

В. П. ВИЗГИН

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ
ТЕОРИЯ
ТЯГОТЕНИЯ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ИНСТИТУТ ИСТОРИИ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ И ТЕХНИКИ

В.П.ВИЗГИН

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ТЕОРИЯ ТЯГОТЕНИЯ

ИСТОКИ И ФОРМИРОВАНИЕ.
1900—1915



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
МОСКВА 1981

Визгин В. П. Релятивистская теория тяготения (истоки и формирование. 1900—1915 гг.). М.: Наука, 1981.

В монографии исследуются предпосылки и формирование основ общей теории относительности, являющейся современной релятивистской теорией тяготения. Особое внимание уделяется анализу кризисной ситуации в области теории гравитации на рубеже XIX и XX вв., обсуждению теорий, конкурирующих с главным направлением развития теории, которое было связано с выдвинутой Эйнштейном релятивистской научно-исследовательской программой, а также изучению механизмов возникновения нового теоретического знания на примере генезиса основ общей теории относительности. Использовал большой фактический материал (включая доступную автору переписку Эйнштейна, мемуарную и биографическую литературу).

Издание представляет интерес для широкого круга физиков, механиков, математиков, философов и всех, кто интересуется проблемами истории современной физики.

Ответственный редактор

доктор физико-математических наук

Л. С. ПОЛАК

ПРЕДИСЛОВИЕ

Переход от физики XIX в. к неклассической квантово-релятивистской физике, происшедший в течение первой четверти XX в., охватил, в сущности, все разделы этой науки. Почти всюду он был двуступенчатым (квантование и релятивизация). И только в области учения о гравитации был, фактически, сделан один шаг: современная теория тяготения, будучи релятивистской, до сих пор остается теорией неквантовой. Правда, релятивизация теории тяготения оказалась значительно более радикальной. Если релятивистские квантовая механика, электродинамика и другие теории не выходят за рамки специальной теории относительности (СТО) и, тем самым, плоского четырехмерного пространства — времени, то релятивистская теория тяготения, при последовательном развитии идеи релятивизма, неизбежно выходит за эти рамки и естественно приводит к искривленному риманову пространству — времени. В результате, современная теория тяготения являет собой кардинальный сдвиг и в учении о пространстве и времени не только по сравнению с классикой, но и по сравнению со СТО. Именно поэтому Эйнштейн, который справедливо считается основоположником этой теории, назвал ее общей теорией относительности (ОТО). Сама релятивизация здесь, по существу, двуступенчата: локально теория лоренц-ковариантна, а в целом — общековариантна (в бесконечно малом пространство — время псевдоевклидово, как и в СТО, а структура пространства — времени в целом — риманова).

Уникальность ОТО заключается еще и в том, что в ней впервые находит воплощение идея геометризации физического взаимодействия: физические величины, характеризующие гравитацию (потенциалы, напряженности и др.), совпадают с чисто пространственно-временными характеристиками (метрика, связность и др.).

Геометрическая природа тяготения естественным образом объясняет универсальность гравитационного взаимодействия. Риманова структура пространства — времени (и тяготения) приводит к равноценности всевозможных систем координат, что и

позволяет оправдать до некоторой степени название теории. Отсутствие не только привилегированной системы отсчета (что имело место уже в СТО), но и выделенного класса таких систем (например, инерциальных) — характерная черта ОТО. Уравнения гравитационного поля, выражающие одновременно динамическую структуру пространства—времени, образуют сложную нелинейную систему, что приводит в не слишком простых задачах к серьезным математическим трудностям.

Таким образом, несквантовость ОТО в известной мере «компенсируется» ее геометризацией (римановой структурой, общей ковариантностью, отождествлением потенциалов с метрикой и т. д.) и целенаправленностью. Многочисленные попытки построения квантовой общерелятивистской теории тяготения пока не привели к успеху, хотя в последнее время в этой области некоторый прогресс был достигнут. Программа квантования ОТО, если удастся ее осуществить, будет, в сущности, уже третьей ступенью в квантово-релятивистской революции, и она может привести к решающему прогрессу фундаментальной физики в целом.

Построение основ ОТО, включая ядро этой теории — общековариантные уравнения гравитационного поля (уравнения Эйнштейна), было завершено к концу 1915 г. В течение последующих нескольких лет были найдены основные точные решения (прежде всего, решение Шварцшильда), заложен фундамент теории гравитационных волн, в значительной мере разъяснен вопрос об энергии гравитационного поля, созданы основы релятивистской космологии.

Наконец, в 1919 г. ОТО получила еще одно блестящее экспериментальное подтверждение (первым можно считать успешное объяснение аномального смещения перигелия орбиты Меркурия) — было подтверждено предсказанное теорией отклонение световых лучей в поле Солнца.

В дальнейшем развитие ОТО и гравитационной физики в целом протекало значительно менее интенсивно, чем квантовой теории, имеющей обширнейшие приложения как в физике атомно-молекулярных систем, так и в физике элементарных частиц. Наиболее впечатляющими были успехи ОТО в космологии в 1920—1930-х годах (Эйнштейн, В. де Ситтер, А. А. Фридман, Э. Хаббл и др.).

Принципиальный результат — вывод уравнений движения из уравнений поля — был получен в конце 1930-х годов (Эйнштейн, Л. Инфельд и Б. Гоффман, а также В. А. Фок).

За последние 15—20 лет в астрофизике и космологии был сделан ряд замечательных открытий, позволяющих говорить о свособразной научной революции в этих областях (квазары, пульсары и нейтронные звезды, реликтовое излучение, гравитационно-волновые эксперименты, «черные дыры» и т. д.). При этом оказалось, что некоторые из этих явлений уже предсказывались ОТО, а другие получили на ее основе удовлетворительное объяснение или, по крайней мере, перспективу такого объяснения.

Все это вновь привлекло всеобщее внимание к ОТО, ее основаниям и экспериментальной проверке, ее трудностям, а также к некоторым альтернативным релятивистским теориям тяготения и вопросу о сравнении их с ОТО.

В этих условиях возрос интерес также к методологии и истории ОТО. Возобновление интереса к истории ОТО совпало по времени с заметным подъемом в области истории науки в целом, который выразился и в резком росте числа профессиональных историков науки, и в стремлении к более документированному и глубокому анализу развития науки. Характерными чертами истории науки 70-х годов являются: «документированность», стремление учесть социальные и социально-психологические аспекты, установить их связь с содержательными аспектами и внутренней логикой развития науки, стремление к выявлению логических и прочих механизмов возникновения нового научного знания, осознание важности методологии историко-научного исследования. На XIII Международном конгрессе по истории науки, проходившем в Москве (1971), видный американский историк физики Дж. Холтон сказал: «Нет сомнения в том, что история науки и техники как отдельная дисциплина находится на подъеме... Существует широко распространенное мнение, что мы, возможно, вступаем в наше золотое десятилетие» [217, с. 1].

В настоящей работе сделана попытка дать картину формирования ОТО, этого грандиозного и прекрасного творения научной мысли, неразрывно связанного с именем Альберта Эйнштейна. При решении этой задачи автор стремился учесть основные достижения истории теории относительности, доступные ему документы, касающиеся обсуждаемой проблемы, а также отмеченные выше современные тенденции истории науки. Эту работу следует рассматривать лишь как один из первых шагов на пути к созданию реалистической истории ОТО.

Автор благодарен И. С. Алексееву, А. Н. Вяльцеву, Г. Е. Горелику, Г. М. Идлису, В. С. Кирсанову, И. Ю. Кобзареву, Л. С. Полаку, Я. А. Смородинскому за стимулирующее обсуждение работы и полезные замечания, а также И. Илли из Будапешта и Л. Р. Пайнсону из Монреаля, которые помогли познакомиться с некоторыми труднодоступными материалами, в частности с их собственными работами (в том числе с еще не опубликованными).

Частично материал книги опубликован в статьях 1975—1980 гг. — в «Эйнштейновском сборнике», «Историко-математических исследованиях», «Вопросах истории естествознания и техники», «Природе», «Вопросах философии», «Успехах физических наук» (совместно с Я. А. Смородинским) и других изданиях. Работы иностранных ученых цитируются в случае отсутствия переводов в переводе автора.

Какой-нибудь поздний историк
Напишет винушительный труд.
Вот только замучит, проклятый,
Ни в чем не повинных ребят
Годами рожденья и смерти
И ворохом скверных цитат.

А. Блок. «Друзьям» (1908)

Обзор современной историко-научной литературы по ОТО. За последние несколько лет появился ряд глубоких исследований различных сторон генезиса и последующего развития ОТО. Назовем, с одной стороны, физиков — Э. Гута, К. Ланцоша, Б. Гоффмана, М.-А. Тоннела, Г.-Ю. Тредера, М. Штрауса, А. Л. Харвея, Дж. Стэчела, а с другой, — историков науки Дж. Холтона, Ф. Гернека, Дж. Мсхры, Р. Мак Кормака, Л. Р. Пайнсона, С. Голдберга, Дж. Ирмэна и К. Глимора, Дж. Вудворда, П. Илли, С. Л. Джэки.

Рассмотрим кратко наиболее существенные, с нашей точки зрения, работы. Детально и глубоко исследуется процесс формирования ОТО в целом в работах Э. Гута [383], К. Ланцоша [441—443], Б. Гоффмана [403, 404], Дж. Мсхры [458, 459], Л. Р. Пайнсона [503—510], Дж. Ирмэна и К. Глимора [342—344]*. Эти исследователи, всесторонне используя доступный фактический материал (в наибольшей мере это касается последних трех авторов), не ограничиваются перечислительно-хронологической стороной вопроса, а стремятся понять генезис ОТО и в плане раскрытия конструктивной логики построения теории, и в широком контексте различных взаимосвязей научно-коммуникативного характера.

В работе Гута [383], содержащей немало ценных наблюдений и выводов, основное внимание уделяется проблеме конкуренции тензорной релятивистской теории со скалярными лоренц-ковариантными теориями (прежде всего, теориями Нордстрема). Спорную позицию занимает Гут в отношении одной из решающих фаз генезиса ОТО — открытия общковариантных уравнений гравитационного поля. В частности, он явно занижает вклад Гильберта, которому вместе с Эйнштейном принадлежит честь открытия окончательной формы уравнений гравитации, лежащих в основе ОТО. Гут обсуждает отношение ОТО и теории Нордстрема к принципу эквивалентности, принципу Маха (в ло-

* В целом верную, хотя и набросанную слишком крупными мазками, картину формирования ОТО содержат последние работы Дж. Стэчела [535, 536]. См. также его содержательную работу об эйнштейновском мысленном эксперименте с абсолютно твердым вращающимся диском [537].

кальной и глобальной формулировках), проблеме выводимости уравнений движения из уравнений поля.

К. Ланцош, работавший в области теории гравитации с начала 20-х годов (в 1928—1929 гг. совместно с Эйнштейном), в недавних работах рассмотрел некоторые вопросы разработки ОТО [441—443]. Наибольший интерес представляет проведенный им анализ обстоятельств, связанных с отказом Эйнштейна от требования общей ковариантности по отношению к полевым уравнениям, а также некоторые замечания, относящиеся к другим стадиям формирования ОТО (прежде всего, к периоду возврата Эйнштейна на путь общей ковариантности). Ланцош всюду настойчиво подчеркивает глубоко физический характер теоретического мышления Эйнштейна даже тогда, когда математические аспекты, как будто, выдвигались на первый план. Весьма полезен «конспект» почти всех существенных научных публикаций Эйнштейна с 1905 по 1915 г. («эйнштейновская декада»), мастерски составленный Ланцошем и образующий вторую часть его книги [443].

Другой сотрудник Эйнштейна Б. Гоффман (написавший совместно с Э. Дюкас одну из лучших биографических книг об Эйнштейне [404]), в статье «Эйнштейн и тензоры» [403], опираясь, в основном, на анализ его работ по статическим теориям тяготения и фундаментальной статьи Эйнштейна и М. Гроссмана 1913 г., пытается реконструировать становление тензорной концепции тяготения. Он, однако, не учитывает роли конкурирующих скалярных теорий Абрагама и Нордстрема, дискуссий Эйнштейна с авторами этих теорий, некоторых важных контактов Эйнштейна с пражскими учеными и влияния маховского анализа основ классической механики.

Обстоятельной является работа Дж. Мехры [458, 459]. Побужденный вопросом Вигнера о вкладе Гильберта в генезис ОТО, Мехра рассмотрел историю формирования ОТО от первой формулировки Эйнштейном принципа эквивалентности (1907 г.) до начала 20-х гг., когда на первый план была выдвинута проблема единой геометризованной теории поля. Он тщательно обсуждает проблему «Эйнштейн — Гильберт», критикует позицию Гута и приходит к выводу об одновременном и независимом открытии уравнений гравитации Эйнштейном и Гильбертом. Мехра не ограничивается изучением проблемы «Эйнштейн — Гильберт» и затрагивает другие важные стороны истории создания ОТО: роль теорий Абрагама и Нордстрема, а также статических теорий Эйнштейна в этой истории (впрочем, периоду 1911—1912 гг. Мехра уделяет всего несколько страниц); сотрудничество Эйнштейна и Гроссмана, которое привело к созданию «Проекта обобщенной теории относительности и теории тяготения»; завершение основ ОТО, связанное с возвратом Эйнштейна к идее общей ковариантности уравнений гравитационного поля. К сожалению многие существенные вопросы, касающиеся временного неприятия Эйнштейном общековариантного подхода к уравнениям поля и по-

следующего возврата «на путь истинный», оказались за пределами внимания автора этого исследования.

Глубокий анализ концепций общей ковариантности и ее значения в генизисе ОТО дан в неопубликованной работе Дж. Ирмэна [342] *. Он обсуждает сложность и противоречивость эйнштейновского понимания этой концепции, явившейся источником и замечательных успехов и глубоких заблуждений на пути к ОТО. Основное внимание Ирмэн уделяет проблеме общековариантных уравнений гравитационного поля в период с 1913 по 1915 гг. Используя современное состояние проблемы ковариантности в ОТО, он анализирует соответствующие рассуждения Эйнштейна и Гроссмана, но почти не привлекает непосредственно относящиеся сюда дискуссии Эйнштейна с Ми, Абрагамом и другими учеными. Не рассматривается и путь Гильберта к общековариантным уравнениям гравитационного поля.

Представляется очень перспективным подход к истории ОТО, который разрабатывает Пайнсон. Этот подход основан на понятии «научная дисциплина» и на представлении о том, что она действует как фундаментальный фактор, детерминирующий развитие научной теории. (Одним из лидеров этого направления в зарубежной истории науки является редактор весьма авторитетного историко-научного издания «Historical Studies in the Physical Sciences» Р. Мак Кормак [457].) Пайнсон сосредоточивает внимание на двух институционально оформившихся в начале XX в. направлениях: «теоретической физике», наиболее ярко выраженной, по его мнению, в Лейдене (Лоренц, Эренфест и др.) и Вене (Больцман, Хазенорль и др.), и «математической физике», оплотом которой оказался Геттинген (Клейн, Гильберт, Минковский и др.). «Теоретики» на первый план всегда выдвигали физические аспекты теории (экспериментальное обоснование исходных положений, предсказание экспериментально проверяемых эффектов, вопросы физической интерпретации и т. д.). «Математики» же придавали особое значение анализу математических структур физических теорий, проблемам аксиоматизации, проблеме синтеза физического знания на основе математизации и т. д. Формирование и последующее восприятие ОТО было тесно связано с этими двумя традициями. Самого Эйнштейна в большей мере можно отнести к «теоретикам», и Пайнсон тща-

* Совсем недавно появились две статьи Дж. Ирмэна и К. Глимора, являющиеся серьезным вкладом в разработку истории ОТО. В одной из них [344], представляющей собой развитие неопубликованной статьи Ирмэна [342], обсуждаются «блуждания» Эйнштейна на пути к общековариантным уравнениям гравитации (ср. с работами [26, 28, 31, 35]). В другой статье [343] на основе найденной авторами переписки между Эйнштейном и Гильбертом в ноябре 1915 г., проливающей дополнительный свет на историю открытия уравнений гравитационного поля, рассматривается финальная стадия создания ОТО, связанная с этим открытием. Эти статьи стали известны нам уже после сдачи рукописи книги в издательство. Поскольку статья [343] представляется нам чрезвычайно важной, мы сочли необходимым кратко пересказать ее в Приложении.

тельно анализирует различные каналы, которые связывали его с этим направлением. В частности, он исследовал восприятие ОТО в Геттингене, особенности вклада геттингенских «математиков» в разработку релятивистской теории тяготения, а также раннее сотрудничество Эйнштейна с Лаубом, Ритцем и Фрейндлихом (1907—1912 гг.), обеспечивавшее контакт Эйнштейна с «теоретиками» и немецким научным сообществом физиков. Подчеркнем, что диссертация Пайнсона «Восприятие общей теории относительности Эйнштейна в Геттингене» вообще содержит большой материал, относящийся к генезису релятивистской теории тяготения в конце XIX — начале XX в. [503—510].

Многие вопросы, главным образом относящиеся к концептуальному развитию ОТО, остаются недостаточно разработанными и у Пайнсона, который делает упор на «научно-дисциплинарных» аспектах формирования ОТО.

Весьма нстривальной историко-научной информацией насыщены работы немецкого гравитациониста Г.-Ю. Тредера. Он рассматривал дискуссии Эйнштейна с Абрагамом, Коттлером, Кречманом, Ленардом и Райхенбахером, в основном по проблемам обобщения принципа относительности и соотношения принципов эквивалентности, общей ковариантности, Маха. Им обсуждалась также теория Нордстрема в контексте современных скалярно-тензорных теорий типа Иордана — Дикке, концепция относительности инерции и ее предвосхищение в электродинамике и механике Вебера и Римана, различные аспекты предвосхищения эйнштейновского эффекта отклонения света в гравитационном поле (Эпикур, Лукреций, Ньютон, Эйлер, Зольднер, Лаплас, Р. Майер и др.), некоторые вопросы истории космологии [200—202, 553—556]*. Различные вопросы истории и предыстории ОТО, в частности философские и методологические, обсуждаются в книге М.-А. Тоннеда [550].

Наряду с перечисленными работами, для нас имели существенное значение исследования, относящиеся к отдельным этапам формирования ОТО. По истории проблемы гравитации накануне открытия теории относительности отметим (из недавних) работы Дж. Вудворда [584]**, Н. И. Кагальниковой [81], Дж. Норса [494]; по электромагнитным и релятивистским теориям тяготения до 1911 г. — работы Х. М. Шварца [521, 522], Р. Мак Кормака [455, 456], А. Л. Харвея [384], Э. Захара [586]. Взаимоотношениям Эйнштейна и Маха, маховской критике оснований механики и роли его методологических установок посвящены исследования Ф. Гернека [390—393], Дж. Холтона [405—407], И. Илли [411—413], Г. Хевля [214, 408], Э. Броды [326, 327],

* Уже после завершения работы над рукописью нам стала известна очень интересная и информативная статья С. Л. Джэки о предвосхищении Зольднером эйнштейновского эффекта отклонения света в гравитационном поле [417]. К ней приложен также перевод статьи Зольднера на английский язык.

** Автор благодарен Дж. Вудворду за предоставленную возможность ознакомиться с этой его работой.

К. Х. Делокарова [55]. Весьма полезными были также ставшие уже классическими труды по теории относительности и гравитации Г. Вейля (1-е изд. 1918 г.) [563, 564], В. Паули [155], А. Эддингтона [225, 226], М.-А. Тоннела [198], Ж. Шази [331—332], М. Лауэ [448], в которых содержится ценный исторический материал. Особенно важными в этом отношении оказались книги Паули и Шази. Из более современных монографий по ОТО, включающих историко-научные разделы, назовем книги А. Арзелье [4], А. Ф. Богородского [7], С. Вейнберга [20], М.-А. Тоннела [198], Ч. Мизнера, К. Торна, Дж. П. Уилера [140—142].

Из историко-научной и методологической литературы, ставшей до некоторой степени также классической, отметим труды Э. Кассирера [82], Э. Мейерсона [462], Л. И. Мандельштама [134], Э. Т. Уиттекера [573], Р. Дюга [339], работы М. Джеммера [56, 418, 419].

Наиболее известными научными биографиями Эйнштейна, содержащими ценный материал для изучения формирования ОТО, являются книги К. Зелига и Ф. Франка, а из более современных Б. Гоффмана и Э. Дюкас и Р. В. Кларка [62, 333, 361, 404].

Советские историки науки и физики внесли существенный вклад в разработку истории теории относительности. Прежде всего, здесь следует выделить четырехтомное собрание научных трудов Эйнштейна (наиболее полное из существующих), вышедшее в серии «Классики науки» под редакцией И. Е. Тамма, Я. А. Смородинского и Б. Г. Кузнецова [227—230]. Еще в 1935 г. под редакцией В. К. Фредерикса и Д. Д. Иваненко был издан сборник «Принцип относительности», содержащий переводы некоторых основных работ Лоренца, Пуанкаре, Минковского и Эйнштейна по СТО и Эйнштейна — по ОТО [168]*. Составленный редакторами краткий комментарий, относящийся к ОТО, представляет несомненную историко-научную ценность. Правда, сборник не включал в себя фундаментальную работу Эйнштейна и Гроссмана [250], четыре классических ноябрьских 1915 года статьи Эйнштейна, в которых было завершено создание ОТО [263—266], а также некоторые другие работы, ставшие вехами на пути к ОТО.

С 1966 г. у нас издается «Эйнштейновский сборник» сначала под редакцией И. Е. Тамма и Г. И. Наана (первый выпуск — под редакцией Тамма и Б. Г. Кузнецова), а после смерти Тамма — под редакцией В. Л. Гинзбурга [30, 47—49, 156, 157, 214, 215]. За эти годы было издано девять сборников. В них опубликованы, например, переписка Эйнштейна с Борном и Бессо, некоторые письма Эйнштейна к Соловину и Адамару, воспоминания об Эйнштейне (Б. Кoen, Р. С. Шенкланд), переводы ряда содержательных историко-научных работ, посвященных истории теории относительности и творчеству Эйнштейна вообще (Дж. Холтон,

* В немецком издании отсутствовала работа Пуанкаре.

М. Клейн, Г. Хенль, С. Гольдберг, А. Арзелье, М. Г. Адам, Р. Дике, М.-А. Тоннела и др.), историко-научные работы советских физиков и историков физики (Я. Б. Зельдович и И. Д. Новиков, В. Л. Гинзбург, В. И. Родичев, Н. П. Коноплева и Г. А. Соколик, А. Г. Баранов, Б. Г. Кузнецов, У. И. Франкфурт и А. М. Френк, В. Я. Френкель, Г. И. Наан и др.) *. Отметим также работы советских историков науки, в которых рассматривались различные аспекты истории ОТО и смежные вопросы: ряд монографий и статей Б. Г. Кузнецова, в частности, научно-биографическую книгу об Эйнштейне [97—100], статьи Д. Д. Иваненко [71—74], монографию У. И. Франкфурта, содержащую обширную библиографию [207]**.

Точка зрения «популярной истории науки». Несмотря на весьма большую литературу, так или иначе связанную с историей формирования ОТО, немало важных проблем этой истории еще ждет своего разрешения. За последние несколько лет появился ряд содержательных историко-научных исследований, показавших, насколько трудные задачи встают перед историками науки, если они всерьез хотят понять героический период истории современной физики, связанный с возникновением теории относительности и квантовой механики. В случае с ОТО положение осложняется тем, что эта теория во многих отношениях кажется аномальной (исключительная математическая сложность, очень слабая связь с экспериментом, отсутствие однозначной физической интерпретации некоторых основных понятий и положений, кардинальное отличие концептуальной структуры ОТО от соответствующих структур всех остальных теорий и т. д.). И эта аномальность в значительной мере переносится и на процесс ее формирования. Изучение этого процесса, по нашему мнению, находится еще только в самом начале. Но наряду с документированной аналитической историей науки существует «популярная история науки» [218, с. 117], которая состоит из эссе, воспоминаний, юбилейных статей, научно-популярных работ, написанных зачастую выдающимися учеными; в случае ОТО — свидетелями тех лет, когда закладывались основы этой теории, иногда друзьями и сотрудниками Эйнштейна. Именно с точки зрения «популярной истории науки», создание ОТО — историко-научный фе-

* Краткий обзор содержания всех девяти выпусков «Эйнштейновского сборника» содержится в рецензии Б. М. Болотовского [8].

** В 1979—1980 гг. в связи со столетием со дня рождения Эйнштейна появилась обширная историко-научная, методологическая и прочая литература (в частности юбилейные статьи и доклады крупных физиков о творчестве великого ученого) [51, 63, 64, 74, 86, 87, 194, 212, 326, 327, 329, 401, 408, 422, 460, 461 и др.]. Специального упоминания заслуживают двухтомное издание «Альберт Эйнштейн в Берлине, 1913—1933» под ред. Г.-Ю. Тредера [319, 320], содержащее, в частности, важные документы, относящиеся к конечной стадии создания ОТО; сборник классических работ по ОТО, ее истокам и ее современному развитию: «Альберт Эйнштейн и теория гравитации», выпущенный издательством «Мир» [3], сборник «Эйнштейн и философские проблемы XX века» [300].

номен совершенно иного порядка по сравнению с возникновением других физических теорий, и экстраординарность этого явления заключается в следующем.

Во-первых, ОТО — теория явно пресдсвременная. Она возникла неожиданно, реальных предпосылок для ее возникновения не было. Объективная внутренняя логика развития физических идей в конце ХХ в. не подводила вплотную к этой теории. Таким образом, кризисной ситуации накануне ОТО не было. Естественно, это нашло отражение и в том, что проблема гравитации в начале ХХ в. не относилась к числу актуальных. Этой проблемой, по существу, почти никто не занимался.

С этой главной чертой возникновения ОТО связана и вторая особенность его: беспрецедентная изоляция Эйнштейна при построении им этой теории. ОТО — гениальное прозрение Эйнштейна, дитя его творческой интуиции.

В-третьих (это естественно связано с первыми двумя особенностями), ОТО при своем возникновении, фактически, не имела экспериментально-эмпирических стимулов. Эйнштейн при построении теории действовал, скорее, не как физик, а как философ. С другой точки зрения — он действовал как математик. В этой «нсфизичности» (или «надфизичности») состоит четвертая характерная черта обсуждаемого историко-научного события.

Приведем в подтверждение сказанного ряд высказываний многих выдающихся физиков.

Р. Оппенгеймер: «Что же касается ОТО, до сих пор еще окончательно не проверенной, никто, кроме него [Эйнштейна] не изобрел бы ее еще очень, очень долго. Действительно, лишь за последние десятилетия (слова эти были сказаны в 1962 г. — *В. В.*) стало видно, как какой-либо физик или группа рядовых физиков могла бы с огромным трудом построить эту теорию и постичь это своеобразное объединение геометрии и гравитации» [148, с. 265].

И. Инфельд: «Иначе обстояло дело с ОТО. Эйнштейн был единственным человеком, который все еще видел трудности и работал над их устранением. ОТО была как бы лекарством от серьезной болезни, которую, кроме Эйнштейна, никто не замечал. Даже Планк говорил Эйнштейну: «Все теперь так хорошо объяснено, зачем Вы занимаетесь этими другими проблемами?». Но Эйнштейн совсем один продолжал ими заниматься... В этот период (1906—1911 гг. — *В. В.*) физиков мало интересовала проблема тяготения... Никто не усматривал наличия серьезной проблемы в теории тяготения. Расчеты, опирающиеся на закон тяготения Ньютона, казались астрономам достаточно точными. Я не думаю, что в течение нескольких лет после сформулирования частной теории относительности вышла хоть одна работа, посвященная проблеме тяготения. Эйнштейн посвятил последние десять лет жизни в период, когда уже этой проблемой никто не интересовался» [78, с. 189]. И еще одно высказывание Инфельда: «Эйнштейн считал решение проблемы тяготения величайшим

достижением своей жизни. Он сказал мне как-то: «Частная теория относительности была бы уже создана независимо от меня. Эта проблема назрела. Но я не думаю, что это касается и ОТО». Этим своим высказыванием Эйнштейн подчеркивал то, о чем я упоминал выше, а именно, что интересы физиков были далеки от проблем, которыми занималась и которые решила ОТО» [79, с. 210].

К. Ланцош: «...Эйнштейн осмелился бросить вызов этой процедуре (т. е. способам построения физических теорий, характерным для большинства областей физики XIX и даже XX веков. — В. В.) и вернулся к тому, о чем мечтали в древности: раскрывать тайны природы на основе логического дедуктивного метода, а не описывать ее на основе разумно поставленных экспериментов» [108, с. 18].

А. Зоммерфельд: «Следует обратить внимание на то обстоятельство, что мысль Эйнштейна, отправляясь от некоторых теоретико-познавательных положений, двигаясь без всяких логических пропусков и неопределенностей и ничего не зная в самом начале о движении перигелия Меркурия, совершенно однозначно и без всякого произвола привела к наблюдаемому астрономическому значению 43 сек. в сто лет» [70, с. 81].

М. Лоуз: «Долгая история этого процесса (развития представлений о пространстве и времени. — В. В.) нашла в ОТО свое завершение, не оставляющее ни повода, ни возможности для какого-либо изменения со временем. Заслуга этого, безусловно, принадлежит одному Альберту Эйнштейну» [120, с. 295].

Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц: «Она (ОТО. — В. В.) была создана Эйнштейном (и окончательно сформулирована им в 1916 г.) и является, пожалуй, самой красивой из существующих физических теорий. Замечательно, что она была построена Эйнштейном чисто дедуктивным путем и лишь в дальнейшем была подтверждена астрономическими наблюдениями» [104, с. 291].

М. Борн: «Но ОТО — это заслуга исключительно Эйнштейна (...), сам Эйнштейн был единственным, кто нашел верное математическое орудие в геометрии Римана...» [10, с. 408].

Во всех этих высказываниях, как в перечисленных выше позициях «популярной истории науки», конечно, есть известная доля истины. Действительно, проблема гравитации на рубеже XIX и XX веков не привлекла столь же большого внимания как, скажем, проблемы электронной теории и электродинамики движущихся сред или проблемы строения атома и теории излучения. Большинству, прежде всего, физикам, далеким от небесной механики и астрономии, казалось, что в области учения о гравитации дело обстоит относительно благополучно, особенно по сравнению с учениями об эфире и структуре вещества и излучения. Действительно, огромный вклад в создание ОТО был внесен Эйнштейном. Суммарный вклад всех остальных ученых в это дело, как будто, едва ли соизмерим с эйнштейновским, по крайней мере, в период закладки основ этой теории, т. е. с 1907 по 1915 г. Если

бросить беглый взгляд на основные вехи в возникновении ОТО (принцип эквивалентности, теории статического поля, тензорная теория Эйнштейна — Гроссмана, обобщенные уравнения поля), нетрудно заметить весьма слабую связь этих шагов с экспериментально-эмпирической стороной проблемы. Релятивистская методология и ссылки на Маха создавали иллюзию философской или теоретико-познавательной природы основных аргументов Эйнштейна. С другой стороны, полное, казалось бы, совпадение математического аппарата теории с детально разработанной римановой геометрией (при очень слабой связи с опытом) говорило о явном преобладании математического аспекта теории над собственно физическим.

Нерешенные вопросы генезиса ОТО. И все же более тщательное изучение процесса формирования ОТО вносит существенные коррективы в эти достаточно распространенные оценки и взгляды. Позиция «популярной истории науки» не дает возможности понять возникновение ОТО. Выявление кризиса в развитии проблемы тяготения, некоторых фундаментальных предпосылок как теоретического, так и эмпирического характера, определенной логики в переходе от классической схемы к релятивистской концепции гравитации, осознание особой важности многочисленных контактов Эйнштейна с другими учеными и научными школами, уяснение глубоко физической направленности работы Эйнштейна — таковы некоторые результаты настоящего исследования, противостоящие выводам «популярной истории науки». Они примыкают к той линии историко-научного исследования в области ОТО, которая, как мы отмечали, связана с работами Гута, Мехры, Пайнсона, Ирмэна и Глимора, Илли, Стэчела и др.

Таким образом, в центре нашего внимания находятся следующие вопросы.

1. Вопрос о кризисе в области науки о гравитации.
2. Теоретические и эмпирические предпосылки ОТО.
3. Рассмотрение творческой деятельности Эйнштейна в системе научных коммуникаций и значение последних в генезисе ОТО.
4. Реконструкция формирования основ ОТО, соотношение физического, математического и философско-методологического аспектов.

Вместе с тем, существующая литература, как нам кажется, не дает полного ответа на ряд других, более конкретных и тоже очень важных вопросов генезиса ОТО. В нашей работе мы пытались также внести некоторый вклад в их разрешение. К числу этих вопросов, в частности, относятся следующие, тесно связанные, впрочем, с четырьмя предыдущими.

5. Равенство инертной и гравитационной масс до Эйнштейна и принцип эквивалентности.

6. Значение СТО в формировании ОТО, в частности, лоренц-ковариантных обобщений ньютоновского закона тяготения.

7. Роль конкурирующих подходов к решению гравитационной проблемы, связанных с именами Абрагама, Нордстрема, Ми и некоторых других ученых.

8. Эйнштейновские скалярные теории статического поля, а также теории Абрагама, как подготовительная стадия в переходе к тензорной геометризованной теории Эйнштейна — Гроссмана.

9. Как был найден математический аппарат ОТО? Значение четырехмерной тесорстико-инвариантной концепции Минковского. Роль математиков Г. Пика и М. Гроссмана.

10. Мах и Эйнштейн.

11. Причины отказа Эйнштейна (и Гроссмана) от общековариантного подхода к проблеме уравнений гравитационного поля.

12. Пути Эйнштейна и Гильберта к общековариантным уравнениям гравитационного поля.

13. Оценка вклада в разработку основ ОТО таких исследователей, как Абрагам, Нордстрем, Ми, Фрейндлих, Эренфест, Гроссман, Гильберт, Минковский, Мах и других.

Наконец, на основе изучения всех этих проблем мы пытались ответить на кардинальные для любого историко-научного исследования вопросы о механизмах формирования нового научного знания и о соотношении внутренних и внешних факторов в этом процессе.

ПРОБЛЕМА ГРАВИТАЦИИ НАКАНУНЕ СОЗДАНИЯ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

1. Трудности ньютоновской теории тяготения и попытки их преодоления

...Как ни неудачны и часто видимо бесполезны усилия, сделанные до сих пор в этом направлении, можно думать, что все эти частные гипотезы и теории постепенно подготовят и расчистят почву для создания истинной теории всемирного тяготения.

М. А. Левитская (1910)

Я помню сходы и проходы,
И зал круги и лестниц винт,
Из мира Солнца и свободы
Вступил я, дерзкий, в лабиринт.

В. Брюсов. «Нить Ариадны» (1902)

Замечания методологического характера

ОТО, несмотря на ее весьма специальный характер *, радикально преобразовала ряд фундаментальных понятий и принципов физики вообще. Прежде всего, это касается понятий пространства и времени, относительности, силы, физического поля

* Сам Эйнштейн неоднократно подчеркивал, что ОТО — не более, чем релятивистская теория тяготения. Уже в статье, доложенной 25 ноября 1915 г. и содержащей впервые общековариантные уравнения гравитационного поля, он замечает: «Постулат относительности в его наиболее общей форме... приводит с железной необходимостью к вполне определенной теории тяготения... Вместе с тем общая теория относительности не может нам дать о сущности остальных явлений природы ничего, что не было бы известно в специальной теории относительности» [266, с. 451]. Когда вскоре после завершения Эйнштейном основ ОТО Зоммерфельд выразил надежду, что эта теория может открыть путь к решению квантовой проблемы, Эйнштейн писал ему: «Общая теория относительности здесь вряд ли Вам поможет, потому что для этих проблем она практически совпадает со специальной... Общая теория относительности по сути дела дает закон гравитационного поля... Любая другая теория, удовлетворяющая специальной теории относительности, должна перейти путем преобразования в общую теорию относительности, но последняя не дает никакого нового критерия» [76, с. 194]. Но уже в 1919 г. Эйнштейн, переходя на позиции программы единой геометризованной теории поля, пишет: «Ни ньютонова, ни релятивистская теория тяготения до сих пор не продвинули всерьез вопроса о структуре материи. В противоположность этому ниже будут указаны соображения, позволяющие думать, что элементарные электрические образования, представляющие собой кирпичи атомов, удерживаются вместе благодаря силам тяготения» [281, с. 664]. Таким образом, к началу 20-х годов Эйнштейн меняет оценку значения ОТО, полагая, что она может и должна стать исходным пунктом и в решении проблемы материи, и в построе-

и т. д. Она также явилась значительным шагом вперед в развитии теории относительности. Тем самым, ОТО наряду со СТО и квантовой теорией образует, по общему признанию физиков, основу научной революции в физике первой четверти XX в., которую часто называют квантово-релятивистской.

Термин «научная революция» в настоящее время вышел за рамки методологической схемы Т. Куна и широко используется историками науки, а также и в марксистской методологии истории науки. Революционный характер событий в физике со всей отчетливостью проявился уже в первом десятилетии XX в.: 1892—1902 — электронная теория и электродинамика движущихся тел и связанная с ними электромагнитная концепция физики (Лоренц, Дж. Томсон, Друде, Лармор, Пуанкаре и др.), 1900—1907 — квантовая гипотеза Планка и ее развитие Эйнштейном, 1905—1907 — СТО (Эйнштейн, Пуанкаре, Минковский и др.) и т. д. В. И. Ленин в вышедшем в свет в 1909 г. «Материализм и эмпириокритицизм» большое внимание уделил анализу научной революции в естествознании, прежде всего в физике. Он неоднократно и в этой, и в других работах подчеркивал революционный характер преобразований, происходящих в физике начале XX в.: «...естествознание прогрессирует так быстро, переживает период такой глубокой революционной ломки во всех областях, что без философских выводов естествознанию не обойтись ни в коем случае» [123, т. 45, с. 31].

Проблема гравитации на рубеже XIX и XX вв., как будто, не относилась к числу центральных. Если в электроной, атомной и квантовой физике экспериментальный материал, не согласующийся или плохо согласующийся с классическими (включая теорию электромагнитного поля) представлениями, был достаточно обширен, то в области учения о тяготении имелись лишь единичные и очень незначительные эмпирические трудности. Это обстоятельство, очевидно, породило достаточно распространенную точку зрения, весьма популярную и сейчас, что ОТО не была подготовлена предшествующим развитием гравитационной проблемы. Таким образом, имеется устойчивая традиция рассматривать открытие ОТО как своеобразную историко-научную аномалию, выходящую тем самым за рамки понятия «научной революции», которая возникает в результате кризиса предшествующей теории или, более широко, парадигмы (в методологии Куна [101]), или наступления дегенерирующей стадии в развитии научно-исследовательской программы (в методологии И. Лакатоса [103, 439, 440]) и т. д. Иначе говоря, радикальное преобразование физики (или значительной ее части), которое можно назвать «научной революцией», не может возникнуть немотивированно, на «пустом месте», без предпосылок. Наиболее деталь-

ни единой полевой теории. Последующее развитие квантовой теории, как мы знаем, не оправдало этого прогноза Эйнштейна. Оценка ОТО, данная им в 1915—1916 гг., как собственно теории тяготения оказалась более реалистичной.

по эту предреволюционную ситуацию в общих чертах исследовал Кун, который назвал ее кризисом. Независимо от других пунктов методологии Куна, понятие кризиса (или некоторый его аналог) оказывается центральным при анализе радикальных преобразований научного знания. Это понятие широко используется и в марксистской методологии: «Развитие науки сопровождается «переломами», кризисами, сменами «понятийной сетки», радикальными изменениями «видения мира» [185, с. 194]. И далее: «Кризис в науке... возникает не тогда, когда перестает работать очередная научная теория и возникает потребность в создании новой, а тогда, когда на основе сложившегося строя мышления (парадигмы) нельзя построить новую теорию, когда ее создание необходимо связано с перестройкой логического строя науки, когда эта новая теория представляет исходный пункт развития нового категориального строя науки» [185, с. 208]. Такое понимание кризиса в науке, пожалуй, ближе к лакатосовской методологии научно-исследовательских программ. Если использовать терминологию Куна, то можно сказать, что исходным пунктом научного кризиса является неспособность существующей парадигмы «справиться с возникающими в развитии нормальной науки техническими задачами по решению головоломок» [101, с. 97]. Отсылая за разъяснениями этих понятий к самому Куну или соответствующей марксистской литературе, заметим только, что под головоломками понимаются задачи, корректно формулируемые на основе уже существующей теории. Если обратиться к ньютоновской теории тяготения и связанной с ней небесной механике XIX в., то к числу головоломок следует отнести, например, задачи о движении планет (в частности вопрос об аномальном смещении перигелия Меркурия), Луны, комет и других небесных тел, гравитационный парадокс и т. д. Когда многократные попытки решения некоторых головоломок не удаются, можно говорить об аномалиях. Наиболее характерными аномалиями классической теории тяготения к концу XIX в., как мы увидим, оказались аномальное смещение перигелия Меркурия и гравитационный парадокс.

Важным симптомом развивающегося кризиса является возникновение большого количества различных модификаций общепринятой теории или в рамках существующей парадигмы или даже посредством некоторых видоизменений этой парадигмы*. Эти модификации призваны устранить аномалии. Они подвергаются критике с позиций общепринятой теории, парадигмы и выработанных в ее рамках различных методологических критериев, а также на основе их сопоставления с экспериментально-эмпирическим материалом. Этот процесс конкуренции модифицирован-

* Куновский термин «парадигма», лакатосовский термин «научно-исследовательская программа», часто используемые в марксистской литературе выражения: «стиль научного мышления», «физическая картина мира» или «картина природы» и др. — в первом приближении можно считать равносильными.

ных теорий с основной теорией, лежащей в основе парадигмы (или научно-исследовательской программы), детально исследуется в методологии научно-исследовательских программ.

Другой типичный признак кризисной ситуации — это усиление сомнений в самой парадигме («Любой кризис начинается с сомнения в парадигме и последующего расшатывания правил нормального исследования» [101, с. 114]). Эти сомнения резко повышают интерес ученых к анализу оснований и теорий, и парадигмы в целом, а это, в свою очередь, ведет к явному включению философских и методологических вопросов в тематику научных исследований («...В периоды осознания кризисов... ученые обращаются к философскому анализу для раскрытия загадок в их области» [101, с. 119]).

Любопытной особенностью кризиса и его последующего разрешения является частичное предвосхищение этого разрешения в то время, когда кризисной ситуации еще не было, «но при отсутствии кризиса эти предвосхищения игнорировались» [101, с. 104]. Во время кризиса появляется интерес к преждевременной критике парадигмы, критике, ранее игнорируемой. Характерно появление «историко-критических» работ.

Увеличение конкурирующих вариантов, готовность опробовать что-либо еще, выражение явного недовольства, обращение за помощью к философии и обсуждение фундаментальных положений — все это симптомы перехода от нормального исследования к экстраординарному», — так резюмирует обсуждение симптомов кризиса Кун [101, с. 122]. В. И. Ленин в «Материализме и эмпириокритицизме» приводит высказывание А. Рея, описывающего ситуацию кризиса в физике: «Крайние разногласия сменили прежнее единодушие, и притом разногласия не в деталях, а в основных и руководящих идеях. Если бы было преувеличением сказать, что у каждого ученого свои особые тенденции, то все же необходимо констатировать, что, подобно искусству, наука, в особенности физика, имеет многочисленные школы, выводы которых зачастую расходятся, а иногда прямо враждебны один другому...» [123, т. 18, с. 268—269]. Умножение теорий, борьба между ними, появление конкурирующей программы (парадигмы) или некоторых ее прообразов, обострение философских и методологических дискуссий — все эти кризисные явления находят определенное выражение и на институционально-социологическом уровне (конкуренция различных научных сообществ и школ и т. д.).

Хотя ОТО являет собой радикальное преобразование классической теории тяготения и потому — всю историю гравитационной проблемы, она была бы невысказима без СТО. В известном смысле, ОТО — также дальнейший шаг в развитии релятивистской концепции и физического учения о пространстве и времени. Создание же СТО явилось ответом на глубокие аномалии, возникшие прежде всего в электродинамике (в связи с электродинамикой движущихся сред, электронной теорией, проблемой эфи-

ра). Но, вместе с тем, СТО открыла новые возможности для разрешения затянувшегося кризиса классико-механической программы (парадигмы), которая в конце XIX в. продолжала оставаться определяющей. При этом кризис этой программы оказал существенное влияние и на формирование СТО, и на формирование ОТО — не только через посредство СТО, но и непосредственно. К тому же к началу века оформляется, как альтернативная к классико-механической, электромагнитно-полевая программа. успешно развивающаяся в течение десятилетия, которое предшествовало открытию СТО. Вскоре после этого быстро оформляется релятивистская (или релятивистско-полевая) программа.

Каким же оказалось при этом положение в области учения о гравитации? Ньютоновская (классическая) теория тяготения, весьма прочными узами сплетенная с классико-механической программой, была отягощена некоторыми досадными (но не катастрофическими!) эмпирическими и очень серьезными, в значительной мере связанными с кризисом классико-механической программы в целом, логико-теоретическими трудностями. Классическая теория тяготения выступает сначала на фоне растущего кризиса классико-механической программы, сопровождающего бурным прогрессом в электродинамике и теории теплоты (термодинамике, кинетической теории газов, статистической механике). Затем — на фоне начавшейся конкуренции между классико-механической и электромагнитно-полевой программами. Наконец, в 1905 г. после открытия СТО на арену вступает третья фундаментальная программа — релятивистская, которая с самого начала пытается дать свое решение гравитационной проблемы. Мы видим, что реальный процесс движения научной мысли в случае с гравитацией и ОТО оказывается намного сложнее и запутанней, чем общая схема научной революции по Куну или более тонкая схема методологии Лакатоса. Все дело в том, что развитие физики и даже точного естествознания в целом — процесс до некоторой степени единый. Можно выстроить в одну хронологическую цепь события в области гравитационной физики, но понять превращения научной мысли в этой области, рассматривая ее изолированно, невозможно.

Классико-механическая программа

Несмотря на антимеханистические тенденции развития физики во второй половине XIX в. (синтез физики на основе закона сохранения энергии, генезис электромагнитно-полевой физики, термодинамика, статистическая механика и т. д.), классико-механическая программа оставалась еще общепризнанной. Но ведущие физики уже начали сомневаться и «раскачка» ее началась. Ньютоновская теория тяготения, наряду с ньютоновскими законами динамики и соответствующими им пространственно-временными представлениями, была составной частью этой программы и даже, пожалуй, ее «ядра» (по терминологии Лакатоса).

Центральные, зависящие только от расстояний между взаимодействующими телами и потому дальнедействующие силы (с характерной обратно пропорциональной зависимостью от квадрата расстояния), составлявшие одну из основ ньютоновской теории гравитации, рассматривались, фактически, как важнейший элемент классико-механической программы. С другой стороны, небесная механика, составлявшая в XVIII—XIX вв. теоретический фундамент астрономии, опиралась не только на теорию тяготения, но, конечно, и на классико-механическую программу в целом. Эксперименты, большей частью астрономические наблюдения за движением небесных тел в Солнечной системе, подтверждали как ньютоновский закон всемирного тяготения, так и законы классической механики, и только в редких случаях, могли породить сомнения в них. Связь между теорией тяготения и основами механики была взаимной и более глубокой, чем это может показаться на первый взгляд. Фундаментальные понятия и принципы классической механики — пространства и времени, массы, силы, материальной точки и др. — во многих отношениях определялись ньютоновскими представлениями о тяготении. Так, ньютоновская форма закона тяготения хорошо согласовывалась с евклидовостью пространства, а дальнедействующий характер этого закона до некоторой степени позволял физически оправдать абсолютность пространства и времени. Масса в классико-механической программе рассматривалась и как мера инертности тела, и как мера гравитации, и это согласовывалось с представлением о ней как о мере количества вещества. Свойства сил, действующих в механике, во многом были заимствованы из представления о ньютоновских силах тяготения. Расшатывание основ классико-механической программы, начавшееся с открытия закона сохранения энергии, выдвижения концепции поля и близкодействия, 2-го начала термодинамики, формирования вероятностных представлений в атомистике, к концу века перерастает в глубокий кризис этой программы. И это признавалось и признается как ведущими учеными конца XIX — начала XX в., так и современными историками и методологами науки.

Л. Больцман: «Благодаря этому именно наука о явлениях движения, т. е. механика, стала основой для прочих физических дисциплин, которые постепенно все больше и больше, казалось бы, превращались в специальные отделы механики. Лишь в последнее время против этого наступила реакция. Трудности, с которыми столкнулось чисто механическое объяснение магнетизма и электричества, породили сомнения в том, возможно ли все объяснить механически, и как раз в это время электромагнетизм приобрел все большее значение... В конце концов его мощь настолько возросла, что он от обороны перешел к наступлению и пытался объяснить механику, применяя теории электромагнетизма» [9, с. 159].

М. Планк: «... Я думаю, что не встречу серьезных возражений со стороны физиков, если скажу, подводя итоги, что допущение о

точном соответствии с действительностью простых дифференциальных уравнений Максвелла — Герца несовместимо с возможностью механического истолкования электродинамических явлений в чистом эфире» [161, с. 640].

А. Пуанкаре: «... Наступил день, когда концепция центральных сил оказалась недостаточной, и это первый из тех кризисов, о которых я вам только что говорил» [179, с. 561].

А. Эйнштейн: «Первый удар по учению Ньютона о движении как программе для всей теоретической физики нанесла максвелловская теория электричества... Согласно концепции Фарадея, наряду с материальной точкой и её движением появилась нового рода физическая реальность, а именно «поле»... Генриху Герцу мы обязаны сознательным очищением понятия поля от всего побочного, внесенного механическими представлениями, а Г. А. Лоренцу — отделением понятия поля от его материального носителя... Когда эта эволюция завершилась, никто уже не верил в непосредственное мгновенное действие на расстоянии даже в области тяготения, хотя из-за отсутствия достаточного количества фактов теория поля тяготения не была еще однозначно разработана. После того как отказались от гипотезы Ньютона о силах дальнего действия, развитие теории электромагнитного поля привело к попыткам объяснения законов движения Ньютона с электромагнитной точки зрения или их замены более точными, основанными на теории поля. Хотя эти попытки не завершились полным успехом, тем не менее основные понятия механики перестали быть фундаментом для физической картины мира» [291, с. 87].

Ф. Франк: «Со времени рождения новой науки (около 1600 г.) господствующим мнением среди ученых была вера в «механистическую науку», которая означает веру в то, что физические явления могут быть «поняты» или «объяснены» только в том случае, если эти явления могут быть сведены к ньютоновским законам движения. Очевидно, что электромагнитная теория материи подорвала основание такого сведения. Начиная с Г. Герца было установлено, что необходимо прекратить попытки сведения всех физических явлений к законам механики...» [206, с. 226].

Все эти высказывания подтверждают вывод о возникновении в конце XIX в. серьезного кризиса классико-механической программы [400]. Мы не будем здесь более детально заниматься обсуждением этой проблемы. Мы только попробуем спроектировать кризисные явления классико-механической программы на собственно гравитационную её часть. Только в этом смысле можно говорить о состоянии кризиса и в области гравитации. Если же ограничиться рассмотрением эмпирических трудностей или даже аномалий классической теории тяготения, то они были столь незначительны, что едва ли могли породить кризисную ситуацию. Тем не менее, анализ состояния исследований в области учения о тяготении к началу XX в. дает основание сделать вывод о возникновении определенного кризиса и в этой области.

Краткий очерк истории гравитационной проблемы после Ньютона

Выделим три существенных момента: в рассматриваемой истории: 1) превращение ньютоновской концепции тяготения из гипотезы в теорию и возникновение классико-механической программы; 2) разработка квазиполевого математического формализма ньютоновской теории; 3) «предвосхищения» критики основ классической теории тяготения.

Ньютоновская теория тяготения почти столетие оставалась, фактически, на уровне лишь правдоподобной гипотезы. Было два серьезных препятствия на пути к ее признанию: конкурирующая картезианская программа и некоторые существенные расхождения теории с астрономическими наблюдениями (прежде всего, касающимися движения Сатурна и Юпитера, а также Луны). Naturфилософская система Декарта имела немало выдающихся приверженцев на континенте. К их числу, с известными оговорками можно отнести Лейбница, Гюйгенса, И. Бернулли. Во Франции лидером картезианцев был Фонтенель, длительное время являвшийся секретарем Парижской академии. Спустя почти полвека после выдвижения Ньютоном основ классической механики и теории тяготения Парижская академия предложила премию за решение вопроса о причинах эллиптичности планетных орбит и в 1734 г., демонстрируя свое беспристрастие (преимущества ньютоновской системы к этому времени становились все более очевидными), присудила премию за решение вопроса о причинах наклона планетных орбит двум братьям Бернулли: Иоганну, теория которого была основана на системе вихрей (т. е. была картезианской), и Даниилу, теория которого опиралась на теорию Ньютона*. Вероятно, последний раз аналогичный случай был в 1740 г., когда Парижская академия присудила премию за решение задачи о приливах и отливах и ньютонианцам Д. Бернулли, Л. Эйлеру и Маклорену, и картезианцу Кавальери. «...Система Ньютона,— резюмировал свой рассказ об этом Уэвелл,— не принималась во Франции до тех пор, пока не вымерло совершенно картезианское поколение» [204, с. 264].

Таким образом, ньютоновская система к середине XVIII в. в области астрономии Солнечной системы почти вытеснила картезианскую программу. Это не означало, впрочем, что к этому времени она стала общепризнанной и успешно решила все важные задачи, касающиеся движения небесных тел в Солнечной системе. Скорее, дело обстояло так, что к этому времени вполне оформляется классико-механическая программа (или парадигма), которая вступает в период своего «нормального» развития (по терминологии Куна). Она успешно решает астрономические «головоломки», которые порою грозят перерасти в аномалии. Так обстояло дело с некоторыми задачами о движении Луны, Марса,

* Более подробно см. об этом в работе [204].

Венеры и других планет, которые, в конечном счете, были решены в работах Эйлера, Клеро, Лаланда и других ученых. Наиболее серьезными «головоломками» оказались проблемы всковых неравенств для Сатурна и Юпитера и задача о вековом ускорении среднего движения Луны. Эйлер и Лагранж разработали на основе ньютоновской системы сложную математическую теорию, объясняющую секулярную природу упомянутых выше неравенств, за что были удостоены премии Парижской академии. Лаплас вскоре после этого показал, что эти неравенства не могут быть секулярными, а должны иметь периодический характер. Наконец, в 1787 г. Лаплас окончательно решил проблемы неравенств и для Луны, и для больших планет, учтя роль малых возмущений, которыми раньше пренебрегали [203, 383, 573]. С этого времени небесная механика, основанная на ньютоновской теории тяготения и классико-механической программе в целом, развивалась особенно успешно. Высшим ее достижением было теоретическое открытие Нептуна, сделанное в 1845—1846 гг. учеником Лапласа Леверрье и англичанином Адамсом («открытие на кончике пера») *. С точки зрения методологии научно-исследовательских программ здесь налицо «прогрессирующий сдвиг проблемы» («...Исследовательская программа считается *прогрессирующей* тогда, когда ее теоретический рост предвосхищает ее эмпирический рост, т. е. когда она с некоторым успехом может предсказывать новые факты...» [103, с. 219]**. Ср. с высказыванием Уэвслиа, приведенным в примечании.).

В 1798 г. Г. Кавендиш выполняет свой замечательно точный эксперимент, доказавший прямым путем (с помощью крутильных весов измерялась сила притяжения двух девятидюймовых свинцовых шаров) справедливость ньютоновского закона тяготения для небольших тел в земных условиях. В 1799—1800 гг. выходят в свет первые два тома «Небесной механики» Лапласа, в которых явно провозглашаются претензии механики и теории тяготения теоретически охватить всю природу (а не только небес-

* Дж Гершель на собрании Британского общества в Саутгемптоне в сентябре 1816 г. сказал по этому поводу: «Мы видим ее (предполагаемую новую планету), как Колумб видел Америку с берегов Испании. Мы увидели ее движение в то время, когда она проходила по линии нашего анализа, и увидели с несомненностью, не меньшею той, какую дает нам наблюдение посредством зрения» (цит. по: [203, с. 396]). Уэвсли вскоре после этого в 3-м издании «Истории индуктивных наук» писал: «Таким образом теория тяготения предсказала и сделала открытие. Предсказать теоретически неизвестные факты, которые потом подтверждаются наблюдением, это... такое подтверждение теории, которое по своей важности и поразительности далеко оставляет за собой всякое объяснение теорией уже известных фактов. Таких подтверждений было весьма немного в истории науки и они случались только с самыми полными и разработанными теориями, каковы, например, теории в астрономии и оптике» [204, с. 396—397].

** Считая понятие исследовательской программы реалистическим и используя его, мы, тем не менее, не придерживаемся в целом методологической схемы Лакатоса.

ный мир) *. При этом Лаплас опирался не только на механику и закон всемирного тяготения, но и на атомистическую концепцию, получившую к этому времени важные подтверждения. Набросок подпрограммы «молекулярной механики», основанной на сочетании классико-механической программы, теории всемирного тяготения и молекулярной, или атомистической, концепции материи, дан в следующем отрывке: «Видя, что все части материи подвержены действию сил притяжения, одна из которых охватывает сколь угодно большие пространства, тогда как другие становятся неощутимыми даже на самых малых расстояниях, какие доступны нашим чувствам, можно задаться вопросом, не являются ли эти последние силы видоизменением первой силы — видоизменением, определяемым формой и взаимными расстояниями молекул... Между тем притягательные силы тел должны значительно превышать земное тяготение, так как они явным образом искривляют свет, изменения направления которого из-за притяжения Земли мы не замечаем. Итак, плотность молекул должна была бы быть несравненно больше плотности тел, если сродство молекул есть только видоизменение всемирного тяготения. Впрочем ничто не мешает рассматривать все тела таким образом: многие явления и, между прочим, та легкость, с какой свет распространяется в прозрачных телах по всем направлениям, говорят в пользу этого... Тогда различные сродства зависели бы от формы объединяющихся молекул и от их относительных положений, и многообразием этих форм можно было бы объяснить все многообразие сил притяжения и свести, таким образом, к одному общему закону все явления физики и астроно-

* В пересказе И. Б. Погребынского замысел Лапласа выглядит следующим образом: «После открытия Ньютоном закона всемирного тяготения, писал Лаплас, геометры сумели свести к этому великому закону природы все известные в системе мира явления. Точность астрономических теорий и таблиц превысила всякие ожидания. И Лаплас ставит себе цель, изложить с единой точки зрения эти теории, разбросанные в многочисленных трудах, которые содержат в своей совокупности все выводы из закона всемирного тяготения относительно равновесия и движения твердых и жидких тел, образующих Солнечную систему и подобные ей системы, рассеянные в безбрежности небес...» [167, с. 81]. И далее: «Лапласу же принадлежит инициатива попытки вместить всю математическую физику в рамки механики на основе одной и той же, можно сказать, расчетной схемы... Свои исследования в этой области он рассматривал как относящиеся к молекулярной механике, которая должна была включить в себя всю область физических явлений, не охватываемую теорией всемирного тяготения. Тяготение тел незначительной величины становится незаметным, но между частицами тел оно вновь проявляется бесконечно многообразно — таков тезис Лапласа. Твердость геля, кристаллизация, преломление света, капиллярные явления, химические реакции — результат действия сил притяжения, познать которые одна из главных задач естествознания... Этот грандиозный для своего времени синтез, вернее замысел такого синтеза, возник на основе молекулярной, т. е. атомной теории строения вещества... и под влиянием небесной механики» [167, с. 87]. Идеал Лапласа разделялся многими его современниками и учеными последующего поколения, в основном, французскими (Пуассон, Коши, отчасти Навье, Ламе, Клапейрон, Сен-Венан, а также Остроградский).

мии» [167, с. 90]. Эта подпрограмма не стала генеральным направлением физической экспансии классико-механической программы в XIX в., хотя в первой четверти на нее возлагались основные надежды. Тем не менее, она не только явилась важнейшим этапом в развитии классико-механической программы, но и существенно повлияла на формирование теории упругости и гидродинамики. Основы квазиполевого теории гравитации были заложены также, в общем, французскими учеными Лагранжем, Лапласом, Пуассоном и как раз в это же время [547, 572]. В 1773 Лагранж ввел понятие потенциала. Примерно с 1782 г. Лаплас многие задачи теории тяготения решает, используя дифференциальную формулировку ньютоновского закона:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0,$$

т. е. уравнение Лапласа, где V — гравитационный потенциал. В 1813 г. Пуассон обобщает теорию Лапласа на случай гравитирующей материи, распределенной в пространстве с плотностью ρ , и выдвигает основное уравнение классической теории тяготения:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 4\pi k\rho,$$

известное как уравнение Пуассона.

Хотя в начале XIX в. никто, по-видимому, не придавал принципиального физического значения этой математической формулировке ньютоновского закона тяготения, именно она в преддверии теории относительности оказалась мостом к полевой теории тяготения. После того, как в теории электромагнитного поля было показано, что уравнения Лапласа и Пуассона описывают статические электрические и магнитные поля и могут рассматриваться как статические аналоги уравнений Максвелла, естественно возникла мысль о полевой природе гравитации и возможном построении динамического обобщения гравитационных уравнений Пуассона и Лапласа. С другой стороны, эта квазиполевого формулировка гравитации стала началом завоевания дифференциальными уравнениями в частных производных всей математической и теоретической физики.

Экспериментально-эмпирические трудности

К середине XIX в. ньютоновская теория тяготения убедительно доказала свою силу, особенно после того, как Леверрье и Адамс «открыли на кончике пера» Нептун. Но тот же Леверрье вскоре (окончательные вычисления были опубликованы в 1859 г.) обнаружил аномальное вековое смещение перигелия Меркурия, не согласующееся с результатами вычислений, основанных на ньютоновской теории. Первоначально это не воспринималось как существенное затруднение теории Ньютона. Предпола-

галось, что аномалия Леверрье будет объяснена каким-нибудь дополнительным, возможно, скрытым пока источником возмущений.

Точно таким же способом рассчитывали объяснить и другие аномалии в движении планет, прежде всего, в движении узлов орбиты Венеры, перигелия Марса и некоторые небольшие нерегулярности в движении Луны. Наиболее значительный вклад в исследование различных аномалий подобного рода внесли в конце прошлого века выдающиеся специалисты по небесной механике Ньюком и Тиссеран. Они не только занимались небесно-механическими вычислениями, уточнением и поисками аномалий, но и настойчиво искали способы их объяснения [331, 477, 496, 546, 588].

В 60—70-х гг. были зарегистрированы очень большие расхождения наблюдаемого движения с результатами вычислений и для кометы Энке. Немецкий астроном, исследователь комет Т. фон Оппольцер писал в 1881 г.: «Теория Луны позволяет с некоторой вероятностью заключить, теория Меркурия с определенностью доказать, теория кометы Энке — с полной уверенностью заявить, что теории, основанные лишь на ньютоновском законе в его современной форме, недостаточны для объяснения движения небесных тел» (цит. по: [558, с. 36]). Несколько забегаю вперед, заметим, что аномалии в движении кометы Энке вскоре нашли свое более или менее удовлетворительное объяснение в работах пулковского астронома Бакулида в рамках ньютоновской теории. Нерегулярности в движении Луны были объяснены Брауном также на основе теории Ньютона (1903) [331]. Аномалии же в движении планет (прежде всего, Меркурия, а также Венеры и Марса), уточненные расчетами Ньюкома и Тиссерана, несмотря на многочисленные попытки их объяснения, так и не удалось устранить к началу XX в. [331, 496, 588].

Ньюком в 1895 г. и Тиссеран в 1896 г. пришли к выводу о существовании трех основных расхождений ньютоновской теории с астрономическими наблюдениями (для векового движения перигелия Меркурия — $41-43''$, узла Венеры — $10''$, для векового смещения перигелия Марса — $8''$). Наиболее значительным, таким образом, было расхождение, связанное с движением Меркурия [331, 332, 588].

Первоначальные надежды на объяснение этой аномалии наличием тех или иных скрытых масс-источников дополнительных возмущений так и не оправдались. Первая попытка такого рода была предпринята самим Леверрье, который предположил, что между Меркурием и Солнцем имеется еще одна планета, названная им Вулканом. Впоследствии эта планета заменялась кольцом малых планет (Тиссеран), спутником Меркурия (Е. Хертль), кольцом малых планет между Меркурием и Венерой (Ньюком) и т. д. Выдвигалась также гипотеза о несферичности Солнца (Луврс, Гарцер, Ньюком), которая в 60—70-х гг. XX в. вновь стала актуальной в связи со скалярно-тензорной теорией Бран-

са — Дикке, а затем гипотеза о возмущающем воздействии зодиакального света, детально разработанная Зеселигером [4, 331, 496].

Все эти гипотезы действительно приводили к дополнительному смещению перигелия Меркурия и при определенном подборе параметров скрытых масс позволяли получить значение, близкое к требуемому. Но в каждом случае возникали различного рода дополнительные затруднения: либо возникали новые аномалии у того же Меркурия или у других планет, которые не соответствовали наблюдениям, либо параметры скрытых тел были таковы, что эти тела можно было бы наблюдать, а этого не удавалось сделать, либо параметры эти должны были приводить к некоторым неустойчивостям (например, неустойчивости кольца малых планет). Кроме того, для каждой из трех основных аномалий приходилось, как правило, придумывать свое объяснение, а если к этим трем аномалиям прибавить еще существование в то время трудности с кометой Энке и движением Луны, то ситуация с применением ньютоновской теории тяготения к небесной механике выглядела в конце XIX и начале XX в. отнюдь не такой уж благоприятной, какой она была в первой половине XIX в. Наиболее долгоживущей из этих гипотез оказалась гипотеза Зеселигера о возмущающем воздействии Зодиакального света, поскольку она позволяла объяснить три основных планетных аномалии за счет соответствующего подбора параметров этого образования и из-за трудностей точного определения посредством наблюдений его границ. Тем не менее, большинство астрономов считали и эту гипотезу неприемлемой, полагая, что она не соответствует наблюдениям [4, 331].

Таким образом, консервативное направление в преодолении трудностей небесной механики, именно эмпирических трудностей, не привело к успеху, и многие астрономы и физики стали склоняться к выводу о несовершенстве ньютоновской теории тяготения и необходимости ее замены новой теоретической схемой.

Логико-теоретические трудности *

Наряду с небольшими, но весьма надежно установленными, эмпирическими трудностями в теории тяготения стали все более выявляться и обсуждаться трудности логико-теоретического характера. Трудности эти оказались естественно связанными с характерными особенностями и достижениями в развитии физики второй половины XIX века.

Рассмотрим основные из этих трудностей, делая при этом упор именно на тех, которые отчетливо осознавались исследователями гравитации в конце прошлого века.

* Более подробно анализ логико-теоретических трудностей ньютоновской теории тяготения см. в статье [30].

Феноменологизм. Феноменологический характер ньютоновской теории тяготения отмечался многими учеными XVIII и первой половины XIX в. Некоторые из них предпринимали поэтому попытки дать то или иное эфирно-механистическое наглядное объяснение явлению тяготения, согласующееся с законом всемирного тяготения. Но выдающиеся достижения классической механики и ньютоновской теории тяготения, прежде всего в небесной механике, привели к тому, что идя квазиньютоновских центральных сил, мгновенно действующих на расстоянии, стала основополагающей во всей физике. И несмотря на отдельные попытки построения «объяснительных» эфирных гипотез о природе тяготения, «со времен Ньютона учение о тяготении было принято и развивалось, пока мало-помалу не приобрело характера скорее исходного факта, нежели факта, подлежащего объяснению» [129, с. 153]. Но после успехов кинетической теории газов в середине XIX в. положение постепенно меняется. В. Томсон писал в 1884 г.: «Хорошо известная теперь кинетическая теория газов представляет собой столь важный шаг на пути к объяснению с помощью движения таких свойств тел, которые представляются нами статическими, что едва ли можно удержаться от мысли, что в будущем появится полная теория материи, в которой все свойства последней будут рассматриваться лишь как атрибуты движения» (цит. по: [186, с. 187]). Правда, не только кинетическая теория стимулировала в середине прошлого века возобновление интереса к «объяснительным» схемам. Существенную роль при этом играли и другие быстро и успешно развивающиеся области физики, прежде всего, волновая оптика, теория колебаний, учение об энергии, электродинамика.

Автор известного обзора по проблеме тяготения Ценнек дал в 1903 г. следующую классификацию эфирно-механистических гипотез о природе тяготения: гидростатические, связанные, в известной мере, с развитием учения об энергии (Риман, Гельм, Пирсон, Янковский и др.); колебательно-волновые, опирающиеся на достижения колебательно-волновых теорий в акустике, гидродинамике, оптике (Келлер, Челлис, К. Бьеркнес, Лиги, Корн, Деллинггаузен и др., предшественник — Гук); наконец, эфирно-ударные или кинетические гипотезы, которые в большинстве своем исходили из механистической модели тяготения, выдвинутой в конце XVIII в. Лесажем, и существенно опирались на достижения кинетической теории газов (В. Томсон, Изенкраге, Ризанек, Престон, Секки, Ваши, Кролль, Лерэ и многие другие) [588]. Такие выдающиеся физики, как В. Томсон, Максвелл, Пуанкаре, Друде из всех механистических гипотез наиболее высоко оценивали именно кинетическую квазилесажевскую схему, возлагали на нее некоторые надежды и сами принимали участие в ее разработке (см., например, [129, с. 157; 544, с. 577]).

Ценнек в 1903 г. и Максвелл в 1875 г., который уже тогда дал примерно такую же классификацию основных эфирно-механистических гипотез о природе тяготения [130, с. 173], пришли к вы-

воду о неудовлетворительности всех этих гипотез, столкнувшихся при детальном своем развитии с непреодолимыми затруднениями (они приводили к нарушению закона сохранения энергии, противоречили астрономическим наблюдениям и некоторым известным опытам, обладали прочими противоречивыми свойствами).

Но само их появление свидетельствовало о наличии определенной трудности ньютоновской теории, которую мы назвали феноменологизмом, трудности, которая особенно явственно выступила на фоне блестящих успехов кинетической теории теплоты и атомистики во второй половине XIX века. Вместе с тем, несмотря на использование в некоторых из этих гипотез статистических методов, в целом они оставались в рамках эфирно-механистических представлений, и прогрессирующие неудачи этого «объяснительного» направления свидетельствовали о необходимости выхода за пределы классической механики и концепции эфира и поисков более глубокой основы для преодоления феноменологизма ньютоновской теории тяготения.

Изоляционизм. Хотя предпринималось немало попыток использовать ньютоновскую теорию тяготения для построения теорий различных физических явлений, во второй половине XIX в. становилось все более очевидным, что область ее действия ограничивается, по существу, небесной механикой, а тепловые, электрические, магнитные, оптические, химические и прочие процессы оказываются несводимыми к ньютоновским силам.

Успех синтетических концепций физики, связанных с законом сохранения энергии, атомистикой, фарадеевской программой взаимосвязи всех основных физических взаимодействий, затем максвелловским синтезом электромагнетизма и оптики и, наконец, зарождающейся в конце XIX в. электромагнитной концепции физического мира, требовал обнаружения связи гравитации с другими физическими явлениями, а также включения ее в рамки наиболее общих физических теорий или установления связи с этими теориями.

Экспериментаторы пытались, например, установить влияние химического состава и структуры взаимодействующих масс на силу их взаимодействия (Бейли, Крейхгауэр, Ландольт, Пойнтинг и Грэй, Хейдвайсер, Гензель, Маккензи и др.), проверить более строго зависимость силы взаимодействия от величины масс, расстояния, температуры, промежуточной среды, возможную зависимость этой силы от времени, установить явным образом связь гравитации с электромагнитными и оптическими явлениями. Из множества экспериментаторов, занимавшихся в середине и конце прошлого века подобного рода опытами, назовем наиболее известных: Фарадей, Викар, Пойнтинг, Бойс, Браун, Рихард и Кригер-Менцель, Вильзинг, Аустин и Твинг, Йолли, Пикте, Кремье, Пойнтинг и Филлипс, Дж. Томсон, Саутсернс и др. [121, 188, 584]. В обзоре, написанном М. А. Левитской в 1910 г. буквально за несколько лет до открытия ОТО, был подведен следующий итог экспериментальному изучению гравита-

дии: «В общем, все указанные опытные исследования только подтверждают формулировку Ньютона как почти безошибочное выражение закона всемирного тяготения. Те незначительные отклонения, которые обнаруживаются в некоторых исследованиях, если и твердо установлены, то во всяком случае допускают возможность лишь ничтожных поправок к закону Ньютона. Вместе с тем ... все сделанные до сих пор опытные исследования не могли обнаружить ни малейшей связи всемирного тяготения с остальными основными силами природы» [121, с. 32].

Попытки связать объяснение гравитации с различными физическими теориями, такими, как теория теплоты, кинетическая теория газов, гидродинамика и акустика, оптика, также не имели успеха. Ниже мы покажем, что и электродинамика, несмотря на некоторые многообещающие результаты, не вывела гравитацию из необычного для физики второй половины XIX в.—начала XX в. состояния изоляции.

Итак, изоляционизм гравитации несомненно стимулировал экспериментальные и теоретические исследования проблемы. Неудачи же в этой области говорили либо о чрезвычайной слабости гравитационного взаимодействия в микро- и макромасштабах и удивительной универсальности этого взаимодействия, а также, возможно, об исключительном своеобразии будущей более полной теории тяготения.

Все-таки, нельзя здесь не вспомнить об одной работе, явно опередившей свое время. Речь идет о хорошо известной теперь работе Зольднера, выполненной им в 1801 г. [531]. Зольднер, исходя из корпускулярной теории света — при этом он предполагал равенство инертной и гравитационной масс световых частиц и справедливость для них ньютоновских уравнений движения, — вычислил отклонение света в гравитационном поле, например, Солнца. Формула Зольднера, по существу, совпадает с формулой Эйнштейна, полученной последним на основе лишь принципа эквивалентности и не учитывающей кривизны пространства. Эта работа прошла незамеченной, прежде всего потому, что как раз в начале XIX в. усилиями Юнга и Френеля выдвинулась на первый план волновая теория света. О работе Зольднера, которая могла бы стать первой ласточкой в преодолении изоляционизма гравитации, прочно забыли и вспомнили лишь после открытия ОТО [4, 383, 504].

Инстантантизм (мгновенное дальноедействие). Этот кардинальный изъян ньютоновской теории тяготения стал особенно очевиден в свете торжества программы Фарадея — Максвелла, в основе которой лежали принцип близкодействия и концепция поля. «Наивно гениальные воззрения Фарадея и математическая формулировка их Максвеллом слова выдвинули на передний план силы, действующие при прикосновении, — писал Мах в «Механике», которая получила столь высокую оценку Эйнштейна. — Различные затруднения вызвали уже у астрономов сомнения в точности закона Ньютона, и делались попытки к небольшим коли-

чественным изменениям их. Но после того как было найдено доказательство распространения во времени действия электрического, естественно снова возник вопрос о подобных же соотношениях в случае аналогичных действий тяжести» [135, с. 154]. С попытками учесть конечность скорости распространения гравитации связывались и попытки учета скорости гравитационных тел. Лаплас также сделал одну из попыток такого рода. Он получил дополнительный вклад в силу тяготения, пропорциональный отношению относительной скорости движения гравитирующих тел к скорости гравитации v/V , и, применив свои вычисления к Луну, он пришел к выводу, что либо скорость гравитации должна быть в 10^8 раз больше скорости света, либо, если считать ее равной скорости света, получаются явные расхождения с наблюдениями [4, 81, 338].

Спустя примерно полвека, возник целый поток работ, авторы которых пытались тем или иным способом учесть скорость гравитации и скорость гравитирующих тел в духе Лапласа (Леман-Фильес, Геппергер, Оппенгейм, Оппольцер, Друде и др.) [4, 81, 121, 186, 331, 332, 338, 496, 504, 584, 588, 589]. Эти исследователи стремились соединить устранение инстантизма с устранением эмпирических аномалий. Частичный успех при этом достигался лишь при чрезвычайно больших скоростях распространения тяготения (у Лемана-Фильеса порядка $5 \cdot 10^6$ с, у Геппергера — порядка $0,5 \cdot 10^8$ с, где с — скорость света).

Несколько бóльший успех имели попытки учета скорости гравитации, основанные на замене ньютоновского закона квазиэлектродинамическими законами типа законов Вебера, Римана, Гаусса [4, 186, 331, 584, 588]. Все эти законы в первом приближении совпадали с ньютоновским, принимали во внимание скорость гравитирующих тел (причем добавка к ньютоновской силе была пропорциональна v^2/c^2), а главное, они содержали константу Вебера, интерпретированную как $c\sqrt{2}$, и, таким образом, как бы учитывали скорость гравитации, отождествляемую со скоростью света. Впрочем, законы этого типа, так же как и в электродинамике, не были, по существу, близкодействующими в полном смысле этого слова. Тем не менее, эти попытки были серьезным шагом вперед в преодолении трудностей теории тяготения, поскольку на основе их использования возникали реальные надежды на устранение сразу нескольких недостатков ньютоновской теории как эмпирического, так и логико-теоретического характера. Во-первых, они в определенной мере решали проблему дальнего действия (хотя и не были полевыми), во-вторых, приводили к дополнительному смещению перигелия Меркурия, хотя и не совпадающему с наблюдаемым эффектом (закон Вебера объяснял лишь $14''$, а законы Римана и Гаусса — $28''$, т. е. соответственно примерно $1/3$ и $2/3$ наблюдаемого аномального смещения), в-третьих, они связывали гравитацию с электродинамикой, создавая определенную надежду на построение в будущем некоторой объединенной теории тяготения и электромагнетизма.

В этом направлении работали в конце прошлого века многие исследователи, особенно астрономы (Целльнер, Зеегерс, Хольцмюллер, Тиссеран, Зервус, Лиман, Леви и др.). Леви, в частности, так скомбинировал законы Вебера и Римана, включив в выражение для потенциала тяготения произвольную константу, равную 1,64, что получил смещение перигелия Меркурия, требуемое наблюдениями.

После утверждения максвелловской теории поля на первый план постепенно выходят электромагнитно-полевые теории тяготения, связанные с именами Лоренца, Вина, Гапса, Ланжевсна, Дж. Дж. Томсона, Хевисайда и др. [4, 107, 121, 331, 366, 367, 451, 504, 543, 576]. Но и эти теории, устраняя мгновенное дальное действие, не справлялись с большинством трудностей и даже приводили к новым противоречиям, связанным, например, с нарушением закона сохранения энергии.

Достижения и неудачи электромагнитного направления несомненно сыграли существенную роль в подготовке основ ОТО. Неудачи в сведении гравитации к электромагнетизму наводили на мысль о фундаментальности и специфичности гравитационного поля, об ограниченности электромагнитной концепции, казавшейся в ту пору универсальной. Вместе с тем, это были первые полевые теории тяготения, содержащие фундаментальные идеи близкого действия, которые стали основополагающими при создании ОТО.

Финитизм (гравитационный парадокс). Успехи звездной астрономии и расширение масштабов наблюдений Вселенной делали все более актуальными космологические проблемы. Единственной теоретической основой космологии оставалась ньютоновская теория тяготения, которая, однако, как это выяснили сначала К. Нейман в 1873—1874 гг. [475], а затем в 1895 г. Зеелигер [524], страдала существенным недостатком, финитизмом [494, 550]. Иначе говоря, при распространении ньютоновской теории на бесконечно большие расстояния, что было вполне естественным, если считать Вселенную пространственно бесконечной, возникали непреодолимые затруднения, связанные с появлением неопределенностей и бесконечностей физических величин. Зеелигер более подробно и строго, чем К. Нейман, рассмотрел эту проблему и пришел также к выводу об ограниченности закона тяготения Ньютона. Применение модификаций ньютоновской теории, рассмотренных ранее, не устраняло гравитационный парадокс, и Зеелигер и Нейман предложили экспоненциальные модификации закона всемирного тяготения, восходящие к Лапласу:

$$F = k \frac{m_1 m_2}{r^2} e^{-\lambda r}, \quad V = k \frac{m_1 m_2}{r} e^{-\lambda r},$$

где λ — имеет смысл своеобразного коэффициента поглощения гравитаций, F — сила, а V — потенциал тяготения. Наличие экспоненциального множителя обеспечивало сходимость расхо-

дящихся ранее величин и устраняло гравитационный парадокс. Коэффициент выбирался так, чтобы вычисленное значение смещения перигелия Меркурия совпадало с наблюдаемым. Однако при этом получались сильные расхождения с другими астрономическими наблюдениями (например, получались слишком большие смещения перигелиев для Венеры, Земли и Марса). Неймановское обобщение потенциала тяготения и соответственно, уравнения Пуассона:

$$\Delta V - \lambda V = 4\pi k\rho$$

было использовано Эйнштейном в его первой работе по релятивистской космологии и служило ему аналогией для введения в гравитационные уравнения космологического члена [274]. Гравитационный парадокс в конце XIX века воспринимался как существенный недостаток ньютоновской теории тяготения и подсказывал новые возможности для ее модификации. С другой стороны, после обнаружения этого парадокса возник дополнительный критерий отбора для гравитационных теорий, обобщающих ньютоновскую. Так, например, для объяснения планетных аномалий (прежде всего смещение перигелия Меркурия) Холл в 1894 г. и Ньюком в 1895 г. воспользовались старой идеей, входящей еще к Ньютону и Грину, а именно вместо члена $1/r^2$ в законе всемирного тяготения они использовали член $1/r^{2+\epsilon}$, где ϵ принималось порядка 10^{-7} [4, 494]. При такой модификации существенно уменьшались расхождения с астрономическими наблюдениями, но трудности логико-теоретического характера оставались, в частности сохранялся гравитационный парадокс. Конечно, модификация, которая наряду с планетными аномалиями устраняла бы еще и обсуждаемый парадокс, расценивалась бы более высоко.

Предпринимались и другие (помимо зеслигеровской и неймановской модификаций) попытки для устранения гравитационного парадокса. Одна из них, весьма популярная в конце прошлого века, была связана с введением понятия отрицательных масс (Фелпл, 1897) [56]. Еще одна попытка преодоления финитизма ньютоновской теории заключалась в замене бесконечного евклидова пространства конечным неевклидовым пространством постоянной положительной кривизны. Но на этом пророческом предположении мы остановимся несколько подробнее при обсуждении другой трудности ньютоновской теории тяготения, которую можно было бы назвать геометрическим априоризмом.

Геометрический априоризм. Ньютоновская теория тяготения была органически связана с ньютоновской (классической) механикой, она, в частности, использовала те же самые представления о пространстве и времени: пространство считалось евклидовым, а пространственно-временные представления характеризовались галилей-ньютоновской симметрией.

После открытия неевклидовых геометрий естественно вставал вопрос о возможности замены евклидова пространства механики

тем или иным неевклидовым пространством. Уже Гаусс и Лобачевский, как известно, обсуждали возможность эмпирической проверки геометрии пространства, а после признания и утверждения неевклидовых геометрий в конце 60-х гг. возникает целое направление исследований по механике в неевклидовых пространствах (Де Фонсенс, Шеринг, Тийн, Дженокки, Линдеман, А. П. Котельников, Андрад и др.). Особый интерес для теории тяготения имели работы Шеринга (1870—1873) и Киллинга (1885), в которых обсуждался вопрос о неевклидовом эквиваленте ньютоновского закона [331, 494, 588]. Шварцшильд в 1900 г. и Гарцер в 1908 г. обсудили возможности астрономической аргументации в пользу реальности неевклидовых пространств, следуя при этом традициям Лобачевского и Гельмгольца [41, 222]. Вывод Шварцшильда гласил: «Можно, не вступая в противоречие с опытными фактами, вообразить себе, что мир заключен в гиперболическом пространстве с радиусом кривизны, большим 4 миллионов радиусов земной орбиты, или в эллиптическом пространстве с радиусом кривизны, большим 100 миллионов радиусов земной орбиты, причем в последнем случае приходится еще допустить поглощение света, равное 40 звездным величинам для оборота вокруг пространства» [222, с. 67]. Последнее условие связывалось с отсутствием наблюдаемых «противообразов»: светящихся объектов, которые, как отметил еще Гельмгольц, должны возникнуть в замкнутом неевклидовом пространстве постоянной положительной кривизны. Гарцер более детально рассмотрел случай эллиптического пространства, в частности, вопросы, связанные с возможностью обнаружения «противообразов» (так, он подчеркнул, что вывод Шварцшильда о поглощении был бы верен, если бы Солнце и Земля покоились в пространстве, а скорость света была бы бесконечно большой, учет этих обстоятельств должен существенно уменьшить оценку Шварцшильда). Далее, Гарцер указал на важное преимущество эллиптического пространства по сравнению с бесконечно протяженными пространствами (евклидовым и гиперболическим, т. е. пространством постоянной отрицательной кривизны): в силу конечности эллиптического пространства, в нем естественным образом устраняются гравитационный и фотометрический парадоксы.

Тем самым, появлялась возможность модификации ньютоновской теории тяготения на основе представления о замкнутом пространстве постоянной положительной кривизны. Действительно, кривизна пространства приводила к дополнительному смещению перигелия Меркурия, но для совпадения с наблюдаемым значением требовалась слишком большая степень искривления, явно противоречащая оценкам Шварцшильда и Гарцера (радиус кривизны должен был иметь порядок 1000 радиусов земной орбиты).

В конце XIX и начале XX в. проблема возможной неевклидовости пространства обсуждалась весьма широко и в теоретико-познавательном плане (Пуанкаре [170], Рассел, И. Кон, Гэф-

флер, Мотт-Смит, Мюллер [473] и др.). Заметим, что обсуждались также возможности использования пространств с переменной кривизной; идея геометрического толкования сил или физических взаимодействий: именно, в том смысле, что проявления этих взаимодействий могут быть интерпретированы как эффекты искривления пространства или что характер искривления пространства определяется физическими взаимодействиями,— эта идея восходит к Риману и получила развитие (хотя и на качественном уровне) в работах прежде всего Клиффорда [334], а также (несколько позднее) Пуанкаре, Рассела и некоторых других исследователей [182, 330].

Разумеется, до открытия СТО (и в частности, четырехмерной формулировки Минковского) речь могла идти только о трехмерных неевклидовых пространствах, но в свете четырехмерной концепции Минковского ничто не препятствовало рассмотрению четырехмерных неевклидовых пространств, особенно после того, как Клейн в 1910 г. связал идеи Минковского со своей «Эрлангенской программой» [25].

Геометрический абсолютизм. Перейдем теперь к обсуждению геометрического абсолютизма ньютоновской системы, связанного с концепциями абсолютного пространства и времени. В конце 60-х — начале 70-х годов XIX в. в связи с успехами физики и намечающимся кризисом механицизма повышается интерес к основаниям механики, возникает целое направление критического анализа и пересмотра этих оснований. Проблемы определения массы, инерциальной системы отсчета, вопрос о физическом смысле принципа инерции, корректном построении основ механики и т. д. постепенно выдвигаются на первый план и привлекают внимание таких выдающихся исследователей как К. Нейман, Мах, В. Томсон, Кирхгоф, Максвелл, Герц, Дж. Томсон и др. Особенно глубокий критический анализ понятий абсолютных пространства, времени и движения в связи с проблемой инерции был дан Махом в его работах, начатых еще в 60-х гг. Первые итоги этих исследований были подведены Махом в книге «Принцип сохранения работы», вышедшей в 1872 г. [136], и затем в «Механике» (1883) [135]. Он предложил исключить пространственно-временные абсолюты из механики и ответственными за инертные свойства тел сделать не абсолютное пространство, а совокупность всех удаленных масс Вселенной. Это привело к следующей формулировке принципа инерции: «Вместо того, чтобы сказать, что направление и скорость какой-нибудь массы μ остаются в пространстве постоянными, можно также употребить выражение, что среднее ускорение массы μ относительно масс $m, m', m'' \dots$ на расстояниях r, r', r'', \dots равно нулю или

$$\frac{d^2 \sum m r}{dt^2 \sum m} = 0 \text{ [135, с. 195].}$$

Именно эта формулировка дает ключ к пониманию того, что теперь со времени Эйнштейна называется принципом Маха, сы-

гравшим фундаментальную роль в генезисе ОТО [91, 214, 512]. Заметим, что все эти идеи были развиты Махом еще в 60-х — начале 70-х гг. Эйнштейн высоко оценивал роль Маха как предшественника ОТО, это подтверждается и анализом работ Эйнштейна 1912—1915 гг. Весьма подробно этот вопрос обсуждался также в историко-научной литературе [388, 390—393, 407], поэтому мы ограничимся сказанным и подчеркнем лишь, что в последующие годы круг вопросов, поднятых Махом, получил развитие в работах многих физиков и философов, занимавшихся проблемами естествознания. Мах в пятом издании «Механики» писал: «Взгляд, что «абсолютное движение» есть понятие бессмысленное, бессодержательное и научно никуда не годное, — взгляд, который двадцать лет тому назад вызывал почти всеобщее осуждение, в настоящее время разделяется многими выдающимися исследователями. В качестве решительных «релятивистов» я мог бы назвать Сталло, Дж. Томсона, Л. Ланге, Лове, Мак-Грегора, Пирсона, Мансиона, Клейнпетера» [135, с. 262]. В книге можно встретить упоминания и о других ученых, занимавшихся аналогичными проблемами и внесшими в их разрешение определенный вклад: Штрэйнца, Планка, Гельма, П. и И. Фридлиндера, Герца, Викера, Розенбергера, Фолькмана, Лассвица, Зеелигера, Больцмана, Феппла, Клиффорда, Пикара, Пуанкаре, Дюгема, Андинга, а из более ранних исследователей — Кирхгофа, К. Неймана, Максвелла и др.

Критика абсолютизма ньютоновской системы и конструктивные альтернативы, предложенные Махом, Ланге и другими, были существенны и для подготовки СТО и для перехода к релятивистской теории тяготения. В частности, с маховскими представлениями об инерции можно ассоциировать идею принципа эквивалентности, просвечивающую, например, в следующих словах: «Нам нет вовсе надобности относить закон инерции к какому-нибудь особому абсолютному пространству. Напротив, мы видим, что как те массы, которые, согласно обычному выражению, действуют друг на друга, так и те, которые друг на друга не действуют, находятся в совершенно однородных друг к другу отношениях ускорения, и именно можно считать, что все массы находятся в связи друг с другом» [135, с. 196]. Здесь мы подходим к одному из важнейших логико-теоретических изъянов ньютоновской теории, который, правда, осознавался в конце прошлого века заметно слабее, чем другие недостатки, а именно, к необъяснимости в рамках этой теории равенства (или пропорциональности) инертной и гравитационной масс.

Эмпиризм (необъяснимость равенства инертной и гравитационной масс). Этот недостаток ньютоновской теории свидетельствует о наличии в ней фундаментальных соотношений эмпирического характера, теоретическое осмысление которых отсутствует. Поэтому обсуждаемый изъян ньютоновской теории можно было бы назвать условно эмпиризмом. Равенство инертной и гравитационной масс со времени Галилея и Ньютона лежит в

основе классической механики и ньютоновской теории тяготения. Другой формой его выражения является принцип Галилея, согласно которому все тела при свободном падении в поле тяжести движутся с одинаковыми ускорениями. Равенство $m_g = m_{ин}$ подтверждается многократно повторенными с увеличивающейся точностью опытами с маятниками и крутильными весами (Ньютон, Бессель, Этвеш, Пекар и Фекте, Зссман, Реннер, Дикке, Брагинский с сотрудниками и др.) [13, 15, 57], а также всей совокупностью астрономических эффектов небесной механики. Точность подтверждения фундаментального равенства в опытах Дикке составляет $3 \cdot 10^{-11}$, а в опытах группы Брагинского 10^{-12} . Факт этот со временем стал привычным и мало у кого вызывал стремление к какому-либо его объяснению в рамках теории Ньютона. После открытия квазиньютоновских законов в области электростатики и магнитостатики (закон Кулона) стала очевидной уникальность гравитационного взаимодействия, в котором роль зарядов выполняют массы тел, являющиеся универсальной динамической характеристикой тел независимо от того, обладают ли они электрическими или магнитными свойствами или нейтральны. По-видимому, эту особенность гравитации связывали с феноменологическим характером ньютоновской теории, а объяснение ей падеялись найти в атомистических и эфирно-механистических построениях, которые мы рассматривали при обсуждении феноменологизма ньютоновской теории тяготения.

Действительно, теория Лесажа, например, давала объяснение факту пропорциональности силы тяготения произведению взаимодействующих инертных масс, т. е. по существу, равенству инертной и гравитационной масс. Это касается и большинства других эфирно-механистических теорий тяготения. Точно так же и электромагнитная теория гравитации Лоренца объясняла равенство инертной и гравитационной масс, и в этом объяснении видели существенный аргумент в пользу этой теории. Ланжевен специально подчеркивал эту черту теории Лоренца: «Если предположить, что для атома так же, как и для корпускулы (электрона. — В. В.), электромагнитная живая сила представляет собой полную кинстическую энергию, масса атома должна быть пропорциональна числу содержащихся в нем корпускул ... То же самое относится и к силе тяготения, если принять вместе с Лоренцем, что эта последняя возникает благодаря небольшому различию между величинами притяжения зарядов противоположных знаков и отталкивания зарядов одного и того же знака. Таким образом, гипотеза, согласно которой вся инерция материи имеет электромагнитное происхождение, сразу же объясняет пропорциональность, существующую между обычной механической массой, или коэффициентом инерции, и массой астрономической, или коэффициентом ньютоновского притяжения. Оба эти коэффициента оказываются здесь пропорциональными числу заключенных в атоме корпускул» [107, с. 71].

Логико-теоретические трудности классической теории тяготения как предпосылка общей теории относительности

Историко-научные аспекты						
Логико-теоретические трудности	Связь с прогрессом физико-математических наук	Попытки устранения трудностей	Критика предпринятых попыток	Формулировка трудностей в терминах астрометрии	Связь с другими методологическими принципами физики	Требования к будущей теории тяготения
1. Феноменологизм	Кинетическая и статистическая теории теплоты, атомистика, электронная теория, 1850—1900	Эфирно-механистические теории тяготения (В. Томсон, Раман, Бьеркнес, Престон, Персон, Корн, Гельм и др.). См. также 3	Несоответствие с законом сохранения энергии. Ad hoc-характер. Расхождение с опытом	Несимметрия между феноменологическим и объяснительно-микроскопическим уровнями описания	Принципы объяснения, простоты, сохранения энергии	Объяснение или устранение ньютоновского феноменологизма
2. Изоляционизм	Закон сохранения энергии, синтез термодинамики и кинетической теории, синтез электродинамики и оптики 1850—1900	Экспериментальные попытки (Маккензи, Крейхгауэр, Пикте, Аустин, Ландольт, Крэмье, Пойнтинг). Теоретические попытки → см. 1, 3	Отрицательные результаты экспериментов; см. 1, 3	Привилегированное положение гравитации в ряду других взаимодействий (отсутствие связи со всеми остальными взаимодействиями, связанными между собой)	Принципы единства физического знания, наблюдаемости	Установление связи гравитации с другими взаимодействиями, законов этой связи и их опытное подтверждение
3. Инстантенное дальнейшее действие	Фарадей-маквелловская программа близкого действия в электродинамике, теория электромагнитного поля, 1840—1890	Учет скорости гравитации без изменения ньютоновского закона (Леман-Филльс, Геппергер). Применение дальнего действия и максвелловской электродинамики (Вебер, Гербер, Лоренц)	Несоответствие с опытом и законом сохранения энергии. Ad hoc-характер	Привилегированное положение гравитации (бесконечная скорость в отличие от других взаимодействий). Наличие выделенной системы отсчета	Принципы объяснения, причинности, близкого действия	Половой характер гравитации

Таблица 1 (окончание)

Историко-научные аспекты						
Логико-теоретические трудности	Связь с прогрессом физико-математических наук	Попытки устранения трудностей	Критика предпринятых попыток	Формулировка трудности в терминах асимметрии	Связь с другими методологическими принципами физики	Требования к будущей теории тяготения
4. Финитизм (гравитационный парадокс)	Прогресс наблюдательной астрономии, критика оснований механики, закон сохранения энергии, 1850—1900	Экспоненциальные модификации ньютоновского закона, отрицательные массы, использование неевклидовых геометрий (Нейман, Зеллер и др.)	Несоответствие с законом сохранения энергии, опытом. Ад hoc-характер	Неравноправие пространственно-временно-пространственного случая	Принципы надежности и соответствия	Устранение гравитационного парадокса
5. Геометрический альтернативизм	Неевклидовы геометрии и неевклидова механика, критика основ механики, 1830—1900	Введение неевклидовых пространств в физику (Шеринг, Киллинг, Клиффорд, Рассел, Шварцшильд, Гарсер)	Несоответствие с опытом. Ад hoc-характер	Физически неоправданное выделение евклидовой геометрии в ряду других метрических геометрий	Принципы простоты и соответствия	Учет возможности введения в физику неевклидовых геометрий
6. Геометрический абсолютизм	Проблема эфира, критика оснований механики, 1870—1900	Попытки устранения пространственно-временных абсолютов и переопределения понятия инерции в инерциальной системе отсчета	Отсутствие последовательной альтернативы классике, разрыв с концепцией поля	Существование пространственно-временных абсолютов, не подверженных влиянию движущихся тел и полей	Принципы надежности простоты	Устранение пространственно-временных абсолютов
7. Эмпиризм (необъяснимость равенства инертной и гравитационной масс)	Критика оснований механики. Опыт Эвеша, 1870—1900	Попытки объяснения равенства $m_g = m_{ин}$ в эфирно-механистических и электромагнитных теориях тяготения; концепция инерции Маха	См. 1, 2, 3, 6	Инертная масса входит в выражение для закона тяготения, но не входит в выражения для других взаимодействий	Принципы объяснения и единства физического знания	Объяснение равенства $m_g = m_{ин}$ или использование его в качестве основы теории

Итак, сочетание электромагнитной теории тяготения Лоренца с электромагнитной концепцией инертной массы объясняло равенство $m_t = m_{ин}$. Таким образом, факт равенства инертной и гравитационной масс рассматривался многими теоретиками как эмпирическое соотношение в рамках ньютоновской теории, требующее объяснения в более глубокой атомистической (эфирно-механистической, электромагнитной и т. д.) теории. Идея же положить тождество инерции и гравитации в основу всего построения восходит, как мы видели, к Маху. Правда, Мах разрабатывал на этой основе новое понимание инерции, не связывая явно свои построения с проблемой тяготения.

Из логико-теоретических затруднений механики Эйнштейн всегда обращал внимание на следующие (особенно см. [296]). Первое и главное связано с выделением в механике класса привилегированных систем отсчета, именно инерциальных систем, и эта привилегированность их обеспечивается положением о существовании абсолютных пространства и времени. Положение же это (галилеевский абсолютизм) не имеет достаточно глубоких физических оснований. Вторая трудность связана с мгновенным дальнедействием гравитации. Третья, непосредственно связанная со второй, — это разделение энергии на две существенно различные части: кинетическую и потенциальную энергии. Полсвой подход к делу должен был, согласно Эйнштейну, устранить эту трудность, которую в рамках механики, не прибегая к понятию поля, пытался ликвидировать Герц в своем варианте бессильной механики. Наконец, четвертая трудность — это необъяснимость равенства инертной и гравитационной масс.

В таблице 1 в схематической форме представлены описанные логико-теоретические трудности ньютоновской теории тяготения, их связь с развитием физико-математических наук во второй половине XIX в. и неудавшиеся попытки их устранения. Кроме того, каждая из этих трудностей сформулирована в терминах асимметрии и отмечена ее связь с теми или иными методологическими принципами физики. Это сделано потому, что именно такой подход к анализу трудностей классических теорий был присущ Эйнштейну [30, 32].

2. Электромагнитные теории тяготения

Сведёние инерции к электромагнитным процессам означало полный переворот в основах физики, но крайней мере в принципиальном отношении. Место материальной точки как элемента реальности заняло электромагнитное поле. Оно стало фундаментальным понятием во всех построениях теоретической физики.
А. Эйнштейн (1922)

Я свет, я тем и знаменит,
Что сам бросаю тень.
Я жизнь Земли, ее зенит,
Ее начальный день.

Б. Пастернак. «Когда за лиры
лабиринт» (1913)

Электродинамические теории тяготения до возникновения электромагнитно-полевой программы

Кризис классико-механической программы в разрезе ньютоновской теории тяготения в некоторых своих пунктах, как мы видели, был связан с интенсивным развитием электродинамики во второй половине XIX в. Связь эта была двойкой. Даже до утверждения теории электромагнитного поля электродинамика, например в ее веберовском варианте, содержала идею конечной скорости передачи взаимодействия. С другой стороны, в этой области еще до максвелловского синтеза электричества, магнетизма и оптики, отчетливо проявилась тенденция к широкому охвату чуть ли не всего многообразия физических явлений. К тому же, стремление свести это многообразие к взаимодействиям заряженных микрочастиц (подход Вебера — Неймана) или к различным формам проявления непрерывного эфира (подход Фарадея) заключало в себе значительный антифеноменологический заряд. Таким образом, сопоставление положения дел в электродинамике с таковым в области гравитации способствовало развитию кризисной ситуации в последней.

Но электродинамика (опять-таки уже до Максвелла) не только обостряла эту ситуацию в области учения о гравитации, но и указывала некоторые пути для ее преодоления. На этих путях возникала надежда разрешить и главную эмпирическую трудность классической теории — загадку аномального движения перигелия Меркурия.

Одной из первых попыток понять всемирное тяготение на основе электродинамического взаимодействия была теория Моссотти (1836) *. По соображениям простоты Моссотти предпочи-

* О. Ф. Моссотти (1791—1863) — итальянский «математический физик» первой половины XIX в. Наиболее значительным его вкладом в физику считается математическая теория электростатической индукции (1846—1850), которая впоследствии использовалась Клаузакусом, а затем и Максвеллом. Свою

тал однофлюидную теорию электричества Франклина и Эпинуса в противовес более современной и более сложной двухжидкостной теории Кулона и Пуассона. Он также исходил из представления о молекулярном строении тел, полагая при этом, что молекулярные силы определяются электростатическим взаимодействием молекул, которые при отсутствии электрической жидкости (эфира) отталкиваются друг от друга и могут рассматриваться как положительные заряды, а также взаимодействием этих молекул с отрицательно заряженными частицами эфира. Более массивные молекулы можно было считать практически неподвижными по сравнению с эфиром. Это построение очевидным образом расходилось с общепринятой концепцией тяготения: молекулы вещества при отсутствии эфира не притягивались, а отталкивались. Моссотти предположил поэтому, что гравитация — вторичный эффект, вызванный тем, что электростатическое притяжение разноименных зарядов несколько больше, чем отталкивание одноименных. Эта замечательная идея в дальнейшем широко использовалась во многих электромагнитных теориях тяготения (от Вебера и Целльнера до Лоренца и Вина). Моссотти не ограничился качественным рассмотрением, он разработал математически единую теорию молекулярных и гравитационных сил на основе электростатического взаимодействия. Закон взаимодействия между двумя частицами вещества (представляющими собой положительно заряженные молекулы, погруженные в отрицательно заряженный эфир) опирался на введенную Моссотти зависимость плотности эфира от расстояния до молекул. Эта зависимость оказалась экспоненциальной, что приводило к отталкиванию на очень малых расстояниях, к притяжению на достаточно малых расстояниях, сначала увеличивающемуся с расстоянием до некоторого максимума, а затем спадающему фактически по квадратичному закону. Последнее притяжение и отождествлялось с ньютоновским тяготением. Теория Моссотти напоминала «молекулярную механику» Лапласа и динамическую теорию Босковича, но в отличие от них выходила за рамки классико-механической программы, хотя и оставалась мгновенно-дальнодействующей.

К концу 40-х годов XIX в. произошло два, вначале совершенно не связанных между собой события большой важности. В 1846 г. ученик Гаусса В. Вебер сформулировал обобщение кулоновского закона, описывающее взаимодействие движущихся зарядов. Закон Вебера позволял дать математически строгое объяснение электромагнитной индукции и в одну схему объединить электростатическое и электродинамическое взаимодейст-

электростатическую теорию тяготения он развил в работе «О силах, которые управляют внутренним строением тел» [4, 81, 584], посвященной разработке электрической теории сил молекулярного взаимодействия. Копию этой статьи Моссотти послал Фарадею, который высоко оценил эту работу, и по-видимому, рекомендовал ее издать на английском языке [584, с. 134].

вня. Примерно в это же время Леверрье обнаружил аномальное смещение перигелия Меркурия — основное расхождение небесной механики и, как вскоре стали подозревать, ньютоновской теории тяготения с наблюдениями *. Необъясненное смещение перигелия Меркурия, которое было получено Леверрье, составляло $38''$ в столетие. В 90-х годах прошлого века Ньюком уточнил результат Леверрье и принял его близким к современному — $43''$ [477, 331]. Как мы уже отмечали, с конца 50-х годов до конца XIX в. было предпринято множество попыток устранить это расхождение, которое грозило превратиться в подлинную аномалию (в купновском смысле слова). Вскоре после первых неудач с объяснением загадки Меркурия на основе классико-механической программы (без каких-либо видоизменений ньютоновского закона всемирного тяготения) астрономы и небесные механики обратили свои взоры на закон Вебера и некоторые его модификации, известные как законы Гаусса, Римана и т. д. С начала 70-х годов Вебер стремится превратить свою теорию в научно-исследовательскую программу и не без успеха распространяет свой закон на химию, теплоту, кинетическую теорию газов, представление об эфире и учение о тяготении. «В течение 1870-х годов он разработал электрическую картину природы... Он достиг законченного образа природы: единственными конституентами физического мира были электрические частицы двух знаков, движущиеся в соответствии с единым динамическим законом» [455, с. 472]. Концепция Вебера пользовалась поддержкой ряда ведущих физиков, прежде всего немецких, таких как Клаузиус, Риман, Ф. и К. Нейман. При развитии веберовской программы эти исследователи сталкивались с кардинальными отступлениями от классико-механической программы, такими как конечная скорость распространения электрического и гравитационного взаимодействия, нарушение 3-го закона механики для электродинамических сил, существование верхнего предела для относительной скорости частиц, возможность равноправного (симметричного) использования пространственных и временной координат при описании электродинамических явлений, формальная зависимость кажущейся массы заряженных частиц от их скорости и некоторые другие **. Веберовская программа не успела развернуться и вынуждена была отступить, не выдержав конкуренции с полевой концепцией Максвелла, которая к началу 90-х годов окончательно вытеснила первую. Значение ее было, тем не менее, весьма велико. Особенно сильно она повлияла на формирование

* Пересмотр теории планетных движений, завершившийся открытием аномалии Меркурия, был начат Леверрье в 1839 г. и завершен к середине 50-х гг. Обнаружение аномального смещения перигелия Меркурия обычно датируется 1846 г. Расчеты, относящиеся к этому открытию, были опубликованы полностью в 1859 г. [4, 331, 335].

** Эти отклонения от классико-механической программы, связанные с именами Вебера, Римана, Клаузиуса, обсуждались Мак-Кормаком [455] и Тредсом [201].

электронной теории Лоренца, которая вслед за теорией электромагнитного поля образовала фундамент электромагнитно-полевой программы*.

Перечисленные выше предвосхищения релятивистских аспектов не были систематизированы и осмыслены приверженцами веберовской программы, но, по-видимому, были восприняты творцами электронной теории, прежде всего Лоренцем.

Вебер с самого начала понимал возможность распространения своего закона и на гравитацию. В 1846 г., когда об аномальном смещении перигелия Меркурия ему еще не было известно, он подчеркнул, что использование его закона вместо ньютоновского в небесной механике не может привести к наблюдаемым эффектам [186, с. 230].

Впервые, в 1864 г., уравнения движения с веберовской силой проинтегрировал с помощью эллиптических интегралов геттингенский механик К. Зеегерс в своей докторской диссертации, которая, однако, не была опубликована [4, 186, 588]. А начиная с 1870 г., когда аналогичный подход выдвинул также Г. Хольцмюллер, появилась целая серия работ, посвященных применению «дальнедействующих» законов Вебера, Гаусса, Римана и подобных им для решения проблемы Меркурия. Наиболее известными и значительными здесь были работы К. Ф. Целльнера (1872) (последовательного сторонника Вебера), выдающегося французского небесного механика Ф. Тиссерана (1872; 1890), известного французского механика Ж. Бертрана (1890), а также О. Лимава (1886), М. Леви (1890), С. Оппенгейма (1894) и др. [4, 331, 584, 588]. Как мы уже подчеркивали, начало 70-х годов — это как раз время наиболее интенсивного развития идей Вебера, которое вошло к их оформлению в научно-исследовательскую программу.

Тиссеран рассматривал веберовский член как малое возмущение к ньютоновской силе и использовал соответствующие приближенные методы, хорошо известные в небесной механике. Он нашел единственное заметное расхождение с ньютоновской теорией, как раз относящееся к движению перигелия Меркурия. Расчет Тиссерана для смещения перигелия Меркурия приводил, однако, лишь к $14''$ в столетие, т. е. примерно $1/3$ наблюдаемого. При этом предполагалось, что скорость гравитации совпадает со скоростью света. К такому же, в сущности, результату пришел Целльнер (1872), использовавший более грубые, чем у Тиссерана, вычисления В. Шайбнера. Целльнер привел для Меркурия значение смещения его перигелия равное $6,75''$. Это расхождение объяснялось тем, что Шайбнер вместо скорости света с использовал постоянную $c\sqrt{2}$ [186].

* В связи с этим Мак-Кормак заметил: «Лоренц, который восхищался электродинамикой Вебера, построил ее аналог, объединенную картину природы, основанную как на электромагнитном поле, так и на электрических частицах» [455, с. 472].

Ограничившись пока сказанным относительно использования закона Вебера в теории тяготения, для большей краткости и наглядности сведем основные попытки такого рода в таблицу 2. Хотя до утверждения максвелловской теории поля большинство физиков было склонно считать правильным закон Вебера, вполне резонно было проверить, какой результат в отношении смещения перигелия Меркурия дают родственные ему законы Гаусса и Римана. В случае удачи можно было надеяться на то, что именно этот закон следует принять в качестве основного и в гравитации, и в электродинамике.

Требуемое значение этого смещения сначала (по расчетам Леверье) принималось $38''$ в столетие, а после уточненных вычислений Ньюкома было принято $\sim 42''$. Действительно оказалось, что дополнительное смещение перигелия Меркурия для законов Гаусса и Римана ближе к требуемому, составляя примерно $2/3$ его ($28''$). Но разница остается еще слишком велика, чтобы можно было предпочесть какой-либо один из трех законов (тем более, что для законов Римана и Гаусса получается одинаковый результат).

Ж. Шази, автор фундаментальной двухтомной монографии по релятивистской небесной механике [331, 332] дал общую формулу для силы взаимодействия веберовского типа:

$$F_x = -\frac{GM}{r^2} \frac{x}{r} \left(1 - \frac{2\alpha M}{c^2 r} + \frac{2\beta v^2}{c^2} - \frac{3\gamma r'^2}{c^2} \right) + \frac{2GM\lambda r' x'}{r^2 c^2}. \quad (1)$$

Эта формула посредством специализации нескольких характерных параметров приводит к законам Вебера, Римана, Гаусса и некоторым другим.

Коэффициенты α , β , γ , λ — как раз те параметры, специализация которых определяет форму того или иного закона. В случае закона Вебера $\alpha = \beta = \gamma = 1$, $\lambda = 0$; Гаусса — $\alpha = 0$, $\beta = \gamma = 1$, $\lambda = 0$; Римана — $\alpha = 1$, $\beta = \frac{1}{2}$, $\gamma = 0$, $\lambda = 1$. Соответствующая формула для расчета дополнительного опережения перигелия Меркурия:

$$\delta\omega = \frac{2\pi M (-\alpha + 2\beta + 2\lambda)}{ac^2(1 - e^2)}, \quad (2)$$

где a — большая полуось орбиты, e — ее эксцентриситет. Значение, равное требуемому $42''$, получается, когда коэффициент $(-\alpha + 2\beta + 2\lambda)$ равен трем (формула, характерная для ОТО).

Впрочем, желанная тройка для этого коэффициента была получена еще в прошлом веке, и даже дважды. Но оба варианта выглядели слишком искусственно, напоминая «подгонку» под заранее известный ответ. К тому же почти все логико-теоретические изъяны ньютоновской теории в этих случаях оставались незатронутыми. Первый вариант был выдвинут в 1890 г. М. Леви

Т а б л и ц а 2
Применение электродинамических законов веберовского типа в теории тяготения

Закон тяготения	Потенциал взаимодействия	Сила взаимодействия	Дополнительное смещение перагеллия Меркурия в угловых секундах за 100 лет и соответствующие работы (автор, год)
Закон Ньютона	$\frac{GM}{r}$	$-\frac{GM}{r^2}$	0
Закон Вебера	$\frac{GM}{r} \left[1 - \frac{1}{c^2} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 \right]$	$-\frac{GM}{r^2} \left[1 - \frac{2v^2}{c^2} + \frac{2v^2}{c^2} - \frac{3}{c^2} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 \right]$	Seegers (1864) Holzmüller (1870) 14° Zöllner (1872) Tisserand (1872) Servus (1885) J. Bertrand (1890)
Закон Гаусса	$\frac{GM}{r} \left[1 + \frac{2v^2}{c^2} - \frac{3}{c^2} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 \right]$	$-\frac{GM}{r^2} \left[1 + \frac{2}{c^2} v^2 - \frac{3}{c^2} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 \right]$	Tisserand (1890) 28° J. Bertrand (1890)
Закон Римана	$\frac{GM}{r} \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)$	$F_x = -\frac{GM}{r^3} x \left(1 - \frac{2M}{c^2 r} + \frac{v^2}{c^2} \right) + \frac{2GM x'}{r^2 c^2} \frac{dr}{dt}$	O. Liemann (1886) 28° M. Levy (1890)
Закон Гербера	$\frac{GM}{r} \left[1 + \frac{2}{c} \frac{dr}{dt} + \frac{3}{c^2} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 \right]$	$-\frac{GM}{r^2} \left[1 - \frac{3}{c^2} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + \frac{6r}{c^2} \frac{dr}{dt} \right]$	42° P. Gerber (1898)

П р и м е ч а н и е: r —расстояние от точечного источника до точки, где вычисляется потенциал (сила), v —абсолютное значение относительной скорости источника с массой M и единичной массы, помещенной в точку, где вычисляется потенциал, G —гравитационная константа, c —скорость света.

[450], который образовал своеобразную линейную комбинацию из законов Вебера и Римана:

$$V = \frac{GM}{r} \left\{ 1 - \frac{1}{c^2} \left[(1-k) \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + kv^2 \right] \right\}. \quad (3)$$

При $k=0$ этот закон переходил в веберовский, при $k=1$ — в закон Римана, а при $k=2$ он давал тресбумос значение для опережающего значения перигелия Меркурия:

$$\delta\omega = \frac{2\pi M(k+1)}{ac^2(1-e^2)}. \quad (4)$$

Но теоретического обоснования для $k=2$ не было, закон Леви носил явно «подгончный» характер, иллюстрируя все же некоторые потенциальные возможности законов веберовского типа.

Более интересна история со вторым вариантом — законом Гербера [370, 371]. В отличие от Леви, Гербер попытался теоретически обосновать свое выражение для потенциала и силы взаимодействия, опираясь явно на представление о конечной скорости распространения гравитации. Исходным для него был подход К. Неймана, основанный на введении в ньютоновский закон не расстояния r , а расстояния между взаимодействующими точками с учетом времени распространения гравитационного действия $r - \Delta r$, чем учитывался эффект запаздывания

$$V = \frac{Gm_1 m_2}{r - \Delta r} = \frac{Gm_1 m_2}{r(1 - \Delta r/r)}. \quad (5)$$

Но это неймановское выражение при разложении его в ряд по степеням $(1/c)(dr/dt)$ приводит к закону Вебера, т. е. дает лишь $1/3$ наблюдаемого аномального смещения перигелия Меркурия. Поэтому Гербер пытается так модифицировать потенциал Неймана, чтобы он дал требуемое смещение. Оказывается, что это достигается, если использовать следующее выражение для потенциала:

$$V = \frac{Gm_1 m_2}{r(1 - \Delta r/r)^2}. \quad (6)$$

При этом дополнительный множитель $1/(1 - \Delta r/r)$ Гербер вводит на основе недостаточно ясных представлений о характере распространения гравитации. Потенциал Гербера после его разложения в ряд приводит к тому виду, который указан в табл. 2. В конце XIX — начале XX в. решение Гербера не считалось убедительным, хотя его работа цитировалась и в большом обзоре по гравитации Ценнека [588] и в повторных изданиях «Механики» Маха [135].

Спустя 18 лет, уже после того как Эйнштейн на основе ОТО получил объяснение аномалии Меркурия, противники теории относительности вспомнили об этой работе Вебера, указав, что эйнштейновская формула для смещения перигелия

$$\delta\omega = \frac{6\pi M}{ac^2(1-e^2)} \quad (7)$$

уже фигурировала в этой работе. Первым это заметил в 1916 г. один из наиболее активных противников теории относительности — Э. Герке, который также недвусмысленно намекал на то, что Эйнштейн не мог не знать (хотя бы через посредство Маха) о работе Гербера: «Эйнштейн, однако не обратил внимания на то, что другая значительно более простая теория тяготения, выдвинутая Гербером, уже за 18 лет до теории относительности привела к тому же самому результату» [368, с. 122]. Сам Эйнштейн не реагировал в печати на это, так же как и на аналогичные выпады, связанные с предвосхищением эффекта отклонения лучей света в гравитационном поле Зольднером в 1801 г. Но крупные немецкие физики и астрономы, прежде всего Лауэ, Г. Зеелигер, С. Опленгейм, подвергли критике и аргументы Герке, и работу Гербера. Лауэ в 1920 г. резюмировал это следующим образом: «...Гербер просто подогнал правильное его значение (численного коэффициента в формуле для смещения перигелия Меркурия. — В. В.), изменив соответственно без какого-либо физического обоснования математический подход своих двух предшественников [Шайбнера и Тиссерана]» [112, с. 89]. Лауэ полагал, что основы веберовского подхода к гравитации были заложены именно ими.

Едва ли следует сейчас более детально рассматривать «герберовскую» дискуссию, которая, хотя и весьма интересна сама по себе, но не имеет прямого отношения к электромагнитным теориям тяготения на рубеже XIX и XX вв.

В связи с этой дискуссией Лауэ писал: «Столь просто сделанное открытие могло бы иметь значение, если бы Гербер смог вывести математически безупречно уравнение (5) (уравнение движения с герберовской силой:

$$-\frac{GM}{r^2} \left(1 - \frac{3r'^2}{c^2} + \frac{\delta r}{c^2} r'' \right). \text{ — В. В.) из разумных физических представлений.}$$

Тогда его объяснение имело бы то значение, что движение перигелия было бы приведено в соответствие с другими известными фактами...» [112, с. 189]. Далее он заметил, что закон Гербера, так же как и другие законы веберовского типа, строго говоря, являются дальподействующими: «То, что вопреки его [Гербера] мнению распространение гравитации с конечной скоростью не следует из уравнений Гербера, что, наоборот, эти уравнения целиком находятся на почве дальподействия, это мы показали, как думаем, в 1917 в «Ann. Phys.», 53, з. 214 ... Остальное, что преподносит Гербер в качестве физических соображений, нам кажется непонятным. На математические неточности указал Зеелигер («Ann. Phys.», 1917, 53, с. 31). Мы поэтому не можем признать работу Гербера физическим объяснением» [112, с. 189]. В статье, на которую ссылается здесь Лауэ, он показывает, что во всех законах веберовского типа, в том числе и в законе Гербера, ϵr и dr/dt — это расстояние и скорость взаимодействующих тел в один и тот же момент времени» [446, с. 214]. Другими словами, «если тяготение распространяется с конечной скоростью, то физическое состояние в том месте, где находится притягиваемое тело, не

может определяться одновременным положением и скоростью притягивающегося тела, но его положением и скоростью в определенный предшествующий момент времени» [446, с. 214]. Потенциалам веберовского типа он противопоставляет выражения для запаздывающих потенциалов в максвелловской электродинамике, удовлетворяющих этому требованию. Лауэ также заметил, что объяснение аномалии Меркурия в ОТО связано не столько с введенным конечной скорости распространения гравитации, сколько с кривизной пространства — времени. Как известно, даже вполне корректное введение этой скорости, как, например, в теории Нордстрема, не приводит к требуемому смещению перигелия Меркурия.

Зееллигер, на работу которого ссылается Лауэ, показал в 1917 г., что герберовский потенциал не приводит, строго говоря, к требуемому выражению для силы, т. е. $-\frac{GM}{r^2} \left[1 - \frac{3}{c^2} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + \frac{6r}{c^2} \frac{d^2r}{dt^2} \right]$ [525]. С. Опленгейм показал, что закон Гербера является наиболее простым обобщением закона Ньютона или Вебера, дающим требуемое значение для дополнительного смещения перигелия Меркурия. От оценки же физического обоснования, данного Гербером своему закону, он воздержался, полагая, видимо, что это — дело физиков, а не астрономов [495].

В 20-х годах некоторые советские физики и философы, выступая против теории относительности, не менее энергично, чем Герке, «поднимали на щит» работу Гербера. Речь идет, например, о приверженце механистического материализма З. А. Цейтлине, который писал о законе Гербера: «...Формула Гербера, объясняющая движение перигелия Меркурия, отвергается, чтобы 18 лет спустя громко грубить во славу той же формулы как основного доказательства общей теории относительности... Кто читал замечательные работы Гербера, не может не видеть причин отвержения теории Гербера. Теория эта является действительным шагом к решению знаменитой «загадки тяготения» [219, с. 135].

Простой перенос электродинамических законов веберовского типа на гравитацию выглядел, вообще говоря, неоправданным. Можно было говорить об аналогичности электродинамики и гравитации, но не о подлинном синтезе. В 1876 г. Цельзнер объединил идеи Моссотти с веберовской электродинамикой, что привело его к электродинамическому обоснованию закона тяготения в веберовской форме:

$$V = \frac{2n\alpha e^2}{r} \left[1 - \frac{1}{c^2} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 \right], \quad (8)$$

где n — число зарядов e , образующих взаимодействующие тела, α — постоянная Моссотти, выражающая меру электрического притяжения по отношению к электрическому отталкиванию. Побужденный Цельзнером Вебер с 1877 по 1880 г. также принял участие в обсуждении модернизированного варианта теории Моссотти [584, 588, 589].

Электромагнитно-полевая программа и проблема гравитации

Но в это время уже развевывалась и приобретала все большее число приверженцев максвелловская концепция электромагнитного поля. А с другой стороны, многочисленные попытки распространения законов веберовского типа на гравитацию, в частности, и в их комбинации с идеями Моссотти, не были в состоянии устранить эмпирическую трудность, связанную с движением перигелия Меркурия. Да и большинство логико-теоретических недостатков, в сущности, оставались. Даже инстантизм не преодолелся радикально в теориях тяготения веберовского типа, хотя в выражении для гравитационных силы и потенциала входила постоянная, равная скорости света. Уже веберовская электродинамика в этот период (70—90-е годы) встретилась со многими трудностями. Основанные на ней или на аналогии с ней гравитационные теории вызывали еще большие сомнения (введение *ad hoc*-гипотез, трудности с законом сохранения энергии плюс почти все изъяны ньютоновской теории тяготения, за вычетом изоляционизма и, отчасти, феноменологизма и инстантизма).

Вместе с тем, веберовская электродинамика, как мы уже подчеркивали в начале этой главы, не только имела значение как направление, конкурирующее с максвелловской программой. Она очень сильно повлияла на формирование электронной теории — следующего шага в развитии полевой программы. Применение же законов веберовского типа к гравитации и концепция Моссотти — Целльнера, несомненно, служили предпосылкой для развития будущих электромагнитных теорий тяготения. Частичный успех в объяснении аномального смещения перигелия Меркурия создавал определенные надежды на устранение основной эмпирической трудности в теории тяготения на пути установления более тесной связи гравитации с электродинамикой.

К началу 90-х годов максвелловская концепция электромагнетизма получает, наконец, всеобщее признание. В Англии — Дж. Дж. Томсон, Хевисайд, Пойнтинг, Лармор, Лодж, Фицджеральд и др., в Германии и Австрии, несмотря на сильные традиции «дальнодействующей» электродинамики, — Больцман, Герц, Друде и др., во Франции — Пуанкаре, в Голландии — Лоренц, в России — Столетов и Умов и др. активно включаются в разработку теории электромагнитного поля. Решающее значение здесь имели эксперименты Герца, приведшие в 1888 г. к открытию электромагнитных волн. Вскоре, вероятно к 1894—1895 гг., оформляется электромагнитно-полевая научно-исследовательская программа как фундаментальная стратегия научного исследования. Ее возникновение было связано не только с самой теорией поля, но и с попытками связать эту теорию с атомистическими представлениями об электричестве, восходящими к тра-

дициям Вебера и Моссотти. Таким образом, полевая программа возникает на перекрестке собственно полевой теории Максвелла и рождающейся в конце 80-х — начале 90-х гг. электронной теории. Лидерами новой программы оказались Лоренц, Э. Вихерт, Дж. Лармор, Дж. Дж. Томсон и некоторые другие физики*. В 1894 г. Вихерт дал один из первых набросков новой программы. Он рассматривал электромагнитный эфир как первичную реальность, полагая, что заряженные частицы — его возбужденные состояния, а вещество состоит из этих частиц. Он считал, что инертная масса заряженных частиц имеет электромагнитное происхождение. В Англии аналогичные идеи развивали Дж. Лармор, О. Лодж, Дж. Дж. Томсон, которые с начала 90-х годов внесли значительный вклад и в разработку электронной теории. Имелись, впрочем, определенные различия в подходах к электромагнитной картине природы у английских физиков по сравнению с «континентальными»: английские ученые «наделяли эфир механическим понятием массы, считая ее скорее элементарным свойством, нежели выводя ее как вторичное явление из полностью немеханического электромагнитного эфира» [455, с. 460].

С 1892 г. Лоренц начинает разрабатывать электронную теорию, синтезируя максвелловскую полевую концепцию и идею конечной скорости распространения электрических и магнитных действий с атомистическими представлениями об электричестве Вебера и других континентальных физиков. Несмотря на некоторый интерес к возможностям механического обоснования или механической интерпретации электромагнетизма, первый набросок электронной теории Лоренца уже явно выходил за рамки механики. Эфир и заряд в его понимании были явно немеханическими. В дальнейшем антимеханистическая тенденция в работах Лоренца становится все более определенной. В этом же русле протекало развитие электродинамики движущихся сред, которое, наряду с развитием квантовых идей, привело в конечном счете к краху электромагнитной концепции физики.

Дж. Дж. Томсон уже в 1881 г., а вслед за ним Хевисайд, Дж. Ф. Сирл и В. Б. Мортон показали, что кажущаяся электромагнитная масса заряженного тела зависит от скорости его движения. В рамках электродинамики движущихся сред Лоренц в 1899 г. нашел зависимость любой массы от скорости, которая рассматривалась как один из основных аргументов в пользу электромагнитно-полевой программы. После открытия электрона, который был отождествлен Лоренцем с отрицательно заряженной частицей, фигурирующей в его теории, открылись возможности для экспериментальной проверки выводов о зависимости массы от скорости. В 1901 г. Кауфман начинал публиковать сообщения о такого рода экспериментах, которые, подтвер-

* Детальный анализ процесса формирования электромагнитной программы и роли в нем электронной теории дан Р. Мак-Кормаком [455].

див наличие зависимости массы электронов от скорости, убедили Лоренца и многих других физиков в электромагнитной природе массы электрона.

Электромагнитно-полевую программу в духе глобального замысла Вебера Лоренц изложил в своей известной лейденской лекции 1900 г. [455]. Он воспроизвел почти все достижения веберовского подхода к объяснению молекулярно-кинетических и химических явлений. Открывающаяся перспектива электромагнитного синтеза всего многообразия физических явлений и, прежде всего, электромагнитного обоснования наиболее фундаментальных понятий, таких, как масса, сила и т. д., требовала и гравитацию включить в эту программу. И электромагнитные теории тяготения не замедлили появиться, причем весьма важным здесь оказался тот запас идей и подходов, который был создан в рамках веберовской «электрической программы».

Стратегия электромагнитно-полевой программы сводилась к включению того или иного явления или соответствующих теоретических представлений в рамки электронной теории. В конечном же счете заряженные частицы предполагалось свести к электромагнитному полю.

Максвелл и энергетическая трудность полевой теории тяготения. Задолго до общего признания теории электромагнитного поля, когда даже и сама эта теория не была еще вполне развита, Максвелл рассмотрел возможность полевого подхода к гравитации. В его «Динамической теории электромагнитного поля» имеется небольшой раздел «Замечание о действии силы тяготения», в котором Максвелл, исходя из аналогии между законом Кулона и законом Ньютона, приходит к вопросу, «нельзя ли свести притяжение гравитации... к действию окружающей среды» [127, с. 308]. Но, из-за того, что ньютоновский закон приводит к притяжению, а не к отталкиванию, возникает существенная трудность энергетического характера. Простыми рассуждениями Максвелл показывает, используя антианалогию гравитационного притяжения с отталкиванием одноименных магнитных полюсов, что внутренняя энергия поля тяготения должна определяться формулой:

$$E = C - \sum \frac{1}{8\pi} R^2 dV, \quad (9)$$

где R — напряженность гравитационного поля, а C — некоторая постоянная. «Следовательно, — приходит к выводу Максвелл, — внутренняя энергия поля должна быть меньше там, где существует результирующая сила тяготения» [127, с. 309], т. е., попросту, гравитационное поле. «Так как, — делает следующий шаг Максвелл, — всякая энергия по своему существу положительна, то невозможно, чтобы какая-либо часть пространства обладала отрицательной внутренней энергией. Поэтому те части пространства, в которых нет результирующей силы, как, например, точки равновесия в пространстве между различными телами системы

и внутри вещества каждого тела, должны обладать внутренней энергией на единицу объема, большей на $(1/8\pi)R^2$, где R — наибольшее возможное значение силы тяготения в любой части вселенной» [127, с. 310]. Таким образом, «предположение, что тяготение возникает от действия окружающей среды указанным выше путем (при полевом подходе к гравитации.— В. В.), приводит к заключению, что каждая часть этой среды обладает, будучи невозмущенной (т. е., фактически, пустое пространство.— В. В.), громадной внутренней энергией и что присутствие плотных тел влияет на среду в сторону уменьшения этой энергии, где только имеется результирующее притяжение» [там же]. Этот парадоксальный результат поставил под сомнение возможность распространения полевых представлений на гравитацию уже в самом начале формирования электромагнитно-полевой программы, и Максвелл заключил свой экскурс в проблему гравитации следующими словами: «Поскольку я не могу понять, каким образом среда может обладать такими свойствами, я не могу идти дальше в этом направлении в поисках причины тяготения» [там же].

Другая принципиальная трудность, как мы уже отметили, была указана еще Лапласом, который полагал, что наличие конечной скорости распространения гравитации приводит к дополнительному члену в силе притяжения, равному в простейшем случае $(m_1 m_2 / r^2) (v/V)$ (v — скорость притягиваемой массы m_2 , V — скорость распространения гравитации), что не вызывает заметных возмущений лишь при $V \sim 10^8$ с (c — скорость света). К несколько меньшим допустимым скоростям пришли в начале 90-х годов Геппергер ($0,5 \cdot 10^8$ с) и Леман-Фильес ($5 \cdot 10^8$ с), а также Оппольцер [338, 588]. Вместе с тем, выход за рамки ньютоновского закона на основе законов веберовского типа наводил на мысль о возможности принятия скорости света в качестве скорости гравитации. В этих законах дополнительные члены в законе притяжения были пропорциональны v^2/c^2 , и это не только не приводило к новым аномалиям в движении небесных тел, но и давало серьезную надежду на устранение главной эмпирической аномалии, связанной с движением перигелия Меркурия. Однако законы этого типа были прочно связаны с «дальнодействующей» традицией.

Пытаясь преодолеть трудности, связанные с гравитационным парадоксом, А. Феппл в 1897 г., как мы указывали ранее, ввел понятие отрицательных масс, взаимодействие которых с положительными массами должно было проявляться в их отталкивании*. Следуя электродинамической аналогии, он, в сущности,

* Несколько раньше, в 1885 г., идею отрицательных масс использовал К. Пирсон в своей «гидродинамической» модели гравитации. В другой статье (1891 г.) он говорит, что материя была создана в равных и противоположных по знаку количествах, и выдвигает предположение, что быстро удаляющаяся звезда «1830 Возничего», имеющая самое большое собственное движение по

развивает максвелловский подход к гравитации. Естественно, что гравитационный парадокс при этом устраняется, а отсутствие наблюдаемых отрицательных масс он объясняет тем, что взаимодействие их с наблюдаемыми телами нашей Вселенной привело эти массы к удалению на расстояния, недоступные для наших наблюдений. Но теория Фейлпа приводила к той же самой трудности, которую еще в 1865 г. отметил Максвелл [56]. Аналогичные идеи, не взирая на «энергетическую» трудность, разрабатывал также Хевисайд [386], который полагал, что теория тяготения должна содержать второе поле, подобное магнитному. Только в этом случае гравитация могла бы описываться уравнениями типа Максвелла. Но работы Хевисайда прошли незамеченными [4].

Электромагнитная теория тяготения Лоренца

Первой детально разработанной теорией тяготения, основанной на электромагнитно-полевой программе, стала теория Лоренца. В 1900 г. он опубликовал работу, в которой рассмотрел два возможных варианта сведения гравитации к электромагнетизму [451]. Первый представлял собой электромагнитный аналог теории Лесажа. Теория Лесажа в 70-х годах была возрождена В. Томсоном. Главная трудность, с которой встретилась эта теория, была отмечена Максвеллом и была связана с нарушением принципа сохранения энергии. Лоренц заменяет ультрамикровые частицы Лесажа — Томсона короткими электромагнитными волнами типа рентгеновских. Рассуждения в духе Лесажа, использующие, однако, соотношения теории электромагнитного поля, прежде всего выражения для давления излучения, приводят к силе взаимодействия, обратно пропорциональной квадрату расстояния между взаимодействующими телами. Таким образом, замена частиц электромагнитными волнами не устраняла главной трудности. «Но при этом,— указывает сам Лоренц,— возникает непрерывная потеря энергии, и этого достаточно, чтобы отвергнуть такое объяснение (т. е. основанное на описанной схеме Лесажа.— В. В.)» [451, с. 205]. К электромагнитному варианту теории Лесажа, забракованному Лоренцем, в 1905 г. обращался Дж. Х. Дарвин [336], а в 1908 г.— и Пуанкаре [176], осознавая, однако, те огромные трудности, которые стояли на ее пути. Дарвин, в сущности, показал, что требуемая законом Ньютона обратно пропорциональная зависимость притяжения от расстояния получается, если считать лессажевские частицы неупругими. В электромагнитном варианте это эквивалентно поглощению гравитирующими телами электромагнитного излучения, вызывающего эффект Лесажа. В результате Пуанкаре приходит к выводу, повторяющему и даже усиливающему оценку Лоренца:

данным того времени, возможно, имеет отрицательную массу, а потому выталкивается из нашей области и пространства [56, с. 135].

«Итак, не может быть притяжения без поглощения света (или соответствующего «лесажевского» излучения.— В. В.) и, следовательно, без возникновения тепла. Это убедило Лоренца отказаться от предложенной им теории, не отличающейся по существу от теории Лесажа — Максвелла — Бартоли (давление Максвелла — Бартоли — другое название для давления электромагнитного излучения.— В. В.). Он бы еще более ужаснулся, если бы продвинул вычисления до конца. Тогда он нашел бы, что температура Земли должна повышаться на 10^{15} градусов в секунду» [176, с. 514].

Отказавшись от квазилесажевской схемы, Лоренц обращается к концепции Моссотти — Целльнера — Вебера в электромагнитно-полевом воплощении. В сущности, основная идея та же самая: притяжение между разноименными зарядами несколько сильнее, чем отталкивание одноименных зарядов. Достаточно принять, что различие в этих силах составляет 10^{-36} . Иначе говоря, если α — отталкивание одноименных единичных зарядов на единичном расстоянии, а β — соответственно, притяжение, то для объяснения ньютоновского притяжения достаточно принять

$$2 \frac{\beta - \alpha}{\alpha} = 10^{-36}. \quad (10)$$

Лоренц предположил, что нейтральные частицы вещества состоят из одинакового числа положительных и отрицательных электронов или, в простейшем случае, что противоположно заряженные электроны движутся связанными парами. Далее, обозначив напряженности электрического и магнитного полей, создаваемых положительным электроном e через \mathbf{D} и \mathbf{H} , а отрицательным электроном e' — через \mathbf{D}' и \mathbf{H}' , он представил силы, действующие на e со стороны положительных электронов, как

$$\mathbf{k}_1 = \alpha (4\pi c^2 \mathbf{D} + \mathbf{v} \times \mathbf{H}) e \quad (11)$$

и со стороны отрицательных электронов как

$$\mathbf{k}_2 = \beta (4\pi c^2 \mathbf{D}' + \mathbf{v} \times \mathbf{H}') e. \quad (12)$$

Аналогичные силы, действующие на отрицательный заряд e' , он записал в виде:

$$\mathbf{k}_3 = \beta (4\pi c^2 \mathbf{D} + \mathbf{v}' \times \mathbf{H}) e' \quad (13)$$

$$\mathbf{k}_4 = \alpha (4\pi c^2 \mathbf{D}' + \mathbf{v}' \times \mathbf{H}') e'. \quad (14)$$

Постоянные α и β , определяющие относительную силу взаимного притяжения разноименных зарядов и отталкивания одноименных, предполагались различными. Вся дальнейшие естественные предположения

$$\mathbf{D}' = -\mathbf{D}, \quad \mathbf{H}' = -\mathbf{H}, \quad e' = -e,$$

Лоренц вычисляет силы, действующие на e и e' :

$$\mathbf{k}_e = \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 = \mathbf{k}_1 - (\beta/\alpha) \mathbf{k}_1 = \mathbf{k}_1 (1 - \beta/\alpha), \quad (15)$$

$$k_e := k_3 + k_4 = k_4 (1 - \beta/\alpha). \quad (16)$$

Таким образом, эти силы оказываются равными по величине и направлению, хотя и действуют на противоположные по знаку заряды. Поэтому Лоренц считал возможным отождествить их при соответствующем выборе константы $2(1 - \beta/\alpha)$ с гравитационными силами. Отсюда также следовало, что суммарная сила тяготения, действующая между двумя телами, пропорциональна числу электронов (положительных и отрицательных), составляющих эти тела. С другой стороны, согласно электромагнитной концепции инертной массы, важнейшего элемента электромагнитно-полевой программы, инертная масса должна быть также пропорциональна числу заряженных частиц. Ланжвен в 1903 г., имея в виду теорию Лоренца, заметил: «Таким образом, гипотеза, согласно которой вся инерция материи имеет электромагнитное происхождение, сразу же объясняет пропорциональность, существующую между обычной механической массой, или коэффициентом инерции, и массой астрономической, или коэффициентом ньютоновского притяжения. Оба эти коэффициента оказываются здесь пропорциональными числу заключенных в атоме корпускул» [107, с. 71]. Тем самым, теория Лоренца, включаясь в электромагнитно-полевую программу, давала естественное объяснение известному со времен Галилея и Ньютона фундаментальному факту равенства (или пропорциональности) инертной и гравитационной масс. Теория приводила и к другим важным выводам. Во-первых, она приводила к конечной скорости распространения гравитации, равной скорости света. Во-вторых, она согласовывалась с принципом относительности в формулировке Лоренца, поскольку включалась в рамки электронной теории. Это обстоятельство специально подчеркивал Пуанкаре: «...так как гравитация сводится к силам электрофизического происхождения, то к ней применима общая теория Лоренца (электронная теория. — В. В.) и, следовательно, не нарушается принцип относительности» [176, с. 509].

Лоренц рассматривал также другую интерпретацию своей теории, независимую от предположений об электронной структуре вещества. Он считал возможным рассматривать гравитационное поле как вполне аналогичное электромагнитному с присущими ему гравитационными напряжениями D^g и H^g , которые должны удовлетворять уравнениям, эквивалентным (формально) уравнениям Максвелла (т. е. в духе Хевисайда). В формальном отношении оба варианта были равноценны. Для неподвижных тел они давали закон Ньютона, а в случае движущихся тел закон их взаимодействия, как показал Лоренц, оказывался близким к законам веберовского типа и включал квадратичные скоростные члены. Если обозначить скорость одного тела p^* , другого — w , а

* В случае расчета движения некоторой массы вокруг центрального тела p — скорость этого тела.

расстояние между ними r , то к статической ньютоновской составляющей, согласно Лоренцу, следовало добавить еще четыре дополнительных члена следующего вида:

$$k \frac{p^2}{2c^2} \frac{r}{r^3}; \quad - \frac{k}{2c^2} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p_x^2}{r} \right), \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{p_y^2}{r} \right), \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{p_z^2}{r} \right) \right\}, \quad (17)$$

$$\frac{k}{c^2} \frac{1}{r^2} \frac{dr}{dt} p; \quad \frac{k}{c^2} \frac{1}{r^2} p \omega \cos \vartheta \frac{r}{r}.$$

Все эти добавочные члены содержат квадратичные скоростные отношения типа v^2/c^2 . Лоренц использовал соответствующий закон движения для расчета планетных движений (по формулам Тиссерана). Оказалось, что дополнительных аномалий не возникает. Но и дополнительный вклад в секулярное смещение перигелия оказался слишком мал даже по сравнению с веберовским, равным $14''$. Учет зависимости массы от скорости (а об этой зависимости Лоренц уже знал по крайней мере в 1899 г.), как вскоре показали Вакер и Вилкенс, дал бы несколько лучший результат (порядка $7''$ в столетие), но все равно в два раза меньший, чем у Вебера.

Неудача в объяснении аномалии Меркурия не казалась, впрочем, непреодолимой, так как скоростные добавочные члены были аналогичны соответствующим членам в законах Вебера, Гаусса и Римана, которые создавали определенные надежды на устранение этой аномалии. Главная цель все же была достигнута. Удалось построить полевою электромагнитную (или «квазиэлектромагнитную») теорию тяготения, согласно которой гравитация распространялась с конечной скоростью, практически совпадающей со скоростью света. Тем самым изоляционизм, феноменологизм и инстантизм в значительной мере устранялись. Определенное истолкование, отсутствовавшее, впрочем, у самого Лоренца, получал также фундаментальный факт равенства инертной и гравитационной масс. Несколько более туманными представлялись перспективы устранения финитизма, например на пути введения отрицательных масс в духе Фейнмана по аналогии с существованием положительных и отрицательных зарядов в электродинамике. Поэтому, несмотря на то, что геометрические «пизмы» и аномалия Меркурия в лоренцевой теории сохранялись и что добавлялись даже некоторые новые трудности (отмеченная Максвеллом «энергетическая» трудность, ненаблюдаемость «квазиэлектромагнитной» компоненты напряженности гравитационного поля H^2 , ad hoc-характер введения постоянной $2(1-\beta/\alpha) \sim 10^{-25}$ и др.), она вызвала большой интерес и многими рассматривалась как перспективное направление на пути к окончательному решению гравитационной проблемы.

Теория Вина. В Германии теория Лоренца была поддержана и развита В. Вином, Р. Гансом, Вакером, Вилксисом и др., во Франции — Ланжевеном, Пуанкаре и др., в Англии — Дж. Дж. Томсоном, Мак-Ларсоном и др.

Вин в 1898 г. более тесно связал лоренцеву теорию с электромагнитно-полевой программой [455]. В отличие от Лоренца, он явно провозгласил полностью электромагнитное происхождение массы. Он также безоговорочно принял положение об электронной структуре вещества и подчеркивал глубокое родство гравитации и инерции; в работе же 1901 г. он раскрыл соответствующие возможности, содержащиеся в подходе Лоренца [576]. Инерция и гравитация были связаны с электронным строением материи, которое должно было полностью описываться уравнениями Максвелла — Лоренца. Инертная и гравитационная массы, обе, оказывались пропорциональными числу зарядов, и этим достигалось, как мы уже отмечали, определенное истолкование факта равенства этих масс. Однако закон движения у Вина несколько отличался от лоренцевского, поскольку для массы (как инертной, так и гравитационной) он использовал соотношение

$$m = \frac{4}{3} E_0 / c^2, \quad (18)$$

которое было получено им на основе работ Хевисайда (1889) и Сирла (1897) *. В соответствии с расчетами Сирла энергия поля движущегося эллипсоида Хевисайда определялась по формуле

$$E = E_0 \frac{1 + \frac{1}{3} v^2 / c^2}{(1 - v^2 / c^2)^{3/4} \arcsin(v/c)}. \quad (19)$$

Обозначив $\beta = v/c$ и разлагая E в ряд по степеням β , Вин находит:

$$E = E_0 (1 + \frac{2}{3} \beta^2 + \frac{16}{45} \beta^4 + \dots). \quad (20)$$

Приравнявая второй член $\frac{2}{3} (E_0 \beta^2)$ кинетической энергии электрона $mv^2/2$, он получает известную формулу

$$m = \frac{4}{3} (E_0 / c^2).$$

Вин использует эту же формулу и для гравитационной массы и, применяя закон сохранения энергии, решает приближенно зада-

* Хевисайд продолжил развитие идеи Дж. Томсона (1881) об электромагнитной массе электрона и получил формулу $m = \frac{4}{3} (E_0 / c^2)$, где E_0 — электромагнитная энергия заряженной сферы. Сирл, однако, нашел, что в общем случае следует рассматривать не сферу, а так называемый эллипсоид Хевисайда, главные оси которого находятся в отношении $(1 - v^2/c^2) : 1 : 1$. При движении этого эллипсоида со скоростью v в направлении 1-й оси его поле совпадает с полем равного ему точечного заряда, движущегося с этой же скоростью [56, с. 145].

чу о движении эллипсоидальной массы в центральном поле неподвижной массы. В результате он приходит к уравнению

$$\frac{1}{r} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 \left(1 + \frac{16}{15} \frac{GM}{r} \frac{1}{c^2} \right) = \frac{GM}{r}, \quad (21)$$

которое с точностью до расхождений в числовых коэффициентах совпадало с соответствующим уравнением для закона Вебера.

В 1901 г. В. Кауфман, приверженец электромагнитной программы и автор экспериментальных работ по проверке зависимости массы электронов от скорости, выступая на собрании немецких естествоиспытателей, перечислил проблемы, стоящие перед этой программой. Одна из главных проблем заключалась в экспериментальной проверке теории Вина [455].

Теория Ганса. Другую модификацию теории Лоренца дал Р. Ганс, который, конкретизировав представления о структуре вещества, пришел к некоторым новым выводам, возможно, допускающим экспериментальную проверку [366]. Он также обсуждал вопрос о незранируемости гравитации в противовес электромагнитным силам. При этом им были использованы только что разработанные Лоренцем, Друде, Дж. Дж. Томсоном и другими представления электроннои теории металлов. Ганс исходил из уравнений электронной теории, записанных для напряженностей полей, создаваемых отдельно положительными и отрицательными зарядами:

$$\begin{aligned} c \operatorname{rot} \mathbf{H}_+ &= \frac{\partial \mathbf{E}_+}{\partial t} + \rho_+ \mathbf{v}, & c \operatorname{rot} \mathbf{H}_- &= \frac{\partial \mathbf{E}_-}{\partial t} + \rho_- \mathbf{v}, \\ -c \operatorname{rot} \mathbf{E}_+ &= \frac{\partial \mathbf{H}_+}{\partial t}, & -c \operatorname{rot} \mathbf{E}_- &= \frac{\partial \mathbf{H}_-}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \mathbf{E}_+ &= \rho_+, & \operatorname{div} \mathbf{E}_- &= \rho_-, \\ \operatorname{div} \mathbf{H}_+ &= 0, & \operatorname{div} \mathbf{H}_- &= 0. \end{aligned} \quad (22)$$

Сила, действующая на частицу, которая содержит заряды ρ_+ и ρ_- и движется со скоростью \mathbf{v} , может быть тогда (в соответствии с концепцией Моссогги-Целльнера) записана в виде

$$\mathbf{f} = \rho_+ \{ \alpha \mathbf{E}_+ + \beta \mathbf{E}_- + \{ \mathbf{v}/c \times (\alpha \mathbf{H}_+ + \beta \mathbf{H}_-) \} \} + \rho_- \{ \beta \mathbf{E}_+ + \alpha \mathbf{E}_- + \{ \mathbf{v}/c \times (\beta \mathbf{H}_+ + \alpha \mathbf{H}_-) \} \}. \quad (23)$$

Коэффициенты α и β имеют тот же смысл, что и в теории Лоренца. Это выражение для поперечной силы переходит в обычную силу Лоренца, если положить

$$\alpha = \beta, \quad \mathbf{E} = \mathbf{E}_+ + \mathbf{E}_-, \quad \mathbf{H} = \mathbf{H}_+ + \mathbf{H}_-, \quad \rho = \rho_+ + \rho_-.$$

Умножая первую («плюсовую») систему уравнений Максвелла на β , а вторую («минусовую») — на α и складывая их, Ганс получает стандартную систему уравнений Максвелла для эффективных напряженностей

$$\mathbf{E} = \beta \mathbf{E}_+ + \alpha \mathbf{E}_-, \quad \mathbf{H} = \beta \mathbf{H}_+ + \alpha \mathbf{H}_-$$

и эффективную плотность заряда $\rho = \beta\rho_+ + \alpha\rho_-$.
 В этом случае силу f можно пересписать в форме:

$$f = -\frac{\beta^2 - \alpha^2}{\alpha} \rho_+ \left\{ \mathbf{E}_+ + \left[\frac{\mathbf{v}}{c} \times \mathbf{H}_+ \right] \right\} + \frac{\rho}{\alpha} \left\{ \mathbf{E} + \left[\frac{\mathbf{v}}{c} \times \mathbf{H} \right] \right\}. \quad (24)$$

Этой последней формуле можно дать любопытную физическую интерпретацию. Отличие от обычной электронной теории заключено в первом члене, который содержит константу $(\beta^2 - \alpha^2)/\alpha$, отождествленную Гансом с гравитационной постоянной. Гравитационный член, как мы видим, определяется, согласно Гансу, только положительными зарядами и, в статическом случае ($\mathbf{H}_+ = 0$), дает для двух частиц ньютоновский закон притяжения. В нестатическом случае появляются дополнительные силы, которые уже были вычислены Лоренцем, как и их влияние на движение планет. Из гансовского представления теории Лоренца следовало, в частности, что β -лучи и вообще отрицательные электроны не подвержены гравитации. Таким образом, равенство инертной и гравитационной масс в его подходе было приближенным, определялось структурой вещества и не выполнялось для отрицательных электронов. Формула Ганса давала также очевидное объяснение отсутствия экранирующего эффекта для гравитации, который имел место в электростатике (при использовании металлических экранов). Теория Ганса направляла мысль исследователей гравитации на поиски разнообразных гравитационных явлений, связанных со структурой вещества. В этом отношении характерен заключительный абзац его статьи: «Если в некоторых веществах допустить вращательные движения положительных электронов, то на основе выше изложенной теории можно было бы объяснить изменение гравитации (веса.— *V. V.*) при известных химических реакциях, которые наблюдались Ландольтом и Хейдвайлером. Наблюдаемый эффект можно было бы связать с влиянием вращения Земли на эти вещества. Но тогда этот эффект должен был бы зависеть от географической широты» [366, с. 805]*.

Многие исследователи продолжали разрабатывать и другие варианты электромагнитного подхода к проблеме тяготения, основанные на идеях Лесажа и лучистого давления электромагнитных волн (Дж. Х. Дарвин, 1905 г. [336], Т. Томмазина,

* Г. Ландольт в 1893 г. проводил эксперименты по восстановлению сернистого серебра, в результате чего пришел к выводу об изменении веса веществ до и после реакции. Эти различия, как он считал, были больше ошибок измерения, присущих его методу. А. Хейдвайлер, продолжив аналогичные опыты, также сделал вывод: «может быть с определенностью установлено, что имеет место различие в массах в случае реакции железа на медном купоросе» (цит. по [56, с. 192]). Уже в 1898 г. Ф. Сэнфорд и Л. Рэй полагают, что эффекты такого рода своим происхождением обязаны еще не известной связи, которая может существовать между электромагнетизмом и гравитацией. Впоследствии Д. Пекар показал, что описанные Ландольтом и Хейдвайлером аномалии можно объяснить неточностями взвешивания, связанными с тепловым расширением сосудов с образцами [56].

1908 г. [548], О. Келлер, 1908 г. [4] и др.). Но теории этого типа не согласовывались, как правило, с принципом сохранения энергии: необходимо было допускать исчезновение огромных количеств энергии, так как в противном случае все тела весьма быстро должны были бы разогреться до миллиардных температур.

Пуанкаре, электромагнитные теории тяготения и подход Ритца. Пуанкаре в 1908 г. склонен был в области учения о тяготении примкнуть к направлению Лоренца — Вина — Ганса, которое входило в рамки электромагнитно-полевой программы и, как будто, не приводило к вопиющим расхождениям с принципом сохранения энергии. К тому же теории этого типа в пределах малых скоростей гравитирующих тел (по сравнению со скоростью света) давали ньютоновский закон, а возмущения, вызванные учетом этих скоростей, не приводили к новым наблюдаемым аномалиям в движении планет. Наконец, как отмечал Пуанкаре, «так как гравитация сводится к силам электродинамического происхождения, то к ней применима общая (электронная. — В. В.) теория Лоренца и, следовательно, не нарушается принцип относительности» [176, с. 509]. Здесь мы уже касаемся непосредственно подхода к гравитации, основанного на СТО, которая в это время (к 1908 г.) уже вошла в арсенал теоретической физики. Пуанкаре, как мы увидим, и сам внес основополагающий вклад в развитие спецрелятивистских теорий тяготения и вообще своими работами способствовал формированию релятивистской программы, лидером которой стал Эйнштейн.

Но прежде чем перейти к рассмотрению этой программы и ее роли в решении проблемы гравитации, сделаем несколько замечаний об электромагнитном подходе к гравитации, который разрабатывался В. Ритцем. Ритц, как известно, развивал эмиссионную электродинамику, призванную замесить теорию Максвелла — Лоренца. Он считал, что неудачи электромагнитных теорий тяготения были связаны именно с тем, что они опирались на некорректную электродинамику: «Если два столетия напряженных исследований не дали нам никакого результата в установлении взаимосвязи гравитации с другими явлениями, прежде всего электрическими силами, и если нам до сих пор ничего не известно о конечной скорости ее распространения, то, возможно, это вызвано лишь несовершенством наших знаний о законах электродинамики» [518, с. 477]. Рассмотрев теорию Лоренца и указав на ее достоинства, он заметил: «Итак, сведение гравитации к электродинамике в принципе почти возможно, причем получается близкий порядок величины в отношении аномалии Меркурия. Но сама электродинамика еще не завершена, и изменения в ней могут привести к успешному сведению гравитации к электродинамике» [там же]. Подход Ритца выходил за рамки электромагнитно-полевой программы, поскольку та опиралась на электродинамику Максвелла — Лоренца, но и не включался в схему релятивистской программы, которая к концу первого десятилетия XX в. окрепла и приобрела много авторитетных сторонников.

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ПРОГРАММА И ПРИНЦИП ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ

1. СТО и гравитация

Возможно ли найти такой закон, который удовлетворил бы условиям, поставленным Лоренцем (преобразованиям Лоренца.— В. В.) и одновременно бы сводился к закону Ньютона во всех случаях, когда скорости небесных тел достаточно малы?..

А. Пуанкаре (1906)

И вот разорваны трех измерений узы,
И открываются всемирные моря...

О. Мандельштам. «Адмиралтейство» (1913)

Релятивистская программа

Создание СТО оказалось решающим шагом на пути к современной теории тяготения. Именно на основе СТО к концу первого десятилетия (1906—1911 гг.) утверждается новая стратегия физического исследования — релятивистская программа, которая стала постепенно вытеснять электромагнитно-полевую программу. Использование релятивистской программы в области теории тяготения привело, в конечном счете, к ОТО. Однако этот путь, как мы увидим, оказался сложным и многоступенчатым. На первых порах электромагнитная и релятивистская программа резко не различались. Это было вполне понятно, поскольку сама СТО формировалась в значительной мере в рамках электродинамики движущихся сред и, таким образом, на основе электромагнитно-полевой программы. Основоположники этой программы Лоренц, Лармор, Пуанкаре и другие внесли значительный вклад и в создание СТО. Более того, несмотря на приверженность этих ученых к электромагнитной программе, некоторые из них, например Пуанкаре, Лоренц, своими исследованиями дали первые примеры использования релятивистской программы. В дальнейшем, правда, эти классики релятивизма, скорее, остались на позициях электромагнитной программы. Подлинным лидером релятивистской программы стал Эйнштейн. Вскоре на рельсы этой программы встали Планк, Минковский, Лауэ, Зоммерфельд, Борн, Лауб, Герглотц, Ланжевэн, Бэйтмэн и др. Конечно, успехи релятивистской программы были связаны с тем, что она исключала из своего рассмотрения ряд проблем электромагнитной программы, относящихся к структуре вещества и из-

лучения. Многие физики, занимавшиеся этими фундаментальными проблемами (строение атома, радиоактивность, спектры, начала квантовой теории и т. д.), не определяли своего отношения к обсуждаемым здесь программам.

В области же учения о гравитации, которое, правда, не находилось на передовых рубежах физической науки, несмотря на затянувшийся кризис, происходило отчетливое разграничение электромагнитной и релятивистской программ.

Электромагнитные теории тяготения Лоренца—Вина—Ганса были значительным шагом вперед в освоении электромагнитной программой мира гравитации. Устраняя изоляционизм, феноменологизм, инстантизм и в известной мере эмпиризм ньютоновской теории тяготения, они создавали определенную надежду и на объяснение секулярного смещения перигелия Меркурия. Электромагнитные теории тяготения можно было рассматривать как последовательные векторные теории поля*. При этом, следуя Лоренцу, можно было считать гравитацию либо чисто электромагнитным явлением, либо аналогичным электромагнетизму по своей структуре. Электромагнитные теории тяготения, которые приводили к новым существенным трудностям (проблемы энергии, гравитационного «магнетизма», искусственный характер идеи Моссотти—Цельнера, множественность возможных теоретических построений, неудачи с объяснением аномалии Меркурия и т. д.) так же, как и сама электромагнитная программа, выглядели как заманчивый и вполне реализуемый проект, но ни в коей мере не как утвердившиеся теоретические схемы.

В начале первого десятилетия XX в. внутри самой электромагнитной программы оформляются расходящиеся направления (связанные, например, с различными представлениями о структуре электрона) и нарастают трудности и противоречия, попытки разрешения которых, в конечном счете, привели к СТО, а затем — и к релятивистской программе. Кризисные явления в электромагнитной программе в целом, конечно, бросали дополнительную тень и на электромагнитные теории гравитации. Но, поскольку СТО во многих своих основных положениях вызревает в недрах электродинамики (и электромагнитной программы), первые наброски релятивистских теорий тяготения возникают также в лоне электромагнетизма, до явного оформления релятивистской программы. Конкретизируем вкратце содержание программы, ядром которой стала СТО. Универсальность пространства и времени и связанного с ними специального принципа относительности, формулируемого в терминах лоренц-ковариантности основных уравнений физики, требовали такой перестройки существующих

* Классификацию теорий поля, в частности теорий гравитационного поля, по размерности потенциала впервые явно ввел Абрагам [317]. Электромагнитные теории, естественно, были отнесены к векторному типу. Теории Абрагама, Нордстрема, Ми, а также статические теории Эйнштейна — к скалярному, и, наконец, теория Эйнштейна-Гроссмана — к тензорному типу.

теорий (или такого построения новых теорий), чтобы они (эти теории) были лоренц-ковариантны и в нерелятивистском пределе совпадали со своими классическими аналогами. Последовательный релятивизм требовал также отказа от эфира и явного использования релятивистских понятий и соотношений, относящихся к пространству и времени, массе, энергии, импульсу, силе и т. д. Многие из этих соотношений уже фигурировали в рамках электромагнитной программы, например, преобразования Лоренца, зависимость массы от скорости, универсальность скорости света и т. д. Лоренц, как известно, уже в 1899 г. пришел к выводу о зависимости массы от скорости, получившей впоследствии в рамках СТО обоснование, независимое от электронной теории [169, 398, 455]. Эта зависимость базировалась на модели деформируемого электрона и для продольной и поперечной масс описывалась формулами *:

$$m_{\text{прод}} = m_0(1 - \beta^2)^{-1/2}; \quad m_{\text{поп}} = m_0(1 - \beta^2)^{-3/2}. \quad (1)$$

В 1902—1903 гг. Абрагам, ставший одним из главных глашатаев электромагнитной программы, разрабатывая на основе работ Лоренца и Пуанкаре концепцию электромагнитной массы и динамику электрона, отметил непоследовательность лоренцева подхода, требовавшего для объяснения устойчивости электрона введения сил неэлектромагнитного происхождения, и выдвинул модель твердого (недеформируемого) электрона, которая позволяла избежать введения неэлектромагнитных сил. В результате Абрагам пришел к несколько более сложным формулам, описывающим зависимости продольной и поперечной масс от скорости [80, 373]**

$$m_{\text{прод}} = m_0 \frac{3}{4} \frac{1}{\beta^2} \left\{ -\frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{1+\beta}{1-\beta} \right) + \frac{2}{1-\beta^2} \right\},$$

$$m_{\text{поп}} = m_0 \frac{3}{4} \frac{1}{\beta^2} \left\{ \left(\frac{1+\beta^2}{2\beta} \right) \ln \frac{1+\beta}{1-\beta} - 1 \right\}. \quad (2)$$

* Основное значение имела формула для поперечной массы, описывающая изменение массы при криволинейном движении с постоянной по абсолютной величине скорости. Понятия продольной и поперечной массы были введены Лоренцем в 1899 г. [56, 455].

** Другая запись этих формул, использовавшая представление m_0 в виде электромагнитной массы:

$$m_0 = e^2/6\pi R c^2$$

и разложение выражений, стоящих в фигурных скобках, в ряде по степеням β [124, с. 71]:

$$m_{\text{прод}} = \frac{e^2}{4\pi R c^2} (2/3 + 4/5\beta^2 + 6/7\beta^4 + \dots),$$

$$m_{\text{поп}} = \frac{e^2}{8\pi R c^2} [(1 + 1/3) + (1/3 + 1/5)\beta^2 + (1/5 + 1/7)\beta^4 + \dots].$$

С результатами опытов Кауфмана (1900—1906 гг.) по измерению зависимости массы электронов от скорости лучше согласовывались формулы Абрагама, который, как и Кауфман, считал решенным вопрос о выборе между своей теорией и теорией Лоренца. Однако Лоренц в 1904 г. и Планк в 1906 г. показали, что эксперименты Кауфмана не позволяют сделать однозначный выбор между этими теориями. В 1908—1914 гг. трудами Гайля, Бухсера, Ратновского, Неймана и Триккера окончательный выбор был определен в пользу теории Лоренца, которая давала те же формулы, что и СТО. Трудность такого выбора определялась тем, что при скоростях электронов порядка $0,8c$ разница между формулами составляла примерно 5%, что было близко к точности опытов Кауфмана [80, 124].

Учет релятивистской зависимости массы от скорости (Вакер, Вилкенс). Идея зависимости массы от скорости была подхвачена теми исследователями, которых волновали проблемы гравитации и небесной механики. В 1904—1906 гг. молодые немецкие теоретики Ф. Вакер и А. Вилкенс попытались рассчитать возможное влияние этой зависимости на движение планет и, прежде всего, Меркурия. Их теоретические представления не базировались явно на СТО, они опирались на электромагнитную программу и использовали формулы изменения массы тел при их движении. Но результат, полученный ими, прежде всего Вакером, и основа их вычислений, в сущности, предвосхитили соответствующие релятивистские расчеты, что и позволяет рассматривать работы Вакера и Вилкенса в этом разделе.

Вакер опубликовал свою работу [557], будучи студентом Тюбингенского университета. Р. Ганс, бывший в то время приват-доцентом, а затем профессором этого университета, побудил Вакера к исследованию взаимосвязи гравитации и электронной теории, о чем сообщает сам Вакер в конце своей статьи. В 1909 г. он защитил диссертацию «О гравитации и электромагнетизме», представлявшую собой расширенный вариант статьи 1906 г. [558]. Диссертация была защищена в Тюбингенском университете под руководством Ф. Пашена, известного своими работами в области спектроскопии и проявлявшего большой интерес к электронной теории [504].

Вакер начинает с упоминания о теории тяготения Лоренца, которая, хотя и дополнила ньютоновскую силу скоростными членами типа v^2/c^2 , но не приняла во внимание установленную самим же Лоренцем зависимость инертной массы от скорости. Идея развития соответствующей динамики подчеркивалась и Вином, на которого ссылается Вакер. Таким образом, Вакер исходит из уравнения, аналогичного 2-му закону механики:

$$m \frac{du}{dt} = f, \quad (3)$$

где масса m , однако, является зависящей от скорости, а сила f содержит лоренцевы скоростные члены. Это уравнение он при-

водит к такому виду, чтобы члены, выражающие зависимость массы от скорости, можно было интерпретировать как некоторые силы. При этом левая часть уравнений остается стандартной:

$$\begin{aligned} m_0 \frac{du_x}{dt} &= F_x + F_{1x} + F_{2x}, \\ m_0 \frac{du_y}{dt} &= F_y + F_{1y} + F_{2y}, \\ m_0 \frac{du_z}{dt} &= F_z + F_{1z} + F_{2z}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $F_x = \frac{GMm_0}{r^3} x$ — x -компонента ньютоновской силы притяжения,

F_1 — лоренцева возмущающая сила, а F_2 — «новая возмущающая сила, которая возникает вследствие зависимости инертной массы от скорости» [557, с. 301]. Вид силы F_2 определяется в зависимости от выбора между формулами Лоренца и Абрагама. Вакер проводит вычисления секулярного смещения перигелия Меркурия в обоих случаях. По-видимому, определенное предпочтение он отдавал подходу Абрагама, который и рассматривает в первую очередь. Он также приводит в статье выражения для силы F_2 , соответствующие лишь теории Абрагама:

$$\begin{aligned} F_{2x} &= -\alpha u_x \frac{d(u^2)}{dt} + \frac{\gamma GMm_0}{r^2} u^2 \cos \omega, \\ F_{2y} &= -\alpha u_y \frac{d(u^2)}{dt} + \frac{\gamma GMm_0}{r^2} u^2 \sin \omega, \\ F_{2z} &= -\alpha u_z \frac{d(u^2)}{dt}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\alpha = 2/3 (m_0/c^2)$, $\gamma = 2/3 (1/c^2)$ — постоянные, определяющие зависимость массы от скорости по Абрагаму, ω — истинная аномалия, $\mathbf{u} = \mathbf{v} + \mathbf{p}$, \mathbf{v} — скорость планеты относительно Солнца, \mathbf{p} — абсолютная скорость Солнца (относительно эфира). Соответствующие выражения для F_2 при использовании подхода Лоренца он не приводит в статье, ограничиваясь лишь упоминанием о результатах расчета.

Приведем основные результаты Вакера в его собственной формулировке: «Вычисления для Меркурия, основанные на этом эскизно набросанном подходе, дают следующие результаты.

1. При условии, что Солнце в эфире покоится и что электроны материи твердые (Абрагам), секулярное смещение перигелия оказывается равным $5,6''$, а в случае деформируемых электронов (Лоренц) $7,2''$.

2. Для случая, когда эфир покоится относительно системы неподвижных звезд, электроны считаются твердыми, а скорость Солнца принимается равной $p = 2 \cdot 10^6$ см/сек, секулярное смещение перигелия оказывается равным $6,5''$ или $5''$ в зависимости от

солнечного апекса (направления, в котором движется Солнце.— В. В.) ($A=270^\circ$, $D=36^\circ$) или, согласно Кобольду ($A=270^\circ$, $D=0^\circ$)» [557, с. 301—302]. Таким образом, варьирование различных параметров (движение Солнца в эфире, характер зависимости массы от скорости) несущественно влияет на окончательный результат — секулярное смещение перигелия Меркурия, которое колеблется в интервале 5—7" и оказывается, тем самым, слишком малым, чтобы объяснить наблюдаемую аномалию.

Еще раньше эта же проблема привлекла внимание молодого геттингенского астронома А. Вилкенса, в 1903—1905 гг. работавшего ассистентом в архиве Гаусса. Он был непосредственно связан с К. Шварцшильдом, который в это время дал изящную вариационную формулировку электронной теории [504]. Вилкенс использовал выражение для кинетической энергии, характерное для электронной теории, и с его помощью получил соответствующие уравнения движения, описывающие эллиптические пути планет [578]. Использованное им выражение для кинетической энергии было заимствовано из работы К. Шварцшильда и являлось, в сущности, абрагамовским. Вычисления Вилкенса привели его к выводу о недостаточности «новой механики» для устранения аномалии Меркурия (соответствующее значение для секулярного смещения перигелия было на порядок меньше наблюдаемого). Работа Вилкенса была опубликована в астрономическом издании и, вероятно, поэтому не была замечена физиками. После появления статьи Вакера Вилкенс дал повторное изложение своей работы в «*Physikalische Zeitschrift*». «Так как я уже два года тому назад рассматривал ту же самую проблему, — писал Вилкенс в начале своей статьи, имея в виду проблему, обсуждавшуюся Вакером, — и мои тогдашние исследования оказались, очевидно, недоступными для физиков, целесообразно, по-видимому, еще раз кратко изложить здесь полученные мною ранее результаты, тем более что мой способ изложения проблемы в некоторых пунктах отличен от принятого Вакером» [579, с. 846]. Обе работы, с одной стороны, демонстрировали возможность непротиворечивого распространения «новой динамики», содержащей идею изменения массы с изменением скорости, на небесную механику. С другой стороны, они предвосхищали неудачи СТО в ее попытках решить проблему тяготения.

Лоренц-ковариантная теория гравитации Пуанкаре

Еще до утверждения релятивистской программы, в которой большую роль сыграли опубликованные в 1908 г. исследования Минковского, Пуанкаре в своей классической работе «О динамике электрона», законченной примерно на месяц позже эйнштейновской «К электродинамике движущихся сред», систематически разработал лоренц-ковариантную теорию тяготения, удовлетворяющую основным требованиям релятивистской програм-

мы. «Возможно ли найти такой закон, который удовлетворил бы условиям, поставленным Лоренцем (преобразованиям Лоренца.— В. В.) и одновременно сводился к закону Ньютона во всех случаях, когда скорости небесных тел достаточно малы для того, чтобы можно было пренебречь их квадратами (а также произведениями ускорений на расстояния) по сравнению с квадратом скорости света?»,— так ставит Пуанкаре проблему гравитации [170, с. 56]. Постановка задачи, таким образом, вполне соответствует релятивистской программе*, хотя затем он делает некоторые существенные оговорки, свидетельствующие о его колебаниях между релятивистской и электромагнитной программами при известном предпочтении, которое он отдавал последней: «Если распространение сил притяжения происходит со скоростью света, то это не может быть результатом каких-либо случайных обстоятельств, а должно быть обусловлено одной из функций эфира; тогда возникает задача глубже проникнуть в природу этой функции и связать ее с другими функциями эфира» [173, с. 55]. И дальше: «...Если бы мы приняли принцип относительности, то в законе тяготения и в электромагнитных законах мы нашли бы общую постоянную— скорость света. Точно так же мы встретили бы ее во всех других силах какого угодно происхождения, что можно объяснить только с двух точек зрения: или все, что существует в мире— электромагнитного происхождения, или же это свойство, являющееся, так сказать, общим для всех физических явлений, есть не что иное как внешняя видимость, что-то, связанное с методами наших измерений» [173, с. 56]. Вторая альтернатива приближается к эйнштейновскому пониманию СТО, но Пуанкаре, как показывают его более поздние работы, склонен был принять первую альтернативу**. При этом релятивистская эвристика в любом случае могла быть включена в арсенал более широкой, с точки зрения Пуанкаре, электромагнитно-полевой программы. Вместе с тем он считал, во всяком случае в 1905 г., что свести гравитацию к электромагнетизму пока не удалось: «Однако существуют силы, которым нельзя приписать электромагнитное происхождение, как, например, силы тяготения... Поэтому,— подчеркивает далее Пуанкаре,—

* Э. Захар, почти дословно повторяя Пуанкаре, так характеризует эвристику релятивистской программы: «Таким образом, эвристика эйнштейновской программы основывалась на двух различных требованиях: (1) новый закон должен быть лоренц-ковариантным и (2) он должен давать некоторый классический закон как предельный случай» [586, с. 243].

** С. Голдберг, обсуждая «молчание Пуанкаре» по поводу СТО, писал: «В действительности эфир составлял одно целое с электронной теорией материи, как это ясно понимал Пуанкаре, а электронная теория ставила своей целью охватить всю физику. После 1904 г. в обзоре работ Лоренца Пуанкаре отметил, что, по его мнению, поставленная цель в сущности достигнута. Имея в виду интерес Пуанкаре к всеобъемлющей электронной теории... вполне разумно допустить, что он мог рассматривать теорию относительности Эйнштейна как тривиальную и неполную— как несущественно малую часть большей теории, которую он и Лоренц уже завершили» [52, с. 354].

Лоренц вынужден был дополнить свою гипотезу предположением, что силы любого происхождения и, в частности, силы тяготения ведут себя при поступательном движении (или, если угодно, при преобразовании Лоренца), совершенно так же, как электромагнитные силы» [173, с. 114]. Это первое исходное положение Пуанкаре. Его непосредственными следствиями оказываются, во-первых, то, что ньютоновская сила должна зависеть не только от положений взаимодействующих тел в определенный момент времени, но и от их скоростей, и во-вторых, что «если сила, действующая в момент t на притягиваемое тело, зависит от положения и скорости этого тела в этот же момент, то она зависит кроме того от положения и скорости притягивающего тела, но уже не в момент t , а в предшествующий момент, как если бы силы тяготения требовали некоторого времени для своего распространения» [там же]. Естественно, что скорость распространения гравитации, в соответствии с требованием лоренц-ковариантности, должна совпадать со скоростью света. Итак, Пуанкаре рассматривает взаимное притяжение двух тел, при этом притягиваемое тело характеризуется положением (x_0, y_0, z_0) в момент времени t_0 и скоростью (ξ, η, ζ) , а притягивающее в момент $t_0 + t$ — координатами $(x_0 + x, y_0 + y, z_0 + z)$ и скоростью (ξ_1, η_1, ζ_1) . Искомый закон записывается в форме:

$$\varphi(t, x, y, z, \xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) = 0. \quad (6)$$

Иначе говоря, задача заключается в установлении выражений для составляющих силы X_1, Y_1, Z_1 , действующих в момент t на притягиваемое тело, в зависимости от десяти параметров: $t, x, y, z, \xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1$. Условия, которым, согласно Пуанкаре, должен удовлетворять обобщенный закон тяготения, являются, в сущности, выражением требований релятивистской программы. Пуанкаре их формулирует следующим образом:

«1. Соотношение (1) (здесь уравнение (6).— В. В.) не должно меняться от преобразования группы Лоренца.

2. Составляющие X_1, Y_1, Z_1 должны себя вести при преобразовании Лоренца так же, как электромагнитные силы (...)

3. Когда оба тела находятся в покое, мы должны вернуться к обыкновенному закону притяжения» [173, с. 115].

К этим трем добавляются еще два условия, одно из которых носит экспериментально-эмпирический характер, а второе связано с принципом причинности и представлением о конечной скорости распространения гравитации.

«4. Так как астрономические наблюдения не обнаруживают видимому заметных отклонений от закона Ньютона, то мы выберем решение, наименее расходящееся с этим законом для малых скоростей обоих тел.

5. Попытаемся распорядиться так, чтобы время t всегда было отрицательным; в самом деле, если понятно, что гравитационный эффект требует некоторого времени для своего распространения, то очень трудно усмотреть, каким образом этот эффект мо-

жет зависеть от *недостигнутого еще* положения притягивающего тела» [173, с. 116]. Задача, таким образом, заключается в отыскании всевозможных инвариантов группы Лоренца, удовлетворяющих поставленным требованиям. Пуанкаре находит оптимальный способ для их вычисления, прибегнув к четырехмерному формализму, предвосхищающему концепцию «мира Минковского». «Мы знаем, что подстановки этой группы (группы Лоренца.— В. В.), — замечает он, — являются линейными подстановками, не изменяющими квадратичной формы $x^2 + y^2 + z^2 - t^2$ (...). Легко видеть, что преобразование Лоренца представляет не что иное, как поворот в этом (четырёхмерном.— В. В.) пространстве вокруг начала координат, рассматриваемого неподвижным» [173, с. 117—118]. Формально задача сводится к нахождению инвариантов трехточечной системы в четырехмерном пространстве. Этими инвариантами, в сущности, являются расстояния между точками $P(x, y, z, \sqrt{-1}t)$, $P'(\xi\delta t, \eta\delta t, \xi\delta t, \delta t\sqrt{-1})$, $P''(\xi_1\delta_1 t, \eta_1\delta_1 t, \xi_1\delta_1 t, \delta_1 t\sqrt{-1})$ и началом координат (0, 0, 0, 0), из которых конструируются четыре инварианта, являющиеся функциями десяти переменных ($t, x, y, z, \xi, \eta, \xi_1, \eta_1, \xi_1$), т. е. не содержащие дифференциалов $\delta x, \delta y, \delta z, \delta t, \delta_1 x, \delta_1 y, \delta_1 z, \delta_1 t$ (или которые являются однородными функциями степени 0 по отношению к этим дифференциалам):

$$\Sigma x^2 - t^2, \frac{t - \Sigma x\xi}{\sqrt{1 - \Sigma \xi^2}}, \frac{t - \Sigma x\xi_1}{\sqrt{1 - \Sigma \xi_1^2}}, \frac{1 - \Sigma \xi\xi_1}{\sqrt{(1 - \Sigma \xi^2)(1 - \Sigma \xi_1^2)}}. \quad (7)$$

В соответствии со своим вторым условием, Пуанкаре аналогичным образом вычисляет четыре «силовых» инварианта:

$$\Sigma X^2 - T^2, \Sigma Xx - Tt, \Sigma X\delta x - T\delta t, \Sigma X\delta_1 x - T\delta_1 t. \quad (8)$$

Здесь $T = \Sigma X\xi$, а сила (X, Y, Z, T) относится к единице объема. Несложными преобразованиями он переходит затем к четырем аналогичным инвариантам для силы (X_1, Y_1, Z_1, T_1), действующей в момент времени t на притягиваемое тело:

$$\frac{\Sigma X_1^2 - T_1^2}{1 - \Sigma \xi^2}, \frac{\Sigma X_1 x - T_1 t}{\sqrt{1 - \Sigma \xi^2}}, \frac{\Sigma X_1 \xi_1 - T_1}{\sqrt{1 - \Sigma \xi^2} \sqrt{1 - \Sigma \xi_1^2}}, \frac{\Sigma X_1 \xi - T_1}{1 - \Sigma \xi^2}, \quad (9)$$

из которых последний тождественно равен 0, согласно определению T_1 .

Затем Пуанкаре вводит, в сущности, предположение о скорости распространения гравитации. Инвариантный способ определения заключается в приравнивании одного из трех первых инвариантов (7) нулю. При этом оказывается, что принять равным нулю следует именно первый инвариант, что приводит к выражению $t = -r$, означающему, что скорость гравитации равна скорости света (в обозначениях Пуанкаре $c = 1$). Приравнивание нулю двух других инвариантов, приводящее к скоростям гравитации, много большим скорости света, оказывается непри-

емлемым из-за того, что t в этих случаях может оказаться положительным, что, как мы видели, не согласуется с принципами причинности и близкодействия.

Далес, Пуанкаре предполагает, что инварианты (9) должны быть функциями инвариантов (7), а в предельных случаях абсолютного покоя или относительного покоя компоненты силы X_1, Y_1, Z_1 должны иметь соответственно значения, отвечающие закону Ньютона, или значения, вычисленные Пуанкаре (в случае относительного покоя):

$$X_1 = -\frac{k(x-\xi t)}{r'^3}, \quad Y_1 = -\frac{y}{kr'^3}, \quad Z_1 = -\frac{z}{kr'^3}, \quad (10)$$

где $\xi = \xi_1, \eta = \eta_1, \zeta = \zeta_1, \eta = \zeta = 0, r'^2 = k^2(x-\xi t)^2 + y^2 + z^2, k = 1/\sqrt{1-\xi^2}$. Используя свойства преобразований скоростей и сил, Пуанкаре записывает выражения для X_1, Y_1, Z_1, T_1 в виде:

$$\begin{aligned} X_1 &= x \frac{\alpha}{k_0} + \xi\beta + \xi_1 \frac{k_1}{k_0} \gamma, \\ Y_1 &= y \frac{\alpha}{k_0} + \eta\beta + \eta_1 \frac{k_1}{k_0} \gamma, \\ Z_1 &= z \frac{\alpha}{k_0} + \zeta\beta + \zeta_1 \frac{k_1}{k_0} \gamma, \\ T_1 &= -r \frac{\alpha}{k_0} + \beta + \frac{k_1}{k_0} \gamma, \end{aligned} \quad (11)$$

где α, β, γ — функции инвариантов (7), $k_0 = 1/\sqrt{1-\Sigma\xi_i^2}, k_1 = 1/\sqrt{1-\Sigma\xi_i'^2}$. Соображения соответствия и простоты приводят к следующим формулам для α, β, γ : $\alpha = 1/B^3, \beta = 0, \gamma = -(A/B^3C)$, где A, B, C — соответственно второй, третий и четвертый инварианты (7). Релятивистски инвариантное обобщение ньютоновского закона тяготения, в результате, приобретает следующий вид:

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{x}{k_0 B^3} - \xi_1 \frac{k_1}{k_0} \frac{A}{B^3 C}, \\ Y_1 &= \frac{y}{k_0 B^3} - \eta_1 \frac{k_1}{k_0} \frac{A}{B^3 C}, \\ Z_1 &= \frac{z}{k_0 B^3} - \zeta_1 \frac{k_1}{k_0} \frac{A}{B^3 C}, \\ T_1 &= -\frac{r}{k_0 B^3} - \frac{k_1}{k_0} \frac{A}{B^3 C}. \end{aligned} \quad (12)$$

Пуанкаре указывает далее на неоднозначность полученного обобщения. Теоретико-инвариантные соображения позволяют заметить $1/B^3$ выражением

$$1/B^3 + (C-1)f_1(A, B, C) + (A-B)^2 f_2(A, B, C),$$

где f_1 и f_2 — произвольные функции инвариантов A, B, C . Другой способ определения иных значений для α, β, γ состоит в прибавлении к ним добавочных членов, зависящих от ξ (квадратично — для α и линейно — для β, γ) так, чтобы они удовлетворяли соотношению $-A\alpha - \beta - C\gamma = 0$, которое лежало в основе определения α, β, γ через A, B, C . Трехвекторная пространственная часть силы (12), в частности, может быть преобразована:

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{\lambda}{B^3} + \frac{\eta\nu' - \xi\mu'}{B^3}, \\ Y_1 &= \frac{\mu}{B^3} + \frac{\xi\lambda' - \eta\nu'}{B^3}, \\ Z_1 &= \frac{\nu}{B^3} + \frac{\xi\mu' - \eta\lambda'}{B^3}. \end{aligned} \quad (13)$$

где $\lambda = k_1(x + r\xi_1)$, $\mu = k_1(y + r\eta_1)$, $\nu = k_1(z + r\xi_1)$; $\lambda' = k_1(\eta_1 z - \xi_1 y)$, $\mu' = k_1(\xi_1 x - \xi_1 z)$, $\nu' = k_1(\xi_1 y - \eta_1 x)$. Переход от (12) к (13) связан с возможностью представления, например

$$X_1 = -(k_1/B^3 C) [(x + r\xi_1) + \eta(\xi_1 y - x\eta_1) + \xi(\xi_1 z - x\xi_1)]. \quad (14)$$

При этом возникает интересная аналогия: первую составляющую можно интерпретировать как силу, обусловленную электрическим полем, а две другие — как силу, вызванную магнитным полем. Эта аналогия становится более очевидной, если в соответствии с отмеченными ранее теоретико-инвариантными соображениями, коэффициент $1/B^3$ заменить на C/B^3 , так чтобы компоненты X_1, Y_1, Z_1 зависели линейно от скорости (ξ, η, ξ) притягиваемого тела. Таким образом, первый член $(\lambda/B^3, \mu/B^3, \nu/B^3)$ или (λ, μ, ν) можно рассматривать как аналог электрического поля, а $(\lambda'/B^3, \mu'/B^3, \nu'/B^3)$ или (λ', μ', ν') — как аналог магнитного поля.

Так Пуанкаре получил два варианта обобщенного лоренц-ковариантного закона тяготения, общими особенностями которых были: во-первых, представление о конечной скорости распространения гравитации; во-вторых, наличие двух составляющих силы гравитационного взаимодействия: параллельной вектору (x, y, z) , соединяющему местоположения центров масс тел, и параллельной скорости притягиваемого тела $(\xi_1, \eta_1, \xi_1)^*$ и, в-третьих, включение скоростных членов только в форме v^2/c^2 . Последнее, как заметил Пуанкаре, означает, что «расхождение с законом Ньютона будет порядка ξ^2 , т. е. в 10 000 раз меньше, чем если бы оно было порядка ξ , т. е. если бы силы тяготения распространялись со скоростью света, *ceteris non mutatis* (в соответствии с подходом Лапласа.— В. В.)» [173, с. 129].

* Пуанкаре поясняет, «что когда мы говорим о положении или скорости притягиваемого тела, то при этом речь идет о положении или скорости в момент, когда гравитационная волна покидает его; наоборот, для притягиваемого тела речь идет при этом о его положении или скорости в момент, когда гравитационная волна достигает его» [173, с. 127].

Релятивистская теория тяготения, развитая Пуанкаре, не привлекла внимания физиков, хотя в принципиальном отношении она была значительным шагом вперед в развитии гравитационной проблемы. Причины этого невнимания, с нашей точки зрения, таковы: 1) теория не объясняла аномальное смещение перигелия Меркурия; 2) большинство физиков в 1906—1908 гг. не разделяло релятивистской программы*, 3) формально-алгебраический метод построения теории отодвинул на задний план физические аспекты теории; 4) неоднозначность свидетельства о незаключенности теории; 5) в период преобладания электромагнитно-полевой программы настоящее обобщение ньютоновской теории тяготения требовало использования явного полевого подхода — теория же Пуанкаре не давала уравнений гравитационного поля, из которых можно было получить найденные им лоренц-инвариантные элементарные законы взаимодействия.

Теория тяготения Минковского

В ноябре — декабре 1907 г. в своих знаменитых работах по четырехмерной теоретико-инвариантной концепции СТО Г. Минковский дал набросок релятивистски инвариантного обобщения ньютоновского закона тяготения, который, в сущности, совпадал с одной из двух формулировок Пуанкаре [470, 471]. Однако Минковский использовал наглядные геометрические рассуждения и миновал громоздкие алгебраические выкладки. Хотя геттингенский математик полагал, что полученное им обобщение отличается от одного из выражений, установленных Пуанкаре, работу которого он изучал и цитировал. В геттингенском докладе, сделанном 5 ноября 1907 г. Минковский в разделе «Тяготение» [470] ограничивается описанием подхода Пуанкаре**, свою теорию не формулирует и только обещает более подробно остановиться на вопросах гравитации в следующей работе [471].

И действительно, в работе [471] гравитационной проблеме уделено значительно больше места. Свои рассуждения Минковский предваряет двумя замечаниями. Во-первых, как и Пуан-

* Более того, сам Пуанкаре использовал релятивистский подход в рамках более широкой, с его точки зрения, электромагнитно-полевой программы. Поэтому, например, в статье 1908 г., рассматривая различные гравитационные теории, он явное предпочтение отдает теориям лоренцевского типа.

** Нетрудно уловить в этом описании критические нотки по отношению к теории Пуанкаре: «В действительности, Пуанкаре также полагает, что гравитация распространяется именно со скоростью света c . Он ставит далее чисто математическую задачу найти закон (тяготения.— В. В.), который бы соответствовал постулату относительности, если пренебречь квадратами скоростей небесных тел, а также произведениями ускорений на расстояния (по сравнению с квадратом скорости света c^2). Пуанкаре находит такой закон, вводя в рассмотрение инварианты лоренцевой группы, однако закон этот оказывается только одним из множества возможных, и соответствующие исследования, таким образом, не носят однозначно определенного характера» [470, с. 938]. Минковский отмечает формально-математическую тенденцию в подходе Пуанкаре и неоднозначность полученного им обобщения.

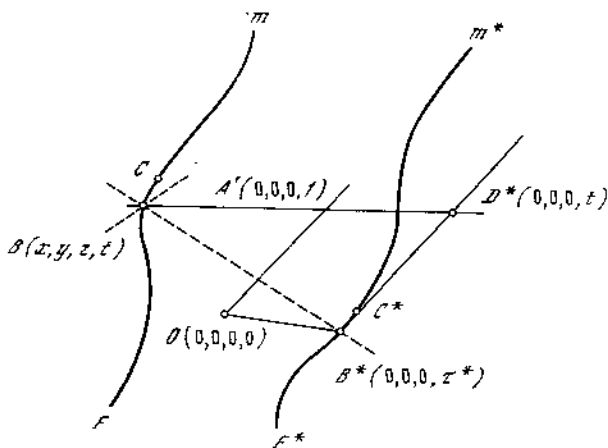


Рис. 1. Графическое изображение рассуждений Минковского

каре, главную цель он видит в том, чтобы показать возможность согласования теории гравитации с принципом относительности. Второе замечание касается кардинального различия в методах, которые используют он сам и Пуанкаре: «Совершенно иным образом, чем я это делаю здесь, Пуанкаре... пытается согласовать ньютоновский закон притяжения с постулатом относительности» [471, с. 401]. Действительно, различие в методах разительное: формально-алгебраический, насыщенный громоздкими преобразованиями вывод Пуанкаре и короткое геометрическое рассуждение Минковского не более, чем на треть страницы, завершающееся одной-единственной формулой. В докладе «Пространство и время», прочитанном 21 сентября 1908 г., Минковский прибегает к графическому изображению для пояснения взаимодействия двух произвольно движущихся зарядов [145, с. 199] (рис. 1) *.

Пусть притягиваемая масса находится в точке $B(x, y, z, t)$, когда притягивающая масса находится в точке $B^*(0, 0, 0, t^*)$, связанной с точкой B уравнением:

$$(x - x^*)^2 + (y - y^*)^2 + (z - z^*)^2 = (t - t^*)^2, \quad (15)$$

причем $t - t^* \geq 0$, т. е. притягивающая масса m^* находится на световом конусе точки B . Следующее геометрическое рассуждение, приводящее к искомому закону, звучит так: «Пусть BC — бесконечно малый элемент мировой линии F (Hauptlinie), далее B^* — световая точка B , C^* — световая точка C на мировой линии F^* , затем OA' — радиус-вектор гиперboloидной полости

* Обстоятельный разбор геометрической конструкции Минковского и соответствующий рисунок имеется в работах Пайсона [504, 508]. Этот рисунок удобно использовать и здесь (в тексте же обсуждаемой статьи рисунков нет).

(2) (т. е. — $x^2 - y^2 - z^2 + t^2 = 1$, $t > 0$. — В. В.), параллельный B^*C^* , наконец D^* — точка пересечения прямой B^*C^* с ортогональным к всей пространством в точке B . Движущая сила, действующая на материальную точку F в пространственно-временной точке B , будет таким пространственно-временным вектором 1-го рода, ортогональным к BC , который представляет собой сумму двух векторов:

$$mm^*(OA'/B^*D^*)^3BD^*, \quad (16)$$

параллельного BD^* , и вектора, направленного вдоль B^*C^* ... Очевидно, что эта конструкция носит ковариантный характер по отношению к группе Лоренца» [471, с. 402]. Последнее утверждение — следствие последовательного четырехмерного подхода. Точки B и B^* , как уже отмечалось, связаны уравнением (15) при $t - t^* > 0$, которое в случае, рассматриваемом на рис. 1, приобретает вид:

$$x^2 + y^2 + z^2 = (t - \tau^*)^2.$$

Таким образом, выражение (16) приобретает вид:

$$mm^* \overline{BD^*} / (t - \tau^*)^3, \quad (17)$$

аналогичный ньютоновскому закону

$$mm^* \frac{\mathbf{r}}{r^3}.$$

Затем Минковский рассматривает более простой случай, когда движение m^* равномерное и прямолинейное. Тогда F^* — прямая, которую посредством лоренцева преобразования можно совместить с временной осью. Координаты точки m^* при этом — $(0, 0, 0, \tau^*)$. Эти упрощающие предположения приводят к простым уравнениям движения точки m^* с обобщенным выражением для силы взаимодействия между массами m и m^* :

$$\frac{d^2x}{dt^2} = - \frac{m^*x}{(t - \tau^*)^3},$$

.....

$$\dots \dots \dots \quad (18)$$

$$\frac{d^2t}{d\tau^2} = - \frac{m^*}{(t - \tau^*)^2} \frac{d(t - \tau^*)}{dt},$$

причем $x^2 + y^2 + z^2 = (t - \tau^*)^2$,

$$\left(\frac{dx}{d\tau}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\tau}\right)^2 + \left(\frac{dz}{d\tau}\right)^2 = \left(\frac{dt}{d\tau}\right)^2 - 1.$$

Последнее соотношение — дифференциальная запись метрики четырехмерного пространства — времени. Из высказывания Минковского, приведенного выше, следует также, что суммарный вектор силы взаимодействия между точками m и m^* параллелен

вектору, соединяющему притягиваемую точку с точкой мировой линии притягивающей массы, одновременной с первой, в системе отсчета, которая движется со скоростью притягиваемой точки*.

Заметим, что при получении уравнений движения (18) Минковский, специально не оговаривая, как и Пуанкаре, использовал равенство инертной и гравитационной масс. Уравнения (18) Минковского близки к классическим уравнениям движения частицы в центральном поле. Обсудив при некоторых упрощающих предположениях решение кеплеровской задачи на основе уравнений (18), Минковский нашёл, что мерой отличия модифицированного решения от классического является множитель m^*/ac^2 , где m^* — масса Солнца, a — большая полуось планетной орбиты, c — скорость света. Этот множитель, очевидно, совпадает с отношением квадратов средней скорости планеты и скорости света и равен в рассматриваемом случае $\sim 10^{-8}$. Именно это обстоятельство позволило Минковскому заключить: «Принимая во внимание малость периодического члена в (31)** (содержащего множитель m^*/ac^2 .— В. В.) нельзя на основе астрономических наблюдений прийти к выводу против применения такого закона и предложенной модифицированной механики в пользу ньютоновского закона тяготения и ньютоновской механики» [471, с. 404]. Важное значение полученного результата он видел в возможности согласования закона тяготения с принципом относительности и представлением о конечной скорости распространения гравитации, равной скорости света: «Закон притяжения, согласно обсужденной выше и связанной с постулатом относительности формулировке, означал бы одновременно распространение гравитации со скоростью света» [там же].

В знаменитом кельнском докладе «Пространство и время», сделанном 21 сентября 1908 г., Минковский коснулся проблемы тяготения, подчеркнув, что гравитация не препятствует универсальности принципа относительности. Интересно, что Минковский считал СТО, которую интерпретировал с позиций релятивистской программы (в противовес Лоренцу и Пуанкаре), подтверждением электромагнитной картины мира: «Мне хочется верить, что не имеющая исключений справедливость мирового постулата (принципа относительности.— В. В.) является истинной основой электромагнитной картины мира, основой, которая была найдена Лоренцом, очищена далее Эйнштейном и которая теперь предстала пред нами во всей ясности» [145, с. 203].

* В 1910 г. Зоммерфельд во всех деталях разъяснил результат Минковского и установил его связь с теорией Пуанкаре.

** Уравнение (31):

$$n\dot{t} + \text{const} = \left(1 + \frac{1}{2} \frac{m^*}{ac^2}\right) nT + \frac{m^*}{ac^2} \sin E.$$

Здесь $T = 2\pi/n$ — прирост собственного времени за 1 оборот при движении планеты по эллиптическому пути, E — эксцентрисическая аномалия [471, с. 405].

Развитие теорий Пуанкаре — Минковского в начале 1910-х годов

Направление в теории тяготения, открытое Пуанкаре и Минковским, не получило значительного развития. Наиболее важным здесь были работы Зоммерфельда, Лоренца и де Ситтера, выполненные ими в 1910—1911 гг. Зоммерфельд был одним из тех физиков, которые с энтузиазмом восприняли четырехмерный формализм Минковского и внесли большой вклад в его усовершенствование и применение. В статье «К теории относительности» он систематически изложил основы четырехмерного векторного исчисления и его применения к электродинамике и теории тяготения [532, 533]. В статье содержится также детальный анализ релятивистских обобщений закона тяготения, предпринятых Пуанкаре и Минковским, и показано, что модификация Минковского в точности совпадает со второй формой Пуанкаре. Зоммерфельд записывает оба варианта Пуанкаре

$$(I) \quad K = mm_0 c^3 \frac{(\mathbf{v}_0 \mathbf{V}) \mathbf{R} - (\mathbf{V}_0 \mathbf{R}) \mathbf{V}}{(\mathbf{R}\mathbf{V})^3 (\mathbf{V}_0 \mathbf{V})}, \quad (19)$$

$$(II) \quad K = -mm_0 c \frac{(\mathbf{v}_0 \mathbf{V}) \mathbf{R} - (\mathbf{V}_0 \mathbf{R}) \mathbf{V}}{(\mathbf{R}\mathbf{V})^3} \quad (20)$$

и отмечает, что вариант II полностью эквивалентен закону Минковского*.

Общие и специфические черты подходов Пуанкаре и Минковского он характеризует так: «Минковский непосредственно (с перемножением знака) переносит закон отталкивания двух электронов на притяжение двух тяготеющих масс: его подход заключается в том, чтобы в уравнении (37) (т. е. релятивистское обобщение закона Кулона.— В. В.) произведение ee_0 заменить на $(-mm_0)$, где m_0 и m — соответственно притягиваемая и притягивающая массы покоя <...> Пуанкаре, с другой стороны, ставит задачу построения наиболее общего закона сил, инвариантного относительно преобразований Лоренца, который для малых скоростей сводился бы к ньютоновскому закону. Только в случае, когда обе скорости равны, форма релятивистского расширенного закона определяется однозначно; в противном случае она остается до некоторой степени неопределенной» [533, с. 684—685].

Зоммерфельд также представил формулы Пуанкаре и Минковского (I) и (II) в более наглядной и простой геометрической

* Соответствие с формулами Пуанкаре достигается, если принять $K = (X_1, Y_1, Z_1, iT_1)$, $\mathbf{R} = (x, y, z, -it)$, $\mathbf{V}_0 = (\xi, \eta, \zeta, ic)k_0$, $\mathbf{V} = (\xi_1, \eta_1, \zeta_1, ic)k_1$ (следует также помнить, что Пуанкаре принимает $c=1$ и $m=m'=1$).

Инварианты Пуанкаре A , B и C в обозначениях Зоммерфельда имеют вид:

$$A = -\frac{1}{c} (\mathbf{R}\mathbf{V}_0), \quad B = -\frac{1}{c} (\mathbf{R}\mathbf{V}), \quad C = -\frac{1}{c^2} (\mathbf{V}_0 \mathbf{V}).$$

Массу m' , измеренную в системе отсчета, движущейся со скоростью \mathbf{V}_0 относительно m , можно выразить через массу покоя m_0 : $m' = m_0 k_0$.

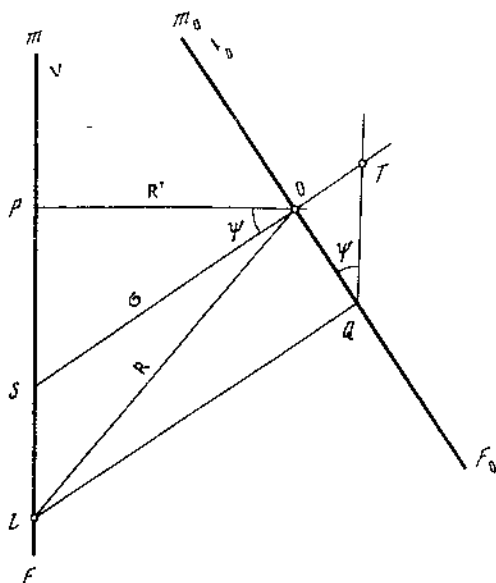


Рис. 2. Геометрический смысл законов тяготения Пуанкаре и Минковского

форме (рис. 2), что приводит к следующему виду этих законов:

$$(Ia) \text{ для закона (I)} \quad K = \frac{mm_0}{R'^4} \sigma, \quad (21)$$

$$(IIa) \text{ для закона (II)} \quad K = \frac{mm_0}{R'^4} \sigma \cos \psi. \quad (22)$$

Здесь и на рис. 2 R' — четырехмерный вектор, связывающий притягиваемую массу в точке O с одновременной (в системе отсчета, движущейся со скоростью V) сй точкой P на мировой линии притягивающей массы; ψ — угол между скоростями V и V_0 , соответствующими четырехмерным скоростям притягивающей и притягиваемой масс; вектор σ связывает точку O с точкой S на мировой линии притягивающей массы (точка S одновременна с O в системе отсчета, движущейся со скоростью V_0), $OL = R$, OQ — проекция вектора R на вектор скорости V_0 .

Из геометрических соображений допустимыми оказываются также релятивистски-инвариантные выражения

$$K = \frac{mm_0}{S^4} \sigma, \quad (23)$$

$$K = \frac{mm_0}{S^2 R'} \sigma, \quad (24)$$

отличающиеся от (21) и (22) членами, пропорциональными v^2/c^2 (здесь $S = |\sigma|$)*.

Работы Лоренца и обобщающий обзор де Ситтера. В конце октября 1910 г. в Геттингене выступил Лоренц с лекциями под названием «Старые и новые вопросы физики» [452]. В центре внимания Лоренца находились вопросы электронной теории и электродинамики движущихся сред, а также квантовой теории. Была рассмотрена и проблема релятивистского обобщения ньютоновского закона гравитации со ссылками на работы Пуанкаре и Минковского. Сам Лоренц, исходя из аналогии с взаимодействием двух движущихся зарядов и соображений, связанных с переходом от покоящейся системы отсчета к произвольной инерциальной системе отсчета, получил первый вариант релятивистского обобщения, найденного Пуанкаре (закон (I)). Расчет аномального векового смещения перигелия Меркурия, соответствующий этому закону, как заметил Лоренц, был произведен голландским астрономом В. де Ситтером, который спустя несколько месяцев закончил обстоятельный обзор по релятивистским теориям тяготения типа Пуанкаре—Минковского. Результат оказался равным $6,69''$, т. е. очень близким к вычислениям Вакера ($7,2''$). Лоренц считал возможным связать большую часть наблюдаемого смещения перигелия Меркурия с возмущающим действием зодиакального света, гипотезой, выдвинутой Зеслигером.

Детальное аналитическое рассмотрение обоих вариантов релятивистского обобщения ньютоновского закона и наиболее полное их сопоставление с астрономическими наблюдениями дал де Ситтер в марте 1911 г. [528]. По-видимому, его интерес к релятивистской теории тяготения был вызван контактом с Лоренцем. Еще в октябре 1910 г. Лоренц ссылался в своих геттинген-

* Выражения (Ia) и (IIa) могут быть получены посредством следующих преобразований. Принимая во внимание, что

$$(V_0V) = \cos \psi |V| |V_0| = -c^2 \cos \psi; \quad OQ = \frac{(RV_0)}{|V_0|};$$

$$\frac{QO}{\cos \psi} = QT = LS = -(RV)_0 / |V_0| \cos \psi; \quad (RV)^2 = c^2 R'^2,$$

получаем

$$K = -mm_0c \frac{(V_0V)}{(RV)^2} \left(R - \frac{(V_0R)V}{(V_0V)} \right) = -mm_0c \frac{(-c^2 \cos \psi)}{c^2 R'^2} (R + \overline{LS}) = \\ = \frac{mm_0}{R'^2} \sigma \cos \psi, \text{ т. е. формулу (IIa).}$$

Соотношение (Ia) отсюда получается, если ввести дополнительный множитель $-c^2/(V_0V) = \cos \psi$. Заметим, что формула $(RV) = c^2 R'^2$ следует из соотношения $(RV)^2 = -|V|^2 R'^2 = c^2 R'^2$, которое является следствием «светоподобности» вектора R ($|R|^2 = 0$):

$$R'^2 + (PL)^2 = 0, \quad (RV)^2 = (PL)^2 |V|^2 = -R'^2 |V|^2.$$

ских лекциях на сделанный де Ситтером расчет векового смещения перигелия Меркурия на основе первого варианта релятивистского обобщения ньютоновского закона, произведенного Пуанкаре. В рассматриваемой работе выведены оба варианта релятивистского закона гравитации:

$$\text{закон (II)} \quad (X)_1 = \frac{k^2 m_1 m_2}{B_1} \left\{ x_2 - x_1 - (\xi)_2 \frac{A_1}{C} \right\}, \quad (25)$$

$$\text{закон (I)} \quad (X)_2 = \frac{k^2 m_1 m_2}{B_1} \{ C(x_2 - x_1) - (\xi)_2 A_1 \}. \quad (26)$$

Здесь выписана x -компонента четырехмерной силы, действующей на притягиваемую точку m_1 , $(\xi)_2$ — x -компонента скорости притягивающей массы, A_1 , B_1 , C — инварианты Пуанкаре; x и x — координаты одновременных событий в системах отсчета соответственно движущихся со скоростями $(\xi)_1$ и $(\xi)_2$. Де Ситтер считал, что Лоренц использовал закон (I) из-за того, что ньютоновская сила $X_1 = (X_1) \sqrt{1 - v_1^2}$ не содержит скорости v_1 , а Минковский использовал закон (II), «вероятно, потому, что он дает простейший результат для планеты бесконечно-малой массы» [528, с. 397]. Он далее показал, что, если считать притягиваемую массу достаточно малой, то для обоих законов, в конечном счете, получаются простые уравнения движения, выражения для силы в которых различаются между собой членом $\frac{1}{2} x v^2$ (или $\frac{1}{2} x v^2 / c^2$). В сущности, эти уравнения, как заметил де Ситтер, обсуждали Вакер и Минковский, подход же Вилкенса, строго говоря, не согласовывался с принципом относительности. Вычисления Вакера в отношении перигелия Меркурия подтвердились (7,2"). Де Ситтер провел и более детальный расчет смещения перигелия Меркурия, приняв во внимание ускорение Солнца и не пренебрегая массой планеты. В качестве системы отсчета при этом использовалась система, связанная не с Солнцем, а с удаленными звездами, и, таким образом, свободная от ускорения. Результат оказался удивительно мало отличающимся от предыдущего (7,15" в столетие). Оба закона (I) и (II), тем самым, давали для смещения перигелия Меркурия одинаковый результат. Де Ситтер также обсудил гипотезу Зеелигера о возмущающем действии зодиакального свста и заметил, что учет релятивизма в дополнение к этой гипотезе позволяет лучше объяснить наблюдаемое смещение перигелия Меркурия.

Обсуждение теорий Пуанкаре — Минковского и их роль в генезисе релятивистской теории гравитации

Дальнейшая судьба теорий типа Пуанкаре—Минковского. В 1911 г., когда возобновились исследования Эйнштейна по принципу эквивалентности и появились первые работы Абрагама по теории тяготения с обобщенным уравнением Пуассона и персе-

менной скоростью света (см. гл. III настоящей работы), разработка релятивистских теорий типа Пуанкаре—Минковского уже должна была выглядеть как некоторый анахронизм. После создания ОТО они почти утратили всякий интерес, хотя в обзорах неэйнштейновских теорий тяготения им время от времени уделялось определенное внимание. Ф. Коттлер [434] в начале 20-х годов, опираясь на работы Пуанкаре, Минковского, Зоммерфельда, и, особенно, Лоренца и де Ситтера, дал простое рассмотрение законов тяготения (I) и (II). Он отдал предпочтение закону (I), т. к. полагал, что закон (II), не делая различия между силами Ньютона и Минковского, не вполне корректен с точки зрения релятивистской механики.

В начале 60-х гг., когда усилился интерес к неэйнштейновским теориям, снова пересматривались возможности теорий типа Пуанкаре—Минковского (Уитроу и Мордух [570, 571], Харвей [384] и др.). Логико-теоретические трудности этих теорий были хорошо известны. Тем не менее, названные исследователи пытались, используя неоднозначность формулировок Пуанкаре, построить формально, хотя бы за счет введения ad hoc-констант, релятивистски-инвариантные обобщения ньютоновского закона, объясняющие три знаменитых общерелятивистских эффекта: «красное смещение», отклонение лучей света в гравитационном поле и аномальное смещение перигелия Меркурия. В одну из формулировок Пуанкаре Уитроу и Мордух ввели инвариантный множитель

$$(u_{1\beta}u_{2\beta} - c^2)^\epsilon,$$

так что закон тяготения приобрел вид:

$$F_\alpha = \frac{Gm_1m_2c^3}{(R_\gamma u_{1\gamma})^3} \left(\frac{u_{1\beta}u_{2\beta}}{-c^2} \right)^\epsilon \left\{ R_\alpha - \frac{u_{1\alpha}(R_\beta u_{2\beta})}{(u_{1\beta}u_{2\beta})} \right\}, \quad (27)$$

где $u_{1\beta}$ и $u_{2\beta}$ — четырехмерные скорости масс m_1 и m_2 , G — постоянная тяготения, R_α — радиус-вектор, связывающий m_1 и m_2 , ϵ — вводимая ad hoc-константа. Оказывается, что наилучший результат получится при $\epsilon=2$: «красное смещение» объясняется полностью, отклонение света лишь наполовину, а смещение перигелия — на 1/3 наблюдаемого значения.

Заметим, что, если пренебречь притягиваемой массой, то, согласно де Ситтеру и Коттлеру, уравнения движения этой массы, основанные на законе (I), принимают вид:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{GM}{r^3} x \left(1 - \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \right) + \frac{x'GM}{c^2} \frac{r'}{r^2} \quad (28)$$

и аналогичные уравнения для y - и z -координат.

Для уравнений движения в общей форме:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{GM}{r^3} x \left(1 - \frac{2\alpha}{c^2 r} + \frac{2\beta v^2}{c^2} - \frac{3\gamma r'^2}{c^2} \right) + x' \frac{2\lambda GM}{c^2 r^2} r', \quad (29)$$

как показал Шази [331, 332], аномальное вековое смещение перигелия $\delta\omega$ вычисляется по формуле:

$$\delta\omega = \frac{2\pi M}{ac^2(1-e^2)} (-\alpha + 2\beta + 2\lambda), \quad (30)$$

причем требуемые $42''$ для Меркурия получаются при условии, что $(-\alpha + 2\beta + 2\lambda) = 3$. В случае с законом Пуанкаре мы имеем $\alpha = 0$, $2\beta = -1/2$, $2\lambda = 1$ и, следовательно, $(-\alpha + 2\beta + 2\lambda) = 1/2$, т. е. аномальное вековое смещение перигелия Меркурия, как это показывали еще Вакер и де Ситтер, оказывается порядка $7''$, составляя лишь $1/6$ часть наблюдаемого.

Научно-коммуникативный аспект теорий типа Пуанкаре—Минковского. Имена трех выдающихся исследователей — Пуанкаре, Минковского и Лоренца — наиболее тесно связаны с релятивистскими теориями рассматриваемого типа. Причем, Минковский и Лоренц принадлежали к двум большим научным школам — геттингенской и лейденской — которые, условно говоря, были под влиянием, до некоторой степени полярных направлений в разработке физической теории: «математической физики» и «теоретической физики» [503, 504, 506, 510]. Для первого направления, восходящего к традициям Гаусса, Вебера, Римана и связанного в начале XX в. с именами Ф. Клейна, Д. Гильберта, Г. Минковского, К. Шварцшильда, характерны были стремление к аксиоматизации и геометризации физики и в связи с этим некоторая переоценка значения математических методов, приверженность к электромагнитной концепции физики, определенная недооценка собственно физических и экспериментальных аспектов научных теорий и т. д.

Направление «теоретической физики», к которому принадлежали не только Лоренц и его ученики, но и Больцман, Планк, а также Эйнштейн, на первый план выдвигало собственно физические, интерпретационные, операционально-измерительные аспекты научных теорий, вопросы их экспериментального обоснования и подтверждения и не ставило перед собой явно задачи аксиоматизации и геометризации физики и построения на этой основе единой теории.

К названным направлениям (Пуанкаре, Минковский и Лоренц) можно добавить здесь еще одну линию, связанную с именами Вакера и Вилкенса. Вилкенс непосредственно относился к геттингенской школе. Он испытал сильное влияние Шварцшильда, а затем работал в Киле под руководством известного астронома П. Гарцера, также близкого к геттингенской традиции, Вакер же находился в прямом контакте с физиками Тюбингенского университета, Пашеном, Гансом, Ритцем, астрономом Маурером. Но и тюбингенская школа испытывала влияние геттингенской традиции, и среди ее представителей также был весьма высок авторитет электромагнитно-полсовой программы. Зоммерфельд, в это время работавший в Мюнхене, тоже был выходцем из Геттингена. Будучи сначала безусловным сторонником элект-

ромагнитной концепции физики, он затем под влиянием Минковского перешел на рельсы релятивистской программы в ее геометрическом четырехмерном облачении. Его работа по релятивистской теории тяготения естественно примыкает к традиции «математической физики». Названные особенности двух основных традиций в развитии физической теории в этот период достаточно определенно проявились и на уровне разработки различных вариантов релятивистских теорий тяготения типа Пуанкаре—Минковского. Геометризм, согласование теории тяготения с фундаментальной четырехмерной концепцией физики, определенное пренебрежение экспериментально-наблюдательной стороной дела (Минковский и Зоммерфельд не сделали расчет аномального векового смещения перигелия Меркурия)*, повышенный интерес к самому четырехмерному формализму — характерные черты работ Минковского и Зоммерфельда.

Лоренц и де Ситтер сосредоточивают основное внимание на проблеме экспериментального обоснования и подтверждения теории. Вывод релятивистских модификаций ньютоновского закона у них также выглядит проще и привычнее для физиков.

Несколько сложнее представляется фигура Пуанкаре. С одной стороны, он, как будто, близок к геттингенской традиции. Ему принадлежит разработка теоретико-группового подхода к СТО, он превосходит четырехмерную формулировку этой теории. Пуанкаре внес фундаментальный вклад в анализ оснований геометрии [178, с. 658]. Несомненна также его приверженность к электромагнитно-полевой программе. С другой стороны, он далек от стремления к аксиоматизации физики. Он, как известно, превосходил и некоторые операционально-измерительные аспекты СТО.

Вместе с тем, он разрабатывал концепцию физического знания, которую можно было бы назвать «физикой принципов». Эта концепция отчетливо сформулирована в его докладе «Настоящее и будущее математической физики». «Применение этих пяти или шести общих принципов (имеются в виду принципы сохранения массы, энергии и импульса, относительности, наименьшего действия, энтропии и некоторые другие.— В. В.) к различным физическим явлениям достаточно для того, чтобы узнать все то, что вообще можно в разумных пределах надеяться познать» [177, с. 562].

В условиях кризиса в физике, возникшего на рубеже XIX и XX столетий, появились определенные сомнения в справедливости некоторых из этих принципов. Но Пуанкаре полагал, что, несмотря на это, «физика принципов», прибегнув в некоторых случаях к обобщению или модификации этих принципов, сохранит свое значение. Этот подход был вообще близок французской

* Такой расчет в сильно упрощенной ситуации был проведен небесными механиками Вакером и Вилкелсом.

школе теоретической физики, представителями которой были, например, Ланжевен, Перрен и др. *

Наконец, для Пуанкаре был характерен глубокий интерес к методологическим проблемам науки. С начала века появляются серия его замечательных книг по философии научного знания: «Наука и гипотеза» (1902), «Ценность науки» (1905), «Наука и метод» (1908) [170—172]. Его методологическая позиция, хотя и была связана с конвенционализмом, во ни в коей мере не сводилась к нему. В ней причудливым образом переплетаются элементы эмпиризма, априоризма, психологизма. Вместе с тем, не вызывает сомнения наличие материалистических элементов в философских воззрениях Пуанкаре. Дж. Холтон и С. Гольдберг характеризуют Пуанкаре как представителя «здорового научного консерватизма». «Его сила состояла в том, что он снова и снова спасал физику Ньютона, Максвелла и Лоренца» [52, с. 346]. Гольдберг, обсуждая «молчание Пуанкаре» по поводу СТО в эйнштейновской формулировке, анализирует пуанкаревские критерии «добротной» научной теории — простоту, гибкость и естественность — и приходит к выводу, что по этим критериям «теория относительности Эйнштейна выглядела в глазах Пуанкаре явно недостаточной, причем в такой степени, что он просто не считал нужным о ней упомянуть» [там же].

Таким образом, несмотря на известное родство между работами Минковского и Пуанкаре, последнее нельзя отнести к направлению «математической физики» геттингенского типа. Еще меньше оснований для включения его в одну из школ «теоретической физики» (типа лейденской или венской). Сплетение обеих этих традиций, осложненное к тому же философско-методологическими представлениями (конвенционализм, эмпиризм и т. д.) и определенной приверженностью к электромагнитной программе, сочетание «здорового научного консерватизма» с резко критическим отношением к механизму — все это не позволяет дать однозначную оценку позиции «последнего универсалиста» [322]. В 1908 г. в статье «Динамика электрона», обсуждая вопросы теории тяготения, Пуанкаре даже не упомянул явно о своей лоренц-ковариантной теории [176]. Он рассмотрел здесь четыре подхода к решению проблемы гравитации: теории лессажевского типа, которые, правда, отверг на основе принципа сохранения энергии: две модификации ньютоновской теории, учитывающие лишь зависимость массы от скорости либо по Абрагаму, либо по Лоренцу (в духе Вакера и Вилкенса), и теорию Лоренца, основанную на гипотезе Моссотти—Целльнера, с учетом «гипотезы Лоренца об электронах». Последние три возможности Пуанкаре формулирует следующим образом: «А. Примем гипотезу Абрагама

* Ученик и друг Пуанкаре Ланжевен в 1904 г. писал: «В настоящее время происходит революция именно такого рода. Она выводит атомистические идеи из той тени, в которой их оставляли, для того чтобы привести в соприкосновение с новыми фактами и перевести из области гипотез в область принципов...» [106, с. 51].

(исдеформируемые электроны) и оставим закон Ньютона в его обычном виде. В. Примем гипотезу Лоренца о деформации электрона и сохраним закон Ньютона в его обычном виде. С. Примем гипотезу Лоренца об электронах и видоизменим закон Ньютона, как мы это сделали в разделе XIII (т. е. в соответствии с электромагнитной теорией Лоренца.— В. В.), таким образом, чтобы он стал совместим с принципом относительности» [176, с. 510].

Эффект аномального векового смещения перигелия Меркурия не позволял выбрать одну из этих возможностей. Каждый из подходов дает примерно один и тот же результат (порядка $6-7''$), составляющий не более $1/6$ наблюдаемого сдвига. Все эти три теории входят в рамки электромагнитно-полевой программы. Причем первые две, строго говоря, не согласуются с принципом относительности (даже в лоренцевом понимании), потому что закон Ньютона сохраняется в неизменном виде. Правда, теорию В можно согласовать с принципом относительности, если модифицировать ньютоновский закон в духе релятивистской теории тяготения Пуанкаре 1906 г. (о чем, впрочем, сам Пуанкаре ничего не говорит). Теорию А нельзя сделать релятивистской, так как она опирается на принципиально нерелятивистский подход Абрагама. Теория С, фактически совпадающая с электромагнитной теорией Лоренца, видимо, представлялась Пуанкаре наиболее удовлетворительной, так как давала полевые уравнения гравитации, была лоренц-ковариантной, а также естественно включалась в электромагнитную программу. Таким образом, хотя в 1905 г. Пуанкаре, строя свою лоренц-ковариантную теорию тяготения, действовал в духе релятивистской программы в том виде, который получил распространение после работ Минковского, он, в сущности, оставался на позициях электромагнитно-полевой программы. Он предпочитал в условиях некоторой неопределенности в экспериментальных данных (опыты Кауфмана 1906, лучше согласующиеся с теорией Абрагама, примерно одинаковый результат различных подходов в отношении смещения перигелия Меркурия и т. д.) сохранять достаточно гибкую позицию, которую в дальнейшем можно было бы приспособить к различным теоретическим возможностям. Электромагнитно-полевая концепция была именно такой, а релятивистская программа выглядела более жесткой и догматичной.

Трудности классической теории тяготения в свете теории Пуанкаре—Минковского. Рассмотрим теперь, в какой мере теории типа Пуанкаре—Минковского решали трудности, стоявшие перед классической теорией тяготения на рубеже XIX и XX столетий. Это рассмотрение должно показать нам все плюсы и минусы нового подхода.

Феноменологизм сохранялся и в этих теориях, в отличие, скажем, от теорий типа Лесажа и Лоренца. Но этот недостаток в первом десятилетии XX в. в условиях крушения эфирно-механистических представлений не выглядел слишком серьезным.

Изоляционизм в определенном смысле преодолевался. Вся физика становилась релятивистской, и гравитация органично включалась в этот синтез. Особенно значительной представлялась возможность устранения *инстантизма*. Гравитация оказывалась некоторым квазиполевым действием, распространяющимся, как и электромагнитное поле, со скоростью света.

Причем, фундаментальная роль скорости света в теории тяготения означала наличие глубокой связи между гравитацией и электромагнетизмом, ибо в основе этих явлений и, по-видимому, всей физики лежит некая универсальная сущность, связанная, например, со структурой пространства и времени или процедурами измерений [173, с. 56]. Спустя два-три года Пуанкаре склонился к первой альтернативе. Во всяком случае, доказательство возможности построения логически и эмпирически удовлетворяющей теории тяготения, в которой гравитация распространяется со скоростью света, выглядело как весьма серьезный успех.

Новая теория была не настолько развита, чтобы в ней обсуждался вопрос о гравитационном парадоксе. Однако подход к решению этого парадокса на основе СТО не является бесперспективным. В 50-х годах Г. М. Идлис [75] использовал релятивистские дефекты масс для подсчета суммарной напряженности гравитационного поля от космических систем разного порядка в иерархической (структурной) модели Вселенной, бесконечной в пространстве и времени. Оказалось, что учет дефектов масс этих систем приводит к устранению гравитационного парадокса.

Замена галилей-ньютоновской группы, описывающей пространственно-временную структуру классической механики и теории тяготения, группой Пуанкаре, лежащей в основе СТО и релятивистской теории тяготения, разрушала *геометрический априоризм* классики.

Точно так же и *геометрический абсолютизм* устранялся в новой теории. Однако, как это вскоре подчеркнул сам Эйнштейн, СТО также присущ геометрический абсолютизм, связанный с выделением абсолютной четырехмерной структуры, «мира Минковского», который так же, как и ньютоновские абсолюты, не подвержен воздействию со стороны движущейся материи.

В расчетах, предпринятых де Ситтером, предполагалось, что равенство инертной и гравитационной масс сохраняется. Таким образом, положение дел, в сущности, не отличается от такового в классической теории, а значит, и эмпиризм в указанном ранее смысле остается и в теориях типа Пуанкаре—Минковского. Правда, сам Пуанкаре считал, что в действительности допущение $m_g = m_{ин}$ в рамках СТО не доказано, и расчеты, основанные на его использовании могут оказаться некорректными: «...Мы должны отличать массу-коэффициент инерции и массу-коэффициент притяжения. По закону Ньютона между этими двумя коэффициентами существует строгая пропорциональность. Но это было доказано только для скоростей, к которым применимы общие принципы динамики. Теперь мы видели, что масса-коэффи-

циент инерции — возрастает вместе со скоростью. Следует ли из этого заключить, что масса-коэффициент притяжения — также возрастает вместе со скоростью и остается пропорциональной коэффициенту инерции или что этот коэффициент притяжения остается постоянным? Это тот вопрос, решить который у нас нет никакой возможности. С другой стороны, если коэффициент притяжения зависит от скорости, то так как скорости двух тел, притягивающих друг друга, обычно не одинаковы, то как этот коэффициент будет зависеть от таких двух скоростей?» [176, с. 507].

Недостатки теорий типа Пуанкаре—Минковского. Суммируя сказанное, можно констатировать существенный прогресс на пути устранения ряда логико-теоретических изъянов классической теории тяготения, прежде всего инстантизма, изоляционизма и геометрического априоризма; определенные возможности открывались и для преодоления финитизма, которые, однако, не были использованы. Вместе с тем, и это, прежде всего, касалось эмпиризма и геометрического абсолютизма, некоторые существенные трудности оставались. К ним следовало добавить еще то обстоятельство, что новая теория, несмотря на естественное включение в неё конечной скорости распространения гравитации, не была полевой. В теории отсутствовало уравнение гравитационного поля, рассматривался, в сущности, лишь элементарный закон взаимодействия. Таким образом, теория была квазидальнодействующей (напоминала дальнодействующие электродинамические теории Вебера, Римана, Неймана) и поэтому по сравнению с теорией электромагнитного поля, в которой инстантизм радикально устранялся из теории, выглядела достаточно ущербной. Решение проблемы инстантизма в них представлялось неполным, половинчатым. Этот недостаток лоренц-ковариантных теорий Пуанкаре и Минковского рассматривался как основной. Абрагам в 1914 г. писал в обзоре гравитационных теорий: «Законы взаимодействия гравитирующих масс, установленные этими пионерами теории относительности (Пуанкаре и Минковский, — В. В.), вполне совместимы с рассмотренной выше векторной теорией тяготения (электромагнитной теорией Лоренца. — В. В.). Все же любая векторная теория дает отчет о процессах в поле, посредством которых импульс и энергия одной массы переносятся на другие; релятивистские же элементарные законы не выводимы из полевых уравнений. Таким образом, трудность, присущая векторной теории, не преодолевается, но лишь замалчивается»* [317, с. 474]. Нерешенной осталась задача установления уравнений гравитационного поля, которые «описывали бы распространение гравитации со скоростью света и при этом приписывали бы полю положительную энергию...» [там же]. Абрагам, таким образом, затрагивает еще одну проблему, — проблему

* Здесь имеется в виду, прежде всего, проблема отрицательной плотности энергии.

энергии,— которая в релятивистских теориях Пуанкаре—Минковского скорее обходится, чем решается.

Паули уже после создания ОТО писал в своей энциклопедической статье по теории относительности: «Против всех этих исследований можно возразить, что они исходят из элементарного закона для силы, а не из дифференциального уравнения Пуассона. Между тем, если уж оказывается, что действие распространяется с конечной скоростью, то ожидать простых общеприменимых законов можно только в том случае, если их удастся выразить с помощью величин, непрерывно изменяющихся в пространстве и времени (т. е. поля), а также найти дифференциальные уравнения этого поля» [155, с. 207]*.

Другим, менее серьезным, но все же заметным недостатком теорий типа Пуанкаре—Минковского была определенная неоднозначность релятивистского обобщения ньютоновского закона. Множественность возможных обобщений такого рода ясно осознавалась самим Пуанкаре.

Наконец, судьба этих теорий могла быть более длительной и счастливой, если бы они сумели объяснить аномальное смещение перигелия Меркурия. Но, как это было вполне выяснено де Ситтером (а еще раньше отмечено Вакром), лоренц-ковариантные обобщения ньютоновского закона способны объяснить не более $1/6$ наблюдаемого сдвига. Лоренц и де Ситтер, правда, поддержали попытку Зеелигера объяснить оставшуюся часть сдвига возмущающим действием зодиакального света. Поэтому серьезных аргументов эмпирического характера в начале 1910-х годов против релятивистских теорий Пуанкаре и Минковского, вообще говоря, не было. Во всяком случае, в экспериментально-эмпирическом отношении теории Пуанкаре—Минковского выглядели не слабее ньютоновской теории, хотя вопрос об экспериментальном подтверждении основ СТО не был решен в эти годы однозначно в пользу этой теории, как показали опыты Кауфмана.

Значение теории Пуанкаре—Минковского в формировании релятивистской теории гравитационного поля. Эйнштейн уже в 1907 г. начал разработку гравитационной проблемы. Некоторые материалы дают основание считать, что он с самого начала пытался строить релятивистское обобщение уравнения Пуассона. При этом он, вероятно, мог знать о работах Вакера и Вилкса, опубликованных в «*Physikalische Zeitschrift*», и, таким образом, рассчитывать на то, что учет релятивизма может устранить аномалию Меркурия. Не осталось никаких материалов, свидетельствующих о том, что Эйнштейн делал попытки в духе теории Пуанкаре—Минковского. Насколько нам известно, он вообще не

* Зоммерфельд, комментируя доклад Минковского «Пространство и время», писал: «Из формулировки закона тяготения, данной Минковским или Пуанкаре, вытекает, что можно (различным образом) примирить закон Ньютона с теорией относительности. Этот закон понимается при этом как точечный закон, т. е. как своего рода дальное действие», тяготение при этом «лишь внешним образом приспособлено к постулату относительности» [68, с. 212].

высказывался о теориях этого типа. Понятие поля для Эйнштейна было, по-видимому, столь же фундаментальным, как и принцип относительности. Поэтому он считал, вероятно, бесперспективным подход типа Пуанкаре—Минковского. К тому же, в конце 1907 г. Эйнштейн, размышляя над гравитационной проблемой, взглянул на факт равенства инертной и гравитационной масс, который лежал в основе классической механики и теории тяготения, через призму релятивистской программы и, превратив его в принцип эквивалентности, нашел, как ему казалось, ключ к релятивистскому обобщению теории тяготения. С этого времени его подход к теории гравитации опирался на этот принцип и концепцию поля. В чем же заключалось значение релятивистских квазидальнодействующих теорий Пуанкаре—Минковского? Ведь это направление, как будто, не оказало влияния на магистральный путь развития теории тяготения, который привел к ОТО. Дело обстоит, однако, несколько сложнее. Проблемой гравитации в первом десятилетии занимался не только Эйнштейн. Она в этот период решалась на основе двух основных научно-исследовательских программ: электромагнитно-полевой и релятивистской. В условиях утверждения СТО и релятивистской программы стояла важная в принципиальном отношении задача: доказать возможность совместимости законов гравитации с новой программой. Эта фундаментальная задача и была решена Пуанкаре и Минковским, хотя надежды на то, что на этом пути удастся устранить основную эмпирическую трудность теории тяготения, не оправдались. Возможность непротиворечивого (с логико-теоретической и экспериментально-эмпирической точек зрения) введения конечной скорости распространения гравитации, равной скорости света, и включения изолированного до тех пор круга гравитационных явлений в рамки релятивистской программы, охватившей почти всю физику, было делом огромной принципиальной важности.

Далее, поскольку гравитационная сила описывалась в теориях Пуанкаре—Минковского четырехмерным вектором, направлялась мысль о том, что при их теоретико-полевом оформлении должно появиться обобщение уравнений Пуассона со скалярным потенциалом. Тем самым, эти теории можно рассматривать как некоторую переходную фазу от векторных теорий с присущей им трудностью энергетического характера (наличие отрицательной плотности энергии) к теориям скалярного типа, в которых можно было надеяться устранить эту трудность. Кстати говоря, саму теорию Пуанкаре—Минковского с точки зрения размерности потенциала квалифицировали по-разному. Абрагам рассматривал её в разделе «Векторные теории» и писал: «Законы взаимодействия гравитирующих масс, установленные этими пионерами теории относительности (Пуанкаре и Минковским.— В. В.), вполне совместимы с рассмотренной выше векторной теорией тяготения» [317, с. 476]. Основанием для такой оценки было, во-первых, близкое родство выражений для силы тяготения в элект-

ромагнитных теориях и теории Пуанкаре—Минковского, во-вторых, лоренц-ковариантность и наличие конечной скорости распространения гравитации, равной скорости света, и, в-третьих, совпадение значений для векового сдвига перигелия Меркурия в теории Лоренца и теориях Пуанкаре—Минковского.

Современные исследователи нередко помещают теорию Пуанкаре—Минковского в раздел скалярных теорий. Так поступает, например, А. Л. Харвей [384]. О теории Пуанкаре он замечает, что «это не только первая лоренц-ковариантная теория, она еще и скалярная» [384, с. 452].

Другие авторы (например, Уитроу и Мордух [570, 571]) не включают ее ни в векторные, ни в скалярные, рассматривая ее особняком. И это, вероятно, наиболее правильный подход, поскольку теория Пуанкаре—Минковского не является полевой теорией. Коттлер [434], например, в 1922 г. показал, что выражение для силы в этой теории можно получить по формуле

$$X_i = \frac{d}{d\tau} \left(\frac{\partial V}{\partial (\dot{x}_i / d\tau)} \right) - \frac{\partial V}{\partial x_i}, \quad (31)$$

исходя из скалярного потенциала:

$$V = - \frac{k^2 m m'}{c} \sum_i \frac{dx_i}{d\tau} \frac{dx'_i}{d\tau'} \Big/ \sum_i (x_i - x'_i) \frac{dx'_i}{d\tau'}, \quad (32)$$

где x_i, x'_i — координаты взаимодействующих масс m и m' , k^2 — гравитационная постоянная, c — скорость света, τ — собственное время. Однако для этого скалярного потенциала не существует полевого уравнения типа уравнения Пуассона. Во всяком случае, теория Пуанкаре—Минковского носила до некоторой степени промежуточный характер между векторными и скалярными и могла сыграть определенную роль в переходе к полевым скалярным теориям, которые в 1911—1912 гг. разрабатывали Абрагам, Нордстрем, Эйнштейн и др. Теория Пуанкаре—Минковского была первой в ряду «переходных» теорий на пути от теории Ньютона к ОТО. (В квантовой физике такой переходной фазой была так называемая «старая квантовая теория» Бора).

Стимулирующее значение должны были иметь и недостатки теории Пуанкаре—Минковского. Поиск лоренц-ковариантных уравнений поля, которые бы давали решения, близкие к элементарным законам взаимодействия Пуанкаре; более органичный учет факта равенства инертной и гравитационной масс, который мог бы устранить эмпиризм существующих теорий тяготения — эти направления исследования подсказывались неудачами прямолинейного использования релятивистской программы для решения гравитационной проблемы. Наконец, теория Пуанкаре—Минковского не объясняла аномальный сдвиг перигелия Меркурия и, в сущности, не предсказывала никаких новых эффектов, которые можно было бы обнаружить экспериментально.

Таким образом, теории типа Пуанкаре — Минковского, явившиеся результатом прямолинейного применения релятивистской программы к проблеме тяготения, образовали определенный этап в развитии релятивистской теории тяготения. Они успешно конкурировали с электромагнитными теориями, последующее их развитие должно было привести к лоренц-ковариантным скалярным теориям типа теорий Нордстрема и Ми. Но реальный путь движения научной мысли оказался сложнее.

2. Принцип эквивалентности, 1907 г.

С горы скатившись, камень лег в долине.
Как он упал? Никто не знает ныне —
Сорвался ль он с вершины сам собой,
Иль был низринут волею чужой.

Ф. И. Тютчев «*Problème*»

И он дерзнул на все — вплоть до небес.
Но разрушенье — жажда созиданья,
И, разрушая, жаждал он чудес —
Божественной гармонии создапя.

И. Бунин. «*Джордано Бруно*» (1907)

Вопрос о равенстве инертной и гравитационной масс до Эйнштейна

Первый фундаментальный вклад Эйнштейна в теорию тяготения — разработка принципа эквивалентности, который впоследствии стал физической основой ОТО, а до этого служил главной путеводной нитью в поисках удовлетворительной релятивистской теории тяготения. Сформулировал его Эйнштейн в конце 1907 г., когда теории типа теорий Пуанкаре—Минковского были последним словом в области гравитации. 4 декабря 1907 г. статья Эйнштейна «О принципе относительности и его следствиях», пятый раздел которой содержал принцип эквивалентности, поступила в редакцию «*Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*» [234], а 21 декабря Минковский в Геттингене докладывал свою работу «Основные уравнения...» [471], в которой развил вариант релятивистской теории тяготения.

Основой принципа эквивалентности, как мы увидим, является интерпретация известного со времен Галилея и Ньютона факта равенства инертной и гравитационной масс с позиций релятивистской методологии. Этому факту придавалось большее значение на рубеже XIX и XX столетий, более того, многие механистические и электромагнитные теории тяготения конструировались именно так, чтобы объяснить его. В теориях лессажевского типа объяснение фундаментального равенства достигалось за счет предположения о такой пористости тел, которая

обеспечивает независимое взаимодействие «ультрамировых корпускул» с каждым атомом тела. В результате оказывалось, что сила притяжения должна быть пропорциональна числам атомов взаимодействующих тел [129, с. 154]. В электромагнитных теориях типа Лоренца равенство $m_r = m_{ин}$ вытекает из единой электромагнитной природы инертной и гравитационной масс.

В теории Пуанкаре—Минковского равенство этих масс не объясняется, а в сущности постулируется, как и в теории Ньютона.

Некоторые идеи, которые можно было бы интерпретировать в духе эйнштейновского принципа эквивалентности, были высказаны Махом в его «Механике» [135], которая, как известно, произвела на Эйнштейна глубокое впечатление [296, 391]. Изучая понятие инертной массы и критикуя ньютоновское понимание инерции, Мах близко подошел к мысли об интерпретации взаимодействия между массами на чисто кинематическом языке, а именно на основе понятия ускорения. Он связывал это с критикой ньютоновских пространственно-временных и кинематических абсолютов, апеллируя к их ненаблюдаемости, с исключением понятия силы, с новым представлением об инерции как свойстве тел по отношению к удаленным массам Вселенной. В известных рассуждениях Маха о ньютоновском опыте с ведром [273, с. 31] Эйнштейн усматривал идею принципа эквивалентности, ведущего к необходимости расширения принципа относительности инерциальных движений.

Таким образом, распространенное мнение, что «в наш век никто, за исключением Эйнштейна, не удивлялся больше этому закону» (т. е. факту равенства $m_r = m_{ин}$. — В. В.) [78, с. 189] и что «за последние три столетия развития науки Эйнштейн был первым, кто увидел в равенстве ускорений (свободного падения. — В. В.) некий важный намёк» [78, с. 189] явно преувеличено. В оценке и понимании этого факта, кстати говоря, подтвержденного как прямыми экспериментами типа Бесселя — Этвеша, так и всей небесной механикой, было две традиции. Первая заключалась в истолковании равенства $m_r = m_{ин}$ как фундаментального эмпирического или феноменологического положения, которое, как и закон всемирного тяготения в целом, надлежало объяснить на основе тех или иных эмпирико-механистических представлений, а после утверждения электромагнитной программы — на основе электромагнетизма. Именно так ставилась задача в теориях лессажевского типа и в электромагнитной теории Лоренца и подобных ей. Вторая, значительно менее развитая традиция, восходит к К. Нейману [474] и особенно к Маху и связана не с попытками «объяснения» равенства $m_r = m_{ин}$, а с использованием его для перестройки учения об инерции в классической механике. К тому же эта традиция — речь идет прежде всего о Махе — связывала анализ инерции с релятивизацией пространства и времени и расширением понятия относительности, с идеями близкодействия и поля (инерциальное

поведение тел определяется некоторым полем, «средой», зависящей от удаленных масс Вселенной и призванной замкнуть абсолютное пространство Ньютона), с заменой динамических понятий (сила и т. д.) понятиями кинематическими (ускорение и т. д.).

Эйнштейн воспринял эту вторую традицию. Его гениальность в данном случае заключалась не в том, что он первым после Ньютона обратил внимание на равенство $m_g = m_{ин}$ и его необъяснимость в классической механике и теории тяготения. Заслуга Эйнштейна, как мы увидим, состояла в таком обращении проблемы, чтобы, отказавшись от попыток механического, электромагнитного или каких-либо иных объяснений фундаментального равенства, принять его за некоторый исходный пункт для построения теории тяготения.

Экспериментальное обоснование равенства $m_g = m_{ин}$ и опыты Этвеша. О том, что фундаментальность факта равенства инертной и гравитационной масс осознавалась физиками, свидетельствуют эксперименты по проверке этого факта, проведенные Ф. Бесселем в 1828—1832 гг. и Л. Этвешем* в 1888—1889 гг. [349]. Бессель, продолжая традицию Ньютона, экспериментировал с маятниками. Он доказал независимость периода колебаний (T) от выбора тела маятника, используя различные сорта латуни, железо, золото, серебро, свинец, метеоритное железо, кварц, мрамор, глину. Это могло получиться только при строгой пропорциональности инертной и тяжелой масс, т. е.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g} \frac{m_{ин}}{m_g}},$$

где l — длина маятника, $g = GM/R^2$ (M, R — масса и радиус Земли, G — гравитационная постоянная). Точность опытов Ньютона составляла 0,001, а точность опытов Бесселя — $2 \cdot 10^{-5}$.

Этвеш проводил свои знаменитые опыты со статическими крутильными весами и в результате добился точности $0,5 \cdot 10^{-7}$. Он вполне отдавал себе отчет в принципиальном значении своих экспериментов. «Среди законов, на которых Ньютон основал свою теорию тяготения,— писал Этвеш в первом своем сообщении, зачитанном на заседании Будапештской академии наук 20 января 1889 г.,— существует один из важнейших, который утверждает, что притяжение земных тел Землей пропорционально массе тел и не зависит от их материальной структуры» [351, с. 17]. Упомянув затем об экспериментах Ньютона и Бесселя, он напомнил о словах Бесселя, который «удивительно метко заметил, что всегда будет интересно проверить справедливость этого закона с той точностью, которую позволяет до-

* В работах на венгерском языке имя Этвеша пишется как Logand, на немецкий же язык оно всегда переводилось и писалось как Roland. С этим связана некоторая путаница в литературе: пишут то L. Eötvös, то R. Eötvös.

стичь наиболее совершенные вспомогательные средства прогрессирующего времени» [351, с. 18] *.

Основополагающие эксперименты Этвеша, увеличившие точность подтверждения равенства $m_g = m_{in}$ почти на четыре порядка, были весьма своевременны в условиях нарастания кризисной ситуации в области гравитации. Сам Этвеш отметил два обстоятельства, которые стимулировали его опыты: «К этому исследованию побуждают, главным образом, два обстоятельства. Во-первых, так как закон Ньютона дает возможность определять массу тел посредством измерения их веса, то логика требует, чтобы справедливость основного закона была доказана по крайней мере с той степенью точности, которая достигнута в экспериментах по взвешиванию тел, а эта последняя значительно больше $1/50\ 000$ (т. е. точности опытов Бесселя.— *В. В.*), а именно, больше $1/1\ 000\ 000$. Во-вторых, опыты Ньютона и Бесселя распространялись лишь на такие тела, которые мало разнятся по своему строению, при этом для существенно менее плотных тел вопрос, фактически, остается открытым» [351, с. 18]. Идея опыта заключалась в измерении действующих на два тела одинаковой массы суммарных сил, складывающихся из притяжения Земли, которое направлено к ее центру, и центробежной силы, которая вызвана вращением Земли и направлена от оси вращения перпендикулярно ей. Если бы гравитационные массы тел зависели от их структуры, то эти суммарные силы для различных тел с одинаковой инертной массой были бы направлены по-разному. В этом случае «посредством вычисления,— продолжал Этвеш,— мы находим, что если бы притяжение Земли для двух тел одинаковой массы, но из различного вещества, отличалась бы друг от друга на одну тысячную часть, то направления тяжести (равнодействующих, составленных из притяжения и центробежной сил.— *В. В.*) обоих тел образовывали между собой угол $0,356''$, то есть примерно одну треть секунды; а если бы разность в силах притяжения составляла одну двадцатимиллионную, то этот угол составил бы $356/20\ 000\ 000$ секунды, то есть несколько больше одной шестидесятитысячной секунды» [там же]. Но изменение направления силы тяжести на эту величину, как показал Этвеш, можно было бы зарегистрировать с помощью существенно усовершенст-

* Год проведения опыта	Автор эксперимента	Точность	Литература
1908—1909	Этвеш, Пекар, Фекете	$0,5 \cdot 10^{-8}$	[354, 355]
1910	Саутсерис	$0,5 \cdot 10^{-8}$	[189]
1920	Зеeman	$0,3 \div 0,5 \cdot 10^{-7}$	[15, 587]
1935	Реннер	$0,5 \cdot 10^{-8}$	[4, 7]
1961—1964	Дикке, Ролл, Кротков	$3 \cdot 10^{-11}$	[57, 59, 60]
1971	Брагинский с сотр.	10^{-12}	[13]

Примечание. Все опыты, кроме маятникового эксперимента Саутсериса, были проведены с крутильными весами. Саутсерис и Зеeman экспериментировали с радиоактивными веществами.

вованных им крутильных весов, закручивание нити подвеса должно было бы составить одну минуту, значенис, вполне доступное измерению*.

В результате он достиг точности измерений даже более высокой, чем точность взвешивания. «Я могу поэтому с полным правом утверждать,— писал в заключение Этвеш,— что если вообще существует некоторос различие в силе тяжести для тел одинаковой массы, но состоящих из различного вещества, то оно для латуни, стекла, сурьмы и пробки оказывается меньше одной двадцатимиллионной, а для воздуха и латуни определено меньше одной стотысячной» [351, с. 20].

В связи с опытами Этвеша остановимся еще на двух вопросах: 1) каким образом он пришел к этим опытам и 2) сыграли ли они какую-либо роль в формулировке принципа эквивалентности?

Этвеш в конце 70-х и начале 80-х годов XIX в. занимался исследованиями в области молекулярной физики жидкостей и капиллярности. В 1885 г. он опубликовал работу [350], в которой содержалось открытое им соотношение, описывающее зависимость молекулярного объема жидкости от температуры и вошедшее в историю физики как «закон Этвеша»:

$$\alpha v^{2/3} = k(T - T_0),$$

где α — поверхностное натяжение, v — молекулярный объем, T — температура, T_0 — температура, почти совпадающая с критической, k — универсальная постоянная**. А через два с небольшим года после этого в «Naturwissenschaftliche Mitteilungen», издаваемых Венгерской академией наук, появилось сообщение: «Действительный член академии, барон Роланд Этвеш доложил (12 ноября 1888 г.) работу под названием «Исследо-

* Этвеш описывает так свой эксперимент: «Я закрепил в моих крутильных весах (Torsionswagen) на концах коромысла длиной в 25—30 см, подвешенного на тонкой платиновой проволоке, два различных тела каждое весом примерно в 30 г. После того, как коромысло было установлено перпендикулярно к меридиану, я точно определил его положение посредством зеркальца, двигающегося вместе с коромыслом, и зеркальца, закрепленного на ящике установки. Затем я поворачивал установку вместе с ящиком на 180°, так что тело, находившееся до этого на восточном конце коромысла, перемещалось теперь на западный конец, после чего вновь измеряя положение коромысла. Если бы силы тяжести прикрепленных с обеих сторон тел были различны, то это должно было бы привести к закручиванию нити подвеса. Этого однако не наблюдалось, несмотря на то, что на одном конце всегда помещался латунный шарик, а на другом конце — стекло, пробка или кристаллы сурьмы; но отклонение в направлении силы тяжести на 1/60000 секунды должно было бы вызвать закручивание в одну минуту, что можно было бы отчетливо наблюдать» [351, с. 19].

** Эта работа Этвеша породила целое направление исследований в области учения о капиллярности. Ван дер Ваальс в 1894 г. дал первое термодинамическое объяснение закону Этвеша. Эйштейн в 1911, Маделунг в 1913 и, особенно, Борн и Курант в 1913 разработали молекулярно-кинетическую теорию явления, распространив методы Дебая и Борна — Кармана по расчету удельных теплоемкостей твердых тел на жидкости [527].

вание в области гравитационных явлений», содержащую обзор проведенных им исследований по изучению притяжения масс... Он описывает средства и пути, с помощью которых можно доказать притяжение тел очень незначительной массы с огромной точностью» (цит. по: [527, с. LXVI]). Биограф Этвеша П. Шеленьи [527] подчеркивает, что все последующие гравитационные и магнитные исследования Этвеша были стимулированы его усовершенствованием статических крутильных весов, которые Этвеш называл кулоновыми. Он нашел новую возможность использования крутильных весов для очень точного измерения векторной разности сил, которые действуют на тела, помещаемые на концы коромысла весов. Таким образом, для Этвеша, как и для А. Майкельсона, исходным пунктом исследований был прибор, экспериментальный метод, и сфера исследований определялась не столько потребностями той или иной области знания (теории тяготения или гравитации), сколько возможностями этого прибора или метода*.

В 1896 г. Этвеш опубликовал «Исследования по гравитации и земному магнетизму» в немецком журнале «*Annales der Physik und Chemie*» [352], а затем докладывал их на Международном конгрессе физиков в Париже (1900 г.) [353]. В 1909—1910 гг. точность опыта Этвеша была повышена в 10 раз [354].

Как известно, Эйнштейн не упоминает об экспериментах Этвеша ни в 1907 г., когда им впервые был выдвинут принцип эквивалентности, базирующийся на равенстве $m_g = m_{ин}$, ни в 1911 г., когда после некоторого прерыва Эйнштейн вернулся к разработке теории тяготения на основе этого принципа. Вероятнее всего, он действительно не знал об этом опыте. Любопытно, что в 1910 г. Эйнштейн закончил статью о законе Этвеша, относящемся к теории капиллярности [244]. Имя Этвеша, таким образом, появляется в работах Эйнштейна уже в 1911 г., но не в связи с гравитацией! Впервые об опыте Этвеша Эйнштейн упоминает лишь в 1913 г. в статье, написанной совместно с М. Гроссманом и содержащей контуры ОТО [250].

СТО и равенство $m_g = m_{ин}$

Вопрос о равенстве инертной и гравитационной масс приобрел новый смысл после установления в рамках электродинамики движущихся сред (даже еще до СТО) зависимости инерт-

* П. Шеленьи проводит далеко идущую параллель между Этвешем и Майкельсоном: оба сумели построить исключительно точные приборы, которые определяли их последующие исследования (крутильные весы и интерферометр); оба неуклонно стремились в дальнейшем к повышению их точности; опыты Этвеша и Майкельсона, как известно, лежат в основе, соответственно, ОТО и СТО; оба эксперимента связаны с движениями Земли. Добавим, наконец, несколько предвосхищая последующее наше изложение, что эти фундаментальные эксперименты, по-видимому, не имели существенного значения в разработке Эйнштейном основ СТО и ОТО, более того, вероятно, Эйнштейн о них не знал (об опыте Майкельсона в 1905 г., а об опыте Этвеша — в 1907 г.).

ной массы от скорости. Это обстоятельство неоднократно отмечал Пуанкаре. В докладе «Настоящее и будущее математической физики» (1904) он после краткого наброска «новой механики» заметил: «Здесь перед нами возникает вопрос, постановкой которого я и ограничусь: если нет больше массы (т. е. массы, не зависящей от скорости.— В. В.), то во что превращается закон Ньютона? Масса имеет два аспекта: это и коэффициент инерции, и масса тяготения, входящая в качестве множителя в закон ньютоновского притяжения. Если коэффициент инерции не постоянный, может ли быть постоянной масса притяжения? Вот в чем вопрос» [177, с. 570].

Аналогичный вопрос, но уже в рамках СТО, обсуждался и Планком в статье «К динамике движущихся систем», доложенной на заседании Берлинской академии наук 11 июня 1907 г. и посвященной, в основном, релятивистской динамике абсолютно черного тела: «Тепловое излучение в полностью эвакуированном, ограниченном зеркальными стенками пространстве наверняка обладает инертной массой, но обладает ли оно так же и тяжелой массой?» [161, с. 468]. Планк не ограничивается постановкой вопроса и склонен ответить на него положительно: «Если, что проще всего, ответить на этот вопрос отрицательно, то придется отказаться от общепризнанной тождественности инертной и тяжелой масс, подтвержденной всеми предпринятыми до сих пор опытами» [там же].

Вопрос о равенстве инертной и гравитационной масс поднял также Дж. Дж. Томсон (в речи, произнесенной в Манчестерском университете 4 ноября 1907 г.) [196]. Он полагал, что масса, ассоциированная с энергией движения заряженного тела, является массой эфира, увлекаемого телом: «Итак, с наэлектризованным телом связано эфирное, астральное тело, которое увлекается наэлектризованным телом при его движении и увеличивает кажущуюся массу последнего» [196, с. 78]. При этом, независимо от того, считать ли эфир невесомым или тяготеющим, эта «присоединенная» эфирная масса, согласно Томсону, не должна давать вклад в вес тела: «Если эфир не подвержен силе тяжести, он наверное не может усилить вес тела, с которым он соединен; если, наоборот, эфир тяготеет, нельзя ожидать, чтобы вес тела, плавающего в эфирном море, увеличился от того, что с ним связана эфирная масса» (цит. по: [189, с. 106]). (Эти слова были сказаны Томсоном в 1909 г. на съезде Британской ассоциации в Виннипеге.)

Приходилось допускать нарушение равенства инертной и гравитационной масс, которое проще всего можно было бы зарегистрировать у тел, обладающих большой добавочной, или эфирной, инертной массой. В качестве такого рода тел можно было взять радиоактивные вещества. «Такого рода заключения побудили меня несколько времени тому назад начать опыты с радием, чтобы убедиться, нельзя ли открыть какис-нибудь указания на то, что некоторая часть его массы состоит из необык-

новешнего вещества (эфира.— В. В.). Лучший способ исследования, который до сего времени я мог придумать, состоит в том, чтобы проследить, будет ли для радия соблюдаться то же отношение между массой и весом, как и для всякого обыкновенного вещества. Если бы часть массы радия, соответствующая эфиру, была невесома, то грамм радия весил бы меньше, чем грамм такого вещества, в массе которого не так много эфира. А отношение массы к весу можно найти точно, когда измеряется время качания маятника» [196, с. 80]. Опыт с радиевым маятником не удался Томсону. Ему не удалось достичь необходимой точности, и результат остался неопределенным. Спустя некоторое время, в 1910 г., значительно большего успеха в этом направлении добился ученик Томсона Л. Саутсернс, который проводил эксперименты с более доступным ураном. Он получил с достаточно высокой для маятниковых измерений точностью ($5 \cdot 10^{-6}$) подтверждение равенства $m_g = m_{ин}$, в то время как, согласно расчетам Томсона, следовало ожидать разницу порядка $6 \cdot 10^{-5}$. Результат Саутсернса свидетельствовал об ошибочности эфирных представлений Томсона и рассматривался современниками как «чувствительный удар для сторонников не только теории Томсона, но и эфирной теории вообще» [189, с. 106]. Значение этих работ Томсона и Саутсернса заключалось также в подтверждении равенства инертной и гравитационной масс, хотя и с небольшой точностью (в 1000 раз меньшей, чем в опытах Этвеша, Пекара и Фекете 1909—1910 гг.), но для нового важного класса тел — радиоактивных веществ.

Итак, в первом десятилетии (и до и после 1907 г.) вопрос о равенстве инертной и гравитационной масс широко обсуждался в самых различных контекстах (электромагнитная программа, релятивистская программа, разные варианты механистической и эфирной концепций и т. д.).

Предположение об эйнштейновской попытке построения лоренц-ковариантной скалярной теории гравитационного поля. В 1912 г. молодой финский теоретик Г. Нордстрем [481] выдвинул первую лоренц-ковариантную скалярную теорию гравитационного поля, которая, в отличие от теории Пуанкаре — Минковского, была действительно полевой теорией и опиралась на четырехмерное обобщение уравнения Пуассона. Копию статьи до ее опубликования Нордстрем послал Эйнштейну. В дополнении при корректуре он сообщал о реакции Эйнштейна: «Из письменного сообщения проф. Эйнштейна я узнал, что он уже раньше и более простым способом рассматривал использованную мною возможность исследования гравитации. Однако он пришел к убеждению, что следствия такой теории не могут соответствовать действительности. Он показывает на простом примере, что согласно этой теории некоторая вращающаяся система в поле тяготения будет получать меньшее ускорение, чем невращающаяся» [481, с. 1129]. Как мы увидим, со времени выдвижения Эйнштейном принципа эквивалентности в

конец 1907 г. он уже едва ли мог вернуться к попыткам построения теории тяготения на основе СТО. Поэтому наиболее вероятно, что слова «уже раньше» (*bereits früher*) относятся к периоду, предшествовавшему выдвижению принципа эквивалентности. Это значит, что, по крайней мере, в 1907—1908 г. Эйнштейн работал над релятивистской теорией тяготения, причем не в духе квазидальнодействующего подхода Пуанкаре — Минковского, а на основе лоренц-ковариантного обобщения уравнения Пуассона. Публикаций на эту тему, как известно, не существует. Но некоторые дополнительные подтверждения сказанному найти можно прежде всего в воспоминаниях самого Эйнштейна, к которым он обращался в 1933 г. [293] и 1949 г. [296]. Наиболее подробно и ярко рассматриваемый период описан в Гибсоновской лекции в Глазго. В частности, Эйнштейн рассказывает о том, что до принципа эквивалентности он пытался построить лоренц-ковариантную полевую теорию тяготения, от которой, однако, вынужден был отказаться из-за расхождения ее с фактом равенства инертной и гравитационной масс: «Когда в 1905 г. специальная теория относительности провозгласила равноправие всех так называемых инерциальных систем для формулировки законов природы, со всей остротой встал вопрос: не существует ли и более всеобъемлющее равноправие систем координат? (...) **Первый шаг на пути решения этой задачи я впервые сделал, пытаясь рассматривать закон тяготения в рамках специальной теории относительности** (выделено нами.—*В. В.*). Как и большинство других исследователей того времени, я старался отыскать *полевой закон* тяготения, так как ввиду отказа от понятия абсолютной одновременности уже невозможно было бы сколько-нибудь естественным образом ввести непосредственное действие на расстоянии.

Конечно, проще всего было сохранить лапласов скалярный потенциал тяготения и дополнить уравнение Пуассона производной по времени так, чтобы удовлетворить требованиям специальной теории относительности. Следовало также привести в соответствие со специальной теорией относительности и закон движения материальной точки в гравитационном поле. Путь к этому был не столь очевиден, поскольку инертная масса тела могла зависеть от гравитационного потенциала. Этого даже следовало ожидать в силу закона инерции энергии. Однако эти исследования привели к результату, который вызывал у меня глубокое недоверие. Согласно классической механике, ускорение тела в вертикальном поле тяготения не зависит от горизонтальной составляющей скорости. С этим связано то обстоятельство, что ускорение механической системы... в подобном поле тяготения не зависит от ее внутренней кинетической энергии. Согласно же разработавшейся мною теории, ускорение падения зависело от горизонтальной скорости и, следовательно, от внутренней энергии системы.

Это противоречило давно известному опытному факту, что все тела падают в поле тяжести с одинаковым ускорением. Этот закон, который иначе можно сформулировать как закон равенства инертной и тяжелой масс, представлялся мне имеющим глубокий смысл. Я крайне удивился, что этот закон существует, и предположил, что он и даст ключ к более глубокому пониманию инерции и тяготения. В том, что этот закон выполняется строго, я не сомневался, даже не зная результатов изящных опытов Этвеша, которые — если я правильно вспоминаю — стали мне известны позже. Тогда я отказался от попытки рассматривать упомянутым выше образом проблему гравитации в рамках специальной теории относительности. Эта попытка, конечно, оказалась несостоятельной, поскольку не принималось во внимание наиболее фундаментальное свойство гравитации» [293, с. 403—404].

В сущности, то же самое пишет Эйнштейн в «Автобиографических заметках» 1949 г. Правда, он подчеркивает, что идея расширения СТО возникла лишь после неудачной попытки включить гравитацию в рамки этой теории: «Тот факт, что специальная теория относительности представляет лишь первый шаг в необходимом развитии, стал мне ясен лишь при попытке представить в рамках этой теории и тяготение» [296, с. 282]. Затем он рассказывает об этой попытке построения лоренц-ковариантной скалярной теории гравитационного поля. Конструируемая теория, как полагал Эйнштейн, должна была «соединить в себе следующие вещи: 1) из общих соображений частной теории относительности было ясно, что инертная масса физической системы при увеличении полной энергии... должна возрастать; 2) из очень точных опытов (в особенности из опытов Этвеша...) было эмпирически известно с очень большой точностью, что тяжелая масса тела в точности равна его инертной массе» (там же). Отсюда вытекало, что вес тела должен был определяться его полной энергией, или, другими словами, что ускорение свободного падения тела не должно было зависеть от природы падающего тела и, в частности, от содержащейся в нем энергии. Поскольку теория этого не давала, Эйнштейн пришел к выводу о том, «что в рамках специальной теории относительности нет места для удовлетворительной теории тяготения» [там же] *.

Осознание Эйнштейном фундаментального значения факта равенства $m_g = m_{ин}$. Итак, отметим следующие моменты в развитии идей, которые подвели Эйнштейна вплотную к принципу эквивалентности.

1) С самого начала Эйнштейн пытался строить полевую лоренц-ковариантную теорию, опираясь, таким образом, на реля-

* В «Автобиографических набросках» 1955 г. Эйнштейн, правда, ничего не говорит о своих гравитационных исследованиях, предшествующих открытию принципа эквивалентности [298].

тивистскую полевую программу, в отличие от Пуанкаре и Минковского.

2) Скалярный характер теории (в этом отношении она превосходила более поздние работы Нордстрема и Ми по скалярным лоренц-ковариантным теориям гравитационного поля).

3) Анализ уравнений движения материальной точки в этой теории приводил к зависимости ускорения свободного падения от полной энергии точки, что, в свою очередь, означало расхождение с хорошо известным фактом равенства инертной и гравитационной масс.

4) Вытекающая из СТО зависимость инертной массы тела от полной энергии, содержащейся в нем, приводила к вопросу об аналогичной зависимости и для гравитационной массы (Пуанкаре). Причем, высокая точность экспериментов по проверке равенства $m_g = m_{ин}$ говорила в пользу такой зависимости и для гравитационной массы (Планк). Работа Планка, которую Эйнштейн изучал не позже начала осени 1907 г., могла сыграть определенную эвристическую роль в разработке первой эйнштейновской теории тяготения и в последующем отказе от нее.

5) Подход к теории тяготения после этого отказа должен был, согласно Эйнштейну, опираться теперь не только на релятивистскую программу, но и на фундаментальное равенство $m_g = m_{ин}$: «Этот закон... представлялся мне имеющим глубокий смысл. Я крайне удивился, что такой закон существует и предположил, что он и дает ключ к более глубокому пониманию инерции и тяготения» [293, с. 404], поэтому его следовало положить в основу построения теории, а не выводить в качестве следствия из нее.

Открытие принципа эквивалентности

Первая формулировка принципа эквивалентности. Осенью 1907 г. Эйнштейн напряженно работал над большой обзорной статьей по теории относительности, заказанной ему журналом «Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik» [234]. Статья была закончена в первых числах декабря 1907 г. и 4 декабря поступила в редакцию журнала. Эта работа Эйнштейна замечательна во многих отношениях. Здесь, вероятно впервые, Эйнштейн говорит о значении опыта Майкельсона—Морли, перечисляет наиболее существенные, с его точки зрения, работы по СТО, выполненные к концу 1907 г.; кроме своих собственных работ, он, в частности, упоминает исследования Планка, Лауэ, Лауба, Мозенгайля, Штарка. Последняя же часть работы явилась как раз результатом попыток Эйнштейна ввести гравитацию в рамки специальной теории относительности. При этом решение, которое им предлагалось, выходило за пределы СТО и требовало расширения класса допустимых систем отсчета. Это означало, что релятивистское рассмотрение гравитации парадоксальным образом подрывало саму релятивистскую программу в указан-

ном ранее смысле этого выражения. Эйнштейн в статье ничего не пишет о своих неудачных попытках построения лоренц-ковариантной скалярной теории гравитационного поля и связанном с равенством $m_r = m_{in}$ аргументе против нее.

Изложение своего нового подхода к решению проблемы релятивистской теории гравитации он начинает с вопроса о возможности расширения специального принципа относительности: «До сих пор мы применяли принцип относительности, т. е. требование независимости законов природы от состояния движения системы отсчета, только к инертным системам отсчета. Можно ли представить себе, что принцип относительности выполняется и для систем, движущихся относительно друг друга с ускорением?» [234, с. 105]. Вопрос ставится так, как будто он возник независимо от гравитационной проблемы. Описанные выше соображения дают основание считать, что вопрос о расширении СТО был вызван попытками релятивизации теории тяготения. От неудачных попыток вместить гравитацию в схему лоренц-ковариантности — к равенству $m_r = m_{in}$ как новому физическому критерию для гравитационных теорий и осознанию его фундаментальности, далее, отсюда — к истолкованию этого равенства в релятивистском духе, что вело к расширению СТО и вместе с ней релятивистской программы — по-видимому, именно таков был ход мысли Эйнштейна. Несколькими строками ниже цитированного вопроса он рассматривает несложный мысленный эксперимент, преобразующий факт равенства инертной и гравитационной масс в некоторую форму принципа относительности, которая раскрывает природу гравитационного поля с совершенно новой — кинематико-релятивистской точки зрения. «Рассмотрим две системы отсчета Σ_1 и Σ_2 . Пусть Σ_1 движется с ускорением в направлении своей оси X и пусть ее ускорение (постоянное во времени) равно γ . Предположим, что Σ_2 покоится, но находится в однородном гравитационном поле, которое сообщает всем телам ускорение — γ в направлении оси X . Как известно, физические законы относительно Σ_1 не отличаются от законов, отнесенных к Σ_2 ; это связано с тем, что в гравитационном поле все тела ускоряются одинаково. Поэтому при современном состоянии наших знаний нет никаких оснований полагать, что системы отсчета Σ_1 и Σ_2 в каком-либо отношении отличаются друг от друга, и в дальнейшем мы будем предполагать полную физическую равноценность гравитационного поля и соответствующего ускорения системы отсчета» [234, с. 105—106].

В результате намечается путь к решению сразу двух проблем: построения релятивистской теории гравитационного поля и расширения принципа относительности. «Это предположение (сформулированный выше принцип эквивалентности однородного гравитационного поля и равноускоренной системы отсчета.— В. В.), — продолжает Эйнштейн, — распространяет принцип относительности на случай равномерно ускоренного прямолиней-

ного движения системы отсчета. Эвристическая ценность этого предположения состоит в том, что оно позволяет заменить однородное поле тяжести равномерно ускоренной системой отсчета, которая до известной степени поддается теоретическому рассмотрению» [234, с. 106].

Таким образом, возникает поистине удивительный замысел построения теории физического поля, правда, пока для полей очень специального вида (однородных!), как некоторого аналога СТО, то есть на чисто кинематико-геометрической основе. Эйнштейн осторожен, он еще не говорит, что природа гравитации носит вообще кинематико-геометрический характер. Он говорит пока только об «эвристической ценности» нового подхода. Возможно, это, хотя и глубокая, но только аналогия. Возможно, это только расчетный прием, позволяющий «замнить» однородное поле равноускоренной системой отсчета, «которая до известной степени поддается теоретическому рассмотрению» [234, с. 106].

При всей своей простоте, граничащей, как это может показаться, с очевидностью и тривиальностью, эйнштейновский принцип эквивалентности являет собой одно из наиболее дерзких и революционных свершений в области физической мысли. Впервые на строгой научной основе возник замысел геометризации физического взаимодействия: само гравитационное поле исследовалось как пространственно-временная структура. Принцип эквивалентности оказался той клсточкой, из которой выросла ОТО, во всей полноте и детальном математическом оформлении реализовавшая идею геометризации физических полей. Найдя эффективный инструмент для изучения однородных гравитационных полей, Эйнштейн сразу же приступил к выявлению разнообразных физических следствий, которые нетрудно было получить на основе анализа простых явлений в равноускоренных системах отсчета.

Как был открыт принцип эквивалентности? Вернемся, однако, к самому принципу эквивалентности и попытаемся реконструировать логику его изобретения, которая лишь неявно и далеко не в полной мере присутствует в классической статье Эйнштейна 1907 г. Ключом к пониманию того, как вообще могла возникнуть столь необычная для классической физики идея сведения вопроса о природе физического поля (взаимодействия) к кинематической или пространственно-временной структуре, является релятивистская программа. Именно она поставила во главу угла всякой физической теории пространственно-временной, теоретико-инвариантный подход, который, конечно, не сводился к требованию лоренц-ковариантности и соответствию в пределе малых скоростей с нерелятивистской физикой. Этот подход, по крайней мере в понимании Эйнштейна, включал в себя, особенно в нестандартных и затруднительных ситуациях, обращение к детальному анализу операционально-измерительных процедур с линейками и часами, системами отсчета и световы-

ми сигналами. В арсенал эвристических средств релятивистской программы органично включался и принцип наблюдаемости [1], требующий операционально-измерительного обоснования основных физических понятий, по крайней мере на уровне мысленных экспериментов. Кстати говоря, этот методологический инструмент виртуозно использовался Эйнштейном и был весьма характерен для релятивистской методологической техники. Релятивистская программа в случае, если какая-то совокупность явлений не вмещалась в рамки СТО, требовала расширения принципа относительности, а не сужения этого принципа или даже отказа от него. Ни один из творцов релятивистской программы не пытался систематически изложить ее основы и методологию. Более того, существовали определенные расхождения в ее понимании и реализации. Для большинства физиков, примкнувших к концу 10-х годов к релятивистской программе, главными были требование лоренц-ковариантности, понимаемое как отсутствие привилегированных инерциальных систем отсчета, и принцип соответствия с классикой. Более глубокое понимание новой программы, присущее прежде всего Эйнштейну, было и менее догматическим, и более физическим. Перечисляя некоторые дополнительные стороны релятивистской программы (операционально-измерительный подход, мысленный эксперимент, принцип наблюдаемости и т. д.), мы имели ввиду именно эйнштейновское ее понимание. Добавим только еще, что Эйнштейн не мыслил релятивистскую программу вне понятия поля. Возможно, эйнштейновский вариант программы следовало бы назвать релятивистски-полевым. Этим, по-видимому, можно объяснить полное игнорирование Эйнштейном лоренц-ковариантных теорий тяготения Пуанкаре—Минковского, которые опирались на релятивистское обобщение не уравнений поля, а лишь элементарного закона взаимодействия.

Итак, возникновение релятивистской программы и ее успешное распространение на всю физику требовали согласования с этой программой и теории тяготения. Это требование появилось бы независимо от тех эмпирических и логико-теоретических трудностей, которые были присущи теории гравитации на рубеже XIX и XX вв. Но названные трудности обостряли создавшуюся ситуацию, стимулировали исследование гравитационной проблемы, а также дальнейшую ее разработку и после того, как выяснилось, что непосредственное использование релятивистской программы в духе Пуанкаре—Минковского не приводит к их разрешению.

Эйнштейн не позже осени 1907 г. делает первые попытки включения теории тяготения в рамки релятивистской программы. При этом, в отличие от Пуанкаре и Минковского, он стремится дать релятивистское обобщение именно скалярных полевых уравнений. Насколько далеко он пошел в этом направлении, вполне созвучном тому, которое в 1912—1914 гг. раз-

рабатывалось Нордстремом и Ми, неизвестно *. Но, во всяком случае, ему очень быстро удалось понять бесперспективность такого подхода, поскольку закон движения материальной точки в этом случае приводил к зависимости ускорения свободного падения от полной энергии падающего тела, что расходилось с известным со времен Галилея и Ньютона фундаментальным фактом независимости ускорения свободного падения от природы падающих тел. Этот факт имел и другое, хорошо известное, выражение — равенство $m_r = m_{ин}$. Возможно внимание Эйнштейна к релятивистской интерпретации этого равенства

$$m_r = m_{ин} = E/c^2$$

было привлечено работой Планка, которую он тщательно изучал, когда писал свой обзор для журнала «*Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*» осенью 1907 г. Хотя ни Планк, ни Эйнштейн не ссылались на очень точные эксперименты Этвеша, они оба считали, что равенство $m_r = m_{ин}$ является надежным эмпирическим соотношением, установленным с большой точностью. Вообще, как мы неоднократно отмечали, физики, разрабатывая эфирно-механистические, электромагнитные и прочие теории тяготения, со времен Лесажа стремились объяснить это равенство, или, другими словами, вывести его на основе этих теорий. Таким образом, если даже Эйнштейн первоначально и не ставил перед собой такую цель, он не мог избежать вопроса о согласовании его теории с этим фактом. Обнаруженное же расхождение имело два последствия: во-первых, Эйнштейн отверг свою лоренц-ковариантную теорию, во-вторых, теперь его внимание сосредоточилось на самом этом факте. Замечательное равенство было обосновано не только мысленными, но и вполне реальными экспериментами, оно касалось самых основ учения о гравитации и инерции и выражалось в двух простых и симметричных формах. Размышляя над этим свойством гравитации с позиций релятивистской программы, включающей весь арсенал методологической техники, которая была использована при создании СТО, Эйнштейн пришел к выводу о безусловной его фундаментальности. Он понял, что именно этот факт должен быть положен в основу теории тяготения. Логико-теоретическая ущербность ньютоновской теории гравитации заключалась, с этой точки зрения, прежде всего в том, что равенство $m_r = m_{ин}$ в ней носило сугубо эмпирический характер. Многочисленные эфирно-механистические и электромагнитные гипотезы о природе тяготения на протяжении более двух веков безуспешно пытались объяснить факт равенства инертной и гравитационной масс. При этом, они опирались, как правило, на

* Как мы упоминали, публикаций Эйнштейна по теории тяготения такого рода не существует; имеются лишь косвенные свидетельства в пользу мнения, что он действительно разрабатывал такую теорию в 1907 г. (цитированная выше статья Нордстрема 1912 г., а также воспоминания Эйнштейна, написанные им в 1933 и 1949 гг.).

многочисленные искусственные предположения о строении материи и эфира. Релятивистская программа, с характерными для нее аксиоматичностью, стремлением «отстроиться» от всякого рода эфирно-модельных представлений и в этом отношении вполне аналогичная термодинамике [218, 424], наводила на мысль о том, чтобы отказаться от объяснения равенства $m_r = m_{нв}$ и принять его в качестве исходного положения. Такого рода методологическая инверсия была произведена Эйнштейном и при построении СТО. В электродинамике движущихся сред Лоренца принцип относительности и постоянство скорости света подлежали объяснению на основе одиннадцати ad hoc-гипотез (по подсчетам Дж. Холтона) такого рода, как существование неподвижного эфира, шарообразность неподвижного электрона, равномерность распределения заряда по объему электрона, электромагнитная природа всех масс, сокращение Лоренца—Фидджеральда для электрона и т. д. [215, с. 183]. В СТО в качестве исходных принимаются принципы относительности и постоянства скорости света. Производится, таким образом, процедура обращения, инверсии между положениями, которые считали необходимым объяснять, и теми, которые при этом принимаются за основные принципы*.

Следующий шаг заключался в таком переосмыслении факта равенства $m_r = m_{нв}$, чтобы он органично соединился с требованиями релятивистской программы. При этом ограничиться тем выводом, который сделал Планк, распространявший обсуждаемое равенство на релятивистскую массу: $m = E/c^2$, было недостаточно, так как оставалось неясно, как на этой основе строить релятивистскую теорию тяготения. Галилеевская интерпретация равенства $m_r = m_{нв}$ как факта постоянства ускорения в однородном поле тяготения для тел любой массы независимо от структуры этих тел с позиций релятивистской методологии наводила на мысль о возможности истолкования этого факта как чисто кинематического эффекта, связанного с переходом от инерциальной системы отсчета с однородным полем, сообщаемым телам ускорение g , к системе отсчета, лишенной поля и движущейся с ускорением g в сторону, противоположную направлению поля. Принятие такой интерпретации было подготовлено СТО и релятивистской программой, согласно которым, например, понимаемое динамически лоренцево сокращение и подобные ему явления были истолкованы как чисто кинематические эффекты. Если физическое проявление однородного гравитационного поля полностью сводится к наличию одинакового для всех тел (независимо от их массы и структуры) ускорения,

* На самом деле, конечно, полного обращения не происходит. Ряд исходных положений электродинамики движущихся сред Лоренца при переходе к СТО либо оказываются ошибочными, либо, в соответствии с духом и замыслом СТО, не входят в ее компетенцию (например, вопросы, относящиеся к форме и строению электрона и т. д.).

то с точки зрения принципа наблюдаемости это поле тяготения можно замеснить чем-то, что порождает соответствующее ускорение. Релятивистская методология непосредственно указывала на простейший способ получения такого ускорения — преход от инерциальной системы отсчета к системе отсчета, движущейся равноускоренно. Требования СТО при этом учитывались тем, что под массой тел (как инертной, так и тяжелой) понималась релятивистская масса, соответствующая полной энергии тела.

Существенную роль в превращении факта равенства инертной и гравитационной масс в фундаментальный теоретический принцип огромной эвристической силы играла, по-видимому, также одна особенность творческого мышления Эйнштейна, связанная с использованием понятия симметрии для разрешения различного рода проблемных ситуаций. «Симметрический» подход использовался им и в критическом анализе ньютоновской механики и теории тяготения, а также дорелятивистской физики вообще. В последнее время эта характерная черта эйнштейновской методологии подчеркивалась Дж. Холтоном [217, 405, 406], Э. Захаром [586] и др. Холтон замеснил, что все три классических статьи Эйнштейна 1905 г. начинаются с указания на определенные логико-теоретические несовершенства существующих теорий, которые сам Эйнштейн предпочитал называть «несимметриями» или асимметриями: «Действительно, с указаний на ранее не замеченные явления формальной асимметрии или несоответствия преимущественно эстетического характера (скорее, чем на загадку, поставленную необъясненными экспериментальными фактами) начинаются все три, в остальных отношениях резко отличающиеся друг от друга, статьи 1905 г.» [405, с. 29]. Речь здесь идет о статьях Эйнштейна, посвященных фотоэффекту, СТО и броуновскому движению. Вот, например, характерная фраза статьи 1905 г., положившей начало СТО: «Известно, что электродинамика Максвелла в том виде, как ее в настоящее время обыкновенно понимают, в применении к движущимся телам приводит к асимметрии, которая, по-видимому, несвойственна самим явлениям» [232, с. 7].

В статье о квантовой теории света отмечается несимметрия, «глубокое формальное различие» «между теоретическими представлениями (...) о газах или других весомых телах и максвелловской теорией электромагнитных процессов», между дискретностью частиц и их энергий и непрерывностью электромагнитного поля и его энергии [23, с. 92]. Констатация асимметрий стимулирует работу по их устранению, что приводит к радикальной перестройке теории. Асимметрии имеются лишь на теоретическом уровне, а не на уровне явлений, опыта. Задача поэтому заключается в согласовании этих уровней. «Во всех случаях,— пишет Холтон,— асимметрию устраняют, показывая, что она не является необходимой ... Асимметрия, которая не кажется присущей явлению, должна быть отброшена: природа не нуждается в ней» [217, с. 28].

Э. Захар обсуждает два основных принципа «эйнштейновской эвристики»: «внутреннее совершенство» теории (простота, единство, согласованность и т. д.) и некоторый вариант «принципа симметрии». Это второе эвристическое правило формулируется так: «Всякую теорию, которая не объясняет симметрические ситуации на уровне наблюдений как проявления более глубоких симметрий, следует заменить — независимо от того, можно или нельзя вывести из теории все известные факты» [586, с. 225]. Корни симметрической методологии Эйнштейна имеют, вероятно, двойное происхождение: психологическое, связанное с особенностями его мышления, и логическое, связанное с формированием теоретико-инвариантного подхода к пониманию и построению физических теорий в конце XIX — начале XX вв. *

В случае с фактом равенства инертной и гравитационной масс асимметрия в эйнштейновском смысле совершенно очевидна. На уровне явлений, опыта равенство $m_i = m_{гг}$ выполняется с огромной точностью, т. е. на этом уровне имеется строгая и фундаментальная симметрия. Но она, однако, не находит никакого выражения на теоретическом уровне: ни классическая механика (и теория тяготения), ни СТО (и известные в то время релятивистские теории тяготения типа Пуанкаре) не связывали гравитацию и инерцию. Равенство $m_i = m_{гг}$ в этих теориях было эмпирическим, случайным совпадением.

Эйнштейн через сорок с лишним лет формулировал эту асимметрию еще и так: «Мне бы хотелось также указать на внутреннюю несимметрию теории, проявляющуюся в том обстоятельстве, что входящая в закон движения инертная масса входит и в выражение для сил тяготения, но не в выражение для других сил» [296, с. 270]. Эта несимметрия побуждала мысль Эйнштейна к такой перестройке ньютоновской теории тяготения (с учетом СТО), чтобы исключить ее (несимметрию) с самого на-

* Холтон [217] указал на многозначительные обстоятельства, которые могли иметь существенное значение: позднее детское развитие Эйнштейна, первые интеллектуальные потрясения (компас, евклидова геометрия), роль визуального восприятия (о чем неоднократно говорил сам Эйнштейн), идеи Песталоцци и кантональная школа в Аарау, основанная его учениками и сыгравшая, по-видимому, не последнюю роль в духовном развитии 16-летнего Эйнштейна и т. д. [405].

В отношении логического аспекта следует заметить, что предпосылками и предвестниками теоретико-инвариантного подхода в физике были: кинематическая концепция геометрии (Гельмгольц); «Эрлангенская программа», классифицирующая геометрии по группам преобразований (Ф. Клейн); применение групповых методов в механике (Ли, Котельников, Клейн, Гамель, Пуанкаре и др.) и кристаллографии (Шепфлис, Федоров); принцип симметрии Неймана—Миннигероде—Кюри в кристаллофизике; проблема абсолютного пространства и корректного определения инерциальной системы отсчета (К. Нейман, Мах, Л. Ланге и др.); стремление аксиоматизировать механику на основе принципов относительности и сохранения (Шютц (1897), Гамель (1904)); вопросы оптики и электродинамики движущихся сред (Герц, Лоренц, Лармор, Пуанкаре и др.) [21, 25, 27].

чала, чтобы в самом фундаменте новой теории тождество гравитации и инерции находило естественное выражение.

Истолкование гравитационных сил, пропорциональных массе, посредством сил инерциальных, также пропорциональных массе, открывало возможность преобразовать равенство инертной и гравитационной масс в тождество инерции и гравитации, которые в ньютоновской теории рассматривались, фактически, как независимые сущности.

Не следует при этом упускать из виду стимулирующего влияния маховских представлений об инерции, массе, пространстве и времени, значение которых всегда подчеркивал Эйнштейн. Особенно важным представляется органическая связь представлений Маха об инерции с расширенной релятивистской концепцией. В некрологе, посвященном Маху, Эйнштейн писал через несколько месяцев после завершения основ ОТО: «Рассуждения Маха о ньютоновском опыте с ведром показывают, сколь близко его духу было требование относительности в обобщенном смысле (относительности ускорения). Во всяком случае, в этих рассуждениях чувствуется ясное понимание того, что требование равенства инертной и тяжелой массы тел приводит к постулату относительности в более широком смысле, ибо с помощью эксперимента мы не можем отличить, обусловлено ли падение тела относительно некоторой системы отсчета наличием какого-то гравитационного поля или ускорением системы отсчета» [273, с. 31]. Возведение эмпирического факта равенства $m_i = m_{гг}$ в ранг фундаментального теоретического положения, интерпретируемого на языке релятивистской методологии, неизбежно вело к расширению самой релятивистской программы, что вполне согласовывалось с неудачами прямого использования СТО на пути построения лоренц-ковариантной теории тяготения. Эти неудачи, согласно Эйнштейну, не были результатом неумелого применения релятивистской программы, основанной на СТО,—они указывали на ограниченность СТО и неизбежность расширения релятивистской программы, если ставилась задача включения гравитации в рамки этой программы. Класс допустимых систем отсчета расширялся: кроме инерциальных, в него следовало включить еще и равноускоренные системы отсчета. И переход от одной системы отсчета к другой мог теперь вызвать преобразование (вплоть до порождения или исчезновения) гравитационных полей, до некоторой степени подобно тому, как в СТО при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой можно было вызвать преобразование напряженностей электрического и магнитного поля. В результате возникал двойной замысел, с одной стороны, расширения СТО, которая оказывалась неспособной удовлетворительно описать гравитацию, а с другой,—кинематического истолкования гравитации, что должно было привести к последовательной релятивистской теории тяготения. Эта новая теория относительности, по видимому, должна была совпасть с новой теорией тяготения, по-

тому что именно гравитационные соотношения должны были указать на то, как следует расширить СТО.

Следствия принципа эквивалентности. Почти все, что до сих пор говорилось о формировании принципа эквивалентности, находится за рамками классической статьи Эйнштейна 1907 г., где впервые был сформулирован этот принцип [234]. Эйнштейн начинает свое изложение с постановки вопроса о возможности расширения принципа относительности, а затем сразу же формулирует принцип эквивалентности, создающий физическую основу такого расширения.

В следующих трех параграфах он рассматривает следствия принципа эквивалентности. Сначала изучает поведение линеек и часов в равноускоренной системе отсчета, или, в свете принципа эквивалентности, влияние однородного гравитационного поля на пространственно-временные соотношения. Основное место уделено выводу зависимости хода часов от гравитационного потенциала, что находит выражение в эффекте «красного смещения» спектральных линий в гравитационном поле (§ 18 и 19 эйнштейновской статьи). В последнем параграфе выводит на основе принципа эквивалентности эффект отклонения световых лучей в поле тяготения и подчеркивает справедливость соотношения:

$$m = E/c^2$$

не только для инертной, но и для гравитационной массы.

Анализ пространственно-временных соотношений в равноускоренной системе отсчета, проведенный Эйнштейном, привел к зависимости «местного времени» σ в этой системе отсчета от ускорения γ , согласно следующей формуле:

$$\sigma = \tau(1 + \gamma\xi/c^2). \quad (33)$$

Здесь τ соответствует показанию часов, помещенных в начале координат равноускоренной системы, а ξ соответствует x -координате неускоренной системы (ускорение направлено вдоль координаты x). Принцип эквивалентности позволяет отождествить $\gamma\xi$ с гравитационным потенциалом однородного поля Φ , что дает зависимость «местного времени» от этого потенциала:

$$\sigma = \tau(1 + \Phi/c^2). \quad (34)$$

При выводе формул (33—34) Эйнштейн не использует принцип Доплера, как это обычно стало делаться впоследствии. Его рассуждения, опирающиеся на мысленные эксперименты с часами, линейками, системами отсчета, еще достаточно громоздки и приближенны. Сначала он показывает, что форма тела, как и ход часов, не могут непосредственно зависеть от ускорения γ . Такая зависимость может быть только квадратичной (в силу соображений симметрии) или более высокой четной степени. Поэтому, наложив условие малости γ , ею можно пренебречь.

Соотношение же (33) устанавливается на основе использования СТО.

В результате Эйнштейн приходит к следующему выводу: «Любой физический процесс ... протекает тем быстрее, чем больше гравитационный потенциал в области, где разыгрывается этот процесс» [234, с. 110]. Можно ли экспериментально зарегистрировать этот эффект? Эйнштейн указал способ осуществления такой возможности и оценил порядок этого убыстрения: «Существуют «часы», находящиеся в местах с различными гравитационными потенциалами, скорость «хода» которых можно проконтролировать с большой точностью: это — источники света с линейчатым спектром. Из сказанного выше следует, что свет, исходящий от такого источника, расположенного на поверхности Солнца, обладает длиной волны, приблизительно на две миллионных доли большей, чем свет, испускаемый теми же атомами на Земле» [там же]. Можно предположить, что в 1907 г. он не видел реальной возможности измерить отмеченное им «красное смещение» путем наблюдений или экспериментов, в противном случае он наверняка указал бы на такую возможность.

Затем Эйнштейн аналогичным образом рассматривает эффект искривления лучей света в однородном поле тяготения, пользуясь соотношением $\Phi = \gamma \xi$. Оказывается, что в этом случае вместо скорости света следует использовать скорость

$$c(1 + \gamma \xi / c^2) = c(1 + \Phi / c^2). \quad (35-39)$$

Это ведет к тому, резюмирует Эйнштейн, что «световые лучи, распространяющиеся не по оси X , искривляются гравитационным полем: изменение направления, как легко видеть, составляет $(\gamma / c^2) \sin \varphi$ на 1 см пути света, где φ означает угол между направлениями силы тяжести и светового луча» [234, с. 113]. В отношении этого эффекта Эйнштейн вполне определенно отметил невозможность его экспериментального обнаружения: «К сожалению, согласно нашей теории, влияние поля тяготения Земли так незначительно (вследствие того, что величина $\gamma \xi / c$ мала), что нет никаких перспектив на сравнение результатов теории с опытом» [там же].

Статья заканчивается демонстрацией того, что соотношение $m = E/c^2$ «выполняется не только для инертной, но и для тяготеющей массы», если справедлив принцип эквивалентности. Правда, Эйнштейн показывает это только для электромагнитного поля.

Проблема гравитации в 1908—1910 годах

Вопрос об аномальном смещении перигелия Меркурия. Итак, уже в 1907 г. Эйнштейн предсказал два знаменитых общерелятивистских эффекта: «красное смещение» и отклонение лучей света в гравитационном поле. Впоследствии, впрочем,

выяснилось, что вычисление этого отклонения только на основе принципа эквивалентности дает вдвое меньшую величину по сравнению с опытом и тем значением, которое дает ОТО. Правда, Эйнштейн не видел возможности экспериментальной проверки этих эффектов. Третий общерелятивистский эффект — вековое смещение перигелия Меркурия. Он был зафиксирован эмпирическим путем и со времени Леверрье рассматривался как главный экспериментально-эмпирический изъян ньютоновской теории тяготения.

В начале XX в. эта трудность, как мы видели, была хорошо известна. Она обсуждалась и в электромагнитных теориях Лоренца, Вилла и др., и в работах Вакера и Вилкенса. Все эти работы печатались в основных немецких физических журналах, таких как «Physikalische Zeitschrift», «Annalen der Physik», а также «Докладах Амстердамской академии наук», которые должны были быть хорошо известны Эйнштейну. Поэтому вызывает некоторое удивление, что Эйнштейн в статье 1907 г. ничего не говорит об аномалии Меркурия — главной эмпирической трудности классической теории тяготения. Имеется, однако, один замечательный документ — письмо Эйнштейна к своему другу К. Габихту, одному из членов знаменитой «академии Олимпия», написанное в рождественский вечер 1907 г., — в котором упоминается работа «О принципе относительности и его следствиях» и говорится о дальнейшей работе над релятивистской теорией тяготения с целью объяснения векового смещения перигелия Меркурия: «В октябре и ноябре (1907 г. — В. В.) я был очень занят; писал работу о принципе относительности: одна половина ее носит обзорный характер, другая посвящена новому материалу (речь идет о статье «О принципе относительности и его следствиях», законченной 4 декабря 1907 г. — В. В.). Я Вам ее посылаю. Сейчас я также занимаюсь исследованием закона тяготения с позиций теории относительности; надеюсь, это позволит мне пролить свет на еще необъясненное большое вековое смещение перигелия орбиты Меркурия. Но пока это не удастся» (цит. по: [62, с. 66]). Значит, уже в декабре 1907 г. и в начале 1908 г. Эйнштейн, по-видимому, напряженно искал способ использовать развитый им подход, основанный на принципе эквивалентности, для изучения полей более общего вида. В частности, он надеялся на этом пути объяснить аномалию Меркурия. Таким образом, на первой стадии разработки релятивистской теории тяготения экспериментально-эмпирические аспекты имели для Эйнштейна первостепенное значение, вопреки распространенному мнению. Сам принцип эквивалентности имел прочный опытный фундамент. Не прибегая к сложным теоретическим построениям, Эйнштейн, исходя из него, извлек два новых наблюдаемых эффекта («красное смещение» и отклонение света), экспериментальная регистрация которых, как он полагал, была в обозримом будущем едва ли возможна. Наконец, давно известное эмпирическое затруднение ньютонов-

ской теории тяготения, связанное с аномальным вращением перигелия Меркурия, также побуждало Эйнштейна к дальнейшей разработке релятивистской теории тяготения.

Отсутствие реакции физиков на принцип эквивалентности. Новый подход Эйнштейна не был замечен другими физиками. В центре внимания продолжали оставаться электромагнитные теории тяготения (Пуанкаре, Ритц, Дж. Дж. Томсон, Вакер, В. Вин) и лоренц-ковариантные теории типа Пуанкаре — Минковского (Минковский, Зоммерфельд, Лоренц, де Ситтер). Едва ли это можно было теперь объяснить неизвестностью Эйнштейна, его относительной изоляцией в Берне. В 1906—1908 гг. его работы получили признание. Он был поддержан Планком, В. Винном, затем с его работами познакомились в Гёттингене, особенно благодаря Минковскому. Статьи Эйнштейна изучали в Вюрцбурге (Вин, Лауб), Тюбингене (Ганс, Вакер, Ритц), Бреслау (Борн, Лориа, Луммер, Прингсгейм, Ладенбург и др.). Уже в мае 1906 г. он писал М. Соловину: «Я уже подошел к тому устойчивому и бесплодному возрасту (Эйнштейну исполнилось 27 лет.— В. В.), когда революционная направленность умов молодежи вызывает лишь горечь. Мои работы получили высокую оценку и послужат стимулом для последующих исследований. Об этом написал мне профессор Планк из Берлина» [299, с. 547]. Дело, скорее, заключалось в следующем. Научная общественность еще только начала осваивать СТО, которая казалась слишком необычной даже на фоне новейших достижений теоретической физики. Релятивистская программа еще только оформляется и начинает приносить некоторые плоды, а Эйнштейн, фактически, своим принципом эквивалентности если и не разрушает ее, то существенно преобразует. Перспективным и надежным в области гравитации представлялся как раз путь, связанный с построением лоренц-ковариантных теорий тяготения. Эйнштейн же, указывая на ограниченность СТО при решении гравитационной проблемы, требовал на основе принципа эквивалентности расширения класса допустимых систем отсчета и, таким образом, расширения релятивистской программы. Именно поэтому даже те физики, которые были склонны встать на позиции релятивистской программы и проявляли интерес к проблеме гравитации, никак не отреагировали на эйнштейновский принцип эквивалентности. Были, впрочем, и другие причины. Сам Эйнштейн полагал, что предсказанные им гравитационно-оптические эффекты нельзя проверить на опыте. Вместе с тем, хорошо известную эмпирическую аномалию ньютоновской теории тяготения на основе принципа эквивалентности так и не удалось объяснить (об этих неудачах Эйнштейн писал в цитированном выше письме к Габихту).

Трудности на пути теоретического развития принципа эквивалентности. Но принцип эквивалентности при сопоставлении с требованиями СТО и релятивистской программы приводил, как мы увидим, к очень значительным трудностям, особенно при

попытке развития на его основе систематической теории гравитации. Эти трудности оказались настолько значительными, что Эйнштейн сам приостановил работу по гравитации. В 1908 г. не появилось ни одной статьи Эйнштейна, связанной с новой концепцией тяготения и относительности. В этом году, если не считать элементарного изложения эйнштейновской теории броуновского движения [238], доступного для химиков и написанного по совету Лоренца, а также короткой заметки о новом методе измерения малых количеств электричества [237], Эйнштейн опубликовал (совместно с И. Лаубом) *, стимулированный работами Минковского по электродинамике движущихся сред, две работы по этому вопросу [235, 236]. Но в январе 1909 г. была закончена большая обзорная статья «К современному состоянию проблемы излучения» [239], которая свидетельствовала о том, что Эйнштейн уже в течение некоторого времени (полгода, несколько месяцев?) работал над новой труднейшей проблемой — построением некоторой единой теории поля, способной с единой теоретико-полевой точки зрения объяснить элементарные электрические заряды (электроны) и кванты. Трудности, с которыми столкнулся Эйнштейн при попытке превратить принцип эквивалентности в последовательную полевую теорию тяготения, и неудачи на пути их преодоления, привели к временному отказу от работы над проблемой гравитации и переключению усилий Эйнштейна на решение квантовой проблемы. Это решение, однако, он видел в некотором теоретико-полевом синтезе на основе релятивистской программы. Причем, в случае удачи уравнения единой теории поля могли содержать и гравитацию.

Но вернемся к тем трудностям, которые препятствовали разрыванию принципа эквивалентности, дающего контур теории однородного гравитационного поля, в общую теорию произвольных полей тяготения. Обратимся сначала к воспоминаниям самого Эйнштейна. В 1933 г. он писал о ситуации, сложившейся после открытия принципа эквивалентности:

«Если бы этот закон выполнялся для любых явлений . . . то это указывало бы на то, что принцип относительности должен быть распространен на неравномерно движущиеся системы координат, если стремиться к естественной теории гравитационного поля. Подобные размышления занимали меня с 1908 по 1911 год, и я старался вывести из них конкретные следствия, о которых я не предполагал говорить здесь. Важно было прежде всего понять, что разумную теорию гравитации можно построить лишь в результате обобщения принципа относительности.

Следовательно, необходимо было построить теорию, уравнения которой сохраняют форму при нелинейных преобразованиях координат. Удовлетворяют ли этому условию совершенно произвольные (непрерывные) или только неко-

* Сотрудничество Эйнштейна с учебником Вилла Лаубом, с большим энтузиазмом воспринявшим СТО и релятивистскую программу, детально исследовал Л. Р. Пайнсон [507].

торые преобразования координат, заранее я не знал. Скоро я увидел, что при нелинейных преобразованиях, требуемых принципом эквивалентности, утрачивается простая физическая интерпретация координат, т. е. что больше уже нельзя требовать, чтобы разности координат были непосредственными результатами измерений с помощью идеальных линеек или часов. Уяснение этого обстоятельства доставило мне много беспокойства, так как я долго не мог понять, что же вообще должны означать координаты в физике» [293, с. 405].

Примерно так же описывает Эйнштейн положившие дел в 1908 г. в «Автобиографических заметках» 1949 года:

«...Равенство инертной и тяжелой массы приводит вполне естественно к мысли о том, что основное требование специальной теории относительности (инвариантность по отношению к преобразованию Лоренца) слишком узко, т. е. что нужно постулировать инвариантность законов и относительно нелинейных преобразований координат в четырехмерном континууме. Это произошло в 1908 г. Почему понадобилось еще 7 лет, чтобы построить общую теорию относительности? Главная причина заключается в следующем: не так легко освободиться от представления, что координаты имеют прямой метрический смысл В равноускоренной системе, в которой имеется статическое поле, часы идут не так, как одинаково устроенные часы в неподвижной системе. Из этого частного примера уже видно, что непосредственно метрическое значение координат теряется, если вообще допускать нелинейные преобразования координат. Но делать это необходимо, если стремиться к тому, чтобы равенство тяжелой и инертной массы было заложено уже в основах теории, и если стремиться преодолеть парадокс Маха * относительно инерциальных систем» [296, с. 283].

Вот соответствующее место из «Автобиографических набросков» 1955 г.:

«Знание этого (принцип эквивалентности) сделало вероятным не только то, что законы природы должны быть инвариантными по отношению к более общей группе преобразований, чем группа Лоренца (расширение принципа относительности), но также и то, что это расширение должно привести к углубленной теории гравитационного поля. В том, что эта идея в принципе является правильной, я по меньшей мере не сомневался. Но трудности ее осуществления казались почти непреодолимыми. Прежде всего элементарные соображения показывали, что переход к более широкой группе преобразований несовместим с прямой интерпретацией пространственно-временных координат, которая проложила путь специальной теории относительности. Кроме того, нельзя было усмотреть, как должна быть выбрана расширенная группа преобразований» [298, с. 353].

Главной трудностью, таким образом, было то, что релятивистский подход к теории тяготения приводил к необходимости расширения релятивистской программы. Прежде всего, оказывалось, что класс допустимых систем отсчета должен быть расширен так, чтобы включить в него равноускоренные системы. Требование лоренц-ковариантности становилось, тем самым,

* Имеется в виду вопрос Маха о физическом основании выделения инерциальных систем среди всех других систем отсчета.

слишком узким. С другой стороны, из принципа эквивалентности следовала зависимость скорости света от гравитационного потенциала, и второй основной постулат СТО утрачивал свою силу.

Наибольшее же впечатление на Эйнштейна, судя по цитированным отрывкам, произвело кардинальное изменение физического (или метрического) смысла пространственно-временных координат в неинерциальных системах отсчета. Анализ пространственно-временных соотношений в равноускоренной системе, а значит (согласно принципу эквивалентности), и в однородном гравитационном поле, показывал, что пространственные и временные интервалы нельзя теперь было интерпретировать как соответствующие разности координат. Но именно такое осмысление координат, связанное с операционально-измерительными процедурами, было характерной чертой релятивистской методологии и, как писал Эйнштейн, «проложило путь к специальной теории относительности». Эта особенность пространственно-временных отношений в гравитационных полях, как выяснилось впоследствии, была связана с выдвиганием на первый план метрики, которой следовало приписывать непосредственный физический смысл (а не координатам!). Невозможность истолковывать разности координат как расстояния и промежутки времени была следствием неевклидова характера пространства — времени при наличии гравитационных полей. Но в 1907—1908 гг. Эйнштейн был еще очень далек от этой мысли, и ему поэтому казалось, что принцип эквивалентности ведет к «почти непреодолимым затруднениям». Все эти трудности вели, как будто, к подрыву релятивистской программы, во всяком случае, к ее существенному, но еще туманному обобщению. До тех пор, пока контуры этого обобщения оставались неопределенными, было не ясно, как же, опираясь на принцип эквивалентности, строить общую теорию. Дело в том, что принцип эквивалентности годился только для описания однородных полей, т. е. чрезвычайно узкого класса гравитационных полей. Более того, было ясно, что однородное поле — это сильная идеализация, что в действительности все гравитационные поля неоднородны. Но как распространить принцип эквивалентности хотя бы на статические неоднородные поля, Эйнштейну было не ясно. По-видимому, он думал о более широком классе допустимых систем отсчета, включающем не только инерциальные и равноускоренные системы, но и системы, движущиеся сложнее, и о более широкой группе нелинейных преобразований координат, призванной заменить группу Лоренца, но никаких разумных физических аргументов в пользу того или иного расширения не было («Кроме того, нельзя было усмотреть, как должна быть выбрана расширенная группа преобразований») [298, с. 353]. Определение такой группы позволило бы подойти к решению вопроса об уравнениях поля, которые должны были быть ковариантны относительно этой группы. Других подходов к проблеме

уравнений поля не было, если стремиться к введению принципа эквивалентности в основания теории. В результате, несмотря на многообещающее начало дальнейшее продвижение вперед резко замедлилось, препятствия оказались слишком серьезными, и Эйнштейн временно приостанавливает свой штурм гравитационной проблемы. Тем более, что, обратившись к квантовой теории излучения, он, как ему показалось, увидел новые возможности для решения другой грандиозной проблемы — проблемы построения на основе релятивистской полевой программы единой теории поля, способной объяснить, наряду с электромагнитным полем, электроны и кванты излучения.

Новая проблема — единая теория полей, частиц и квантов. В статье «К современному состоянию проблемы излучения» (январь 1909 г.) имеется аргументация в пользу такой теории [239]. Заметив (в духе более современных «пифагорейских» соображений Эддингтона и Дирака), что величина e^2/c , имеющая размерность действия, всего лишь на три порядка отличается от кванта действия h ($e^2/c = 7 \cdot 10^{-30}$, $h = 6 \cdot 10^{-27}$), Эйнштейн находит возможным сделать вывод о сведении постоянной Планка к «элементарному кванту электричества». Но это не означает сведения квантовой теории к классической теории электромагнитного поля. Ведь «для электродинамики Максвелла—Лоренца элементарный квант e (электрон.— В. В.) является чуждым» [239, с. 178]. Но если удастся так обобщить уравнения электродинамики, чтобы они содержали описание электрона, то они будут содержать также и квантовую теорию: «...Из соотношения $h = e^2/c$ вытекает, что та модификация теории, которая даст как следствие элементарный квант e , будет также содержать в себе квантовую структуру излучения» [там же]. Как же строить эту «модификацию теории»? Ведущей нитью была релятивистская полевая программа в сочетании с требованиями нелинейности и неоднородности основных уравнений: «Фундаментальное уравнение оптики

$$D(\varphi) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right) = 0$$

необходимо будет заменить таким уравнением, в которое входит в виде коэффициента также универсальная постоянная e (вероятно, ее квадрат). Искомое уравнение (или система уравнений) должно быть однородным по размерности. При преобразовании Лоренца оно должно переходить в самое себя. Оно не может быть линейным и однородным. Оно должно ... переходить в пределе больших амплитуд в уравнение $D(\varphi) = 0$. Мне еще не удалось найти удовлетворяющую этим условиям систему уравнений, о которой можно было бы сказать, что она пригодна для построения элементарных электрических и световых квантов. Однако многообразие возможностей, по-видимому, не настолько велико, чтобы отпугнуть от этой задачи» [там же]. Требование нелинейности уравнений было связано с представ-

лением о том, что линейные уравнения не могут обеспечить устойчивость электрона. Несовершенство же уравнений требовалось потому, что сумма решений линейного однородного уравнения является также решением, и тогда невозможно описать взаимодействие между частицами. Теоретико-полевой идеал единства, лоренц-ковариантность искомого уравнения поля, принцип соответствия (теория должна иметь максвелловский предел) — таков набор основных требований к будущей единой теории. Математические условия на основные уравнения варьировались. В 1908 г. и начале 1909 г. он искал нелинейные и неоднородные уравнения второго порядка. Затем он вернулся к требованиям линейности и однородности, но решил, что уравнения должны быть четвертого порядка [456]. Эти поиски, которые нашли лишь очень слабое отражение в публикациях и более детальное — в переписке с Лоренцем, напоминают эйнштейновские работы по конструированию общековариантных уравнений гравитационного поля в 1913—1915 гг.: столь же интенсивное использование релятивистской полевой программы, методологических принципов; в обоих случаях основная задача — угадать дифференциальные уравнения поля, удовлетворяющие определенному набору физических и математических условий. Особо следует оговорить то обстоятельство, что поиски необходимых уравнений были неразрывно связаны у Эйнштейна с наглядными физическими представлениями того, что он безуспешно пытался выразить математически. После ряда неудачных попыток это сделать он говорил (на 81-м собрании Общества немецких естествоиспытателей в Зальцбурге в октябре 1909 г.): «Все же мне кажется пока наиболее естественным, что появление электромагнитных полей света должно быть связано с особыми точками так же, как появление электростатических полей — с электронной теорией. Не исключено, что в такой теории всю энергию электромагнитного поля можно будет считать локализованной в этих особых точках, совсем как в старой теории дальнего действия. Я представляю себе каждую такую особую точку окруженной силовым полем ... Если большое число таких особых точек находится на расстояниях, малых по сравнению с размерами силового поля одной особой точки, то силовые поля будут перекрываться и в целом дадут волновое силовое поле, быть может, очень мало отличающееся от волнового поля в смысле современной электромагнитной теории света» [240, с. 194]. Эйнштейн и в конце 1909 г. продолжал считать, что можно найти полевые уравнения, соответствующие этой картине, хотя по-прежнему был далек от удовлетворительного решения: «Вряд ли стоит подчеркивать, что до тех пор, пока такая картина (описанная в цитированном выше отрывке.— В. В.) не приведет к точной теории, ей не следует придавать особого значения» [там же].

Письмо к Бессо от 31 декабря 1909 г. говорит о том, что Эйнштейн в конце 1909 г. и начале 1910 г. еще продолжал по-

иски, которые, вероятно, закончились не позже лета 1910 г. [157]. В письме к Лаубу от 10 августа 1910 он уже ничего не пишет о проблеме, занимавшей его более двух с половиной лет, как, впрочем, и о квантах вообще и сообщает, что возвращается к проблеме гравитации и принципу эквивалентности [62, с. 101].

Можно предположить, что отход от непосредственного исследования гравитационной проблемы в 1908—1910 гг., вызванный огромными трудностями при попытке превратить принцип эквивалентности в релятивистскую теорию произвольных полей тяготения, и переключение на решение новой более глобальной проблемы единой теории полей, частиц и квантов были тесно взаимосвязаны. Решение последней должно было или непосредственно привести к решению гравитационной проблемы (уравнения единой теории могли содержать и гравитацию), или, по крайней мере, указать дополнительные средства для этого.

В своих настойчивых поисках единой теории поля Эйнштейн, фактически, вышел за рамки собственно релятивистской программы. Он руководствовался более обширной программой полевого синтеза квантов и частиц, близко примыкавшей к электромагнитно-полевой программе, хотя и не совпадавшей с ней. Она более близка к той программе единых геометризованных теорий поля, к которой в начале 1920-х гг. вернулся Эйнштейн, вооруженный ОТО и вдохновленный ее успехами.

Умозрительный «прорыв в неизвестное», в значительной мере основанный на угадывании подходящих дифференциальных уравнений, согласующихся с яркими, хотя и несколько неопределенными, физическими представлениями, не удался. Не помогли и строгие релятивистские требования (лоренц-ковариантность), и знание классического (максвелловского) предела и значительный эмпирический материал из квантовой области. Возврат к более узкой проблеме тяготения и эмпирически прочно обоснованному принципу эквивалентности не означал, что Эйнштейн полностью разочаровался в программе теоретико-полевого синтеза. Можно предположить, что Эйнштейн рассуждал следующим образом. Принцип эквивалентности говорит о необходимости расширения релятивистской программы. Предшествующие же попытки построения единой теории поля основывались лишь на лоренц-ковариантности. Возможно, именно поэтому глобальный замысел потерпел неудачу. Надо вернуться к проблеме тяготения и принципу эквивалентности, довести решение этой более частной и не обремененной массой эмпирического материала задачи до конца. При этом будет найдена более широкая группа преобразований, которую надо будет положить в основу расширенной релятивистской программы. И только после этого можно будет вновь вернуться к поискам единой теории на этой основе. Причем, тогда появится надежда на более полный синтез, в котором определенное место должна будет занять и гравитация. Таким образом, неудачи программы теоре-

тико-полевого синтеза могла стимулировать возврат к проблеме тяготения и принципу эквивалентности. Не оказался обременительным в дальнейших исследованиях по созданию релятивистской теории гравитационного поля опыт, полученный Эйнштейном в работе над единой теорией поля: богатые возможности теоретико-полевой концепции; методы конструирования уравнений поля, в частности, использование методологических принципов (симметрии, соответствия, простоты и др.); идея нелинейности полевых уравнений; сочетание физически наглядных образов и представлений с высоким уровнем математики, призванной превратить их в строгую теорию; идея вывода уравнений движения из уравнений поля. Этот опыт особенно пригодился в 1912—1915 гг., когда работа по созданию ОТО вступила в решающую стадию и когда вопрос об уравнениях гравитационного поля встал особенно остро*.

Возврат к проблеме гравитации на рубеже 1910 и 1911 гг. был связан, возможно, также с некоторыми другими обстоятельствами. В это время вновь обсуждались, прежде всего Зоммерфельдом и Лоренцем, релятивистские теории тяготения Пуанкаре и Минковского, ущербность и бесперспективность которых для Эйнштейна была очевидна. Но интерес к проблеме релятивизации тяготения, особенно со стороны Лоренца, с которым Эйнштейн вел интенсивную научную переписку, мог стимулировать его возврат к проблеме тяготения и принципу эквивалентности.

Выводы. Итак, релятивистская программа привела Эйнштейна в его размышлениях над основаниями гравитации к принципу эквивалентности, который, будучи релятивистским по сути дела, вместе с тем подрывал основы самой этой программы, связанной со СТО. Этот принцип повлек за собой новые эффекты, экспериментальная проверка которых, к сожалению, казалась невозможной из-за их малости. Это обстоятельство и в еще большей мере трудности, связанные с выходом за рамки релятивистской программы и распространением принципа эквивалентности на произвольные поля тяготения, приостановили разработку гравитационной проблемы. Размышления Эйнштейна над проблемами квантовой теории излучения привлекли его внимание к проблеме полевого осмысления квантов, а затем и к более общей проблеме построения единой теории поля, частиц и квантов. В случае решения этой глобальной проблемы мог значительно проясниться и вопрос о тяготении. Проблему теоретико-полевого синтеза решить не удалось, и Эйнштейн вернулся к исследованиям по гравитации.

* Детальное исследование работы Эйнштейна по созданию единой теории полей, частиц и квантов в 1908—1910 гг., которое мы здесь использовали, было проведено в статье [456].

3. Принцип эквивалентности, 1911 г.

Мы снова возвращаемся к этой теме, так как нас не удовлетворяет прежнее изложение; кроме того, мы теперь еще раз убедились в том, что один из наиболее важных выводов указанной работы (1907 г.— В. В.) поддается экспериментальной проверке.

А. Эйнштейн (1911)

Нужна нам отвага
Для первого шага,
А кто упадет, но рискнет на второй,
Тот дважды герой.

С. Маршак

Пражские контакты Эйнштейна

Итак, Эйнштейн возвращается к проблеме тяготения. Сформулированный им в 1907 г. принцип эквивалентности, опиравшийся на факт равенства инертной и гравитационной масс, обнаруживал границы применимости СТО и наводил на мысль о возможном обобщении этой теории. Это могло привести не только к решению проблемы тяготения, но и к радикальному преобразованию физики вообще, подобному тому, которое было связано с открытием СТО. Такое преобразование, в свою очередь, могло открыть новый путь к построению единой теории поля, электронов и квантов, в частности, указать новые способы для конструирования основного уравнения, которое бы могло лежать в основе этой теории.

Эта переориентация Эйнштейна по времени оказалась связанной с переездом его в Прагу весной 1911 г. Первым ректором немецкого университета в Праге, куда был приглашен Эйнштейн, был Э. Мах. После ухода Маха его ученики и последователи — физик А. Лампа и математик Г. Пик — сделали все возможное, чтобы организовать приглашение его для участия в конкурсе на замещение вакантной должности ординарного профессора теоретической физики. Этому, вероятно, способствовали возросший авторитет Эйнштейна в европейской физике, а также импонирующий последователям Маха антидогматический характер СТО, которую они могли истолковывать в позитивистском духе. Отношение же Эйнштейна к Маху в это время достаточно хорошо известно. Оно зафиксировано в двух письмах к Маху, написанных Эйнштейном в августе 1909 г. и свидетельствующих о том, что он высоко ценил мнение Маха о теории относительности и считал себя в определенной мере его учеником: «Я, конечно, очень хорошо знаю основные Ваши работы, из которых больше всего восхищает меня Ваша книга о механике. Ваше влияние на гносеологию

* Пражский период жизни и деятельности Эйнштейна см. также в работах Илли, Броды и др. [413, 326, 327, 361].

ческие концепции молодого поколения физиков так велико, что даже современных Ваших противников, таких, как Планк, пару десятилетий тому назад несомненно назвали бы последователями Маха» [216, с. 212].

Яумани и его теория тяготения. Соперником Эйнштейна в конкурсе был другой ученик Маха профессор физики Технологического института в Брно Г. Яумани. Шансы его были весьма велики: он был австриец и хорошо известный приверженец Маха. Узнав, однако, что в списке кандидатов его имя стояло после Эйнштейна, он выразил по этому поводу свое возмущение (полагая, что его научные заслуги много выше, чем заслуги Эйнштейна) и снял свою кандидатуру. Любопытно, что Яумани в марте 1911 г. послал в редакцию «Wiener Berichte» статью, в которой развивалась квазиполевая теория тяготения, основанная на «диффузионном» обобщении гравитационного уравнения Пуассона [420]. Это обобщение не связывалось с СТО, проблема равенства инертной и гравитационной масс также не затрагивалась. Но это была квазиполевая теория, описывающая нестатическое поле тяготения, распространение которого аналогично распространению тепла или диффундирующего вещества. В 1908—1911 гг. Яумани перенес в термодинамику представления о близкодействии и потоке энергии, присущие электромагнетизму. Эти работы рассматриваются сейчас как важный вклад в термодинамику необратимых процессов [42]. Именно он одним из первых ввел в термодинамику понятия «вектора потока энтропии», «скорость производства энтропии» и т. д. На основе этих энергетических и континуалистских идей Яумани пытался построить обобщенную квазитермодинамическую физическую теорию, включающую и гравитацию. В начале 1912 г. он опубликовал расширенное изложение своей гравитационной теории. Он дополнил гравитационное уравнение Пуассона первой производной потенциала по времени, умноженной на достаточно малый коэффициент α (имеющий смысл некоего «гравитационного сопротивления»):

$$\alpha \frac{d\varphi}{dt} + 4\pi k\rho = \operatorname{div} \nabla\varphi. \quad (40)$$

В результате, в теории Яуманна «распространение изменений гравитационного поля в мировом эфире... происходит не мгновенно, но только очень быстро, и не светоподобно (или волнообразно) с определенной скоростью распространения, как это предполагал Лаплас, но подобно распространению тепла и диффузии, лишь значительно более быстрому» [420, с. 98].

Физически не обоснованное распространение диффузионно-тепловой аналогии на гравитацию, отягощенное весьма сложными эфирными представлениями, полное игнорирование СТО, введение ряда новых констант (подобранных так, чтобы объяснить, в частности, аномалию Меркурия), наконец, тяжеловесное и многословное изложение — все это привело к тому, что на работу

Яуманна никто из гравитационистов (ни Эйнштейн, ни М. Абрагам, ни Г. Ми, ни Г. Нордстрем) не обратил внимания. И когда на 85-м собрании немецких естествоиспытателей в Вене (октябрь 1913 г.), обсуждая доклад Эйнштейна о тензорной теории Эйнштейна — Гроссмана, Г. Ми заметил, что «первым, кто выдвинул до некоторой степени разумные уравнения гравитации, был Абрагам» [61, с. 361], Яуманн считал необходимым возразить, указав при этом на свою теорию. В декабре 1913 г. он послал в редакцию «*Physikalische Zeitschrift*» заметку под названием «Установление приоритета в теории тяготения», в которой подчеркнул, что «за восемь месяцев до первой публикации Абрагама (и, добавим, за три с половиной — до работы Эйнштейна «О влиянии силы тяжести на распространение света». — В. В.)» он опубликовал теорию тяготения, которая описывает гравитационные явления посредством очень простого дифференциального уравнения, основанного на принципе близкодействия» [421, с. 160]. Он заметил далее, что в теории Абрагама (о которой речь ниже и которая действительно сыграла заметную роль в развитии проблемы тяготения) уравнение Пуассона дополняется второй производной потенциала по времени, в то время как в его теории это уравнение дополняется первой производной. Поэтому, как считал Яуманн, его теория явилась своеобразным «психологическим» источником теории Абрагама. В конце 1914 г. Абрагам в своем обзоре гравитационных теорий, изложив ход мысли, которым он руководствовался в своей первой публикации, заметил, что «Яуманн выдвинул не соответствующую действительности гипотезу о психологическом происхождении этой (абрагамовской. — В. В.) теории». Он далее весьма деликатно оценил теорию Яуманна как «настолько далекую по своему кругу представлений от исследований, рассматриваемых здесь, что ее обсуждение представляется неуместным» [317, с. 484].

Знал ли Эйнштейн что-либо о своем конкуренте и о его теории, первое изложение которой появилось как раз во время переезда Эйнштейна в Прагу? Могла ли она повлиять на ход мысли Эйнштейна в области гравитации? Никаких указаний на его знакомство с теорией Яуманна у нас нет и каких-либо определенных следов ее влияния мы не находим в работах Эйнштейна. Она, конечно, могла привлечь его внимание, так как с августа 1910 г. он снова обращается к проблеме тяготения. Но научно-исследовательская программа, которой руководствовался Яуманн, его исходные посылки, представления, методы были неприемлемы для Эйнштейна. Единственной идеей, созвучной Эйнштейну, было введение близкодействия в гравитацию, хотя способ этого введения у Яуманна прямо противоречил духу релятивизма. Для Эйнштейна при дальнейшей разработке гравитационной проблемы более важны были контакты с П. Эренфестом и Г. Пиком, возникшие во время его пребывания в Праге.

Эренфест. К апрелю 1911 г. относится начало переписки Эйнштейна с Эренфестом (12-м апреля датировано первое сохранив-

шея письмо Эйнштейна [211, 425]). Личное знакомство состоялось в январе 1912 г. * Эренфест к этому времени был достаточно известным физиком. В 1909 г. в «Physikalische Zeitschrift» появилась его короткая заметка, доказывающая на основе СТО невозможность приведения абсолютно твердого цилиндра (или диска) в равномерное вращение вокруг его центральной оси [303]. Допустив возможность такого вращения, Эренфест пришел к парадоксу, известному как «парадокс Эренфеста», который заключался в том, что в результате лоренцева сокращения длина окружности уменьшается, в то время как радиус, будучи перпендикулярным направлению мгновенной линейной скорости, остается без изменения. Эта небольшая статья, содержащая описание и анализ простого мысленного эксперимента, существенно повлияла на развитие релятивистской теории абсолютно твердого тела. Эйнштейн знал и высоко ценил эту работу Эренфеста. По-видимому, именно в связи с парадоксом Эренфеста и возникла переписка между обоими учеными. Это подтверждается короткой заметкой Эйнштейна «К парадоксу Эренфеста», посланной в редакцию «Physikalische Zeitschrift» 18 мая 1911 г. В ней обсуждается вопрос о реальности лоренцева сокращения в связи с одной из работ В. Варичака, в которой утверждалось «будто лоренцево сокращение является „субъективным явлением“» [245, с. 187]. Эйнштейн разъяснил свою позицию так: «Сокращение не является реальным, поскольку оно не существует для наблюдателя, движущегося вместе с телом; однако оно реально, так как оно может быть принципиально доказано физическими средствами для наблюдателя, не движущегося вместе с телом» [там же]. При этом он ссылаясь на упомянутый мысленный эксперимент Эренфеста: «это именно то, что обнаруживает весьма изящным способом Эренфест» [там же]. Примерно через месяц была написана статья, послужившая исходным пунктом нового периода в истории гравитации, закончившегося построением основ ОТО. Прямой связи между этими работами, на первый взгляд, не усматривается. Однако равномерно вращающаяся система отсчета была некоторым аналогом равноускоренных систем отсчета, которые следовало в соответствии с принципом эквивалентности, рассматривать как допустимые при изучении однородных гравитационных полей. Уже в 1907—1908 гг. Эйнштейн понял, что применение равноускоренных систем отсчета исключает возможность приписывания пространственно-временным координатам «непосредственного физического смысла». Парадокс Эренфеста также подтверждал это и мог навести на мысль о возможности использования неевклидовых метрических соотношений при подключении уско-

* После встречи с Эйнштейном в Праге Эренфест писал А. Ф. Иоффе: «...Был у Эйнштейна... Эйнштейн абсолютно неповторим. Неисчерпаемость идей, с одной стороны, и абсолютная точность и аскетизм (!!) мышления, с другой, просто ослепили меня! К тому же чрезвычайно простая, жизнерадостная, здоровая естественность, полная остроумия,— он необычайно душевен и одарен музыкально...» [304, с. 81].

ренных систем отсчета или, согласно принципу эквивалентности, при наличии гравитационных полей.

Действительно, в следующей гравитационной работе Эйнштейна, написанной в феврале 1912 г., упоминается «диск (или цилиндр) Эренфеста» [246]. Впрочем, там речь идет пока только о том, что использование абсолютно твердых масштабов может привести (например, в равномерно вращающейся системе отсчета) к явно неевклидовым соотношениям [246, с. 190].

Впоследствии, например, в принстонских лекциях «Сущность теории относительности» (1921 г.), Эйнштейн использовал мысленный опыт Эренфеста с вращающимся диском, чтобы показать; что в неинерциальных системах отсчета возникают неевклидовы соотношения [285]. Вот почему мы кратко остановились на контактах Эйнштейна с Эренфестом, которые возникли в начале пражского периода. Парадокс Эренфеста органически связывался с трудностями применения принципа эквивалентности к решению гравитационной проблемы и, по-видимому, все время в этот период находился в круге размышлений Эйнштейна о природе тяготения*.

Г. Пик. Знакомство и дружба с математиком Г. Пиком, приверженцем Маха, у которого Пик в молодости работал ассистентом по экспериментальной физике, и учеником основоположника теоретико-инвариантной концепции в геометрии Ф. Клейна, имело, по-видимому, не меньшее значение. По свидетельству Ф. Франка, сменившего Эйнштейна на кафедре теоретической физики после его отъезда в Цюрих и хорошо знавшего Пика, именно он указал Эйнштейну на «абсолютное дифференциальное исчисление» и риманову геометрию (в частности, на работу Риччи и Леви-Чивиты) как на наиболее подходящий инструмент для преодоления трудностей релятивистской теории тяготения [361]. Хотя сам Эйнштейн, насколько нам известно, нигде не писал о Пике, эта версия вполне правдоподобна, тем более что Пик как раз в 1911 г. занимался исследованиями по дифференциальной геометрии в неевклидовых пространствах [499—501]. Ф. Франк и другие биографы Эйнштейна отмечают также, что Пик, знавший Маха лично, в беседах с Эйнштейном приводил не раз такие высказывания Маха, которые можно было истолковать как предвосхищения теории относительности [45, 364].

Принцип эквивалентности

21 июня 1911 г. в редакцию «Annalen der Physik» поступила статья Эйнштейна, специально посвященная применению принципа эквивалентности к анализу гравитации [242]. Она повторяла изложение принципа эквивалентности, который рассматри-

* Различные аспекты мысленного эксперимента с абсолютно твердым вращающимся диском в связи с генезисом ОТО рассмотрены в статье Дж. Стэчела [537].

вался как «основная гипотеза о физической природе гравитационного поля» [242, с. 165]. Во втором параграфе на основе принципа эквивалентности и простых мысленных экспериментов доказывалась «тяжесть энергии». Третий параграф был посвящен анализу хода часов в гравитационном поле, отличавшемся значительно большей простотой по сравнению со статьей 1907 г. Наконец, в последнем, четвертом, параграфе приводился более наглядный расчет искривления лучей света в поле тяготения. Сам Эйнштейн так объясняет отличие этой работы от статьи 1907 г.: «Мы снова возвращаемся к этой теме, так как нас не удовлетворяет прежне изложение вопроса; кроме того, мы теперь еще раз убедились в том, что один из наиболее важных выводов указанной работы поддается экспериментальной проверке» [там же]. Можно предположить, что обнаружение способа экспериментальной проверки теоретического построения, основанного на принципе эквивалентности, возможность открытия нового физического эффекта посредством астрономических наблюдений, явилась основным поводом для написания этой статьи.

Если в 1907 г. Эйнштейн писал, что «согласно нашей теории, влияние поля тяготения Земли так незначительно... что нет никаких перспектив на сравнение результатов теории с опытом» [234 с. 113], то теперь ситуация изменилась; «Оказывается, что лучи, проходящие вблизи Солнца, согласно излагаемой ниже теории, испытывают под влиянием поля тяготения Солнца отклонение, вследствие чего должно произойти кажущееся увеличение углового расстояния между оказавшейся вблизи Солнца неподвижной звездой и самим Солнцем почти на одну дуговую секунду» [242, с. 165].

В последнем параграфе указана основная идея соответствующего астрономического эксперимента-наблюдения: «Так как звезды в соседних с Солнцем областях неба становятся видимыми при полных солнечных затмениях, то это следствие теории можно сравнить с опытом» [242, с. 174]. Отклонение луча света должно было составить $0,83''$. Что произошло бы, если бы такие наблюдения были проведены уже в 1911 или 1912 г.? В случае успеха они, как теперь известно, дали бы результат, вдвое больший ($1,7''$). Несмотря на это, доверие к эйнштейновскому подходу, несомненно, возросло бы, поскольку другие теоретические схемы (включая появившуюся вскоре теорию Нордстрема) вообще не предсказывали такого отклонения. А Эйнштейн с самого начала подчеркивал, что расчеты его справедливы лишь в первом приближении и что принцип эквивалентности, применимый, в сущности, только к однородным полям, является лишь ключом к построению будущей теории тяготения. Таким образом, уже на этой стадии развития теории тяготения эйнштейновский подход предсказывал новый физический эффект, по всей вероятности, доступный для обнаружения астрономическими средствами.

Что же касается второго эффекта — «красного смещения» спектральных линий солнечного света по сравнению с соответст-

вующими спектральными линиями земных источников, вызванного замедлением хода часов в гравитационном поле Солнца, то точка зрения Эйнштейна на возможность его экспериментальной регистрации осталась отрицательной. Он только добавил краткое обоснование этой точки зрения: поскольку «другого рода причины (давление, температура) также влияют на положение центра тяжести спектральных линий, трудно установить, действительно ли существует выведенное выше соотношение, в котором учитывается влияние гравитационного потенциала» [242, с. 171]. При этом он сослался на работы Л. Джовила (1897) и Ш. Фабри и А. Буассона (1909), которые обнаружили эффект «красного смещения», близкий по порядку к значению, данному Эйнштейном, $((v_0 - v) / v_0 = 2 \cdot 10^{-6})$, но объяснили его давлением в поглощающем слое.

Обратимся к теоретической части работы. Обоснование и формулировка принципа эквивалентности, фактически, остались без изменения, хотя стали более подробными и приобрели большую четкость. Укажем на некоторые важные моменты, не выделенные достаточно выпукло в статье 1907 г.

1) Подчеркнуто, что основой всего рассуждения и принципа эквивалентности, в частности, является «опытный факт об одинаковом ускорении падения всех падающих в гравитационном поле тел», который «является одним из наиболее общих фактов, установленных нами из наблюдений» и который «несмотря на это ... не нашел еще отражения в основах нашей физической картины мира» [242, с. 166].

2) Указывая, что возможность замены равноускоренной системы отсчета покоящейся системой с однородным гравитационным полем означает невозможность «говорить об абсолютном ускорении координатной системы», Эйнштейн тут же во избежание недоразумений замечает: «Конечно, нельзя *любое* поле тяжести заменить состоянием движения системы без гравитационного поля, точно так же, как нельзя преобразовать все точки произвольно движущейся среды к покою посредством релятивистского преобразования» [там же]. Это замечание говорит о том, что Эйнштейн понимал ограниченный характер принципа эквивалентности. Возможность сведения однородного поля к эффекту равноускоренной системы отсчета не означала сводимость даже статического произвольного поля к кинематическому эффекту. Вероятно, уже в это время Эйнштейн был близок к пониманию локальной природы принципа эквивалентности, хотя общей формулировки принципа, выходящей за рамки однородных полей, он здесь не дает. Кстати говоря, отмеченная несводимость была одним из препятствий, стоящих на пути построения теории произвольных полей тяготения на основе принципа эквивалентности. «Большое эвристическое значение» принципа, заключающееся в том, что «с помощью теоретического изучения явлений, протекающих относительно равномерно ускоренной координатной системы, мы получаем представление о ходе явлений в однородном гравитационном поле» [242, с. 167], касалось, в сущности, только

однородных полей. Проблема состояла в распространении принципа на произвольные поля. Другими словами, как можно было бы распространить результаты исследования однородных полей, достигнутые на основе принципа эквивалентности, на поля произвольные?

3) Принцип эквивалентности обладал общностью принципа и формулировался для всех физических законов (и явлений). Релятивистский характер формулировки принципа подчеркивал его глубокое родство с принципами относительности. Оба эти обстоятельства, которые в статье 1907 г. содержались в завуалированном виде, выражены теперь вполне отчетливо: «Пока мы ограничиваемся чисто механическими явлениями, для которых справедлива механика Ньютона, мы уверены в равноценности систем K и K' (т. е. покоящейся системы с однородным полем и соответствующей ей равноускоренной системы.— В. В.). Однако представление наше будет достаточно глубоким только в том случае, если системы K и K' окажутся равноценными относительно всех физических явлений, т. е. законы природы по отношению к системе K полностью совпадут с законами природы по отношению к системе K' » [там же]. Этот последний момент, впрочем, в несколько более сжатой форме содержался и в статье 1907 г. Здесь только подчеркнуто, что в отношении механических явлений принцип эквивалентности достаточно очевиден. Когда же он распространяется на все, возможно, даже еще и не открытые физические явления, он, действительно, приобретает характер принципа.

Если в 1907 г. вывод о том, что соотношение $m = E/c^2$ выполняется не только для инертной, но и для гравитационной массы, достигался несколько формально, то теперь Эйнштейн стремится получить его с помощью простого мысленного эксперимента. Он рассматривает две физические системы тел S_1 и S_2 , расположенные в однородном гравитационном поле и удаленные друг от друга вдоль направления поля на расстояние h (в покоящейся системе отсчета K), причем потенциал в центре масс системы S_2 на γh больше такового в центре масс системы S_1 . Из системы S_2 посылаются в S_1 излучение, обладающее энергией E_2 .

В соответствии с принципом эквивалентности система K с полем γ заменяется равноускоренной системой K' , свободной от поля и движущейся с ускорением — γ . В момент излучения система K' покоится (относительно некоторой неускоренной системы K_0). Излучение достигает S_1 , через время h/c , когда S_1 относительно K_0 обладает уже скоростью $v = \gamma h/c$. Поэтому, согласно СТО, излучение в S_1 будет иметь (в первом приближении) энергию не E_2 , а

$$E_1 = E_2(1 + v/c) = E_2(1 + \gamma h/c^2), \quad (41)$$

или

$$E_1 = E_2 + (E_2/c^2)\Phi, \quad (42)$$

где Φ — гравитационный потенциал в S_2 , равный γh , а потенциал

в точке S_1 положен равным 0. «Таким образом,— заключает Эйнштейн,— оказывается, что для выполнения закона сохранения энергии нужно к энергии E перед ее испусканием из S_2 прибавить потенциальную энергию, которая соответствует (тяжелой) массе E/c^2 в поле тяжести» [242, с. 168].

Эйнштейн для большей убедительности и наглядности получает этот результат еще двумя другими способами. Сначала он рассматривает мысленный опыт с круговым энергетическим процессом, связанный с падением некоторого тела из системы S_2 в систему S_1 , сообщением телу энергии, излученной из S_2 в S_1 , последующим подъемом тела в S_2 и, таким образом, передачей энергии тела в систему S_2 . Это приводит его к выводу, что «приращение тяжелой массы равно E/c^2 , т. е. оно равно тому приращению инертной массы, которое следует из теории относительности» [242, с. 169]. Затем он показывает, что поскольку из принципа эквивалентности следует равенство тяжелой и инертной масс, то и «энергия должна иметь тяжелую массу, равную ее инертной массе» [там же]. Соответствующий мысленный опыт с пружинными весами в равноускоренной системе K' и последующим использованием принципа эквивалентности достаточно очевиден.

Эйнштейн существенно упростил также вывод эффекта «красного смещения». Теперь он использовал принцип Доплера. Повторяя рассуждения, которые были использованы для вывода соотношений (41) и (42), и опираясь на принцип Доплера, Эйнштейн находит, что частоты излучения в S_1 и S_2 должны быть связаны формулой, аналогичной (41)

$$v_1 = v_2(1 + \gamma h/c^2). \quad (43)$$

Если гравитационный потенциал в S_1 принять равным нулю, а его значение в S_2 обозначить Φ , то формулу (43) можно записать

$$v_1 = v_2(1 + \Phi/c^2). \quad (44)$$

Отсюда непосредственно следует эффект «красного смещения». Пусть v_2 — частота некоторого элементарного источника света, измеренная часами U , находящимися там же, где находится этот источник (например, на поверхности Солнца, система S_2). На Земле (система S_1) такими же часами U измеряют частоту v_1 света, излученного подобным же элементарным источником. Рассматривая Φ как разность гравитационных потенциалов между поверхностью Солнца и поверхностью Земли, получаем, что «спектральные линии солнечного света должны несколько сместиться по сравнению с соответствующими ... линиями земных источников света в сторону красного конца спектра, а именно, на относительно величину (вытекающую из формулы (44)).— В. В.)

$$(v_2 - v_1)/v_2 = -\Phi/c^2 = 2 \cdot 10^{-6} \quad [242, с. 171]. \quad (44a)$$

Дальше следует замечание о трудности экспериментальной проверки этого вывода и ссылки на работы Девила и Фабри и

Буассона, о чем говорилось выше. Затем Эйнштейн дает интерпретацию (44) и (44а) как замедления хода часов при их перемещении в места с большим гравитационным потенциалом. Она оказывается возможной, так как « ν_2 означает число периодов, отнесенное к единице времени часов U в S_2 , а ν_1 — число периодов, отнесенное к единице времени точно таких же часов U в S_1 », и естественной, поскольку дает возможность исключить явную зависимость законов природы от времени. Частота света при его излучении из S_2 , измеренная часами, находящимися там же, будет, таким образом, равна $\nu_2(1+\Phi/c^2)$ и, следовательно, совпадает с частотой ν_1 этого же луча света при его прибытии в S_1 .

Отсюда Эйнштейн непосредственно получает результат о зависимости скорости света от гравитационного потенциала:

$$c = c_0(1 + \Phi/c_0^2), \quad (45)$$

где c_0 — скорость света в начале координат, где $\Phi=0$, а c — скорость света в месте, где имеется гравитационный потенциал Φ .

Наконец, Эйнштейн, используя соотношения (45) и принцип Гюйгенса, просто и наглядно получает формулу для отклонения луча света, проходящего мимо небесного тела

$$\alpha = \frac{1}{c^2} \int_{\vartheta=-\pi/2}^{\vartheta=\pi/2} \frac{kM}{r^2} \cos \vartheta ds = \frac{2kM}{c^2 \Delta}. \quad (46)$$

Здесь α — угол отклонения, которое испытывает луч света на любом пути S по направлению к небесному телу с массой M , удаленному от луча света на расстояние Δ ; значения r и ϑ ясны из рис. 3.

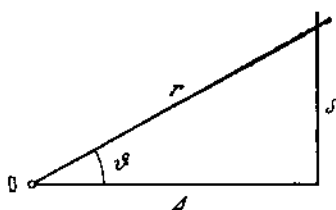


Рис. 3. Отклонение луча света в гравитационном поле

Статья заканчивается призывом к астрономам (или даже некоторым вызовом): «Было бы крайне желательным, чтобы астрономы заинтересовались поставленным здесь вопросом даже и в том случае, если бы предыдущие рассуждения казались недостаточно обоснованными или фантастическими. В самом деле, независимо от всякой теории, возникает вопрос: можно ли вообще современными средствами установить влияние гравитационных полей на распространение света?» [242, с. 174].

Эйнштейн понимал, что принцип эквивалентности и следствия, вытекающие из его применения к анализу однородных гравитационных полей, — это только начало, только подход к теории

произвольных полей. Вместе с тем, уже на этом этапе возникали возможности экспериментальной проверки правильности нового подхода. С другой стороны, неизбежность отказа от СТО и эвристики, связанной с релятивистской программой (конструируемая теория должна быть релятивистски-инвариантной и в пределе малых скоростей должна совпадать со своим классическим аналогом), утрата координатами непосредственного метрического смысла, неясность применения принципа эквивалентности к неоднородным полям и другие трудности казались очень серьезными. В этих условиях экспериментальное подтверждение эйнштейновского подхода послужило бы сильным стимулом для дальнейшей разработки этого подхода и преодоления указанных трудностей. Как же астрономы откликнулись на призыв Эйнштейна?

Фрейндлих. Первым астрономом, который заинтересовался работой Эйнштейна и решил провести соответствующие астрономические наблюдения, был Э. Ф. Фрейндлих. В 1910 г. он защитил диссертацию по математике у Ф. Клейна в Геттингене и по рекомендации последнего приступил к работе в Берлинской обсерватории. В августе 1911 г. демонстратор Института космической физики при немецком университете в Праге Л. В. Поллак, который в это время был хорошо знаком с Эйнштейном и его работами, посетил Берлинскую обсерваторию. Там он встретился с Фрейндлихом и, по свидетельству Кете Фрейндлих, рассказал ему о последней работе Эйнштейна и о том, что тот очень сожалел об отсутствии интереса астрономов к этой работе. «В тот же вечер, — вспоминает Кете Фрейндлих, — он написал Эйнштейну и выразил готовность сотрудничать» [504, с. 315]. Так как работа «О влиянии силы тяжести на распространение света» была представлена в редакцию 21 июня, а соответствующий номер «Annalen der Physik» увидел свет лишь в сентябре, сожаление Эйнштейна, по-видимому, относилось к его работе 1907 г., когда он сам еще не считал возможной экспериментальную проверку эффектов «красного смещения» и отклонения света. Поллак после своего возвращения в Прагу писал Фрейндлиху: «Несколько дней тому назад я говорил с проф. Эйнштейном. Вчера он прислал мне корректуру своей последней работы, которая, вероятно, недели через три должна появиться в «Анналах». Он сделал это с условием, что я перешлю ее Вам. Эта работа «О влиянии силы тяжести на распространение света», содержит на 10 и 11 стр. обсуждаемые результаты, которые нуждаются в незамедлительной астрономической проверке. Проф. Эйнштейн настоятельно просил меня передать Вам, что сам он сильно сомневается в том, что эксперименты с чем-либо иным, кроме Солнца, могут оказаться успешными. Я посылаю Вам корректуру, глубокоуважаемый доктор, и любезно прошу Вас сообщить мне или, может быть, прямо проф. Эйнштейну все, что касается астрономической проверки» [504, с. 316].

Вскоре после получения корректуры Фрейндлих написал Эйнштейну письмо, в котором он, в частности, обсуждал, по-видимо-

му, вопрос о трудности разделения гравитационного отклонения света от отклонения света, вызванного преломлением световых лучей в солнечной атмосфере. Эйнштейн в ответном письме от 1 сентября 1911 г. продолжал, несмотря на это, настаивать на целесообразности проведения астрономических наблюдений по отклонению света, которые могли бы оказаться, по его мнению, критерием правильности избранного им пути к решению проблемы тяготения, связанного с принципом эквивалентности: «Я очень хорошо знаю, что решение вопроса экспериментальным путем — дело не легкое, так как в игру включается преломление световых лучей в солнечной атмосфере. Но можно с уверенностью сказать: если предсказываемого отклонения не существует, то исходные положения теории не верны. Если бы только существовали планеты, много больше, чем Юпитер! Но природа не интересуется тем, чтобы сделать удобным для нас открытие ее законов» («Aber die Natur hat es sich nicht angelegen sein lassen, mir die Auffindung ihrer Gesetze bequem zu machen») (цит. по: [504, с. 318]). Как справедливо заметил Л. Р. Пайнсон, «Эйнштейн, очевидно, был не согласен с предложением Фрейндлиха о возможности измерения отклонения света в гравитационном поле Юпитера» [там же].

Заметим, что в статье он указал величину этого отклонения, которое должно было составить примерно $1/100$ отклонения в поле Солнца. В этом же письме Эйнштейн обсуждал вопрос об измерении гравитационного «красного смещения» как в поле Солнца, так и в поле других звезд.

С этого времени Фрейндлих начал изучение возможностей астрономической проверки обоих эффектов. Впоследствии Эйнштейн высоко оценивал его вклад в проблему экспериментального подтверждения принципа эквивалентности и ОТО. В письме к Зоммерфельду (5 февраля 1916 г.) примерно через два месяца после завершения основ ОТО Эйнштейн писал: «Нельзя забывать, что именно Фрейндлих придумал статистический метод, позволяющий привлечь звезды для ответа на вопрос о смещении линий ... Фрейндлих был единственным из коллег, кто поддерживал меня в моих стремлениях в области общей теории относительности. Он посвятил этой проблеме годы раздумий и труда, насколько это удавалось совмещать с напряженной и оупляющей службой в обсерватории ... Фрейндлих показал, что современные астрономические приборы достаточно хороши, чтобы обнаружить отклонение света у Юпитера, что я считал невозможным, хотя давно размышлял об этом. Мне как раз недоставало контакта с астрономией» [76, с. 195—196].

Этот контакт Эйнштейна с «экспериментатором» — астрономом, характеризует его как представителя теоретико-физической традиции, связываемой с именами Лоренца, Больцмана, Планка и др. Эта традиция в конце XIX и первой четверти XX века, в известном смысле, противостояла направлению «математической физики», ассоциируемому, прежде всего, с геттингенской школой

(Гильберт, Клейн, Минковский и др.). Представителей этой традиции отличали стремление к синтезу физики на основе абстрактных математических структур и к аксиоматизации, выявлению структурно-математических особенностей физических теорий, широкое и эффективное использование эвристической роли математики в физике и, вместе с тем, отсутствие непосредственного контакта с экспериментом, определенная незаинтересованность в разработке интерпретационных аспектов физической теории. Иногда Эйнштейна причисляют к этой традиции, во всяком случае, в период разработки им основ ОТО. Точно так же нередко встречаются утверждения об отсутствии у него в связи с ОТО интереса к экспериментальной стороне дела. Приведенный материал не подтверждает такой точки зрения. Мы увидим, что и в дальнейшем, по крайней мере вплоть до завершения основ ОТО, проблемы экспериментальной проверки и обоснования теории, а также физической интерпретации были для Эйнштейна весьма существенными.

Выводы. Именно трудности физического характера препятствовали дальнейшему движению от принципа эквивалентности и однородных полей тяготения к общей теории произвольных гравитационных полей. 10 октября 1911 г. Эйнштейн писал своему другу Лаубу: «Рассмотрение гравитации с позиций теории относительности вызывает серьезные затруднения. Я считаю вероятным, что принцип постоянства скорости света в его обычном понимании действителен лишь для пространства с постоянным гравитационным потенциалом» [62, с. 102]. Выход за рамки СТО при изучении гравитации повлек за собой необходимость нового пересмотра пространственно-временных отношений. Операционально-измерительное обоснование пространства и времени в СТО и связанная с ним «метрическая» интерпретация координат оказывались неприменимыми. Кинематическое истолкование однородных полей, опирающееся на принцип эквивалентности, как будто не поддавалось распространению на неоднородные поля. Не удавалось, таким образом, использовать непосредственно принцип эквивалентности как ключ к построению уравнения для произвольных полей.

Тем не менее, уверенность Эйнштейна в том, что ключ этот выбран правильно, была весьма велика, и опиралась она, прежде всего, на аргументы экспериментального и физического характера, а также на основные положения релятивистской программы. Успех принципа эквивалентности, его эвристичность и плодотворность стали бы несомненными в случае осуществления астрономических подтверждений эффектов отклонения света и «красного смещения». Поэтому Эйнштейн придавал этому особое значение и, несмотря на глубокую внутреннюю убежденность в справедливости принципа эквивалентности и вытекающих из него следствий, допускал возможность и ошибочности своего подхода. Не случайно в цитированном выше письме к Лаубу он подчеркнул, что считает лишь «вероятным» избранный им путь.

СКАЛЯРНЫЕ ТЕОРИИ

1. Первая теория Абрагама

...Первым, кто выдвинул до некоторой степени разумные уравнения гравитации, был Абрагам. В то время как раньше всегда стремились... описать гравитационное поле аналогично электромагнитному, Абрагам нашел новый подход.

Г. Ми (1913)

Однажды ошибаясь при выборе дороги,
Они упорно шли, глядя на свой компас,
И был их труд велик, шаги их были строги,
Но уводил их прочь от цели каждый час.

В. Брюсов. «Замкнутые» (1901)

В середине декабря 1911 г. М. Абрагам, один из видных геттингенских теоретиков, известный своими исследованиями в области электродинамики и электронной теории, закончил работу «К теории тяготения», которая была послана им 14 декабря в «Rendiconti della Reale Accademia dei Lincei» и одновременно в «Physikalische Zeitschrift» [306]. Эта работа была непосредственно стимулирована опубликованной несколькими месяцами раньше статьей Эйнштейна и явилась следующим серьезным шагом в развитии теории тяготения. Абрагам воспринял фундаментальную идею Эйнштейна о непостоянстве скорости света в поле тяготения и ее зависимости от гравитационного потенциала (формула (45)). Эта зависимость явилась физической основой четырехмерного обобщения уравнения Пуассона для скалярного потенциала. Таким образом, если не считать теории Яуманна, игнорировавшей СТО, принцип эквивалентности и проблему энергии, теория Абрагама оказалась первой скалярной теорией гравитационного поля, опиравшейся, в значительной мере, на теорию относительности и принцип эквивалентности. Вместе с тем, эта теория отличалась определенной непоследовательностью (использование четырехмерного формализма СТО и отказ от постоянства скорости света), несоответствием духу релятивистской программы, на позициях которой стоял Эйнштейн.

Несмотря на это, она стала важным шагом вперед в развитии гравитационной проблемы. Она стимулировала исследования Эйнштейна по скалярной теории статического поля и работы Нордстрема по скалярной релятивистски инвариантной теории

тяготения, которые, в свою очередь, оказались необходимым этапом на пути к ОТО. Вскоре с начала 1912 г. между Эйнштейном и Абрагамом возникли острые дискуссии по гравитационной проблеме, в которые несколько позже включились Г. Нордстрем, Г. Ми, Г. Рейснер, Ф. Коттлер, Э. Кречман и др.

Абрагам, электродинамика и СТО. Для более глубокого понимания позиции Абрагама в гравитационной дискуссии 1912—1914 гг. имеет смысл рассмотреть его предшествующую деятельность в области электронной теории и его отношение к СТО [504, 373, 325]. С 1897 г. Абрагам был студентом и затем ассистентом Планка, под руководством которого защитил докторскую диссертацию. С 1900 г. он приват-доцент в Геттингенском университете, в котором работал до 1909 г. В 1902 г. он опубликовал первую большую работу по динамике электрона, которая хорошо согласовывалась с экспериментами В. Кауфмана по определению зависимости массы электронов от скорости. Абрагам при этом опирался на концепцию эфира, что вело его к необходимости принятия абсолютной системы отсчета, и максвелловскую электродинамику. На этой основе он развил теорию недеформированного электрона, противостоящую теории Лоренца, в которой, в соответствии с лоренцевым сокращением, форма электрона зависела от его скорости. До 1909 г. Абрагам считал свою теорию правильной, но после опытов Бухсера вынужден был признать её некорректность. В это время он, в сущности, был одним из лидеров электромагнитной концепции физики в Германии. К 1909 г. относится начало дискуссии между Абрагамом, Нордстремом, Лауэ, Эйнштейном и Лаубом, Гансом и др. о выражениях для тензора энергии-импульса и пондеромоторной силы в электродинамике сплошной среды. Особенно большую активность проявляли Абрагам и Нордстрем, оба представителя Геттингенской школы. Исходным пунктом дискуссии были работы Минковского по феноменологической электродинамике. Сам Минковский, несмотря на разработку им четырёхмерной теоретико-инвариантной концепции СТО, в значительной мере был приверженцем электромагнитной концепции физики, весьма популярной в Геттингене. Дискуссия (прежде всего, между Абрагамом и Нордстремом) продолжалась до лета 1911 г., т. е. до того времени, когда Нордстрем приехал в Геттинген из Гельсингфорса и достиг определенного соглашения с Абрагамом. Они пришли к выводу о необходимости продолжения исследований проблемы энергии — импульса, в частности на основе использования релятивистской термодинамики. Эти работы Абрагама и Нордстрема имели своей целью дальнейшую разработку электромагнитной концепции физики [155, 373, 504].

Эйнштейн, как мы помним, в 1908—1910 гг. также интенсивно работал над единой теорией электромагнитного поля, электронов и квантов, которая, хотя и выходила за рамки электромагнитной концепции физики, но все же близко примыкала к ней. Вскоре Эйнштейн оставил работу над этой глобальной проблемой и об-

ратился к исследованию гравитации. Затем на этот путь вышли Абрагам и Нордстрем. Интересно отметить, что Абрагам, несмотря на свое несогласие с релятивистской программой, интенсивно и успешно использовал понятийный и математический аппарат СТО, особенно в той форме, в какой он был развит Минковским. Таким образом, пути Эйнштейна, Абрагама и Нордстрема (в известной мере, это касается и Г. Ми) в гравитацию были аналогичны, хотя и не тождественны. Все они в 1908—1911 гг. интенсивно занимались проблемами электродинамики и электронной теории. Абрагам и Нордстрем — в рамках электромагнитной концепции физики и под влиянием работ Минковского, Эйнштейн — главным образом, с целью построения на основе релятивистской программы некоторой единой полевой теории, учитывающей также и световые кванты. И в 1911 г. все трое, встретившись с огромными трудностями в данной теории, обратили свои взоры к проблеме тяготения. При этом у Эйнштейна уже был определенный «задел» в этой области в виде сформулированного им в 1907 г. принципа эквивалентности. К тому же, он раньше геттингенских коллег осознал ошибочность своего пути (примерно к августу 1910 г.), а в июне 1911 г. уже закончил основополагающую статью по гравитации, несомненно, повлиявшую и на Абрагама, и на Нордстрема.

От «гипотезы Эйнштейна» к первой скалярной теории. Статью [306] Абрагам начинает с упоминания о «гипотезе, выдвинутой Эйнштейном, о зависимости скорости света c от гравитационного потенциала Φ » [306, с. 1]. Свою задачу Абрагам видит в построении полевой теории тяготения, удовлетворяющей принципу относительности, переходящей в пределе малых скоростей в ньютоновскую теорию, а также объясняющей эйнштейновскую зависимость скорости света от гравитационного потенциала и не приводящей к трудностям с плотностью энергии, с которыми встречались квазиэлектромагнитные теории тяготения: «В настоящей заметке я развиваю теорию тяжести (*Schwerkraft*), которая удовлетворяет принципу относительности, и вывожу из нее соотношение между c и Φ , которое в первом приближении совпадает с эйнштейновским» [там же]. Далее, используя четырехмерный формализм Минковского, он даст соответствующее обобщение уравнения Пуассона:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial u^2} = 4\pi\gamma v, \quad (1)$$

где Φ и v — четырехмерные скаляры (гравитационный потенциал и плотность распределения массы покоя), $u = it = ict$, γ — гравитационная постоянная. Добавление к левой части уравнения Пуассона именно второй производной (а не первой, как у Яумана) определялось, очевидно, стремлением Абрагама согласовать свою теорию с принципом относительности и возможностью использовать четырехмерный аппарат СТО.

Полагая, что движущая сила, действующая на единичную массу, согласно четырехмерному векторному исчислению, равна:

$$\mathbf{F} = -\text{Grad } \Phi, \quad (2)$$

а уравнения движения при этом:

$$\ddot{x} = F_x, \quad \ddot{y} = F_y, \quad \ddot{z} = F_z, \quad \ddot{u} = F_u, \quad (3)$$

Абрагам сразу получает два важных вывода. Во-первых, из волнового скалярного уравнения (1), в сочетании с (2), следовало, что «гравитация распространяется со скоростью света, как этого требует принцип относительности, и при этом, в то время как световые волны поперечны, гравитационные волны продольны» [там же]. (Заметим, что это одно из первых упоминаний о существовании гравитационных волн как самостоятельной физической реальности.) Во-вторых, опираясь на соотношения (2) и (3), а также на известное релятивистское тождество:

$$\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 + \dot{u}^2 = c^2 \quad (4)$$

Абрагам получает зависимость скорости света от гравитационного потенциала, которая в первом приближении дает эйнштейновское соотношение:

$$c = c_0 (1 + (\Phi - \Phi_0)/c_0^2). \quad (4a)$$

Несложные преобразования тождества (4) дают:

$$l = c/\sqrt{1 - \beta^2} = c\kappa^{-1}, \quad \kappa = \sqrt{1 - \beta^2};$$

а также, дифференцируя (4) по собственному времени τ , получим:

$$\dot{x}\ddot{x} + \dot{y}\ddot{y} + \dot{z}\ddot{z} + \dot{u}\ddot{u} = -c \frac{dc}{d\tau}.$$

Используя формулы (2) и (3), последнее тождество можно переписать в виде:

$$\dot{x} \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \dot{y} \frac{\partial \Phi}{\partial y} + \dot{z} \frac{\partial \Phi}{\partial z} + \dot{u} \frac{\partial \Phi}{\partial u} = c \frac{dc}{d\tau}, \quad \text{или} \quad \frac{d\Phi}{d\tau} = c \frac{dc}{d\tau},$$

интегрируя которое, получаем соотношение Абрагама

$$c^2/2 - c_0^2/2 = \Phi - \Phi_0. \quad (5)$$

Здесь c_0 и Φ_0 — соответственно скорость света и потенциал в начале координат. Абрагам считал, таким образом, что одно лишь предположение о пространственно-временной зависимости скорости света, в сочетании с естественным четырехмерным (хотя и не релятивистским!) обобщением соотношений механики (формулы (2) и (3)), дает зависимость скорости света от потенциала, полученную Эйнштейном на основе принципа эквивалентности и связанную с эффектами отклонения лучей и «красного смещения» в поле тяготения.

Может показаться, что соотношение (5) нетрудно получить из закона сохранения в рамках эмиссионной теории света. Это неверно, поскольку, как это заметил Абрагам, эмиссионная теория дает не (5), а похожее, но иное соотношение:

$$c^2/2 - c_0^2/2 = \Phi_0 - \Phi.$$

Последнее уравнение системы (3) с учетом равенства $l = c\kappa^{-1}$ в случае статического поля дает

$$mc \frac{d}{d\tau} (c\kappa^{-1}) = 0, \quad (6)$$

откуда $m c \kappa^{-1} = \text{const}$,

что в первом приближении (т. е. пренебрегая β^2 и членами Φ/c^2) приводит к классическому закону сохранения энергии для частицы, движущейся в гравитационном поле:

$$\frac{1}{2} m v^2 + m\Phi = \text{const}.$$

Это обстоятельство позволило Абрагаму сделать вывод о том, что «в предельном случае малых скоростей новая механика, таким образом, совпадет со старой» [306, с. 3].

Проблема энергии. Главное достоинство теории — удовлетворительное решение проблемы энергии, которая была камнем преткновения для векторных теорий.

Как отмечал уже Максвелл, плотность энергии гравитационного поля в этом случае оказывалась отрицательной. Действительно, это следует из выражения для энергии поля системы:

$$E = \int \frac{1}{2} \mu \Phi dV,$$

где μ — плотность материи, Φ — скалярный потенциал поля, и уравнений поля

$$\text{div } \mathbf{E}^g = -\mu, \quad \mathbf{E}^g = -\text{grad } \Phi. \quad (6a)$$

Здесь \mathbf{E}^g — напряженность статического гравитационного поля.

Отрицательный знак плотности энергии статического поля тяготения η^g получается из-за минуса перед μ в уравнении (6a), в отличие от электростатики:

$$E = \int \frac{1}{2} \mu \Phi dV = - \int \frac{1}{2} (\mathbf{E}^g)^2 dV, \quad \text{откуда } \eta^g = -\frac{1}{2} (\mathbf{E}^g)^2.$$

Путь к решению этой проблемы еще в конце XIX в. указал В. Вольтерра, который по аналогии с электродинамикой ввел понятие потока энергии гравитационного поля \mathbf{S} [317]. Он представил полный поток энергии как сумму двух членов: $\mathbf{S} = \mathbf{S}^g + \mathbf{S}^m$, первый из которых обусловлен изменением поля во времени:

$$\mathbf{S}^g = -\Phi \frac{\partial \mathbf{F}^g}{\partial t},$$

где \mathbf{F}^g — напряженность произвольного гравитационного поля, а второй — переносом энергии гравитирующим веществом: $\mathbf{S}^m =$

$\equiv \Phi \nu$. Это открывало возможность при введении плотности энергии η^m , соответствующей потоку S^m , $\eta^m = \Phi \mu$, получить вполне корректное выражение для полной энергии некоторой покоящейся системы масс, если для плотности энергии поля выбиралась величина: $\eta^s = \frac{1}{2}(F^s)^2$, являющаяся положительной.

Подход Вольтерры, в сущности, был скалярно-полевым, хотя и трехмерным. Переход к четырехмерной скалярной теории давал, таким образом, надежду на решение проблемы энергии на основе введения тензора энергии — импульса. Однако выражение для тензора энергии — импульса гравитации должно было отличаться от соответствующего выражения для электромагнитного поля, так чтобы плотность энергии поля тяготения была положительной. Абрагам следующим образом определяет десять компонентов «гравитационного тензора»:

$$\begin{aligned} X_x &= \frac{1}{4\pi\gamma} \left[-\left(\frac{\partial\Phi}{\partial x}\right)^2 + \Psi \right], & X_y &= Y_x = -\frac{1}{4\pi\gamma} \frac{\partial\Phi}{\partial x} \frac{\partial\Phi}{\partial y}, \\ Y_y &= \frac{1}{4\pi\gamma} \left[-\left(\frac{\partial\Phi}{\partial y}\right)^2 + \Psi \right], & X_z &= Z_x = -\frac{1}{4\pi\gamma} \frac{\partial\Phi}{\partial x} \frac{\partial\Phi}{\partial z}, \\ Z_z &= \frac{1}{4\pi\gamma} \left[-\left(\frac{\partial\Phi}{\partial z}\right)^2 + \Psi \right], & Y_z &= Z_y = -\frac{1}{4\pi\gamma} \frac{\partial\Phi}{\partial y} \frac{\partial\Phi}{\partial z}, \\ X_u &= U_x = -\frac{1}{4\pi\gamma} \frac{\partial\Phi}{\partial u} \frac{\partial\Phi}{\partial x}, & U_u &= \frac{1}{4\pi\gamma} \left[-\left(\frac{\partial\Phi}{\partial u}\right)^2 + \Psi \right], \\ Y_u &= U_y = -\frac{1}{4\pi\gamma} \frac{\partial\Phi}{\partial u} \frac{\partial\Phi}{\partial y}, & Z_u &= U_z = -\frac{1}{4\pi\gamma} \frac{\partial\Phi}{\partial u} \frac{\partial\Phi}{\partial z}, \end{aligned} \quad (7)$$

причем $\Psi = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial\Phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial u}\right)^2 \right]$.

Последнюю компоненту тензора U_u следует отождествить, по аналогии с электродинамикой, с плотностью энергии гравитационного поля, которая оказывается положительной и равной

$$\varepsilon = U_u = \frac{1}{8\pi\gamma} \left\{ \left(\frac{\partial\Phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial t}\right)^2 \right\}. \quad (8)$$

Остальные компоненты имеют тот же смысл, что и соответствующие компоненты тензора энергии — импульса электромагнитного поля. Если обозначить «гравитационный тензор» T^s , то можно показать, что

$$\text{Div } T^s = -\square\Phi \text{ Grad } \Phi,$$

и для того чтобы выполнялось характерное для СТО выражение для силы: $\text{Div } T^s = F$, нужно принять $\square\Phi = 4\pi\gamma\nu$, т. е. как раз постулированное Абрагамом уравнение гравитационного поля. Таким образом, выражения для тензора энергии — импульса поля, силы тяготения, уравнения движения, закон сохранения энер-

гии — импульса и уравнения поля естественным образом связываются между собой.

Аномалия Меркурия, гравитационные волны. В следующей заметке, посланной в редакцию также 14 декабря и называвшейся «Элементарный закон тяготения» [307], Абрагам нашел решение для четырехмерного уравнения Пуассона (1) в случае взаимодействия двух точечных масс в точках $P_0(x_0, y_0, z_0, u_0)$ и $P(x, y, z, u)$

$$\Phi = -\frac{\gamma}{\pi} \iiint \frac{v dx dy dz du}{R}, \quad (9)$$

где $R = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2 + (u-u_0)^2}$. Соотношение (9) легко интегрируется, в результате чего для точечного гравитационного потенциала получается

$$\Phi = -\gamma m/S, \quad (10)$$

где $S = (x-x_0)\dot{x} + (y-y_0)\dot{y} + (z-z_0)\dot{z} - ir\dot{u}$, (11)
а r — пространственное расстояние между точками P и P_0 . Если вектор $\{(x-x_0), \dots, (u-u_0)\}$ обозначить \mathbf{R} , а вектор $\{\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{u}\}$ — \mathbf{V} , то сила взаимодействия двух точечных масс m и m_0 , определяемая как $(-m_0 \text{Grad } \Phi)$, окажется равной

$$\mathbf{F} = \gamma m m_0 \left(\mathbf{R} \frac{1-T}{S^3} + \mathbf{V} \frac{1}{cS^2} \right), \quad (12)$$

где $T = (1/c^2) (\mathbf{R}, \mathbf{V})$.

Отметив сходство со спецрелятивистскими обобщениями закона тяготения Пуанкаре и Минковского, которые тоже состоят из двух слагаемых, пропорциональных четырехмерным векторам \mathbf{R} и \mathbf{V} , Абрагам заключил статью следующим замечанием: «Однако наш элементарный закон проще, поскольку скорость притягиваемой точки в него не входит, и общее, потому что он учитывает также ускорение притягивающей точки. Его сравнение с астрономическими наблюдениями послужило бы для проверки теории тяготения, развитой в предыдущей статье» [307, с. 5].

Закон тяготения Абрагама (12) был вскоре применен итальянским физиком Дж. Паванини для расчета аномального secularного движения перигелия Меркурия, которое в системе, покоящейся относительно центра масс системы двух тел Меркурий—Солнце, составило $14''$, 52 в 100 лет, то есть только 1/3 фактически наблюдаемого [497].

Важным следствием теории было существование продольных гравитационных волн, распространяющихся со скоростью света. Через некоторое время Абрагам продолжил обсуждение гравитационных волн. Он заметил, что при излучении, например, α -частиц радиоактивными атомами должны возникать гравитационные волны с амплитудой, пропорциональной произведению массы на ускорение. Возникающие при этом электромагнитные волны создавали силу, действующую на другую α -частицу, кото-

рая по подсчетам Абрагама оказывалась в 10^{16} раз больше соответствующей гравитационной силы. Более того, он полагал, что амплитуда волны, излучаемой, например, системой из двух частиц, которые притягивают друг друга, должна быть пропорциональна векторной сумме $m_1 a_1 + m_2 a_2$, которая, в соответствии с третьим законом Ньютона, равна нулю. Тем самым, «не удается ... указать способ генерации гравитационных волн заметной интенсивности» и поэтому «гравитационные волны не играют роли в хозяйстве природы» [317, с. 487].

В марте 1912 г. Абрагам получил из своей теории любопытное космогоническое следствие, что «масса звезды, средняя плотность которой равна средней плотности Солнца, не может превзойти величину порядка 10^8 солнечных масс», и заключил: «Так как эта граница лежит достаточно высоко, то никаких трудностей в этом отношении для нашей теории не возникает» [309, с. 311].

Выводы. Во многих отношениях теория Абрагама казалась существенным шагом вперед по сравнению со спецрелятивистскими и квазиэлектромагнитными теориями тяготения. Во-первых, это была теория поля, опиравшаяся на дифференциальные полевые уравнения, в отличие от спецрелятивистских теорий, не являющихся в полном смысле близкодействующими.

Во-вторых, в качестве следствия теория содержала установленную Эйнштейном на основе принципа эквивалентности взаимосвязь потенциала и скорости света и, таким образом, как бы учитывала эйнштейновский принцип эквивалентности. В-третьих, Абрагаму казалось, что его теория локально удовлетворяет принципу относительности, хотя вскоре Эйнштейн показал, что это не так [246, с. 200].

Четвертым достоинством теории Абрагама было удовлетворительное решение проблемы энергии. Дело в том, что квазиэлектромагнитные (векторные) теории гравитационного поля приводили к отрицательной плотности энергии. В скалярной полевой теории эту трудность удавалось устранить. Абрагаму казалось весьма важным то обстоятельство, что оказывалось возможным использовать четырехмерный формализм Минковского, особенно ввести тензор энергии — импульса гравитационного поля («гравитационный тензор»), дивергентные соотношения для которого хорошо согласовывались с уравнениями гравитационного поля.

Теория не приводила к новым эмпирическим трудностям в области небесной механики солнечной системы, хотя и не снимала полностью аномалию в движении перигелия Меркурия, объясняя лишь $\frac{1}{3}$ наблюдаемого смещения.

Наконец, наряду с эйнштейновскими эффектами отклонения световых лучей и «красного смещения», теория Абрагама приводила к существованию гравитационных волн, правда, слишком малой интенсивности, чтобы их можно было экспериментально обнаружить, и к предельному значению звездных масс (порядка 10^8 солнечных).

В отличие от Эйнштейна, который пытался и в 1907, и в 1911 г. строить теорию тяготения на основе релятивистской программы, Абрагам опирался только на полевую программу, хотя и не сводящуюся к электромагнитной концепции физики. Он уже до 1911 г. был противником СТО и релятивистской программы, поэтому с энтузиазмом подхватил идеи Эйнштейна о перемещении скорости света, об ограниченности СТО применительно к гравитационным явлениям. Для Абрагама это означало крушение релятивистской программы. Для Эйнштейна принцип эквивалентности означал, что решение проблемы тяготения должно быть связано с обобщением СТО, и главные трудности для него заключались в отыскании способа распространения принципа эквивалентности на произвольные гравитационные поля. Абрагам же использовал, скорее, вытекающие из этого принципа следствия (прежде всего, зависимость c от потенциала Φ), чем сам этот релятивистский по своей природе принцип. Здесь как раз уместно перейти к теории статического поля тяготения, выдвинутой в феврале 1912 г. и стимулированной, по-видимому, рассмотренными здесь работами Абрагама.

2. Эйнштейновские теории статического гравитационного поля

Довольно нам,— сказал я,— рыскать зря!
Взойдем сперва на ближнюю вершину,
Чтоб местность обозреть.

А. Толстой. «Дракон»

Первая «статическая теория» Эйнштейна

Сравнение подходов Эйнштейна и Абрагама. Эйнштейн понимал, что принцип эквивалентности, дающий ключ к изучению однородных полей тяготения, еще не составляет теории. Но трудности, связанные с его распространением на произвольные гравитационные поля, были настолько значительны, что Эйнштейн пытался даже отказаться от решения проблемы гравитации на этом пути, и в течение нескольких лет (1908—1910 гг.) искал решение более общей проблемы построения единой теории поля. Такая теория, опирающаяся на тем или иным образом обобщенные релятивистски-инвариантные уравнения электродинамики, должна была бы в качестве особых решений дать описание не только электромагнитного поля, электронов и квантов света, но, в случае удачи, и гравитации. Этот замысел умозрительного и кардинального разрешения основных проблем физики был явно преждевременным, и Эйнштейн в 1911 г. вернулся к принципу эквивалентности. Можно предположить, что возврат Эйнштейна к гравитационной проблеме не означал окончательного отказа от

решения глобальной проблемы единой теории поля; напротив, принцип эквивалентности свидетельствовал о необходимости расширения СТО, и создание гравитационной теории должно было привести к новому более широкому классу допустимых преобразований, т. е. новой группе симметрии, которая могла оказаться своеобразным компасом и при построении единой теории поля.

После опубликования статьи «О влиянии силы тяжести на распространение света» прошло более полугодия, в течение которого Эйнштейну в общем не удалось продвинуться вперед в разработке теории тяготения. По-видимому, упомянутые выше трудности применения принципа эквивалентности к анализу произвольных полей были непреодолимым препятствием для дальнейшего развития теории. С «падением» СТО подрывалась и вся релятивистская программа в области гравитации. И хотя Эйнштейн видел выход не столько в отказе от нее, сколько в ее расширении, ясного понимания того, как достичь этого расширения и чем должна быть заменена релятивистская программа, связанная с СТО, в 1911 г. у Эйнштейна не было.

Непосредственным стимулом для февральской публикации Эйнштейна [246], послужили рассмотренные работы Абрагама. Во-первых, теория Абрагама претендовала на обобщение результатов Эйнштейна и содержала подход к произвольным полям на основе обобщенного уравнения Пуассона для четырехмерного скалярного потенциала. Во-вторых, путь Абрагама не устранил Эйнштейна, так как он опирался, фактически, не столько на принцип эквивалентности, сколько на его следствие, и, как показал Эйнштейн, плохо согласовывался с релятивистской программой. Вместе с тем, теория Абрагама наводила на мысль о скалярном характере гравитационного потенциала и возможности использования в качестве потенциала скорости света. Но построение на основе этих соображений теории произвольных полей казалось Эйнштейну преждевременным, поскольку, как показал опыт теории Абрагама, отказ от СТО при отсутствии адекватной ее замены сопровождался в этом случае использованием четырехмерной тензорной схемы Минковского, что приводило к внутренней противоречивости теории. В сущности, в «падении» СТО Абрагам видел не указание на необходимость расширения релятивистской программы, а возможность возврата к классической полевой («эфирной», фактически) программе Максвелла — Лоренца. Впрочем, позиция Абрагама здесь была несколько более уточненной. Он считал, что в отсутствие гравитации СТО вполне приемлема, «но если принимать во внимание конечные гравитирующие системы, то никакой эквивалентности между равномерно и прямолинейно движущимися системами не существует», «ковариантность физических законов относительно лоренцевых преобразований... остается справедливой тогда только в бесконечно малых пространственных областях, в которых скорость света может рассматриваться как постоянная [317, с. 487]. С точки зрения Абрагама, в действительности всегда есть выделенная система

отсчета — это система, «в которой внешнее поле тяготения может рассматриваться как статическое». Она и должна «совпасть с „абсолютной“ системой отсчета, которая обнаруживает себя посредством центробежных и кориолисовых сил, возникающих при вращательных движениях». В этом-то и заключалось принципиальное различие в подходах Абрагама и Эйнштейна к проблеме гравитации. «... Систему уравнений Абрагама,— писал Эйнштейн,— нельзя согласовать с принципом эквивалентности и ... к его представлениям о времени и пространстве нельзя прийти исходя из формальной, чисто математической точки зрения» [246, с. 189]. Последнее замечание разъясняется в конце статьи, где Эйнштейн показывает, что любая теория тяготения, включающая описание статических полей, приводит к нарушению лоренц-ковариантности даже в бесконечно малых пространственных областях. Рассуждение Эйнштейна достаточно элементарно. Если преобразования Лоренца сохраняют свою справедливость локально, то должны существовать преобразования

$$dx' = \frac{dx - v dt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad dt' = \frac{(-v/c^2) dx + dt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}; \quad (13)$$

dx' и dt' должны быть полными дифференциалами, т. е. выполняться известные условия:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{-v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right), \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{-v/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right).$$

Теперь предполагается, что в нештрихованной системе поле статическое, т. е. $c = f(x)$ и не зависит от времени t . Далее, предполагается, что нештрихованная система движется равномерно и прямолинейно и при этом v при фиксированном x также не зависит от t . Тогда левые, а значит, и правые части выражений (14) должны обратиться в нуль. Но обращение в нуль правых частей оказывается невозможным, так как «при произвольной зависимости c от x и при соответствующем выборе v как функции x правые части обоих уравнений не могут одновременно обращаться в нуль» [246, с. 200]. Конечно, приближенно лоренцевы преобразования могут быть справедливы, а именно, в той мере, в какой в достаточно малых областях скорость света может считаться постоянной. Непоследовательность Абрагама, с одной стороны, отказавшегося от постоянства скорости света, а с другой,— использовавшего четырехмерную релятивистскую схему Минковского, была в глазах Эйнштейна серьезным недостатком: «Действительно, теория Абрагама предполагает, что скорость света переменна, что она является, известным образом, мерой гравитационного потенциала. Тем не менее он пользуется специальной теорией относительности, так что занимает позицию, полную противоречий.

Возражение настолько веское, что эта теория мне кажется совершенно несостоятельной» [61, с. 364].

Абрагам, как уже упоминалось, использовал идею переменной скорости света, которую Эйнштейн прочно связывал с принципом эквивалентности, но не сам этот принцип. «Гипотеза о том, что «поле ускорения» является частным случаем гравитационного поля», [246, с. 189], составляющая эвристическую сущность принципа эквивалентности, была совершенно чужда Абрагаму. Поэтому Эйнштейн полагал, что, несмотря на объяснение эффекта отклонения света и вывод формулы (5), теория Абрагама не согласовывалась с принципом эквивалентности.

В сущности, этот принцип приводил к теории однородных гравитационных полей. Но он же и доказывал неприменимость СТО при изучении гравитации или, словами Эйнштейна «исключал всеобщую применимость преобразований Лоренца» [там же]. При этом, однако, принцип эквивалентности ничего не говорил о том, какой класс преобразований должен заменить лоренцевы преобразования, в какой форме принцип относительности должен выполняться в гравитационной физике. Это обстоятельство очень затрудняло поиски уравнений произвольных гравитационных полей, которые должны были быть инвариантны относительно остававшихся неизвестными преобразований, более общих, чем лоренцевы. Четырехмерное обобщение уравнения Пуассона, принятое Абрагамом, казалось Эйнштейну внутренне противоречивым, поскольку оно, фактически, опиралось на СТО.

Первая «статическая теория» Эйнштейна. В условиях отсутствия физически обоснованной группы пространственно-временной симметрии Эйнштейн сделал попытку продвинуться вперед, перейдя от однородных полей к полям, не меняющимся во времени, т. е. статическим. Этот, в известном смысле, индуктивный путь уже привел к определенному успеху (теория однородных полей). Для статических полей в классике имелись аналоги в виде дифференциальных уравнений Лапласа и Пуассона, соответствующие уравнения для нестатических полей были неизвестны ни в классике, ни в рамках СТО.

Связь между скоростью света и гравитационным потенциалом в форме, данной Эйнштейном (4а) или Абрагамом (5), наводила на мысль о том, что скорость света может рассматриваться как мера гравитационного потенциала. Рассмотрение пространственно-временных соотношений в равноускоренной системе отсчета, эквивалентной однородному полю тяготения, привело Эйнштейна к простой зависимости скорости света от пространственных координат:

$$c = c_0 + ax, \quad (15)$$

где a/c_0 характеризует напряженность поля.

Соотношение (15) естественным образом удовлетворяет уравнению Лапласа, в котором роль потенциала играет скорость света:

$$\Delta c = \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} = 0. \quad (16)$$

«Отсюда,— замечает Эйнштейн,— напрашивается предположение, что это уравнение справедливо и в случае любого статического гравитационного поля в отсутствие масс» [246, с. 194].

При выводе соответствующего аналога уравнения Пуассона Эйнштейн использует, в сущности, принцип подобия, что оказывается возможным, так как роль потенциала в этом случае играет скорость света. Но «из физического смысла с непосредственно следует, что c определено лишь с точностью до постоянного множителя, зависящего от того, какими часами пользуются для измерения t в начале координат системы K » [там же]. Поэтому-то искомым аналогом уравнения Пуассона должен быть однородным по c . В результате получается

$$\Delta c = k c r, \quad (17)$$

где k — универсальная гравитационная постоянная.

Не меньшее значение в теории тяготения имеют уравнения движения физических систем (прежде всего, материальной точки) в гравитационном поле. Точно так же, как по уравнениям Лапласа и Пуассона, пользуясь принципами эквивалентности, соответствия, подобия и т. д., Эйнштейн получил обобщение этих уравнений для произвольных статических полей: опираясь на уравнения движения материальной точки в однородном поле, он конструирует соответствующие уравнения для произвольных статических полей.

В неускоренной системе Σ с координатами ξ, η, ζ, τ эти уравнения в отсутствие сил будут таковы:

$$\xi = A_1 \tau + B_1; \quad \eta = A_2 \tau + B_2; \quad \zeta = A_3 \tau + B_3,$$

где A_i и B_i ($i=1, 2, 3$) — константы. Переход к равноускоренной системе, связанный с «включением» однородного гравитационного поля, позволяет записать:

$$\begin{aligned} x &= A_1 c t + B_1 - (a c / 2) t^2, \\ y &= A_2 c t + B_2, \\ z &= A_3 c t + B_3. \end{aligned} \quad (18)$$

Одно- и двукратное дифференцирование соотношений (18) дает возможность исключить константы и получить в результате систему уравнений движения материальной точки в однородном поле:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\dot{x}}{c^2} \right) &= - \frac{a}{c}, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\dot{y}}{c^2} \right) &= 0, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\dot{z}}{c^2} \right) &= 0. \end{aligned} \quad (19)$$

Из формулы (15) следует, что $a = \partial c / \partial x$. Принимая во внимание, что $\partial c / \partial y = \partial c / \partial z = 0$, уравнения (19) можно переписать в виде, не содержащем выделенного направления (например, вдоль оси Ox):

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\dot{x}}{c^2} \right) &= - \frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial x}, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\dot{y}}{c^2} \right) &= - \frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial y}, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\dot{z}}{c^2} \right) &= - \frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial z}. \end{aligned} \quad (20)$$

Эти уравнения Эйнштейн и принимает за уравнения движения материальной точки в произвольных статических полях.

Умножение уравнений (20) соответственно на \dot{x}/c^2 , \dot{y}/c^2 , \dot{z}/c^2 , последующее их сложение и интегрирование полученного выражения приводит к интегралу энергии:

$$\frac{c}{\sqrt{1 - q^2/c^2}} = \text{const}, \quad (21)$$

где $q = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}$ — скорость материальной точки.

Отождествление выражения (21) с законом сохранения энергии вытекает из сопоставления левой части его с выражением для энергии точки в релятивистской механике (одна и та же зависимость от скорости q). Поэтому выражение $c/\sqrt{1 - q^2/c^2}$ с точностью до множителя, зависящего от самой точки, должно рассматриваться как энергия E этой точки. Указанный множитель, очевидно, равен массе m , которая, так же как и плотность вещества ρ , определяется независимо от потенциала c (см. также (17)). Таким образом, в произвольном статическом поле тяготения

$$E = mc/\sqrt{1 - q^2/c^2}, \quad (22)$$

или в первом приближении

$$E = mc + mq^2/2c.$$

Отметим, что эти выражения для энергии совпадают с соответствующими выражениями, полученными Абрагамом в его первой декабрьской статье (см. формулу (6) и след.).

Уравнения движения (20) с учетом (22) или (21) (например, посредством умножения их на эти выражения) можно представить в форме, близкой к соответствующим уравнениям релятивистской механики:

$$\frac{d}{dt} \left\{ \frac{\dot{x}/c}{\sqrt{1 - q^2/c^2}} \right\} = - \frac{\partial c / \partial x}{\sqrt{1 - q^2/c^2}}. \quad (23)$$

Эти уравнения легко обобщаются на случай, когда действуют, помимо гравитации, другие силы; пусть, например, действует сила K . Тогда уравнения движения приобретают вид

$$\frac{d}{dt} \left\{ \frac{m(\dot{x}/c)}{\sqrt{1 - q^2/c^2}} \right\} = - \frac{m(\partial c/\partial x)}{\sqrt{1 - q^2/c^2}} + K_x. \quad (24)$$

Эти уравнения справедливы, если выполняется закон сохранения энергии

$$Kq = \dot{E}. \quad (25)$$

Эйнштейн показывает, что уравнение (25) согласуется с уравнениями (24). Тем самым, несмотря на несколько непривычную размерность энергии в этой схеме ($E = mc$) и импульса ($p_x = m(\dot{x}/c)/\sqrt{1 - q^2/c^2}$) уравнения движения (24) сохраняют основные динамические соотношения между силой, импульсом, энергией и т. д. При этом уравнения движения (24) и уравнения поля (17) легко согласуются с ньютоновскими, если

$$k = K/c^2,$$

где k — универсальная гравитационная константа, K — обычная постоянная тяготения, фигурирующая в ньютоновской теории. Так, уравнения движения в форме (20) легко переходят для скоростей, малых по сравнению с c , в уравнения

$$\ddot{x} = -c \frac{\partial c}{\partial x} = - \frac{\partial \Phi}{\partial x}, \quad (26)$$

а уравнения поля (17) при отбрасывании некоторых достаточно малых членов, — в уравнение

$$\Delta \Phi = kc^2 \rho, \quad \text{или} \quad \Delta \Phi = K\rho,$$

т. е. в уравнение Пуассона.

Итак, при выводе уравнения произвольных статических полей и уравнения движения материальной точки Эйнштейн наряду с принципом эквивалентности эффективно использует также принципы соответствия и сохранения энергии. Применение принципа соответствия при этом существенно облегчается именно потому, что Эйнштейн ограничивается изучением статических полей.

Отождествление скорости света с гравитационным потенциалом, казалось, приводило к зависимости физических (измеримых) величин от абсолютных значений потенциала.

Однако эта зависимость оказывается кажущейся. Эйнштейн специально разъясняет это обстоятельство с помощью несложных мысленных экспериментов, основанных на использовании принципа эквивалентности. В результате он приходит к выводу, что скорость света в точках с различными значениями потенциала, изме-

ренная с помощью часов, установленных в этих точках, остается одной и той же. Это связано с тем, что скорость хода часов пропорциональна потенциалу точки, в которой они находятся, или, другими словами, скорости света в этой точке. Точно так же оказывается, что и другие локально измеренные физические величины пропорциональны скорости света, локальные измерения которой в точках с различными значениями гравитационного потенциала дают одно и то же значение.

Влияние гравитации на другие физические процессы. В следующей статье, поступившей в редакцию «Annalen der Physik» 23 марта 1912 г. [247], Эйнштейн продолжил развитие своей теории статического гравитационного поля, главным образом, в двух направлениях. Во-первых, он попытался более строгим образом учесть влияние статического гравитационного поля на электромагнитные процессы, а также наметить подход к решению аналогичной задачи для тепловых процессов. Впрочем, основным эвристическим средством при этом по-прежнему оставался принцип эквивалентности.

Во-вторых, и это для нас наиболее существенно, Эйнштейн модифицирует уравнения статического поля тяготения, убедившись, что уравнения поля в форме (17) вступают в противоречие с выражением для силы тяготения, действующей на материальную точку:

$$F = -\rho \operatorname{grad} c, \quad (27)$$

или с законом равенства действия и противодействия (другими словами, законом сохранения импульса). В сущности, он приходит к новой теории статического поля, в которой уравнения поля согласуются с законом равенства действия и противодействия и естественным выражением для силы (27), но не удовлетворяют строго принципу эквивалентности. В результате, теория подрывала-собственные основания. Столь серьезные трудности и противоречия, возникающие уже в статическом случае, наводили на мысль об ошибочности каких-то исходных положений теории.

Вместе с тем, анализ этих статей Эйнштейна показывает формирование некоторых важных предпосылок, подготовивших переход к тензорной теории тяготения. Существенной при этом оказалась дискуссия Эйнштейна с Абрагамом, которую мы рассмотрим в конце этой главы.

Первая часть мартовской работы Эйнштейна не затрагивает вопроса об уравнениях гравитационного поля и в значительной мере примыкает к предыдущей его статье. Здесь принцип эквивалентности в сочетании с тщательным обсуждением операционально-измерительной стороны вопроса используется для вывода уравнений Максвелла и основных электродинамических соотношений в присутствии статических полей тяготения.

Эйнштейн в соответствии с эвристикой принципа эквивалентности ищет форму уравнений Максвелла в равноускоренной системе отсчета. В результате он получает несколько видоизменен-

ные уравнения электромагнитного поля:

$$\rho \mathbf{v} + \partial \mathbf{E} / \partial t = \text{rot} (c \mathbf{H}),$$

$$0 = \text{div} \mathbf{H},$$

(28)

$$\partial \mathbf{H} / \partial t = - \text{rot} (c \mathbf{E}),$$

$$\rho = \text{div} \mathbf{E},$$

отличающиеся от обычных уравнений Максвелла наличием множителя c в выражениях, стоящих под знаком ротора. Замстим, что на конечном этапе рассуждений Эйнштейн заменяет постоянное ускорение системы \mathbf{g} выражением

$$\mathbf{g} = (1/c) \text{grad } c, \quad (29)$$

которое является естественным обобщением простого соотношения

$$|\mathbf{g}| = a/c = 1/c (dc/dx),$$

вытекающего из преобразований

$$\xi = x + (ac/2)t^2, \quad a > 0, \quad (30)$$

$$\eta = y, \quad \zeta = z, \quad \tau = ct,$$

где $c = c_0 + ax$.

Здесь преобразования (30) связывают координаты неускоренной системы $\Sigma(\xi, \eta, \zeta, \tau)$ с координатами равноускоренной системы $K(x, y, z, t)$. Использование соотношения (29) — это переход от класса однородных полей к произвольным статическим полям, аналогичный тому, который Эйнштейн сделал при выводе уравнений движения, переходя от формулы (19) к формуле (20). Таким образом, уравнения (28) он понимал «как основные электромагнитные уравнения в статическом поле тяжести» [247, с. 206].

В следующем параграфе обсуждаются некоторые физические следствия уравнений (28). В частности, с помощью мысленных экспериментов с «карманными измерительными приборами» получают модифицированные выражения для закона Кулона, плотности энергии электромагнитного поля, плотности импульса поля и т. д.:

$$|\mathbf{F}| = c \frac{qq^1}{4\pi r^2}, \quad \epsilon = \frac{c}{2} (\mathbf{E}^2 + \mathbf{H}^2),$$

$$p_x = \frac{\partial X_x}{\partial x} + \frac{\partial X_y}{\partial y} + \frac{\partial X_z}{\partial z} - 1/2 (\mathbf{E}^2 + \mathbf{H}^2) \frac{\partial c}{\partial x}, \quad (31)$$

где $\begin{vmatrix} X_x & X_y & X_z \\ Y_x & Y_y & Y_z \\ Z_x & Z_y & Z_z \end{vmatrix}$ — тензор максвелловских натяжений.

«Вообще прилагательным «карманным» (введенным Эренфестом.— В. В.), — замечает Эйнштейн, — будут обозначаться такие

физические устройства, которые можно мысленно располагать в областях с различными гравитационными потенциалами и показаниям которых можно доверять в областях со сколь угодно большим c [там же].

Эйнштейн не останавливается в этой статье на выводе формулы для отклонения лучей света в гравитационном поле, ссылаясь на работу 1911 г. Влияние же электромагнитного поля на гравитацию, с его точки зрения, сводится к вкладу массы электромагнитного поля, отвечающей плотности его энергии. При этом, из-за нестатического характера электромагнитного поля вклад последнего в гравитацию «может так изменить гравитационное поле, что последнее перестанет быть статическим» [там же]. Уравнения же (31), как отметил Эйнштейн «не позволяют вычислить влияние электромагнитного поля на статическое гравитационное поле (c)» [там же]. Они описывают только влияние статической гравитации на электромагнитное поле, но не обратное воздействие.

В духе мысленного эксперимента Эйнштейн рассматривает далее круговой процесс получения неким телом с «карманной» температурой T^* из теплового резервуара W_1 «карманного» количества тепла Q^* , последующего перемещения этого тела к резервуару W_2 (эти резервуары находятся в точках с различными значениями потенциала, или скорости света, c_1 и c_2), передачи Q^* от тела резервуару W_2 при «карманной» температуре T^* и, наконец, возвращение тела к резервуару W_1 . Это рассмотрение приводит его к следующему выводу: «...Если два тепловых резервуара имеют одинаковую температуру, измеренную «карманным» термометром, то их истинные (термодинамические) (т. е. определяемые с помощью цикла Карно.— В. В.) температуры относятся как скорости света в соответствующих областях» [247, с. 209]. Таким образом, истинное количество теплоты и температура в точке с потенциалом c связаны с соответствующими «карманными» величинами так:

$$Q = cQ^*, \quad T = cT^*, \quad (32)$$

откуда следует, что энтропия характеризует состояние самого тела и не зависит от гравитационного потенциала.

Обсуждая влияние статического гравитационного поля на электромагнитные и тепловые процессы, Эйнштейн стремился глубже осмыслить физические следствия своей «промежуточной» теории, с тем чтобы преодолеть, главным образом, физические трудности, связанные с необходимостью распространения принципа эквивалентности на произвольные гравитационные поля.

Вторая «статическая теория» Эйнштейна

В последнем же параграфе обсуждаемой статьи Эйнштейн отмечает дополнительные трудности. Он обнаруживает серьезное внутреннее противоречие своей теории: несогласованность выдвинутых им уравнений гравитационного поля с уравнениями

движения. И чтобы устранить это противоречие, он модифицирует уравнения поля. Модификация эта имела, казалось, глубокое физическое основание, но, как подчеркнул сам Эйнштейн, приводила к нарушению строгой справедливости принципа эквивалентности, который оставался верным только для очень слабых полей.

Рассмотрим более подробно эйнштейновскую критику уравнений гравитационного поля (17), обсуждение некоторых других отвергнутых им возможностей и, наконец, принятые им новые уравнения поля. Эйнштейн вычисляет $\int f d\tau$, где

$$f = -\sigma \text{ grad } c \quad (27a)$$

— сила, действующая на массу σ , отнесенную к единице объема. Интегрирование производится по всему пространству в предположении, что скорость света c на бесконечности постоянна. Согласно закону сохранения импульса для такой системы, или закону равенства действия и противодействия

$$\int f d\tau = 0. \quad (33)$$

Использование формулы (27a) и уравнений поля (17) при вычислении интеграла (33) дает выражение:

$$\int f d\tau = - \int \sigma \text{ grad } c d\tau = - \frac{1}{k} \int (\Delta c/c) \text{ grad } c d\tau, \quad (33a)$$

которое, как это можно легко показать с помощью интегрирования по частям, в общем случае не обращается в нуль. «Таким образом,— заключает Эйнштейн,— мы пришли к довольно рискованному результату, который может вызвать сомнения в справедливости всей развитой здесь теории. Этот результат, очевидно, свидетельствует о глубоком пробеле в основах наших исследований...» [247, с. 211].

Чтобы устранить этот пробел и вместе с ним расхождение теории с фундаментальными принципами физики, Эйнштейн рассматривает два возможных выхода из положения. Во-первых, рассуждает Эйнштейн, может быть, дело в не вполне корректном понимании равенства инертной и гравитационной масс. Если рассмотреть помещенный в статическое гравитационное поле лишенный массы ящик с отражающими стенками, заполненный излучением или движущимися во всех направлениях материальными точками, то, возможно, интеграл (33) мог бы обратиться в нуль при условии, что стенкам ящика, подверженным напряжениям, приписать тяжелую массу, так как тогда к силам, с которыми поле тяготения действует на материю, добавятся силы, с которыми оно действует на эти стенки. Но как раз это предположение приводит к нарушению равенства инертной и тяжелой масс, как показывает анализ мысленного эксперимента с ящиком. Таким образом, этот путь, вообще мало конструктивный, с самого начала вступает в противоречие с равенством

инертной и гравитационной масс и, значит, с принципом эквивалентности.

Во-вторых, поскольку выражение (27а) «с необходимостью вытекает из наших уравнений движения материальной точки ...естественно приходится сомневаться в справедливости этих уравнений» [247, с. 212].

Принцип соответствия с СТО требует, чтобы выражение для импульса в теории статического поля отличалось от обычного релятивистского

$$p_x = mx/\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

только некоторым множителем, являющимся функцией s . Соображения размерности подсказывают, что эта функция должна быть степенной (c^α). Тогда уравнения движения

$$\frac{d}{dt} \left\{ \frac{mxc^\alpha}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right\} = K_{xs} + K_{xa},$$

где K_{xa} — x -компонента гравитационной силы, а K_{xs} — x -компонента равнодействующей негравитационных сил. Далее, каково может быть в общем случае выражение для K_s ? Из предыдущих соображений, принципа соответствия и соображений размерности Эйнштейн приходит к выражению:

$$K_s = - \frac{m(\text{grad } c)c^\beta}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \text{const.}$$

«Подставив это выражение для K_s в уравнения движения, можно показать, — завершает рассуждение Эйнштейн, — что выражение $K_{xx}\ddot{x} + K_{yy}\ddot{y} + K_{zz}\ddot{z}$ может быть производной по времени (а этого требует закон сохранения энергии в форме (25).— В. В.) только в том случае, если постоянным α и β придать значения, при которых получаются уравнения движения, указанные в нашей предыдущей работе ($\alpha = -1$, $\beta = 0$.— В. В.). Следовательно, нужно либо останавливаться как на этом, так и на получающемся отсюда выражении (4) (здесь (27а).— В. В.), либо вообще отказаться от всей теории (определения гравитационного поля посредством s)» [247, с. 213].

Таким образом, Эйнштейн приходит к необходимости замены уравнений (16) и (17) другими, для которых выражение для силы (27а) согласуется с законом равенства действия и противодействия. Поскольку уравнения (16) и (17) были неразрывно связаны с принципом эквивалентности, то их замена в общем означала выход за рамки этого принципа, который, по-видимому, можно было сохранить только для бесконечно слабых полей. Это был шаг, на который, как заметил Эйнштейн, «тяжело решиться, так как с ним мы покидаем область справедливости принципа эквивалентности» [247, с. 213]. Вместе с тем, он полагал, что выведенные ранее уравнения движения и уравнения электромагнитного поля останутся в силе, так как их вывод свя-

зан с применением «равноускоренных преобразований» (30) к бесконечно малым областям пространства. Можно было бы, согласно Эйнштейну, использовать и более общие преобразования, заменив a в преобразованиях (30) на dc/dx .

Чем же должен был определиться выбор более удовлетворительных уравнений поля при отсутствии группы инвариантности и нарушении строгой справедливости принципа эквивалентности? Оставляя в силе предыдущие аргументы в пользу уравнений (17), Эйнштейн стремится модифицировать их так, чтобы удовлетворить принципу сохранения импульса, или принципу равенства действия и противодействия:

$$\int \bar{f} d\tau = -\frac{1}{k} \int \frac{\Delta c}{c} \text{grad } c d\tau = 0,$$

где k — универсальная гравитационная постоянная. Доказательство необращения в нуль этого интеграла в предыдущей теории, основанной на уравнениях поля (17), заключалось в сведении интеграла $\int (\Delta c/c) \text{grad } c d\tau$ к интегралу $-1/2 \int (1/c^2) \times (\text{grad } c)^2 d\tau$, который заведомо не может быть равен 0. Действительно,

$$\begin{aligned} \int \Delta c \frac{\nabla c}{c} d\tau &= \int \nabla (\nabla c) \frac{\nabla c}{c} d\tau = \frac{(\nabla c)^2}{c} \Big|_{-\infty}^{+\infty} - \int \nabla c \nabla \left(\frac{\nabla c}{c} \right) d\tau = \\ &= - \int \frac{1}{c^2} (\nabla c)^2 d\tau - \int \nabla^2 c \frac{\nabla c}{c} d\tau, \end{aligned}$$

откуда

$$\int \Delta c \frac{\nabla c}{c} d\tau = -\frac{1}{2} \int \frac{1}{c^2} (\nabla c)^2 d\tau = -\frac{1}{2} \int \frac{1}{c^2} (\text{grad } c)^2 d\tau. \quad (34)$$

Следовательно, интеграл $\int \bar{f} d\tau$ должен содержать член $1/2k \int 1/c^2 (\text{grad } c)^2 d\tau$, который и приведет к обращению в нуль этого интеграла. Таким образом, вместо σ в (33а) следует поставить не $\sigma = \Delta c/kc$, вытекающее из уравнения (17) а

$$\sigma = \Delta c/kc - \frac{1}{k} \frac{(\text{grad } c)^2}{c^2},$$

что и приведет к необходимому аннулированию интеграла $\int \bar{f} d\tau$. Но последнее означает замену полевых уравнений (17) уравнениями:

$$c\Delta c - 1/2 (\text{grad } c)^2 = kc^2\sigma, \quad (35)$$

которое можно привести к виду

$$\Delta(\sqrt{c}) = k/2\sqrt{c}\sigma. \quad (36)$$

Дополнительными аргументами в пользу уравнений гравитационного поля в форме (35) — (36) оказались, во-первых, возможность естественной физической интерпретации добавочного члена, содержащего $(\text{grad } c)^2$, и, во-вторых, согласованность

этих уравнений с законом сохранения энергии. Действительно, уравнения (35) легко представить в форме

$$\Delta c = k \left\{ c\sigma + \frac{1}{2k} \frac{\text{grad}^2 c}{c} \right\}. \quad (37)$$

Второй член в фигурных скобках естественно отождествить с плотностью энергии гравитационного поля, которая складывается с плотностью энергии «материи», определяя распределение гравитационного потенциала в пространстве. Эйнштейн в связи с этим замечает: «Если любая плотность энергии (σc) дает некоторую ... дивергенцию силовых линий гравитации, то это должно сохраняться также и для плотности энергии самой гравитации» [247, с. 214]. Тем самым, здесь впервые реализуется идея нелинейности уравнений гравитационного поля, которая сохранила свое значение и в дальнейшем. Наконец, уравнения (35), в сочетании с выражением (27а) для силы, действующей на весомую материю в единице объема σ , хорошо согласуются с законом сохранения энергии, что и показывает Эйнштейн в конце обсуждаемой статьи.

Согласование новых уравнений поля с законами сохранения энергии и импульса, учет вклада плотности энергии гравитационного поля (наряду с плотностью энергии «материи») в распределение поля в пространстве — таковы были достоинства второй эйнштейновской теории статического поля тяготения. За это приходилось платить немалую цену — принцип эквивалентности, стимулировавший развитие всей теории, сохранял свою справедливость лишь для бесконечно слабых полей. Далее, эта теория была всего только теорией статических полей. С отказом же от постоянства скорости света (и значит, требования лоренц-ковариантности) и принципа эквивалентности исчезали главные ориентиры, которые могли бы указать путь к распространению теории на произвольные поля тяготения.

Значение «статических теорий» Эйнштейна в подготовке ОТО

Наряду с уже рассмотренными идеями, оказавшимися в дальнейшем развитии теории тяготения особенно существенными, в работах Эйнштейна по теории статического поля можно найти еще некоторые очень важные в этом отношении моменты.

Во-первых, это идея возможного изменения геометрии в гравитационных полях. В § 1 февральской статьи при обсуждении пространства и времени в поле ускорения Эйнштейн подчеркивает: «Пространственные измерения в системе K (равноускоренной системе отсчета.— $B. B.$) осуществляются посредством масштабов, которые при их сравнении друг с другом в состоянии покоя и в определенном месте системы K обладают одинаковыми длинами. Все геометрические свойства, равно как и соотношения между координатами x, y, z и другими длинами, должны исследоваться такими масштабами. Эти правила не являются

само собой разумеющимися; они содержат в себе некоторые физические предположения, которые иногда могут оказаться и неправильными. Так, например, весьма вероятно, что они несправедливы в равномерно вращающейся системе, в которой вследствие лоренцова сокращения отношение длины окружности к диаметру при применении нашего определения длины должно отличаться от π [246, с. 190]. Таким образом, мысленный эксперимент с «диском Эренфеста» наводит на мысль о возможности изменения евклидовых соотношений в ускоренных системах отсчета, а в соответствии с принципом эквивалентности, и в гравитационных полях. Но время для ее реализации и конкретизации этой идеи еще не пришло. Необходимо было всерьез принять концепцию четырехмерного пространства — времени, нужно было показать, как принцип эквивалентности при распространении на произвольные поля тяготения приводит к общему принципу относительности, римановой геометрии и тензорным потенциалам тяготения и т. д.

Однако (и это — во-вторых), в корректурном дополнении к мартовской статье Эйнштейн указывает на очень важное звено в переходе от статики к произвольным полям, от скалярных потенциалов к тензорным, от принципа эквивалентности к принципу общей ковариантности. В формулировке его статических теорий это «звено» не играет роли, но оно содержит недвусмысленное указание на то, как искать переход к произвольным полям.

Эйнштейн замечает, что уравнения движения материальной точки в гравитационном поле (34) можно сформулировать в форме уравнений Лагранжа—Эйлера, если взять в качестве лагранжевой функции

$$L = -m\sqrt{c^2 - q^2}, \quad (38)$$

где q — скорость материальной точки.

В отсутствие внешних сил вариационный принцип

$$\delta \int L dt = 0$$

сводится к известной четырехмерной формулировке принципа инерции релятивистской механики:

$$\delta \int \sqrt{c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2} dt = 0. \quad (38a)$$

Однако при наличии статических гравитационных полей скорость света c является функцией x, y, z

$$c = c(x, y, z).$$

В случае произвольных полей $c = c(x, y, z, t)$ и уравнение (38a) «позволяет предположить, как должны быть построены уравнения движения материальной точки в динамическом (произвольном, зависящем, в частности, и от времени.— В. В.) гравитационном поле» [247, с. 216]. Итак, начиная с весны 1912 г. Эйнштейн, по-видимому, постепенно меняет свое отношение к

четырёхмерной формулировке СТО. В сочетании с другими идеями и принципами (принципы соответствия, эквивалентности и т. д.) она приобретает важное эвристическое значение. Новое звучание в этой связи приобретали и смутные еще идеи о возможной неевклидовости пространства.

Действительно, метрика четырёхмерного пространства—времени:

$$ds^2 = c^2(x, y, z) dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2, \quad (39)$$

которую Эйнштейн выписал, фактически, в корректурном дополнении к мартовской статье, уже не была евклидовой (или, точнее, псевдоевклидовой). Соответствующее пространство—время (при произвольной зависимости $c = c(x, y, z)$) становилось искривленным [403]. Тензор кривизны этого пространства был отличен от нуля:

$$R_{4\alpha\alpha}^{\beta} = -c \frac{\partial^2 c}{\partial x_{\beta} \partial x_{\alpha}} \quad (\alpha, \beta = 1, 2, 3). \quad (40)$$

Связанный же с ним тензор Риччи также не был равен нулю:

$$R_{\alpha\beta} = \frac{1}{c} \frac{\partial^2 c}{\partial x_{\alpha} \partial x_{\beta}}, \quad R_{\alpha\alpha} = 0, \quad R_{44} = -c \Delta c. \quad (41)$$

Таким образом, переформулировка теории статических полей на языке четырёхмерной дифференциальной геометрии могла бы привести к концепции искривленного четырёхмерного пространства—времени, использованию римановой геометрии и, вместе с этим, подсказать математическое оформление идеи обобщенной относительности. Все это, по-видимому, облегчило бы переход к общековариантной тензорной теории тяготения.

Но весной 1912 г. Эйнштейн был еще далек от этого круга идей. Определенные достоинства его второй теории: возможность ее согласования с принципами соответствия, сохранения энергии—импульса и т. д.—создавали надежды на успешное решение проблемы. Заметим, что эмпирических аргументов против этой теории в 1912 г. не было. Отклонение света в гравитационном поле, которое предсказывала она, совпадало с результатом, полученным на основе принципа эквивалентности, т. е. со значением, равным половине общерелятивистского, подтвержденного экспериментально лишь в 1919 г.

Дискуссия между Эйнштейном и Абрагамом. С начала лета обостряется дискуссия между Эйнштейном и Абрагамом, возникающая, фактически, в рассмотренных выше их работах. Летом и осенью 1912 г. Абрагам разрабатывает новый вариант своей теории, а Нордстрем выдвигает лоренц-ковариантную полевую теорию тяготения.

Здесь мы рассмотрим дискуссию между Абрагамом и Эйнштейном, состоявшуюся летом 1912 г. Абрагам в ответ на критические замечания, содержащиеся, главным образом, в фев-

ральной статье Эйнштейна, и по поводу его теории статического поля написал небольшую статью, которую послал в редакцию «Annalen der Physik» в начале июля [311]. Сам он или редакция журнала направили эту статью Эйнштейну, который сразу же написал ответную статью, поступившую в редакцию 4 июля [248]. Обе статьи назывались «Относительность и гравитация» и были напечатаны в одном номере. В августе Абрагам написал ответ на июльскую статью Эйнштейна [312], который, в свою очередь, ограничился коротким ответом, поступившим в редакцию «Annalen der Physik» 2 сентября: «Поскольку каждый из нас изложил свою точку зрения со всей необходимой подробностью, я не считаю нужным снова отвечать на указанную статью Абрагама. Я прошу читателя только о том, чтобы он не принял молчание за согласие» [248, с. 222]. Отголоски этой дискуссии можно встретить и в последующих статьях Эйнштейна и Абрагама, опубликованных в 1913—1914 гг., и в переписке Эйнштейна, относящейся к этому времени.

Центральный пункт критики Абрагама был связан с его отрицательным отношением к СТО и релятивистской программе в целом. Он считал непоследовательностью стремление Эйнштейна остаться на позициях релятивистской программы при разработке им теории тяготения, так как тот сам же установил на основе принципа эквивалентности переменность скорости света и пришел при этом к выводу о неизбежности выхода за пределы класса инерциальных систем отсчета. Он полагал, что Эйнштейн в своих исследованиях по гравитации подорвал основы СТО, против которой высказывался и ранее. «Каждому здравомыслящему человеку... ясно, что эта теория (СТО.— В. В.) не сможет привести к полной картине мира, пока она не будет в состоянии включить в себя гравитацию — эту наиболее важную, ввиду ее универсальности, силу природы. Крушение нацеленных на это усилий, — подчеркивал Абрагам, — привело к кризису теории относительности» [311, с. 1056]. Более того, ему казалось, что и сам Эйнштейн пришел к такому же выводу: «Те, кто, как автор, неустанно предостерегали против сирноподобного пения приверженцев этой теории, с удовлетворением узнают, что творец теории относительности теперь сам убедился в ее несостоятельности» [там же].

Абрагам считал, что крах СТО не случайно возник при изучении гравитации. По его мнению, гравитация позволяет физически ввести абсолютную систему отсчета: ее можно связать со статическим гравитационным полем. Именно та система отсчета может быть названа абсолютной, в которой внешнее поле тяготения может рассматриваться как статическое. Центробежные, кориолисовы и, возможно, другие силы инерции, обнаруживающие существование такой абсолютной системы, связываются, таким образом, с гравитацией.

Эйнштейн [248] разъясняет свое понимание СТО и ее пределов применимости, а также набрасывает дальнейшую про-

грамму построения релятивистской теории тяготения. Он защищает релятивистскую концепцию гравитации, вопреки кажущемуся неизбежным краху СТО при анализе проблемы тяготения. Во-первых, он дает более тонкую и эмпирически обоснованную формулировку принципа относительности, которая, в общем, остается справедливой и в случае гравитации: «Пусть некоторая система Σ изолирована от всех других физических систем... и отнесена к такой координатной системе K , что законы, которым подчиняются пространственно-временные изменения Σ , по возможности просты; тогда имеется бесконечно много координатных систем, относительно которых эти законы остаются неизменными; к этим системам принадлежат все те координатные системы, которые движутся относительно K равномерно и прямолинейно» [248, с. 218]. Если совокупность всех остальных физических систем («остаточную систему», как ее называет Эйнштейн) обозначить U , то оказывается, что эта система может влиять на процессы в системе Σ . Ход процессов в Σ (например, скорость света) зависит от состояния U (например, от среднего расстояния от Σ отдельных систем, составляющих U). Но это не противоречит той форме принципа относительности, которая приведена выше. Принятие этой формулировки или эквивалентной ей («относительная скорость системы отсчета K по отношению к остаточной системе U не входит в физические законы») означает, «что надо отклонить всякую теорию, которая выделяет одну систему отсчета из других, движущихся относительно неё равномерно и прямолинейно систем отсчета» [там же]. В выделении такого рода привилегированной системы отсчета заключалась антирелятивистская позиция Абрагама. Эйнштейн замечает также, что отождествление такой системы отсчета со статическим гравитационным полем физически неосуществимо в общем случае, «ибо невозможно, чтобы такое преобразование (преобразование каждого элемента гравитационного поля посредством преобразования координат и скоростей в статическое поле.— В. В.) одновременно преобразовало подобным образом все элементы динамического гравитационного поля» [248, с. 219].

СТО, как известно, основана не только на принципе относительности, но и на принципе постоянства скорости света, который как раз и нарушается в гравитационных полях. Именно в этом смысле, согласно Эйнштейну, следует понимать ограниченность или недостаточность СТО при изучении явлений тяготения. Принцип же относительности в переформулированном выше виде может быть сохранен и, более того, использован для дальнейшего развития теории. Таким образом, для Эйнштейна ограниченность СТО не означает крушения релятивистской программы, для него — это указание на необходимость ее расширения. И ключ к этому расширению — принцип эквивалентности, релятивистский по своему существу: «Задачей ближайшего будущего должно быть создание релятивистской схемы, в которой най-

дет свое выражение эквивалентность инертной и тяжелой масс» [248, с. 220].

Вопрос о тензорной размерности гравитационного потенциала. В статье имеется один замечательный абзац, не связанный непосредственно с обсуждаемой дискуссией, в котором Эйнштейн аргументирует неудовлетворительность скалярной и векторной релятивистских (в смысле СТО) теорий тяготения с позиций принципа эквивалентности: «Если поле тяжести может быть истолковано в смысле нашей теперешней теории относительности, то это может быть сделано, вероятно, только двумя способами. Вектор гравитационного поля можно представить либо как 4-вектор, либо как 6-вектор. Для каждого из этих двух случаев получаются формулы преобразования для пересхода к равномерно и прямолинейно движущейся системе отсчета. С помощью этих формул преобразования и формул преобразования для поперечных сил удастся найти силы, действующие в обоих случаях на материальную точку, движущуюся в статическом поле тяжести. Однако при этом получаются результаты, которые противоречат указанным выше следствиям из положения о тяжелой массе энергии. Таким образом, вектор гравитационного поля, по-видимому, не может быть введен без противоречий в схему теперешней теории относительности» [там же]. По-видимому, Эйнштейн проанализировал соответствующие варианты лоренц-ковариантных гравитационных теорий с точки зрения принципа эквивалентности и пришел к выводу об их несовместимости с этим принципом. Можно предположить, что его рассуждения при этом были вполне аналогичны тем, которые содержатся в книге Я. Б. Зельдовича и И. Д. Новикова [66, с. 88—93]. Вполне в духе Эйнштейна указанные авторы рассматривают несложный мысленный эксперимент: они вычисляют суммарный гравитационный потенциал заключенных в сферический сосуд частиц, движущихся там по всевозможным направлениям. Если предположить, что все частицы движутся с одинаковыми постоянными скоростями v , все направления движения равновероятны, то суммарный потенциал φ окажется в зависимости от характера его размерности —

$$\text{для скаляра: } \varphi = n\varphi_1 \sqrt{1 - v^2/c^2}; \quad (42)$$

$$\text{для четвертой компоненты четырехвектора: } \varphi = n\varphi_1; \quad (43)$$

для 16-й компоненты тензора φ_{ik} ($\varphi_{kk} = \varphi$):

$$\varphi = n\varphi_1 / \sqrt{1 - v^2/c^2}, \quad (44)$$

где $\varphi_1 = a/r$ — потенциал одной неподвижной частицы, n — число частиц в сосуде. Выражения (42)—(44) получаются в результате применения преобразований Лоренца к выражению для системы покоящихся частиц. Нетрудно видеть, что выражения (42) и (43), соответствующие четырех- и шестимерному векторам (т. е. антисимметричному тензору второго ранга) гравитационного поля, не согласуются с принципом эквивалентности,

так как гравитационное воздействие n движущихся частиц на удаленную пробную массу, находящуюся в покое, в этих случаях не будет пропорционально сумме масс n -частиц ($\Sigma m = nm_0/\sqrt{1-v^2/c^2}$). Эта пропорциональность будет соблюдаться лишь в случае (44). Но такая возможность в 1912 г. еще не рассматривалась Эйнштейном. Согласно СТО он считает только две первых возможности: скалярного и векторного потенциала. Особенно наглядной была неудовлетворительность векторной теории, формально совпадающей с теорией электромагнитного поля. Согласно СТО и принципу эквивалентности, движение частиц должно увеличивать создаваемое ими поле; но движение электрических зарядов не дает соответствующего вклада в электрическое поле. Векторная теория также должна приводить к отталкиванию частиц и притяжению частиц и античастиц. Но гравитация такими свойствами не обладает. Несколь-ко менее очевидной была ситуация со скалярным потенциалом. Действительно, Нордстрем вскоре нашел некоторые возможности для построения скалярной лоренц-ковариантной теории гравитационного поля, допустив зависимость массы частиц от потенциала.

Продолжение дискуссии. Выводы. Теории Абрагама и Эйнштейна тоже использовали понятие скалярного потенциала, но обе при этом выходили за рамки СТО. И если Абрагам в этом выходе видел возврат к классике с характерными для нее понятиями абсолютной системы отсчета, эфира и т. д., то Эйнштейн связывал указанный выход с необходимостью расширения СТО и переходом к некоторой более общей теории относительности: «...Принцип эквивалентности открывает нам интересную перспективу — уравнения теории относительности, охватывающей гравитацию, должны быть инвариантны также относительно преобразований ускорения (и вращения)» [248, с. 221]. Именно в этом расширении релятивистской концепции Эйнштейн видел возможность последовательного проведения идеи тождества гравитации и инерции, проявляющегося в теории статического поля в том, что это поле оказывается «физически тождественным ускорению системы отсчета» [там же]. Впрочем, он тут же указывает огромные трудности, возникающие на этом пути. Во-первых, «необходимо признать, что эту интерпретацию (кинематическую интерпретацию тяготения.— В. В.) мы смогли провести непротиворечивым образом только для бесконечно малых областей пространства и что не можем указать никакого удовлетворительного объяснения этого обстоятельства» [248, с. 220], и неясно, каким образом эта замечательная идея может быть распространена на произвольные поля тяготения. Во-вторых, «уже из рассмотренного до сих пор очень частного случая тяготения покоящихся масс видно, что пространственно-временные координаты теряют свой простой физический смысл и нельзя предвидеть, какую форму могут иметь общие уравнения пространственно-временных преобразований» [248, с. 221].

В заключении Эйнштейн подчеркивает основное противоречие теории Абрагама: с одной стороны, Абрагам вообще отвергает принцип относительности («Не может быть и речи о каком-либо виде относительности, т. е. о соответствии двух систем, которое можно было бы выразить соотношениями между их пространственно-временными параметрами x, y, z, t и x', y', z', t' ») [там же], с другой, — он использует четырехмерный подход, характерный для СТО. «...При отказе от принципа относительности использованная Абрагамом в качестве путеводной нити релятивистская схема теряет всякую убедительность» [там же]. Наконец, Эйнштейн указал на то, что выражения Абрагама для силы тяжести, действующей на покоящуюся материальную точку ($-mc \text{ grad } c$), и для плотности энергии в статическом поле [$(c^2/\gamma) \text{ grad}^2 c$] плохо согласуются с выражением для энергии материальной точки в поле тяготения:

$$E = mc/\sqrt{1 - q^2/c^2},$$

которое совпадает с эйнштейновским [там же]. Соответствующие выражения для силы и плотности энергии, принятые в его теории статического поля таковы:

$$F = -m \text{ grad } c, \quad \varepsilon = \frac{1}{2k} \frac{\text{grad}^2 c}{c}.$$

В статье [312] Абрагам еще раз подчеркнул свою принципиально антирелятивистскую позицию, настаивая на определенном кризисе эйнштейновской программы. Действительно, СТО и основанная на ней программа, бесспорно, были подорваны, а обобщенный принцип относительности не был сформулирован (сам Эйнштейн в общем-то соглашался с этим: «...нельзя предвидеть, какую форму могут иметь общие уравнения пространственно-временных преобразований» [248, с. 221]). По мнению Абрагама, Эйнштейн, не признавая краха релятивистской программы, «надеется на появление на горизонте фата-морганы некоторого нового определения пространства — времени, охватывающего гравитацию... требует кредита для этой «завтрашней» теории относительности...» [312, с. 447]. В рассуждениях Эйнштейна, связанных с отстаиванием принципа относительности в теории тяготения, он усмотрел неудачную попытку спасти концепцию относительности. Формулировка этого принципа с помощью понятия «изолированной» системы и утверждение о справедливости СТО в предельном случае пространственно-временных областей с постоянным гравитационным потенциалом, как заметил Абрагам, весьма уязвимы, поскольку никакую физическую систему нельзя изолировать от сил тяготения, а случай постоянно-го потенциала соответствует отсутствию силы тяжести. Он также видел, что контуры возможной обобщенной теории относительности, на мысль о которой наводил принцип эквивалентности, не ясны и самому Эйнштейну.

Что же касается принципа эквивалентности, то Абрагам, признавая фундаментальность равенства инертной и гравитационной масс, гравитационные свойства энергии, отклонение света в гравитационном поле, полученные Эйнштейном на основе этого принципа, вместе с тем не принимал релятивистское истолкование равенства $m_r = m_{гв}$, составляющее ядро принципа эквивалентности. Конечно, Абрагам очень чутко улавливал наиболее уязвимые места рассуждений Эйнштейна и использовал их для борьбы с релятивистской программой. Его остроты, порою слишком эмоциональные, замечания служили для Эйнштейна хорошим раздражителем. Эйнштейновские теории тяготения 1911—1912 гг. еще не отличались ясностью, логической строгостью, оставляли впечатление незаконченности, исполноты, непоследовательности, и в общем Эйнштейн понимал это. Абрагаму же, как подчеркнул Дж. Мехра [458, с. 98], были в высшей степени присущи стремление к ясности, логической строгости и т. д. М. Борн и М. Лауз [325, с. 53], хорошо знавшие Абрагама, писали о нем: «Ясность была сущностью его природы, как в области разума, так и в эмоциональной сфере. К ней он стремился во всех своих работах, и мы думаем, что это было более характерно для него, чем открытие нового в физике. Везде, где он находил ее недостаточной, он выступал с резкой, даже чрезмерной критикой» (цит. по: [458, с. 98]).

Дискуссия и взаимное влияние работ Эйнштейна и Абрагама стимулировали исследование каждого из них. Исходным пунктом для Абрагама была установленная Эйнштейном зависимость скорости света от потенциала $c = c(\varphi)$. Работы Абрагама, безусловно, подтолкнули Эйнштейна и стимулировали распространение принципа эквивалентности на статические неоднородные поля. Острая дискуссия между ними, возникшая в основном в связи с полярным их отношением к принципу относительности и релятивистской программе, способствовала напряженным поискам решения проблемы с обеих сторон, а также углублению и уточнению их позиций. «Дискуссия между Эйнштейном и Абрагамом охватывает вкратце все предложенные определения принципа относительности (а также различные интерпретации принципа эквивалентности). В особенности Абрагам во многих отношениях предвосхитил точку зрения Фока», — отметил в своей недавно вышедшей книге Г. Ю. Тредер [200, с. 33]. В последнем замечании имеется в виду упорно отстаиваемая Абрагамом идея существования привилегированной системы отсчета, а также отсутствие физически обоснованного принципа относительности при наличии гравитационного поля. В известной мере это согласуется с точкой зрения В. А. Фока*.

* См., например, его высказывания: «...В случае пространства, хотя и неоднородного в любой конечной области вблизи масс, но переходящего на бесконечности в однородное (евклидово) пространство, существует класс координатных систем, преобразования между которыми допускают физическую адаптацию» [206, с. 34], т. е. существует класс привилегированных систем отсчета.

3. Вторая теория Абрагама

Хотя новая теория Абрагама, как мне кажется, логически правильна, она представляет собой лишь уродливое проявление существующих трудностей.

А. Эйнштейн (1912)

Роль второй теории Эйнштейна. Улучшение теории статического поля, произведенное Эйнштейном в марте 1912 г., не привело к кардинальному решению проблемы. Уравнения поля, в которых роль потенциала, фактически, играла не скорость света c , а \sqrt{c} (уравнения (36)), в отличие от уравнений (17), согласовывались с законом сохранения импульса (или принципом равенства действия и противодействия). Они также допускали разумную интерпретацию плотности энергии гравитационного поля, которая вносила свой вклад в распределение потенциала и свидетельствовала, тем самым, о принципиальной нелинейности этих уравнений.

Но, как сразу же заметил Эйнштейн, такая модификация уравнений уже в статическом случае приводит к существенному ограничению области справедливости принципа эквивалентности, который «можно сохранить только для бесконечно слабых полей» [247, с. 213]. Это ограничение вместе с отказом от требования лоренц-ковариантности лишали развиваемый подход основных эвристических средств на пути к теории произвольных полей тяготения.

В июльской дискуссии с Абрагамом Эйнштейн, по существу, выходит за рамки своей теории, понимая необходимость введения в нее каких-то принципиально новых идей. Во-первых, он подчеркивает, что в окончательной теории потенциал не может быть ни векторным, ни скалярным: «Таким образом, вектор гравитационного поля, по-видимому, не может быть введен без противоречий в схему теперешней теории относительности» [248, с. 220]. Во-вторых, он замечает, что принцип эквивалентности указывает некоторый путь к расширению принципа относительности: «...Принцип эквивалентности открывает нам интересную перспективу — уравнения теории относительности, охватывающей гравитацию, должны быть инвариантны также относительно преобразований ускорения (и вращения)» [248, с. 221], хотя на этом пути встречаются серьезные препятствия, которые также указывает Эйнштейн: «...пространственно-временные ко-

Или: «В общем же случае неоднородного пространства — времени адаптация, а значит, и физическая относительность, как мы уже говорили, невозможна» [206, с. 35]. Фоковское выражение «физическая адаптация» означает, что любое явление можно как бы перенести из одной системы отсчета в другую, другими словами, «адаптировать» его к положению и движению другой системы отсчета [206, с. 8—9].

ординаты теряют свой простой физический смысл и нельзя предвидеть, какую форму могут иметь общие уравнения пространственно-временных преобразований» [там же]. В реплике на статью Абрагама Эйнштейн [248], как будто, возвращается к своей « \sqrt{c} -теории» статического поля, подорванной сделанными им же самим замечаниями. Но эти замечания говорят о том, что Эйнштейн уже летом 1912 г. близко подошел к идеям тензорной общековариантной теории и что возврат к скалярным вариантам был для него уже едва ли возможен.

Мартовская статья Эйнштейна [247] и критические замечания, сделанные им в адрес первой теории Абрагама [248], существенно повлияли на дальнейшую работу Абрагама в области гравитации. 12 июля он послал в редакцию «*Physikalische Zeitschrift*» статью, содержащую новый вариант теории тяготения [313]. В августе 1912 г. Абрагам выступил с докладом на Математическом конгрессе в Кембридже, текст которого совпадал с текстом указанной статьи [313].

Абрагам воспринял идею Эйнштейна о необходимости отождествления гравитационного потенциала с \sqrt{c} . Решающими для него были аргументы, использованные Эйнштейном: «Однако, я убежден в том, что мои уравнения движения материальной точки (уравнения его первой теории.— В. В.) не могут быть согласованы с принципами аналитической механики» [313, с. 794]. Эйнштейн тоже обнаружил расхождение своей первой теории с одним из фундаментальных принципов механики — принципом равенства действия и противодействия — и нашел выход в переходе к « \sqrt{c} -теории». Абрагам же, ограничившись приведенным замечанием, пытается вывести этот переход более строгим, почти аксиоматическим путем и опирается при этом на теорию размерностей. Разумеется, он, как и в первом варианте, решает задачу построения общей теории произвольных полей тяготения (а не только статических, как Эйнштейн), по-прежнему стремясь избежать релятивистской интерпретации принципа эквивалентности и связанных с ней пространственно-временных аспектов проблемы: «Я хотел бы здесь развить новую теорию тяготения, не затрагивая проблему пространства—времени» [313, с. 794]. В остальном вторая теория Абрагама мало отличалась от первой. Она была также полевой теорией, основанной на четырехмерном волновом обобщении уравнения Пуассона для скалярного потенциала. «Гравитационный тензор» в форме (17), описывающий распределение энергии—импульса гравитационного поля, в этой теории сохранял свое значение, так же как и фундаментальная идея Эйнштейна о «пропорциональности тяжести и энергии».

В июльской реплике Эйнштейн, указывая на существенные расхождения между своей теорией и первой теорией Абрагама и на внутренние противоречия последней, замстил, что выражения для силы тяжести, действующей на покоящуюся материаль-

ную точку, у него ($-mg$ grad c) и у Абрагама ($-mc$ grad c) различны, так же, как и выражения плотности энергии в статическом поле тяготения (у Эйнштейна — $(1/2k)(\text{grad}^2 c/c)$, у Абрагама — $(c^2/\gamma)(\text{grad}^2 c)$), хотя выражения для энергии материальной точки $mc\sqrt{1-q^2/c^2}$ у них совпадали.

Во втором варианте Абрагаму удалось показать, что его уравнения поля в статическом случае и выражения для плотности энергии поля и силы тяжести, действующей на материальную точку, совпадают с эйнштейновскими. Таким образом, если оставить в стороне вопросы интерпретации, то вторая теория Абрагама, в основном, могла рассматриваться как обобщение второй теории Эйнштейна на произвольные поля. По-видимому, именно поэтому Эйнштейн считал вторую теорию Абрагама «логически правильной». Но, несмотря на «логическую правильность», новая теория Абрагама (как и его собственная « \sqrt{c} -теория» статического поля) представлялись Эйнштейну уже пройденным этапом. Еще до ознакомления с этой теорией он понял ограниченность и бесперспективность развивавшегося им и Абрагамом скалярного подхода, который не мог разрешить трудностей, связанных с нарушением принципа эквивалентности, с неизвестностью группы инвариантности теории и т. д. Вторая теория Абрагама не вносила ясности в эти принципиальные вопросы. Поэтому Эйнштейн, отмечая «логическую правильность» ее, говорил также, что «она представляет собой лишь уродливое проявление существующих трудностей».

Здесь уместно еще раз напомнить, что Эйнштейн и Абрагам, несмотря на большую общность подходов и развиваемых ими теорий, опирались на полярные научно-исследовательские программы. С лета 1912 года их пути расходятся все больше. Абрагам продолжает старое «скалярное» направление, а Эйнштейн выходит, ведомый релятивистской программой, к совершенно новым возможностям, связанным с геометризованной концепцией гравитации.

Основы и следствия теории Абрагама. Рассмотрим теперь более подробно особенности второй теории Абрагама. Он полагал, что исходит из следующих положений, образующих аксиоматический базис его теории: «Ее (второй теории Абрагама.— В. В.) предпосылки, помимо основного предположения о том, что поле тяготения определяется скоростью света, таковы: справедливость выражения (1a—d) (здесь (7).— В. В.) для гравитационного тензора, принципы механики, т. е. законы сохранения импульса и энергии и уравнения Лагранжа) и, наконец, гипотеза о пропорциональности тяжести и энергии» [313, с. 797]. В действительности, он использовал неявно и другие предположения, например, то, что физические величины, имеющие размерность длины, не зависят от потенциала тяготения при условии, что измерения производятся локальным наблюдателем. Он по-прежнему пользуется языком СТО, не принимая ее релятивистской

потенциала в точку с другим значением потенциала, — обобщенный им впоследствии до постулата относительности гравитационного потенциала, он находит из выражений (45), что энергия имеет размерность $c^{2\alpha}$ *.

Впрочем, Абрагам не называет функцию ω потенциалом, хотя по тому, как она входит в гравитационный тензор, именно её следовало бы отождествить с потенциалом. Он вводит еще одну величину, которую называет гравитационным потенциалом: $\Phi = \Phi(c)$. Энергия покоящейся материальной точки в статическом поле, по Абрагаму, целиком зависит от Φ :

$$E = M\Phi(c), \quad (48)$$

где M — некоторая массовая константа, не зависящая от скорости света и связанная с данной материальной точкой. Таким образом, и Φ имеет размерность $c^{2\alpha}$. Выражение для силы тяжести, действующей на материальную точку,

$$\mathbf{F} = -M \text{grad } \Phi, \quad (49)$$

которое следует из соотношения (48), может быть переписано в виде:

$$\mathbf{F} = -(E/\Phi) \text{grad } \Phi. \quad (50)$$

Предполагая, что формула (50) верна и для движущейся материальной точки, Абрагам приходит к постулату: «Вообще, тяжесть (или сила тяжести.— *B. B.*) системы пропорциональна ее энергии» [313, с. 795]. Это — некоторая разновидность эйнштейновского положения о равенстве инертной и гравитационной масс, связанного с принципом эквивалентности.

Постулат о пропорциональности тяжести и энергии, в сочетании с предположением о лагранжевой структуре уравнений движения материальной точки в поле тяготения с лагранжианом $L = L(v, \Phi)$, позволяет определить значение $\lambda = 1/2$. Это позволяет заключить, что $\Phi \sim c$, но функция ω , определяющая гравитационный тензор, оказывается равной \sqrt{c} . Инертная масса оказывается обратно пропорциональной скорости света:

$$m_0 = \zeta(M/c). \quad (51-57)$$

* Заметим, что постулат относительности потенциала был впоследствии использован Эйнштейном в первом варианте тензорной теории Эйнштейна—Гроссмана в следующем виде: «Наблюдаемые законы природы не должны зависеть от абсолютных значений гравитационного потенциала (или гравитационных потенциалов). Физически это означает следующее: совокупность связей между наблюдаемыми величинами, которую можно найти в некоторой лаборатории, не должна меняться, если всю лабораторию переместить в область с другим гравитационным потенциалом (постоянным в пространстве и времени)» [252, с. 276]. Этот постулат, основанный на принципах относительности и эквивалентности, как заметил Эйнштейн, «...вероятно, нельзя обосновать опытом. Он оправдывается не чем иным, как верой в простоту законов природы...» [там же]. Впоследствии, однако, постулат относительности потенциала не вошел в число основных положений общей теории относительности. Эйнштейн, очевидно, полагал, что он может быть включен в общий принцип относительности (или выведен из него).

Коль скоро функция ω найдена, то из соотношений (46) и (47) непосредственно следует, что в отсутствии материи

$$\square \omega = 0, \quad (58)$$

т. е. обобщенное уравнение Лапласа, которое определяет структуру поля в этом случае.

Теперь, для того, чтобы уравнения поля в присутствии материи с плотностью энергии η , т. е. обобщенные уравнения Пуассона, согласовывались с постулатом о пропорциональности тяжести и энергии, они должны выглядеть так:

$$\square(\sqrt{c}) = 2\eta\alpha/\sqrt{c}, \quad (59)$$

или, если принять $\eta = \mu c$ (μ — плотность массовой константы M):

$$\square(\sqrt{c}) = 2\alpha\mu\sqrt{c}. \quad (59')$$

Действительно, плотность силы тяжести \mathbf{f} и сила тяжести \mathbf{F} , в соответствии с упомянутым постулатом, должны записываться в форме:

$$\mathbf{f} = -\frac{\eta}{c} \text{grad } c, \quad \mathbf{F} = -\frac{E}{c} \text{grad } c.$$

Первое выражение в терминах $\omega = \sqrt{c}$ можно переписать

$$\mathbf{f} = -\frac{2\eta}{\omega} \text{grad } \omega. \quad (60)$$

Сопоставляя это выражение с формулой (46), получаем уравнение (59), которое, таким образом, согласуется и с тензорной схемой распределения энергии-импульса в гравитационном поле (45)–(47), и с выражением (60), опирающимся на постулат о пропорциональности тяжести и энергии. Уравнение (59) можно записать в виде:

$$\omega \square \omega = 2\alpha\eta. \quad (59'')$$

Тогда левая часть (59''), как замечает Абрагам, инвариантна относительно преобразований Лоренца, а правая часть — неинвариантна, так как плотность энергии не является лоренц-инвариантной величиной. Поэтому уравнения поля (59) не являются инвариантными относительно преобразований Лоренца, и вся теория явно выходит за рамки СТО.

До сих пор Абрагам не ссылался на работу Эйнштейна, в которой фигурировал статический вариант уравнений (59) и в которой уже была использована идея отождествления потенциала с \sqrt{c} . Получив уравнения (59), Абрагам, наконец, упоминает об этой статье Эйнштейна: «Полевые уравнения (здесь (58) и 59''). — В. В.) переходят для специального случая статического поля в уравнения, указанные Эйнштейном (здесь (36). — В. В.)» [313, с. 796]. Но Абрагам полагает, что его вывод не только бо-

лсе общий (уравнения (59) верны и для произвольных полей), но и более строгий. Верно усматривая слабое место « \sqrt{c} -теории» Эйнштейна, он замечает: «Однако рассуждения Эйнштейна в известной мере произвольны и не лишены противоречий, поскольку они основаны на гипотезе эквивалентности, которая как раз и не согласуется с его полевыми уравнениями» [там же].

Естественно было далее посмотреть, к какому элементарному закону взаимодействия двух покоящихся материальных точек P и P' с массовыми константами M и M' приводят уравнения (59). На точку P действует сила

$$\mathbf{F} = -M \text{grad } c = -2Mw \text{ grad } w, \quad (61)$$

а потенциал w определяется уравнением:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = \frac{2\alpha\eta}{w}. \quad (62)$$

Несложные вычисления дают следующий результат:

$$\mathbf{F} = A/r^2 - B/r^3, \quad (63)$$

где $B/A = \gamma m'/2c^2$ (γ — гравитационная постоянная, m' — инертная масса притягивающего тела). Для Солнца, например, B/A оказывается порядка 10^{-8} , и Абрагам делает вывод, что кубическая поправка к ньютоновскому закону слишком мала, чтобы сказаться заметным образом на движении планет. Нетрудно оценить, к какому смещению перигелия Меркурия приводит теория Абрагама [14, 331]. Выражение для силы (63) является частным случаем более общего закона

$$\mathbf{F} = -\frac{m}{r^3} \left(\gamma - \frac{2\sigma\gamma m'}{r} + 2\beta r^2 - 3\alpha r^2 \right) - \frac{2\lambda m}{r^2} \dot{\mathbf{r}} \quad (64)$$

при условии, что $\sigma = 1/4$, $\beta = 0$, $\alpha = 0$, $\lambda = 0$. Оно, как известно, приводит к общему выражению для смещения перигелия:

$$\delta\omega = \frac{2\pi m}{a(1-e^2)} (2\beta + 2\lambda - \sigma). \quad (64a)$$

Эйнштейновское значение для смещения перигелия ($\sim 43''$ в столетие), характерное для общей теории относительности, получается, когда $(2\beta + 2\lambda - \sigma) = 3$. В нашем случае $(2\beta + 2\lambda - \sigma) = -1/4$, что дает смещение перигелия $\sim 3,5-4''$, но в противоположном направлении. Таким образом, вторая теория Абрагама, хотя и приводила к дополнительному смещению перигелия, но весьма незначительному и с другим знаком.

Связь теории с электромагнитной концепцией физики. Весьма симптоматична концовка кембриджского доклада Абрагама. В качестве достоинства своей теории он подчеркивает то обстоятельство, что лангранжова функция для тела, движущегося в поле тяготения, не постулируется однозначно. Требуется лишь,

чтобы она была однородной функцией первого порядка относительно v и c :

$$L = -Mcf(\beta), \quad \beta = v/c, \quad (65)$$

$$f(\beta) = 1 - \frac{\zeta}{2}\beta^2 + \dots \quad (66)$$

Здесь ζ — некоторая численная константа, позволяющая конкретизировать выбор лагранжевой функции. Если в качестве $f(\beta)$ выбрать согласующееся со СТО и статическими теориями Эйнштейна выражение

$$f(\beta) = \sqrt{1-\beta^2} = 1 - \frac{1}{2}\beta^2 + \dots, \quad (67)$$

то

$$L = -M\sqrt{c^2 - v^2} \quad (68)$$

(сравни с эйнштейновским выражением (38), (38a)). Тогда $\zeta = 1$ и в соответствии с (57)

$$L = -m_0c\sqrt{c^2 - v^2}, \quad (69)$$

что согласуется со СТО. Но если для $f(\beta)$ взять выражение

$$f(\beta) = \frac{1-\beta^2}{2\beta} \ln\left(\frac{1+\beta}{1-\beta}\right) = 1 - \frac{2}{3}\beta^2 + \dots, \quad (70)$$

характерное для динамики электрона, развиваемой Абрагамом, то константу ζ следует принять равной $1/3$, и тогда получится иное (нерелятивистское) соотношение между массой и энергией

$$m_0 = \frac{1}{3}E_0/c^2, \quad (71)$$

присущее теории электрона Абрагама.

Тем самым, «развитая выше теория гравитационного поля вполне независима от нерешенных вопросов динамики электрона» [313, с. 797] и, в частности, может быть успешно согласована с антирелятивистской программой электромагнитного синтеза физики, которая существенно расходилась в вопросах динамики электрона со СТО. Будучи одним из лидеров электромагнитной концепции физики, Абрагам после опытов А. Бухерера, Е. Гулки и С. Ратновского, проведенных в 1908—1911 гг. [155, с. 125] и свидетельствовавших скорее в пользу релятивистской зависимости массы от скорости, уже не был абсолютно убежден в справедливости своей динамики электрона. Поэтому он стремился построить такую теорию тяготения, которую можно было бы приспособить и к лоренц-эйнштейновским динамическим соотношениям, и к формулам нерелятивистской концепции недеформированного электрона. В этой гибкости была, конечно, и известная слабость теории, поскольку она согласовывалась с двумя взаимно противоречивыми теоретическими концепциями. В обзоре [317], посвященном анализу гравитационной проблемы и законченном в декабре 1914 г., Абрагам при анализе своей второй теории уже не упоминает о возможности ее согласования с

динамикой твердого электрона и исходит из релятивистских динамических соотношений ($m_0 = E_0/c^2$, $L = -m_0 c^2 \sqrt{1 - v^2/c^2}$ и т. д.). Можно предположить, что это было связано с опытами Г. Неймана (1914), которые, по мнению Паули, впервые «совершенно однозначно» подтвердили релятивистскую зависимость $m = m(v)$ [155, с. 125].

Развитие теории. Как раз в августе состоялся, наконец, переезд Эйнштейна в Цюрих. К этому времени, как показала дискуссия с Абрагамом, он, по-видимому, уже понял несостоятельность скалярных теорий, нековариантных относительно преобразований Лоренца (как своей собственной, так и Абрагама). Продолжение дальнейших споров было бесцельным, и Эйнштейн 2 сентября в ответ на очередную критическую заметку Абрагама посылает в редакцию «*Annalen der Physik*» записку с отказом продолжать дискуссию [248, с. 222].

В 1955 г. Эйнштейн вспоминал: «В 1912 г., когда меня пригласили на работу в Цюрихский политехникум, я уже значительно ближе подошел к решению этой проблемы (построения теории тяготения, удовлетворяющей принципу эквивалентности и более общему принципу относительности, чем специальный.— В. В.)» [298, с. 353]. Несколько дальше он описывает концепцию отождествления гравитационных потенциалов с компонентами метрического тензора $g_{\alpha\beta}$ и подчеркивает: «Тем самым проблема гравитации была сведена к чисто математической. Существуют ли дифференциальные уравнения для $g_{\alpha\beta}$, которые инвариантны относительно нелинейных преобразований координат?... С этой задачей в голове я навел в 1912 г. моего старого студенческого друга Марселя Гроссмана, который тем временем стал профессором математики в Швейцарском политехникуме» [298, с. 354—355]. Действительно ли еще до переезда в Цюрих Эйнштейн пришел к необходимости отождествления метрики и гравитации и уже осенью 1912 г. усиленно разрабатывал эту концепцию? В какой-то мере это подтверждается его письмом к Зоммерфельду от 29 октября 1912 г.: «Теперь занимаюсь исключительно проблемой гравитации и надеюсь, что с помощью одного здешнего товарища математика (М. Гроссмана.— В. В.) удастся устранить все трудности. Но одно точно: никогда в жизни я так не мучился, и теперь мне внушает большое уважение математика, тонкости которой раньше я по своей ограниченности считал роскошью. По сравнению с этой проблемой первоначальная теория относительности является просто детской игрушкой» [76, с. 191].

Создается, таким образом, впечатление, что не позже начала осени 1912 г. Эйнштейн ясно понял бесперспективность предшествующих своих и абрагамовских теорий со скалярным потенциалом и, по-видимому, пришел к выводу о выражении гравитационного поля с помощью метрического тензора римановой геометрии. Абрагам же продолжал углублять и совершенствовать свою вторую скалярную теорию. В октябре 1912 г. он выступил

на заседании «Общества содействия прогрессу науки в Генуе» с докладом «Новая теория тяготения», в котором, в частности, попытался углубить и упростить аксиоматику своей теории. Он выдвинул три постулата, из которых, как он считал, можно ее вывести: «1. Поверхности $c = \text{const}$ совпадают с эквипотенциальными поверхностями гравитационного поля, отрицательный градиент c при этом дает направление силы тяготения. 2. Наблюдатель, находящийся в материальной системе, которую он наблюдает, не в состоянии обнаружить перемещение этой системы из области с одним значением скорости света c в область с другим ее значением. 3. Силы, которые действуют на два тела в одном и том же месте в поле тяготения, пропорциональны их энергиям» [314, с. 195]. Первый постулат связан с отождествлением гравитационного потенциала со скоростью света (или некоторой функции от нее), гравитационным отклонением света и выражением для гравитационной силы. Во втором, релятивистском утверждении Абрагам постулирует невозможность для локального наблюдателя определить, какое значение потенциала или скорости света он должен приписать месту своего нахождения. Вместе с тем, это не означает, что локальный наблюдатель не может найти град c , определяющий силу тяготения. Кроме того, внешний наблюдатель может зарегистрировать физические проявления гравитационного потенциала, например, красное смещение спектральных линий в поле Солнца относительно соответствующих линий на Земле. Второй постулат также приводит к выводу о том, что роль потенциала больше подходит не скорости света, а корню квадратному из нее (\sqrt{c}). Третий постулат является своеобразной переформулировкой принципа равенства инертной и гравитационной масс.

В этом докладе Абрагам обсуждает вслед за Эйнштейном идею самовозбуждения гравитационного поля. Он приводит уравнения статического поля к виду:

$$\Delta c = 4(\eta^m + \eta^g), \quad (72)$$

где $\eta^m = \mu c$ — плотность энергии покоящейся материи с массовой константой μ , отнесенной к единице объема, а $\eta^g = \frac{1}{2}(\text{grad} \sqrt{c})^2$ — плотность энергии гравитации.

Это уравнение вполне согласуется с эйнштейновским уравнением (37), но преимущество своего подхода Абрагам видел в общности и строгости вывода.

Уравнения движения материальной точки в гравитационном поле, которые получает Абрагам в октябрьском докладе, а затем повторяет в обзоре 1914 г. [317], также совпадают с эйнштейновскими:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\mathbf{v}}{\sqrt{c^2 - v^2}} \right) = - \frac{c}{\sqrt{c^2 - v^2}} \text{grad } c. \quad (73)$$

В статическом случае уравнение (73) переходит в уравнение

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{v}{c^2} \right) = -\frac{1}{c} \text{grad } c. \quad (74)$$

Вторая теория Абрагама получила некоторое развитие в работах итальянского физика Б. Кальдонаццо [328] и японского теоретика Дж. Ишивары [414], работавшего в то время в Геттингене и Берлине. Работа Кальдонаццо была опубликована летом 1913 г. [328]. Он изучал свободное движение материальной точки в однородном гравитационном поле. Результаты его были одобрены и подробно описаны Абрагамом [317].

Значительно большего внимания заслуживает работа Ишивары, поступившая в редакцию «Physikalische Zeitschrift» 29 октября 1912 г. [414]. Она интересна по трем причинам. Во-первых, потому что автор выдвигает на первый план электромагнитную концепцию физики и старается на ее основе получить уравнения теории Абрагама. Во-вторых, в результате он получает модифицированные уравнения электромагнитного поля, согласующиеся с теорией Абрагама. И наконец, в-третьих, определенный интерес представляет позиция Ишивары в споре между Эйнштейном и Абрагамом.

Несмотря на кардинальные разногласия, как отмечает Ишивара, теории Абрагама и Эйнштейна имеют много общего: «В то время как эйнштейновская теория опирается на новое понимание пространства и времени и так называемую гипотезу эквивалентности, Абрагам выводит дифференциальные уравнения гравитационного поля из нескольких естественных предпосылок с помощью принципов механики. Обе теории тяготения при этом могут быть охарактеризованы тем, что они исходят из основного положения, согласно которому гравитационное поле определяется скоростью света» [414, с. 1190]. Именно это обстоятельство, по мнению Ишивары, свидетельствует об электромагнитном происхождении гравитации: «...мы постулируем ... вместе с Эйнштейном и Абрагамом, что в пространстве с постоянной скоростью света существует только одно электромагнитное поле, но, если скорость света изменяется в пространстве и во времени, то эти изменения приводят к возникновению гравитационного поля» [там же]. Он полагает, что тензор энергии — импульса электромагнитного поля и соответствующие законы сохранения, записанные с учетом возможности изменения скорости света, достаточны для получения гравитационного тензора энергии — импульса Абрагама и, тем самым, всей теории Абрагама: «...Нужно иметь в виду, что компоненты электромагнитного 10-тензора уже содержат скорость света. Изменения ее должны, таким образом, приводить к возникновению дополнительных членов в уравнениях сохранения энергии и импульса, которые, как это справедливо подчеркнул Эйнштейн, должны представлять в совокупности гравитационное поле» [там же].

В споре между Эйнштейном и Абрагамом Ишивара склонен встать на сторону Абрагама. При этом он выступает даже как более последовательный приверженец электромагнитного синтеза. Обсуждая вопрос о возможной скорости распространения гравитации, он замечает: «Все же представляется, что целесообразно принять гипотезу равенства обеих названных скоростей (света и гравитации.— *В. В.*) из-за ее простоты и созвучности с концепцией электромагнитной основы всех физических теорий» [там же]. Задача же, которую ставит Ишивара перед собой в этой статье, формулируется им так: «...Вывести соотношения Абрагама для гравитационного тензора, а также его гипотезу о пропорциональности тяжести и энергии, из фундаментальных уравнений электромагнитного поля» [там же]. А вопросы, связанные со структурой пространства и времени, обойти которые молчанием при решении проблемы гравитации Эйнштейн не считал возможным, Ишивара считал, по-видимому, сугубо интерпретационными: «...Предложенная здесь теория не зависит от специфического понимания пространства, которое представляется метафизической проблемой» [там же]. Исходным пунктом для Ишивары являются модифицированные уравнения Максвелла, переписанные так, что особую роль в них играет \sqrt{c} (так же, как в теориях Эйнштейна и Абрагама):

$$\begin{aligned} \operatorname{rot}(\mathbf{H} \sqrt{c}) &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\mathbf{E}}{\sqrt{c}} \right) + \rho \frac{\mathbf{v}}{\sqrt{c}}, \\ \operatorname{div} \left(\frac{\mathbf{H}}{\sqrt{c}} \right) &= 0, \\ -\operatorname{rot}(\mathbf{E} \sqrt{c}) &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\mathbf{H}}{\sqrt{c}} \right), \\ \operatorname{div} \left(\frac{\mathbf{E}}{\sqrt{c}} \right) &= \frac{\rho}{\sqrt{c}}. \end{aligned} \tag{75}$$

В случае $c = \text{const}$ уравнения (75) переходят в обычные уравнения Максвелла. Если же отказаться от этого предположения и принять известное выражение тензора энергии — импульса электромагнитного поля, то характерное соотношение электродинамики:

$$\rho \mathbf{F}^e = \operatorname{div} T^e, \tag{76}$$

где \mathbf{F}^e — электромагнитная 4-сила, а T^e — тензор энергии-импульса электромагнитного поля, переходит в соотношение, содержащее гравитационный член:

$$\rho \mathbf{F}^e + \frac{\eta^e}{c} \operatorname{grad} c = \operatorname{div} T^e, \tag{77}$$

где η^e — плотность энергии электромагнитного поля.

Ишивара далсе показывает, что уравнения (75) и (77) согласуются с уравнением гравитационного поля Абрагама

$$\sqrt{c} \square (\sqrt{c}) = 2(\eta^m + \eta^e).$$

Конечно, задача электромагнитного синтеза физики была бы решена, если бы удалось свести η^m к η^e , т. е. дать электромагнитное обоснование структуры материи. То, что сделал Ишивара, нельзя назвать выводом гравитации из электромагнетизма, это, скорее, — согласование уравнений электродинамики в форме (75) с гравитационной теорией Абрагама, и то не полное. В обзоре 1914 г. Абрагам писал: «Полевые уравнения (35) (здесь (75). — В. В.) удовлетворяют при этом постулату тяжести энергии и вводятся, таким образом, в изложенную здесь теорию (вторую теорию Абрагама. — В. В.). Связь обоих полей, впрочем, не является простой. Так, согласно (35), потенциал тяготения влияет на электромагнитное поле, а с другой — сам зависит от распределения энергии в электромагнитном поле» [317, с. 497]. Пути Абрагама и Ишивары начали расходиться в 1914 г., когда Ишивара в качестве одного из постулатов своей модифицированной теории принял локальную справедливость СТО, постулат, который не выполняется во второй теории Абрагама [504, с. 279].

Эйнштейн о второй теории Абрагама. Выводы. Реакцию Эйнштейна на вторую теорию Абрагама можно найти в его письмах к своему бывшему ассистенту Хопфу и к Зоммерфельду. В письме к Хопфу* речь идет о статье Абрагама, которая, как уже упоминалось, была получена редакцией 12 июля 1912 г. Поэтому, вероятно все, письмо написано в конце лета или начале осени 1912 г. «Как Вы, может быть, видели в «Физическом журнале» («Physik. Zeitschrift». — В. В.), Абрагам прикочил меня и теорию относительности двумя сокрушительными, смертоносными ударами и написал единственно верную теорию гравитации (с присвоением моих результатов). Ничего не скажешь — ход конем, и конь-то статный, да только ему не хватает трех ног! К тому же Абрагам еще и установил, что связь между массой и энергией понимал уже Роберт Майер» (цит. по: [62, с. 118]).

Под «присвоением ... результатов» Эйнштейн, очевидно, имел в виду используемые Абрагамом без ссылок на Эйнштейна постулат о тяжести энергии и идею принятия в качестве гравитационного потенциала не скорости света c , а \sqrt{c} . Надо отдать должное Абрагаму, который в рассуждениях Р. Майера об энергетическом балансе Солнца усмотрел предвосхищение постулата о тяжести энергии [202], но ему следовало, конечно, в этой связи сослаться и на Эйнштейна, который впервые строго сформулировал это положение на основе равенства инертной и гравитационной масс и соотношения $E = mc^2$.

* Мы цитируем письмо по книге Зелига [62], в которой не сказано, когда оно было написано.

В письме к Зоммерфельду от 29 октября 1912 г. оценка второй теории Абрагама более спокойная [76, с. 191]. В это время Эйнштейн вместе с Гроссманом уже начал активно разрабатывать тензорно-геометрическую концепцию гравитации.

Резюмируя раздел, подчеркнем, что в генезисе идей, приведших Эйнштейна к ОТО, вторая теория Абрагама сыграла определенную роль. Она еще сильнее выявила внутреннюю противоречивость скалярного подхода в рамках релятивистской программы, которой твердо придерживался Эйнштейн. Нарушение принципа эквивалентности и принципа лоренц-ковариантности (даже локально) без ясной перспективы того, как должен быть расширен принцип относительности, подрывали основы эйнштейновской теории Эйнштейна, но он, по-видимому, надеялся их устранить при переходе к общей теории. Абрагам как раз построил общую теорию переменных гравитационных полей, которая в статическом случае совпадала с теорией Эйнштейна. И в этой общей теории Абрагама сохранялись и становились даже более очевидными изъяны всего подхода в целом. Таким образом, вторая теория Абрагама, с точки зрения Эйнштейна, вела в тупик и потому способствовала ускорению его отказа от этого направления и поискам более радикального решения при переходе от статического случая к общей ситуации переменных полей тяготения.

4. Первая теория Нордстрема

Гипотеза Эйнштейна о том, что скорость света c зависит от гравитационного потенциала, ведет, как это вытекает из дискуссии между Эйнштейном и Абрагамом, к значительным трудностям для принципа относительности. Поэтому возникает вопрос, нельзя ли эйнштейновскую гипотезу заменить некоторой другой, которая оставляет c постоянной и, тем не менее, согласует теорию гравитации с принципом относительности таким образом, чтобы тяжелая и инертная массы оставались равными.

Г. Нордстрем (1912)

Именно так начинается первая статья известного финского теоретика Г. Нордстрема, положившая начало целому направлению лоренц-ковариантных скалярных теорий гравитационного поля [481, с. 1126]. Две основные теории этого типа вошли в историю проблемы гравитации под его именем (первая и вторая теории Нордстрема). Рассмотренные ранее теории Абрагама и Эйнштейна были скалярными, но они не удовлетворяли требованию лоренц-ковариантности. Этот недостаток многим казал-

ся весьма серьезным, так как к началу 1910-х годов большинство теоретиков примкнуло к релятивистской программе, выдвинутой Эйнштейном в 1905 г. Существенное значение при этом имели работы Минковского по четырехмерной теоретико-инвариантной формулировке СТО и электродинамике движущихся тел. Успехи релятивистской программы наводили на мысль о том, что путь Эйнштейна и Абрагама, связанный с отказом от постоянства скорости света и специального принципа относительности, ошибочен и что следует попытаться фундаментальный факт равенства инертной и гравитационной масс согласовать с требованием лоренц-ковариантности.

Первой опубликованной попыткой такого рода и явилась теория Нордстрема [481] (статья поступила в редакцию «Phys. Zeitsch.» 23 октября 1912 г.

Нордстрем до 1912 г. Финский физик Г. Нордстрем * (1881—1923 гг.) с 1899 по 1905 гг. учился в Политехнической школе и затем в течение двух лет в университете в Гельсингфорсе (Хельсинки). В апреле 1906 г. он прислал в Геттинген, чтобы изучать физическую химию у Нерста, но Нерст в это время был в Берлине. Нордстрем, по-видимому, вошел в контакт с геттингенскими теоретиками, которые были увлечены новыми открытиями в области СТО и электродинамики движущихся сред. При этом, однако, он занимался также физической химией у Ф. Долсжалека, замещавшего Нерста. В конце 1906 г. он закончил экспериментальное исследование чисел переноса Гитторфа ** для концентрированных щелочных растворов, опубликованное в 1907 г. в «Zeitschrift für Elektrochemie». В августе 1907 г. он возвращается в Гельсингфорс и полностью переключается на исследования в области СТО и электродинамики движущихся сред, с которой он познакомился в Геттингене. В 1908 г. он получил степень доктора философии за работу по теории пондеромоторных сил в электродинамике и смежным вопросам. В 1909—1911 гг. появляются его работы в этой области.

Летом 1911 г. он снова посещает Геттинген, к этому времени относится его работа по релятивистской механике сплошной среды. К стати говоря, в своих работах по электродинамике Нордстрем энергично дискутировал с Абрагамом, в частности, по вопросу о релятивистском законе преобразования для джоулева тепла [155, с. 159]. Впоследствии правильной была признана точка зрения Абрагама.

В 1912 г. Нордстрем, вслед за Абрагамом, Эйнштейном переходит к проблеме гравитации. В это время он получает должность доцента в Гельсингфорском университете.

Таким образом, Нордстрем, как и Абрагам, примыкал к Гет-

* См., например, о нем диссертацию Л. Р. Пайсона [504, с. 250].

** Числа переноса Гитторфа характеризуют интенсивность электролитического процесса и определяются отношением скорости анионов v_a к суммарной скорости анионов и катионов $v_a + v_k$

$n = v_a / (v_a + v_k)$.

тингенской традиции математической и теоретической физики, находясь под влиянием работ Минковского и, в известной мере, Абрагама, с которым, впрочем, у него имелись определенные расхождения в вопросах электродинамики движущихся сред. Были у него расхождения с Абрагамом и более принципиального характера, т. к. Нордстрем полностью принимал релятивистскую программу, основанную на СТО.

Лоренц-ковариантность теории. Исследования Нордстрема были стимулированы гравитационными работами Эйнштейна и Абрагама 1911—1912 гг. и теми трудностями, которые возникли на их пути к последовательной релятивистской теории тяготения. Главной проблемой для него было, однако, не построение уравнений гравитационного поля, которые он принял совладающими по форме с соответствующими уравнениями Абрагама:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial u^2} = 4\pi f \gamma, \quad (78)$$

а согласование релятивистских уравнений движения с требованием равенства инертной и тяжелой масс. Уравнения поля (78) отличались от уравнений Абрагама тем, что скорость света, входящая в них, подразумевалась постоянной и они, тем самым, удовлетворяли принципу лоренц-ковариантности. В этом уравнении по обозначениям Нордстрема: Φ — скалярный гравитационный потенциал, $u = ict$, γ — плотность массы тел, f — гравитационная постоянная. Гравитационное поле, далее, характеризуется четырехмерным вектором:

$$F_x = -\frac{\partial \Phi}{\partial x}, \quad F_y = -\frac{\partial \Phi}{\partial y}, \quad F_z = -\frac{\partial \Phi}{\partial z}, \quad F_u = -\frac{\partial \Phi}{\partial u}. \quad (79)$$

И тогда в качестве уравнений движения материальной точки в поле тяготения естественно было принять:

$$\begin{aligned} -m \frac{\partial \Phi}{\partial x} &= \frac{d}{d\tau} (ma_x), \\ -m \frac{\partial \Phi}{\partial y} &= \frac{d}{d\tau} (ma_y), \\ -m \frac{\partial \Phi}{\partial z} &= \frac{d}{d\tau} (ma_z), \\ -m \frac{\partial \Phi}{\partial u} &= \frac{d}{d\tau} (ma_u), \end{aligned} \quad (80)$$

где m — масса покоя материальной точки, четырехмерный вектор (a_x, a_y, a_z, a_u) — ее четырехмерная скорость, названная Нордстремом «вектором движения» («Bewegungsvektor»), τ — собственное время. В рамках СТО, которой должны удовлетворять уравнения (80), пространственно-временной интервал принимается равным:

$$ds^2 = -dx^2 - dy^2 - dz^2 - du^2, \quad (81)$$

а через собственное время он выражается так:

$$ds = cd\tau. \quad (82)$$

Тогда компоненты «вектора движения» должны удовлетворять релятивистскому соотношению

$$-c^2 = a_x^2 + a_y^2 + a_z^2 + a_u^2, \quad (83)$$

откуда, дифференцируя по τ , получаем:

$$-c \frac{dc}{d\tau} = a_x \frac{da_x}{d\tau} + a_y \frac{da_y}{d\tau} + a_z \frac{da_z}{d\tau} + a_u \frac{da_u}{d\tau}. \quad (84)$$

Если же в согласии с общепринятой точкой зрения считать, что масса покоя частицы постоянна, т. е. не зависит от потенциала Φ , то соотношение (84) с учетом уравнений движения (80) можно представить как

$$\frac{dc}{d\tau} = -\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{d\tau}. \quad (85)$$

Полученное соотношение означает, что скорость света можно считать постоянной только при условии постоянства потенциала, т. е. в отсутствие гравитационного поля. Следовательно, вектор движения должен быть ортогонален вектору движущей силы, а это условие приводит к несовместимости постоянства скорости света и постоянства массы покоя частицы.

Эйнштейн и Абрагам отказались от постоянства скорости света и, вместе с этим, от требования лоренц-ковариантности. Нордстрем выбирает второй путь, предположив, что масса покоя частицы не является постоянной, а зависит от гравитационного потенциала: «...Если 4-вектор F понимать как движущую силу, которая действует на неизменную единицу массы, то не удастся сохранить в силе постоянство скорости света. А именно, в этом случае F было бы равно четырехмерному вектору ускорения материальной точки, и он не мог бы при произвольном направлении движения быть перпендикулярным вектору движения a , как этого требует постоянство скорости света. Оставляя скорость света постоянной, можно, однако, устранить трудность и даже двумя путями. Либо под движущей силой следует понимать не F , но только ее составляющую, нормальную вектору движения, либо следует принять массу материальной точки не постоянной, но зависящей от гравитационного потенциала» [481, с. 1126]. Здесь, правда, Нордстрем указывает две альтернативы, но в дальнейшем он показывает, что они эквивалентны, так как приводят к одним и тем же уравнениям движения. Все же как более физическую он выбирает вторую альтернативу: «Соответственно точке зрения большинства исследователей в области теории относительности, я буду использовать второй метод, то есть (уравнения.— В. В.)

$$mF_x = -m \frac{d\Phi}{dx} \text{ и т. д.}$$

аналогичное уравнению (87)

$$\frac{d}{dt}(\rho dV) = \frac{\rho dV}{c^2} \frac{d\Phi}{dt}. \quad (95)$$

Эйнштейн и первая теория Нордстрема. Журнальный текст статьи содержит весьма замечательное дополнение, сделанное Нордстремом при корректуре: «Из письма профессора Эйнштейна я узнал, что он уже раньше * и несколько более простым способом изучал использованную выше возможность рассмотрения гравитации. Однако он пришел к убеждению, что следствия такой теории не могут соответствовать действительности. Он показывает на простом примере, что, согласно этой теории, некоторая вращающаяся система будет получать в поле тяготения меньшее ускорение, чем невращающаяся система» [481, с. 1129]. Нордстрем соглашается с этим замечанием Эйнштейна, но считает небольшое отклонение от принципа эквивалентности меньшим злом по сравнению с трудностями, вызванными предположением о зависимости скорости света от гравитационного потенциала. «Это следствие само по себе (т. е. различие в ускорениях вращающегося и невращающегося тел.— В. В.), отвечает он,— я не считаю опасным, так как различие получается слишком малым, чтобы привести к противоречию с опытом. Но, пожалуй, это следствие означает, что моя теория не согласуется с эйнштейновской гипотезой эквивалентности, в соответствии с которой неускоренная система отсчета в однородном гравитационном поле эквивалентна ускоренной системе отсчета в пространстве, свободном от сил тяготения. В этом обстоятельстве я не вижу, однако, достаточного основания для того, чтобы отвергнуть теорию. Хотя эйнштейновская гипотеза исключительно остроумна, она приводит, с другой стороны, к большим трудностям» [там же].

Прежде чем продолжить анализ теории Нордстрема, остановимся на замечании Эйнштейна, содержащемся в письме к Нордстрему, о том, что он «уже раньше изучал ... использованную (Нордстремом.— В. В.) возможность рассмотрения гравитации». В публикациях Эйнштейна этот факт не нашел никакого отражения. Однако имеются, по крайней мере, еще два свидетельства того, что Эйнштейн не прошел мимо возможности, использованной Нордстремом.

В гибсоновской лекции «Некоторые замечания о возникновении общей теории относительности», прочитанной Эйнштейном в Университете Глазго 20 июня 1933 г., он говорил, в частности: «Первый шаг на пути решения этой задачи (построения релятивистской теории тяготения.— В. В.) я впервые сделал, пытаясь рассматривать закон тяготения в рамках специальной теории относительности. Как и большинство дру-

* Не вполне ясно, когда Эйнштейн, в 1907 или в 1911—1912 гг., рассматривал аналогичную теорию.

гих исследователей этого времени, я старался отыскать *полевой закон* тяготения ... Конечно, проще всего было сохранить лапласов скалярный потенциал тяготения и дополнить уравнение Пуассона производной по времени так, чтобы удовлетворить требованиям специальной теории относительности. Следовало также привести в соответствие со специальной теорией относительности и закон движения материальной точки в гравитационном поле. Путь к этому был не столь очевиден, поскольку инертная масса тела могла зависеть от гравитационного потенциала. Этого даже следовало ожидать в силу закона инерции энергии.

Однако эти исследования привели к результату, который вызывал у меня глубокое недоверие. Согласно классической механике, ускорение тела в вертикальном поле тяготения не зависит от горизонтальной составляющей скорости. С этим связано то обстоятельство, что ускорение механической системы (или ее центра тяжести) в подобном поле тяготения не зависит от ее внутренней кинетической энергии. Согласно же разрабатывавшейся мною теории, ускорение падения зависело от горизонтальной скорости и, следовательно, от внутренней энергии системы.

Это противоречило давно известному факту, что все тела падают в поле тяжести с одинаковым ускорением. Этот закон, который иначе можно сформулировать как закон равенства инертной и тяжелой масс, представлялся мне имеющим глубокий смысл. Я крайне удивился, что этот закон существует, и предположил, что он и даст ключ к более глубокому пониманию инерции и тяготения. В том, что этот закон выполняется строго, я не сомневался, даже не зная результатов изящных опытов Этвеша, которые — если я правильно вспоминаю — стали мне известны позже. Тогда я отказался от попытки рассматривать упомянутым выше образом проблему гравитации в рамках специальной теории относительности ... Подобные размышления занимали меня с 1908 по 1911 год...» [293, с. 404].

В более известных «Автобиографических заметках» (1949 г.) Эйнштейн пишет примерно то же самое. Ввиду важности вопроса, приведем и это высказывание: «В классической механике, истолкованной в духе теории поля, потенциал тяготения представляется как *скалярное поле* (простейшая теоретическая возможность поля с одной единственной составляющей). Такая скалярная теория тяготения может быть легко сделана инвариантной по отношению к группе преобразований Лоренца ... Возможность реализации этой программы представлялась, однако, сомнительной с самого начала» [296, с. 282]. Из рабства инертной и гравитационной масс «следовало, — продолжает Эйнштейн, — что вес системы зависит вполне определенным и известным образом от ее полной энергии. Если теория этого не давала или давала только с натяжкой, то ее надо было отбросить. Проще всего это условие можно выразить так: при падении системы в данном поле силы тяжести ускорение не зависит от природы падающей системы (а значит, в частности, и от содержащейся в ней энергии).

Однако выяснилось, что в рамках намеченной программы это элементарное положение вещей вообще не может быть учтено

надлежащим образом, во всяком случае без натяжки. Это убедило меня в том, что в рамках специальной теории относительности нет места для удовлетворительной теории тяготения» [там же].

Таким образом, Эйнштейн, по-видимому, независимо от Нордстрема пытался разработать аналогичную скалярную лоренц-ковариантную теорию гравитационного поля, но не стал публиковать работу, так как пришел к выводу о несогласуемости теории с принципом эквивалентности, который казался ему надежной основой гравитации.

Трудно сказать, когда это было. Скорее всего, уже после четкой формулировки принципа эквивалентности в конце 1907 г. Наиболее вероятно, что эта работа Эйнштейна относится либо к концу 1907 — началу 1908 г., либо к 1911—1912 гг., т. к. с 1908 по 1910 г. он был увлечен идеей построения единой теории поля и только во второй половине 1910 г. вернулся к разработке непосредственно гравитационной проблемы.

Уравнения движения и экспериментальные следствия теории. Нордстрем, как мы видели, согласился с аргументом Эйнштейна против развитой теории, хотя соответствующий результат был строго получен им несколько позже, в феврале 1913 г. [482]. В сентябре 1913 г. к аналогичным выводам пришел и женеvский теоретик Бехакер [321]. В обзоре 1914 г. Абрагам воспроизвел эти результаты, используя лагранжеву формулировку уравнений движения некоторого тела с массой покоя

$$m = \int \frac{v dV}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

где v — плотность массы покоя, в гравитационном поле. Он показал, в частности, что «сила тяготения \bar{K}^a , действующая на движущееся тело ... оказывается пропорциональной не его энергии, а соответствующей функции Лагранжа»

$$L = -mc\sqrt{c^2 - v^2}, \quad (96)$$

а это «при малых скоростях означает, что не сумма потенциальной и кинетической энергий, но их разность должна служить мерой веса тела» [317, с. 498].

Соответствующие уравнения движения в статическом поле имеют интеграл энергии в виде:

$$e^{\varphi/c^2} \sqrt{c^2 - v^2} = \text{const}, \quad (97)$$

где φ — потенциал поля.

Сами же эти уравнения оказываются следующими:

$$\frac{dv}{dt} = - \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) \text{grad } \varphi. \quad (98)$$

Свободное падение в однородном поле тяготения описывается, таким образом, формулой

$$\frac{dv}{dt} = g - \frac{g v^2}{c^2}, \quad (99)$$

т. е. горизонтально брошенное тело, действительно, падает тем медленнее, чем больше его скорость. Из уравнения (99), совпадающего с классическим уравнением свободного падения в среде с квадратичным (по скорости) законом трения, следует, во-первых, что при $v=c$, $dv/dt=0$, и движение света оказывается равномерным и прямолинейным. Во-вторых, интегрирование уравнения (99) дает при нулевой начальной скорости

$$v=c \operatorname{th}(gt/c). \quad (100)$$

Если воспользоваться разложением (100) в ряд, то

$$v=gt-1/3(gt)^3/c^2. \quad (101)$$

В-третьих, формулы (99)—(101) показывают, что отклонения нордстремовских соотношений от классических имеют порядок v^2/c^2 , что и позволило Нордстрему в ответ на возражения Эйнштейна заметить, что различие в ускорениях вращающегося и невращающегося тел «получается слишком малым, чтобы привести к противоречию с опытом» [481, с. 1129].

Бехакер изучал астрономические следствия первой теории Нордстрема и также пришел к выводу, что движение планет в Солнечной системе с точностью до членов порядка v^2/c^2 описывается классически. Нетрудно, продолжая вычисления Бехакера, найти аномальное смещение перигелия Меркурия, которое оказывается здесь направленным в противоположную сторону (по сравнению с наблюдаемым) и составляющим $1/3$ его (см. [7, с. 74—76]).

В отличие от скалярных теорий Абрагама и Эйнштейна, теория Нордстрема предсказывала прямолинейное распространение света в любых гравитационных полях. Тем самым, эксперименты по измерению отклонения световых лучей в поле Солнца во время солнечного затмения, которые планировались Эйнштейном и Фрейндлихом в конце 1911 г., могли бы предотвратить появление теории Нордстрема, если бы их удалось провести в 1911—1912 гг.

Что касается эффекта «красного смещения», который предсказывался Эйнштейном на основе принципа эквивалентности, то, как в 1914 г. было показано Фрейндлихом, этот эффект существует и в теории Нордстрема [364, 447].

Таким образом, первая скалярная лоренц-ковариантная теория гравитационного поля, логически стройная и последовательная схема, и в экспериментальном отношении была для начала вполне удовлетворительна, и отрицательный результат в экспериментах по отклонению света вынудил бы физиков, по всей вероятности, предпочесть тензорной теории Эйнштейна — Гроссмана именно эту теорию (или ее аналог, например, вторую теорию Нордстрема, о которой пойдет речь ниже).

Дальнейшее развитие теории. Выводы. Первая теория Нордстрема в дальнейшем получила развитие в трех направлениях. Во-первых, сам Нордстрем и Бехакер в первой половине 1913 г. продолжали разрабатывать ее, изучая свободное движение, кеп-

леровскую задачу, законы сохранения, проблему соотношения инертной и гравитационной масс в этой теории. Вторым и основным направлением оказалась подготовка такой модификации теории, которая бы, сохранив ее главные достоинства (лоренц-ковариантность, скалярный характер потенциала, удовлетворительно согласие с опытом и т. д.), позволила бы устранить её главный недостаток — нарушение эквивалентности инертной и гравитационной масс и, тем самым, принципа эквивалентности. Именно этот изъян, выражающийся, в частности, в различии ускорений свободного падения вращающегося и невращающегося тел, послужил основной причиной отхода Эйнштейна от разработки этой теории. И хотя Нордстрем заметил, что указанный Эйнштейном недостаток не ведет к расхождению с опытом, он с самого начала искал, по-видимому, путь к его устранению. Об этом говорит и его статья, посвященная первой теории [482] и, наконец, разработка к середине лета 1913 г. нового варианта скалярной теории (названного впоследствии второй теорией Нордстрема) [317, 447].

Третье направление, которое развивал Г. Ми в конце 1912—1913 г., связано с некоторым усложнением теории, заключающимся во введении двух четырехмерных векторов напряженности гравитационного поля (наподобие векторов напряженности и электрического смещения в электродинамике), совпадающих в случае идеального вакуума [61, 464—466].

Последние два направления, однако, разрабатывались уже после того, как Эйнштейн вступил на путь тензорно-геометрической теории, приведшей его к ОТО. Условно началом этого периода мы будем считать возвращение Эйнштейна в Цюрих осенью 1912 г. К этому времени относится и публикация первой гравитационной статьи Нордстрема. Можно предположить, учитывая описанную ранее реакцию Эйнштейна на статью финского теоретика, что эта работа послужила для Эйнштейна дополнительным аргументом против лоренц-ковариантного скалярного подхода к проблеме тяготения, плохо согласующегося с принципом эквивалентности, и способствовала осознанию необходимости тензорной теории. Более вероятно, впрочем, что Эйнштейн еще до знакомства с теорией Нордстрема преодолел скалярный лоренц-ковариантный подход и уже раньше (в Праге) начал разработку тензорной теории тяготения. Именно к этому решающему периоду в генезисе релятивистской теории тяготения мы и переходим. Дальнейшее же развитие теории Нордстрема в работах самого Нордстрема, Абрагама, Ми, Эйнштейна и Фоккера, Лауэ и других мы рассмотрим в разделе, посвященном конкуренции тензорной теории Эйнштейна — Гроссмана с другими, главным образом скалярными, теориями гравитации.

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

1. Решающий поворот — тензорно-геометрическая теория Эйнштейна — Гроссмана (1912—1913 гг.)

В свете уже достигнутых результатов счастливо найденное кажется почти само собой разумеющимся... Позади остались долгие годы поисков в темноте, полных предчувствий, напряженное ожидание, чередование надежд и изнеможенья и, наконец, прорыв к ясности.

А. Эйнштейн (1933)

Ни один из нас бы не взлетел,
Покидая Землю, в поднебесье,
Если б отказаться не хотел
От запасов лишних равновесья.

С. Маршак

Принципиально новый подход к проблеме гравитации, составивший основу ОТО, был развит Эйнштейном в сотрудничестве с его студенческим другом математиком М. Гроссманом в течение примерно полугода (со времени приезда Эйнштейна в Цюрих в октябре 1912 г. до середины весны 1913 г.). В апреле — мае 1913 г. (более точную датировку нам осуществить не удалось) Эйнштейн и Гроссман отослали в редакцию журнала «*Zeitschrift für Mathematik und Physik*» совместную работу: «Проект обобщенной теории относительности и теории тяготения» [250]. В основных положениях теории Эйнштейна — Гроссмана (так называли в 1913—1915 гг. этот первоначальный набросок ОТО) мы узнаем фундамент современной релятивистской теории тяготения. Во-первых, для анализа произвольных полей тяготения привлекаются произвольные непрерывные преобразования пространственно-временных переменных и основные законы физики формулируются в соответствии с требованием ковариантности относительно этих преобразований. Именно в этом расширении допустимых преобразований координат авторы усматривают обобщение специального принципа относительности и трактуют этот обобщенный (или общий) принцип относительности как равноправие произвольно движущихся систем отсчета. Во-вторых, обобщение принципа относительности при наличии гравитации позволяет обобщить псевдоевклидову метрику четырехмерного пространства — времени СТО до римановой метрики:

$$ds^2 = g_{ik} dx_i dx_k,$$

а компоненты метрического тензора, выражающего геометрическую структуру пространства — времени, отождествить с компонентами гравитационного потенциала. Тем самым, теория гравитации становится тензорной теорией поля и, одновременно, теорией пространства — времени. Наконец, в работе развивается математический аппарат теории — тензорный анализ в римановом пространстве, основы которого были заложены Риманом (1854 г.) и Кристоффелем (1869 г.) и затем развиты Риччи (1884 г.) и несколько позже Риччи и Леви-Чивитой (1901 г.).

В сочтении с принципом эквивалентности и признанием локальной справедливости СТО эти положения составляют ядро ОТО. Последовательное их развитие должно было привести к полному построению релятивистской теории тяготения и, прежде всего, к соответствующим уравнениям гравитационного поля. Но этого последнего шага Эйнштейн и Гроссман не сделали.

В вопросе об уравнениях поля тяготения был сделан ошибочный выбор, который задержал окончательную формулировку теории болс чем на два с половиной года. Тем не менее, в генезисе релятивистской теории тяготения «Проект» — это, несомненно, решающий поворот, сравнимый по своему значению только с выдвижением в 1907 г. принципа эквивалентности и с открытием обобщенных уравнений гравитации в ноябре 1915 г.

Остановимся несколько подробнее на вопросе о датировке этой важнейшей работы. Дело в том, что редакция журнала «*Zeitschrift für Mathematik und Physik*» не указывала даты поступления статей в редакцию; не указана в конце статьи также и дата завершения ее, как это обычно делалось в статьях для журналов «*Physikalische Zeitschrift*» или «*Annalen der Physik*». Статья напечатана в начале третьей тетради 62-го тома журнала. За ней следуют две статьи по прикладной математике, законченные в июне и сентябре 1912 г. Таким образом, редакция, по-видимому, в течение весьма длительного срока собирала статьи и затем публиковала их, не придерживаясь порядка, соответствующего времени их завершения или поступления. В конце 1912 г. Эйнштейн с Гроссманом напряженно работали над новой теорией и, можно предполагать, достигли весьма многого, но трудности с уравнениями гравитации задерживали публикацию.

В письме к Зоммерфельду от 29 октября 1912 г. Эйнштейн сообщал: «Теперь занимаюсь исключительно проблемой гравитации и надеюсь, что с помощью одного здесь товарища математика удастся устранить все трудности (речь идет, несомненно, о М. Гроссмане.— В. В.). Но одно точно: никогда в жизни я так не мучился, и теперь мне внушает большое уважение математика, тонкости которой раньше я по своей ограниченности считал роскошью. По сравнению с этой проблемой первоначальная теория относительности является просто детской игрушкой» [76, с. 191].

Имеется еще одно чрезвычайно интересное свидетельство. Это

третье письмо Эйнштейна к Маху, написанное, по-видимому, в конце декабря 1912 г. Это рождественское письмо, к сожалению, не датировано, но оно могло быть написано либо в декабре 1912 г., либо в декабре 1913 г. Содержание письма свидетельствует скорее в пользу первого варианта датировки.

Вот что пишет Эйнштейн в этом письме: «Меня очень радует дружеский интерес, который Вы проявляете к новой теории. Математические трудности, на которые наталкивается эта идея при ее развитии, к сожалению, и для меня очень велики. Меня чрезвычайно радует, что в развитии теории становится очевидной глубина и важность Ваших исследований по основаниям классической механики... Для меня является абсурдом приписывать «пространству» физические свойства. Совокупность масс порождает некоторое $G_{\mu\nu}$ -поле (поле тяготения), которое со своей стороны управляет течением всех процессов, включая распространение света и повседнежные масштабы и часов. Все сущее будет сначала относиться к четырем совершенно произвольным переменным. Они должны затем, если выполняются законы сохранения импульса и энергии, быть специализированы таким образом, что только (полностью) *линейные* подстановки приводят от одной правильной системы отсчета к другой. Система отсчета, так сказать, измеряет существующий мир с помощью принципа энергии и теряет свою туманную априористическую сущность.

В скором времени я пошлю Вам одно изложение предмета, в котором формально насколько возможно отходит на задний план, а существенное возможно более подчеркнуто. Но мне не удалось в этих абстрактных вещах полностью отделить существенное от формы» [391, с. 8; 96, с. 82—83].

Это письмо содержит набросок общековариантной тензорной теории тяготения, ограниченной затем требованием лишь линейной ковариантности. Таким образом, если исключить возможность написания этого письма в конце 1913 г., Эйнштейн и Гроссман к началу 1913 г. уже имели эскиз «новой теории». Работа эта, однако, была закончена только к концу апреля или середине мая. Эта датировка опирается также на письма Эйнштейна к Лаубу от 22 июля 1913 г. и к Маху от 25 июня (четвертое и последнее из известных писем Эйнштейна к Маху) [62, 214]. Своему бывшему сотруднику Лаубу, уехавшему работать в Аргентину, Эйнштейн сообщал: «Ваши письма с дикого Запада меня очень обрадовали. Не отвечал я потому, что отчаянно увяз в проблеме гравитации. Но вот уже месяца два как я с ней справился. В будущем году затмение Солнца должно показать, верны ли основные гипотезы. Соответствующее обобщение теории относительности удалось» [62, с. 120].

В письме к Маху Эйнштейн писал 25 июня: «Вероятно, Вы недавно получили мою новую работу об относительности и гравитации, которую я, наконец, закончил после бесконечных усилий и мучительных сомнений (речь, очевидно, может идти лишь о «Прокте». — В. В.). В будущем году во время солнечного зат-

меня будет проверено, изгибаются ли световые лучи Солнцем или, другими словами, верно ли основное и фундаментальное предположение об эквивалентности ускоренной системы и гравитационного поля.

Если это так, то Ваши вдохновляющие исследования об основах механики — вопреки несправедливой критике Планка — получат блестящее подтверждение» [214, с. 262].

Наконец, Нордстрем в своей статье «К теории тяготения с точки зрения принципа относительности», законченной в июле и поступившей в редакцию «Annalen der Physik» 24 июля, даст ссылку на «Проект», к этому времени, очевидно, уже опубликованный.

Таким образом, основы теории Эйнштейна — Гроссмана были разработаны, по-видимому, к началу 1913 г., первое ее изложение было закончено в апреле — мае и, по всей вероятности, опубликовано не позднее первой половины июня 1913 г.

Гроссман подключился к работе над проблемой тяготения после переезда Эйнштейна из Праги в Цюрих в сентябре — октябре 1912 г. Период их совместной деятельности — это естественное продолжение работы Эйнштейна в Праге (и до этого в Цюрихе). Ко времени переезда в Цюрих Эйнштейн, как мы видели, осознал неудовлетворительность скалярного подхода и во многих отношениях весьма близко подошел к теории, составившей впоследствии каркас ОТО.

Воспоминания Эйнштейна о событиях 1912—1913 гг. Прежде чем вернуться к тому состоянию проблемы гравитации накануне осени 1912 г., которое зафиксировано в статьях Эйнштейна, предшествующих этому времени, обратимся к воспоминаниям самого Эйнштейна о решающей фазе в генезисе ОТО.

Эйнштейн трижды писал об этом: в 1933 г. [293], в 1949 г. [296] и в 1955 г. [298].

В Гибсоновской лекции, прочитанной в 1933 г. в Университете Глазго, Эйнштейн так описывал ход своей мысли и ситуацию к осени 1912 г.:

«...Необходимо было построить теорию, уравнения которой сохраняют форму при нелинейных преобразованиях координат (к этому вели соображения, связанные с принципом эквивалентности.— В. В.). Удовлетворяют ли этому условию совершенно произвольные (непрерывные) преобразования или только некоторые преобразования координат, заранее я не знал.

Скоро я увидел, что при нелинейных преобразованиях, требуемых принципом эквивалентности, утрачивается простая физическая интерпретация координат, т. е. что больше уже нельзя требовать, чтобы разности координат были непосредственными результатами измерений с помощью идеальных линеек или часов. Уяснение этого обстоятельства доставило мне много беспокойства, так как я долго не мог понять, что же вообще должны означать координаты в физике. Решение этой дилеммы было найдено лишь в 1912 году, причем благодаря следующему рассуждению.

Требуется все-таки найти новую формулировку закона инерции, которая в отсутствие истинного «гравитационного поля» в инерциальной системе коор-

динат» переходила бы в галилееву формулировку принципа инерции. Согласно последней, материальная точка, на которую не действуют никакие силы, изображается в четырехмерном пространстве прямой линией, т. е. кратчайшей или, более точно, экстремальной линией. Это понятие предполагает существование длины линейного элемента, т. е. метрики. В специальной теории относительности — как показал Г. Минковский — эта метрика была квазиевклидовой, т. е. квадрат «длины» ds линейного элемента представлял собой определенную квадратичную функцию дифференциалов координат.

Если же вводятся другие координаты с помощью нелинейного преобразования, то ds^2 остается однородной функцией дифференциалов координат, но коэффициенты этой функции ($g_{\mu\nu}$) будут уже не постоянными, а некоторыми функциями координат. Математически это означает, что физическое (четырёхмерное) пространство обладает римановой метрикой. Временно-подобные экстремальные линии этой метрики определяют движение материальной точки, на которую не действуют другие силы, кроме гравитационных. Коэффициенты ($g_{\mu\nu}$) этой метрики одновременно описывают гравитационное поле по отношению к выбранной системе координат. Тем самым была найдена естественная формулировка принципа эквивалентности, распространение которой на произвольные гравитационные поля представлялось весьма естественным.

Таким образом, указанная выше дилемма разрешилась следующим образом: реальный физический смысл имеют не дифференциалы координат, а только соответствующая им риманова метрика. Тем самым были заложены основы общей теории относительности. Однако остались нерешенными еще две проблемы.

1. Если уравнения поля выражены в терминах специальной теории относительности, то как перенести их на случай римановой метрики?

2. Каковы дифференциальные уравнения, определяющие саму риманову метрику (т. е. $g_{\mu\nu}$)?

Над этими вопросами я работал с 1912 до 1914 года вместе с моим другом Марселем Гроссманом. Мы обнаружили, что математические методы для решения первой проблемы уже существовали в готовом виде в абсолютном дифференциальном исчислении Риччи и Леви-Чивиты.

Что же касается второй проблемы, то для её решения, очевидно, требовались дифференциальные выражения второго порядка из $g_{\mu\nu}$. Мы скоро увидели, что эти выражения уже были составлены Риманом (тензор кривизны). Еще за два года до опубликования общей теории относительности мы изучали правильные уравнения гравитационного поля, но не были убеждены в их физической применимости.

Напротив, я даже полагал, что они не могут подтвердиться на опыте. К тому же мне еще казалось, будто из весьма общих соображений можно показать, что закон тяготения, инвариантный относительно произвольных преобразований координат, несовместим с принципом причинности. Это заблуждение стоило мне двух лет чрезвычайно тяжелой работы, пока я, наконец, не убедился в этом в конце 1915 года и нашел связь теории с данными астрономических наблюдений, после чего я с раскаянием вернулся к римановой кривизне» [293, с. 405—406].

Спустя полтора десятилетия в «Автобиографических заметках» Эйнштейн эту же фазу в истории ОТО описывал так:

«Это произошло в 1908 г. (речь идет об открытии принципа эквивалентности, которое было в действительности сделано в конце 1907 г.— В. В.). Почему понадобилось еще 7 лет, чтобы построить общую теорию относительности? Главная причина заключается в следующем: не так легко освободиться от представления, что координаты имеют прямой метрический смысл. Переворот совершался примерно так <..> (Далее следует описание мысленного эксперимента, связанного с изменением пространственно-временных отношений в равноускоренных системах отсчета, введение которых в соответствии с принципом эквивалентности обусловлено релятивистским рассмотрением однородных гравитационных полей.— В. В.).

Но раз приходится отказаться от того, чтобы придавать координатам непосредственный метрический смысл (разность координат равна измеряемой длине или промежутку), то нельзя уже обойтись без признания равноценности всех координатных систем, получаемых путем непрерывных преобразований.

Сообразно этому общая теория относительности исходит из следующего основного положения. Законы природы должны выражаться такими уравнениями, которые были бы ковариантны относительно группы непрерывных преобразований координат. Эта группа становится здесь, таким образом, на место группы преобразований Лоренца.

<..> Путь, по которому я пошел при первой формулировке общей теории относительности, может быть характеризован следующим образом. Если мы и не знаем, каковы те переменные (та структура поля), которыми следует описывать физическое пространство, то нам достоверно известен один частный случай: «свободное от поля» пространство специальной теории относительности. Такое пространство характеризуется тем, что в надлежащей выбранной системе координат относящиеся к двум соседним точкам выражение

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - dx_4^2 \quad (1)$$

представляет измеримую величину (квадрат расстояния), следовательно, имеет реальный физический смысл. Отнесенная к произвольной системе эта величина выражается так:

$$ds^2 = g_{ik} dx_i dx_k \quad (2)$$

...Если после выполнения преобразования над выражением (полем) (1) получаются g_{ik} с не исчезающими первыми производными по координатам, то по отношению к этой системе координат существует как бы гравитационное поле.. а именно: гравитационное поле совсем частного вида. Благодаря римановым исследованиям n -мерных метрических пространств это особое поле может быть инвариантно характеризовано следующим образом:

1) Риманов тензор кривизны R_{iklm} , образованный из коэффициентов метрики (2), равен нулю.

2) По отношению к инерциальной системе ... траектория материальной точки есть прямая, а тем самым есть экстремаль (геодезическая). Последнее же утверждение представляет такую характеристику закона движения, которая опирается на выражение (2).

Общий закон физического пространства должен быть обобщением только что написанного закона» [296, с. 283—285]. Далее следуют соображения, ведущие к обобщенным уравнениям поля.

Прочитав, наконец, отрывок из «Автобиографических набросков», написанных в 1955 г. и посвященных М. Гроссману,

Эйнштейн говорит о принципе эквивалентности и трудностях его использования для построения теории произвольных полей, связанных с неопределенностью выбора расширенной группы преобразований и несовместимостью перехода к такой группе с непосредственной метрической интерпретацией пространственно-временных координат и затем продолжает:

«В 1909—1912 гг., в то время как я занимался теоретической физикой в Цюрихском и Пражском университетах, я непрерывно размышлял об этой проблеме. В 1912 г., когда меня пригласили на работу в Цюрихский политехникум, я уже значительно ближе подошел к решению этой проблемы. Важным здесь оказался анализ Германа Минковского формальных основ специальной теории относительности ... Принцип эквивалентности позволяет нам ввести в таком пространстве (четырёхмерном пространстве — времени Минковского.— В. В.) нелинейные преобразования координат ... Псевдоевклидова метрика принимает при этом общую форму

$$ds^2 = \sum g_{ik} dx_i dx_k;$$

...Эти g_{ik} являются тогда функциями четырех координат, которые согласно принципу эквивалентности кроме метрики описывают также «гравитационное поле». Конечно, гравитационное поле здесь имеет совершенно особый вид. Ибо с помощью преобразования метрику можно перевести в специальную форму

$$-dx_1^2 - dx_2^2 - dx_3^2 + dx_4^2,$$

т. е. в форму, в которой g_{ik} не зависят от координат. В этом случае описываемое посредством g_{ik} гравитационное поле можно «оттрансформировать». В последней специальной форме инерционные свойства изолированных тел выражаются (временноподобной) прямой линией. В общей форме им соответствуют «геодезические линии».

Эта формулировка относилась, правда, все еще к случаю псевдоевклидова пространства. Однако она ясно показала, как нужно осуществлять переход к гравитационным полям общего вида. Здесь также необходимо описывать гравитационное поле посредством некоторого рода метрики, т. е. симметричного тензорного поля g_{ik} . Обобщение состоит просто в том, что теперь нужно отбросить предположение о том, что это поле можно превратить в псевдоевклидово с помощью простого преобразования координат.

Тем самым проблема гравитации была сведена к чисто математической. Существуют ли дифференциальные уравнения для g_{ik} , которые инвариантны относительно нелинейных преобразований координат? Такие и только такие дифференциальные уравнения принимались во внимание как уравнения гравитационного поля. Закон движения материальной точки давался бы тогда уравнением геодезической линии.

С этой задачей в голове я навел в 1912 г. моего старого студенческого друга Марселя Гроссмана, который тем временем стал профессором математики в Швейцарском политехникуме. Он тотчас загорелся, хотя как настоящий математик имел несколько скептическую точку зрения на физику (...)

Вышло так, что хотя он охотно согласился совместно работать над проблемой, но все-таки с тем ограничением, что он не берет на себя никакой ответственности за какие-либо физические утверждения и интерпретации. Он

тщательно просмотрел литературу и скоро обнаружил, что указанная математическая проблема была уже решена прежде всего Риманом, Риччи и Леви-Чивитой. Это развитие в целом примыкало к теории кривизны поверхностей Гаусса ...Достижения Римана были наибольшими. Он показал, как из поля тензоров g_{ik} можно получить вторые производные. Из этого следовало, как должны выглядеть уравнения поля гравитации в случае, если поставлено требование инвариантности относительно группы всех непрерывных преобразований координат. Однако не так легко было принять это требование как обоснованное, так как я считал, что против него можно найти какие-то возражения. Эта, разумеется, ошибочная мысль привела к тому, что в своей окончательной форме теория появилась только в 1916 г.» [298, с. 353—355].

Анализ этих текстов приводит к следующим выводам.

1. Последовательность событий в разработке гравитационной проблемы, предшествующих «Проекту», описана Эйнштейном примерно одинаково. Это говорит в пользу правдоподобия изложенной версии.

2. Попытки включения гравитации в релятивистскую программу привели уже в 1907 г. (в тексте 1949 г. Эйнштейн ошибочно называет 1908 г.) к принципу эквивалентности и, вместе с ним, к необходимости расширения самой этой программы в направлении расширения фундаментальной группы преобразований так, чтобы она включила нелинейные преобразования координат. Это требование, однако, сразу же натолкнулось на препятствие «почти непреодолимое», связанное с невозможностью непосредственной метрической интерпретации координат в неинерциальных системах. Было также не ясно, какая именно (более широкая) группа должна заместить группу Лоренца.

Эти трудности, главным образом физического характера, существенно тормозили развитие проблемы. Путь к их разрешению, найденный Эйнштейном, по-видимому, в Праге летом 1912 г. заключался в следующем. Он детально рассмотрел случай «приводимых» полей тяготения, имеющих кинематическое происхождение, выдвигая при этом на первый план в качестве физически измеримой величины не координаты (или их разности), а метрику соответствующего четырехмерного пространства — времени. Важнейшим конструктивным средством здесь оказалась четырехмерная формулировка СТО Минковского, в которой метрика явно фигурирует как основная характеристика теории, а принцип инерции получает простую геометрическую форму. Переход к нелинейным преобразованиям переводит псевдоевклидову метрику в риманову: $ds^2 = g_{ik} dx_i dx_k$, а компоненты метрического тензора g_{ik} получают, в соответствии с принципом эквивалентности, смысл гравитационных потенциалов «приводимого» поля. Инерциальное движение материальной точки при этом интерпретируется как геодезическая (кратчайшая) линия в четырехмерном пространстве — времени. В результате возникает совершенно новый замысел теории гравитации, связанный с переходом от псевдоевклидовой метрики к римановой, с геометризацией интер-

претацией тяготения и обобщением релятивистской программы в целом.

По воспоминаниям Эйнштейна, таким образом, весь этот комплекс идей, образующих фундамент ОТО, был развит Эйнштейном ко времени его переезда в Цюрих (до начала его совместной работы с Гроссманом).

3. В итоге, развитие проблемы гравитации достигло принципиально нового уровня, на котором особое значение приобрела математика («...тем самым, проблема гравитации была сведена к чисто математической»), такая математика, которую Эйнштейн знал явно недостаточно. Для полного развития теории, прежде всего, общековариантной переформулировки основных физических законов и, особенно, построения удовлетворительных дифференциальных уравнений для g_{ik} (уравнений гравитационного поля), требовалось свободное владение новым математическим формализмом, к которому лишь подошел Эйнштейн. На этой стадии в работу по просьбе Эйнштейна включается Гроссман, профессиональный геометр, занимавшийся до этого не только начертательной геометрией (которую он преподавал в Цюрихском политехникуме), но и исследованиями в области дифференциальной и неевклидовой геометрии. Это содружество принесло замечательные плоды. Гроссман, перед которым Эйнштейн поставил четко сформулированную математическую задачу и которого он сумел увлечь грандиозным научным замыслом, быстро нашел необходимые математические средства для дальнейшего развития теории. Речь идет об абсолютном дифференциальном исчислении Риччи и Леви-Чивиты, основы которого были заложены Риманом и Кристоффелем. Эйнштейн и Гроссман, применив аппарат римановой геометрии и тензорного анализа, решили задачу общековариантной переформулировки законов физики и, тем самым, задачу о взаимодействии гравитации с «материей» и вплотную приблизились к правильным уравнениям гравитационного поля.

Работы, предшествующие «Проекту»

Было бы теперь интересно сопоставить это зафиксированное в памяти Эйнштейна представление о решающей фазе в генезисе ОТО с той картиной, которая складывается на основе анализа работ Эйнштейна, предшествующих «Проекту». Прежде всего, вернемся к концу пражского периода и рассмотрим под этим углом зрения его последние работы по теории статического поля (март — апрель 1912 г.), завершающую стадию его дискуссии с Абрагамом (июль 1912 г.) и некоторые другие материалы.

Основная трудность (утрата координатами непосредственно метрического смысла), которая встала на пути развития релятивистской теории тяготения была ясно осознана Эйнштейном, по крайней мере, весной — летом 1912 г.: «...Принцип эквивалентности открывает нам интересную перспективу — уравнения тео-

рии относительности, охватывающей гравитацию, должны быть инвариантны также относительно преобразований ускорения (и вращения). Однако путь к этой цели представляется нам весьма трудным. Уже из рассмотренного до сих пор очень частного случая тяготения покоящихся масс видно, что пространственно-временные координаты теряют свой простой физический смысл и нельзя предвидеть, какую форму могут иметь общие уравнения пространственно-временных преобразований» [248, с. 221]. Одного лишь принципа эквивалентности было недостаточно, чтобы преодолеть это препятствие и чтобы указать конкретный вид расширенной группы преобразований, призванной заменить группу Лоренца.

Примерно в это же время Эйнштейн нащупывает путь к решению этих проблем. В мартовской статье по теории статического поля, точнее, в корректурном дополнении к ней, он впервые вводит фундаментальную метрическую форму для формулировки уравнений движения материальной части в гравитационном поле. Здесь он берет на вооружение четырехмерную концепцию СТО, выдвинутую Минковским, а также основанную на принципе Гамильтона формулировку уравнений движения частицы в СТО, предложенную в 1906 г. Планком:

$$\delta \int ds = 0, \quad (1)$$

$$\text{где } ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2. \quad (2)$$

Только метрика пространства — времени в статическом поле тяготения характеризуется зависимостью скорости света от положения, т. е. $c = c(x, y, z)$, и тогда:

$$ds^2 = c^2(x, y, z) dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2. \quad (3)$$

Тем самым, геометрия пространства-времени уже не может быть псевдоевклидовой, и это, по-видимому, понимал Эйнштейн. Уже в февральской статье по теории статического поля он отмечал возможность нарушения евклидовых соотношений: «Так, например, весьма вероятно, что они несправедливы в равномерно вращающейся системе, в которой вследствие лоренцова сокращения отношение длины окружности к диаметру при применении нашего определения длины должно отличаться от π » [246, с. 190].

Реальное физическое значение приобрела теперь метрика, а не сами координаты. Именно через посредство метрики геометрические свойства сближались (или даже отождествлялись) с характеристиками гравитации. Простой геометрический смысл приобретали при этом и уравнения движения тел, а именно смысл геодезических (или кратчайших) линий в четырехмерном пространстве с неевклидовой метрикой (3), которая, кстати говоря, уже означала выход в искривленное пространство со специализированным, но отличным от нуля, тензором кривизны

(и, соответственно, тензором Риччи)

$$R_{i4}^i = -c \frac{\partial^2 c}{\partial x^i \partial x^i} \quad (i, j = 1, 2, 3), \quad (4)$$

$$R_{ij} = \frac{1}{c} \frac{\partial^2 c}{\partial x^i \partial x^j}, \quad R_{i4} = 0, \quad R_{44} = -c \nabla^2 c. \quad (5)$$

Хотя сто́ит еще раз подчеркнуть, что наличие лишь линейной зависимости скорости света $c(x, y, z)$ от координат, справедливой при включении только однородных полей тяготения, приводит к обращению в нуль тензоров кривизны (4) и (5) и, таким образом, оставляет пространство — время плоским.

В мартовской статье Эйнштейн замечает: «Написанное в конце уравнение Гамильтона (здесь (1) с учетом (3). — В. В.) позволяет предположить, как должны быть построены уравнения движения материальной точки в динамическом гравитационном поле» [247, с. 216]. Как именно, Эйнштейн здесь не пишет, хотя, если судить по воспоминаниям, это, в общем, было ему ясно еще до Цюриха. По-видимому, он представлял себе дело следующим образом.

Уравнения движения частицы в динамическом (или произвольно меняющемся) гравитационном поле выражаются с помощью принципа Гамильтона в форме (1). Но метрика в общей ситуации должна выглядеть более сложно, чем в статическом случае. Даже включение однородных полей в соответствии с принципом эквивалентности приводит к нелинейным преобразованиям координат, посредством которых метрика преобразуется

$$ds^2 = g_{ik} dx_i dx_k. \quad (6)$$

В общей ситуации коэффициенты g_{ik} могут быть произвольными функциями координат, и именно они определяют, согласно (1), характер движения материальной точки в поле тяготения. Если в теории статического поля такой функцией был лишь коэффициент при dt^2 (т. е. квадрат скорости света — см. (2) — он-то и связывался или отождествлялся с гравитационным потенциалом, — то теперь роль потенциала должна играть вся совокупность величин g_{ik} . Таким образом, принцип эквивалентности и применение четырехмерного метрического подхода к теории статического поля весьма естественно приводили к трем фундаментальным идеям, лежащим в основе будущей ОТО: 1) утрата координатами непосредственного физического смысла и выдвигание на первый план пространственно-временной метрики, а значит, и геометрической структуры пространства-времени, которая при наличии гравитации может быть неевклидовой; 2) эта метрика в общем случае оказывается римановой, основное значение приобретает метрический тензор g_{ik} ; 3) g_{ik} , выражающий структуру пространства-времени при наличии гравитации, является и адекватной характеристикой гравитационного поля (по-

тенциалом поля); 4) в результате, теория поля оказывается тензорной.

Такой ход мысли подтверждается, правда, несколько косвенным образом, одним абзацем из июльского ответа Эйнштейна на критику Абрагама. Эйнштейн рассматривает вопрос о возможной размерности гравитационных потенциалов в рамках СТО и делает вывод, что и скалярный, и векторный характер потенциалов приводит к результатам, «которые противоречат указанным выше следствиям из положения о тяжелой массе энергии». Поэтому, заключает Эйнштейн, «вектор гравитационного поля (имеются в виду 4-вектор и 6-вектор напряженности, а значит, скалярный и векторный потенциал.— В. В.), по-видимому, не может быть введен без противоречий в схему теперешней теории относительности» [248, с. 220].

Таким образом, есть основания считать, что картина, нарисованная Эйнштейном в его воспоминаниях о положении в области теории тяготения, к началу осени 1912 г. близка к действительности. Вместе с тем, подчеркнем, что до приезда Эйнштейна в Цюрих мы не находим в его статьях и прочих документах этого времени (например, письмах) явных выводов о римановой метрике, отождествлении метрического тензора с гравитационными потенциалами и необходимости перехода к тензорной теории тяготения.

М. Гроссман. «Проект» состоит из двух почти одинаковых по объему частей: физической, написанной Эйнштейном, и математической, написанной Гроссманом. Марсель Гроссман (1878—1936) учился вместе с Эйнштейном в Цюрихском политехникуме, был его другом. После окончания политехникума он получил должность приват-доцента математики в Базельском университете, а с 1907 г. стал профессором начертательной геометрии и проекционного черчения. Помимо преподавательской деятельности, он вел интенсивную научную работу в области геометрии, в частности, дифференциальной и неевклидовой [375—379]. Незадолго до своей смерти Минковский, характеризуя выпускников курса, на котором учились Гроссман и Эйнштейн, писал председателю Швейцарского совета по делам образования: «...Именно этот немногочисленный курс факультета VI-A дал видных исследователей: Альберта Эйнштейна, Вальтера Ритца и Марселя Гроссмана» [62, с. 110] и математика Луи Колльроса, о котором Минковский говорил несколько раньше. Когда Эйнштейн в сентябре 1912 г. приехал в Цюрих, Гроссман заведовал факультетом VIII, который готовил преподавателей математики и физики. Именно на этом факультете Эйнштейн начал читать лекции по различным разделам теоретической физики. С этого времени и начинается творческое содружество Эйнштейна и Гроссмана. Как вспоминает другой «политехник» Л. Колльрос, вскоре после своего возвращения в Цюрих Эйнштейн «говорил с Гроссманом о своих заботах (в области гравитации.— В. В.) и сказал ему однажды: «Гроссман, ты должен мне помочь, иначе я сойду с

ума! (Grossmann, Du mußt mir helfen, sonst werd Ich verrückt!)» [426, с. 27].

В цитированном уже письме к Зоммерфельду от 29 октября 1912 г. Эйнштейн сообщал о своей совместной работе с Гроссманом над тензорно-геометрической теорией тяготения и о тех огромных математических трудностях, с которыми они столкнулись при этом. Таким образом, в октябре совместная работа Эйнштейна и Гроссмана была в полном разгаре и, можно думать, к этому времени они уже использовали «абсолютное дифференциальное исчисление» как наиболее адекватную гравитации математическую структуру.

Третье письмо Эйнштейна к Маху. Прежде чем перейти непосредственно к анализу «Проекта», напомним, что уже в третьем письме Эйнштейна к Маху, которое мы приводили почти полностью, явно говорится о тензорном характере гравитационного поля (вероятно, впервые), которое одновременно выражает геометрию пространства-времени (« $G_{\mu\nu}$ — поле (поле тяготения), которое со своей стороны управляет течением всех процессов, включая распространение света и поведение масштабов и часов» [391, с. 8]). Затем речь идет о принципе общей ковариантности («Все сущее будет сначала относиться к четырем совершенно произвольным переменным»), который, однако, не удавалось, как полагал Эйнштейн, распространить полностью на гравитацию. Главный аргумент против этого распространения он видит в законе сохранения энергии-импульса, который, казалось, мог быть ясно сформулирован лишь в классе систем отсчета, связанных линейными преобразованиями. По-видимому, вынужденный отказ от требования общей ковариантности, предшествующие ему усилия согласовать разрабатываемую схему с этим требованием и фундаментальными принципами физики (такими, как принцип сохранения энергии), последующие попытки найти нековариантные уравнения поля — все это задерживало публикацию новой теории.

Конечно, трудности физического характера были сопряжены с математическими трудностями, о которых писал Эйнштейн.

«Проект» — первое изложение теории

«Физическая часть». В коротком введении «Проекта» излагается прежде всего принцип эквивалентности, основанный на факте пропорциональности инертной и тяжелой масс. Эйнштейн ссылается на свои более ранние работы 1911 и 1912 гг. [242, 246], в которых этот принцип рассматривался подробно, а также на две работы Этвеша [351], в которых пропорциональность тяжелой и инертной масс была проверена с весьма большой точностью (порядка $0,5 \cdot 10^{-7}$). Описав опыт Этвеша, Эйнштейн замечает, что «если бы... изменения инертной массы (связанным с распадом радиоактивных веществ.— В. В.) не соответствовали изменениям тяжелой массы, то отклонения инертной массы от тяжелой

должны были бы значительно превышать допускаемое опытами Этвеша» [250, с. 228].

Первый параграф «Уравнения движения материальной точки в статическом гравитационном поле» устанавливает преемственность новой теории со статическими теориями Эйнштейна 1912 г.: «В предыдущих работах я показал, что гипотеза эквивалентности ведет к следствию, что в статическом гравитационном поле скорость c зависит от гравитационного потенциала. Тем самым я пришел к выводу, что обычная теория относительности является лишь приближенной... Кроме того, я обнаружил, что уравнениями движения материальной точки в статическом гравитационном поле по-прежнему служат уравнения (1) или (1a) $\delta \left\{ \int ds \right\} = \delta \left\{ \int \sqrt{-dx^2 - dy^2 - dz^2 + c^2 dt^2} \right\} = 0$ или $\delta \left\{ \int H dt \right\} = 0$, $H = (-ds/dt)m - B$. В.), однако при этом c следует рассматривать не как постоянную, а как функцию пространственных координат, представляющую меру гравитационного потенциала» [250, с. 229]. Напомнив некоторые формулы статической теории, Эйнштейн, в частности, подчеркивает наличие обратнопропорциональной зависимости импульса и кинетической энергии медленно движущейся материальной точки от гравитационного потенциала, заканчивая параграф ссылкой на маховскую концепцию инерции: «Это согласуется со смелой мыслью Маха о том, что причиной инерции является взаимодействие рассматриваемой материальной точки со всеми остальными...» [250, с. 230].

В следующем параграфе «Уравнения движения материальной точки в произвольном гравитационном поле, характеристика последнего» Эйнштейн делает решающий шаг, переходя к тензорной общековариантной программе построения теории тяготения. При этом волепроизводится та самая логика рассуждений, которая уже намечалась в статьях по статической теории и о которой он вспоминал впоследствии в «Автобиографических заметках». Переменная скорость света c означает выход за рамки СТО и допущение, наряду с инерциальными, произвольно движущихся систем отсчета. Статическая теория должна содержаться в теории произвольных полей тяготения как частный случай. Если в некоторой системе $K(x, y, z, t)$ гравитационное поле статическое и уравнение движения материальной точки в ней выражается формулой (1), то переход к системе $K'(x', y', z', t')$ посредством произвольного непрерывного преобразования

$$\begin{aligned} x' &= x'(x, y, z, t), \\ y' &= y'(x, y, z, t), \\ z' &= z'(x, y, z, t), \\ t' &= t'(x, y, z, t) \end{aligned} \quad (7)$$

оставляет уравнение (1) без изменения с той лишь разницей, что метрика ds' приобретает в K' следующий вид:

$$ds'^2 = g_{11}dx'^2 + g_{22}dy'^2 + 2g_{12}dx'dy' + \dots,$$

где $g_{\mu\nu}$ ($\mu, \nu=1, 2, 3, 4$), являются функциями координат и $g_{\mu\nu}=g_{\nu\mu}$. Таким образом, форма уравнений движения в произвольно движущихся системах отсчета имеет вид (1), т. е.

$$\delta \left\{ \int ds \right\} = 0,$$

причем

$$ds^2 = \sum_{\mu\nu} g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu. \quad (8)$$

Так впервые появляются $g_{\mu\nu}$, и Эйнштейн незамедлительно делает вывод: «Таким образом, мы приходим к убеждению, что в общем случае гравитационное поле характеризуется десятью пространственно-временными функциями

$$\begin{array}{cccc} g_{11} & \dots & \dots & g_{14} \\ \vdots & & & \vdots \\ g_{41} & \dots & \dots & g_{44} \end{array} \quad (g_{\mu\nu} = g_{\nu\mu}),$$

которые в случае обычной теории относительности соответственно равны:

$$\begin{array}{cccc} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c^2, \end{array}$$

где c — постоянная» [250, с. 231].

В случае статического поля $g_{\mu\nu}$ имеет такой же вид, что и в СТО, только c — не постоянная, а функция пространственных координат. Затем из соображений, связанных с принципом соответствия, выписывается лагранжиан

$$H = -m \frac{ds}{dt} = -m \times \sqrt{g_{11}x_1^2 + \dots + 2g_{12}x_1x_2 + \dots + 2g_{14}x_1 + \dots + g_{44}}, \quad (9)$$

который позволяет получить и уравнения движения, и выражения для импульса, энергии и силы, характерные для материальной точки в гравитационном поле.

Например, x -компонента силы K_x записывается в виде:

$$K_x = -\frac{1}{2} m \sum_{\mu\nu} \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x_1} \frac{dx_\mu}{ds} \frac{dx_\nu}{ds}. \quad (10)$$

В конце параграфа Эйнштейн еще раз подчеркивает, что «в обычной теории относительности допускаются только линейные ортогональные преобразования», в новой же теории гравитации, как это уже ясно из изложенного и как это более обстоятельно будет показано в дальнейшем, «для описания воздействия

гравитационного поля на материальные процессы можно составить уравнения, ковариантные относительно произвольных (непрерывных.— В. В.) преобразований» [250, с. 232]. Тем самым, возникает программа общековариантной теории с фундаментальным (абсолютным) инвариантом в виде метрики ds . Основные же физические величины приобретают характер общековариантных тензоров (например, $g_{\mu\nu}$ — метрический тензор, называемый Эйнштейном «ковариантным фундаментальным тензором»), векторов, скаляров.

«Математическая часть». При обсуждении свойств фундаментального тензора $g_{\mu\nu}$ Эйнштейн впервые ссылается на «Математическую часть», написанную Гроссманом. «Математический аппарат для построения векторного анализа гравитационного поля, характеризуемого инвариантным элементом длины

$$ds^2 = \sum_{\mu\nu} g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu,$$

по существу, заложен в фундаментальной работе Кристоффеля о преобразовании квадратичных дифференциальных форм. Исходя из результатов Кристоффеля, Риччи и Леви-Чивита развили свой метод абсолютного, т. е. независимого от координатной системы, дифференциального исчисления, который позволяет придать инвариантную форму дифференциальным уравнениям математической физики», — так начинается раздел, написанный Гроссманом, который ссылается на работы Кристоффеля (1869) и Риччи и Леви-Чивиты (1901) [250, с. 248]. Кстати говоря, Кристоффель был как раз основателем и первым деканом физико-математического факультета Цюрихского политехникума.

Здесь уместно обсудить вопрос о том, как и когда Эйнштейн впервые пришел к мысли об использовании римановой геометрии и тензорного анализа в теории тяготения. Весьма распространенной является версия, что это произошло уже после приезда Эйнштейна в Цюрих и его встречи с Гроссманом. Вместе с тем, по воспоминаниям Эйнштейна, идея использования римановой метрики, тензорный характер гравитации, отождествление метрического тензора с гравитационным потенциалом — все это пришло к нему еще в Праге, до начала его творческого контакта с Гроссманом. Об этом свидетельствует и работа Ф. Франка [361]*. Одним из наиболее близких друзей Эйнштейна в Праге был математик Г. Пик, который, по словам Франка, и подсказал ему идею использования «абсолютного дифференциального исчисления» Риччи и Леви-Чивиты: «Эйнштейн и Пик встречались почти ежедневно и вместе обсуждали многие проблемы. В ходе продолжительных прогулок Эйнштейн рассказывал Пикку о математиче-

* Ф. Франк сменил Эйнштейна на кафедре теоретической физики в Пражском университете после отъезда последнего в Цюрих. Впоследствии Франк написал интересный обзор [361] жизни и творчества основателя теории относительности

ских трудностях, на которые натолкнулся он при обобщении теории относительности. Уже в это время Пик подал ему мысль, что подходящим математическим инструментом для дальнейшего развития его исследований в этой области является «абсолютное дифференциальное исчисление» итальянских математиков Риччи и Леви-Чивиты» [361, с. 82]. В другом месте Франк писал: «...Эйнштейн уже во время своего пребывания в Праге понял, что развитие более общей теории (относительности и гравитации.— В. В.) требует более сложного математического метода... Он обсуждал это со своим коллегой Пиком, который привлек его внимание к новой математической теории итальянцев Риччи и Леви-Чивиты» [361, с. 103].

Эта версия подтверждается еще и тем, что Пик именно в 1911 г. занимался дифференциальной геометрией в неевклидовых пространствах. В «*Compt. Rend.*» за 1911 г. была опубликована его небольшая статья о параллельных прямых и параллельном переносе в неевклидовой геометрии [499]. Имя его не оставило заметных следов в истории дифференциальной и неевклидовой геометрии. Тем не менее, контакт с ним мог оказаться для Эйнштейна очень плодотворным, так как он живо интересовался физикой и, в частности, теорией относительности, методологическими проблемами физики и, наконец, был исключительно эрудированным и творчески мыслящим математиком. Ф. Франк писал о нем: «Пик был, главным образом, творческим умом в области математики. В ряде очень коротких статей он опубликовал много точно сформулированных идей, которые развивались затем другими как целые независимые области математики» [361, с. 82]. По-видимому, Пик был также своеобразным резонатором идей своего учителя, это был один из важнейших каналов воздействия методологии Маха на Эйнштейна в пражский период его творчества.

Итак, вернемся к «Математической части» «Проекта». Во введении Гроссман делает еще два замечания, заслуживающие внимания. Во-первых, он подчеркивает, что на «общую теорию Эйнштейна без труда распространяются понятия векторного анализа, разработанные Минковским, Зоммерфельдом, Лауэ и другими для специальной теории относительности», так как «векторный анализ для произвольных криволинейных координат в евклидовом пространстве формально тождествен векторному анализу в произвольном многообразии, заданном своим линейным элементом» [250, с. 248]. (Говоря о векторном анализе, Гроссман имеет в виду, конечно, тензорный анализ.) Таким образом, еще раз подчеркивается существенное значение четырехмерной формулировки СТО и связанного с ним тензорного исчисления. Такие фундаментальные физические характеристики как тензор напряженностей электромагнитного поля, тензоры энергии — импульса и момента импульса, соответствующие векторные и скалярные величины естественно переносились и в новую теорию.

Во-вторых, Гроссман упоминает о том, что некоторые аспекты общего тензорного анализа, правда, в связи только с электродинамикой, незадолго до этого (а именно, в 1912 г.) разрабатывал австрийский теоретик Ф. Коттлер. Ссылку на Коттлера в «Физической части» делает и Эйнштейн, обсуждая в § 6 общеквариантную формулировку уравнений электродинамики. Остановимся поэтому коротко на этой работе Коттлера, который некоторым образом предвосхитил использование общего четырехмерного анализа в физике*.

Почти стостраничная диссертация Коттлера «О пространственно-временных линиях Мира Минковского» была опубликована в октябре 1912 года [428]. Основной смысл работы заключался в том, чтобы к весьма сложным задачам релятивистской теории электрона подключить мощный и уточненный математический аппарат — теорию интегральных форм и теорию инвариантов квадратичных дифференциальных форм. Коттлер не касался вообще проблемы тяготения и не использовал новую геометрию пространства-времени. «Настоящая работа,— писал он во Введении,— имеет дело с теорией точечного заряда, развиваемой на основе представлений Минковского. Вводные параграфы содержат обсуждение интегральных форм Гурса и теорию инвариантов некоторой квадратичной дифференциальной формы Риччи и Леви-Чивиты» [428, с. 1659]. Этот аппарат затем применяется для четырехмерного пространства-времени Минковского, в частности, дается формулировка уравнений Максвелла в произвольных криволинейных координатах (именно на этот раздел ссылается Эйнштейн).

Затем Коттлер дает обобщение запаздывающих потенциалов Вихерта-Шварцшильда для произвольных криволинейных координат и применяет их (и весь этот формализм) к задачам о вычислении различных сил, действующих на точечный и неточечный электрон. Коттлер ссылается в своей диссертации на две группы работ: физическую и математическую. Физические работы относятся к теории электрона и релятивистской теории твердого тела (ссылки на Лоренца, Абрагама, Зоммерфельда, Герглота), а математические — к теории интегральных форм Гурса и теории инвариантов дифференциальных квадратичных форм или «абсолютному дифференциальному исчислению» (ссылки на Кристоффеля, Риччи и Леви-Чивиту, а также, по-видимому, первую монографию по этому разделу математики, написанную в 1908 г. американским математиком Дж. Райтом [585]). Коттлер упоминает еще одну работу, именно, статью английского теоретика Бэйтмэна, написанную в 1910 г. [24].

Дело в том, что Уиттекер приписывает Бэйтмэну, ссылаясь именно на эту статью, первое применение «абсолютного диффе-

* Коттлер с 1914 г. активно разрабатывал физические аспекты относительности движения сначала в теории Эйнштейна — Гроссмана, а затем в ОТО [429—434].

рещионального исчисления» в физике до Коттлера и Эйнштейна [573]. Но Коттлер ссылается на эту статью в связи с теорией интегральных форм Гурса, хотя во введении у Бэйтмена содержится замечание, что теория преобразования интегральных форм тесно связана с двумя теоремами, используемыми Риччи и Леви-Чивитой в их статье 1901 г. [519].

Статья Бэйтмена замечательна в другом отношении — в ней была впервые явно установлена конформная инвариантность уравнений Максвелла, чему в основном (наряду с использованием аппарата интегральных форм в электродинамике) и посвящена эта работа.

Таким образом, и Бэйтмен в 1910 г., и Коттлер в 1912 г. уже пытались признать общий тензорный анализ и риманову геометрию к задачам электродинамики. Коттлер даже дал общековариантную формулировку уравнений Максвелла. Однако в этих случаях новый аппарат имел исключительно вспомогательное значение. Использование произвольных криволинейных координат и общековариантной записи не было связано с обобщением принципа относительности, метрическому тензору не придавалось ни физического, ни даже геометрического значения. Коттлер находился в рамках пространства-времени Минковского. Бэйтмен же, хотя и вышел за рамки псевдоевклидовой геометрии, выдвинул лишь идею инвариантности электродинамики относительно конформных преобразований, образующих 15-параметрическую непрерывную группу, но не относительно произвольных непрерывных преобразований. Тем не менее в формальном отношении работа Коттлера была определенным достижением, и авторы «Проекта» несколько раз сослались на него в своей работе.

Едва ли, впрочем, работа Коттлера могла существенно повлиять на исследование Эйнштейна и Гроссмана, так как она появилась в печати не раньше октября 1912 г., когда, судя по всему, работа над тензорной теорией тяготения была в полном разгаре. Правда, Эйнштейн, работая в Праге, мог познакомиться с диссертацией Коттлера до ее публикации, т. к. она была доложена на заседании Венской академии наук 4 июля 1912 г. В сочетании со стимулирующими замечаниями Пика, работа Коттлера, таким образом, могла сыграть роль дополнительного мостика на пути к синтезу формализма Риччи и Леви-Чивиты с теорией тяготения.

«Математическая часть» Гроссмана состоит из четырех параграфов (§ 1 «Общие тензоры», § 2 «Дифференциальные операции над тензорами», § 3 «Специальные тензоры» и § 4 «Математические дополнения к физической части»). В § 1 даются определения тензоров, описываются их трансформационные законы при произвольных непрерывных преобразованиях, вводятся алгебраические операции над тензорами. Затем (§ 2) вводятся дифференциальные операции над тензорами: ковариантное дифференцирование, где появляются символы Кристоффеля; построение дивергенции и лапласиана для скаляров, векторов и тензоров второго

ранга. Теория специальных тензоров (§ 3) — это применение общего тензорного исчисления к антисимметричным тензорам. В значительной мере эта работа для четырехмерного случая уже была проделана Коттлером (тензор напряженностей электромагнитного поля как раз относится к такого рода тензорам). Материал § 4 рассмотрим при обсуждении соответствующих пунктов «Физической части».

Закон сохранения энергии-импульса материи в присутствии гравитации. Вернемся снова к «Физической части». В третьем параграфе Эйнштейн обсуждает вопрос о физическом значении метрики ds^2 и метрического тензора g_{ik} . Он напоминает, что еще в 1911 г. им было показано отсутствие простой, характерной для СТО, связи между пространственно-временными координатами и измерениями с помощью линсек и часов уже при наличии однородных гравитационных полей. Какой же тогда физический смысл следует приписать координатам? Основное физическое значение теперь приобретает метрика ds , имеющая смысл «инвариантной меры для расстояния между двумя соседними пространственно-временными точками». Поскольку локально остается в силе СТО, метрика посредством линейного преобразования координат в окрестности некоторой точки может быть приведена к виду:

$$ds^2 = d\xi_1^2 + d\xi_2^2 + d\xi_3^2 - d\xi_4^2.$$

Тогда «в этой элементарной $d\xi$ -системе справедлива обычная теория относительности, а расстояния и промежутки имеют в этой системе такой же физический смысл, как и в обычной теории относительности» [250, с. 233].

Если рассматривается гравитационное поле в некоторой системе координат, то метрика ds может быть определена, если известны компоненты метрического тензора g_{ik} в этой системе, определяющие гравитационное поле. Тем самым «гравитационное поле влияет на измерительные тела и часы вполне определенным образом» [там же].

Следующий параграф («Движение непрерывно распределенных масс в произвольном поле тяжести») посвящен выводу закона сохранения энергии-импульса некоторой материальной системы, характеризуемой тензором энергии-импульса, в присутствии гравитации. Рассмотрение ведется для случая «непрерывно распределенных несвязанных масс», а затем утверждается, что полученный результат, т. е. обобщенный дифференциальный закон сохранения энергии-импульса

$$\sum_{\mu\nu} \frac{\partial}{\partial x_\nu} (\sqrt{-g} g_{\sigma\mu} \theta_{\mu\nu}) - \frac{1}{2} \sum_{\mu\nu} \sqrt{-g} \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x_\sigma} \theta_{\mu\nu} = 0, \quad (11)$$

имеет силу и для произвольных материальных систем с тензором энергии-импульса $\theta_{\mu\nu}$ в произвольных гравитационных полях $g_{\mu\nu}$.

Для указанной материальной системы вычисляются импульсы

и пондеромоторная сила, отнесенные к единице объема, а затем применяется обычная релятивистская формулировка закона сохранения энергии-импульса:

$$\frac{I_x}{V} = -\rho_0 \sqrt{-g} \sum_{\nu} g_{1\nu} \frac{dx_{\nu}}{ds} \frac{dx_1}{ds}, \quad (12)$$

$$K_x = -\frac{1}{2} \rho_0 \sqrt{-g} \sum_{\mu\nu} \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x_1} \frac{dx_{\mu}}{ds} \frac{dx_{\nu}}{ds}. \quad (13)$$

Тогда, учитывая, что

$$\theta_{\mu\nu} = \rho_0 \frac{dx_{\mu}}{ds} \frac{dx_{\nu}}{ds}, \quad (14)$$

закон сохранения энергии-импульса в присутствии гравитационного поля записывается в виде (11). Общую ковариантность этой формулировки закона сохранения энергии-импульса доказал Гроссман в «Математической части» [250, с. 260]. Он простым расчетом показал, что левая часть соотношения (11) представляет собой ковариантную дивергенцию тензора энергий-импульса «материи», и обращение ее в нуль есть, таким образом, общековариантное уравнение. Первый член в уравнении (11) имеет обычный смысл производной по координатам от тензора энергии-импульса и служит выражением закона сохранения энергии-импульса в отсутствие гравитации, второй же «выражает влияние гравитационного поля на материальный процесс».

Проблема уравнений гравитационного поля

Раздел «Дифференциальные уравнения гравитационного поля» (§ 5) является центральным, хотя, как выяснилось позже, именно проблема уравнений оказалась камнем преткновения для теории Эйнштейна-Гроссмана 1913 г. Эйнштейн ставит задачу общековариантного и тензорного обобщения уравнения Пуассона для скалярного потенциала

$$\Delta\varphi = 4\pi\kappa\rho, \quad (15)$$

где ρ — плотность «материи», φ — потенциал поля, а κ — гравитационная постоянная. Здесь, таким образом, он пользуется одним из основных методологических принципов физики — принципом соответствия. Он ищет указанное обобщение в виде

$$\Gamma_{\mu\nu} = \kappa\theta_{\mu\nu} \quad (\mu, \nu = 1, 2, 3, 4), \quad (16)$$

где $\theta_{\mu\nu}$ призван заменить скалярную плотность «материи» ρ при релятивистском подходе, а $\Gamma_{\mu\nu}$ — некоторый еще не известный общековариантный тензор второго ранга, обобщающий лапласиан и потому составленный из производных компонентов потенциала g_{ik} до второго порядка. Ранг тензора $\Gamma_{\mu\nu}$ определяется рангом тензора $\theta_{\mu\nu}$, его общековариантный характер — общим принципом

относительности, выражающимся в требовании общей ковариантности фундаментальных уравнений физики; порядок производных $g_{\mu\nu}$, составляющих этот тензор, определяется как раз принципом соответствия (тензор $\Gamma_{\mu\nu}$ в пределе слабых полей и малых скоростей должен сводиться к лапласиану). Сама же форма уравнения (16) также определяется принципом соответствия (уравнения (16) в указанном выше пределе должны переходить в уравнение Пуассона).

В пространстве, свободном от материи, уравнения (16) переходят в уравнение

$$\Gamma_{\mu\nu} = 0, \quad (17)$$

аналогичные уравнению Лапласа. Теперь, казалось, задача отыскания уравнений поля тяготения свелась к отысканию фундаментального общековариантного тензора второго ранга, составленного из производных $g_{\mu\nu}$ по координатам до второго порядка.

«Абсолютное дифференциальное исчисление» указывало прямой путь к построению такого тензора, и Гроссман в § 4 находит этот путь: «Проблема нахождения дифференциальных уравнений гравитационного поля связана с рассмотрением дифференциальных инвариантов и дифференциальных ковариантов квадратичной формы

$$ds^2 = \sum_{\mu\nu} g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu.$$

(...) Полная система этих дифференциальных тензоров (относительно произвольных преобразований) сводится к найденному Риманом и независимо Кристоффелем ковариантному дифференциальному тензору четвертого ранга, который будем называть дифференциальным тензором Римана» [250, с. 261].

Этот путь сразу же приводит к замечательному выводу: тензор $\Gamma_{\mu\nu}$ должен совпадать с тензором Риччи, двухранговым аналогом тензора Римана, который является тензором четвертого ранга (это и есть знаменитый тензор Римана-Кристоффеля, или тензор кривизны). Вот как этот вывод формулируется Гроссманом: «Важнейшее значение этих понятий (тензора кривизны и его различных представлений.— В. В.) для дифференциальной геометрии многообразия, заданного своим линейным элементом, позволяет априори предположить, что эти обобщенные дифференциальные тензоры могут оказаться полезными и для составления дифференциальных уравнений гравитационного поля. Действительно можно сразу указать ковариантный тензор второго ранга и второго порядка G_{im} , который мог бы входить в эти уравнения, а именно: $G_{im} = \sum_{kl} \gamma_{kl}(ik, lm) = \sum_k \{ik, km\}$ [250, с. 262].

Здесь $\gamma_{\mu\nu}$ — контрвариантный аналог метрического ковариантного тензора $g_{\mu\nu}$; $(ik, lm) = R_{iklm}$ — тензор Римана-Кристоффеля; $\{ip, lm\} = \sum_k \gamma_{ok}(ik, lm)$.

Таким образом, Эйнштейн и Гроссман, казалось, пришли к общековариантным уравнениям гравитации

$$G_{\mu\nu} = -\kappa T_{\mu\nu}, \quad (18)$$

$$G_{\mu\nu} = 0, \quad (19)$$

последнее — для пространства-времени, свободного от «материи». Уравнения (19), как мы теперь знаем, являются правильными уравнениями гравитации для «пустого» пространства, характерными для ОТО. Уравнения (18) отличаются от соответствующих уравнений ОТО отсутствием в правой части члена $\frac{1}{2}g_{\mu\nu}T$.

Отказ от общей ковариантности уравнений поля и линейно-ковариантный подход. Но авторы «Проекта», подойдя вплотную к решенной проблеме, отвергли намеченный путь и пошли в ошибочном направлении. Конечно, у них были весьма весомые основания для этого. В «Физической части» Эйнштейн замечает, что предположение о втором порядке уравнений (16) «не позволяет найти дифференциальное выражение, являющееся обобщением $\Delta\phi$, которое было бы тензором по отношению к произвольным преобразованиям» [250, с. 237]. Здесь он ссылается на соответствующее место из части Гроссмана. Предположение о втором порядке в сочетании с другими требованиями, как мы видели, вело к необходимости принять тензор Риччи $G_{\mu\nu}$ в качестве $G_{\mu\nu}$. Но авторам «Проекта», по-видимому, не удалось согласовать напрашивающееся обобщение с принципом соответствия. Указав на целесообразность использования тензора Риччи в качестве тензора $G_{\mu\nu}$, Гроссман заключает: «Однако в частном случае бесконечно слабого статического поля тяжести этот тензор *не сводится* к $\Delta\phi$. Поэтому вопрос о том, как далеко простирается связь проблемы уравнений гравитационного поля и общей теории дифференциальных тензоров, связанных с гравитационным полем, остается открытым. Такая зависимость должна была бы существовать, если бы уравнения гравитационного поля допускали произвольные преобразования; однако, в этом случае, по-видимому, совершенно невозможно ограничиться дифференциальными уравнениями второго порядка» [250, с. 262]. Таким образом, возникла дилемма: либо сохранить требование общей ковариантности применительно к уравнениям гравитационного поля, но искать уравнения более высокого порядка, чем второй, либо отказаться от этого требования, сохранив второй порядок уравнений. «...При современном состоянии наших знаний о физических свойствах гравитационного поля обсуждение подобных возможностей (связанных с уравнениями более высокого порядка, чем второй. — В. В.) было бы преждевременным. Поэтому мы вынуждены ограничиться уравнениями второго порядка и, следовательно, отказаться от поисков уравнений гравитации, ковариантных относительно произвольных преобразований» [250, с. 237].

Имеется, впрочем, еще одна возможность построения общековариантных уравнений гравитационного поля. Так как существ-

вуют ковариантные обобщения операций дивергенции и градиента, применимые к тензорам любого ранга, то можно попытаться построить общековариантное обобщение лапласиана $\Delta\phi$ как последовательное применение обобщенных операций градиента и дивергенции к метрическому тензору g_{ik} . Но такая процедура, как показывают авторы «Проекта», приводит к вырождению. И Эйнштейн делает окончательный вывод (в этой статье), что «искомые уравнения должны быть ковариантными относительно только одной определенной пока неизвестной нам группы преобразований» [там же], т. е. некоторой конечнопараметрической группы непрерывных преобразований типа линейной группы, но, по-видимому, более широкой. Во всяком случае, «в искомую группу преобразований должны входить линейные преобразования. Следовательно, мы требуем, чтобы величины $\Gamma_{\mu\nu}$ составляли тензор относительно произвольных линейных преобразований» [там же]. Эйнштейн и Гроссман не приводят вычислений, оправдывающих их отказ от использования тензора Риччи в качестве $\Gamma_{\mu\nu}$. Можно попытаться проделать эти вычисления и понять, почему им не удалось установить соответствие общековариантных уравнений (18)—(19) с уравнениями Пуассона и Лапласа [14, 441—443].

Если предположить, что в пределе слабых полей должно выполняться соотношение

$$g_{ik} = \delta_{ik} + \epsilon h_{ik}, \quad (20)$$

где δ_{ik} — метрический тензор пространства-времени Минковского, ϵ — малый параметр, такой, что членами, содержащими ϵ^2 , можно пренебречь, h_{ik} — произвольный симметричный тензор второго ранга, десять компонентов которого в ньютоновском пределе должны сводиться к скалярному потенциалу ϕ .

Тензор Риччи (в обозначениях Эйнштейна и Гроссмана) равен:

$$G_{ik} = \sum_l \{ij, lk\} = \frac{\partial \{i j\}}{\partial x_k} - \frac{\partial \{i k\}}{\partial x_j} + \sum_l \left(\{i j\} \{l k\} - \{i k\} \{l j\} \right).$$

Подставляя сюда выражения для символов Кристоффеля {...}, учитывая (20), а также пренебрегая членами, содержащими ϵ^2 , получаем

$$G_{ik} = \frac{\epsilon}{2} \left[\left(\frac{\partial^2 h_{ik}}{\partial x_j \partial x_l} \right) \delta^{jl} - \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\partial h_{il}}{\partial x_j} - \frac{1}{2} \frac{\partial h_{jl}}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_l} \left(\frac{\partial h_{kl}}{\partial x_j} - \frac{1}{2} \frac{\partial h_{jl}}{\partial x_k} \right) \right]. \quad (21)$$

Авторам «Проекта», по-видимому, казалось, что тензор G_{ik} при условии (20) должен свестись лишь к первому члену, который в нерелятивистском приближении должен был совпасть с лапласианом. Но два других дополнительных члена не поддавались какой-либо физической интерпретации. Было также не вполне ясно, как десять функций h_{ik} в этом приближении должны свестись к единственному скаляру — ньютоновскому потенциалу φ .

Итак, математически естественное и логически напрашивающееся решение проблемы уравнений гравитации, связанное с тензором Риччи, не удалось согласовать с фундаментальным методологическим принципом физики — принципом соответствия. Эйнштейн весьма эффективно использовал этот принцип при построении СТО. В сущности вся релятивистская программа перестройки классической физики была основана на двух фундаментальных принципах: специальном принципе относительности и принципе соответствия. После открытия СТО в течение нескольких последующих лет на основе этой программы были разработаны релятивистская механика точки и системы, релятивистская теория упругости и гидродинамика, релятивистская электродинамика, релятивистские термодинамика и статистическая механика и т. д. И все эти теории строились так, чтобы их основные уравнения были инвариантными относительно преобразований Лоренца и чтобы они в нерелятивистском пределе совпадали с классическими. Релятивистская программа в таком понимании и, в частности, принцип соответствия (который, впрочем, получил свое название позже в связи с проблемами квантовой теории) привели к замечательным достижениям в работах Эйнштейна, Планка, Минковского, Лауэ, Герглотца, Борна, Зоммерфельда, Хазенерля, Ютнера и др. [155, 207, 449]. Поэтому Эйнштейн придавал принципу соответствия столь же большое значение, как и другим методологическим (или общезначимым) принципам, таким, как принципы сохранения, причинности, симметрии, простоты.

В корректурных примечаниях к «Физической части» Эйнштейн приводит второй аргумент против требования общековариантности по отношению к уравнениям гравитационного поля. В свете этого аргумента становится понятной фраза Эйнштейна в основном тексте статьи: «Необходимо впрочем подчеркнуть, что у нас нет никаких оснований для общей ковариантности уравнений гравитации» [250, с. 237]. Этот второй аргумент подводит под отказ от общековариантного подхода к уравнениям поля более глубокое физическое основание. Первый аргумент, связанный с принципом соответствия, имел эмпирический оттенок. Теоретически дело явно шло к общековариантным уравнениям типа (18) или (19), но реальность оказалась не столь гармоничной. Поэтому Эйнштейн должен был искать более принципиальные, теоретические доводы против общековариантных уравнений гравитации. В результате возникла до некоторой степени парадоксальная ситуация. С одной стороны, замысел новой теории был связан с

расширением специального принципа относительности и, вместе с этим, всей релятивистской программы. С другой стороны, Эйнштейн оказался вынужденным искать аргументы против радикального решения проблемы, т. е. против общей ковариантности полевых уравнений, которым предстояло быть ядром всей теории. «При написании данной работы мы считали недостатком теории то, что для гравитационного поля нам не удалось найти общековариантные уравнения. ...Впоследствии же я обнаружил, что уравнения, однозначно определяющие $\gamma_{\mu\nu}$ по $\theta_{\mu\nu}$ и в то же время *общековариантные*, вообще не могут существовать» [250, с. 265]. И далее Эйнштейн описывает своеобразный мысленный эксперимент, в котором основную роль играет классическое понимание принципа причинности. Согласно этому пониманию, гравитационные потенциалы $g_{\mu\nu}$ (или $\gamma_{\mu\nu}$) должны однозначно определяться распределением энергии-импульса «материи» в пространстве-времени, которое задается тензором энергии-импульса $\theta_{\mu\nu}$.

Рассматривается некоторая область пространства-времени L , в которой отсутствует «материальный процесс», т. е. $\theta_{\mu\nu} = 0$. Тогда, тензор $\theta_{\mu\nu}$ вне области L должен определять гравитационные потенциалы $g_{\mu\nu}$ всюду, в частности, и внутри этой области. Если уравнения поля, определяющие $g_{\mu\nu}$ по $\theta_{\mu\nu}$, общековариантны, то допустимо следующее преобразование координат: $x'_\nu = x_\nu$ вне L , $x'_\nu \neq x_\nu$ внутри L (хотя бы в некоторой части L и хотя бы для одного индекса ν). Ясно, что такое преобразование приводит к тому, что хотя бы в части L $g'_{\mu\nu} \neq g_{\mu\nu}$. Но, поскольку $\theta'_{\mu\nu} = \theta_{\mu\nu}$ всюду, как вне L , где $x'_\nu = x_\nu$, так и внутри L , где $\theta_{\mu\nu} = 0 = \theta'_{\mu\nu}$, то один и тот же тензор $\theta_{\mu\nu}$ породит более, чем одну систему гравитационных потенциалов ($g_{\mu\nu}$ и $g'_{\mu\nu}$, которые различны). «Следовательно, — резюмирует Эйнштейн, — если ... придерживаться требования, чтобы $\theta_{\mu\nu}$ полностью определяли значения $\gamma_{\mu\nu}$ (или $g_{\mu\nu}$. — В. В.), то приходится ограничить выбор систем отсчета [там же].

Таким образом, классическое понимание принципа причинности, как казалось Эйнштейну, не согласуется с наиболее радикальным расширением релятивистской программы. Это ошибочное рассуждение укрепило авторов «Проекта» в том, что тензор Риччи не случайно не давал ньютоновского приближения. Оно могло получиться только для уравнений поля, не ковариантных относительно произвольных непрерывных преобразований.

Необщековариантный подход к уравнениям гравитационного поля, избранный Эйнштейном и Гроссманом, был основан также на принципе соответствия и принципе сохранения энергии-импульса, со времени Гельмгольца признанном одним из основных методологических и общезначимых принципов. Третьим важным ограничением при построении уравнений поля стало требование линейной ковариантности. Эйнштейн, как мы видели, полагал, что уравнения гравитации должны быть ковариантны

относительно некоторой конечно-параметрической группы, более широкой, чем лоренцева, но не столь широкой, как бесконечная группа произвольных непрерывных преобразований (т. е. группа общей ковариантности). Эта не известная пока группа безусловно должна была содержать линейные преобразования, а потому уравнения гравитации должны были быть как минимум линейно-ковариантными. Следовательно, тензор $\Gamma_{\mu\nu}$ в уравнениях (16) — (17) оказывался линейно-ковариантным. Естественным линейно-ковариантным обобщением лапласиана оказывался оператор

$$\sum_{\alpha\beta} \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left(\gamma_{\alpha\beta} \frac{\partial}{\partial x_\beta} \right),$$

представляющий собой последовательное применение линейно-ковариантных тензорных обобщений операций градиента и дивергенции. Таким образом, тензор $\Gamma_{\mu\nu}$ должен включать в себя тензор

$$\sum_{\alpha\beta} \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left(\gamma_{\alpha\beta} \frac{\partial \gamma_{\mu\nu}}{\partial x_\beta} \right), \quad (22)$$

который в пределе слабых полей дает волновой оператор, т. е. $\Gamma_{\mu\nu}$ в этом пределе сводится к выражению:

$$-\left(\frac{\partial^2 \gamma_{\mu\nu}}{\partial x_1^2} + \dots - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \gamma_{\mu\nu}}{\partial x_4^2} \right). \quad (23)$$

В статическом случае $\gamma_{\mu\nu}$ сводится к γ_{ik} , а выражение (23) — к левой части уравнения Пуассона. Тем самым, принцип соответствия, как будто, выполняется. Но тензор $\Gamma_{\mu\nu}$ может содержать, помимо (22), еще и другие члены, являющиеся линейными тензорами и обращающиеся в нуль в пределе слабых полей. Эти дополнительные члены Эйнштейн находит с помощью принципа сохранения энергии-импульса.

Из уравнения закона сохранения энергии-импульса в гравитационном поле (11) следовало, что выражение

$$\frac{1}{2} \sum_{\mu\nu} \sqrt{-g} \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x_\sigma} \theta_{\mu\nu} \quad (24)$$

дает вектор энергии-импульса, передаваемый гравитационным полем единице объема «материи». Поэтому $\Gamma_{\mu\nu}$ следовало, в согласии с принципом сохранения энергии-импульса, выбрать так, чтобы величина

$$\frac{1}{2\kappa} \sum_{\mu\nu} \sqrt{-g} \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x_\sigma} \Gamma_{\mu\nu}, \quad (24)$$

полученная подстановкой в (24) выражения для $\theta_{\mu\nu}$ из уравнения (16) (т. е. $\theta_{\mu\nu} = -(1/\kappa)\Gamma_{\mu\nu}$), могла быть сведена к диверген-

ции (или сумме производных по координатам). Используя аналогию со скалярным полем, Эйнштейн находит необходимое соотношение и вместе с ним выражение для тензора $\Gamma_{\mu\nu}$. Вводя следующие обозначения:

$$\theta_{\mu\nu} = -\frac{1}{2\kappa} \sum_{\alpha\beta\tau\rho} \left(\gamma_{\alpha\beta}\gamma_{\beta\gamma} \frac{\partial g_{\tau\rho}}{\partial x_{\alpha}} \frac{\partial \gamma_{\tau\rho}}{\partial x_{\beta}} - \frac{1}{2} \gamma_{\mu\nu}\gamma_{\alpha\beta} \frac{\partial g_{\tau\rho}}{\partial x_{\alpha}} \frac{\partial \gamma_{\tau\rho}}{\partial x_{\beta}} \right), \quad (25)$$

$$\Delta_{\mu\nu} = \sum_{\alpha\beta} \frac{1}{\sqrt{-g}} \frac{\partial}{\partial x_{\alpha}} \left(\gamma_{\alpha\beta} \sqrt{-g} \frac{\partial \gamma_{\mu\nu}}{\partial x_{\beta}} \right) - \sum_{\alpha\beta\tau\rho} \gamma_{\alpha\beta} g_{\tau\rho} \frac{\partial \gamma_{\mu\tau}}{\partial x_{\alpha}} \frac{\partial \gamma_{\nu\rho}}{\partial x_{\beta}}, \quad (26)$$

он после некоторых вычислений, содержащихся в «Математической части», получает соотношение

$$\sum_{\mu\nu} \frac{\partial}{\partial x_{\nu}} (\sqrt{-g} g_{\sigma\mu} \kappa \theta_{\mu\nu}) = \frac{1}{2} \sum_{\mu\nu} \sqrt{-g} \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x_{\sigma}} (-\Delta_{\mu\nu} + \kappa \gamma_{\mu\nu}), \quad (27)$$

откуда следует

$$\Gamma_{\mu\nu} = \Delta_{\mu\nu} - \kappa \theta_{\mu\nu}.$$

Тогда, в соответствии с (16), уравнения гравитации принимают вид

$$\Delta_{\mu\nu} = \kappa (\theta_{\mu\nu} + \vartheta_{\mu\nu}). \quad (28)$$

Величины $\theta_{\mu\nu}$ приобретают физический смысл контрвариантного «тензора энергии-натяжений гравитационного поля».

Складывая уравнения (11) и (27) и учитывая уравнения поля (28), Эйнштейн находит характерное выражение для закона сохранения энергии — импульса системы в целом:

$$\sum_{\mu\nu} \frac{\partial}{\partial x_{\nu}} \{ \sqrt{-g} g_{\sigma\mu} (\theta_{\mu\nu} + \vartheta_{\mu\nu}) \} = 0 \quad (\sigma = 1, 2, 3, 4). \quad (29)$$

Форма уравнений поля (28) и представление закона сохранения энергии-импульса (29) служили определенным свидетельством в пользу правильности избранного пути (в решении проблемы полевых уравнений). «Эти уравнения удовлетворяют требованию, по нашему мнению, обязательному для релятивистской теории гравитации; именно они показывают, что тензор гравитационного поля (точнее, тензор энергии-импульса гравитационного поля.— В. В.) $\theta_{\mu\nu}$ является источником поля наравне с тензором материальных систем $\vartheta_{\mu\nu}$. Исключительное положение энергии гравитационного поля по сравнению со всеми другими видами энергии привело бы к недопустимым последствиям» [250, с. 242].

Полученные уравнения поля и выражение для закона сохранения энергии-импульса существенно опирались на условие линейной ковариантности. Тем самым, успешное включение закона сохранения энергии-импульса в теорию, оказавшееся возмож-

ным при этом условии, служило дополнительным аргументом против общековариантных уравнений поля. В примечаниях к «Физической части» Эйнштейн писал: «В нашей работе это ограничение (выбор класса допустимых систем отсчета. — В. В.) достигается благодаря тому, что постулируется соблюдение законов сохранения, т. е. выполнимость соотношений типа (19) (здесь (29). — В. В.) для материального процесса и гравитационного поля вместе взятых. Именно из этого постулата... выведены уравнения (18) (здесь (28). — В. В.) гравитационного поля. Соотношения (19) ковариантны относительно только *линейных* преобразований, так что в развитой выше теории допустимыми следует считать только *линейные* преобразования... Весьма примечательно, что законы сохранения позволяют дать физическое определение прямой (выделяя в качестве допустимых аффинные системы координат. — В. В.), хотя в нашей теории и не существует объекта или процесса, могущего непосредственно служить моделью прямой, наподобие светового луча в обычной теории относительности» [250, с. 265—266].

Эта же мысль содержалась уже в письме Эйнштейна к Маху, написанном накануне 1913 г.: «Все сущее будет сначала относиться к четырем совершенно произвольным переменным. Они должны затем, если выполняются законы сохранения импульса и энергии, быть специализированы таким образом, что только линейные подстановки приводят от одной правильной системы отсчета к другой. Система отсчета, так сказать, измеряет существующий мир с помощью принципа энергии и теряет свою туманную априористическую сущность» (цит. по: [96, с. 83]).

Таким образом, можно выделить три основных аргумента Эйнштейна и Гроссмана против общековариантных уравнений гравитационного поля. Первый из них, связанный с невозможностью сведения напрашивающихся общековариантных уравнений поля с тензором Риччи (18)—(19) к классическим уравнениям Пуассона или Лапласа в ньютоновском пределе, основан на фундаментальном методологическом принципе физики — принципе соответствия, и мы будем его называть «аргументом соответствия». По-видимому, он оказался первым серьезным аргументом против последовательного общековариантного подхода. Но, как уже отмечалось, он не был логически или теоретически оправдан, вернее, он не позволял подкрепить отказ от общей ковариантности достаточно основательными теоретическими соображениями.

Именно такого рода аргумент (второй) был найден Эйнштейном, когда он проанализировал общековариантные уравнения с точки зрения характерного для классической физики понимания причинности. Оказалось, что общековариантные уравнения поля не удовлетворяют этому важному методологическому принципу физики. Этот аргумент логического характера будем называть «аргументом причинности». Заметим сразу, что оба эти аргумента оказались ошибочными, и некорректность их

была связана с трудностями физической интерпретации принципа общей относительности или общей ковариантности. Таким образом, природа их некорректности, в сущности, была одна, и преодоление этих аргументов было результатом более глубокого физического осмысления принципа общей ковариантности.

Наконец, третий аргумент («аргумент сохранения») против общей ковариантности и в пользу линейной ковариантности опирался на еще один основополагающий общезначимый принцип — принцип сохранения энергии-импульса, представляющий собой одну из главных реализаций методологического принципа сохранения.

В результате, аргументация против общей ковариантности уравнений поля и в пользу избранного линейно-ковариантного подхода казалась весьма основательной. К тому же в примечаниях Эйнштейн привел еще одну форму уравнений гравитации, физически более наглядную и правдоподобную, чем (28):

$$\sum_{\alpha\beta\mu} \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left(\sqrt{-g} g_{\alpha\beta} g_{\sigma\mu} \frac{\partial \gamma_{\mu\nu}}{\partial x_\beta} \right) = \kappa (T_{\sigma\nu} + t_{\sigma\nu}), \quad (30)$$

где $T_{\sigma\nu} = \sum_{\mu} \sqrt{-g} g_{\sigma\mu} \theta_{\mu\nu}$, $t_{\sigma\nu} = \sum_{\mu} \sqrt{-g} g_{\sigma\mu} \vartheta_{\mu\nu}$ —

смешанные тензоры энергии-импульса.

И все же авторы ощущали определенную незавершенность теории, ее некоторую противоречивость: «...Сначала наиболее естественным кажется требование ковариантности системы уравнений относительно произвольных преобразований. Однако такому требованию противоречит тот факт, что построенные нами уравнения гравитационного поля этим свойством не обладают. Мы смогли показать, что уравнения гравитационного поля ковариантны лишь относительно произвольных линейных преобразований, однако мы не знаем, существует ли общая (или более общая. — В. В.) группа преобразований, относительно которой ковариантны эти уравнения. Вопрос о существовании такой группы преобразований для системы уравнений (гравитации. — В. В.) ... имеет важнейшее значение для рассматриваемой здесь задачи. Во всяком случае при современном состоянии теории мы не можем требовать ковариантности уравнений относительно произвольных преобразований» [252, с. 243]. Эйнштейн по-прежнему придавал принципу общей ковариантности фундаментальное значение и стремился сохранить общековариантный подход всюду, где это представлялось возможным. А это можно было сделать для всех уравнений физических процессов, кроме самих уравнений гравитации: «...Мы видели, что для материальных процессов можно составить уравнение баланса энергии-импульса..., которое допускает произвольные преобразования. Поэтому все же естественно предположить, что все физические уравнения, за исключением уравнений гравитационного поля, следует сформулировать, так чтобы они были ковариант-

ны относительно произвольных преобразований» [250, с. 243—244].

Шестой параграф «Физической части» «Влияние гравитационного поля на физические, в частности на электромагнитные, процессы» содержит общеквариантную переформулировку уравнений электродинамики, которая уже ранее была дана Коттлером.

$$\sum_{\nu} \frac{\partial}{\partial x_{\nu}} (\sqrt{-g} \Phi_{\mu\nu}) = \rho \frac{dx_{\mu}}{dt},$$

$$\sum_{\nu} \frac{\partial}{\partial x_{\nu}} (\sqrt{-g} \Phi_{\mu\nu}^*) = 0, \quad (31)$$

где $\Phi_{\mu\nu}$ и $\Phi_{\mu\nu}^*$ — контрвариантный и дуальный ему тензоры электромагнитного поля (по терминологии Гроссмана, специальные тензоры, которым посвящен отдельный параграф в «Математической части»).

В последнем седьмом параграфе «Можно ли свести гравитационное поле к скаляру?» Эйнштейн затрагивает вопрос о конкурирующем подходе к теории тяготения, связанном с сохранением скалярного характера гравитационного потенциала. Более подробно мы рассмотрим эту проблему в следующем разделе.

Роль Гроссмана. Коснемся теперь вопроса о приоритете в открытии основ будущей ОТО (тензорно-геометрическая природа гравитации, риманов характер пространства — времени при наличии гравитации, отождествление уравнений движения частиц в гравитационном поле с уравнениями геодезических линий соответствующего риманова пространства, общеквариантная формулировка закона сохранения энергии-импульса «материи» и других уравнений «материальных процессов» в присутствии поля тяготения, реализация маховской концепции инерции и т. д.). Дело в том, что в одной из недавних работ промелькнула мысль о том, что все основные формы уравнений гравитации в ОТО были получены не Эйнштейном, а математиками, именно Гроссманом, Гильбертом и Герглотисом [40, с. 289]. Это связывалось с явно не каноническим, чрезмерно математизированным и оторванным от эксперимента путем формирования ОТО. Автор этой статьи резко отделяет физический фундамент теории, созданный почти целиком Эйнштейном, и разработанную им программу построения релятивистской теории тяготения от формулировки уравнений гравитационного поля. Но даже если ограничиться вопросом об уравнениях поля, то и здесь фактически решающую роль играл Эйнштейн. В этом разделе мы обсудим лишь проблему Эйнштейн — Гроссман.

Вероятно, впервые вопрос о возможных претензиях Гроссмана на приоритет в открытии ОТО был поставлен Зоммерфель-

дом в письме к Эйнштейну в июле 1915 г. Само это письмо не сохранилось, но о нем можно судить по ответному письму Эйнштейна от 15 июля 1915 г.: «Гроссман никогда не будет претендовать на то, чтобы считаться соучастником открытия. Он лишь помог мне ориентироваться в математической литературе, но ничего не внес в результаты» [76, с. 192]. С другой стороны, особенность «Проекта» заключается в том, что он, как мы видели, состоит из двух частей: физической (Эйнштейн) и математической, написанной целиком Гроссманом. И хотя работа над «Проектом» была совместной, а роль лидера, безусловно, принадлежала Эйнштейну, в математической части оказались некоторые замечания, не вошедшие в физическую часть и оказавшиеся пророческими. Речь идет, прежде всего, о втором пункте § 4 «Математических дополнений к физической части», именно, о возможности использования тензора Риччи для построения уравнений гравитационного поля, причем уравнения эти явно не выписываются, но из сопоставления с физической частью ясно, что имеются в виду уравнения (18), которые в случае отсутствия «материи» переходят в уравнения (19).

Правда, эти уравнения тут же отвергаются по «соображениям соответствия». В части, написанной Эйнштейном, действительно тензор Риччи явно не упоминается, хотя, несомненно, и, подразумевается, и если бы общековариантный подход не был отвергнут авторами «Проекта», уравнения (18) были бы написаны сразу же вслед за уравнениями (11) физической части. Поэтому уравнения (18) или (19), к которым вплотную приблизились Эйнштейн и Гроссман и от которых затем отказались, фигурировали в «Проекте» лишь как отвергнутая возможность. Принятие этих уравнений произошло позже, именно в ноябре 1915 г. (в работах, доложенных 11 и 18 ноября). Кому первому из авторов «Проекта» пришла в голову мысль об использовании в качестве $\Gamma_{\mu\nu}$ тензора Риччи, теперь уже едва ли можно сказать. Во всяком случае, было бы более справедливо приписывать отвергнутую возможность использования тензора Риччи обоим авторам.

В дополнение к несколько суровой оценке вклада Гроссмана, содержащейся в цитированном выше письме Эйнштейна к Зоммерфельду, напомним соответствующие места из воспоминаний Эйнштейна, написанных в 1933, 1949 и 1955 годах. В 1933 г. Эйнштейн писал, что он вместе с Гроссманом обнаружил математические методы для решения проблемы общековариантной переформулировки основных законов физики, которые «уже существовали в готовом виде в абсолютном дифференциальном исчислении Риччи и Леви-Чивиты». «Мы скоро увидели, — продолжал Эйнштейн, — что эти выражения (тензоры Римана — Кристоффеля и Риччи. — В. В.) уже были составлены Риманом (тензор кривизны). Еще за два года до опубликования общей теории относительности мы изучали правильные уравнения гравитационного поля, но не были убеждены в их физической при-

менимости» [293, с. 406]. И далее Эйнштейн упоминает об «аргументе причинности» и кратко описывает последующий возврат к принципу общей ковариантности.

В «Автобиографических заметках» 1949 г. Гроссман вообще не упоминается. Здесь изложение пути к ОТО дано в логически очищенном виде. В сущности, опущен весь период с 1912 по 1915 г.

Наиболее подробно, как мы видели, сотрудничество с Гроссманом описано в «Автобиографических набросках» 1955 г., в которых Эйнштейн подчеркивал: «Потребность по крайней мере один раз в жизни выразить мою благодарность Марселю Гроссману придала мне смелость написать эти довольно пестрые автобиографические наброски» [298, с. 355].

Вклад Гроссмана в ОТО в воспоминаниях 1933 и 1955 гг. выглядит несколько более значительным, чем в цитированном письме Эйнштейна к Зоммерфельду. Правда, в 1933 г. Эйнштейн не выделяет именно вклад Гроссмана: «Мы обнаружили... математические методы... За два года до опубликования общей теории относительности мы изучали правильные уравнения гравитационного поля...» и т. д. [293, с. 406]. Здесь идет речь о совместной работе. Наконец, в «Набросках» 1955 г., посвященных Гроссману, Эйнштейн, подчеркивая вспомогательную, чисто математическую, функцию Гроссмана в их совместной работе («...он согласился совместно работать над проблемой, но... с тем ограничением, что он не берет на себя никакой ответственности за какие-либо физические утверждения и интерпретации») [298, с. 355], специально выделяет вклад Гроссмана: «Он тщательно просмотрел литературу и скоро обнаружил, что указанная математическая проблема была уже решена прежде всего Риманом, Риччи и Леви-Чивитой». Ясно, что Гроссман обнаружил возможность использования тензора Риччи, которая затем была отвергнута Эйнштейном и Гроссманом. Последняя оценка вклада Гроссмана Эйнштейном выглядит более справедливой, хотя она и не находится в резком противоречии с оценкой 1915 г., так как под «результатами» Эйнштейн, по-видимому, понимал физические результаты. Эйнштейн, судя по воспоминаниям и отчасти по работам пражского периода, до встречи с Гроссманом уже пришел к тензорным потенциалам и идее отождествления геометрии и гравитации. Он вышел на такой уровень исследований, который требовал глубоких познаний в столь сложной математической области, как риманова геометрия и тензорный анализ, до этого времени фактически не использовавшиеся в физике. Но все же он представлял себе эту область и мог четко сформулировать математический аспект проблемы, ответ на который уже ранее был дан Риманом, Кристоффелем, Риччи и Леви-Чивитой. Гроссман не разрабатывал новой математики, он именно нашел, обнаружил решение проблемы в трудах основателей римановой геометрии.

Тем не менее, все сказанное не дает основания считать его автором общековариантных уравнений гравитации типа (18)—(19) не только потому, что эти уравнения были отвергнуты обоими авторами «Проекта». Даже если бы по рекомендации Гроссмана они были приняты в качестве уравнений гравитационного поля, само их принятие требовало бы их согласования с физической ситуацией (отождествление входящих в уравнения математических величин с физическими характеристиками гравитационного поля, согласование уравнений с общефизическими и методологическими принципами, такими как принципы соответствия, сохранения энергии-импульса, причинности и, конечно, симметрии или инвариантности). Все это было делом именно Эйнштейна, ведь Гроссман, по словам Эйнштейна, не брал «на себя никакой ответственности за какие-либо физические утверждения и интерпретации».

Таким образом, физические основы теории 1913 г., во многом совпавшие с основами ОТО, были заложены прежде всего Эйнштейном. В совместной работе с Гроссманом ему принадлежало бесспорное лидерство. Что касается проблемы уравнений гравитационного поля, то она, как выяснилось впоследствии, в этой теории была решена неправильно. Однако Эйнштейн и Гроссман действительно близко подошли к правильным общековариантным уравнениям поля, содержащим тензор Риччи, но отказались от их принятия, так как не сумели согласовать их с фундаментальными методологическими принципами физики — принципами соответствия, сохранения энергии-импульса и причинности. До некоторой степени можно говорить об известном предвосхищении общековариантных уравнений типа (18)—(19), но и это предвосхищение нельзя приписать одному лишь Гроссману. Подлинное открытие этих уравнений следует отнести к ноябрю 1915 г. и приписать Эйнштейну. Гроссман же не только сыграл роль своеобразного гида Эйнштейна по математической литературе, он помог ему быстро освоить методы римановой геометрии и тензорного анализа и преодолеть известный «математический барьер», стоявший на пути к релятивистской теории тяготения. В частности, Гроссман, по-видимому, первым указал на возможное значение тензоров кривизны (прежде всего, тензора Риччи) для построения общековариантных уравнений гравитационного поля. Сотрудничество Эйнштейна с Гроссманом, пожалуй, в наиболее важный период формирования ОТО было весьма плодотворным. И хотя едва ли было бы справедливо называть ОТО теорией Эйнштейна — Гроссмана, а, например, уравнения поля для пустого пространства: $G_{im} = 0$ (G_{im} — тензор Риччи) — уравнениями Гроссмана, имя его, бесспорно, должно сохраниться в истории создания ОТО*.

* Заметим, что современные специалисты в области гравитации помнят и высоко ценят вклад Гроссмана в ОТО. 7—12 июля 1975 г. в Институте теоретической физики Университета в Триесте состоялся «Гроссмановский симпо-

Венский доклад Эйнштейна

Вопрос об уравнениях поля. Осенью 1913 г. состоялись две конференции, на которых выступил Эйнштейн с изложением новой теории. 9 сентября он и Гроссман выступили с докладами на годовом собрании Швейцарского общества естествоиспытателей во Фрауэнфельде. Доклады, в сущности, содержали повторение основных разделов «Проекта» и затем были опубликованы в трудах этого общества. Значительно больший интерес представляет обширный доклад Эйнштейна «К современному состоянию проблемы тяготения», сделанный им 23 сентября в Вене на 85-м собрании Общества естествоиспытателей. Доклад вызвал большую дискуссию, которая, как и сам доклад, была опубликована в «*Physikalische Zeitschrift*». И в докладе, и в дискуссии обсуждалась не только тензорная теория, но и конкурирующие теории гравитации, прежде всего, теории Нордстрема, Абрагама и Ми, которые мы рассмотрим в следующих разделах.

В этом же разделе целесообразно затронуть следующие вопросы: об уравнениях гравитационного поля, о ньютоновском приближении и об относительности инерции. Последние два вопроса в «Проекте» фактически не обсуждались. По-видимому, текст доклада готовился до получения корректуры «Проекта». Об этом свидетельствует отсутствие в докладе «аргумента причинности» против общековариантных уравнений гравитационного поля. Имеется только примечание: «Недавно я нашел доказательство, что подобное общековариантное решение (проблемы уравнений поля тяготения. — В. В.) вообще не может существовать» [252, с. 290]. Как и в «Проекте», сначала развивается общековариантный подход к проблеме гравитации в целом и подчеркивается естественность такого же подхода и к уравнениям поля. Но затем со ссылкой на «аргумент сохранения» (другие аргументы отсутствуют), на уравнения гравитации накладывается требование линейной ковариантности:

знаю о современном прогрессе в области основ общей теории относительности», в котором приняли участие некоторые ведущие ученые в этой области А. Лишнеровиц, С. Чандрасекхар, И. Шоке-Брюа, А. Тауб, Р. Пенроуз, Р. Руффини, Дж. Элерс, Е. Шюкинг, Е. М. Лифшиц, В. Файербэнк, Ф. Эверитт и др. К программе симпозиума приложена краткая биография Гроссмана. В ней, в частности, говорится: «Когда Эйнштейн попытался математически сформулировать свою концепцию общей теории относительности, он обратился за помощью к Гроссману. Гроссман ввел Эйнштейна в абсолютное дифференциальное исчисление, начало которому было положено Э. Б. Кристоффелем (1864) и которое было полностью развито в Падуанском университете Г. Риччи-Курбастро и Т. Леви-Чивитой (1901). Обеспечив встречу великих математических достижений итальянских геометров и глубоких физических идей Эйнштейна, М. Гроссман облегчил этот уникальный синтез математической и теоретической физики, достигнутый Эйнштейном, синтез, который и сегодня рассматривается как наиболее элегантная и мощная теория поля в физике — это общая теория относительности» [454, с. 2]. Автор выражает благодарность А. А. Старобинскому и О. И. Богоявленскому за эту информацию.

«...Вся проблема гравитации была бы решена удовлетворительно, если бы удалось найти ковариантные относительно произвольных преобразований уравнения, которым удовлетворяет гравитационное поле $g_{\mu\nu}$. Однако решить проблему таким способом не удалось. Решение все же удалось получить, дополнительно ограничивая выбор систем отсчета... Мы должны, по-видимому, требовать, чтобы для материального процесса и гравитационного поля вместе взятых выполнялись законы сохранения (...)

$$\sum \partial_i \partial x_\nu (T_{\sigma\nu} + t_{\sigma\nu}) = 0.$$

Если $t_{\sigma\nu}$ (компоненты тензора энергии-импульса гравитации.— В. В.) с точки зрения теории инвариантов должны иметь такой же характер, как и $T_{\sigma\nu}$ (тензор энергии-импульса «материи».— В. В.), то левая часть этого соотношения не может быть ковариантной по отношению к произвольным преобразованиям; по-видимому, она является таковой только по отношению к произвольным линейным преобразованиям.

Следовательно, требуя выполнения законов сохранения, мы в значительной степени специализируем систему отсчета и тем самым отказываемся от установления уравнений гравитации в общековариантном виде» [252, с. 289—290]. Вместе с тем, Эйнштейн чувствует внутреннюю противоречивость такого подхода: «Несмотря на это, я считаю, что уравнения, выведенные на основе соображений § 4 (общековариантные уравнения, описывающие взаимодействие «материи» и гравитации.— В. В.), не теряют под собой почвы. С одной стороны, конечно, можно описывать процессы по отношению к произвольным системам отсчета, с другой стороны, невозможно понять, какие ограничения возникают для этих уравнений после введения ограничения на системы отсчета» [там же].

Линейно-ковариантные уравнения гравитации приобретают такой же вид, как в «Проекте».

Как мы видели, несудача с получением ньютоновского приближения для общековариантных уравнений гравитации была одним из главных (по-видимому, исходным) аргументов против этих уравнений («аргумент соответствия»). В «Проекте», однако, вопрос о том, дают ли линейно-ковариантные уравнения (28) или (30) ньютоновский предел, только затронут. В всенском докладе этот вопрос изучается более детально. Предполагая, «что в доступной нам области Вселенной отклонение компонент тензора от указанных постоянных значений (псевдоевклидовских.— В. В.) можно считать очень малыми» [252, с. 292] и что членами, содержащими квадраты и более высокие степени этих отклонений можно пренебречь, Эйнштейн из уравнений (29) или (30) без труда получает

$$\square h_{\mu\nu} = \frac{\partial^2 h_{\mu\nu}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h_{\mu\nu}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h_{\mu\nu}}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 h_{\mu\nu}}{\partial t^2} = \kappa T_{\mu\nu}, \quad (32)$$

где $h_{\mu\nu} = g_{\mu\nu} - \eta_{\mu\nu}$, где $\eta_{\mu\nu}$ — псевдоевклидовский метрический тензор. Ньютоновское приближение из уравнений (32) получается при следующих естественных ограничениях. В качестве источника поля рассматриваются только несвязанные массы, описы-

ваемые тензором энергии импульса

$$\left(\begin{array}{cccc} \frac{\rho_0}{c^2 - q^2} \dot{x}^2 & \frac{\rho_0}{c^2 - q^2} \dot{x} \dot{y} & \dots & \frac{-\rho_0 c^2}{c^2 - q^2} \dot{x} \\ \frac{\rho_0}{c^2 - q^2} \dot{y} \dot{x} & \dots & \dots & \frac{-\rho_0 c^2}{c^2 - q^2} \dot{y} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{-\rho_0}{c^2 - q^2} \dot{x} & \dots & \dots & \frac{\rho_0 c^4}{c^2 - q^2} \end{array} \right), \quad (33)$$

где ρ_0 — плотность массы покоя.

При этом, в силу статичности ньютоновского поля, следует пренебречь влиянием скоростей масс, создающих поле, а в уравнениях движения сохраняются лишь величины низшего порядка по отношению к скоростям и ускорениям.

Наконец, предполагается, что на бесконечности пространство псевдоевклидово, т. е. $h_{\mu\nu} = 0$. Тогда уравнения (32) после подстановки компонентов тензора T_{ik} (33) при указанных ограничениях имеют вид

$$\begin{aligned} \Delta h_{\mu\nu} &= 0 \quad (\mu \neq \nu \neq 4), \\ \Delta h_{44} &= \kappa c^2 \rho_0. \end{aligned} \quad (34)$$

Это в конечном счете даст

$$\begin{aligned} h_{\mu\nu} &= 0 \quad (\mu \neq \nu \neq 4), \\ h_{44} &= \frac{\kappa c^2}{4\pi} \int \frac{\rho_0 dv}{r}, \end{aligned} \quad (34a)$$

и уравнения движения материальной точки принимают вид

$$\ddot{x} = -\frac{1}{2} \frac{\partial h_{44}}{\partial x}. \quad (35)$$

Таким образом, линейно-ковариантные уравнения гравитации (28) или (30) при сделанных ограничениях дают ньютоновское приближение.

Проблема экспериментальной проверки теории. В этом направлении с 1911 г. никакого продвижения вперед не произошло. Напротив, теперь Эйнштейн говорит только об одном эффекте, который отличает его теорию от большинства других теорий тяготения и который, по его мнению, доступен экспериментальной проверке. Речь идет об искривлении световых лучей гравитационным полем. Выписав для ньютоновского приближения интервал

$$ds = \sqrt{-dx^2 - dy^2 - dz^2 + g_{44} dt^2}, \quad \text{где } g_{44} = c^2 \left(1 - (\kappa/4\pi) \int \rho_0 dV/r\right),$$

Эйнштейн заключает, что в этом приближении гравитационное поле не искажает масштабы, но влияет на скорость хода часов,

поскольку величина ds/dt при $dx=dy=dz=0$ является мерой этой скорости и она равна

$$\frac{ds}{dt} = \sqrt{g_{44}} = \text{const} \left(1 - \frac{\kappa}{8\pi} \int \frac{\rho_0 dv}{r} \right),$$

т. е. «часы идут тем медленнее, чем большие массы расположены вблизи них» [252, с. 294]. Но, видимо, теперь Эйнштейн считал возможность экспериментальной регистрации этого эффекта маловероятной. К тому же, аналогичный результат получался и в теории Нордстрема. Так что даже в случае осуществления такой возможности, выбор между теориями Эйнштейна — Гроссмана и Нордстрема нельзя было бы сделать.

Из условия $ds=0$ сразу же определяется зависимость скорости света от гравитационного потенциала:

$$\left| \sqrt{\frac{dx^2 + dy^2 + dz^2}{dt^2}} \right|_{ds=0} = \sqrt{g_{44}} = c \left(1 - \frac{\kappa}{8\pi} \int \frac{\rho_0 dv}{r} \right). \quad (36)$$

«Таким образом, согласно излагаемой теории и в противоположность теории Нордстрема, световые лучи искривляются гравитационным полем, — замечает Эйнштейн. — Это единственное найденное до сих пор следствие теории, доступное проверке на опыте» [252, с. 295]. Соотношение (36) естественно приводит к отклонению света в гравитационном поле Солнца $0,85''$, как это было показано еще в 1911 г.

Эйнштейн заключил свой доклад следующими словами: «Соответствует ли природе первый или второй путь (т. е. теория Нордстрема или теория Эйнштейна — Гроссмана. — В. В.), должно решить исследование снимков звезд, появляющихся рядом с Солнцем во время полных солнечных затмений. Можно надеяться, что к важным результатам приведет уже наблюдение солнечного затмения 1914 г.» [там же].

Нет никаких упоминаний в докладе и о возможности проверки теории по результатам наблюдения аномального смещения перигелия Меркурия. Тем более возростала важность наблюдений по гравитационному отклонению света, которые обсуждались уже ранее в переписке Эйнштейна и Э. Фрейндлиха [504, 507]. Сначала Фрейндлих использовал имеющиеся в Берлинской обсерватории снимки солнечного затмения. Но это его не привело к успеху. В письме к Бессо от 4 февраля 1912 г. Эйнштейн сообщал: «Один берлинский астроном очень старается проверить искривление лучей Солнцем. Он получает все фотографии солнечного затмения и вымывает их» [157, с. 36].

Затем Фрейндлих попытался использовать снимки околосолнечной области, полученные американским астрономом В. В. Кэмпбеллом в Ликской обсерватории при поисках планет между Солнцем и Меркурием.

Кэмпбелл в письме от 4 ноября 1913 г. к другому американскому астроному Дж. Э. Хэйлу сообщал: «Я собираюсь напи-

сать профессору Эйнштейну о проблеме регистрации звезд во время солнечного затмения, лучи которых проходят вблизи Солнца. Речь идет об эффекте гравитационного отклонения света. Мы обещали обеспечить фотографиями такого рода доктора Фрейндлиха из Берлинской обсерватории. Эти фотографии были получены с помощью объективов, которые мы использовали при затмениях в поисках замерзших планет» (цит. по [504, с. 320]). Известно, что Эйнштейн незадолго до этого обратился к Хэйлу (14 октября 1913 г.) и Кэмпбеллу, чтобы они оказали Фрейндлиху содействие в этом деле. Но и эти снимки не дали нужного результата, о чем сообщил Фрейндлих в статье, опубликованной в «*Astronomische Nachrichten*» [там же]. Еще до опубликования этой работы Эйнштейн, накануне своего отъезда во Фрауэнфельд, где он должен был выступить с докладом по новой теории тяготения, писал Фрейндлиху в августе 1913 г.: «В глубине души я твердо убежден, что световые лучи действительно испытывают искривление. Ваш план наблюдать околосолнечные звезды днем весьма интересен. Это было бы возможно, если бы атмосферу не заполняли взвешенные частицы размеров порядка длины световых волн, которые лишь незначительно отклоняют свет. Я обеспокоен тем, что Ваш план может не удалиться. Но Вы лучше ориентированы в этом вопросе, чем я...» (цит. по: [504, р. 322]). Летом 1913 г. Фрейндлих стал думать о снаряжении специальной экспедиции в Крым для наблюдений солнечного затмения, которые позволили бы измерить гравитационное отклонение света. Впервые он сообщил о такой возможности в упомянутой выше статье, датированной январем 1913 г. Эйнштейн в письме от 25 июня 1913 г. писал Маху: «В будущем году во время солнечного затмения будет проверено, изгибаются ли световые лучи Солнцем или, другими словами, верно ли основное и фундаментальное предположение об эквивалентности ускоренной системы и гравитационного поля» (цит. по: [214, с. 262]).

Эйнштейн встретился с Фрейндлихом в начале сентября 1913 г. во Фрауэнфельде [333, с. 162]. Главным предметом их разговоров был вопрос о предстоящей экспедиции. Однако руководство Берлинской обсерватории, прежде всего, директор обсерватории Г. Струве не поддержали проект Фрейндлиха, о чем последний вскоре сообщил Эйнштейну. В письме от 7 декабря Эйнштейн отвечал Фрейндлиху: «После получения Вашего последнего письма я тотчас же написал Планку, который серьезно относится к делу и обещал поговорить с Шварцшильдом. Струве я не буду писать. Если Академия не согласится финансировать (экспедицию. — В. В.), то мы получим некоторую толику из частных источников (цит. по: [504, с. 324]). Фрейндлиху удалось договориться о финансировании экспедиции с химиком Э. Фишером и Крупном. Экспедиции, как известно, помешала разразившаяся в августе 1914 г. первая мировая война. Экспедиционное оборудование было конфисковано, а Фрейндлих ин-

тернирован и в начале сентября обменян на одного из русских офицеров.

Спустя некоторое время Фрейндлих приступил к изучению возможности экспериментальной регистрации гравитационного красного смещения и, вероятно, одним из первых (в конце 1914 г.) поднял вопрос об объяснении аномального смещения перигелия Меркурия с позиций теории Эйнштейна — Гроссмана [365, 504, с. 326]. Но это относится уже к 1915 г. *

Относительность инерции. Роль Маха. Наконец, кратко рассмотрим вопрос об относительности инерции. Здесь уместно вообще коснуться влияния Маха на Эйнштейна и, прежде всего, на генезис идей, связанных с ОТО. Это большая самостоятельная проблема, которой посвящено немало содержательных работ [56, 58, 60, 91, 214, 390—392, 407, 512, 520, 538, 550]. Отношение Эйнштейна к Маху на протяжении полувека претерпело изменения, но он всегда высоко ценил глубокий критический анализ основ механики, проведенный Махом. В «Автобиографических заметках» Эйнштейн неоднократно подчеркивал существенное влияние идей Маха на формирование теории относительности: «Эрнст Мах в своей истории механики потряс эту догматическую веру (в механику как основу физики. — В. В.); на меня — студента — эта книга («Механика» Маха. — В. В.) оказала глубокое влияние именно в этом отношении. Я вижу действительное величие Маха в его неподкупном скепсисе и независимости...» [296, с. 266]. Далсс он пишет о том, что и гносеология Маха сначала произвела на него впечатление, но впоследствии он увидел ее существенные изъяны, связанные с недооценкой Махом «конструктивно-спекулятивного» аспекта теоретического мышления.

Эйнштейн в этих же «Заметках», анализируя логико-теоретические недостатки классической механики, ссылается прежде всего на Маха. Речь идет о концепции инерции, и о понятиях абсолютных пространства и времени, и о необоснованности выделения класса инерциальных систем отсчета и т. д. Ключевым в этом круге вопросов Эйнштейну представлялся вопрос о природе инерции: «По мнению Маха, в действительно рациональной теории инертность должна, подобно другим ньютоновским силам, происходить от взаимодействия масс. Это мнение я долгое время считал в принципе правильным» [296, с. 268].

В статье-искрологе, написанной в марте 1916 г., то есть сразу же после завершения основ ОТО, Эйнштейн, пожалуй, еще более восторженно говорит о Махе [273]. Он не только подчеркивает значение его «гносеологической установки», «исподкупного скепсиса и независимости», его критического анализа для творческой работы физиков **, но и весьма высоко оценивает конст-

* Детальный анализ истории экспериментального определения гравитационного красного смещения солнечного света дан в статье Э. Форбса [359].

** «Значение таких мыслителей, как Мах, состоит отнюдь не только в том, что они удовлетворяют определенные философские потребности своего време-

руктивные идеи Маха о природе инерции, непосредственно ведущие, по его мнению, к основам ОТО.

Описав маховскую критику абсолютных пространства и времени, его интерпретацию знаменитого мысленного эксперимента Ньютона с вращающимся ведром и приведя соответствующие высказывания Маха, Эйнштейн пишет: «Приведенные строки показывают, что Мах ясно понимал слабые стороны классической механики и был недалек от того, чтобы придти к общей теории относительности. И это за полвека до ее создания! Весьма вероятно, что Мах сумел бы создать общую теорию относительности, если бы в то время, когда он еще был молод духом, физиков волновал вопрос о том, как следует понимать постоянство скорости света... Рассуждения Маха о ньютоновском опыте с ведром показывают, сколь близко его духу было требование относительности в обобщенном смысле (относительности ускорения). Во всяком случае, в этих рассуждениях чувствуется ясное понимание того, что требование равенства инертной и тяжелой массы тел приводит к постулату относительности в более широком смысле» [273, с. 31].

В 1959—1963 гг. были найдены четыре письма Эйнштейна к Маху. Два из них написаны в августе 1909 г., два других, цитированных ранее, относятся к 1912—1913 гг. (одно можно, по видимому, датировать концом 1912 г., а другое письмо написано им 25 июня 1913 г.). В письме от 9 августа 1909 г. Эйнштейн благодарит Маха за присылку известной книги последнего о законе сохранения энергии и с восхищением пишет о его «Механике». Он также подчеркивает огромное влияние гносеологии Маха на современных физиков. Ф. Гернек предполагает [391, с. 6], что посредником между Махом и Эйнштейном мог выступить в этот период студенческий друг Эйнштейна, доцент теоретической физики Цюрихского университета Ф. Адлер. Он активно переписывался с Махом в 1909 г., а также посещал его в Вене в это время. Письма Маха к Эйнштейну, к сожалению, не сохранились. 17 августа Эйнштейн пишет второе письмо Маху, по которому можно судить, что Мах весьма лестно отзывал-

ни... Понятия, которые оказываются полезными при упорядочении вещей, легко завоевывают у нас такой авторитет, что мы забываем об их земном происхождении и воспринимаем их как нечто неизменно данное. В этом случае их называют «логически необходимыми», «априорно данными», и т. д. Подобные заблуждения часто надолго преграждают путь научному прогрессу. Поэтому анализ давно используемых нами понятий и выявление обстоятельств, от которых зависит их обоснованность, пригодность, и того, как они возникают из данных опыта, не является праздной забавой. Такой анализ позволяет подорвать излишне большой авторитет этих понятий... Ученому, занимающемуся конкретными проблемами, чье внимание привлекают лишь частности, подобный анализ покажется излишним, претенциозным и даже смешным. Однако ситуация меняется, когда развитие соответствующей науки требует, чтобы какое-нибудь употребляемое понятие было заменено новым, более точным. Тогда те, кто обращался с понятиями своей науки, не особенно вдаваясь в их смысл, начинают энергично протестовать и жаловаться на революционную угрозу, грозящую духовным благам и т. д.» [273, с. 28—29].

ся о теории относительности и хотел бы получить оттиски основных работ Эйнштейна по СТО: «Меня очень радует, что Вам нравится теория относительности. К сожалению, у меня нет больше ни одного экземпляра резюмирующей работы, которую я опубликовал в «Jahrbuch für Radioaktivität und Elektronik». Благодарю Вас еще раз сердечно за Ваше дружеское письмо и остаюсь Вашим, почитающим Вас, учеником» (цит. по: [391, с. 7]). Об интересе Маха к СТО достаточно подробно говорится в статье Гернека [391]. Известно также, что Эйнштейн и Мах встречались, скорее всего, в конце 1911 г.— начале 1912 г., когда Эйнштейн работал в Праге и отсюда прислал в ВснУ. Согласно Франку, разговор касался, главным образом, маховского «принципа экономии мышления» [361]; не известно, шла ли при этом речь о гравитационной проблеме, над которой Эйнштейн в это время напряженно работал. Но спустя несколько месяцев Эйнштейн завершает статью «Существует ли гравитационное воздействие аналогичное электродинамической индукции?» [249], в которой Эйнштейн впервые (в печати) упоминает имя Маха и пытается показать в рамках своей теории статического поля существование маховского эффекта обусловленности инерции тела его взаимодействием со всеми остальными массами. Статья не датирована, но содержит ссылку на вторую статью по теории статического поля, законченную 23 марта 1912 г. [247], ко времени завершения обсуждаемой работы, однако, еще не увидевшую свет. Поэтому можно предположить, что она была закончена в апреле — мае 1912 г.

Эйнштейн рассматривает следующий мысленный эксперимент. Внутри массивной сферической оболочки K с радиусом R и массой M , в ее центре находится частица с массой m . Масса оболочки предполагается равномерно распределенной. Согласно СТО, инертная масса всей системы равна

$$M + m - kmM/Rc^2, \quad (37)$$

где kmM/R — это энергия, которую необходимо затратить, чтобы перевести частицу m из центра оболочки в бесконечность. Затем, опираясь на приближенные соотношения своей теории статического поля для кинетической энергии T и скорости света:

$$T = \frac{m}{2} q^2 \frac{c_0}{c}, \quad (38)$$

$$\text{и } \frac{c}{c_0} = 1 - \frac{\Phi_0 - \Phi}{c_0^2}, \quad (39)$$

вытекающие из приближенных уравнений движения

$$\ddot{x} = -c(\partial c / \partial x), \quad (40)$$

Эйнштейн подставляет (39) в (38), причем в рассматриваемом случае

$$\Phi_0 - \Phi = kM/R,$$

и получает выражение для кинетической энергии частицы:

$$T = \frac{m}{2} q^2 \left(1 + \frac{km}{Rc_0^2} \right) \quad (q \text{ — скорость частицы}),$$

откуда непосредственно следует, что реальная масса частицы с учетом оболочки K равна

$$m' = m + kmM/Rc_0^2. \quad (41)$$

Точно так же и масса оболочки увеличивается на ту же самую величину:

$$M' = M + kmM/Rc_0^2. \quad (42)$$

Здесь c_0 — скорость света в гравитационном поле с потенциалом Φ_0 . «Этот результат очень интересен. Он показывает, что присутствие оболочки K , обладающей инертной массой, увеличивает инертную массу находящейся внутри нее материальной точки. Это наводит на мысль о том, что инерция материальной точки полностью обусловлена воздействием всех остальных масс посредством некоторого вида взаимодействия с ними» [249, с. 225]. К последней фазе Эйнштейн делает следующее примечание: «Это полностью совпадает с точкой зрения, выдвинутой Э. Махом в его остроумных исследованиях по этому вопросу» [там же]. При этом он ссылается на «Механику» Маха. Далее Эйнштейн вычисляет силу, действующую на массу m со стороны сферической оболочки K , обладающей ускорением Γ . Несложные вычисления, опирающиеся на формулы (37), (41), (42), дают выражение для этой силы:

$$K = \frac{3}{2} \frac{kmM}{Rc^2} \Gamma, \quad (43)$$

причем направлена она так же, как ускорение Γ , в отличие от аналогичного электродинамического взаимодействия между одноименными электрическими зарядами. Естественно, что в более общей ситуации эти соотношения должны были претерпеть некоторые изменения, и Эйнштейн осторожно замечает: «В какой мере оправдывается эта точка зрения, выяснится, когда мы будем располагать динамической теорией гравитации» [там же].

В конце 1912 г. Эйнштейн пишет свое знаменитое третье письмо к Маху (рождественское письмо 1912—1913 гг.), которое мы приводили полностью. Если принятая датировка правильна, то письмо содержит первый набросок тензорной теории Эйнштейна — Гроссмана. Не вполне ясно, о каких своих работах говорит в начале письма Эйнштейн: «Меня очень радует дружеский прием, который Вы проявляете к новой теории (речь может идти лишь о теории статического поля и статьях, законченных в феврале-марте 1912 г., либо Эйнштейн в предыдущем, не

найденном пока письме дал эскиз тензорной теории. — В. В.). Математические трудности, на которые наталкивается эта идея при ее развитии, к сожалению, и для меня очень велики» [391, с. 8].

Наконец, последнее из известных писем Эйнштейна к Маху, опубликованное немецким теоретиком Хенлем в 1960 г., было написано вскоре после окончания «Проекта», копию которого Эйнштейн, по-видимому, отослал Маху. Концовка письма весьма замечательна, в ней как раз идет речь об эффектах относительности инерции, которые Эйнштейн связывал с Махом и которые имели место в новой теории тяготения: «Если это так (т. е. если наблюдения солнечного затмения в 1914 г. подтверждают гравитационное отклонение света. — В. В.), то Ваши вдохновляющие исследования об основах механики — вопреки несправедливой критике Планка * — получают блестящее подтверждение. Тогда неизбежным следствием будет то, что инерция проявляется как своего рода взаимодействие тел, вполне в духе Вашей критики ньютоновского эксперимента с вращающимся сосудом. Первое следствие в этом смысле Вы найдете на странице 6 этой работы (речь идет, очевидно, о зависимости инерции от гравитационного потенциала, выраженной формулой (4) «Проекта». — В. В.). Дальше оказалось:

1. Если ускорить массивную сферическую оболочку S , то согласно теории, заключенное внутри тело должно испытывать ускоряющую силу.

2. Если вращать оболочку S вокруг оси, проходящей через ее центр... то внутри оболочки возникает кориолисово поле, т. е. происходит увлечение плоскости маятника Фуко...» (цит. по: [214, с. 262—263]). Из трех «маховских» следствий, указанных в этом письме, два, как мы видели, рассматривались Эйнштейном в работе 1912 г. Правда, эти два следствия непосредственно не обсуждались Махом в «Механике» [135], хотя близко примыкают к идее Маха об обусловленности инерции тела взаимодействием его со всеми остальными телами Вселенной. Но третье следствие, связанное с частичным увлечением инерциальной системы отсчета вращающимися массами, до некоторой степени, просматривается в маховской критике ньютоновского опыта с вращающимся сосудом.

Впервые весь круг этих вопросов, которым, как видно из четвертого письма, Эйнштейн придавал принципиальное значение, нашел достаточное отражение именно в Венском докладе. Из уравнения движения в ньютоновском приближении

$$\frac{d}{dt} \left\{ m \frac{\dot{x}}{\sqrt{g_{44} - q^2}} \right\} = -\frac{1}{2} m \frac{\partial g_{44} / \partial x}{\sqrt{g_{44} - q^2}}$$

* В трех из имеющихся четырех писем Эйнштейн подчеркивает свою солидарность с позицией Маха в противовес критике Планка.

он получает выражения для импульса и энергии частицы

$$I_x = m \left(1 + \frac{\kappa}{8\pi} \int \frac{\rho_0 dv}{r} \right) \frac{\dot{x}}{c}, \quad (44)$$

$$E = mc \left(1 - \frac{\kappa}{8\pi} \int \frac{\rho_0 dv}{r} \right) + \frac{1}{2} \frac{m}{c} \left(1 + \frac{\kappa}{8\pi} \int \frac{\rho_0 dv}{r} \right) q^2. \quad (45)$$

Эти соотношения означают, что хотя «энергия покоящейся материальной точки... уменьшается от скопления масс в ее окрестности, то же самое скопление масс приводит к увеличению инерции рассматриваемой точки» [252, с. 295]. Поэтому, продолжает Эйнштейн, «едва ли можно отказаться от того, чтобы считать инерцию точки обусловленной существованием остальных масс» [252, с. 296]. Затем следует ссылка на Маха и его концепцию относительности инерции, которая связывается с идеей относительности ускорения: «Известно, что впервые эту точку зрения со всей остротой и ясностью выдвинул Э. Мах в своей истории механики» [там же]. Интересно, что в этой связи Эйнштейн упоминает еще одного венца — математика В. Гоффмана: «Сошлемся также на остроумную брошюру венского математика В. Гоффмана, где независимо выдвинута та же самая точка зрения», т. е. «гипотеза относительности инерции» [там же] *.

Не следует упускать из виду, что концепция относительности инерции, которую Эйнштейн имел в виду уже тогда, когда он разрабатывал основанную на принципе эквивалентности теорию статического поля тяготения и пытался согласовать ее с этой концепцией, непосредственно вела от специального к общему принципу относительности: «...Теория, обеспечивающая относительность инерции, более удовлетворительна, чем ...современная теория (классическая механика, СТО. — В. В.), поскольку в последней вводится инерциальная система, состояние движения которой, с одной стороны, не связано с состоянием наблюдаемых предметов и, следовательно, не определяется чем-либо доступным восприятию, а с другой стороны, она должна определять поведение материальных точек» [там же]. Тем самым, концепция относительности инерции увязывается с отсутствием класса привилегированных систем отсчета, что и является физической основой общего принципа относительности.

Затем Эйнштейн получает второе следствие, связанное с тем, что ускоряющиеся массы оказывают своеобразное индукционное действие на материальную точку (пробное тело) в направлении ускорения. Напомним, что это следствие Эйнштейн обсуждал в статье 1912 г. «Существует ли гравитационное воздействие, аналогичное электродинамической индукции?» [249]. Тензорная теория подтверждает, обобщает и уточняет этот вывод. Вместо уравнений поля в ньютоновском приближении (34), в

* Речь идет о брошюре В. Гоффмана [402], цитированной Махом в его «Механике» [135]. Нам не удалось познакомиться с этой книгой В. Гоффмана.

которых пренебрегалось влиянием скоростей масс, Эйнштейн теперь учитывает члены, пропорциональные первой степени скорости масс, создающих поле:

$$\begin{aligned} \square h_{\mu\nu} &= 0 \quad (\mu, \nu \neq 4), \\ \square h_{44} &= -\kappa \rho_0 \dot{x}, \\ &\dots \dots \dots \\ \square \dot{h}_{44} &= -\kappa c^2 \rho_0. \end{aligned} \tag{46}$$

Уравнение движения материальной точки, совпадая с уравнением геодезической, приобретает тогда следующий вид:

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{1}{2} \text{grad } g_{44} + \dot{\mathbf{g}} - [\dot{\mathbf{r}}, \text{rot } \mathbf{g}]. \tag{47}$$

Здесь скорость движущейся точки считается достаточно малой, \mathbf{r} — радиус вектор точки, \mathbf{g} — вектор (g_{14}, g_{24}, g_{34}) .

Уравнения поля в этом случае приобретают вид:

$$\square \mathbf{g} = -\kappa \rho_0 \mathbf{v}, \quad \square h_{44} = -\kappa c^2 \rho_0. \tag{48}$$

Эйнштейн сопоставляет уравнения (47) — (48) с уравнениями электродинамики (g_{44} — аналог скалярного потенциала, \mathbf{g} — аналог векторного потенциала). «Второй член в правой части (уравнения (47). — В. В.)... соответствующий напряженности электрического поля, возникающего вследствие изменения векторного потенциала во времени, в точности выражает те совпадающие по направлению с ускорением индукционные воздействия, которые мы должны ожидать в соответствии с понятием инертности энергии» [252, с. 297].

Наконец, выразив $[\dot{\mathbf{r}}, \text{rot } \mathbf{g}]$ уравнения (47), подобное силе Лоренца, с одной стороны, и вполне аналогичное кориолисовой силе в механике относительного движения — с другой, ведет к третьему следствию, о котором Эйнштейн писал в последнем письме к Маху. Это следствие было детально изучено Г. Тиррингом [155, 504]. Все эти три эффекта из-за малости гравитационной постоянной оказываются весьма незначительными, и их едва ли можно наблюдать в земных или в астрономических условиях. Но они, в сочетании с общей концепцией обусловленности инерции удаленными массами наводят на мысль о глобальном выражении этой идеи в духе космологической формулировки принципа Маха. В конечном счете, развитие этого комплекса идей привело к релятивистской космологии. В том, что новая теория успешно согласовывалась с маховской концепцией относительности ускорения и инерции, Эйнштейн видел важное логико-теоретическое подтверждение ее. «Это обстоятельство (т. е. именно это согласование. — В. В.) образует одну из важнейших опор изложенной теории» [251, с. 272], — говорил он в своем докладе во Фрауэнфельде, состоявшемся двумя неделями ранее венского доклада. Наконец, и принцип общей относитель-

ности тесно связывался с концепцией относительности инерции и получал, таким образом, дополнительное физическое обоснование. Развитие маховского круга идей, по-видимому, послужило важным стимулом при расширении принципа относительности до принципа общей ковариантности.

Выводы. ОТО еще не была построена (к концу 1913 г.), хотя решающий поворот совершился. Выход за рамки СТО, инициированный принципом эквивалентности и связанный как с отказом от постоянства скорости, так и с отказом от привилегированного характера класса инерциальных систем отсчета; идея радикального расширения СТО, связанная с переходом от однородного псевдоевклидова пространства — времени к неоднородному пространству — времени Римана и связанная с этим динамизация пространственно-временных абсолютов — все это выражение отказа «от запасов лишних равновесия». При этом, к такому отказу не вели ни общие гносеологические установки, ни стремление к аксиоматизации или адекватной математической формулировке теории тяготения. Решающее значение в осознании необходимости отказов «от запасов лишних равновесия» и превращении их в мощное конструктивное средство для построения новой теории имели существенно физические соображения и стимулы: необъяснимость аномалии Меркурия в рамках ньютоновской теории тяготения, полевая концепция гравитации, равенство инертной и гравитационной масс и связанный с ним принцип эквивалентности, идеи Маха об относительности ускорения и инерции, осознание утраты координатами непосредственного метрического смысла и необходимости перехода к метрике как основе пространственно-временных измерений и т. д. Тензорная теория Эйнштейна — Гроссмана, несмотря на многие свои достоинства, была внутренне противоречивой и имела некоторые особенности, которые выглядели как своеобразные недостатки. Противоречивость теории заключалась в отказе от общей ковариантности уравнений самого гравитационного поля. Введение тензорного потенциала, отождествляемого с метрическим тензором риманова пространства — времени, которое становилось на место пространства Минковского; последовательное развитие идей, связанных с принципом эквивалентности и концепцией относительности инерции Маха — все это требовало перехода к принципу общей относительности (или общей ковариантности) как фундаментальному принципу всей теории тяготения. Но в процессе развития теории авторы ее (Эйнштейн и Гроссман) пришли к ошибочному выводу о необходимости ограничиться линейной ковариантностью уравнений гравитации, возвратившись, таким образом, к тем самым «излишкам равновесия», отказ от которых как раз явился лейтмотивом новой теории. Эта теория предсказывала чуть ли не единственное экспериментально регистрируемое отличие от теории Ньютона и некоторых других полевых теорий — отклонение света в поле тяготения. Гравитационное «красное смещение» спектральных

линий считалось в 1913 г. практически ненаблюдаемым или неотделимым от других, негравитационных, эффектов смещения. Вопрос об аномальном движении перигелия на этой стадии также не обсуждался. Более того, если бы в 1913—1914 гг. удалось измерить отклонение световых лучей в гравитационном поле Солнца, то результат получился бы в два раза больше ожидаемого. Таким образом, в отношении экспериментального подтверждения теория Эйнштейна — Гроссмана не имела преимуществ по сравнению с другими теориями, прежде всего, скалярными. Отказ от СТО, искривление пространства — времени, удешевление числа потенциалов, нелинейность полевых уравнений, то есть резкое усложнение теории не давало каких-либо заметных выгод в плане опытного обоснования теории. Серьезные логико-теоретические трудности возникали и в связи с пониманием принципа общей относительности и его соотношения с общей ковариантностью, принципом эквивалентности, маховской концепцией относительности инерции, принципами сохранения энергии-импульса, причинности и т. д.

С другой стороны, Абрагам, Нордстрем, Ми и др. продолжали разрабатывать свои теории, которые в этот период реально конкурировали с теорией Эйнштейна — Гроссмана. К анализу этих конкурирующих теорий мы и переходим.

2. Конкуренция гравитационных теорий (1913—1915 гг.)

...Теории, не соответствующие моему исходному убеждению, мне чужды. Но я совершенно не утверждаю, что эти теории должны быть отброшены при современном состоянии экспериментов.

А. Эйнштейн (1913)

И, уцепясь за край скользящий, острый,
И слушая всегда жужжащий звон,—
Не сходим ли с ума мы в смене пестрой
Придуманных причин, пространства, времен...

А. Блок. «Миры летят. Годы летят. Пустая...» (1912)

Вторая теория Нордстрема

«Проект», аргументы Эйнштейна против скалярного лоренц-ковариантного подхода. Еще в «Проекте» Эйнштейн, не ссылаясь прямо на теорию Нордстрема, пришел к выводу, что гравитационное поле не может быть скалярным. При этом он имел в виду именно лоренц-ковариантную теорию Нордстрема, а не теорию Абрагама, которая, будучи нерелятивистской, представлялась ему ошибочной с самого начала. Но, в противовес первой теории Нордстрема, он полагал, что основную роль в скалярной

теория должен играть так называемый «скаляр Лауэ», т. е. след тензора энергии-импульса материи $T_{\mu\nu}$

$$\sum_{\mu} T_{\mu\mu} = T.$$

Лауэ показал, что для замкнутой системы выполняется равенство

$$\int T dV = \int T_{44} d\tau,$$

и, таким образом, как будто, можно согласовать скалярный подход с равенством инертной и тяжелой масс («...Согласно этой точке зрения тяготение в замкнутой системе определяется ее полной энергией» [250, с. 247].). Однако затем Эйнштейн описывает некоторый мысленный эксперимент с полостью, заполненной излучением, но не являющейся замкнутой системой (полость — цилиндр с подвижными в вертикальном направлении зеркальными стенками), и показывает, что в статическом поле тяготения с помощью такой системы можно было бы извлекать работу при помощи некоторого кругового процесса.

Второй аргумент против скалярного подхода носил логико-теоретический характер: «Однако с моей точки зрения самое действенное возражение против подобной теории (скалярной. — В. В.) основано на убеждении, что относительность справедлива не только для ортогональных линейных преобразований, но и для значительно более широкой группы преобразований» [там же]. Впрочем, из-за того, что и тензорная теория не в полной мере удовлетворяла требованию общей ковариантности, пришлось делать оговорку: «Однако мы не можем считать это возражение решающим» [там же].

Вскоре отношение Эйнштейна к скалярному лоренц-ковариантному подходу существенно изменилось. Об этом свидетельствует его венский доклад, в котором после рассмотрения нового варианта скалярной теории Нордстрема сделан следующий вывод: «Резюмируя, мы можем сказать, что скалярная теория Нордстрема ...удовлетворяет всем требованиям, которые при современном состоянии эксперимента можно предъявить теории гравитации» [252, с. 283]. Эйнштейн также показывает, как можно избежать противоречия, связанного с упомянутым выше мысленным экспериментом. Об этом же он писал в корректурных примечаниях к «Проекту»: «Возражение против скалярной теории тяготения (теории Нордстрема), выдвинутое в § 7, оказалось несобоснованным. Его можно обойти, если допустить, что размеры тела определенным образом зависят от гравитационного потенциала» [250, с. 266].

Вторая теория Нордстрема. По-видимому, основную роль в этой переоценке сыграл визит Нордстрема в Цюрих летом 1913 г. Нордстрем встречался с Эйнштейном и обсуждал с ним скалярный подход к проблеме тяготения. В результате Нордстрем раз-

работал новый вариант скалярной теории, болсс удовлетворительный с точки зрения принципа эквивалентности, чем первый [481, 482]. Эйнштейн же признал этот вариант логически непротиворечивым и согласующимся с равенством инертной и гравитационной масс. Статья Нордстрема была закончена 24 июля. Примерно в это же время Эйнштейн закончил подготовку своего венского доклада, в котором рассматривается вторая теория Нордстрема без ссылки на статью последнего. Нордстрем же ссылается на Эйнштейна (в частности, на «Проект») в связи с использованием в качестве собственной плотности материи «скаляра Лауэ», деленного на квадрат скорости света.

Нордстрем имел, по крайней мере, три стимула для модификации своей первой теории. Во-первых, теория не согласовывалась строго с равенством инертной и гравитационной масс (или с независимостью ускорения свободного падения от массы и структуры падающих тел). Во-вторых, постоянство скорости света и релятивистскую инвариантность при наличии гравитационного поля можно было попытаться сохранить, допустив переменность гравитационной константы, зависимость ее от потенциала. В-третьих, после работ Лауэ и Эйнштейна напрашивалось в качестве плотности материи использовать «скаляр Лауэ», деленный на квадрат скорости света. Именно эти соображения выдвинул Нордстрем в начале своей статьи как повод для построения модифицированной скалярной теории гравитационного поля: «...Во-первых, плотность массы покоя определена достаточно произвольным образом; возможно некоторое иное определение массы, которое в общем не изменило бы законов механики, но позволило бы видоизменить законы гравитации. Во-вторых ...имеется возможность не сохранять неизменной гравитационную постоянную, но сделать ее зависящей от некоторых факторов. Можно думать, что эта скалярная величина может зависеть как от внутреннего состояния тела, так и от гравитационного потенциала в соответствующем месте» [483, с. 533]. «Иное определение массы» было связано как раз с использованием «скаляра Лауэ». «...Упомянутые неопределенности теории удастся устранить с помощью вполне правдоподобного предположения, которым я обязан Лауэ и Эйнштейну. Лауэ показал, что эйнштейновский принцип эквивалентности — хотя и не во всей своей полноте — можно сохранить в силе, если собственную плотность материи определить следующим образом

$$T_{xx} + T_{yy} + T_{zz} + T_{uu} = -D \quad [483, с. 534].$$

Величина D , таким образом, характеризует плотность энергии материи, а соответствующая плотность массы дается соотношением:

$$\nu = D/c^2. \quad (49)$$

Задача теперь заключается в том, чтобы это более естественное (с теоретико-инвариантной точки зрения) определение плотно-

сти массы так согласовать с характером зависимости гравитационной постоянной от потенциала, чтобы наиболее полным образом удовлетворить эйнштейновскому принципу эквивалентности. «В дальнейшем, — замечает Нордстрем, — будет показано, что эйнштейновский принцип эквивалентности требует вполне определенной зависимости гравитационной постоянной от гравитационного потенциала $\Phi: g = g(\Phi)$ » [483, с. 534].

Уравнения поля и выражение для силы тяготения записываются в следующем виде

$$\partial^2\Phi/\partial x^2 + \partial^2\Phi/\partial y^2 + \partial^2\Phi/\partial z^2 + \partial^2\Phi/\partial u^2 = g(\Phi)\nu; \quad (50)$$

$$K_x^i = -g(\Phi)\nu(\partial\Phi/\partial x),$$

$$\dots$$

$$K_u^i = -g(\Phi)\nu(\partial\Phi/\partial u),$$

(51)

где K_i — i -я компонента гравитационной силы.

Чтобы найти зависимость $g = g(\Phi)$, Нордстрем рассматривает случай статического гравитационного поля, принимая $\partial\Phi/\partial t = 0$. Предполагается также, что полный импульс системы равен нулю. Таким образом, он имеет дело с так называемой «полной статической системой», которая была введена Лауэ. Это такая замкнутая физическая система, которая в некоторой допустимой системе отсчета Σ_0 находится в равновесии. В этой системе отсчета компоненты тензора энергии — импульса T_{xx} , T_{yy} , T_{zz} , выражающие поток энергии и плотность импульса, равны нулю; обращаются также в нуль $\int T_{xx}dV$, $\int T_{yy}dV$, $\int T_{zz}dV$. Если соответствующие условия наложить на средние значения этих величин, то будет обеспечено статистическое равновесие системы, которая может рассматриваться как «полная статическая система» в среднем. Примером такой системы является газ в замкнутом сосуде, находящийся в статистическом равновесии.

Уравнение гравитации (50) можно переписать в интегральной форме

$$\Delta\Phi = -\frac{1}{4\pi} \int \frac{dV}{r} g(\Phi)\nu + \Phi_\infty, \quad (51)$$

где Φ_∞ — значение потенциала Φ за пределами исследуемой системы с распределением массы ν , который предполагается постоянным. Физический процесс в системе определяется суммарным тензором энергии-импульса, состоящим из тензора «материи» (без учета электромагнитного и гравитационного полей) $T_{\mu\nu}$ и тензоров энергии-импульса электромагнитного ($L_{\mu\nu}$) и гравитационного ($G_{\mu\nu}$) полей. Гравитационный тензор конструируется так же, как в теории Абрагама

$$G_{xx} = \frac{1}{2} \{ (\partial\Phi/\partial x)^2 - \dots - (\partial\Phi/\partial u)^2 \},$$

$$G_{xy} = \frac{\partial\Phi}{\partial x} \frac{\partial\Phi}{\partial y} \text{ и т. д.}$$

Согласно определению полной статической системы

$$\int \{T_{xx} + G_{xx} + L_{xx}\} dV = 0,$$

$$\begin{matrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{matrix}$$

выполняется следующее соотношение:

$$\int \{D + (\nabla\Phi)^2\} dV = \int (T_{uu} + G_{uu} + L_{uu}) dV = -E_0, \quad D = -T.$$

Здесь D — след тензора энергии-импульса материи (при этом учитывается, что след тензора энергии импульса электромагнитного поля L равен нулю); поскольку $\partial\Phi/\partial t = 0$, след гравитационного тензора энергии-импульса G равен $-(\nabla\Phi)^2$; E_0 — энергия полной статической системы в системе отсчета Σ_0 .

Так как $\partial^2\Phi/\partial t^2 = 0$, то уравнение поля (50) сводится к уравнению

$$\operatorname{div} \nabla\Phi = g(\Phi)\mathbf{v}, \quad (50')$$

а несложные преобразования с учетом (50') дают соотношение

$$\int (\nabla\Phi)^2 dV = - \int (\Phi - \Phi_a) g(\Phi) \mathbf{v} dV.$$

Отсюда для полной энергии (E_0) имеем формулу

$$E_0 = \int D dV - \int (\Phi - \Phi_a) g(\Phi) \mathbf{v} dV;$$

и для инертной массы

$$m = E_0/c^2 = 1/c^2 \int \{D - (\Phi - \Phi_a) g(\Phi) \mathbf{v}\} dV. \quad (52)$$

Гравитационную массу системы естественно, в соответствии с уравнениями движения (51), определить так:

$$M_g = \int g(\Phi) \mathbf{v} dV.$$

Тогда пропорциональность инертной и гравитационной масс требует: $M_g/m = \text{const} = g$ (если g не зависит от потенциала); $M_g/m = g(\Phi_a)$ (если предположить, что g зависит от потенциала).

Таким образом, должно выполняться соотношение:

$$g(\Phi_a) m = \int g(\Phi) \mathbf{v} dV. \quad (53)$$

Из формул (52) и (53) получаем:

$$1/c^2 \int D dV = 1/c^2 \int g(\Phi) \mathbf{v} \{ \Phi - \Phi_a + [c^2/g(\Phi_a)] \} dV.$$

Необходимым и достаточным условием выполнения этого тождества, выражающего эквивалентность инертной и гравитационной масс, является соотношение

$$D = g(\Phi) \mathbf{v} \{ \Phi - \Phi_a + [c^2/g(\Phi_a)] \}.$$

Так как плотность негравитационной энергии D не должна зависеть от внешнего потенциала Φ_0 , то должно быть справедливо соотношение:

$$c^2/g(\Phi_0) - \Phi_0 = \text{const.}$$

Поскольку это соотношение должно выполняться при любом значении Φ_0 , то в результате получаем зависимость гравитационной постоянной от потенциала:

$$g(\Phi) = c^2/(A + \Phi). \quad (54)$$

Эта зависимость, как видно из подстановки (54) в выражение для D , даст требуемое соотношение (49). Постоянную A вычислить нельзя из-за невозможности определения абсолютного значения потенциала, но ее можно исключить, предположив, что имеется некоторая точка с потенциалом Φ_0 , доступная для исследования. Тогда

$$g_0 = \frac{c^2}{A + \Phi_0}, \quad g(\Phi) = \frac{g_0}{1 + (g_0/c^2)(\Phi - \Phi_0)}. \quad (55)$$

Можно также ввести подстановку $\Phi' = \Phi + A = (c^2/g_0) + \Phi - \Phi_0$. Тогда $g(\Phi) = c^2/\Phi'$, и уравнения гравитационного поля (50) принимают вид

$$\Phi' \left(\frac{\partial^2 \Phi'}{\partial x^2} + \dots + \frac{\partial^2 \Phi'}{\partial u^2} \right) = c^2 \nu. \quad (56)$$

Соотношения (51) можно в этом случае переписать так:

$$K_x^x = -c^2 \nu \frac{\partial}{\partial x} \ln \Phi', \dots, K_u^u = -c^2 \nu \frac{\partial}{\partial u} \ln \Phi'. \quad (57)$$

Таким образом, если учесть зависимость гравитационной постоянной от потенциала, то уравнения поля и выражение для силы тяготения можно преобразовать к виду (56) — (57). При этом вся теория лоренц-ковариантна, и для полной статической системы выполняется пропорциональность инертной и тяжелой масс. Может показаться теперь, что, поскольку лоренц-ковариантность и принцип эквивалентности обеспечиваются за счет переменности гравитационной константы, инертная масса «материи» не должна зависеть от гравитационного потенциала. Но это не так, и Нордстрем легко находит эту зависимость.

Нордстрем рассмотрел полную статическую систему, окруженную сферой достаточно большого радиуса r . Внутри сферы потенциал, создаваемый удаленными массами, предполагается постоянным и равным Φ_0 . Посредством медленного перемещения этих масс можно вызвать изменение потенциала ($\Phi_0 + d\Phi_0$) и, соответственно, поток гравитационной энергии через сферу принимает вид:

$$S^t = - \frac{\partial \Phi}{\partial t} \nabla \Phi.$$

Поток энергии через сферу можно оценить так:

$$4 \pi r^2 |\nabla \Phi| d\Phi_a.$$

Поскольку $|\nabla \Phi| = M_g/4 \pi r^2$, при $M_g = mg(\Phi_a)$, то прирост полной энергии определяется соотношением

$$dE_0 = M_g d\Phi_a$$

и, следовательно, имеем дифференциальное уравнение:

$$c^2 dm = mg(\Phi_a) d\Phi_a, \text{ или } dm/m = d\Phi_a'/\Phi_a',$$

откуда получаем зависимость инертной массы от внешнего гравитационного потенциала:

$$m/\Phi_a' = \text{const}, \quad (58)$$

или, с учетом соотношения $\Phi' = c^2/g_0 + \Phi - \Phi_0$

$$m = m_0 \{1 + (g_0/c^2) (\Phi_a - \Phi_0)\}, \quad (59)$$

где g_0 — гравитационная постоянная, и Φ_0 — потенциал в некоторой доступной для изучения точке.

Гравитационная же масса оказывается независимой от внешнего потенциала (вследствие соотношения (58)):

$$M_g = mc^2/\Phi_a' = \Phi_a' \text{const } c^2/\Phi_a' = \text{const } c^2.$$

Вычислив инертную массу сферического электрона

$$m = \frac{e^2 + M_g}{8\pi c^2 a},$$

где e — заряд и a — радиус электрона, а M_g — его гравитационная масса, Нордстрем обратил внимание на то, что линейные размеры должны обратно пропорционально зависеть от потенциала Φ_a' (так как инертная масса пропорциональна Φ_a')

$$a\Phi_a' = \text{const}.$$

Но ввиду того, что

$$\Phi' = \Phi_a' - M_g/4\pi a = \Phi_a' - \text{const}$$

и линейные размеры обратно пропорциональны потенциалу Φ'

$$a\Phi' = \text{const}.$$

Соображения размерности и предыдущие формулы дают аналогичную зависимость временных интервалов от потенциала, что приводит к гравитационному «красному смещению», вытекающему из принципа эквивалентности.

Зависимость же линейных размеров от потенциала позволила Нордстрему снять эйнштейновское возражение против скалярного подхода, связанное с описанным выше мысленным экспериментом. По-видимому, когда Нордстрем и Эйнштейн встречались в июле в Цюрихе, они обсуждали, в частности, этот мысленный эксперимент. Во всяком случае Нордстрем прямо ссы-

лается на Эйнштейна в этой связи: «То, что согласно развитой здесь теории должна существовать зависимость линейных размеров тела от гравитационного потенциала как некоторое общее свойство материи, доказал Эйнштейн, показав, что в противном случае можно было бы сконструировать устройство, извлекающее энергию из гравитационного поля» (цит. по: [483, с. 544]).

Используя весьма громоздкие преобразования, Нордстрем в заключение выводит уравнения движения материальной точки

$$\begin{aligned}
 -c^2 \frac{\partial}{\partial x} \ln \Phi'_a &= \frac{dV_x}{d\tau} + V_x \frac{d}{d\tau} \ln \Phi'_a, \\
 \dots \dots \dots \\
 -c^2 \frac{\partial}{\partial u} \ln \Phi'_a &= \frac{\partial V_u}{\partial \tau} + V_u \frac{d}{d\tau} \ln \Phi'_a.
 \end{aligned} \tag{61}$$

Здесь (V_x, V_y, V_z, V_u) — четырехмерная скорость точки, $\Phi'_a = = c^2/g + \Phi_a - \Phi_0$ — высший потенциал с началом отсчета в точке с потенциалом $(\Phi_0 - c^2/g_0)$. Уравнения (61) позволяют сделать вывод, что «движение тела в гравитационном поле полностью независимо от свойств этого тела, если только его можно понимать как материальную точку» [там же].

Задача, поставленная Нордстремом, была выполнена. Была построена лоренц-ковариантная теория тяготения со скалярным потенциалом, хорошо согласующаяся с требованием равенства инертной и гравитационной масс. Достигнуто это было за счет допущения зависимости гравитационной постоянной от потенциала тяготения и более естественного определения собственной плотности массы. Важную роль в разработке теории сыграло введенное Лауэ понятие «полной статической системы», которое позволило удовлетворительно согласовать теорию с требованием эквивалентности инертной и гравитационной масс.

Эйнштейн, как мы видели, проявлял живой интерес к теориям Нордстрема. Еще до самого Нордстрема, он, по-видимому, разрабатывал теорию аналогичную первой теории Нордстрема, но пришел к выводу о ее несовместимости с принципом эквивалентности в форме независимости ускорения свободного падения от внутренней структуры тела. Релятивистское истолкование принципа эквивалентности к тому же требовало расширения СТО. Именно на этот путь встал Эйнштейн в 1911 г., начав разработку своих статических теорий тяготения. В процессе развития этих теорий он вплотную подошел (осенью 1912 г.) к тензорной теории. Как раз в октябре 1912 г. появляется первая теория Нордстрема, которую Эйнштейн считает логически удовлетворительной, но в физическом отношении несостоятельной из-за ее расхождения с принципом эквивалентности. В «Проскте» скалярному подходу был уделен специальный параграф. Эйнштейн указывал на два аргумента против этого подхода. Первый опи-

рался на мысленный эксперимент, иллюстрирующий противоречие скалярной теории с законом сохранения энергии-импульса. Вторым аргументом, логического характера, опирающимся на принцип симметрии: Эйнштейну казалось, что принцип эквивалентности требовал расширения группы Лоренца. Но вскоре выяснилось, что первое возражение можно устранить (по крайней мере, в рамках второй теории Нордстрема). Второе же требование не выполнялось в полной мере и в тензорной теории Эйнштейна — Гроссмана.

Венский доклад Эйнштейна, скалярные теории. Следующим важным шагом в эволюции отношения Эйнштейна к скалярным теориям Нордстрема явился венский доклад первого, который готовился им летом 1913 г., а состоялся в сентябре [252].

В начале доклада Эйнштейн сформулировал «некоторые общие постулаты, которые можно принять (но не обязательно все) в теории гравитации» [252, с. 275]. Два из этих «постулатов» — принцип сохранения энергии-импульса и согласованность с релятивистской инвариантностью — не связаны непосредственно с гравитацией и относятся к общефизическим или методологическим принципам. Два других: равенство инертной и тяжелой масс и так называемый «принцип относительности гравитационного потенциала» — касаются только гравитации («Наблюдаемые законы природы не должны зависеть от абсолютных значений гравитационного потенциала» [252, с. 275].) По всей вероятности, впервые этот принцип был выдвинут Г. Ми в его теории гравитации, которую мы кратко рассмотрим в связи с дискуссией Эйнштейна и Ми на венской конференции. Эта теория появилась в третьем сообщении большой работы по единой теории поля (заключено 31 октября 1912 г.). Ми следующим образом формулировал этот принцип: «Если два пустых пространства отличаются лишь тем, что в одном из них гравитационный потенциал имеет очень большое среднее значение, а в другом среднее значение его равно нулю, то это никак не влияет на размеры и форму электронов и других материальных элементарных частиц, на скорость света, вообще на любые физические соотношения и процессы» [464, с. 63]. «Принцип относительности потенциала» по своему смыслу близок к сильному принципу эквивалентности, утверждающему, «что в свободно падающей лаборатории при проведении локальных экспериментов физические закономерности, включая все численные результаты, проявляются совершенно одинаково независимо от места, в том числе и в областях, где гравитация отсутствует» [57, с. 67]. Правда, Р. Дикке полагает, что этот принцип также опирается на опыт Этвеша.

Комментируя четыре «общих постулата», Эйнштейн упоминает теорию Абрагама и подчеркивает, что она не согласуется с релятивистским постулатом. Затем он обращает внимание на опытный характер постулата о равенстве инертной и гравитационной масс (опыты Этвеша), который ведет к тому, что «тяготеющая масса системы определяется ее полной энергией, вклю-

чая ее гравитационную энергию». «Постулат относительности гравитационного потенциала», по мнению Эйнштейна, не имеет достаточно веского обоснования — ни эмпирического, ни логико-теоретического — и может быть оправдан лишь «верой в простоту законов природы» [252, с. 276].

После этого Эйнштейн рассматривает весьма обстоятельно вторую теорию Нордстрема (без ссылки на июльскую работу последнего). Дело в том, что летом 1913 г. Эйнштейн после встречи с Нордстремом в Цюрихе пришел к выводу, что из ряда гравитационных теорий (ньютоновская теория, лоренц-ковариантные обобщения типа Пуанкаре—Минковского, теории Абрагама, Ишивары, Ми и др.) перечисленным четырем «постулатам» удовлетворяют только вторая теория Нордстрема и тензорная теория его самого и Гроссмана: «Мы также далеки от того, чтобы утверждать, что оба изложенные в дальнейшем обобщения теории Ньютона (вторая теория Нордстрема и тензорная теория.— В. В.) являются единственно возможными; однако все же осмелюсь сказать, что при современном состоянии наших знаний они являются наиболее естественными» [там же].

Эйнштейн, исходя из требований лоренц-ковариантности теории и скалярности потенциала, получает уравнения движения материальной точки и, соответственно, выражения для импульса, энергии и силы, действующей на точку со стороны поля тяжести. Затем рассматривается движение несвязанных масс в поле тяготения, описываемых тензором энергии-импульса $T_{\mu\nu}$. Из теоретико-инвариантных соображений вводится в качестве фундаментального скаляра, генерирующего скалярное поле, след тензора $T_{\mu\nu}$ и конструируется выражение для закона сохранения энергии-импульса в гравитационном поле

$$\sum_{\sigma} \frac{\partial T_{\mu\sigma}}{\partial x_{\sigma}} = \sum_{\sigma} T_{\sigma\sigma} \frac{1}{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x_{\mu}}. \quad (62)$$

Уравнение (62), конечно, относится не только к случаю несвязанных масс, но к любому материальному процессу, описываемому тензором энергии-импульса $T_{\mu\nu}$. Характерен метод, посредством которого Эйнштейн находит уравнения гравитационного поля. Релятивистская инвариантность, принцип сохранения энергии-импульса и принцип соответствия ведут к уравнению

$$-\kappa \Sigma T_{\sigma\sigma} = \varphi \square \varphi. \quad (63)$$

Именно это уравнение согласуется с законом сохранения энергии-импульса в форме

$$\sum_{\nu} \frac{\partial}{\partial x_{\nu}} (T_{\mu\nu} + t_{\mu\nu}) = 0, \quad (64)$$

где тензор энергии-импульса гравитационного поля $t_{\mu\nu}$ естественно выражается через первые производные потенциала

по координатам

$$t_{\mu\nu} = \frac{1}{\kappa} \left\{ \frac{\partial\varphi}{\partial x_\mu} \frac{\partial\varphi}{\partial x_\nu} - \frac{1}{2} \delta_{\mu\nu} \sum \left(\frac{\partial\varphi}{\partial x_\tau} \right)^2 \right\}. \quad (65)$$

Сравнение теорий Эйнштейна — Гроссмана и Нордстрема. Построенная теория, как показывает далее Эйнштейн, согласуется с выдвинутыми «общими постулатами» и, тем самым, «удовлетворяет всем требованиям, которые при современном состоянии эксперимента можно предъявить теории гравитации» [252, с. 283]. Основным же недостатком этой теории Эйнштейн теперь видел в своеобразном характере зависимости инерции тела от массы остальных тел, который выразался в том, что «инерция тела хотя и подвержена влиянию остальных тел, но не обусловлена ими, поскольку в этой теории инерция тела тем больше, чем дальше оно от других тел» [252, с. 298]. Этот вывод непосредственно следовал из соотношений (51a) и (58). Скопление больших масс вблизи некоторого тела приводит, в соответствии с формулой (51a), к уменьшению внешнего потенциала и, таким образом, как показывает соотношение (58), к уменьшению инертной массы тела. Наличие зависимости инерции тела от удаленных масс согласовывалось с маховской концепцией инерции, которой Эйнштейн придавал особое значение. Но характер этой зависимости в теории Нордстрема оказывался таким, что сама эта концепция ставилась под сомнение. В тензорной же теории как будто сохранялась надежда свести инерцию тела к эффекту его взаимодействия со всеми остальными телами Вселенной, так как в этой теории, в отличие от второй теории Нордстрема, скопление масс приводило к увеличению инерции рассматриваемого тела. В «Заключительных замечаниях» к венскому докладу Эйнштейн так резюмировал сравнение скалярной лоренц-ковариантной теории со своей тензорной теорией тяготения: «...Можно оставаться на точке зрения обычной теории относительности... В этом случае можно получить скалярную теорию тяготения (теория Нордстрема), которая достаточно проста и удовлетворяет основным требованиям, предъявляемым к теории тяготения, однако из нее не вытекает относительность инерции» [252, с. 298]. Другой подход, развиваемый Эйнштейном и Гроссманом, связан с обобщением теории относительности. «В этом случае хотя и получаются уравнения значительной сложности, но зато искомые уравнения следуют из основных положений при удивительно малом числе гипотез; кроме того, при этом восстанавливается точка зрения относительности инерции» [там же]. В экспериментально-эмпирическом отношении обе теории были удовлетворительны, но потенциально неравноценны. Решающим экспериментом, который бы позволил сделать выбор между ними, могло оказаться наблюдение солнечного затмения в августе 1914 г. Это наблюдение должно было дать ответ на вопрос о том, искривляются ли лучи света в гравитационном поле, как это следовало из теории Эйнштейна—Гроссмана, или этого явления не происходит (теория

Нордстрема). Вопрос об аномальном смещении перигелия Меркурия в этих теориях не обсуждался ни Эйнштейном, ни Нордстромом, по крайней мере, в 1913 г.

Общековариантный подход ко второй теории Нордстрема. Ни одной из конкурирующих теорий тяготения Эйнштейн не уделял такого большого внимания, как второй теории Нордстрема. В феврале 1914 г. Эйнштейн вместе с молодым голландским теоретиком Фоккером* посвятил второй теории Нордстрема специальную работу, в которой эта теория предстала в еще более совершенной форме. Оказалось, что теория Нордстрема может рассматриваться как своеобразный частный случай тензорной теории при выдвижении требования постоянства скорости света и лоренц-ковариантности. Принцип постоянства скорости света означает, что уравнение светового конуса

$$\sum_{\mu\nu} g_{\mu\nu} dx_{\mu} dx_{\nu} = 0,$$

определяющее распространение света в тензорной теории, должно перейти в уравнение

$$dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2 = 0.$$

Это означает, что существует класс систем отсчета, в которых выражение $\sum g_{\mu\nu} dx_{\mu} dx_{\nu}$ сводится к сумме $\Phi^2 \sum_{\mu} dx_{\mu}^2$. Другими словами, в этом классе систем отсчета (инерциальных) тензорный потенциал редуцируется в систему

$$\begin{pmatrix} \Phi^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Phi^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Phi^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\Phi^2 \end{pmatrix}, \quad (65')$$

зависящую от единственного скаляра Φ .

Теоретико-инвариантный подход позволяет теперь получить скалярное уравнение гравитационного поля в общековариантной форме. Характер рассуждений здесь близок по своему существу к той части «Проекта», где конструировались уравнения поля на основе соображений соответствия и ковариантности: «Это уравнение ... мы установим в общековариантной форме ... Искомое уравнение полностью определяется предположением, что оно является уравнением второго порядка, если при этом учесть, что оно должно быть обобщением уравнения Пуассона» [255, с. 308]. Таким образом, искомое уравнение должно иметь вид

$$\Gamma = \kappa T, \quad (66)$$

* А. Д. Фоккер (род. 1887 г.) учился в Лейдене с 1906 г. по 1913 г., ученик Лоренца. В 1913—1914 гг. работал в Цюрихе, Манчестере и Лидсе. Основная область интересов — общая теория относительности и квантовая теория [504].

где Γ — общековариантный скаляр, образованный из $g_{\mu\nu}$, их первых и вторых производных, T — (след тензора $T_{\mu\nu}$ энергии-импульса «материи»). И здесь Эйнштейн и Фоккер возвращаются к идее использования тензоров кривизны для построения левой части полевых уравнений, которая была в общем отвергнута Эйнштейном и Гроссманом в «Проекте» более полугода назад: «Из математических исследований дифференциальных тензоров... следует, что выражение, которое можно использовать для составления Γ , должно быть функцией от

$$\sum_{ikl} \gamma_{im} \gamma_{kl} (ik, lm)'' \quad [255, \text{с. 309}],$$

где (ik, lm) — известный тензор Римана—Кристоффеля, выражения компонент которого Эйнштейн и Фоккер далее выписывают. Итак, искомое уравнение следует записать в форме:

$$\sum_{iklm} \gamma_{im} \gamma_{kl} (ik, lm) = \kappa \frac{1}{\sqrt{-g}} \sum_{\tau} T_{\tau\tau}. \quad (67)$$

Вместе с общековариантными уравнениями, выражающими закон сохранения энергии-импульса в общем случае:

$$\sum_{\nu} \frac{\partial T_{\sigma\nu}}{\partial x_{\nu}} = \frac{1}{2} \sum_{\mu\nu\tau} \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x_{\sigma}} \gamma_{\mu\tau} T_{\tau\nu}, \quad (68)$$

уравнения поля (67) заключают в себе общековариантную формулировку скалярной теории тяготения. Чтобы показать теперь совпадение этой формулировки со второй теорией Нордстрема в ее первоначальной форме, надо ограничить общую ковариантность условием постоянства скорости света, выделив, тем самым, класс инерциальных систем отсчета. Тогда $g_{\mu\nu}$ следует специализировать в соответствии с (65'), и интервал ds приобретет вид:

$$ds = \Phi \sqrt{dx_1^2 + \dots - dx_4^2}.$$

Для пространственно-подобного интервала $ds = \Phi \sqrt{dx_1^2 + \dots + dx_3^2 - dx_4^2}$, для времени-подобного интервала $ds = i\Phi dx_4$. Таким образом, множитель $1/\Phi$ связывает «естественно измеренные» длины и промежутки времени с «координатными» длинами и промежутками. Уравнение сохранения энергии-импульса (68) при указанной специализации приобретает вид

$$\sum_{\nu} \frac{\partial T_{\sigma\nu}}{\partial x_{\nu}} = \frac{\partial \log \Phi}{\partial x_{\sigma}} \sum_{\tau} T_{\tau\tau}. \quad (69)$$

Подстановка значений $g_{\mu\nu}$ (65') в уравнение поля (67) приводит их после упрощения к виду

$$\Phi \square \Phi = k \sum_{\tau} T_{\tau\tau}.$$

Постоянная k может быть выбрана произвольно (например, как у Нордстрема, $k=1$).

Вывод основных уравнений второй теории Нордстрема Эйнштейном и Фоккером поразительно прост. Он получен в сущности «из чисто формальных соображений, т. е. без использования других физических гипотез» (единственной такой гипотезой можно считать принцип постоянства скорости света). В действительности, конечно, физические основания теории не сводятся лишь к этому принципу, поскольку соображения ковариантности, соответствия, скалярности потенциала и некоторые другие являются по своей сути глубоко физическими. Но столь высокое формальное совершенство и простота теории, ее глубокая связь с общековариантным подходом была в глазах Эйнштейна весьма серьезным аргументом в пользу второй теории Нордстрема. Разумеется, это не означает, что Эйнштейн усомнился в тензорной общековариантной программе. Более того, метод, которым были получены уравнения поля в этой статье, прежде всего использование для этой цели тензоров кривизны, наводило на мысль о применении его для получения полевых уравнений и в тензорной теории. В сущности, Эйнштейн как бы возвращался к мысли об общековариантных уравнениях гравитационного поля. При этом, в конце статьи имеется примечание, свидетельствующее о напряженных раздумьях Эйнштейна об этой проблеме и о преодолении им к этому времени одного из важнейших заблуждений, связанных с кажущейся несводимостью тензора Риччи к $\Delta\phi$: «...Роль, которую играет в настоящем исследовании дифференциальный тензор Римана—Кристоффеля, наводит на мысль, что можно было бы также найти способ вывода гравитационных уравнений Эйнштейна—Гроссмана, независимый от физических предположений (т. е. основанный прежде всего на соображениях соответствия и общей ковариантности.— В. В.). Доказательство существования или отсутствия связи такого рода означало бы важный теоретический прогресс» [255, с. 312]. К этой последней фразе имеется упомянутое выше многозначительное примечание: «Обоснование отсутствия связи такого рода, данное в § 4 «Проекта»..., после более точного анализа отпадает» [там же]. Тем самым, можно с уверенностью думать, что к началу 1914 г. «аргумент соответствия» против общековариантных уравнений гравитационного поля в глазах Эйнштейна в значительной мере утратил свою силу.

Дальнейшее развитие теории Нордстрема. В 1914 г. Нордстрем еще раз вернулся к вопросу о независимости закона движения тела в однородном поле от его внутренней структуры [484]. Эйнштейн, как мы видели, в конечном счете согласился с этим и считал, что вторая теория Нордстрема удовлетворяет «принципу относительности гравитационного потенциала», то есть некоторой форме сильного принципа эквивалентности. Впрочем, сравнительно недавно Г. Ю. Тредер подчеркнул, что, поскольку в теории Нордстрема электромагнитные волны, а значит, и фотоны, не подвержены влиянию гравитационного поля, то это должно привести к нарушению сильного принципа эквивалент-

ности [200, с. 48—49]. Дело в том, что кулоновское взаимодействие между нуклонами добавляет к полной энергии атома (и, следовательно, к его инертной массе) около 1% энергии (или массы). А согласно квантовой теории поля, это взаимодействие обеспечивается обменом виртуальных фотонов. Поэтому в теории Нордстрема, где фотоны рассматриваются невесомыми, «атомы с различным вкладом энергии, обусловленной кулоновским взаимодействием, при равном числе нуклонов должны иметь различные инертные и одинаковые пассивные тяжелые массы, и эта разница значительно превосходит точность измерений в эксперименте Этвеша—Дикке» [200, с. 49]. Но в 1914 г. это обвинение еще нельзя было предъявить теории Нордстрема, и она справедливо рассматривалась удовлетворяющей сильному принципу эквивалентности в форме «принципа относительности гравитационного потенциала».

Нордстрем также сделал попытку апробировать свою теорию на материале небесной механики. Во многих отношениях теория оказалась вполне удовлетворительной. В теории выполнялся закон сохранения момента импульса, отклонения от классической теории были достаточно малы. Но аномалию Меркурия, о которой Эйнштейн в это время (1913—1914 гг.) еще не писал, теория не объясняла. Более того, в отличие от лоренц-ковариантных теорий типа Пуанкаре—Минковского, от теории Абрагама и т. д., теория Нордстрема приводила даже к движению перигелия орбиты Меркурия в противоположном направлении, иначе говоря, она давала противоположный знак аномальному смещению (запаздывание вместо опережения)*. Впоследствии, в 1917 г. Лауэ

* Согласно Тредеру, для смещения перигелия имеется формула:

$$\Delta\omega = \pi(u_1 + u_2) [(2\delta + \beta\gamma)/2\gamma - \alpha/2], \quad (\text{A})$$

где коэффициенты α , β , γ , δ определяются из вида метрики:

$$ds^2 = - \left(1 + \alpha \frac{m}{r} + O\left(\frac{m^2}{r^2}\right) \right) dr^2 - \left(1 + \beta \frac{m}{r} + O\left(\frac{m^2}{r^2}\right) \right) r^2 d\Omega^2 + \left(1 + \gamma \frac{m}{r} + \delta \frac{m^2}{r^2} + O\left(\frac{m^3}{r^3}\right) \right) dt^2, \quad (\text{B})$$

где $m = GM/c^2$ — масса центрального тела в геометрических единицах, u_1 , u_2 — полуоси эллипса. Тогда в ОТО (при соответствующем выборе системы координат) $\beta = 0$, $\alpha = 2$, $\delta = 0$, $\gamma = -2$ и формула (A) даст:

$$\Delta\omega = 3\pi(u_1 + u_2).$$

Во второй теории Нордстрема

$$ds^2 = \left(1 - \frac{m}{r} \right)^2 (dt^2 - dr^2 - r^2 d\Omega^2),$$

откуда получается: $\gamma = -2$, $\alpha = \beta = -2$, $\delta = 1$, что для смещения перигелия $\Delta\omega$ дает:

$$\Delta\omega = -1/2 \pi(u_1 + u_2),$$

т. е. $1/6$ часть от наблюдаемого смещения (и запаздывание, вместо опережения).

более подробно рассмотрел этот вопрос и пришел к тому же самому выводу [447]. Подчеркнем, что Эйнштейн в 1913—1914 гг. не рассматривал вопрос о перигелии Меркурия ни в рамках своей теории, ни в теории Нордстрема.

В письме к Фрейндлиху в 1913 г. (более точная датировка, к сожалению, неизвестна) он писал: «...Последняя (вторая теория Нордстрема.— В. В.) вполне разумна и указывает непротиворечивый путь к решению проблемы без использования гипотезы эквивалентности (принципа эквивалентности.— В. В.). В теории Нордстрема, как и у меня, существует красное смещение спектральных линий Солнца, но не существует никакого искривления световых лучей в гравитационном поле. Наблюдения предстоящего затмения должны показать, какой из двух подходов соответствует фактам. На теоретическом пути ничего большего сделать нельзя» (цит. по: [504, р. 288]). Эйнштейн, таким образом, учитывал возможность экспериментального сравнения теории только по двум эффектам, из которых один («красное смещение») существовал в обеих теориях, а другой (искривление световых лучей в поле тяготения) — только в теории Эйнштейна—Гроссмана. Заметим, что расчет аномального смещения перигелия Меркурия в теории Эйнштейна—Гроссмана должен был привести, по-видимому, к ошибочному результату. В письме к Зоммерфельду через три дня после завершающего доклада в Берлинской академии наук, где были сформулированы общековариантные уравнения гравитации ОТО, Эйнштейн писал, что одной из трех главных причин, по которым он отказался от предыдущей теории с необщековариантными уравнениями поля было неподходящее значение для аномального смещения перигелия Меркурия в этой теории, равное «18" в столетие вместо 45"» * [76, с. 192].

Серьезных теоретических аргументов против теории Нордстрема Эйнштейн не видел, если не считать вопроса об относительности инерции. В недавнее время в связи с повысившимся интересом к альтернативным теориям тяготения, в частности к скалярно-тензорным теориям типа теории Бранса-Дикке, появилось несколько содержательных обзоров лоренц-ковариантных скалярных теорий, в которых важное место занимает вторая теория Нордстрема [7, 200, 387, 384, 458, 459, 570, 571].

В частности, Веллер и Сандри подчеркнули, что вторая теория Нордстрема в общем способна описать «красное смещение»,

* В 1917 г., когда ОТО уже была признана большинством теоретиков и сам Нордстрем отказался от своей теории, Лауэ написал подробный обзор второй теории Нордстрема [447]. Единственным серьезным аргументом против нее он считал как раз вопрос об аномальном смещении перигелия Меркурия. В числе достоинств этой теории он называл ее значительно большую простоту по сравнению с ОТО, выражавшуюся не только в скалярности потенциала, но и в ее лоренц-ковариантности (в противовес общей ковариантности ОТО). При этом он полагал, что имеются веские аргументы (астрономического характера) в пользу выделения класса инерциальных систем отсчета.

связанное с хаббловским «расширением Вселенной» [559]. Они также подчеркнули, что эта теория до некоторой степени реализует идею Маха о зависимости отношения $m_e/m_{\text{жв}}$ от окружающих масс Вселенной, хотя и несколько иначе, чем в ОТО, в которой, впрочем, как выяснилось впоследствии, принцип Маха в полной мере также не выполняется [65—67, 91]. Харвей и Сексл указали на логико-теоретические достоинства второй теории Нордстрема: отсутствие *ad hoc*-гипотез (по крайней мере, в этом отношении она не уступает ОТО), непротиворечивость, наличие одного скалярного потенциала (простота) и лоренц-ковариантность (облегчающая решение проблемы квантования) [384].

Вместе с тем, Харвей счел форму выражения принципа Маха в этой теории неприемлемой и вслед за Абрагамом отмстил определенную трудность теории, связанную с невозможностью корректного построения в ее рамках инерциальной системы отсчета [384]. Эта особенность второй теории Нордстрема связана с ее конформной инвариантностью и зависимостью длины измерительных стержней и хода часов от потенциала. Гут [383] отметил еще три недостатка теории Нордстрема: во-первых, несмотря на скалярный характер потенциала, она сложнее и менее естественна, чем ОТО, так как выделяет след тензора как источник гравитационного поля и искусственным образом ограничивает допустимую группу преобразований (этот аргумент уже встречался в «Проекте»); во-вторых, линейный элемент (интервал ds^2) теории при малых значениях потенциала не сводится к «квантиньютоновскому» интервалу ($ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$, $c^* = c(1 - GM/c^2 r)$), что связано с отсутствием в этой теории эффекта отклонения света в гравитационном поле и, в-третьих, в отличие от ОТО (это выяснилось, правда, значительно позже), уравнения движения здесь не следуют из уравнений поля.

В 1914—1915 гг. Нордстрем пытался построить сначала единую теорию гравитации и электромагнетизма, а затем — единую теорию «материи» в духе известной теории Ми [486—488]. При объединении гравитации и электромагнетизма он применил пятимерный подход, использованный впоследствии Калуцой [486, 487]. Эта же пятимерная схема была им взята за основу и при разработке единой теории «материи». Лауэ в 1917 г., когда Нордстрем уже полностью перешел на рельсы ОТО, так оценивал его работы по единым теориям поля: «Это, в основном, чисто формальное достижение; вопрос о том, целесообразно ли оно с физической точки зрения, остается открытым... (при разработке единой теории материи.— В. В.) потребовались гипотезы, которые напрашивались уже в пятимерном обобщении и физический смысл которых далеко не ясен. До сих пор также из них не выведены все необходимые следствия» [447, с. 310]. Заметим, что эти работы Нордстрема являются своеобразной промежуточной стадией в развитии концепции единой теории поля — между исследованиями Ми и основанными на ОТО геометризованными

теориями Гильберта и Вейля. В 1916 г. Нордстрем включается в разработку ОТО и получает на этом пути некоторые существенные результаты: общерелятивистскую формулировку теории упругости, точное решение уравнений Эйнштейна для заряженной сферы (решение Рейснера—Нордстрема), некоторые аспекты проблемы гравитационной энергии [489—492].

Теории Ми

Единая теория «материи». Заметно меньшую роль в генезисе ОТО сыграла теория тяготения Ми, которая впервые была сформулирована им в третьей части статьи «Основы теории материи» (эта часть поступила в редакцию «Annalen der Physik» 2 ноября 1912 г.) [464]. Эйнштейн не упоминал о теории Ми ни в «Прокрете», ни в своих сентябрьских докладах во Фрауэнфельде и Вене. Но в Вене по докладу Эйнштейна возникла дискуссия. Главным оппонентом выступил именно Ми. Он высказал предположение, что Эйнштейн не говорил о его теории тяготения, так как она была включена в общую работу по единой теории материи и поэтому, «вероятно, он ее не прочитал, иначе он бы ее упомянул» [61, с. 362]. Эйнштейн же в своем ответе Ми сказал, что он не упоминал теорию Ми не потому, что он с ней не знаком, а потому, «что в ней не проводится строго эквивалентность инертной и тяжелой масс» [61, с. 364]. «Допускаю,— продолжил Эйнштейн,— что я не прочел теорию Ми так внимательно, как может быть было нужно, но я далек от мысли желать ее умялить тем, что не упомянул о ней в этой связи» [там же]. В последующее время Ми неоднократно выступал с критикой в адрес теории Эйнштейна—Гроссмана и только к началу 20-х годов он признал преимущество ОТО перед другими теориями тяготения [467]. Дискуссии Эйнштейна с Ми, в которые иногда включались и другие ученые (Абрагам, Нордстрем, Лауэ), так же, как предшествующие споры Эйнштейна с Абрагамом, способствовали выявлению трудностей и противоречий теории Эйнштейна—Гроссмана и, вместе с тем, ее достоинств по сравнению со скалярными теориями. Они также были полезны для уяснения трудных для понимания физических принципов релятивистских теорий тяготения. Сама же теория тяготения Ми, которая была близка к первой теории Нордстрема, едва ли оказала какое-либо непосредственное влияние на формирование теории Эйнштейна—Гроссмана, а затем и ОТО. Поэтому основное внимание мы сосредоточим на дискуссии Эйнштейна—Ми, начало которой было положено на Венской конференции в сентябре 1913 г.

Но вначале несколько слов о самом Ми и его предшествующей научной деятельности [504]. Густав Ми (1868—1957 гг.) закончил Университет в Гейдельберге и там же начал свою исследовательскую работу. С 1897 по 1902 г. он был профессором в Высшей технической школе в Карлсруэ. Свои наиболее значительные работы, включая исследования по единой теории «мат-

рии» и по гравитации, он выполнил в Грейфсвальде (1902—1917). В последующие годы он работал в Халле.

Уже в конце прошлого века Ми присоединился к программе электромагнитной концепции физики. В своем «Проекте общей теории передачи энергии» (1898) он разрабатывал идею вторичности частиц и объяснения их свойств на чисто полевой основе [463]. Он также полагал, что и гравитация имеет электромагнитное происхождение и обсуждал идеи Хевисайда и Фейпла о полевом истолковании тяготения, в частности проблему локализации гравитационной энергии. В последующее десятилетие (примерно до 1912 г.) Ми опубликовал большое количество работ и некоторые книги по различным аспектам электромагнитной теории строения вещества (см., например, [143, 468, 469, 504]). В 1912 г. Ми начал публиковать работу по единой теории материи, которая существенно опиралась на релятивистскую программу и четырехмерный формализм Минковского [464].

По своему замыслу теория Ми восходила к его работе 1898 года и электромагнитной концепции физики в целом. Ми сумел построить одно из возможных обобщений уравнений Максвелла, которое приводило к возникновению внутри заряженных частиц дополнительных сил (электрического происхождения), уравновешивающих кулоновские силы отталкивания. За пределами частиц отклонения от обычной электродинамики оказывались незначительными. Тем самым, удавалось реализовать идею сведения частиц к электромагнитному полю. Ми использовал, наряду с требованием лоренц-ковариантности, вариационную схему получения основных уравнений. Но разумные решения проблемы достигались лишь за счет включения в лагранжиан («мировую функцию» по терминологии Ми) и уравнения поля абсолютных значений потенциалов, что приводило к калибровочной инвариантности, и тем самым, к невозможности существования заряженных частиц в постоянном внешнем поле [155, 564, 568]. Кроме того, принятые предположения не позволяли сделать однозначный выбор «мировой функции». Тем не менее, это, фактически, была «первая попытка построения теории, объясняющей существование элементарных частиц» [155, с. 272]. В отличие от весьма смутно оформленных идей о частицах как «сгустках», «узлах», «особенностях» и т. д. электромагнитного поля, которые выдвигались и ранее, в частности такими приверженцами электромагнитной картины природы, как Лармор и др., теория Ми отличалась высокой теоретичностью и развитым математическим аппаратом. Несмотря на свои недостатки, она произвела огромное впечатление на тех ученых, которых привлекала проблема синтеза физического знания. Наибольший успех теории Ми имела в Геттингене. Ее высоко оценил Гильберт, который использовал идеи Ми и его подход при построении своей единой теории, сыгравшей важную роль на завершающей стадии формирования ОТО. Некоторые аспекты теории Ми разрабатывал Борн. Она повлияла и на Вейля, когда в 1918 г. он создавал

свою единую геометризованную теорию поля. Вейль и Паули уделили в своих замечательных книгах по ОТО большое внимание теории Ми, отдав должное глубине ее замысла и математическому совершенству его реализации, но отметив, вместе с тем, принципиальные недостатки теории, не позволившие принять ее в качестве основы для электромагнитно-полевого синтеза физики. Отношение Эйнштейна к теории Ми было, очевидно, скептическим. Это видно из его реакции на единую теорию Гильберта и из того, что он вообще о теории Ми почти никогда не высказывался.

Можно предположить, что такое отношение вызвано следующими двумя обстоятельствами. Во-первых, за два—три года до этого Эйнштейн сам активно разрабатывал аналогичную единую теорию и, осознав ее преждевременность, пришел к мысли о бесперспективности программы единой теории поля, до тех пор пока не решена, по крайней мере, проблема гравитации. Во-вторых, он очень остро ощущал физические изъяны теорий, возможно, весьма совершенных в математическом отношении. Хорошо известна его пронизательная критика теорий Гильберта и Вейля (1915—1920 гг.) на основе несложных физических соображений или мысленных экспериментов. Впрочем, возможно, к самому замыслу Ми он относился благожелательно, полагая, однако, что средства для его осуществления еще не созрели. Однажды в своем письме к Вейлю от 6 июня 1922 г. он упомянул теорию Ми в следующем контексте: «С высказываниями Эддингтона дела у меня обстоят так же, как с теорией Ми: это превосходная рама, но совершенно неизвестно, как ее заполнить» (цит. по: [62, с. 147]).

Теперь обратимся собственно к теории тяготения Ми, которую можно рассматривать совершенно независимо от его единой теории материи.

Скалярная теория тяготения. Вначале Ми в духе последовательной единой теории поля предполагал получить уравнения гравитации из основных уравнений «эфирной динамики», но затем пришел к мысли, что «...силы сцепления электрических зарядов вместе с электромагнитным полем все еще недостаточны, чтобы объяснить все силовые действия в материальном мире» [464, с. 26] и, прежде всего, гравитацию. Следующим шагом был отказ от векторного потенциала в теории тяготения и, следовательно, от близкого родства гравитации с электромагнетизмом. Векторные теории (здесь Ми ссылается на работы Хевисайда, Лоренца, Гауса, вполне аналогичные теории электромагнитного поля) либо не удовлетворяют принципу относительности, либо приводят к явному нарушению равенства тяжелой и инертной масс, либо плохо согласуются с законом сохранения энергии-импульса. Соображения теоретико-инвариантности характера приводят Ми к принятию в качестве напряженности гравитационного поля четырехвектора, а в качестве потенциала этого поля скалярной величины: «Гравитационное поле должно с необхо-

димостью представляться четырехвектором, а не шестивектором» [464, с. 27]. При этом, Ми приводит новый аргумент в пользу требования лоренц-ковариантности уравнений гравитационного поля: это требование обусловлено тем, что в противном случае гравитация не имела бы отношения к структуре материи. Чтобы теория тяготения согласовывалась с единой теорией материи, она, как и последняя, должна удовлетворять специальному принципу относительности.

Итак, Ми выдвигает скалярный лоренц-ковариантный подход к проблеме гравитации, подход, который (за неделю до завершения работы Ми) был развит, как мы знаем, Нордстремом. Естественно поэтому, что теория гравитации Ми оказывается в принципе близкой к первой теории Нордстрема. Главное ее отличие от последней заключается в том, что по аналогии с электродинамикой в ней вводятся два четырехвектора (подобно напряженности и индукции), совпадающих в вакууме. Конечно, Ми едва ли мог знать о работе Нордстрема. Он исходил из своей единой теории материи и недавно появившейся теории Абрагама, также скалярной, но не согласующейся с принципом относительности. В сущности, Ми (по крайней мере, в случае вакуума) приходит, как и Абрагам, к четырехмерному обобщению уравнения Пуассона, но релятивистски-инвариантному.

На Венской конференции в сентябре 1913 г. Ми особенно подчеркивал значение работы Абрагама, который первым использовал скалярный подход к теории тяготения: «Я считаю необходимым, чтобы здесь было сказано, что первым, кто выдвинул до некоторой степени разумные уравнения гравитации, был Абрагам. В то время как раньше всегда стремились... описать гравитационное поле аналогично электромагнитному, Абрагам нашел новый подход. Невозможно совместить старые попытки с принципом относительности; если принцип равенства инертной и тяжелой масс должен быть выполнен достаточно точно, то гравитационное поле не может быть описано шестивектором. Поэтому Абрагам построил теорию со скалярным потенциалом» [61, с. 361]. Эйнштейн, отвечая Ми, указал на внутреннюю противоречивость теории Абрагама, которая, будучи принципиально нерелятивистской, использовала СТО. Вторая же теория Нордстрема представлялась Эйнштейну логически непротиворечивой и удовлетворяющей всем необходимым требованиям, которые, по его мнению, следовало предъявить к разумной теории тяготения. Ми, в свою очередь, заметил, что при построении теории Нордстрем опирался на теорию Абрагама: «...Нетрудно, располагая уравнениями теории Абрагама, подойти к теории Нордстрема; насколько мне известно, Нордстрем непосредственно связан с уравнениями Абрагама» [61, с. 364]. Эйнштейн заключил эту небольшую дискуссию следующими словами: «Да, психологически это действительно так (тем самым, он признал существенную роль теории Абрагама в генезисе релятивистской теории тяготения Нордстрема. — В. В.), но не логически; теория Норд-

стрема фундаментально отличается от теории Абрагама» [там же].

Ми строит свою скалярную теорию следующим образом. Обозначая четырехвекторы напряженностей гравитационного поля $(g_x, g_y, g_z, i\omega)$ и $(k_x, k_y, k_z, i\omega)$, связанные между собою примерно так же, как векторы электрических напряженности и смещения (индукции), а соответствующие скалярные потенциалы как ω и H , он записывает систему уравнений гравитационного поля в виде

$$g_x = \frac{\partial \omega}{\partial x}, \quad g_y = \frac{\partial \omega}{\partial y}, \quad g_z = \frac{\partial \omega}{\partial z}, \quad u = -\frac{\partial \omega}{\partial t}, \quad (71)$$

$$\frac{\partial k_x}{\partial x} + \frac{\partial k_y}{\partial y} + \frac{\partial k_z}{\partial z} + \frac{\partial \omega}{\partial t} = -\gamma \rho,$$

где γ — гравитационная постоянная, ρ — плотность тяжелой массы. В сентябре 1913 г. Ми уже знал о теории Нордстрема: «Нордстрем улучшил эту теорию (теорию Абрагама. — В. В.) тем, что он для ρ ввел величину, инвариантную относительно лоренцова преобразования. Почти одновременно с ним я также выдвинул свою теорию гравитации... Я еще не сравнил полностью мою теорию с теорией Нордстрема; в последней принимается $(g, i\omega) = (k, i\omega)$, иначе обе теории были бы почти идентичными» [61, с. 362]. Ми более детально, чем Нордстрем, анализирует вопрос о соотношении инертной и тяжелой масс. Как и в первой теории Нордстрема, тяжелая масса тела оказывается пропорциональной не его энергии, а лагранжиану для уравнений движения тела в поле тяготения, или

$$m_r = E_0 \sqrt{1 - q^2}, \quad q \text{ — скорость тела.} \quad (72)$$

Инертная масса, в соответствии с СТО, пропорциональна полной энергии

$$m_{ин} = E_0 / \sqrt{1 - q^2}. \quad (73)$$

В результате оказывается, что равенство инертной и тяжелой масс строго соблюдается лишь для покоящейся частицы, если мы пренебрегаем, к тому же, внутренней энергией тела, зависящей от температуры. Ми рассматривает отношение $m_r/m_{ин}$ и приходит к соотношению:

$$\frac{m_r}{m_{ин}} = \frac{m_0 - Q}{m_0 + Q} = 1 - 2 \frac{Q}{m_0}, \quad (74)$$

где Q — энергия внутреннего движения молекул в теле. Поскольку Q прямо пропорционально зависит от температуры, то соотношение (74) означает уменьшение отношения $m_r/m_{ин}$ по закону

$$m_r/m_{ин} = 1 - 2,3 \cdot 10^{-12} T^\circ.$$

Таким образом, оказывается, что равенство инертной и гравитационной масс выполняется с точностью $\sim 10^{-11}$ — 10^{-12} . В опытах Этвеша была, как известно, достигнута значительно меньшая точность (порядка 10^{-8}). В недавнее время как раз такой точности добились Дикке (10^{-11}) и группа Брагинского ($<10^{-12}$) [13]. Но в опытах с радиоактивными веществами, которые в 1909—1910 гг. проводил Саутсернс, потребовалась бы значительно меньшая точность, и избежать противоречия с их результатами в рамках теории Ми, как заметил в конце 1914 г. Абрагам, можно было «только при весьма искусственных предположениях, например... что полная энергия при (радиоактивных) превращениях связана только с затратой потенциальной электрической энергии» [317, с. 500]. Другое, не менее искусственное предположение, сделанное в 1914 г. Кречманом [436], смогло устранить указанную трудность. Оно заключалось в том, что источником энергии, отдаваемой радиоактивными атомами, являются те частицы, которые переходят в гелий, а не в свинец (Саутсернс сравнивал отношения $m_r/m_{ин}$ для окисей урана и свинца и обнаружил их постоянство с точностью $5 \cdot 10^{-6}$). В последнем случае для гелия отношение $m_r/m_{ин}$ сильно отличалось бы от соответствующего отношения для урана и свинца. Проведение же эксперимента с гелием наталкивалось на существенные затруднения технического характера.

Естественно, что вопрос о равенстве инертной и тяжелой масс в теории Ми обсуждался и на Венской конференции. Венгерский физик Земплен заметил, что после опытов, проведенных Этвешем совместно с Пекаром и Фекете, о результатах которых было сообщено в 1909 г., точность опыта Этвеша удалось повысить в пять раз (10^{-8} вместо $5 \cdot 10^{-8}$). Ми полагал, что отклонения порядка 10^{-11} отношения $m_r/m_{ин}$ от постоянного значения «вообще не поддаются экспериментальному обнаружению; ...и в случае измерений методом маятников пришлось бы ... измерять длину маятника с точностью до доли диаметра атома... — Поэтому, — заключил он, — моя теория не опровергается опытами Этвеша или им подобными» [61, с. 367]. Эйнштейн согласился с этим, но подчеркнул, что в столь точном выполнении равенства $m_r = m_{ин}$ «лежит одно из самых важных указаний для теоретического развития» [там же]. Таким образом, это равенство целесообразнее считать точным. Несмотря на это, Эйнштейн согласился, что теории, не удовлетворяющие точному равенству $m_r = m_{ин}$ вообще говоря, не должны «быть отброшены при современном состоянии эксперимента» [там же].

Вслед за Абрагамом Ми рассмотрел вопрос о гравитационных волнах, которые оказывались в его теории продольными и распространялись в вакууме со скоростью света. Он подчеркнул исключительную малость мощности гравитационных волн по сравнению с электромагнитными (поскольку для электрона $(e/m)^2 c^2 / \kappa \sim 10^{42}$, где κ — гравитационная постоянная) и заме-

тил: «Отсюда ясно, почему продольные волны в эфире, очевидно, не играют никакой роли в хозяйстве природы» [464, с. 61].

Ми делает интересное замечание о связи электромагнитного и гравитационного полей. Поскольку тяжелая масса электромагнитного излучения должна быть пропорциональна его лагранжиану (т. е. величине $L = E^2 - H^2$), а плотности электрического и магнитного полей в электромагнитной волне оказываются равными, то тяжелая масса этого излучения равна нулю. Это согласуется с отсутствием отклонения света в поле тяготения с точки зрения скалярных лоренц-ковариантных теорий.

По-видимому, основное отличие теории Ми от теории Нордстрема заключается в том, что в ней отсутствует «красное смещение» спектральных линий, а также соответствующее изменение линейных масштабов. Исключение этих эффектов достигается выдвиганием ещё одного фундаментального постулата, который Ми считал дальнейшим развитием идеи относительности.

Речь идет о так называемом «принципе относительности гравитационного потенциала»: «Если два пустых пространства различаются между собой лишь тем, что в одном гравитационный потенциал имеет очень большое среднее значение ω_0 , в другом — среднее значение потенциала равно нулю, то это никак не сказывается на величине и форме электронов и других материальных элементарных частиц, на их зарядах, их законах колебаний и других законах движения, на скорости света вообще на всех физических соотношениях и процессах» [464, с. 63]. Этот же принцип, как мы видели, Эйнштейн в своем венском докладе назвал в числе четырех основных требований, которые можно предъявить ко всякой разумной теории тяготения. На первый взгляд, и теория Эйнштейна—Гроссмана и теория Нордстрема, которые предсказывают гравитационное «красное смещение» спектральных линий, не удовлетворяют этому принципу. Но это не так. В этих теориях независимость физических процессов от гравитационного потенциала достигается за счет того, что в них от потенциала одинаковым образом зависят, с одной стороны, единицы измерения длины и времени, а с другой стороны, размеры атомов и периоды их колебания.

Тензорная лоренц-ковариантная теория. Критика теории Эйнштейна—Гроссмана. Вернемся к дискуссии между Эйнштейном и Ми, начавшейся на Венской конференции и продолжавшейся затем в течение нескольких лет. Ми полагал, что теория Эйнштейна—Гроссмана может быть представлена как обычная лоренц-ковариантная теория, но не с векторным потенциалом (как электродинамика Максвелла) и не со скалярным потенциалом (как его собственная теория тяготения или теория Нордстрема), а с тензорным потенциалом. При этом он использовал запись уравнений поля в форме аналогичной уравнениям своей скалярной теории (71):

$$\begin{aligned} g_{\mu\nu} &= \partial\omega_{\mu\nu}/\partial x, \dots, u_{\mu\nu} = \partial\omega_{\mu\nu}/\partial t, \\ \partial k_{\mu\nu}/\partial x + \dots + \partial\omega_{\mu\nu}/\partial t &= -\gamma h_{\mu\nu}, \end{aligned} \quad (75)$$

где $\omega_{\mu\nu}$ — гравитационный потенциал, соответствующий эйнштейновскому $g_{\mu\nu}$; ($g_{\mu\nu}$, $g_{\mu\nu}$, $g_{\mu\nu}$, $u_{\mu\nu}$) — «величина третьего ранга», образуемая десятью четырехмерными векторами и характеризующая напряженность гравитационного поля; $h_{\mu\nu}$, по словам Ми, — «тензор, представляющий плотность тяжелой массы».

Через три месяца после Венского доклада Ми более полно и систематически изложил свои критические замечания в адрес теории Эйнштейна—Гроссмана [465]. Эта большая двухчастная работа была непосредственным продолжением венского выступления Ми. Поэтому в дальнейшем основные пункты его критики, начатой в Вене и продолженной на страницах «*Physikalische Zeitschrift*», мы рассмотрим, не разделяя их четко на то, что было им сказано в Вене, и на то, что было развито затем в статье. Выписав уравнения гравитации для тензорного потенциала (75), Ми указывает, что они могут рассматриваться как лоренц-ковариантные. С другой же стороны, по его мнению, специфика теории Эйнштейна—Гроссмана состоит лишь в ее тензорности: «Эйнштейн уже подчеркивал, что его теория отличается тем, что гравитационный потенциал в ней не четырехмерный скаляр, а четырехмерный тензор» [61, с. 363]. Более того, он полагал, что она может быть выведена из уравнений (75) и в этом смысле является частным случаем соответствующей тензорной лоренц-ковариантной теории. Претензии теории Эйнштейна—Гроссмана на то, что она содержит более общий принцип относительности, казались Ми необоснованными: «Хотя каждому, кто основательно углубится в это сочинение («Проскт» Эйнштейна и Гроссмана. — В. В.), становится ясно, в какой мере Эйнштейн может говорить о новой относительности, поверхностный читатель... может прийти к ошибочному выводу, что здесь действительно идет речь о крушении предшествующей теории относительности. Поэтому во всяком случае не лишено интереса, что я в дальнейшем с помощью методов, которые я в сжатой форме разработал в более обширной работе о теории материи в строжайшем соответствии с концепцией специального принципа относительности, развитой Минковским, формулирую некоторую общую теорию тяготения с тензорным потенциалом, которая включает в себя эйнштейновскую теорию как частный случай» (цит. по: [465, с. 115]). Обсуждая далее уравнения гравитации в форме (75), Ми замечает: «Так как уравнения (1) и (2) (уравнения (75). — В. В.) допускают лоренцевы преобразования, то в этой теории выполняется специальный принцип относительности» (цит. по: [465, с. 116]). Критика Ми в этом пункте не была лишена основания. Действительно, принцип эквивалентности в сочетании с маховской концепцией относительности ускорения и четырехмерным геометрическим подходом Минковского приводил к необходимости расширения принципа лоренц-ковариантности, в идеале до принципа общей относительности, или, с математической точки зрения, общей ковариантности. На этом пути закладывался костяк будущей ОТО: риманово пространство—время,

основополагающая роль метрики и отождествление метрического тензора с гравитационным потенциалом (геометризация гравитации), общековариантная формулировка основных законов физики, автоматически учитывающая воздействие гравитации на «материальные процессы» и т. д. Найти же адекватные этому фундаменту общековариантные уравнения гравитационного поля Эйнштейну и Гроссману не удалось, и они были вынуждены ограничиться, как мы видели, линейно-ковариантными уравнениями поля. К тому же, как казалось Эйнштейну, существовали веские аргументы физического характера против требования общей ковариантности по отношению к полевым уравнениям. Но уравнения гравитационного поля — это, безусловно, ядро всякой гравитационной теории, и если они лишь линейно-ковариантны, что с физической точки зрения очень близко к лоренц-ковариантности (в частности, линейные преобразования не включают, например, перехода от одной равноускоренной системы отсчета к другой), то тем самым и вся теория тяготения, в конечном счете, утрачивает общековариантный характер. Более того, эйнштейновское толкование принципа эквивалентности, связанное с неразличимостью однородных полей и равноускоренных систем отсчета, также ставится под сомнение. Поэтому критика Ми во многом правомерна. Она, конечно, справедлива прежде всего в отношении теории Эйнштейна—Гроссмана, но не ОТО. Ми чутко уловил наиболее уязвимые места новой тензорной теории и, прежде всего, ее главное противоречие — ярко выраженную тенденцию к обобщению принципа относительности до группы общей ковариантности и, вместе с тем, фактическое ограничение лишь линейной ковариантностью.

С другой стороны, уже в венском выступлении Ми прозвучала мысль о физической бессодержательности принципа общей относительности. Справедливо отметив, что «этот принцип в предположенной теории еще не выполнен», он подверг его критике с позиции «здорового смысла» физики. Если связать принцип общей относительности с принципом эквивалентности, то общая относительность имеет место при условии, что эффекты произвольно ускоренного движения будут трактоваться как проявление некоторых гравитационных полей (в общем, весьма искусственных и сложных). «Подобная фикция может оказаться математически очень удобной, как, например, когда для вычисления прилива и отлива допускают воображаемые планеты, чтобы этим заменить действие инерции, трудно поддающееся расчету, но ни одному физическому не придет в голову считать эти воображаемые планеты за действительно существующие. Действие инерции в (неравномерно движущемся. — В. В.) вагоне также нельзя интерпретировать физически как действие тяжелых масс; это привело бы к противоречиям с принципами физического исследования. Поэтому я полагаю, что изложенное здесь толкование обобщенного принципа относительности не имеет физического смысла» [61, с. 365].

Под принципами физического исследования Ми, очевидно, имел в виду классическое представление о физической реальности, которое он полностью переносил и на гравитацию. Аналогичный аргумент против принципа общей относительности впоследствии выдвигал Ленард, который также приводил пример с вагоном (или поездом) [122, с. 18]. Ми также сослался на замечание самого Эйнштейна о том, что общековариантные уравнения гравитационного поля вступают в противоречие с некоторыми фундаментальными принципами физики, такими, как принципы сохранения энергии-импульса и причинности: «...Было бы интересно, если бы можно было математически строго доказать невозможность обобщенного принципа относительности с другой точки зрения (т. е. не только с позиции «здорового смысла». — В. В.). В этой связи мне кажется весьма многозначительным утверждение Эйнштейна, согласно которому не существует фундаментальных уравнений (Эйнштейн имел в виду уравнения гравитационного поля. — В. В.), которые были бы ковариантны относительно произвольных преобразований» [465, с. 176].

Ми полагал, что в теории Эйнштейна—Гроссмана, как и в сто скалярной лоренц-ковариантной теории, может идти речь о расширении принципа относительности только в одном смысле, а именно в смысле выполнения в этих теориях «принципа относительности гравитационного потенциала», сформулированного им ранее. Итак, специальный принцип относительности дополняется и в теории Эйнштейна—Гроссмана, и в теории Ми своеобразным принципом относительности гравитационного потенциала, который, согласно Ми, не имеет отношения к более широкой относительности пространственно-временного (кинематического) характера. Ми считал, что Эйнштейн ошибочно увидел в принципе относительности гравитационного потенциала, который действительно существует в тензорной теории, общий принцип относительности: «В то время как в моей теории преобразуются только величины, которые определяют состояние эфира (т. е. потенциалы и напряженности поля. — В. В.), а координаты, напротив того, остаются неизменными, — в эйнштейновской теории преобразуются и координаты. Соответственно этому в теории Эйнштейна преобразования, характерные для обоих принципов относительности — движения и гравитационного потенциала, — очень похожи друг на друга, и это, вероятно, послужило причиной того, почему Эйнштейн принял свой принцип за обобщенный принцип относительности движения» [465, с. 171]. Ми подчеркивал, впрочем, существенное различие между формой выражения принципа относительности потенциала в своей теории и в теории Эйнштейна—Гроссмана: «С точки зрения физики, главное различие между обеими теориями заключается в том, что, согласно моему принципу относительности, законы природы вообще не подвержены влиянию гравитационного потенциала, а согласно эйнштейновскому принципу относительности, влияние таково, как будто единицы длины и времени изме-

няются в присутствии гравитационного потенциала (...) (это касается и теорий Нордстрема.— В. В.). Согласно эйнштейновской теории, таким образом, с изменением гравитационного потенциала должны изменяться скорость света, частота спектральных линий, размеры атома и состоящих из них тел, в то время, как согласно моей теории, ничего этого нельзя наблюдать» [465, с. 172].

Ми заметил далее, что если бы принцип эквивалентности (однородного гравитационного поля и равноускоренно движущейся системы отсчета), опирающийся на равенство инертной и гравитационной масс, действительно выполнялся бы в теории тяготения Эйнштейна—Гроссмана, то расширение принципа относительности, безусловно, было бы оправдано. Но по мнению Ми, строгое равенство $m_g = m_{ин}$ не имеет места не только в его теории, но и в теории Эйнштейна—Гроссмана, а значит, принцип эквивалентности лишен экспериментально-эмпирического обоснования. Уже выступая на венской конференции, Ми объявил о своем намерении в ближайшее время опубликовать работу, в которой будет доказано нарушение равенства $m_g = m_{ин}$ в тензорной теории. Его доказательство было основано на том, что он рассматривал теорию Эйнштейна—Гроссмана, как вытекающую из двух следствий: тензорности гравитационного потенциала и линейной ковариантности основных уравнений теории: «Я полагаю, следующие два принципа: 1) что гравитационный потенциал — четырехмерный тензор и 2) что общие уравнения эфирной динамики (основные уравнения теории.— В. В.), наряду с лоренцевыми, допускают еще другие линейные преобразования — являются существенными или главными гипотезами эйнштейновской теории, по сравнению с которыми другие предположения играют подчиненную роль вспомогательных гипотез» [465, с. 169]. Тем самым, идея общей относительности, в частности, включения в число допустимых простейших нелинейных преобразований, связывающих, например, равноускоренно движущиеся системы отсчета, отвергалась с самого начала. Но Ми шел дальше и стремился показать, что положение о равенстве инертной и гравитационной масс реализуется в теории Эйнштейна и в его скалярной теории при добавлении к двум основным постулатам, названным выше, некоторых дополнительных искусственных предположений, которые, к тому же, как будто противоречили друг другу. Поэтому Ми считал, что в теории Эйнштейна—Гроссмана не только не содержится принцип эквивалентности в его релятивистской интерпретации, но вообще не может выполняться строгое равенство инертной и гравитационной масс: «Гипотеза эквивалентности, как мне кажется, теряет свою силу уже потому, что ни о каком тождестве инертной и тяжелой масс в эйнштейновской теории не может быть и речи. Правда, благодаря введению некоторых побочных предположений, удастся получить строгую пропорциональность тяжелой и инертной масс для замкнутой системы. Однако, эта пропорцио-

нальность никоим образом не является, как это должно следовать из гипотезы эквивалентности, выводом из трансформационных свойств основных уравнений, она также выполняется и в моей теории, если в нее ввести упомянутые выше дополнительные предположения. Оказывается далее, что эти дополнительные предположения содержат некоторое внутреннее противоречие, и, таким образом, принцип эквивалентности тяжелой и инертной масс даже в ограниченной формулировке... не выполняется» [465, с. 176].

Ми кратко обсудил также обе теории Нордстрема и показал, в частности, что первая теория Нордстрема во многих отношениях совпадает с его собственной теорией. Но вторая теория Нордстрема, по его мнению, содержала некоторые внутренние противоречия такого же рода, как и теория Эйнштейна—Гроссмана (связанные с выполнением в ней строгого равенства инертной и гравитационной масс).

Таким образом, Ми очень точно подметил главную слабость теории Эйнштейна—Гроссмана, которая, провозгласив, как будто, принцип общей относительности, вынуждена была затем при решении вопроса об уравнениях гравитационного поля ограничить допустимые преобразования линейными. Эта непоследовательность, в общем, сводила на нет фундаментальную концепцию общей относительности, лишая также смысла и принцип эквивалентности, так как линейная ковариантность основных уравнений теории исключала возможность физического истолкования общей ковариантности и даже возможность включения в число допустимых равноускоренных систем отсчета.

Реакция Эйнштейна на критику Ми. На дискуссии в Вене Эйнштейн вынужден был согласиться, что в его теории «принцип относительности в этом наиболее общем смысле также не выполнен», так как «законы сохранения приводят к далеко идущей специализации системы отсчета» [61, с. 365]. С другой стороны, он полагал, что, несмотря на это, его теория удовлетворяет строгому равенству инертной и гравитационной масс*. Вместе с тем, Эйнштейн, понимая нежелательность своеобразного дуализма (общая ковариантность для уравнений взаимодействия «материи» и гравитации и для уравнений движения, а также линейная ковариантность для уравнений гравитационного поля), характерного для его теории, считал возможным его сохранение.

Эйнштейн в своем ответе на декабрьскую статью Ми не стал опровергать отдельные критические замечания оппонента, но, полагая, что вся его критика — результат непонимания специфики теории, заново четко, хотя и кратко, изложил основные ее положения. При этом он не следовал аксиоматическому способу

* Как было показано В. Тиррингом, вполне мыслима лоренц-ковариантная тензорная теория тяготения, в которой равенство инертной и гравитационной масс выполняется строго [541, 542].

рассуждений. Скорее он попытался сделать свою аргументацию естественной и физически убедительной. Прежде всего, он заметил, что если отказаться от постоянства скорости света, то какие-либо основания для априорного выделения какого-либо класса систем отсчета (например, инерциальных) отпадают. Это ведет к идее общей ковариантности и, в частности, к такому обобщению пространства—времени, при котором метрика приобретает риманов характер

$$ds^2 = \sum_{\mu\nu} g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu.$$

В этом случае принцип инерции в форме вариационного принципа

$$\delta \int ds = 0$$

обобщается и на случай гравитации, так как закон движения частицы в поле тяготения не зависит от материала и структуры частицы. Так теперь Эйнштейн формулирует принцип эквивалентности. Величины $g_{\mu\nu}$ при этом, в соответствии с идеей общей относительности (и общей ковариантности), дают возможность инвариантного описания и гравитации, и пространства—времени. «Минковский на основе инварианта (1) (т. е. инварианта $ds^2 = \sum_v dx_v^2$. — В. В.) построил четырехмерную ковариантную теорию, содержащую уравнения первоначальной теории относительности, — продолжил Эйнштейн. — Аналогичным образом, на инварианте (1а) (т. е. $ds^2 = \sum g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu$) с помощью «абсолютного дифференциального исчисления» можно основать ковариантную теорию, дающую соответствующие уравнения новой теории относительности» [257, с. 321]. Таким образом, возникает замысел физически обоснованного и логически стройного обобщения одновременно и СТО, и классической теории тяготения. Если бы на этом пути Эйнштейну удалось довести теорию до конца, то большинство аргументов (если не все они!) против тензорной теории, выдвинутых Ми, потеряли бы свою силу. Но оставалась еще проблема построения уравнений самого гравитационного поля. В соответствии с общим замыслом следовало искать «дифференциальные уравнения, являющиеся обобщением уравнения Пуассона и позволяющие вычислить $g_{\mu\nu}$ из $T_{\mu\nu}$ (т. е. тензора энергии-импульса «материи». — В. В.); при этом уравнения должны быть общековариантными» [там же]. Этого, однако, в 1913 г. Эйнштейну (и Гроссману) не удалось сделать: «Мы не смогли выразить в общековариантной форме связь между $g_{\mu\nu}$ и $T_{\mu\nu}$ » [там же]. В конечном счете, это обстоятельство привело к внутренней противоречивости теории Эйнштейна—Гроссмана и послужило основой для ее критики. Эйнштейн, тем не менее, пытается защитить «дуалистический» вариант тензорной теории. Он пытается интерпретировать уравнения гравитаци-

обного поля как соотношения, которые вообще не могут быть общековариантными и которые являются своеобразным ограничением на произвольно движущиеся системы отсчета. В этом случае они «ничего не говорят об объектах, изображаемых введенными величинами; они лишь ограничивают выбор системы отсчета» [257, с. 322]. Оправданием такого понимания уравнений гравитационного поля служат два аргумента, «из которых один имеет логическое, другой эмпирическое происхождение» [там же]. Здесь речь идет об «аргументе причинности» (логический аргумент) и об «аргументе сохранения» (эмпирический аргумент)*. В результате были построены линейно-ковариантные уравнения гравитационного поля. Эйнштейн, конечно, чувствует некоторую логическую ущербность дуалистической конструкции. Ощущение этой ущербности и незаконченности теории, стремление сохранить общековариантный характер теории при наличии как будто важных физических аргументов против общековариантных уравнений поля, нашли выражение в следующем несколько «темном» отрывке: «Этим уравнениям (линейно-ковариантным уравнениям поля. — В. В.), без сомнения, соответствует некоторое, хотя и незначительное число общековариантных уравнений, вывод которых ни с физической, ни с логической точки зрения не представляет, однако, особого интереса, что очевидно из соображений, приведенных в пункте 8 (связанных с аргументами «причинности» и «сохранения». — В. В.). Тем не менее для нас принципиально важно, что общековариантные уравнения, соответствующие уравнениям (6) (линейно-ковариантным уравнениям гравитационного поля. — В. В.), существуют. В самом деле, только в этом случае можно требовать ковариантности остальных уравнений по отношению к произвольным преобразованиям. С другой стороны, возникает вопрос, не подвергаются ли эти уравнения каким-либо ограничениям в результате специализации системы отсчета. В общем случае, по видимому, это не так» [257, с. 324].

Эйнштейн, чувствуя, что возражения Ми в случае линейно-ковариантного подхода остаются в силе, пытается сохранить общековариантный костяк теории. А главное, убедить в этом и себя, и своего оппонента. Только в этом случае критика Ми бьет мимо цели: «Из предыдущего изложения основ теории видно, что для ее обоснования не требуется прибегать к каким-либо специальным предположениям. И если... Ми утверждает обратное, то только потому, что он применяет в качестве вспомогательного эвристического принципа только требования ковариантности, содержащиеся в обычной теории относительности, т. е. потому, что он вводит таким образом априорно предпочтитель-

* Любопытно, что аргумент, связанный с принципом сохранения энергии-импульса, Эйнштейн называет эмпирическим, хотя с теоретико-познавательной точки зрения это едва ли правильно. Вероятно, он хотел подчеркнуть то обстоятельство, что принцип сохранения энергии-импульса подтвержден всем опытом истории физики.

ные системы отсчета. При этом способе рассмотрения защищаемая мной теория действительно имеет крайне малое право на существование! Я надеюсь, однако, что в настоящем сообщении мои взгляды изложены достаточно ясно» [там же].

Таким образом, Эйнштейн, хотя и не согласился с возражениями Ми («Я не согласен с этой критикой и не могу отделаться от впечатления, что Ми неправильно понимает мои теоретические взгляды» [257, с. 319]), в конечном счете, вынужден был признать, что при ограничении общековариантного подхода, т. е. при введении «априорно предпочтительных систем отсчета», «защищаемая (им. — В. В.) теория действительно имеет крайне малое право на существование» [257, с. 324]. Провести же последовательно принцип общей ковариантности в теории Эйнштейна—Гроссмана не удалось. Дискуссия с Ми, несомненно, должна была способствовать уяснению того обстоятельства, что линейная (или лоренцева) ковариантность основных уравнений теории тяготения — уравнений гравитационного поля — лишает тензорную теорию Эйнштейна—Гроссмана ее важнейших достоинств. Она стимулировала мысль Эйнштейна к возвращению на путь общей ковариантности, хотя он все еще был далек от мысли признать необходимым требование общей ковариантности по отношению к уравнениям гравитационного поля.

Теперь коснемся еще двух вопросов, имеющих непосредственное отношение к этой дискуссии: о тензорной лоренц-ковариантной теории тяготения, набросок которой дал Ми, и о книге Ми [467], посвященной релятивистской теории тяготения и изданной в 1921 г., когда Ми уже признал ОТО.

Дальнейшая судьба лоренц-ковариантного тензорного подхода к теории тяготения. Ми ошибочно полагал, хотя, как мы видели, и не без всяких оснований, что теория Эйнштейна—Гроссмана — не более, чем тензорная лоренц-ковариантная теория, контуры которой он набросал в сентябрьской дискуссии в Венс. Тензорный характер потенциала гравитационного поля, рассматриваемого погруженным в четырехмерное пространство—время Минковского, он считал основной особенностью теории Эйнштейна—Гроссмана. Сам Ми считал, что его собственная скалярная лоренц-ковариантная теория содержит меньше противоречий, чем другие теоретические схемы, и существенно проще их. Поэтому он не стал развивать тензорную лоренц-ковариантную теорию, к которой, по его мнению, должен был прийти Эйнштейн. Эйнштейн же, несмотря на трудности с уравнениями поля, не мог согласиться на кардинальное ограничение требованиям лоренц-ковариантности, так как справедливо считал, что это лишило бы его теорию тех физических оснований, которые послужили исходным пунктом для ее разработки. В результате лоренц-ковариантная тензорная теория не получила развития. Спустя примерно полтора десятилетия сначала Биркгоф [7, 151], а затем Фирц и Паули [357] привлекли внимание теоретиков к тензорной лоренц-ковариантной теории тя-

готения. Биркгоф в 1927 г. дал первый набросок своей лоренц-ковариантной тензорной теории, которая в середине сороковых годов получила дальнейшее развитие в работах самого Биркгофа и его учеников Барахаса, Граефа, Сандовалья-Вайярты и др. Теория Биркгофа удовлетворительно объясняла три общерелятивистских эффекта, хотя и содержала некоторые существенные трудности, отмеченные Вейлем: неудовлетворительное согласование с принципом равенства инертной и тяжелой масс, возможность отрицательной плотности энергии гравитационного поля [568]. Фирц и Паули, изучая лоренц-ковариантные уравнения поля для безмассовых частиц произвольного спина нашли, что эти уравнения в случае спина два оказываются тензорными и, более того, совпадают с линейным приближением ОТО.

В упомянутой выше работе Вейль показал также, что единственными тензорными лоренц-ковариантными уравнениями гравитации, удовлетворяющими принципу сохранения энергии-импульса, оказываются уравнения, совпадающие с линейным приближением ОТО. Однако это приближение не объясняло аномалию Меркурия, и Вейль подчеркнул, что последнего можно достичь, если учесть в качестве дополнительного источника тензор энергии-импульса самого гравитационного поля. Впоследствии именно на этом пути Гупта [380—382], Тирринг [541, 542], Фейнман [356] и др. построили корректную лоренц-ковариантную тензорную теорию тяготения, способную объяснить три знаменитых эффекта и лишённую принципиальных трудностей, которые были в теории Биркгофа. Оказалось, однако, что систематическое развитие лоренц-ковариантной тензорной теории требует введения нелинейности, в результате чего эта теория утрачивает свою простоту и естественность. С другой стороны, как показал Тирринг, метрические соотношения плоского пространства—времени вообще ненаблюдаемы, реальные же измерения приводят, фактически, к соотношениям, характерным для искривленного пространства—времени. В результате, «теория РТТПП (релятивистская теория тяготения в плоском пространстве—времени. — В. В.) сама подводит к идее искривления пространства—времени, сама (при ее последовательном развитии) приводит к основным идеям ОТО» [66, с. 95]. Ми, как мы видели, полагал, что ОТО (правда, в ее первом, не вполне корректном, выражении) должна свестись к лоренц-ковариантной тензорной теории. В действительности же произошло как раз наоборот: оказалось, что логически возможная РТТПП может рассматриваться как некоторое приближение ОТО и при последовательном развитии сама приходит к необходимости признать искривление пространства—времени, т. е. к ОТО. Впрочем, все это стало ясно к началу 60-х годов, т. е. спустя почти полвека после дискуссии Эйнштейна и Ми. А спустя семь—восемь лет (вскоре после триумфального подтверждения в 1919 г. отклонения световых лучей в гравитационном поле Солнца в соответствии с формулой Эйнштейна) Ми выпустил небольшую науч-

но-популярную книгу «Эйнштейновская теория тяготения», в которой признал справедливость ОТО [467].

Вспомним, что теория Ми не объясняла, в сущности, ни один из трех знаменитых эффектов, теории Нордстрема же предсказывали лишь «красное смещение». К началу 20-х годов экспериментально-эмпирическое преимущество тензорной теории выявилось с достаточной определенностью. К тому же после ноября 1915 г. она уже не страдала логически неудовлетворительным дуализмом в отношении свойств ковариантности. Триумф принципа общей ковариантности, приведшего к совершенным и в известной мере подтвердившимся уравнениям гравитации Эйнштейна, был очевиден. «Я полагаю, — писал Ми, — многие из моих читателей будут, пожалуй, удивлены, узнав, что вообще можно принять этот постулат (принцип общей ковариантности или общий принцип относительности. — В. В.). Я даже думаю, что и многие специалисты будут поражены этим. Они всдь еще не так давно, когда Эйнштейн искал правильную форму гравитационного закона, очень сильно сомневались в возможности подобного успеха. Автор настоящего сочинения должен сознаться, что он и сам относился к числу сомневающихся. Эйнштейну понадобилось много лет, чтобы со всей ясностью разработать эту проблему... Наконец, он нашел путь, взяв на вооружение известные геометрические исследования математиков... особенно Римана» [467, с. 62]. Интересно, что теперь Ми даже увидел глубокое родство своей программы полевого синтеза с той программой, которую можно было связать с ОТО.

Отношение физиков к теории Эйнштейна — Гроссмана, 1913—1914 гг.

Продолжение дискуссии по Венскому докладу Эйнштейна. В венской дискуссии по докладу Эйнштейна приняли участие, кроме Ми и самого Эйнштейна, Борн, Хазенорль, ставший после смерти Больцмана лидером венских физиков, один из старейших геттингенских физиков Э. Рикке, внесший, в частности, важный вклад в физику металлов (теория проводимости Рикке—Друде), молодой берлинский теоретик Г. Рейснер, решивший в 1916 г. общерелятивистскую задачу о гравитационном и электрическом полях заряженного шара, венский физик Г. Егер и менее известные сейчас немецкий физик А. Шютц и будапештский ученый Г. Земплен, проявлявшие живой интерес к теории относительности. Всех этих ученых, за исключением, пожалуй, Рейснера и Борна, интересовали вопросы экспериментальной проверки новой теории.

Характерное признание прозвучало в вопросе Рикке, занимающего в официальной иерархии немецких физиков видное место: «Экспериментальная физика вначале отнеслась весьма критически к теории относительности. Нам казалось, что новая и странная теория развита на недостаточной эксперименталь-

ной базе. Но настроение переменялось. Мы все сознаем, какие новые разъяснения дала эта теория о явлениях, до тех пор непонятных» [61, с. 366]. Триумф СТО, и тем более, триумф, пришедший с большим запозданием, предостерегал теперь от поспешности в оценке абстрактной, математически сложной, явно слабо, как это не без основания казалось физикам, связанной с экспериментом новой теории Эйнштейна—Гроссмана. В центре внимания поэтому оказался вопрос об эффекте искривления световых лучей в гравитационном поле. Об этом шла речь в выступлениях и вопросах Рикке, Хазснорля, Егера, Ми. Егер, в частности, отметил, что отклонение световых лучей вблизи Солнца может быть вызвано другими физическими причинами, связанными с влиянием атмосферы Солнца. Ответ Эйнштейна состоял в том, что зависимость такого рода отклонения от расстояния луча света до центра Солнца R должна быть иной, чем $1/R$, что имеет место в случае гравитационного отклонения. Эйнштейн также описал метод, которым собирался воспользоваться Фрейндлих, чтобы обнаружить искомый эффект. Имелось в виду фотографирование звезд вблизи Солнца во время его полного затмения. Обработка уже известных фотографий солнечных затмений к этому времени не привела к определенному выводу, и это давало некоторые основания для скептического отношения ряда ученых (Егер, Ми).

Ми также поднял вопрос о гравитационном «красном смещении», которое должно наблюдаться, согласно теории Эйнштейна—Гроссмана, и отсутствует в его теории. Однако Эйнштейн сам считал маловероятной возможность регистрации этого эффекта, поскольку существуют и другие причины, способные вызвать соответствующий сдвиг спектральных линий.

Г. Земплен, хорошо знакомый с последними работами Этвеша и его сотрудников, напомнил, что в 1909 г. точность опыта Этвеша была повышена в пять раз по сравнению с классическими результатами венгерского ученого, полученными в 1890—1891 гг.

Ми в связи с этим заметил, что, хотя его теория не согласуется со строгой пропорциональностью инертной и гравитационной масс (и «независимостью удельного притяжения масс от рода вещества», по выражению Земплена), точность опытов Этвеша явно недостаточна, чтобы опровергнуть эту теорию (она должна была бы превышать 10^{-11}).

Борна интересовал вопрос о скорости распространения гравитационных действий, которая, с его точки зрения, должна совпадать со скоростью света. Эйнштейн подчеркнул, что это действительно так в случае линейного приближения, «когда возмущения, вносимые в поле бесконечно слабы» [61, с. 369]. Но в общем случае нужно искать точные решения сложной нелинейной системы уравнений, и вопрос остается открытым.

Рейснер затронул сложный вопрос «о влиянии поля тяжести на собственную энергию этого поля» [254, с. 299]. Речь шла о

проблемы энергии в теории Эйнштейна—Гроссмана: «Как... показать... что статическая энергия чисто гравитационного поля хотя и обладает инерцией и тяжестью, но не обладает остальными свойствами тяжелой массы — не обнаруживает пондеромоторных сил? Другими словами, как получается, что поле остается статическим, хотя полевая энергия пустого пространства подвержена тяжести? Как охарактеризовать особый вид энергии, присущий тяжелой массе, в противоположность другим видам энергии?» [там же]. На дискуссии Эйнштейн фактически не дал правильного ответа на вопрос Рейснера. Но через полтора-два месяца он написал статью, содержащую развернутый ответ на вопрос Рейснера. Со свойственной ему самокритичностью Эйнштейн писал: «К сожалению, я совершенно не понял вопроса, заданного мне Рейснером в дискуссии по моему докладу о гравитации, и неправильно ответил, хотя вопрос был поставлен ясно» [там же].

Основной смысл этой небольшой статьи заключался в том, что компоненты тензора энергии-импульса гравитационного поля вносят в тяжелую и инертную массы, а также в вектор энергии импульса некоторой замкнутой статической системы точно такой же вклад как компоненты тензора энергии-импульса «материи». Как показал Эйнштейн, это действительно так, и обе массы системы определяются интегралом $\int (T_{44} + t_{44}) dV$, а вектор энергии импульса системы — интегралом $\int (T_{0k} + t_{0k}) dV$, где T_{0k} и t_{0k} — соответственно тензоры энергии-импульса «материи» и гравитационного поля. Эйнштейн также заметил, что, несмотря на самодействие гравитационного статического поля, закон сохранения энергии-импульса обеспечивает статичность поля. Отсутствие объемных сил, которые должны возникать вследствие самодействия поля тяготения, он объяснил компенсацией их силами давления. В результате оказывается, что все силы можно свести к поверхностным, и это согласуется с законом сохранения энергии-импульса в этом случае:

$$\partial t_{01}/\partial x + \partial t_{02}/\partial y + \partial t_{03}/\partial z = 0.$$

Статья Эйнштейна в «Scientia». Весной 1914 г. Эйнштейн закончил статью «О проблеме относительности», заказанную ему журналом «Scientia» (или «Rivista di Scienza»), обсуждавшим философские и методологические проблемы науки и издававшимся в Болонье известным итальянским геометром Ф. Эрикссом [259]. В этом журнале, начиная с 1908 г., велась широкая дискуссия по теории относительности и гравитации, в которой приняли участие в 1908, 1909 гг. В. Ритц, в 1911 г. П. Ланжевен, в 1914 г. Лоренц и Абрагам, в 1913 г. М. Бриллюэн, в 1911 г. Г. Кастельнуово, а также сам Эрикес и др. *

* На страницах этого журнала, который начал издаваться в 1907 г., за восемь лет было опубликовано немало статей выдающихся ученых и философов начала XX в.: С. Аррениуса, Э. Бореля, П. Бутру, Ф. Эрикеса, З. Фрей-

К этому времени дискуссии с Абрагамом и Ми были в общем уже закончены. Прежде чем обратиться к рассмотрению своей теории, Эйнштейн оценивает три основных скалярных теории (Абрагама, Ми и Нордстрема), конкурирующих с теорией Эйнштейна—Гроссмана. Причем оценка теорий проводится им исключительно на основе теоретических критериев, а именно, принципа относительности и принципа эквивалентности. Принцип эквивалентности здесь формулируется либо в виде равенства инертной и гравитационной масс, либо в форме: «тяжелая масса замкнутой системы должна определяться энергией системы», в которую также должна входить и энергия самого гравитационного поля*. Теория Абрагама с этих позиций оказывается неудовлетворительной, так как не согласуется с принципом относительности. Теория Ми, как это считал и сам автор теории, не удовлетворяет второму требованию. Эйнштейн напоминает, что в теории Ми, например, при нагревании возрастает инертная масса, но не тяжелая масса, которая в случае газа может даже при этом уменьшаться. И хотя соответствующие отклонения от строгого равенства масс нельзя обнаружить экспериментально из-за их малости, «все говорит о том, — замечает Эйнштейн, — что взаимосвязь инертной и тяжелой масс является принципиальной, независимой от рода энергии» [259, с. 390]. Сохранение же этого равенства при радиоактивных превращениях, с точки зрения теории Ми, требует очень специальных предположений о природе внутриатомной энергии. Наконец, Эйнштейн признает, что теория Нордстрема (имеется в виду вторая теория) удовлетворяет обоим требованиям. «И если я все-таки полагаю, что мы не можем удовлетвориться этим решением (теорией Нордстрема. — В. В.), то это мнение основано на более общих теоретических соображениях» [259, с. 390].

да, Дж. Каптейна, Маха, Оствальда, Э. Пикара, А. Пуанкаре, А. Рея, Б. Рассела, Г. Зеелигера, Г. Зиммеля и др.

* Отметим, впрочем, что опыт Этвеша, строго говоря, не дает основания для последнего утверждения (т. е. о включении в тяжелую массу системы ее собственной гравитационной энергии). Р. Дикке предложил эксперимент с посылкой к Юпитеру космического аппарата типа «Маринер», который позволил бы решить вопрос о возможном вкладе собственной гравитационной энергии Юпитера в его тяжелую массу. Дело в том, что эта энергия достаточно велика ($E_{\text{свободн}}/Mc^2 = GM^2/RMc^2 \sim 10^{-8}$, где M — масса Юпитера, R — радиус его, G — гравитационная постоянная), чтобы измерения радиуса орбиты Юпитера с помощью «Маринера» позволили бы сделать заключение о наличии соответствующей аномалии в его ускорении. Собственная энергия Солнца в 100 раз больше, чем у Юпитера, но оно не является составной частью двойной звезды, что не позволяет определить его инертную массу независимо от тяжелой массы. Насколько нам известно, такого рода эксперимент до сих пор не поставлен [57, с. 70]. Аналогичный опыт для Земли (гравитационный вклад в массу $\sim 4,6 \cdot 10^{-10}$) и Луны (этот вклад равен $0,2 \cdot 10^{-10}$) недавно был завершен американскими учеными. Оказалось, что отношение $m_{\text{ин}}/m_{\text{г}}$ с учетом гравитационного взаимодействия так же, как и у обычных лабораторных тел. Справедливость этого утверждения проверена с точностью 1,5% [13, с. 10]. См. также [50, 88].

И далее Эйнштейн переходит к рассмотрению этих соображений, уделяя особое внимание маховской критике основ ньютоновской механики и теории тяготения: «Обсуждаемые далее слабые стороны нашего физического мировоззрения уже были со всей ясностью вскрыты Э. Махом в его глубоких исследованиях основ механики Ньютона, так что мои соображения на этот счет не могут претендовать на новизну» [там же]. Затем Эйнштейн приводит блестящий диалог между наивным наблюдателем, обладающим, однако, здравым смыслом (или точнее, «природным разумом»), и «человеком, постигшим школьную премудрость», т. е. приверженцем классической концепции. В результате он приходит к выводу о неоправданности выделения класса привилегированных систем отсчета и относительности ускорения. Здесь же впервые фигурирует замечательная аналогия выделения привилегированных систем отсчета с выделением привилегированного (вертикального) направления, связанным с представлением о плоскостности земной поверхности в древности, аналогия, придуманная Бессо («в обоих случаях нарушается правило достаточного основания»). Этот «фундаментальный недостаток» присущ не только классической механике, но и СТО. «...Я и поставил своей целью обобщить теорию относительности таким образом, чтобы устранить его» [259, с. 392].

Заметим, что, скорее всего (и об этом свидетельствуют некоторые материалы, приведенные нами ранее) Эйнштейн вначале пытался ввести гравитацию в рамки СТО (и релятивистской программы). Но, увидев, что включение даже однородных гравитационных полей, в соответствии с принципом эквивалентности, который был им открыт на основе анализа равенства $m_g = m_{ин}$, выводит за рамки класса инерциальных систем отсчета, он понял необходимость расширения принципа относительности. Иначе говоря, сама идея расширения СТО появляется как следствие попытки ввести теорию тяготения в рамки релятивистской программы.

Отношение физиков. Имеется два письма Эйнштейна к Бессо, относящихся к рассматриваемому периоду. Первое письмо* содержит замечание о весьма скептическом отношении к новой теории гравитации даже близких к Эйнштейну ведущих немецких физиков: «К работе, связанной с гравитацией, занимающаяся физикой часть человечества относится довольно пассивно. Наибольший интерес к этому, пожалуй, проявляет Абрагам. Правда, он основательно поносит в «Scientia» всякую там

* Это письмо датировано 1913 г., но, вероятнее всего, оно написано в декабре 1913 г. Во-первых, Эйнштейн в нем сообщает о результате, полученном им в статье «Дополнительный ответ Рейснеру», законченной 11 декабря 1913 г.: «...Я строго доказал, что, как для гравитационной, так и для инерционной массы замкнутой системы, общая энергия покоя системы, включая энергию гравитации, является определяющей» [157, с. 38]. Во-вторых, в письме упоминается статья Абрагама, опубликованная в январском выпуске «Scientia» за 1914 г. Эйнштейн, очевидно, ознакомился с ней до ее появления в печати.

относительность, но делает это с пониманием. К Лоренцу я собираюсь весной с тем, чтобы обсудить эти дела. Он проявляет большой интерес к ним, так же как и Ланжевэн. Лауэ этим принципиальным доводам не внимает, Планк — тоже, скорее уж Зоммерфельд» [157, с. 38].

Заслуги Эйнштейна в области СТО, квантовой теории и других областях физики были столь значительны, что в середине 1913 г. он был представлен в Прусскую Академию наук в Берлине [498]. Представление было подписано ведущими берлинскими академиками—физиками: Планком, Нернстом, Рубенсом и Варбургом. 2 июля 1914 г. состоялся торжественный прием Эйнштейна в члены Академии, на котором он произнес традиционную вступительную речь. Имея в виду свою новую теорию тяготения, связанную с обобщением относительности, Эйнштейн сказал: «Если верно, что с физической точки зрения равномерному движению нельзя приписывать абсолютного смысла, то возникает вопрос: нельзя ли распространить это утверждение и на неравномерные движения? Оказывается, что если положить в основу таким образом обобщенный принцип относительности, то можно достигнуть вполне определенного развития теории относительности. Это приводит к общей теории тяготения, включающей динамику. Но пока отсутствует фактический материал, на котором можно было бы проверить обоснованность положенного в основу принципа» [261, с. 16]. В своем ответе на выступление Эйнштейна Планк, высоко оценив достижения Эйнштейна, значительную часть речи посвятил полемике по поводу общерелятивистской концепции. По-видимому, Планк считал более реалистическим подход к проблеме гравитации на основе СТО в духе Нордстрема и Ми. В специальном принципе относительности он видел «особенно важный и ценный принцип теории», поскольку он дает возможность произвести «специальный отбор из бесконечной разнообразной области вообще мыслимых, логически свободных от противоречий взаимосвязей» [166, с. 668]. В радикальном расширении принципа относительности ему виделась опасность утраты этим принципом своей эвристической силы и, по-видимому, физического смысла. Подтверждение этой точки зрения он нашел у самого Эйнштейна, который, как мы видели, считал, что уравнения гравитационного поля не могут быть общековариантными и допускают вполне определенный класс систем отсчета: «...В вашем общем принципе относительности... не устранена необходимость обоснования системы координат, поскольку вы сами недавно доказали, что не все нужные системы координат могут быть приняты с достаточным основанием» [166, с. 669]. Здесь же Планк упоминает об экспедиции для наблюдения предстоящего Солнечного затмения, «на исследование которого также и наша Академия ассигновала особое средства» [там же] и которое, возможно, даст ответ на вопросы, поставленные новой теорией Эйнштейна. (Речь идет об экспедиции в Россию, которую должен был возглавить Фрэнк-

лих.) В заключение Планк заметил, что в физике «легче, чем в других науках, разрешаются острейшие деловые противоречия при высоком уважении и сердечном отношении друг к другу» [там же]. Лауэ, по-видимому, тоже относился к теории Эйнштейна—Гроссмана, а затем и к ОТО критически. Даже после триумфального завершения основ ОТО и замечательного объяснения аномального смещения перигелия орбиты Меркурия он опубликовал большую работу, посвященную детальному анализу второй теории Нордстрема, которую он считал более предпочтительной [447]. Сдержанное отношение немецких и австрийских физиков к теории Эйнштейна—Гроссмана проявилось и на Венской конференции в сентябре 1913 г. Большое значение при этом имела, конечно, активная оппозиция со стороны Абрагама и Ми. Заметим, впрочем, что несмотря на резкие расхождения в позициях, Эйнштейн высоко ценил критику Абрагама.

Мартом 1914 г. датировано* следующее письмо Эйнштейна к Бессо [157, с. 39]. Оно замечательно в том отношении, что фиксирует один из важнейших критических моментов в истории ОТО: Эйнштейн отказывается от линейной ковариантности уравнений поля и полагает, что нашел естественный способ ограничения общей ковариантности, не исключаящий из числа допустимых ускоренные системы отсчета. Именно с этого времени он вступает на путь «приспособленной» ковариантности, во всех деталях разработанный в статье «Формальные основы общей теории относительности» [258], законченной в конце сентября 1914 г.: «Новости, относящиеся к теории гравитации, следующие. Из уравнения гравитации вытекает:

$$\sum_{\alpha\beta\mu} \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left(\sqrt{-g} \gamma_{\alpha\beta} g_{\sigma\mu} \frac{\partial \gamma_{\mu\nu}}{\partial x_\beta} \right) = k (T_{\sigma\nu} + t_{\sigma\nu}),$$

а из закона сохранения следует

$$\sum_{\alpha\beta\mu\nu} \frac{\partial}{\partial x_\nu} \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left(\sqrt{-g} \gamma_{\alpha\beta} g_{\sigma\mu} \frac{\partial \gamma_{\mu\nu}}{\partial x_\beta} \right) = 0.$$

Эти 4 уравнения третьего порядка для $g_{\mu\nu}$ (соответственно для $\gamma_{\mu\nu}$) можно рассматривать как условия для специального выбора системы отсчета. Назовем их для краткости

$$B_\sigma = 0.$$

Мне удалось доказать простым расчетом, что уравнения гравитации справедливы для любой системы отсчета, удовлетворяющей этим условиям. А отсюда следует, что имеют место преобразования ускорения различнейших видов, которые преобразуют уравнения в самих себя (например, также и вращения), так что подтверждается гипотеза эквивалентности в своей пер-

* Оригинал этого письма находился вместе с черновиком ответа Бессо от 20 марта. Вероятнее всего, оно написано не позже 15 марта 1914 г.

воначальной форме, причем в неожиданно широком масштабе... Теперь я вполне удовлетворен и более не сомневаюсь в правильности всей системы независимо от того, удастся или нет наблюдение солнечного затмения. Здравый смысл этого дела очевиден... Я сейчас не очень горю желанием работать, так как измучился ужасно, пока не нашел решения, описанного выше. Общая теория инвариантности была в сущности только прелюдией. Прямой путь оказался единственно проходимым. Непонятным остается только, как это я так долго бродил впопыхах, пока не натолкнулся на то, что было так близко» [157, с. 39—40].

Обзор проблемы гравитации Абрагама и критика теории Эйнштейна—Гроссмана. Достаточно полное представление о состоянии гравитационной проблемы к началу 1915 г. дает обстоятельный обзор Абрагама «Новейшие теории тяготения», поступивший в редакцию журнала «*Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*» 15 декабря 1914 г. [317].

Несмотря на острую полемику, которая происходила между Абрагамом и Эйнштейном, последний, как мы уже видели, принял участие Абрагама в работе над проблемой тяготения и активно дискутировал с ним. Обзор Абрагама замечателен тем, что он содержит анализ не только его собственных теорий, но и не менее глубокое обсуждение обеих теорий Нордстрема, теории Ми, теории Эйнштейна—Гроссмана. Наряду с этими основными гравитационными теориями Абрагам кратко рассматривает предшествующие электромагнитные (Лоренц, 1900 г.) и спецрелятивистские (Пуанкаре, Минковский, Зоммерфельд, 1906—1910 гг.) теории тяготения, а также относящиеся к периоду 1912—1914 гг. более второстепенные теории Ишивары и Крсмана. Все полевые теории он классифицирует по размерности потенциала: векторные, скалярные и тензорные. Векторные теории тяготения либо сводящие гравитацию к электромагнитному полю, либо по своей структуре вполне аналогичные максвелловской теории, сталкиваются, как показывает Абрагам, прежде всего, с трудностями энергетического характера: наличие отрицательной плотности энергии, связанная с этим неустойчивость системы гравитирующих масс, энергетико-волновой парадокс — «в то время как само гравитационное поле, распространяясь подобно некоторому виду волн, поступает в некоторую область, свободную от поля, энергия должна распространяться в противоположном направлении» [317, с. 476]. В качестве главного недостатка спецрелятивистских теорий Пуанкаре и Минковского Абрагам отмечает их неполевой характер («релятивистские элементарные законы тяготения не выводимы из полевых уравнений» [там же]).

После краткого обсуждения фундаментального факта равенства инертной и гравитационной масс* он переходит к рассмотрению

* Абрагам при этом упоминает классические эксперименты Этвеша и недавние опыты Саутсериса, но не ссылается на Эйнштейна, который уже в 1907 г. выдвинул вопрос о равенстве $m_g = m_{ин}$ на первый план.

рению широкого класса скалярных теорий. Главным достоинством скалярного подхода оказывается положительность плотности энергии гравитационного поля во всех теориях такого рода. Абрагам последовательно рассматривает свою первую и вторую теории, специально подчеркивая их антирелятивистский характер: «Наша планетная система движется в поле тяжести остальных небесных тел. Та система отсчета, в которой внешнее поле тяготения может рассматриваться как статическое, играет некоторую выделенную роль и должна совпасть с «абсолютной» системой отсчета, которая обнаруживает себя посредством центробежных и кориолисовых сил... Если только тяжесть рассматривается как неотъемлемое свойство материи, то теоретики, которые определяют потенциал тяготения с помощью c (скорости света. — В. В.), должны отказаться от «вчерашней» (специальной. — В. В.) теории относительности» [317, с. 488]. Абрагам также отметил родство своей второй теории со второй статической теорией Эйнштейна.

Затем подробно обсуждаются обе теории Нордстрема и теории Ми, близкая к первой теории Нордстрема. С теориями Абрагама их роднит скалярный характер потенциала, форма уравнений и тензора энергии-импульса гравитационного поля. Однако эти теории лоренц-ковариантны, и в этом их принципиальное отличие от абрагамовского подхода. Абрагам отмечает несогласованность первой теории Нордстрема и теории Ми с положением о тождестве инертной и гравитационной масс. В отношении второй теории Нордстрема подчеркивается то обстоятельство, что «локальные и пространственно-временные измерения не позволяют... сконструировать универсальную систему отсчета, в которой свет распространялся бы прямолинейно», что «едва ли согласуется с теорией относительности Минковского» [317, с. 507].

Из общего ряда скалярных теорий тяготения явно выпадает гравитационная теория Кречмана, выдвинутая немецким физиком в его диссертации в 1914 г. [436]. Мы не рассматривали эту теорию, поскольку она не оказала никакого влияния на основную линию развития, связанную с именами Эйнштейна, Абрагама, Нордстрема и Ми. Кречман использовал эфирно-гидродинамические представления о строении материи, развитые в диссертации Э. Ламлы. Роль гравитационного потенциала в этой теории играло эфирное давление p , удовлетворяющее в вакууме волновому уравнению $\square p = 0$.

Абрагам понимал, что теория Кречмана, являющая собой типичный пример эфирно-модельных представлений, особенно характерных для второй половины XIX в., но имеющих хождение и в первые десятилетия XX в. (А. Корн, Т. Томмасина, Н. А. Морозов, И. О. Янковский и др.), не только не удовлетворительна во многих отношениях, но и полностью выходит за рамки главного направления развития физики XX в.: «Бросается в глаза противоположность между этой теорией и теориями,

рассмотренными выше (теориями Эйнштейна, Абрагама, Нордстрема, Ми, Ишивары. — В. В.). Они вводят в рассмотрение лишь механические и энергетические величины, теория Кречмана же, напротив того, покоится на очень специальных предположениях...» [317, с. 508] *.

Наибольший интерес в обзоре представляет критическое рассмотрение теории Эйнштейна—Гроссмана, на чем мы остановимся несколько подробнее. Сначала обсуждается эйнштейновский принцип эквивалентности и два известных экспериментальных эффекта, вытекающих из него. Абрагам далее справедливо замечает, что следующий шаг после известной работы Эйнштейна 1911 г. был сделан им самим: «В этой первой ** работе Эйнштейн исследовал влияние гравитации на оптические явления, не используя связь потенциала и скорости света для построения теории тяготения... Лишь после публикации первого сообщения Абрагама он вновь обратился к гравитационной проблеме... Он также заключил из этой гипотезы (принципа эквивалентности.— В. В.), что скорость света c в свободном от масс статическом поле тяготения должна удовлетворять уравнению Лапласа» [317, с. 510]. Описав статические теории Эйнштейна и указав на их тесную связь с его собственными теориями, Абрагам переходит к анализу тензорной теории Эйнштейна—Гроссмана.

Абрагам, в противоположность Ми, понимает принципиальное отличие теории Эйнштейна—Гроссмана от тензорной лоренц-ковариантной схемы Ми: «То, что тензорную теорию тяготения можно ввести в рамки понимания пространства—времени, характерного для Минковского, показал Г. Ми. Разработанная Эйнштейном и Гроссманом теория тяготения, однако, выходит за рамки прежней теории относительности тем, что она связывает тензорный потенциал $g_{\mu\nu}$ с обобщенным учением о пространстве—времени... Полная система $g_{\mu\nu}$ определяет тем самым состояние деформации четырехмерного пространства» [317, с. 511]. Указав затем, что Эйнштейну не удалось в полной мере реализовать программу «обобщенной относительности», так как он не нашел общековариантных уравнений гравитационного поля, Абрагам справедливо заметил: «Что касается теоретико-инвариантных свойств гравитационных уравнений этой теории, то Эйнштейн, как будто, при написании «Прокста» надеялся обеспечить их ковариантность если не для группы преобразований, соответствующих наиболее общей форме (55) (т. е. форме $ds^2 = \sum_{\mu\nu} g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu$. — В. В.), то хотя бы для преобразований ускорен-

* Впоследствии Кречман разрабатывал принципиальные вопросы теории Эйнштейна—Гроссмана и ОТО, в частности проблему систем отсчета. Первой работой такого рода была статья [437].

** В действительности, как мы помним, принцип эквивалентности был выдвинут Эйнштейном в 1907 г., о чем, вероятно, Абрагам не знал.

ния, составляющих группу; при этом получила бы математическое оправдание его «гипотеза эквивалентности» [317, с. 513]. Затем, как известно, Эйнштейн считал возможным ограничить группу ковариантности полевых уравнений группой линейных преобразований. Но вскоре (не позже марта 1914 г.) он нашел условие, вытекающее из закона сохранения энергии-импульса, которое, казалось, существенно расширяет класс допустимых систем отсчета. Абрагам не разделял оптимизма Эйнштейна в отношении этого условия и соответствующих ему преобразований («приспособленных», по выражению Эйнштейна): «Было бы интересно и существенно выяснить, какие преобразования, помимо линейных, содержатся в этом классе преобразований? И какой физический смысл (равноускоренные движения, вращение и т. д.) им можно приписать? Только в том случае можно было бы говорить о некоторой «обобщенной теории относительности», если равноправие систем отсчета, постулированное принципом относительности 1905 г. для равномерно и прямолинейно движущихся систем отсчета, было бы распространено и на такие системы, которые находятся друг относительно друга в состоянии ускоренного движения или вращения. Пока, кажется, такое расширение относительности движения не удалось» [317, с. 514]. Далее Абрагам анализирует линейную ковариантность уравнений гравитационного поля в теории Эйнштейна—Гроссмана, так как вопрос о включении нелинейных преобразований в совокупность «приспособленных» преобразований оставался открытым. Он подчеркнул, что если линейная ковариантность в физическом отношении сводится к лоренц-ковариантности, то возникает некоторое противоречие: с одной стороны, общековариантная теория связана с искривленным пространством—временем, а с другой стороны, уравнения гравитационного поля возвращают нас к пространству—времени Минковского. Если искривленное пространство—время — фундаментальная черта теории, то относительность в смысле СТО может в ней выполняться только в бесконечно малом: «Хотя новая теория относительности обобщает понятия пространства и времени, она тем не менее ограничивает относительность движения бесконечно малыми пространственно-временными областями» [317, с. 516]. Абрагам делает и следующий важный шаг в критике теоретико-инвариантных свойств теории Эйнштейна—Гроссмана, справедливо полагая, что произвольно искривленное пространство—время исключает любой тип «глобальной» относительности, связанной с некоторой конечно-параметрической группой Ли. В вопросе о равенстве инертной и тяжелой масс Абрагам соглашается, в общем, с точкой зрения Ми, заметив, что при рассмотрении проблемы уравнений гравитационного поля Эйнштейн использует определенные «специальные» гипотезы (линейная ковариантность или условия «приспособленности»). В действительности, эти условия, нарушая общую ковариантность, как раз подрывают и принцип эквивалентности.

Рассмотрев далее «векторное» приближение теории Эйнштейна—Гроссмана, Абрагам обсуждает проблему «относительности инерции» или «относительности ускорения», которую Эйнштейн связывал с именем Маха. Посредством несложного расчета он показывает, что изменение скорости света и соответственно массы тела на поверхности Солнца составляет 10^{-6} . Если согласно маховской концепции инерции предположить, что масса тела целиком определяется массами окружающей Вселенной, то следует предположить, что масса остальной Вселенной в 10^6 раз больше массы Солнца. Абрагам полагал, что видимых звезд недостаточно для объяснения соответствующего изменения скорости света и массы. И, значит, следует предположить наличие весьма большой невидимой массы, с которой можно связать предпочтительную систему отсчета, а это противоречило бы основам теории. Поэтому Абрагам полагал, что концепция Маха и в рамках теории Эйнштейна—Гроссмана не согласуется с наблюдениями: «В том... что гипотеза относительности инерции выполняется в его теории, Эйнштейн усматривает некоторое существенное преимущество этой тензорной теории перед скалярными теориями... Однако мы видели, что и в теории Эйнштейна—Гроссмана эта смелая гипотеза Маха не находит достаточного количественного выражения, так что приходится призывать на помощь скрытые массы» [317, с. 520].

Последний аргумент против тензорной геометризованной теории тяготения — ее двойная сложность по сравнению со скалярными теориями (тензорность, т. е. удесятирение числа потенциалов, и искривление пространства—времени): «Если принять во внимание громадную сложность, которую несет с собой удесятирение числа потенциалов тяготения и искривления четырехмерного «мира», то, с точки зрения маховской «экономии мышления» (достаточно было бы сослаться на принцип простоты, который, впрочем, тогда еще не вполне оформился как методологический принцип физики. — В. В.), следует, пожалуй, предпочесть скалярные теории, пока предположение, что вместо одного имеются десять гравитационных потенциалов, не будет подтверждено опытом» [там же].

Выводы. Итак, выдвинув против теории Эйнштейна—Гроссмана ряд серьезных аргументов теоретического и методологического характера, главным из которых был своеобразный «дуализм» ее теоретико-инвариантной структуры (наличие линейной или «приспособленной» ковариантности полевых уравнений при общековариантном замысле теории и, соответственно, использовании искривленного пространства—времени), Абрагам как настоящий физик полагал, что окончательный ответ должен дать опыт. Теория Ми не предсказывала гравитационного «красного смещения» и отклонения света в поле тяготения. Теории Нордстрема, предсказывая «красное смещение» такое же, как и в теории Эйнштейна—Гроссмана, не приводили к искривлению световых лучей. Сложнее обстояло дело с теорией Абра-

гама, которая, будучи нерелятивистской, тем не менее давала и «красное смещение», и отклонение света, хотя последнее в этой теории составляло значение в два раза меньше, чем в будущей ОТО, но такое же, как в теории Эйнштейна—Гроссмана. Вопрос о перигелии Меркурия на этой стадии развития теории еще не обсуждался. Несмотря на это, Эйнштейн считал теорию Абрагама не конкурентноспособной из-за ее явно нерелятивистского характера и отдавал предпочтение второй теории Нордстрема, лоренц-ковариантной и удовлетворяющей требованию равенства инертной и гравитационной масс.

Дискуссии по проблеме тяготения в 1913—1914 гг. и критика, главным образом, со стороны Ми и Абрагама (и в значительно меньшей степени, со стороны Планка) свидетельствовали о наличии существенного логико-теоретического изъяна тензорно-геометрической теории, связанного с упомянутым выше «дуализмом». Они, несомненно, стимулировали мысль Эйнштейна, пытавшегося выйти из этого тупика (отказ от линейной ковариантности уравнений, идея связать «приспособленные» преобразования с классом ускоренных систем отсчета и т. д.). Вместе с тем, на фоне описанного спектра скалярных теорий, Эйнштейн все больше убеждался в достоинствах тензорного геометризованного подхода. Наконец, наличие ряда конкурирующих теорий, обеспечивающих ньютоновское приближение, по дающих различные ответы на вопрос о взаимодействии гравитации с электромагнитным полем, стимулировали подготовку прецизионных астрономических наблюдений, которые могли бы существенно облегчить проблему выбора адекватной теории тяготения. К сожалению, начавшаяся первая мировая война помешала Фрейдлиху провести наблюдения солнечного затмения, которые в случае успеха дали бы в два раза большее значение для отклонения световых лучей в поле Солнца, чем значение, предсказываемое теорией Эйнштейна—Гроссмана на основе принципа эквивалентности. Этот результат был бы, тем не менее, очень важен, поскольку он позволил бы отвергнуть скалярные лоренц-ковариантные теории Нордстрема и Ми и указал бы на половинчатость «дуалистической» тензорной теории, тем самым, возможно, ускорив бы возврат Эйнштейна к требованию общей ковариантности по отношению к уравнениям гравитационного поля.

В следующих двух разделах мы рассмотрим заключительную стадию генезиса ОТО, связанную с этим возвратом к первоначальному замыслу полностью общековариантной теории. Центральной при этом будет проблема уравнений гравитационного поля. Мы проследим более детально путь Эйнштейна к общековариантным уравнениям поля, иногда возвращаясь к уже описанным этапам развития теории. Наряду с Эйнштейном, в этом разделе на первый план выйдет новая фигура — один из лидеров Геттингена Д. Гильберт, который сумел, включившись в 1915 г. в разработку гравитационной проблемы, одновременно с Эйнштейном прийти к правильным общековариантным уравнениям гравитации.

3. Возврат Эйнштейна к общековариантным уравнениям гравитационного поля

После того как вера в результаты и методы прежней теории... была утеряна, я ясно увидел, что удовлетворительное решение может быть найдено только путем обращения к общековариантной теории, т. е. к ковариантам Римана.

А. Эйнштейн (1915)

Но кто ж он? На какой арене
Стяжал он поздний опыт свой?
С кем протекли его боренья?
С самим собой, с самим собой.

Б. Пастернак. «Художник»

В течение примерно двух с половиной лет Эйнштейн (сначала вместе с Гроссманом, а затем один) пытался найти уравнения тяготения, не удовлетворяющие принципу общей ковариантности, но удовлетворительные в физическом отношении (в частности, и с эмпирической точки зрения). Он искал такой класс систем отсчета и, соответственно, такие допустимые преобразования между ними, чтобы они включали в себя переходы от одной ускоренной системы к другой (это требовалось принципом эквивалентности), но образовывали бы группу, зависящую от конечного числа параметров. Класс систем отсчета, названных им «приспособленными», и «приспособленные» преобразования выделялись, впрочем, геометрически не ясными критериями, и соответствующие уравнения поля обладали сложной структурой. Вначале, как мы видели, Эйнштейн и Гроссман пытались ограничить допустимые преобразования линейными, но вскоре они поняли физическую неоправданность такого выбора, т. к. уже однородные поля, в соответствии с принципом эквивалентности, требовали равноускоренных систем отсчета.

Временами Эйнштейн возвращался к идее использования тензора Риччи. Так, в начале 1914 г. он вместе с голландским теоретиком Фоккером показал [255], как тензорная схема типа

$$R_{ik} = -\kappa T_{ik} \quad (76)$$

может быть сведена к лоренц-ковариантной скалярной теории Нордстрема, которая, впрочем, не удовлетворяла принципу эквивалентности естественным образом. В этой работе, кстати говоря, содержится примечание, свидетельствующее о том, что аргумент против общековариантных уравнений типа (76), связанный с принципом соответствия, теперь уже не казался Эйнштейну правильным. По-видимому, более точный анализ показал, что уравнения (76) в пределе слабых полей можно свести к уравнению Пуассона.

К осени 1914 г. Эйнштейн (в последней, написанной совместно с Гроссманом, статье) приходит к выводу, что и аргумент, связанный с принципом сохранения энергии, основан на физически не обязательном требовании, чтобы энергия-импульс гравитационного поля образовывала тензор [260, с. 402].

Аргумент же, касающийся принципа причинности и основанный на определенном непонимании принципа общей ковариантности, сохранял, по всей вероятности, свою силу. К тому же, с весны 1914 г. [157, с. 40] Эйнштейну казалось, что он нашел способ выделения «приспособленных» систем отсчета, так как соответствующие найденному ограничению уравнения поля получались не слишком сложными и при отождествлении производных потенциала по пространственно-временным координатам с напряженностями поля выглядели вполне правдоподобными [258, 259].

Причины возврата к общей ковариантности. Однако более детальный анализ этих уравнений и «приспособленных» преобразований привел Эйнштейна, по-видимому, к существенным затруднениям, и работа приостановилась. Следующие публикации его по теории тяготения появляются только осенью 1915 г. В работе, доложенной на заседании Прусской Академии наук 4 ноября [266], Эйнштейн возвращается к требованию общей ковариантности уравнений поля и к уравнениям (76), от которых он вместе с Гроссманом отказался еще в 1913 г. Этот возврат он объясняет тремя причинами физического характера. Во-первых, оказалось, что «приспособленные» преобразования, вопреки первоначальным ожиданиям, сводятся к линейным и, тем самым, не содержат «ускоренных» преобразований, вступая в противоречие с принципом эквивалентности. Во-вторых, эти преобразования, как выяснилось, не определяют уравнения поля однозначно и, в-третьих, остается неясным физический смысл условия «приспособленности». Таким образом, необщековариантный подход к уравнениям поля не оправдался, и Эйнштейн, как он пишет, «вернулся к требованию более общей ковариантности уравнений поля, от которой я отказался с тяжелым сердцем, когда работал вместе с... Гроссманом» [263, с. 425].

Аргументы же, которые он выдвигал до этого против общей ковариантности уравнений поля и которые были связаны с принципами соответствия и сохранения энергии-импульса, как мы видели, были преодолены уже раньше. Третий аргумент, основанный на ошибочном понимании принципа причинности, был преодолен, вероятно, незадолго до начала ноября, хотя явных свидетельств этого мы не находим в указанной работе.

В статье же, доложенной ровно через две недели после этого, т. е. 18 ноября, Эйнштейн не оставляет сомнений в вопросе о причинности: «...Таковыми преобразованиями (отвечающими общей ковариантности, ограниченной, впрочем, условием унимодулярности $\sqrt{-g}=1$, где g — определитель $g_{\alpha\beta}$. — В. В.) все ...реше-

прия можно перевести друг в друга, и... следовательно (при заданных граничных условиях) они отличаются друг от друга лишь формально, а не физически» [265, с. 440].

В знаменитом письме к Зоммерфельду от 28 ноября 1915 г. [76, с. 192] Эйнштейн называет еще два обстоятельства, которые способствовали отказу от нековариантных попыток и возврату к общековариантному подходу.

Первое обстоятельство — это выяснение того, что отождествление производных гравитационного потенциала по координатам (точнее величин $\frac{1}{2} \sum_{\mu} g^{\mu\sigma} \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x_{\sigma}}$) с напряженностями поля

ошибочно и что существует возможность более естественного выбора величин, представляющих гравитационное поле, а именно полных глубокого геометрического смысла символов Кристоффеля $\Gamma_{\mu\nu}^{\alpha}$. Именно эти величины фигурируют как важные геометрические характеристики риманова пространства, определяя, в частности, закон параллельного перенесения вектора и уравнения геодезических (кратчайших) линий, совпадающих с уравнениями движения точечных частиц в поле тяготения. Имея в виду общековариантное решение проблемы уравнений, Эйнштейн подчеркивает: «Ключ к этому решению дало осознание того факта, что не $\sum_{\alpha} g^{i\alpha} \frac{\partial g_{\alpha i}}{\partial x_m}$ является естественным выражением «компонент» гравитационного поля, а родственный символ Кристоффеля $\left\{ \begin{smallmatrix} im \\ l \end{smallmatrix} \right\}$.

Если это понять, то вышеприведенное уравнение (речь идет о полных уравнениях ОТО, но это в полной мере относится и к уравнению (76).—В. В.) легко себе представить, поскольку не возникает искушение ради более общей интерпретации преобразовывать их путем вычисления символов» [76, с. 193]. Действительно, общековариантные уравнения поля, записанные в терминах Γ_{im}^l (правда, с условием $\sqrt{-g}=1$), представлялись в наглядной форме:

$$\sum_{\alpha} \frac{\partial \Gamma_{uv}^{\alpha}}{\partial x_{\alpha}} + \sum_{\alpha\beta} \Gamma_{\mu\nu}^{\alpha} \Gamma_{\nu\alpha}^{\beta} = -\kappa T_{\mu\nu}. \quad (77)$$

Еще более наглядно и вполне в духе аналогии с теорией электромагнитного поля выражался лагранжиан, соответствующий этим уравнениям

$$L = \sum_{\sigma\alpha\beta} g^{\sigma\tau} \Gamma_{\sigma\beta}^{\alpha} \Gamma_{\tau\alpha}^{\beta}. \quad (78)$$

Второе обстоятельство, не упоминающееся явно в первой ноябрьской статье, подчеркивается в письме с особой силой. Речь идет о том, что нековариантные, «приспособленные» уравнения для движения перигелия Меркурия давали 18" за столетие вместо требуемых 45" [76, с. 192].

В статье [265] Эйнштейн впервые получает эти 45", решив приближенно задачу о движении материальной точки в гравитационном поле другой точечной массы. В конце письма к Зоммерфельду он пишет: «Самое замечательное, что я пережил, заключается в том, что не только удалось получить теорию Ньютона как первое приближение, но и движение перигелия Меркурия (43" в столетие) как второе приближение» [76, с. 194]. Таким образом, аргументы, связанные с экспериментальными аспектами проверки теории, были для Эйнштейна, вопреки распространенному мнению, очень важными, что еще раз свидетельствует о глубоко физическом подходе Эйнштейна к проблеме тяготения [28, 34].

Эйнштейн не считал условие унимодулярности, при котором выполнялись уравнения (76), серьезным ограничением допустимых преобразований. В конце первой ноябрьской статьи он специально показывает, что вращения и произвольное ускоренное движение входят в число допустимых движений системы отсчета. Он показал также, что при некоторой естественной нормировке системы координат, например посредством условия

$$\sum_{\beta} \frac{\partial g^{\alpha\beta}}{\partial x_{\beta}} = 0 \quad (\alpha = 1, 2, 3, 4),$$

легко получается ньютоновское приближение. Это дает основание считать, что Эйнштейн уже на этом этапе понял ошибочность своего аргумента против общей ковариантности полеских уравнений, связанного с принципом причинности.

Предположение об «электромагнитно-подобной» структуре материи. Мы несколько забежали вперед, упомянув о блестящих результатах статьи, доложенной Эйнштейном 18 ноября, прежде всего о вычислении аномальной прецессии перигелия Меркурия, которое было основано на уравнениях для случая пустого пространства

$$R_{ik} = 0 \quad (i, k = 1, 2, 3, 4). \quad (79)$$

Уже в первой ноябрьской статье, рассматривая вопрос о согласовании уравнений (76) с законом сохранения энергии-импульса, Эйнштейн приходит к парадоксальному, некоторым образом, выводу о том, «что невозможно выбрать систему координат так, чтобы величина $\sqrt{-g}$ всюду стала равной 1» [263, с. 433]. В противном случае это означало бы, что след тензора энергии-импульса «материи» равен нулю, а в общем случае это неверно. Поэтому, несмотря на то что требование общей ковариантности вывело Эйнштейна на правильный путь, оказалось, что само это требование в теории строго не выполняется.

Этого противоречия не было бы, если бы вся «материя» была «бесследовой», то есть если бы отсутствовали частицы, обладающие массой покоя. В то время был известен единственный тип такого рода «материи» — «чистое» электромагнитное поле. По-

этому в следующей работе, должной 11 ноября [264], Эйнштейн попытался устранить внутреннее противоречие новой теории, предположив, что «условие $\sum_{\mu} T_{\mu}^{\mu} = 0$ («бесследовости» материи.— В. В.) действительно выполняется всегда» [264, с. 436]. Физический смысл этого предположения, по Эйнштейну, заключался в электромагнитной структуре «материи». Наличие же частиц, обладающих массой покоя, и, тем самым, наличие наблюдаемого следа от нуля связаны с тем, что само гравитационное поле и его энергия-импульс t_{μ}^{ν} вносят свой вклад в структуру наблюдаемой «материи» и что $\sum_{\mu} T_{\mu}^{\mu}$ без учета гравитации обра- щается в нуль, а $\sum_{\mu} (T_{\mu}^{\mu} + t_{\mu}^{\mu}) \neq 0$. Таким образом, заключал

Эйнштейн, «тот, кто не отклоняет заранее гипотезу, что молекулярные гравитационные поля являются существенной составной частью материи, обнаружит здесь сильную поддержку своему убеждению» [там же]. Итак, стремясь к логической стройности теории, Эйнштейн прибегнул к приему, не характерному для него,— выдвигению весьма искусственных гипотез модельного характера. Кстати говоря, эта идея о чисто полевой природе материи согласуется с идеями единой нелинейной электродинамики Г. Ми, разработанной им в 1912—1913 гг., хотя Эйнштейн и не использует явно эту теорию. Заметим, что ход мысли, который привел Эйнштейна к «электромагнитной» гипотезе, имел глубокие корни в его более ранних фундаментальных замыслах, связанных с первичностью поля и построением единой электромагнитно-полевой теории квантов и частиц (1908—1910 гг.). И все-таки более важным для Эйнштейна на этом этапе было то, что ценой этой гипотезы достигалась общая ковариантность (и тем самым, общая относительность, как думал Эйнштейн), в которой теперь уже он не сомневался.

Вследствие общей ковариантности условия «бесследовости» $T = 0$ оказалось возможным ввести полностью общековариантные уравнения гравитационного поля в форме

$$G_{ik} = -\kappa T_{ik}, \quad (76')$$

а условие унимодулярности использовать лишь для упрощения вычислений.

Решение проблемы. Следующую неделю Эйнштейн готовил доклад об экспериментальных подтверждениях теории (объяснение аномалии Меркурия и предсказание гравитационного отклонения света) [265]. Здесь он имел дело с уравнением (79), не содержащим тензора энергии-импульса «материи», и поэтому вопросы, обсуждавшиеся в предыдущей работе, пока его не волновали. Впрочем, он еще упоминает о гипотезе «бесследовости», но тут же в статье содержится знаменательное примечание: «В работе, которая вскоре будет опубликована, показано, что и эта гипотеза («электромагнитная» гипотеза.— В. В.) является

излишней» [265, с. 439]. И дальше добавляет: «Существенно лишь то, что возможен такой выбор системы отсчета, при котором определитель $|g_{\mu\nu}|$ принимает значение -1 . Следующее ниже исследование не зависит и от этого» [там же]. Не вполне ясно, когда именно Эйнштейн отказался от гипотезы «бесследовости» и сделал решающий шаг от уравнений (76) к уравнениям

$$R_{ik} - \frac{1}{2}g_{ik}R = -\kappa T_{ik}. \quad (80)$$

Во всяком случае об этом он пишет в примечании, а не в дополнении при корректуре. Ясно только, что упомянутый отказ и связанный с ним переход к уравнениям (80) свершился в промежутке между 11 и 25 ноября, но вполне возможно, что даже до 18 ноября. Однако более важным Эйнштейн считал вычисление наблюдаемых эффектов, которое к тому же не зависело от того, какие уравнения: (76) или (80) — в действительности верны, и от того, верна ли гипотеза «бесследовости». И только после этого он смог вернуться к общей форме уравнений и «электромагнитной» гипотезе, отказ от которой анонсирован в работе, доложенной 18 ноября. Сами же уравнения поля, на этот раз общековариантные без предположения о «бесследовости» T_{ik} и приобретшие форму (80), были доложены им на заседании Прусской академии наук в Берлине 25 ноября [266].

«За последнее время я пришел к убеждению, что можно обойтись без предположений о тензоре энергии материи (т. е. о его «бесследовости». — В. В.), если ввести его в уравнения поля несколько иным путем, чем это сделано в обеих моих недавних заметках» [266, с. 448]. И Эйнштейн далее постулирует уравнения гравитации в форме:

$$G_{im} = -\kappa (T_{im} - \frac{1}{2}g_{im}T), \quad (81)$$

где $T = \sum_{\sigma} T_{\sigma}^{\sigma}$ — след тензора материи, а G_{im} — тензор Риччи;

Эйнштейн использует, как и раньше, его разложение на сумму:

$$G_{im} = R_{im} + S_{im}, \quad (82)$$

каждое из слагаемых которой для общековариантных преобразований, ограниченных условием унимодулярности, оказывается тензором (причем S_{im} обращается в нуль). При этом уравнения (81) упрощаются и приобретают вид, аналогичный уравнениям (76), только с правой частью, фигурирующей в уравнениях (81):

$$\sum_l \frac{\partial \Gamma_{lm}^l}{\partial x_l} + \sum_{\rho l} \Gamma_{lp}^l \Gamma_{ml}^{\rho} = -\kappa \left(T_{im} - \frac{1}{2} g_{im} T \right). \quad (83)$$

В оставшейся части этой последней ноябрьской статьи Эйнштейн показывает, что модифицированные уравнения (81) и (83) допускают принятие условия $\sqrt{-g} = 1$ без искусственного предположения о «бесследовости» материи; а также, что они естествен-

ным образом согласуются с дифференциальной формулировкой закона сохранения энергии-импульса материи в гравитационном поле. Посредством несложных преобразований уравнений (83) Эйнштейн получает соотношение:

$$\sum_{\alpha\beta} \frac{\partial^2 g^{\alpha\beta}}{\partial x_\alpha \partial x_\beta} - \kappa(T + t) = 0, \quad (84)$$

где $t = \sum_{\sigma} t_{\sigma}^{\sigma}$,

$$t_{\sigma}^{\lambda} = \frac{1}{\kappa} \left(\frac{1}{2} \delta_{\sigma}^{\lambda} \sum_{\mu\nu\alpha\beta} g^{\mu\nu} \Gamma_{\nu\alpha}^{\alpha} \Gamma_{\mu\beta}^{\beta} - \sum_{\mu\nu\alpha} g^{\mu\nu} \Gamma_{\mu\sigma}^{\alpha} \Gamma_{\nu\alpha}^{\lambda} \right) \quad \text{— «тензор» энер-$$

гии-импульса (в действительности, являющийся тензором только относительно линейных преобразований) гравитационного поля. В это соотношение «тензоры энергии гравитационного поля и материи входят... одинаковым образом, чего нет в уравнении (21) упомянутой работы (первой ноябрьской статьи.— В. В.)» [266, с. 451]. Заметим, что уравнение (21) (в нумерации Эйнштейна.— В. В.)

$$\sum_{\alpha\beta} \frac{\partial^2 g^{\alpha\beta}}{\partial x_\alpha \partial x_\beta} - \sum_{\alpha\beta\sigma\tau} g^{\sigma\tau} \Gamma_{\sigma\beta}^{\alpha} \Gamma_{\tau\alpha}^{\beta} + \sum_{\alpha\beta} \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left(g^{\alpha\beta} \frac{\partial \sqrt{-g}}{\partial x_\beta} \right) = -\kappa \Sigma T_{\sigma\sigma} \quad (85)$$

— аналог уравнения (84), но, полученное на основе уравнения (76) без введения $1/2 g_{im} T$, оно не может быть приведено к такому виду, чтобы энергия-импульс поля тяготения и «материи» входили бы в него одинаковым образом*. Последнее оказывается возможным лишь при искусственном предположении о «бесследовости» тензора энергии «материи». Таким образом, введение $1/2 g_{im} T$ в правую часть полевых уравнений устраняет противоречие, на которое натолкнулся Эйнштейн в первой своей ноябрьской работе и которого сперва пытался избежать с помощью рискованного предположения об электромагнитной структуре «материи» во второй работе. Правда, обоснование, которое дал Эйнштейн уравнению (81) в своей последней ноябрьской работе, не является достаточно строгим. Но оно носит четко выраженный физический характер: энергия-импульс поля тяготения имеет ту же самую природу, что и энергия-импульс «материи», а потому они должны одинаково фигурировать в законе сохра-

* А именно, оно приводится к виду, аналогичному соотношению (84), но содержащему T и t в соответствующем члене с противоположными знаками

$$\partial^2 g^{ik} / \partial x_i \partial x_k + \kappa(T - t) = 0 \quad (84')$$

Действительно, это непосредственно видно из того, что если вместо T в уравнениях (76) взять эйнштейновское выражение $T_{ik} - 1/2 g_{ik} T$, то T в уравнениях (84') перейдет в $-T$, и оба скаляра T и t войдут в уравнение с одинаковыми знаками. (Этим замечанием автор обязан Я. А. Смородинскому.)

нения энергии-импульса и в соответствующем образом преобразованных уравнениях гравитации.

В следующей большой статье, законченной в марте 1916 г. и содержащей впервые последовательное и развернутое изложение основ ОТО [269] аргументация в пользу уравнений (81) носит более ясный и наглядный характер и поэтому более убедительна. Сначала, опираясь в основном на соображения общей ковариантности, Эйнштейн формулирует уравнения гравитации для «пустого» пространства (79). Затем получает их же на основе вариационного принципа с лагранжианом: $L = g^{\mu\nu} \Gamma_{\mu\beta}^{\alpha} \Gamma_{\nu\alpha}^{\beta}$ (при условии $\sqrt{-g}=1$) и преобразует их к такой форме, в которой выделены величины, характеризующие энергию-импульс гравитации («компоненты энергии» гравитационного поля):

$$(\partial/\partial x_{\alpha})(g^{\sigma\beta} \Gamma_{\mu\beta}^{\alpha}) = -\kappa(t_{\mu}^{\sigma} - 1/2 \delta_{\mu}^{\sigma} t). \quad (86)$$

Учет же «материи» должен далее выразиться в добавлении тензора энергии-импульса «материи» и его следа в правой части уравнений (86) к соответствующим величинам для поля тяготения, т. е.

$$(\partial/\partial x_{\alpha})(g^{\sigma\beta} \Gamma_{\nu\alpha}^{\beta}) = -\kappa[(t_{\mu}^{\sigma} + T_{\mu}^{\sigma}) - 1/2 \delta_{\mu}^{\sigma} (t + T)]. \quad (87)$$

Несложные преобразования приводят эти уравнения к уравнению (81)*. В заключении этого вывода Эйнштейн замечает: «Нужно признать, что указанное введение тензора энергии материи не может быть обосновано одним только постулатом относительности; поэтому выше мы исходили из требования, что энергия гравитационного поля должна действовать в смысле тяготения точно так же, как всякая энергия другого рода» [269, с. 490]. Наконец, Эйнштейн показывает, что уравнения (81) согласуются естественным образом с законом сохранения энергии-импульса, добавляя, что это обстоятельство и является «самым сильным аргументом в пользу указанных уравнений» [там же].

Возвращаясь к последней ноябрьской работе Эйнштейна, подчеркнем, что ее публикацией фактически было закончено построение основ ОТО. Эйнштейн это отчетливо понимал, он также понимал, что построенная им теория — это только теория тяготения, и полностью отказался от всех иллюзий, связанных с ее интерполяцией на физику микромира или на физику в целом: «Тем самым, наконец, завершено построение общей теории относительности как логической схемы. Постулат относительности в его наиболее общей форме, которая лишает пространственно-временные координаты физического смысла, приводит с железной необходимостью к вполне определенной теории тяготения, объясняющей движение перигелия Меркурия.

* Наиболее распространенной аргументацией для введения в полевые уравнения гравитации « $1/2$ -члена» является требование обращения в нуль ковариантной производной T_{ik} , поскольку в соответствии со свернутыми тождествами Бьянки выражение $G_{ik} - 1/2 g_{ik} G$ является простейшей комбинацией требуемого вида.

Вместе с тем общая теория относительности не может нам дать о сущности остальных явлений природы ничего, что не было бы уже известно в специальной теории относительности. Мое мнение, высказанное недавно в этой связи, было в этом отношении ошибочным (речь идет об «электромагнитной» гипотезе о структуре «материи». — В. В.). Каждую физическую теорию, совместимую с частной теорией относительности, можно при помощи абсолютного дифференциального исчисления включить в схему общей теории относительности, причем последняя не дает какого-либо критерия допустимости физической теории» [266, с. 451].

Итак, путь Эйнштейна к общековариантным уравнениям гравитации, венчающим грандиозное здание ОТО, был непрямолинесен, драматичен. Гениальные прозрения чередовались с заблуждениями, мощные броски вперед с топтанием на месте и даже отступлениями или уходами на сомнительные тропинки, ведущие в тупики. Но и то, и другое, и третье было связано с характерными чертами творческого мышления Эйнштейна: его стремлением к глубокому физическому осмыслению формально-математических структур и операций, не имеющих аналога в классической физике; его приверженностью к фундаментальным принципам физического знания (к таким, как принципы причинности, соответствия, симметрии, сохранения, простоты и т. д.); ясным пониманием необходимости согласования теории с экспериментом как в ее основаниях, так и во всех ее конкретных следствиях, допускающих эмпирическую проверку.

В уже цитированном письме Зоммерфельду [76, с. 193] Эйнштейн пишет, что «последние ошибки в этой борьбе (за общую ковариантность уравнений поля. — В. В.) он, к сожалению, увековечил в академической работе», т. е. в первых двух ноябрьских работах, опубликованных в «Отчетах заседаний Прусской академии наук». Но историки науки будут всегда благодарны Эйнштейну за публикацию этих работ, потому что ошибки, сомнения и заблуждения первооткрывателей позволяют заглянуть в их творческую лабораторию и глубже понять механизмы построения научных теорий.

Научная традиция, к которой, по-видимому, следует отнести творчество Эйнштейна, — это традиция теоретико-физическая, связанная с именами Больцмана, Лоренца, Планка [503, 504, 506]. Само возникновение теоретической физики как важной и самостоятельной области физического знания и деятельности связано как раз с названными именами и относится к последней четверти XIX в. Предпосылки для этого были созданы предыдущим поколением физиков, которые не делали еще резкого различия между математической физикой, механикой, экспериментальной физикой и теоретической физикой (Фурье, Ампер, Ф. Нейман, В. Томсон, Гельмгольц, Кирхгоф и др.).

Характерными чертами теоретиков, принадлежащих к этой традиции, были: стремление к синтезу физического знания на

основе фундаментальных принципов типа принципов сохранения энергии-импульса, причинности, близкодействия и т. д. и разработка новых принципов такого рода; конструктивно-интерпретационный и операционально-измерительный подход к формально-математическим аспектам физических теорий; повышенное внимание к экспериментально-эмпирической стороне физических проблем. Хотя Эйнштейн, как известно, не принадлежал к какой-либо определенной школе теоретической физики, именно Планка и Лоренца он считал как бы заочными своими учителями и сказал о них немало добрых слов [262; 230, с. 95; с. 109, 296].

4. Гильберт и проблема общековариантных уравнений гравитации

В сущности, физика чересчур трудна
для физиков.

Д. Гильберт

Когда, вступая в мир огромный,
Единства тщетно ищешь ты...

*А. Блок. «Когда, вступая в мир огромный...»
(1909)*

Гильберт и физика

Фундаментальный вклад в разработку основ ОТО внес выдающийся геттингенский математик Д. Гильберт. Важнейший результат его исследований — это (независимый от последних работ Эйнштейна) вывод общековариантных уравнений гравитационного поля*. Гильберт был одним из крупнейших математиков с 90-х годов прошлого века до 30-х годов XX в. Приведем высказывания двух других замечательных математиков XX в. Р. Куранта и Г. Вейля, учеников Гильберта, о своем учителе.

Курант: «Давид Гильберт — один из действительно великих математиков своего времени. Его труды и вдохновенный творческий облик глубоко повлияли на развитие математических наук вплоть до наших дней. Его пронизательность, творческая сила, неповторимая оригинальность его математического мышления, многосторонность и широта его интересов сделали его пионером во многих областях математики. Он был уникальной личностью, глубоко погруженной в свое дело и полностью посвятившей себя науке, учителем и науч-

* Уже после того, как настоящая работа поступила в издательство, автору стала известна статья Дж. Ирмэпа и К. Глимора [343], в которой освещается переписка между Эйнштейном и Гильбертом в ноябре 1915 г. Эта переписка проливает новый свет на историю открытия общековариантных уравнений гравитации (см. Приложение).

ным лидером высшего порядка, щедрым, неутомимым и настойчивым во всех своих усилиях» [511, с. V].

Вейль: «Нам кажется, что та эпоха в математике, на которую легла печать его [Гильберта] духа и которая теперь скрылась за горизонтом, достигла более совершенного баланса между решением единичных конкретных задач и созданием общих абстрактных понятий, чем до и после Гильберта. Его собственный вклад в это счастливое равновесие был весьма значителен, и направление, в котором мы до сих пор продолжаем двигаться, во многих своих пунктах восходит к импульсам, полученным нами от Гильберта. В нашем поколении не было математиков равного ему ранга» [567, с. 612].

Вейль выделяет шесть периодов в его творчестве: 1. теория алгебраических инвариантов (1885—1893 гг.); 2. теория алгебраических числовых полей (1893—1898 гг.); 3. основания геометрии (1898—1902 гг.); 4. интегральные уравнения (1902—1912 гг.); 5. физика (1910—1922 гг.); 6. основания математики в целом (1922—1930 гг.) [19, 567].

Гильбертовская проблема аксиоматизации физики. Вклад Гильберта в физику не столь значителен, как в математику, но и не так уж мал. Отличительными особенностями физических работ Гильберта были: во-первых, стремление к аксиоматизации и анализ оснований физики и, во-вторых, введение в физику новых (прежде всего, разработанных им самим) математических методов и структур; главным образом, это касалось теории интегральных уравнений. Задолго до своих вполне конкретных занятий физикой (кинетическая теория газов, теория излучения, общая теория относительности и т. д.) он выдвинул, как важную научную задачу, проблему аксиоматизации физики. Это он сделал в своем знаменитом докладе «Математические проблемы» на II Международном конгрессе математиков в Париже (август 1900 г.). Из 23 фундаментальных проблем, выдвинутых Гильбертом, одна, шестая проблема касается непосредственно физики, она заключается в «аксиоматическом построении по этому же образцу (по образцу исследований оснований геометрии.— В. В.) тех физических дисциплин, в которых уже теперь математика играет выдающуюся роль» [46, с. 34]. Гильберт имел в виду главным образом механику и тесно связанную с теорией вероятностей (которую также предстояло аксиоматизировать) кинетическую теорию газов и статистическую механику. Но уже тогда он предвосхитил подход к основаниям физики, который открылся после теории относительности и затем приобрел в физике XX в. определяющее значение, а именно, теоретико-инвариантный (или, что то же самое, теоретико-групповой, геометрический, «эрлангенский») подход. «Для того, чтобы построение физических аксиом провести по образцу аксиом геометрии, следует попробовать сначала небольшим количеством аксиом охватить возможно более общий класс физических явлений, а затем присоединением каждой следующей аксиомы прийти к более специальным теориям, а тогда, возможно, возникнет принцип классификации, ко-

торый сможет использовать глубокую теорию бесконечных групп преобразований Ли» [46, с. 35].

Следующий шаг на пути Гильберта — это геттингенский семинар по электродинамике движущихся сред, который начал работу в значительном для физики 1905 г. и которым руководили два «чистых» (в ту пору) математика — Гильберт и Минковский*. Как вспоминает М. Борн, бывший тогда студентом третьего курса, «имя Эйнштейна упомянуто не было. Дискуссии ограничивались только попытками объяснить опыт Майкельсона и Морлея, а идея относительности обсуждалась в той форме, как она была развита Г. А. Лоренцом и Анри Пуанкаре. Я вспоминаю, что Минковский попутно намекал на то, что он занимается преобразованиями Лоренца и уже напал на след новых взаимосвязей» [10, с. 404]. В конечном счете это привело Минковского, большого друга Гильберта, правда, уже после открытия Эйнштейном специальной теории относительности и на ее основе, к знаменитой концепции четырехмерного пространства — времени, явившейся важнейшим этапом на пути геометризации физики и сыгравшей впоследствии огромную роль в генезисе ОТО. Гильберт же в это время «набрасывал свою теорию интегральных уравнений и квадратичных форм от бесконечно многих переменных и излагал в своих курсах теорию, которой позднее суждено было сыграть очень большую роль в физике, особенно в квантовой механике» [10, с. 399].

Первый раздел физики, которым серьезно занялся он, была кинетическая теория газов (1910—1912 гг.), и интерес к этой области был связан не только с желанием применить созданную им теорию интегральных уравнений, но и с аксиоматическими замыслами, восходящими к 1900 г. «Физика чересчур трудна для физиков» [511, с. 127], — эти легендарные слова Гильберта означали, что физика не только превратилась к началу XX века в сильно математизированную область точного естествознания, но и то, что в связи с новейшими открытиями основы ее оказались под угрозой и в системе физических теорий возникла определенная неразбериха. Великолепный опыт Минковского убедительно продемонстрировал плодотворность вмешательства математиков в работу физиков. Четырехмерная теоретико-инвариантная концепция СТО, до некоторой степени предвосхищенная Пуанкаре, и последовавшая за ней работа Клейна, патриарха Геттингенской школы математики и друга Гильберта, о введении идей его «Эрлангенской программы» в физику являются реализацией гильбертовской программы аксиоматизации на основе «глубокой теории бесконечных групп преобразований». После работ Минковского и Клейна основы теоретической физики приобрели значительно большую ясность, стали более упорядоченными, но, что еще важнее, геометризация и «эрлангенизация» СТО и классической механики оказались началом мощного движения в тео-

* Этому семинару посвящена специальная работа Л. Р. Пайнсона [510].

ретической физике, связанного с теоретико-инвариантной концепцией. Но, конечно, работы Минковского и Клейна закладывали лишь базу для аксиоматизации, но сами не решали аксиоматические проблемы. Один из учеников Гильберта, который в это время слушал его лекции по теоретической физике, вспоминал: «Мы, математики, ощущали в лекциях по теоретической физике определенный дискомфорт, когда перед нами выдвигались без доказательства различные принципы, из которых извлекались всевозможные утверждения и выводы. Мы чувствовали настоятельную необходимость в исследовании совместимости этих различных принципов друг с другом и взаимоотношений между ними» [511, с. 127].

Кинетическая теория газов и теория излучения. Первым аксиоматическим опытом Гильберта в физике стала переформулировка кинетической теории газов на основе теории интегральных уравнений. Не следует думать, что это была лишь упорядочивающая работа, не содержащая новых результатов. Методы и теория, развитые Гильбертом, впоследствии нашли эффективное применение в инженерной физике. Известный специалист в области аэродинамики и прикладной математики (тоже геттингенец) фон Карман вспоминал впоследствии: «Интересно заметить, что эта работа (по кинетической теории газов.— В. В.) 60-летней давности, когда космический полет относился лишь к области научной фантастики, в настоящее время основа большинства наших инженерных расчетов поведения искусственных спутников» [511, с. 127]*.

В 1912 г., когда Эйнштейн уже напряженно работал над проблемой тяготения и вплотную подошел к основным идеям ОТО, Гильберт переходит к теории излучения, к которой оказались применимыми методы его теории интегральных уравнений. С весны того же года у него появляются ассистенты — физики, сначала П. Эвальд, затем А. Ланде, впоследствии весьма видные ученые. Эвальд вспоминал, что Гильберт очень серьезно относился к физике и считал, что математика и аксиоматический подход способны вывести ее из состояния кризиса. По словам Эвальда, научная программа Гильберта в этот период заключалась в следующем: «Мы преобразовали математику, следующая задача — преобразовать физику, а затем мы перейдем к химии» [511, с. 129].

Электромагнитно-полевая программа и теория Ми. В 1913 г., после завершения работы по элементарной теории излучения,

* Заметим, что Д. Энског, внесший фундаментальный вклад в современную кинетическую теорию неоднородных газов, использовал идеи и методы, развитые Гильбертом. Мехра, изучавший этот вопрос, сопоставил лекции Гильберта по кинетической теории газов, которые он читал в 1912—1913 гг., с диссертацией Энскога (1917), не содержащей ссылок на Гильберта, и пришел к выводу, что между ними существует даже формальная аналогия. Уже после этого он нашел Энскога в списках тех, кто слушал в 1912—1913 гг. курс лекций Гильберта по кинетической теории газов [458, 459].

интересы Гильберта все больше смещаются в сторону проблем электронной теории и структуры атома. В Геттингене начинает бывать Н. Бор и П. Дебай. С начала лета 1914 г. Дебай по просьбе Гильберта организует семинар по структуре материи. Как вспоминал Дебай, Гильберт в это время начинает интересоваться проблемой построения единой теории поля, способной объяснить существование частиц и структуру материи. При этом он считал, что уравнений Максвелла не достаточно для решения этой проблемы и требуется их модификация. По-видимому, интерес к этой глобальной проблеме был сильно стимулирован замечательными работами Г. Ми по нелинейной электродинамике, которая, к тому же имела до некоторой степени аксиоматический характер. Ми работал в это время в Грейфсвальде. Теория Ми сейчас хорошо известна, она детально обсуждается в цитированных выше книгах Паули [155, с. 272] и Вейля [564, с. 210] и нет надобности рассматривать ее здесь подробно. Основной замысел Ми заключался в таком обобщении уравнений Максвелла, чтобы они смогли описать структуру частиц (прежде всего, электрона). С физической точки зрения, это обобщение сводилось к появлению сил притяжения на малых расстояниях (т. е. внутри частиц), способных уравновесить обычные кулоновские силы отталкивания. Привлекательной стороной теории Ми был ее строгий формально-аксиоматический характер. Ми исходил из вариационного принципа:

$$\delta \int L d\Sigma = 0, \quad (88)$$

а лагранжиан, который он называл «мировой функцией», конструировал на основе СТО, т. е. из релятивистских инвариантов напряженностей поля F_{ik} и потенциала ϕ . Включение в лагранжиан членов, явно зависящих от потенциала, приводило к нелинейности полевых уравнений, что позволяло интерпретировать заряженные частицы как своеобразные сгустки поля или «сингулярности эфира» и вычислять их массы и заряды на основе чисто полевых величин. Конечно, теория Ми встретила сразу же с серьезными трудностями, связанными прежде всего с явной зависимостью лагранжиана и решений от потенциала, а также с отсутствием критериев для однозначного выбора лагранжиана. Но как программа объединения и аксиоматизации фундаментальной физики она, безусловно, была весьма заманчива.

Не следует забывать также, что электромагнитная концепция физики, возникшая на рубеже веков, имела глубокие корни в Геттингене, восходящие к Гауссу, Риману и особенно Веберу, а во времена Гильберта ее активными приверженцами и даже лидерами были геттингенцы М. Абрагам, Э. Вихерт, В. Кауфман, Г. Герглотц, В. Ритц, Г. Нордстрем, К. Шварцшильд и даже Г. Минковский или воспитанники Геттингена такие как П. Друде и А. Зоммерфельд [398, 455, 504]*.

* О традициях и достижениях геттингенской физики см. [180, 409, 503—510].

«Основания физики» Гильберта

В это время уже были опубликованы статьи Эйнштейна вместе с Гроссманом (1913—1914 гг.), в которых был заложен фундамент ОТО, но еще не была решена проблема уравнений гравитации. По-видимому, не позднее лета 1915 г. Гильберт приступил к изучению этих работ и в объединении программ Эйнштейна и Ми увидел возможность глубокого синтеза физики и ее аксиоматизации.

И вот наступает ноябрь 1915 г.: Эйнштейн, наконец, выходит на финишную прямую и осуществляет свой решающий «прорыв» на пути к полному завершению основ ОТО. В статье, доложенной на заседании Прусской Академии наук в Берлине 18 ноября, он исследует общековариантные уравнения гравитации для «пустого» пространства (79), объясняет на их основе аномальное движение перигелия Меркурия, предсказывает гравитационное отклонение света (в 2 раза большее, чем первоначально полученное на основе лишь принципа эквивалентности) и анонсирует отказ от гипотезы об электромагнитной структуре «материи», которая позволяла ему согласовать не вполне корректные уравнения поля с принципом общей ковариантности. Этот отказ означал, что Эйнштейн уже видел возможность такого согласования без использования «электромагнитной» гипотезы на основе той модификации уравнений гравитации, которая была явно осуществлена им в работе, доложенной 25 ноября.

За 5 дней до этого, т. е. 20 ноября, Гильберт выступает на заседании Геттингенского королевского научного общества с докладом «Основания физики» [45], в котором он совершенно иным путем и в другом контексте получает общековариантные уравнения гравитационного поля, фактически эквивалентные эйнштейновским уравнениям (81). Эйнштейн, начиная с середины 1913 г. опубликовал (один и совместно с Гроссманом и Фоккером) около 15 работ, в которых отражен его сложный путь к вершине ОТО — общековариантным уравнениям гравитационного поля. Гильберт же нашел эти уравнения в первой своей работе, связанной с рассматриваемым кругом проблем.

Чтобы уяснить особенности гильбертовского пути, мы должны несколько более подробно рассмотреть его работу. Само название говорит об аксиоматической направленности ее (вспомним гильбертовские «Основания геометрии»). Причем, речь идет не об аксиоматизации какой-то одной сравнительно узкой области физики, подобно тому, как за несколько лет до этого Гильберт аксиоматизировал кинетическую теорию газов или элементарную теорию излучения, а об основаниях физики вообще. Одновременно с аксиоматизацией им решается также задача построения единой физической теории, да иначе и не возможно, если аксиоматизируется физика в целом. На какой же основе достигается этот синтез? На основе, как говорил впоследствии сам Гильберт, «полевого идеала единства», согласно которому

концепция поля является первичной, фундаментальной (вещество, частицы, с этой точки зрения,— лишь своеобразное проявление этого поля). Здесь узнаем мы замысел Г. Ми. Тем самым, выявляется электромагнитно-полевая направленность гильбертовского подхода. Другой же опорой теории Гильберта является как раз принцип общей ковариантности, понимаемый как максимально общее выражение принципа относительности. Это — ядро эйнштейновского подхода к проблеме гравитации. Используется и все то, что достигнуто было с 1913 г. до ноября 1915 г. в ОТО (или в теории Эйнштейна—Гроссмана): риманова структура пространства—времени и геометрическая концепция тяготения, связь тензора Риччи с уравнениями поля и т. д. Есть и третья опора — это аксиоматический метод, использующий вариационное исчисление, риманову геометрию и тензорный анализ и теорию бесконечных групп Ли, о значении которой для физики пророчески говорил Гильберт еще в 1900 г. Но дадим слово самому Гильберту.

«Грандиозные задачи, поставленные Эйнштейном, а также остроумно разработанные для их решения методы, его глубоко идущие мысли и образование оригинальных понятий, с помощью которых Ми строил свою электродинамику, открыли для исследований по основаниям физики новые пути.

Я хотел бы в последующем, следуя аксиоматическому методу и исходя по существу из двух аксиом, составить новую систему основных уравнений физики. Эти уравнения, обладая идеальным изяществом, содержат одновременно решение задач Эйнштейна и Ми», — так начинается статья Гильберта [45, с. 589].

Таким образом, Гильберт ставит задачу построения некоторой единой теории поля аксиоматическим методом. Заметим, правда, что в отличие от Эйнштейна, который также пытался найти такую теорию, однако, учитывающую квантовые свойства излучения (речь идет о попытках, не нашедших явного отражения в публикациях и относящихся к 1908—1910 гг.), Гильберт пока не принимает во внимание квантовые аспекты. Очевидно, он надеялся это сделать на следующем этапе в духе своей аксиоматической программы 1900 г.: «Для того, чтобы построение физических аксиом провести по образцу аксиом геометрии, следует попробовать сначала небольшим количеством аксиом охватить возможно более общий класс физических явлений, а затем присоединением каждой следующей аксиомы прийти к более специальным теориям» [46, с. 35]. Именно в результате присоединения новых, более специальных аксиом можно было надеяться впоследствии охватить и квантовые особенности излучения.

Гильберт далее задается «мировыми параметрами» или пространственно-временными координатами w_α , в которых описываются физические события, и четырнадцатью полевыми величинами, десять из которых — гравитационные тензорные потенциалы $g_{\mu\nu}$, уже фигурировавшие в теории Эйнштейна—Гроссмана, и четыре других — электродинамические потенциалы q_α . Пер-

вая аксиома, названная Гильбертом «аксиомой Ми о мировой функции», гласит:

«Закон физического события определяется мировой функцией H , которая зависит от следующих аргументов:

$$g_{\mu\nu}, g_{\mu\nu} = \partial g_{\mu\nu} / \partial \omega_l, g_{\mu\nu\lambda} = \partial^2 g_{\mu\nu} / \partial \omega_l \partial \omega_k, \quad (l, k = 1, 2, 3, 4)$$

$$q_s, q_{s1} = \partial q_s / \partial \omega_l.$$

Вариация интеграла

$$\int H \sqrt{g} d\omega, \text{ где } g = |g_{\mu\nu}|, d\omega = d\omega_1 d\omega_2 d\omega_3 d\omega_4,$$

должна быть равна нулю для любого из 14 потенциалов $g_{\mu\nu}, q_s$ [45, с. 589]. Эта аксиома определяет вариационную структуру основных уравнений теории. «...Введение и применение подобной мировой функции в принципе Гамильтона,— замечает Гильберт, объясняя, почему он назвал это положение «аксиомой Ми»,— характерны для электродинамики Ми» [45, с. 589].

Вторую аксиому Гильберт называет «аксиомой об общей инвариантности», но не связывает ее с именем Эйнштейна: «Мировая функция H инвариантна по отношению к любому преобразованию мировых параметров ω_s » [45, с. 590]. В примечании к этой аксиоме Гильберт, отдавая должное Эйнштейну, поясняет, почему он не называет ее аксиомой Эйнштейна: «В только что сформулированной аксиоме П основная мысль Эйнштейна об общей инвариантности находит свое простейшее выражение; впрочем, у Эйнштейна принцип Гамильтона играет только второстепенную роль, и его функции H никоим образом не являются общими инвариантами и не содержат электрических потенциалов» [там же].

Действительно, в работах 1913—1914 гг. Эйнштейн либо не использовал принцип Гамильтона для общековариантного действия, чтобы получить уравнения поля, либо использовал таковой, но для линейно- или ортогональноинвариантного действия. Последнее, в частности, имело место в большой работе 1914 г. «Формальные основы общей теории относительности» [258].

В первой ноябрьской работе Эйнштейна используется гравитационная часть лагранжиана

$$L = \sum_{\sigma\alpha\beta} g^{\sigma\tau} \Gamma_{\sigma\beta}^{\alpha} \Gamma_{\tau\alpha}^{\beta},$$

который приводит к общековариантным уравнениям поля (с точностью до условия унимодулярности $\sqrt{-g} = 1$).

На основе этих двух аксиом Гильберт строит свою единую теорию поля. Ядром всей теории является «теорема I», которую Гильберт только формулирует, но не доказывает:

«Если выражение I инвариантно по отношению к любым преобразованиям и содержит n величин и их производных и если из условия

$$\delta \int I \sqrt{g} d\omega = 0 \quad (89)$$

составить n лагранжевых вариационных уравнений для этих n величин, то в этой инвариантной системе n дифференциальных уравнений четыре всегда являются следствием ($n-4$) остальных, в том смысле, что всегда четыре не зависящие одна от другой линейные комбинации этих n дифференциальных уравнений и их полных производных тождественно удовлетворяются» [45, с. 590].

В этой теореме мы легко узнаем частный случай хорошо известной сейчас второй теоремы Нетер, доказанной через два с небольшим года Эмми Нетер*, дочерью известного немецкого математика М. Нетера. В последующее десятилетие Э. Нетер суждено было возглавить генеральное направление в алгебре, связанное с разработкой и интенсивным использованием понятий гомоморфизма, группы или кольца с операторами, идеала и т. д., т. е. всего того круга идей, который нашел отражение в знаменитой монографии ее ученика Ван дер Вардена «Современная алгебра» [16], первый том которой вышел в 1930 г. Учениками Э. Нетер и коллегами, испытавшими влияние ее работ, были многие видные математики XX в.: Ван дер Варден, Г. Вейль, Г. Хопф, Э. Артин, Г. Хассс, А. Альберт, В. Крулль, О. Шрейер, Р. Брауэр и др., а также советские ученые, такие как П. С. Александров, Л. С. Понтрягин, А. Н. Колмогоров, П. С. Урысон, О. Ю. Шмидт, А. Г. Курош и др.

В 1916 г. она приезжает в Геттинген из Эрлангена, чтобы работать у Гильберта. Гильберт же, увлеченный в это время своей единой теорией и ОТО, подключает ее к математической проблематике этих теорий, которая была связана с теорией дифференциальных инвариантов, римановой геометрией, бесконечными группами Ли. По-видимому, одной из конкретных задач, которые Гильберт поставил перед ней, было доказательство его «теоремы I», игравшей в теории Гильберта ключевую роль. Из вариационной аксиомы I, в соответствии с десятью гравитационными потенциалами $g^{\mu\nu}$, получаются десять дифференциальных уравнений Лагранжа—Эйлера

$$\frac{\partial \sqrt{g}H}{\partial g^{\mu\nu}} - \sum_k \frac{\partial}{\partial w_k} \frac{\partial \sqrt{g}H}{\partial g_k^{\mu\nu}} + \sum_{kl} \frac{\partial^2}{\partial w_k \partial w_l} \frac{\partial \sqrt{g}H}{\partial g_{kl}^{\mu\nu}} = 0, \quad (90)$$

а в соответствии с четырьмя электродинамическими потенциалами q_a —четыре уравнения:

$$\frac{\partial \sqrt{g}H}{\partial q_a} - \sum_k \frac{\partial}{\partial w_k} \frac{\partial \sqrt{g}H}{\partial q_{ak}} = 0. \quad (91)$$

Уравнения (90), обозначенные Гильбертом как

$$[\sqrt{g}H]_{,\mu\nu} = 0,$$

* История, связанная с доказательством общих теорем Нетер и, в частности, этой «теоремы I», изложена в книге [21].

при соответствующем выборе мировой функции H оказываются уравнениями тяготения, а уравнения (91)

$$[\sqrt{g}H]_{,k} = 0$$

— уравнениями электродинамики (обобщенными уравнениями Максвелла).

«Теорема I», являющаяся необходимым следствием принятой математической структуры и с физической точки зрения отвечающая характерным для предыдущих теорий (классическая механика, электродинамика и т. д.) соотношениям между принципами инвариантности и законами сохранения (как это выяснилось позднее) и дает возможность четыре любых лагранж-эйлеровских уравнения, в частности (91), рассматривать как следствие ($n-4$) остальных, например, десяти гравитационных уравнений (90). Таким образом, «...в указанном смысле электродинамические явления суть следствия тяготения» [45, с. 591]. В этом и заключается основная идея синтеза гравитации и электромагнетизма. Первичным, фундаментальным полем оказывается тензорное поле тяготения, электромагнетизм — следствие гравитации, а вещество конструируется из простейших частиц (электрона и, возможно, некоторых других), которые, согласно концепции Ми,— следствия (сингулярности, узлы, особенности, сгустки) электромагнитного поля. Такова редукционистская схема гильбертовского синтеза. Квантование предпологалось, по-видимому, учесть на более поздней стадии. Интересно, что поиски такого синтеза Гильберт связывает с геттингенской традицией: «В этом результате я вижу простое и поразительное решение проблемы Римана, который первым пытался установить теоретически связь между тяготением и светом» [45, с. 587]. Это замечание не лишено основания. Аналогичной проблемой занимался не только Риман, но и другой геттингенский ученый В. Вебер [455].

Определение конкретного вида уравнений гравитационного и электромагнитного полей требует специализации мировой функции, и Гильберт добавляет третью аксиому:

$$H = K + L, \quad (92)$$

где K — скалярная кривизна или «инвариант тензора Римана», единственный инвариант, который можно образовать исключительно из потенциалов $g^{\mu\nu}$ и их первых и вторых производных $g^{\mu\nu}_{,k}$, $g^{\mu\nu}_{,kl}$, а L зависит только от $g^{\mu\nu}$, q_s , $q_{,s}$ [45, с. 594]. Не конкретизируя пока электромагнитную часть мировой функции, Гильберт преобразует гравитационные уравнения (90) к виду:

$$[\sqrt{g}K]_{,\nu} + \partial\sqrt{g}L/\partial g^{\mu\nu} = 0, \quad (93)$$

$$\text{где } [\sqrt{g}K]_{,\nu} = \sqrt{g}(K_{,\nu} - 1/2 K g_{,\nu}) \quad (94)$$

(с точностью до обозначений выражение (94) совпадает с левой частью общековариантных уравнений тяготения в форме (80),

эквивалентной эйнштейновской форме (81)). Гильберт далее показывает, что $\partial\sqrt{g}L/\partial g^{\mu\nu}$ есть не что иное, как общековариантно-обобщение тензора энергии-импульса электромагнитного поля в формулировке Ми (с точностью до гравитационной константы). Тогда уравнения (93) приобретают вид уравнений (80), полностью эквивалентных общековариантным уравнениям гравитации (81). «Получаемые таким путем дифференциальные уравнения тяготения,—резюмирует свой вывод Гильберт,—созвучны, как мне кажется, грандиозной теории общей относительности, выдвинутой Эйнштейном в его последних работах» [45, с. 596]. Замстим, что здесь Гильберт ссылается на все четыре ноябрьских работы Эйнштейна [263—266], ставя в тупик будущих историков науки. С одной стороны, доклад Гильберта датирован 20 ноября, а с другой, в нем имеются ссылки на работы Эйнштейна, датированные не только 4, 11 и 18 числами этого месяца, но 25 ноября. Мы еще вернемся к этому вопросу, а пока остановимся на некоторых других сторонах гильбертовских «Оснований физики».

Большая часть статьи посвящена «установлению понятия энергии и выводу теоремы энергии только из двух аксиом I и II» [45, с. 590]. Здесь же заметим только, что «теорема I» Гильберта и его выражение для «вектора энергии» послужили важным исходным пунктом для последующих работ Клейна, самого Гильберта, Вейля и, наконец, Э. Нетер, которые завершили установлением двух общих теорем о взаимосвязи законов сохранения с принципами симметрии.

К этой части примыкают еще два результата. Во-первых, доказательство на основе аксиомы II того, что электромагнитная часть мировой функции L , кроме потенциалов $g^{\mu\nu}$ и q_{α} , зависит только от компонентов кососимметрического тензора электромагнитного поля $M_{\alpha\beta} = q_{\alpha\beta} - q_{\beta\alpha}$. Во-вторых, установление того факта, что «электромагнитный тензор энергии Ми есть не что иное, как инвариантный тензор, получающийся путем дифференцирования инварианта L по потенциалам тяготения $g^{\mu\nu}$ при указанном переходе к пределу (т. е. при сведении тензора $g^{\mu\nu}$ к тензору Минковского: $g_{\mu\nu} = 0$ ($\mu \neq \nu$); $g_{\mu\nu} = 1$ ($\mu = \nu$).—*B. B.*)» [45, с. 596]. Этот последний результат, о котором мы вскользь уже упоминали, был впоследствии высоко оценен Паули, посвятившим ему целый параграф своей замечательной книги по теории относительности: «Как впервые показал Гильберт, тензор энергии-импульса T_{ik} очень просто связан с функцией действия, что отчетливо проявляется лишь в общей теории относительности» [155, с. 230]. И несколько дальше: «Таким образом, тензор энергии-импульса материи получается варьированием G -поля (т. е. гравитационных потенциалов $g^{\mu\nu}$.—*B. B.*) в интеграле действия (для материи.—*B. B.*)» [155, с. 231]. Для Гильберта же этот результат сыграл также роль определенного подтверждения его теоретической схемы: «Это обстоятельство впервые указало мне на необходимость существования тесной связи между общей

теорией относительности Эйнштейна и электродинамикой Ми и дало мне доказательство справедливости развитой здесь теории» [45, с. 596]. На самом же деле этот результат носит весьма общий характер и не связан исключительно с теорией Ми (для электродинамики это, в сущности, вытекает непосредственно из работы Гильберта, а для теории упругости, например, было показано в работе Нордстрема в 1916 г. [155]).

Наконец, Гильберт непосредственными вычислениями получает из уравнений тяготения четыре независимые одна от другой линейные комбинации основных электродинамических уравнений и их первых производных

$$\sum_m \left(M_{m\nu} [V\bar{g}L]_m + q_\nu \frac{\partial}{\partial w_m} [V\bar{g}L]_m \right) = 0, \quad (95)$$

подчеркивая, что «это и есть точное математическое выражение высказанного выше утверждения о характере электродинамики как следствия тяготения» [45, с. 597—598].

Заключительный абзац статьи весьма красноречив и в свете уже сказанного не требует дополнительных комментариев. Им мы и закончим обсуждение содержания гильбертовских «Оснований физики»:

«Как мы видим, при соответствующем толковании немногие простые предположения, высказанные в аксиомах I и II, оказываются достаточными для построения теории, посредством которой не только в корне преобразуются наши представления о пространстве, времени и движении в направлении, указанном Эйнштейном, но и, как я убежден, при помощи составленных здесь уравнений будут разъяснены сокровеннейшие, до сих пор скрытые явления внутри атома, и на их основе должно оказаться возможным вообще свести все физические постоянные к математическим постоянным. Таким путем мы приближаемся к возможности превратить в принципе физику в науку, подобную геометрии, которая составляет, несомненно, прекраснейший образец аксиоматического метода, пользующегося в данном случае услугами мощных инструментов математического анализа, а именно вариационного исчисления и теории инвариантов» [45, с. 598].

Возвращаясь к гильбертовскому выводу общековариантных уравнений гравитационного поля, перечислим основные особенности этого вывода.

1) Гильберт ставил перед собой задачу аксиоматизации физики и построения на этой основе единой физической теории. Этот замысел, тесно связанный с традициями геттингенской школы математики и математической физики, восходит к 1900 г., когда Гильберт явно выдвинул проблему аксиоматизации физики.

2) Основные средства для реализации этого замысла он нашел в нелинейной электродинамической теории «материи» Ми

(1912—1914 гг.) и общей теории относительности Эйнштейна, которая, однако, еще не была завершена.

3) Идеи Ми и Эйнштейна, сформулированные в виде аксиом на языке вариационного исчисления, дифференциальной геометрии и теории бесконечных непрерывных групп, позволили, в частности, получить общековариантные уравнения гравитационного поля, эквивалентные тем, которые были установлены Эйнштейном в статье, доложенной 25 ноября 1915 г.

Итак, аксиоматичность, программа единой теории поля, использование представлений Ми об электромагнитной структуре материи, общековариантный вариационный принцип — вот характерные черты гильбертовского вывода общековариантных уравнений гравитации.

Вся статья носит ярко выраженный математический характер, особенно в той ее части, которая касается гравитации. Вопросам физической интерпретации принципа общей ковариантности, геометрической природы тяготения, физического истолкования основных математических величин, операционально-измерительных и экспериментально-эмпирических аспектов и т. д. фактически не уделяется никакого внимания. Основное значение при получении уравнений поля имеют теоретико-инвариантные соображения и вариационная техника. Более физический характер носит обсуждение вопросов, связанных с выбором «материальной» части мировой функции H и установлением соответствующего тензора энергии-импульса посредством варьирования этой части по гравитационным потенциалам. Здесь Гильберт жестко привязывается к концепции Ми, хотя его вывод уравнений гравитации легко распространяется на случай произвольной «материи».

Эйнштейн и Гильберт

Эйнштейн и Гильберт пришли к открытию общековариантных уравнений гравитации совершенно различными путями. При этом сразу подчеркнем, что лидерство Эйнштейна в разработке гравитационной проблематики очевидно. Он с 1907 г. напряженно и целенаправленно искал способ включения теории тяготения в рамки релятивистской программы, выдвинутой им в 1905 г. Все основные этапы в генезисе релятивистской теории тяготения были прочно связаны с его именем: понимание необходимости расширения СТО при рассмотрении гравитации, принцип эквивалентности, эффекты гравитационных «красного смещения» и отклонения свста, тензорный характер гравитационных потенциалов, идея отождествления гравитации и геометрии пространства—времени, принцип общей относительности и его математическое выражение с помощью требования общей ковариантности, привлечение римановой геометрии и тензорного анализа к решению проблемы (здесь была существенна роль М. Гроссмана), использование тензоров кривизны для формулировки уравнений гравитации и т. д.

Гильберт же вообще не ставил перед собой проблему построения релятивистской теории тяготения. Его целью, провозглашенной еще в 1900 г., была аксиоматизация физики на основе фундаментальных математических структур. Большое влияние на него оказала также электромагнитно-полевая концепция синтеза физики, имевшая глубокие корни в геттингенской традиции (Гаусс, Риман, Вебер, Вихерт, Абрагам, Минковский и др.) и с большой энергией и на высоком математическом уровне развернутая в нелинейной теории поля Ми (1912—1914 гг.). Разрабатываемая Эйнштейном релятивистская теория тяготения также импонировала Гильберту из-за ее принципиально полевого характера и благодаря органическому использованию в ней таких фундаментальных математических структур, как риманова геометрия и тензорный анализ. К тому же, ввиду той определяющей роли, которую играл в ней принцип общей ковариантности, и высокого уровня математизации, эйнштейновская теория представлялась Гильберту очень подходящей областью для реализации его аксиоматических устремлений. Ядром всего гильбертовского построения явилась его «теорема I» (т. е. частный случай доказанной в 1918 г. Э. Нетер общей теоремы, именно второй теоремы Нетер). Именно эта теорема дала возможность осуществить редукцию электромагнетизма к гравитации и, тем самым, выдвинуть программу далеко идущего синтеза физики на фундаменте гравитационного поля. Общековариантные уравнения гравитации были получены Гильбертом именно в контексте аксиоматической единой теории поля.

Эйнштейн вместе с Гроссманом уже в середине 1913 г. вплотную подошли к правильному решению проблемы уравнений поля тяготения, к которому их вели теоретико-инвариантные соображения, но они не сумели согласовать этот правильный подход с общефизическими и методологическими принципами физики (причинности, соответствия, сохранения энергии-импульса). Как это ни парадоксально, стремление Эйнштейна к глубокому физическому осмыслению новой теории, в частности, к ее согласованию с фундаментальными принципами физического знания, оказалось препятствием на пути к решению проблемы уравнений поля. Эйнштейн встал на ошибочный путь поиска необщековариантных уравнений гравитации в рамках общековариантной теории в целом. Это стоило ему более чем двух с половиной лет драматических блужданий, в течение которых он несколько раз приближался к правильному решению и затем вновь отходил от него. В чем же заключалась главная трудность согласования новой теории с фундаментальными принципами физики? Источники этой трудности находились в принципе общей ковариантности и геометрической природе тяготения, концепциях, радикально отличных от классических. Физическое истолкование их требовало не меньших усилий ума, чем их выдвижение и математическое оформление. Только после детального опробования ряда ошибочных вариантов, осознания их эмпирической и тео-

ретиической неполноценности, повторного продумывания общеквариантного подхода и частичного уяснения ошибочности прежних аргументов против этого подхода Эйнштейн возвращается на правильный путь. Но и тут он не сразу находит окончательное решение. Аргументы, связанные с физической интерпретацией и экспериментальной стороной теории, по-прежнему играют в рассуждениях Эйнштейна главную роль. Он как бы постепенно конструирует уравнения: сначала уравнения

$$R_{ik} = -\kappa T_{ik}; \quad (96)$$

затем оказывается, что необходимо потребовать «бесследовость» тензора T_{ik} , чтобы эти уравнения были общеквариантны, а это равносильно гипотезе об «электромагнитной» структуре вещества; после этого Эйнштейн убеждается, что уравнение поля для пустого пространства $R_{ik} = 0$ успешно объясняет аномалию Меркурия, значит, левая часть уравнения (95) верна; наконец, сопоставление этого уравнения с законом сохранения энергии-импульса и связанными с ним соображениями приводят к дополнению правой части членом, пропорциональным $\frac{1}{2}g_{im}T$. Именно построение, а не вывод, конструкция, а не дедукция — так можно было бы охарактеризовать ход мысли Эйнштейна, который вовсе не стремится к аксиоматичности и логической строгости вывода. Еще менее в этот период его привлекает идея единой теории поля. Только однажды, пытаясь согласовать уравнения (96) с принципом общей ковариантности, он прибегает к предположению, близкому к идеологии Ми, об электромагнитной природе «материи», но через полторы-две недели от него полностью отказывается. Начиная с последней ноябрьской работы, он в течение ряда последующих лет все время настойчиво подчеркивал, что ОТО — это только теория тяготения, не имеющая прямого отношения к природе «материи». Так он думал, по крайней мере, до начала 20-х годов, пока сам не начал постепенно все больше увлекаться проблемой единой геометризованной теории поля в духе Вейля и Эддингтона (1923 г.).

Таким образом, подходы Эйнштейна и Гильберта, на основе которых были установлены полевые уравнения, были в значительной мере противоположны.

Таблица 3 наглядно, хотя и несколько упрощенно, описывает эту противоположность.

Впоследствии упоминания о работе Гильберта становились все более редкими, несмотря на то, что в начале 20-х годов вклад лидера геттингенской математической школы в ОТО был высоко оценен такими авторитетами, как Клейн, Вейль, Паули. Гильбертовские «Основания физики» неоднократно цитировались в знаменитой книге Вейля «Пространство. Время. Материя» [564, с. 329, 330]. Точная характеристика подхода Гильберта и его сопоставление с эйнштейновским подходом содержатся в другой столь же известной книге по теории относительности, принадлежащей Паули (1921): «Одновременно с Эйнштейном и не-

Таблица 3

Сравнение подходов Эйнштейна и Гильберта к проблеме уравнений гравитационного поля

Эйнштейн	Гильберт
<p>Конструктивно-физический подход</p> <p>Стремление к равновесию математического и физического аспектов</p> <p>Связь с единой теорией поля отсутствует</p> <p>Уравнения гравитации конструируются на основе методологических принципов физики</p> <p>Стремление избегать каких-либо гипотетических представлений о структуре материи, в частности об электромагнитной природе «материи»</p> <p>Особое внимание к экспериментально-эмпирической стороне теории</p>	<p>Аксиоматико-дедуктивный подход</p> <p>Явное преобладание математического аспекта над физическим</p> <p>Теория гравитации как фрагмент единой теории поля</p> <p>Уравнения гравитационного поля выводятся из вариационного принципа</p> <p>Использование физически ненадежных представлений об электромагнитной природе вещества (теория Ми)</p> <p>Игнорирование экспериментально-эмпирической стороны теории</p>

зависимо от него общеквариантные уравнения поля были установлены Гильбертом. (...) Изложение Гильберта было, однако, мало созвучно физикам, так как Гильберт, во-первых, аксиоматически вводил вариационный принцип и, во-вторых, что важнее, сго уравнения были выведены не для произвольной материальной системы, а специально исходя из теории материи Ми» [155, с. 211]. Давний друг Гильберта Ф. Клейн, который в теории относительности видел физическую реализацию своей «Эрлангенской программы» 1872 года [25] и который сам увлекся проблемами ОТО, также подчеркивал полярность подходов Эйнштейна и Гильберта (1920 г.):

«О каком-либо приоритете при этом не может быть и речи, так как оба автора [Эйнштейн и Гильберт] следовали совершенно различному ходу мысли (и притом так, что совместимость их результатов первоначально не казалась обеспеченной). Эйнштейн поступает индуктивным образом и имеет в виду произвольные материальные системы. Гильберт дедуцирует, вводя упомянутое... ограничение электродинамикой, из высшего вариационного принципа. При этом он исходит, в частности, из теории Ми» [423, с. 568]. Отметим, что более точной нам кажется характеристика эйнштейновского подхода не как индуктивного, а как конструктивного.

А Вейль, спустя почти 30 лет после описываемых событий, вспоминал: «В своих исследованиях Гильберт объединил теорию гравитации Эйнштейна с программой Ми чисто полевой физики. Эйнштейновский более умеренный подход, который не связывал теорию с весьма спекулятивной программой Ми, ока-

зался на этой стадии развития общей теории относительности более плодотворным. Попытки Гильберта в этом направлении следует рассматривать как некоторое предвосхищение единой полевой теории гравитации и электромагнетизма ...Надсжды на решение проблемы единой теории у Гильберта и его последователей в это время были весьма велики; мечта об универсальном законе, учитывающем и структуру космоса как целого, и все, что касается атомного ядра, казались близко осуществимыми» [567, с. 653].

Большой интерес при сравнении путей Эйнштейна и Гильберта к уравнениям поля представляют дневниковые записи швейцарского писателя Р. Я. Гумма, который в годы создания ОТО слушал лекции по физике и математике в Геттингенском университете. В мае 1917 г. он приехал в Берлин, чтобы встретиться с Эйнштейном, и затем записал разговор с ним. Эйнштейн рассказывал о своем творческом методе, о том, как он пришел к уравнениям гравитации, сравнивал свой подход с подходом геттингенских теоретиков, в частности, выражал неверие в успех направления единых теорий поля, начало которому было положено Гильбертом и Вейлем. Приведем достаточно большой и красноречивый отрывок из дневника Гумма: «Он говорил, что считает себя плохим математиком. Работая, он обычно чаще оперирует наглядными представлениями, и тому, что мы делали в Геттингене, вероятно, не особенно верил: сам он никогда не рассуждал так формально. Представления, к которым прибегает Эйнштейн, всегда очень близки к действительности. Так, он говорил, что наглядно представляет себе гравитационные волны с помощью эластичного тела, и при этом шевелил пальцами, словно сдавливая резиновый мяч. Эйнштейн очень осторожен и — физик до мозга костей; он не спешил броситься в атаку на всеобщее, как мы в Геттингене, — это он объясняет тем, что ему пришлось очень медленно освобождаться от предубеждений. Так, Эйнштейн не сразу понял, каким образом может существовать всеобщая инвариантность, — ему пришлось шаг за шагом идти к этой мысли, которая, правда, потом показалась ему вполне понятной. Тем не менее она внушала ему отвращение, потому что фигурирующие в теории величины — тензоры кривизны — казались слишком уж неясными.

Я высказался в том смысле, что он мог бы использовать квантовую теорию, чтобы модифицировать теорию гравитации, в отличие от Гильберта, которому хотелось вывести квантовую теорию из теории гравитации. Тогда его лицо стало озорным: из этого ничего не получится, несмотря на то, что теория гравитации более обща. Идея относительности не может дать ничего большего, чем теория гравитации. Мысль о том, чтобы построить силой своей фантазии картину мира, можно было бы назвать прекрасной; она могла бы дать известные результаты. Но история учит, что подобные попытки всегда заканчиваются неудачей ... Разнообразие тензоров так велико, что невозможно

сказать, какие из них следует выбрать для обоснования электродинамики. К тому же экспериментальные данные слишком скудны; они еще не дают надежной путеводной нити. Конечно, наряду с другими качествами нужно обладать и силой воображения, однако он отрицательно относился ко всем этим попыткам создать картину мира с помощью только воображения. Было бы большой дерзостью уже теперь нарисовать себе законченную картину мира, потому что существует еще очень много такого, о чем у нас нет даже отдаленного представления. Так, например, он тоже в течение десяти лет пытался понять, почему электроны отталкиваются друг от друга, но вынужден был отказаться от этих попыток» [62, с. 127—128].

Вопрос о приоритете. Еще раз воспроизведем хронологию ноября 1915 г. 4 ноября Эйнштейн докладывает статью «К общей теории относительности» на заседании Прусской Академии наук в Берлине, в которой он возвращается к идее общековариантных уравнений гравитации (правда, общая ковариантность ограничена условием унимодулярности $\sqrt{-g}=1$). В качестве уравнений поля принимаются уравнения:

$$R_{\mu\nu} = -\kappa T_{\mu\nu},$$

где $R_{\mu\nu}$ — тензор Риччи при условии $\sqrt{-g}=1$.

11 ноября Эйнштейн представляет статью «К общей теории относительности (Дополнение)», в которой он пытается устранить обнаруженную в конце предыдущей статьи внутреннюю трудность новой своей теории, связанную с невозможностью принятия условия $\sqrt{-g}=\text{const}$, в частности $\sqrt{-g}=1$. В этой статье он записывает общековариантные уравнения

$$G_{\mu\nu} = -\kappa T_{\mu\nu},$$

которые не приводят к внутренним противоречиям, если потребовать «бесследовость» $T_{\mu\nu}$.

18 ноября Эйнштейн сообщает о своей работе «Объяснение движения перигелия Меркурия в общей теории относительности», в которой решается задача об аномальном движении перигелия Меркурия на основе приближенного решения уравнения гравитации для статического поля точечной массы

$$G_{\mu\nu} = 0 \text{ или } R_{\mu\nu} = 0 \text{ и } \sqrt{-g} = 1,$$

а также вычисляется отклонение света в поле Солнца, оказавшееся в 2 раза большим, чем на основе лишь принципа эквивалентности. Анонсируется возможность отказа от гипотезы «бесследовости».

20 ноября Гильберт на заседании Геттингенского научного общества докладывает работу «Основания физики» (Первое сообщение), в которой строит некоторую аксиоматическую единую теорию поля (на основе более ранних работ Эйнштейна по ОТО и Ми по нелинейной электродинамике). В частности, он, исполь-

зую общековариантный вариационный принцип для лагранжиана

$$H = K + L,$$

где K — скалярная кривизна риманова пространства—времени, а L — общековариантное обобщение лагранжиана теории Ми, получает систему десяти уравнений гравитационного поля в форме

$$K_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} K = - \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial \sqrt{g} L}{\partial g^{\mu\nu}}$$

и показывает, что правая часть имеет смысл общековариантного аналога тензора энергии-импульса электромагнитного поля (в теории Ми).

25 ноября Эйнштейн представляет Прусской академии наук доклад «Уравнения гравитационного поля», в котором он полностью отказывается от гипотезы «бесследовости» и формулирует на основе энергетических соображений общековариантные уравнения гравитации в форме

$$G_{im} = -\kappa (T_{im} - \frac{1}{2} g_{im} T).$$

Эквивалентность последних двух уравнений при условии, что мы не считаем лагранжиан L миевским, доказывался несложным преобразованием. Как будто, картина достаточно ясная. По крайней мере, ясно, кто, когда и что сделал. При этом логика рассуждений и ход мысли каждого из авторов столь различны, а временное совпадение столь удивительное, что напрашивается вывод о вполне независимом открытии общековариантных уравнений каждым из них (с учетом, конечно, того, что Гильберт несомненно знал основные работы Эйнштейна 1913—1915 г., исключая, возможно, ноябрьские).

Но тут нас подстерегают некоторые загадочные обстоятельства. Они заключаются, прежде всего, в том, что Гильберт дважды ссылается на все четыре ноябрьские работы Эйнштейна, в том числе и на статью, доложенную 25 ноября. Причем, одна из ссылок указана именно в том месте, где Гильберт получает уравнения гравитации: «Получаемые таким путем дифференциальные уравнения тяготения созвучны, как мне кажется, гравитационной общей теории относительности, выдвинутой Эйнштейном в его последних работах» [45, с. 596]. Столь странная ситуация, по-видимому, объясняется тем, что текст доклада, который был сделан 20 ноября, претерпел некоторые изменения, когда он готовился к печати, а это, очевидно, происходило уже после 25 ноября. Возможно, Гильберт получил от Эйнштейна корректуры его статей, поскольку он указывает страницы «Отчетов Прусской академии», и фраза о «созвучности» его уравнений «гравитационной общей теории относительности, выдвинутой Эйнштейном в его последних работах» может относиться к уравнениям, доложенным 25 ноября.

Таким образом, некоторая запутанность с датами представления и ссылками и отсутствие достаточной информации (Чем отличался первоначальный текст доклада Гильберта от опубликованного? Знал ли Эйнштейн о докладе Гильберта до 25 ноября? Когда Гильберт познакомился со статьей Эйнштейна, датированной этим числом?) не позволяют сделать однозначный вывод о формально-хронологической стороне вопроса. Такие авторитеты, как Вейль, Паули и Клейн, как мы видели, единодушно считали, что Эйнштейн и Гильберт независимо и практически одновременно нашли правильные общековариантные уравнения, и гарантией этой независимости были и совершенно различный (если не противоположный!) ход мысли каждого из них, и отсутствие явных упоминаний, особенно у Эйнштейна, об уравнениях, полученных другим, и то, что никакой приоритетной полемики после этого не возникло.

Американский специалист по ОТО и автор интересного историко-научного исследования проблемы гравитации Е. Гут [383], однако, выступил недавно с совершенно иной точкой зрения. Он считает, что, поскольку в докладе Гильберта имеются ссылки на последние ноябрьские работы Эйнштейна, то утверждение о независимости открытия уравнений «не соответствует исторической истине», а в примечании указывает, что «вероятно, дата представления этой статьи (статья Гильберта.— В. В.), которое было пятью днями раньше, чем представление последней статьи Эйнштейна» [383, с. 205] ввела в заблуждение Вейля и Паули и послужила основой соответствующего «мифа». Гут не объясняет противоречивой ситуации с датами представления и ссылками Гильберта на Эйнштейна. Но в подтверждение своей позиции ссылается на беседы с первым ассистентом Гильберта по физике Эвальдом. По рассказам Эвальда, Гильберт, по-видимому, в конце ноября действительно делал доклад, в котором дал уравнения гравитации без ссылки на Эйнштейна, который к этому времени их уже имел. Зоммерфельд узнал об этом докладе Гильберта и намекнул ему, чтобы он написал Эйнштейну письмо и извинился перед ним, что, будто бы, Гильберт и сделал.

Аргументация Гута не выдерживает критики. Во-первых, он не объясняет ситуацию с датами представления. Во-вторых, письмо Гильберта к Эйнштейну, о котором говорит Гут, не найдено. В-третьих, Зоммерфельд, насколько известно, сам никогда не говорил ни о чем подобном. Более того, хорошо известна переписка Эйнштейна и Зоммерфельда, относящаяся к этому времени. В частности, в письмах Эйнштейна от 28 ноября [76, с. 192] и 9 декабря 1915 г. [76, с. 194] речь идет об уравнениях гравитации и теории Гильберта (в последнем из этих писем), и нет совершенно никаких следов описанного Гутом случая. В-четвертых, нет основания не доверять Вейлю, Паули и Клейну, которые, безусловно, должны были хорошо знать всю эту историю (от самого Гильберта, Зоммерфельда или даже Эйнштейна). Как известно, Клейн, Вейль и Паули, особенно первые два находи-

лись в дружеских отношениях с Гильбертом, а Паули в 1921—1922 гг. работал в Геттингене, где неоднократно встречался с Гильбертом. Клейн, вполне вероятно, присутствовал на докладе Гильберта. Все они состояли в переписке с Эйнштейном и были лично с ним знакомы. Зоммерфельд же считал себя учеником Клейна, был учителем Паули и находился в дружеских отношениях с Вэйлсом.

Наконец, другой американский историк физики Дж. Мехра, посвятивший истории ОТО большую и содержательную работу, пытался у самого Эвальда выяснить все недоразумения. В письме от 9 сентября 1973 г. Эвальд писал Мехре: «В то время, когда появились статьи Гильберта и Эйнштейна 1915 г., я в качестве «полевого рентгеновского механика» («field-X-ray-mechanic») вместе с немецкими войсками находился в России и не занимался изучением общей теории относительности до моего возвращения к гражданской жизни в 1918 г. В то время передо мной стояло так много проблем быстро развивающейся области рентгеновской кристаллографии, что я только слегка интересовался более общими проблемами физики. Я не могу вспомнить такого рода рассказов, которые мне приписываются» [458, с. 173]. Таким образом, версия Гута мало убедительна. Мехра считает, что Гильберт готовил публикацию статьи через несколько недель после своего доклада. Во всяком случае, можно предположить, что Эйнштейн сразу же послал Гильберту корректуры ноябрьских статей, по-видимому, не позже первой декады декабря, и Гильберт имел возможность дать в окончательном тексте ссылки на них. К ноябрьским работам и, в частности, к последней из них, скорее всего, относится и фраза Гильберта о «созвучности» его уравнений «грандиозной общей теории относительности, выдвинутой Эйнштейном в последних работах». Несомненно, что и Эйнштейн познакомился с работой Гильберта до ее публикации. О ней он знал уже в начале декабря или чуть раньше. В письме к Зоммерфельду от 9 декабря он писал: «Насколько я знаю о теории Гильберта, она пользуется таким подходом к электродинамическим явлениям, исключая рассмотрение гравитационного поля, где он тесно примыкает к теории Ми. Подобный специальный подход с точки зрения общей теории относительности нельзя обосновать» [76, с. 194]. Но в письме к Зоммерфельду от 28 ноября, где Эйнштейн весьма эмоционально рассказывает о своем триумфе, нет ни слова о Гильберте и его теории. Вывод, который можно сделать из предыдущего анализа, заключается в следующем. Окончательные общесковариантные уравнения гравитации были найдены и Эйнштейном, и Гильбертом почти одновременно и независимо. Пути, по которым шли авторы открытия, были совершенно различны, как и цели, которые они перед собой ставили. Конечно, необходимо сделать оговорку, что Гильберт опирался на предшествующие исследования Эйнштейна 1913—1914 гг. Не исключена возможность, что Гильберт был знаком и с работами Эйнштейна, представленными

ми Прусской академии наук 4 и 11 ноября, в которых, однако, фигурировали только «укороченные» уравнения:

$$G_{im} = -\kappa T_{im}.$$

В этом случае эйнштейновская гипотеза об электромагнитной природе «материи», близкая по духу концепции Ми, могла стимулировать размышления Гильберта о единой теории поля. Но это только предположение, поскольку ничего не известно о том, знал ли Гильберт до 20 ноября о работе Эйнштейна, представленной 11 ноября, в какое время он начал разработку своей теории и т. д. Во всяком случае интересно, что Эйнштейн в этой работе близко подошел к физической основе теории Гильберта, но довольно быстро отказался от этого подхода, который в 1915 г. не был характерен для него.

Взаимоотношения Эйнштейна и Гильберта. В связи с обсуждаемой проблемой несомненный интерес представляет вопрос об отношениях между Эйнштейном и Гильбертом как до знаменательного ноября 1915 г., так и после него. Когда Гильберт начнет заниматься ОТО? Был ли он лично знаком с Эйнштейном? Переписывались ли они? Что каждый из них говорил или писал друг о друге? Как Эйнштейн оценивал ноябрьскую работу Гильберта, его единую теорию и его вывод уравнений гравитации? Не возникла ли впоследствии приоритетная полемика между ними? Весь этот комплекс сравнительно второстепенных вопросов, обсуждение которых интересно само по себе и, может быть, более уместно в биографическом исследовании, все же имеет непосредственное отношение к анализу генезиса ОТО, так как позволяет полнее и глубже понять специфику путей каждого из первооткрывателей, восприятие их открытия и дальнейшую его судьбу.

В первой половине лета 1915 г., скорее всего в начале июля, состоялось знакомство Гильберта и Эйнштейна, когда последний приехал в Геттинген. Гильберт после смерти Пуанкаре считался, вероятно, крупнейшим математиком, а Эйнштейн безусловно считался одним из ведущих физиков. Оба в 1913 г. (Гильберт — 27 февраля, а Эйнштейн — 12 июня) были представлены для избрания в Прусскую академию наук в Берлин. Эйнштейн в это время напряженно искал выход из тупика, в который он зашел, развивая нековариантный подход к уравнениям гравитации. Его также весьма волновали вопросы экспериментального подтверждения теории. Об этом свидетельствует, в частности, его письмо к Бессо от 12 февраля 1915 г. [157, с. 43].

Гильберт, как мы знаем, был поглощен в это время физикой, переходя от своей теории излучения к проблемам структуры материи и электромагнитно-полевой концепции Ми. По всей вероятности, он также изучал и ОТО, и визит Эйнштейна в Геттинген был организован именно Гильбертом, который всегда предпочитал непосредственные, живые контакты методичному изучению научных работ. С начала 1910-х годов (начало «физиче-

ского» периода в научной деятельности Гильберта) Геттинген посетили немало ведущих физиков: Лоренц, Зоммерфельд, Н. Бор, Дебай, Лауэ и др., весной 1913 г. была организована конференция по кинетической теории газов.

Проблемами электродинамики движущихся сред Гильберт занимался вместе с Минковским еще в 1905 г. и, разумеется, изучал работы Эйнштейна по СТО, развитие которых привело Минковского к четырехмерному «миру» — возможно, наиболее значительному вкладу геттингенских математиков в теорию относительности. Эйнштейн едва ли изучал какие-либо работы Гильберта, хотя в 1915 г. очень высоко оценивал концепцию Минковского, которая оказалась очень важной при переходе от СТО к ОТО.

К сожалению, очень мало известно о встрече Эйнштейна с Гильбертом. Чуть ли не единственным надежным свидетельством её является письмо Эйнштейна к Зоммерфельду от 15 июля 1915 г., в котором имеется такое место: «В Геттингене у меня была большая радость — было понято все до последних деталей. Гильберт меня совершенно очаровал. Выдающийся человек!» [76, с. 192]*. Нет никакого сомнения в том, что главной темой разговоров была ОТО, а также, возможно, теория Ми и проблемы единой теории. По-видимому, Эйнштейн рассказывал об ОТО и тех трудностях, которые встали перед ним на пути к уравнениям гравитационного поля. Очевидно, Гильберт с большим интересом и пониманием отнесся к эйнштейновской теории, возможно, также сделал ряд глубоких и стимулирующих замечаний, что и вызвало столь восторженные слова Эйнштейна о нем. С тех пор, как Эйнштейн вступил на путь ОТО, он все чаще встречался с непониманием и критикой большинства своих коллег. Вспомним его острые дискуссии 1912—1914 гг. с Абрагамом, Ми, Нордстремом, несколько позже — с Котлером и Кречманом, скептическое отношение Лауэ, который даже в 1917 г. публикует статью по скалярной теории тяготения [447], критические замечания Планка, считавшего целесообразным остаться и в области гравитации на почве СТО [166]. В письме к Зоммерфельду от 5 февраля 1916 г., обсуждая некоторые работы астронома Фрейндлиха, который, пожалуй, раньше всех поддержал Эйнштейна, он писал: «Фрейндлих был единственным из коллег, кто поддерживал меня в моих стремлениях в области общей теории относительности» [76, с. 195]. Возможно, это некоторое преувеличение, но в целом эти слова правильно отражают отношение основного большинства физиков к ОТО в 1912—1915 гг. Поэтому Эйнштейну были так дороги интерес и поддержка Гильберта. Слова «все было понято до последних деталей», скорее всего, означают, что Гильберт понял ОТО и согласился с Эйнштейном. Но не исключено, что они в какой-то мере относятся и к Эйнштейну, который в процессе обсуждения своей теории с Гиль-

* Перевод уточнен по оригиналу [318, с. 30].

бертом сам достиг более глубокого понимания проблемы уравнений поля и принципа общей ковариантности. Конечно, по трем строчкам письма практически невозможно восстановить содержание и результаты бесед между учеными. И все же можно предполагать, что встреча в Геттингене была весьма важна для обоих — всдь примерно через четыре месяца после нее Эйнштейн и Гильберт решили проблему уравнений поля, завершив тем самым создание основ ОТО [45, 263—269].

Гильберт считал ОТО (уже в своем ноябрьском докладе) великим научным достижением, открывающим перед физикой новые горизонты: «Грандиозные задачи, поставленные Эйнштейном, а также остроумно разработанные для их решения методы, его глубоко идущие мысли... открыли для исследований по основаниям физики новые пути» [45, с. 589]. Несоднократные ссылки на труды Эйнштейна, чрезвычайно высокая оценка его достижений в области теорий относительности и гравитации, свидетельствуют о том, что Гильберт считал его всдущим ученым в разработке этих теорий.

В ноябрьских статьях Эйнштейна ссылки на Гильберта отсутствуют. Впрочем, только в последней из них Эйнштейн, вероятно, мог бы дать ссылку на него, например, при корректуре, если, конечно, ему в это время уже была известна статья Гильберта. Во всяком случае, в следующей большой работе по общей теории относительности, законченной 20 марта 1916 г., Эйнштейн ссылается на работу Гильберта, но не в связи с его выводом уравнений гравитации. Обсуждая вопрос о законе сохранения энергии-импульса для материи, Эйнштейн показывает, что он может рассматриваться как следствие общековариантных уравнений гравитационного поля, и ссылается при этом на аналогичный результат Гильберта, вытекающий из его «теоремы I». Правда, в отличие от него, Эйнштейн не связывает «четыре условия, которым должны удовлетворять материальные процессы» исключительно с уравнениями электродинамики, да еще в формулировке Ми. Скорее, он склонен их трактовать как уравнения сохранения энергии-импульса, справедливые для любой материальной системы.

Эта ссылка Эйнштейна на Гильберта уже ясно показывает его отношение к теории Гильберта в целом. Это отношение, несомненно, отрицательное, хотя Эйнштейн и не говорит об этом явно. Он не просто умалчивает об этой теории: он принципиально иначе интерпретирует «теорему I» Гильберта, полагая, что тождества, вытекающие из нее, следует связывать не с уравнениями электродинамики, а с некоторыми универсальными условиями на материальные процессы (типа закона сохранения энергии-импульса). В письмах к своим друзьям он болсе резко писал о теории Гильберта. В цитированном уже письме к Зоммерфельду от 9 декабря 1915 г. он, выражая сомнение в плодотворности применения ОТО к проблемам электрона и атома, замечает: «Насколько я знаю о теории Гильберта, она пользуется

таким подходом к электродинамике, исключая рассмотрение гравитационного поля, где он тесно примыкает к теории Ми. Подобный специальный подход с точки зрения общей теории относительности нельзя обосновать» [76, с. 194].

Таким образом, Эйнштейну казалось недопустимым сочетать в одной теоретической схеме универсальную и физически обоснованную ОТО с искусственной и физически мало оправданной концепцией Ми, которую он еще в 1913 г. считал «фантастической и... имеющей ничтожную внутреннюю вероятность» оказаться правильной («Erstere (теория Ми.— В. В.) ist phantastisch und hat meiner Meinung eine verschwindend klein innere Wahrscheinlichkeit», — так писал он в письме к Фрейдлиху в 1913 г.) (цит. по: [504, с. 358]).

Более развернутую оценку единой теории Гильберта и вообще его «Оснований физики» он дал в письмах 1916 г. к Эренфесту и Г. Вейлю. Эренфесту он писал 24 мая 1916 г.: «Гильбертовское изложение мне не нравится. Оно излишне специально в части, касающейся материи (речь идет о концепции Ми.— В. В.), излишне усложнено и не вполне корректно в построении (плутни сверхчеловека для завуалирования метода)» [62, с. 136]. Математическая сложность, особенно в части, касающейся проблемы энергии, казалась Эйнштейну также излишней. Ровно через полгода 23 ноября 1916 года он откровенно пишет Вейлю, ученику Гильберта: «Гильбертовский подход к материи кажется мне ребяческим; я имею в виду ребенка, не знающего коварства окружающего мира... Во всяком случае невозможно согласиться с тем, чтобы серьезные соображения, вытекающие из принципа относительности, связывались со столь рискованными и необоснованными гипотезами относительно строения электрона или материи. Я охотно признаю, что поиски подходящей гипотезы или функции Гамильтона для строения электрона составляют сегодня одну из важнейших задач теории. Но «аксиоматический метод» мало что может здесь дать...» [62, с. 136].

Тремя неделями раньше (2 ноября) Эйнштейн закончил работу «Принцип Гамильтона и общая теория относительности», в которой он, вообще говоря, признал корректность использования вариационного метода для вывода уравнений гравитации Гильбертом, хотя и подчеркнул, что этот вывод не требует принятия рискованных гипотез о строении материи (в духе концепции Ми): «В последнее время Г. А. Лоренцу и Д. Гильберту удалось придать общей теории относительности особенно наглядную форму тем, что они вывели ее уравнения из одного единственного вариационного принципа» [271, с. 524]. Вариационный вывод уравнений гравитации Лоренцем был сделан уже в 1916 г. и здесь не рассматривается. Эйнштейн в этой работе дает вывод уравнений поля из вариационного принципа с гравитационным лагранжианом, эквивалентным гильбертовскому, но зависящему только от гравитационных потенциалов $g^{\mu\nu}$ и их первых производных (в то время как скалярная кривизна зависит еще и от

вторых производных g^{uv}). При этом, «в противоположность изложению, главным образом Гильберта» Эйнштейн делает «по возможности меньше специальных допущений о свойствах материи» [271, с. 524], т. е. не специализирует материю в духе теории Ми.

Таким образом, несмотря на весьма критическое отношение к единой теории Гильберта (в основном, из-за ее привязки к сомнительной, с точки зрения Эйнштейна, теории Ми, а также «ребяческой» самоуверенности ее автора осуществить на основе «аксиоматического метода» синтез физики), Эйнштейн признал корректной и целесообразной вариационную схему вывода уравнений гравитации, реализованную впервые Гильбертом. Воспринятым оказался и важный вывод о существовании четырехтождественных условий на материю, вытекающий из «теоремы I» Гильберта. Тем самым, в конечном счете, основные результаты Гильберта, при условии их освобождения от наслоений, связанных с теорией Ми, были признаны Эйнштейном и усвоены общей теорией относительности. Таково было далеко не однозначное отношение Эйнштейна к достижениям Гильберта, по крайней мере, до начала 20-х годов, когда Эйнштейн сам постепенно включается в разработку единых геометризованных теорий поля, начало которым было положено именно Гильбертом.

Гильберт же и после событий ноября 1915 г. всегда с восхищением говорил об Эйнштейне и ОТО. В лекциях, которые в течение 1916—1917 гг. читал Гильберт по основаниям физики в Геттингене, он подчеркивал, что основные идеи ОТО принадлежат Эйнштейну. «Каждый мальчишка на улицах Геттингена понимает в четырехмерной геометрии больше, чем Эйнштейн. И, несмотря на это, Эйнштейн сделал все, а не математики», — однажды заметил Гильберт (цит. по: [511, с. 140]). «Знаете ли вы, почему именно Эйнштейн в наше время сделал наиболее глубокие и оригинальные вещи о пространстве и времени? Потому что он вовсе не изучал философию и математику времени и пространства», — говорил он в одной из своих лекций [там же].

Действительно, чрезмерные познания и интересы в области «математики и философии времени и пространства» могли бы увести в сторону физическую мысль Эйнштейна, обременить ее грузом своих собственных проблем.

Заметим также, что еще в 1915 г. Гильберт выдвигал кандидатуру Эйнштейна на премию имени Бойяи «за высокий математический дух всех его достижений» [511, с. 142]. М. Борн, который был близким другом и Эйнштейна, и Гильберта, писал в 1922 г. в связи с 60-летним юбилеем Гильберта: «Но это замечательное совпадение никогда не приводило к спорам о приоритете между ними; наоборот, переписка по научным вопросам привела затем к личному знакомству и дружескому общению. Гильберт всегда ясно сознавал — и это он неоднократно подчеркивал в своих докладах и статьях, — что основное полностью заключалось в замечательной физической идее Эйнштейна» [11, с. 33].

Так, когда в начале 20-х годов в Германии поднялась кампа-

ния против Эйнштейна, в которой весьма незавидную роль играл известный физик Ф. Ленард, написавший антиэйнштейновскую статью о Зольднере *, Борн и Гильберт выступили в прессе в защиту Эйнштейна. Борн в письме к Эйнштейну 29 ноября 1921 г. сообщал: «Статья Ленарда о Зольднере нас здорово позабавила. Не знаю, видел ли ты сообщение об этом во франкфуртской газете и возражения Лауэ, а также наше с Гильбертом» [156, I, с. 31]. В 1922 г. в Геттингене готовились к 60-летию юбилею Гильберта. Борн в связи с этим писал Эйнштейну 1 января 1922 г.: «Попутно мы намерены заполучить тебя здесь на празднование 60-летия Гильберта, и эта идея привела старика в восторг» [156, I, с. 34]. Эйнштейн вначале собирался приехать в Геттинген: «Я с удовольствием приеду к вам — и для того, чтобы поздравить Гильберта, и для того, чтобы рассказать Вам...» [156, с. 35], — отвечал он Борну. Однако приехать не смог, о чем весьма сожалел: «С тяжелым сердцем мне все же приходится отказаться... Так что я должен буду выразить свое глубокое уважение Гильберту только письменно» [там же].

Работы Гильберта по ОТО после ноября 1915 г. Вклад Гильберта в ОТО не ограничивается его работой 1915 г. Заметим, что эта замечательная работа, несмотря на весьма скептическое отношение к ней со стороны Эйнштейна, оказалась, в сущности, первой ласточкой в ряду единых теорий поля, основанных на общерелятивистском подходе. С другой стороны, она занимает важнейшее место в истории взаимосвязи принципов инвариантности с законами сохранения и послужила одним из главных исходных пунктов для тех исследований Гильберта, Клейна и Э. Нетер, которые завершились установлением теорем Нетер [21].

23 декабря 1916 г. Гильберт представил Геттингенскому научному обществу второе сообщение «Оснований физики» [395], в котором рассмотрел ряд важных проблем, касающихся как его единой теории, так и собственно ОТО: физическая интерпретация преобразований, соответствующих принципу общей ковариантности, и операционально-измерительные аспекты пространства — времени; ограничения на произвольные непрерывные преобразования, вызванные принципом (требованиями) причинности; вообще обсуждение взаимоотношения принципов общей ковариантности и причинности. Некоторые из этих результатов были признаны фундаментальными и нашли отражение в основополагающих монографиях по ОТО [155, 448, 564]. Прежде всего, речь идет об условиях на метрику $g_{\alpha\beta}$ и, соответственно, на допустимые преобразования, вытекающих из псевдориманова

* В 1801 г. немецкий математик и геодезист Зольднер [417, 531] на основе корпускулярной теории света, ньютоновской механики и представления о равенстве инертной и гравитационной масс для световых частиц рассчитал отклонение света в поле тяготения Солнца, совпавшее с результатом, полученным Эйнштейном из принципа эквивалентности. Эта работа Зольднера была использована противниками теории относительности [4, 62, 383, 417].

характера пространства — времени в ОТО и связанного с ним принципа причинности. Эти условия обусловлены тем, что в допустимых системах координат три первые координатные оси должны быть всегда пространственноподобными, а четвертая — времениподобной. Тогда допустимые преобразования выделяются четырьмя инвариантными неравенствами:

$$g_{11} > 0, \quad \begin{vmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{vmatrix} > 0, \quad \begin{vmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{vmatrix} > 0, \quad g_{44} < 0.$$

Другой важный результат был связан с более строгим обоснованием приближенного решения уравнений гравитации.

Под влиянием гильбертовских «Оснований физики» ОТО заинтересовались многие геттингенские математики, прежде всего Клейн, который попытался прояснить вопрос о сохранении энергии-импульса, поднятый Гильбертом.

Во второй половине 1917 г. состоялся обмен письмами между Клейном и Гильбертом, посвященными этому вопросу и затем опубликованными в четвертой тетради «Goettinger Nachrichten» за 1917 г. [21]. Именно в этой работе Гильберт впервые очень четко сформулировал отсутствие закона сохранения энергии-импульса в ОТО в общем случае: «...Я утверждаю... что для общей теории относительности, т. е. в случае общей инвариантности гамильтоновой функции, уравнений энергии, которые... соответствуют уравнениям энергии в ортогонально-инвариантных теориях, вообще не существует, я даже мог бы отметить это обстоятельство как характерную черту общей теории относительности» [423, с. 561]. «Уравнения энергии» в ОТО заменяются четырьмя тождествами, которые при предельном переходе к плоскому пространству — времени сводятся, как это показал Гильберт, к обычным законам сохранения. Эти работы Клейна и Гильберта явились важным шагом в прояснении проблемы сохранения энергии-импульса в ОТО и установлении теорем Нетер [21].

Характерными чертами этих результатов Гильберта было, во-первых, то, что они были связаны не с его единой теорией, а с анализом проблем собственно ОТО, и, во-вторых, с его стремлением углубить физические аспекты этой теории. Здесь, очевидно, сказалось критическое отношение Эйнштейна к аксиоматико-синтетической программе Гильберта и чрезмерной математической сложности первого сообщения «Оснований физики».

После триумфального подтверждения ОТО посредством наблюдений гравитационного отклонения света во время солнечного затмения в 1919 г. эйнштейновскую теорию признали во всем мире. Число работ в этой области резко возрастает [449]. Эйнштейн становится легендарной и всемирно известной личностью. Его действительно огромные заслуги в этой области в какой-то мере оттеняют важные достижения других ученых на второй план. Постепенно имя Гильберта в связи с ОТО упоми-

настся все реже, несмотря на то, что и Паули и Вейль в своих монографиях весьма высоко оценили его вклад в эту область [155, 564]. Эйнштейн в своих обзорных работах, в частности, в принстонских лекциях (1921) [285] вообще не упоминает о работах Гильберта. Возможно, именно это обстоятельство привело к тому, что Гильберт в 1924 г. еще раз публикует свои «Основания физики», несколько модернизируя их, в широко известном журнале «*Mathematische Annalen*» [396]. Мехра считает, что Гильберт сделал это, чтобы напомнить о своем вкладе в ОТО [458, 459], он хотел также напомнить, что столь популярное в эти годы направление единых геометризованных теорий поля, восходит к его работе 1915 г.

Вспомним, что после работы Вейля (1918) [562] это направление, несмотря на критику Эйнштейна, находит все большее число сторонников (Эддингтон, Картан, Калуза и др.).

Наконец, начиная с 1923 г. к нему примыкает и сам Эйнштейн [31, 290], долгое время находившийся в оппозиции ко всевозможным попыткам синтеза гравитации и электромагнетизма.

По-видимому (и об этом говорит, например, письмо Эйнштейна к Борну от 3 марта 1920 г.), проблема единой теории поля и ее связи с квантовой теорией начинают глубоко интересовать Эйнштейна уже в 1920 г.: «Все свое свободное время я размышляю о квантовой проблеме с релятивистских позиций. Я не верю в то, что теории придется отказаться от континуальных представлений. Но мне никак не удается придать осмысленные формы моей навязчивой идее понять квантовую структуру с помощью дифференциальных уравнений» [156, I, с. 16]. Борн комментирует это так: «Идея Эйнштейна о возможности разъяснить квантовую структуру в рамках обычного описания с помощью дифференциальных уравнений, которые дополнялись бы таким образом, чтобы быть внутренне согласованным, занимала его в течение ряда лет. Мы часто беседовали с ним об этом. Хотя из этого ничего не получилось, он настолько сильно верил в плодотворность этой идеи, что не оставил ее и после возникновения квантовой механики» [156, I, с. 16].

В 1919 г. он публикует работу «Играют ли гравитационные поля существенную роль в построении элементарных частиц материи?», в которой уже ясно выражен поворот эйнштейновской мысли к концепции единой теории поля, которая бы позволила решить проблему структуры материи [31, 281]. Решающую роль в этом повороте сыграла, очевидно, единая теория Вейля. Эйнштейн вспоминает о теориях Ми, и Гильберта: «Теоретики много потрудились над тем, чтобы придумать теорию, которая объяснила бы равновесие электричества, образующего электрон. Особенно глубокие исследования посвятил этому вопросу Ми. Его теория, не раз встречавшая одобрение специалистов ... Как ни стройна с формальной точки зрения эта теория, развитая Ми, Гильбертом и Вейлем, все же физические результаты не могут до сих пор нас удовлетворить» [281, с. 664]. Эйнштейн предлагает в этой статье некоторую модификацию уравнений гравитации, позволяющую «теоретически ... построить материю исключительно из гравитационного и электромагнитного полей без введения гипотетических дополнительных членов в духе теории Ми» [281, с. 671]. Впрочем, эта модификация, как указывает Эйнштейн, сталкивается с большими теоретическими трудностями, которые не дают возможности «в настоящий момент ре-

шить проблему построения элементарных частиц ... на основе указанных уравнений поля» [281, с. 671].

Между тем, в это время Гильберт уже оставляет физическую тематику. Вейль датирует конец «физического» периода в творчестве Гильберта 1922 г. [567, с. 613]. Об этом же свидетельствует письмо Борна к Эйнштейну от 7 апреля 1923 г., в котором он пишет, что «Гильберт следит за этим (т. е. за работами по гравитации и единым теориям.— В. В.) в полглаза, поскольку он с головой ушел в свое новое обоснование логики и математики» [156, с. 42]. И все же Гильберт, который в это время целиком погружен в проблемы «обоснования логики и математики», готовит большую публикацию для известного во всем мире математического журнала, фактически, повторяющую его «Основания физики» 1915—1916 гг. С тех пор прошло около десяти лет, но позиция Гильберта, в сущности, не изменилась. Он, по-прежнему, приверженец «теоретико-полевого идеала единства» («Einheitsideal») физики, который был глубоко разработан Г. Ми и для достижения которого новые пути открыла ОТО Эйнштейна. Он подчеркивает, что работы, прежде всего, Вейля и Эйнштейна (речь, очевидно, идет о его статьях 1923 г. по единой теории) вполне созвучны его «Основаниям физики» [396, с. 529], которые «содержат некоторую твердую сердцевину (ein bleibender Kern) и указывают рамки, внутри которых достаточно места для будущего построения физики в смысле теоретико-полевого идеала единства» [там же]. Таким образом, Гильберт хотел напомнить не столько о своем выводе уравнений гравитации и вообще вкладе в ОТО, сколько о своей программе построения единой физической теории. Эта публикация Гильберта была как бы эстафетной палочкой, которую геттингенский пионер теоретико-полевого общерелятивистского синтеза физики передавал другим теоретикам, прежде всего Эйнштейну, который на протяжении 30 лет до конца жизни с неслыханным упорством пытался решить проблему, выдвинутую, в сущности, Гильбертом. Многие выдающиеся теоретики XX в. время от времени, даже после открытия квантовой механики, обращались к программе Гильберта — Вейля — Эйнштейна. Среди них были физики Эддингтон, Паули, Шредингер и др., математики Э. Картан, Веблен, Схоутен и др., но все они рано или поздно отходили в сторону, и только Эйнштейн продолжал свой путь, оставаясь к концу жизни все в большей научной изоляции. Но история единых теорий поля, даже в начальной своей стадии, не является предметом изучения в этой работе. Она была затронута лишь постольку, поскольку касалась гильбертовского вклада в ОТО, особенно его вывода общековариантных уравнений гравитационного поля.

Выводы. Общековариантные уравнения гравитационного поля, составляющие ядро ОТО, на которой основаны современные релятивистские теории тяготения, космологии и астрофизики, были установлены Эйнштейном в работе, представленной Прус-

ской академии наук 25 ноября 1915 г., и независимо Гильбертом в работе, доложенной на заседании Геттингенского научного общества 20 ноября 1915 г.

Гильберт в своем выводе уравнений поля опирался на предыдущие исследования Эйнштейна по ОТО 1913—1915 гг. и ссылался на него. Однако маловероятно, что он до 20 ноября знал о ноябрьских работах Эйнштейна, в которых последний вернулся к требованию общей ковариантности уравнений гравитации, хотя нельзя исключить возможности, что Эйнштейн послал Гильберту копии своих работ, представленных Прусской академии наук 4 и 11 ноября. В последнем случае вторая работа Эйнштейна (от 11 ноября), в которой он выдвинул «электромагнитную» гипотезу о структуре «материи», могла стимулировать Гильберта. Вместе с тем, более вероятно, что Гильберт пришел к своей единой теории поля, опираясь на идеи нелинейной электродинамики Г. Ми и работы Эйнштейна 1913—1914 гг.

Ссылки Гильберта на все ноябрьские статьи Эйнштейна, включая работу, доложенную 25 ноября, говорят о том, что он включил их при подготовке доклада к публикации. Не вполне ясно, впрочем, когда они стали ему известны и когда был закончен тот текст «Оснований физики», который был опубликован.

Несмотря на наличие некоторых неясностей о взаимной осведомленности Гильберта и Эйнштейна о ноябрьских работах друг друга, детальный анализ каждого из них к общековариантным уравнениям гравитационного поля позволяет с большой уверенностью сделать вывод о практически одновременном и независимом открытии ими знаменитых уравнений.

В основе эйнштейновского творчества в области гравитации лежала релятивистская программа, связанная с последовательным распространением принципа относительности на всю физику. Определяющей научной традицией была теоретико-физическая традиция, порожденная выделением в конце прошлого века теоретической физики в самостоятельную область деятельности и связанная с именами Больцмана, Лоренца, Планка. Гильберт же придерживался характерной для геттингенской традиции математической физики программы синтеза физического знания на основе его интенсивной математизации. Характерной чертой гильбертовской программы было также стремление к аксиоматизации физики.

Общими чертами их программ были признание фундаментальности концепции поля и принципа общей ковариантности, органически связанного с введением в теорию математического аппарата римановой геометрии и тензорного исчисления.

Ценный дополнительный материал для анализа проблемы генезиса уравнений гравитации дает изучение взаимоотношений Эйнштейна и Гильберта и оценок работы каждого из них друг другом. В этом отношении большой интерес представляет встреча Эйнштейна с Гильбертом в июле 1915 г. в Геттингене, а также реакция Эйнштейна на теорию Гильберта в переписке с Зом-

мерфельдом, Эренфестом, Вейлс, Бессо и Борном. Вероятно июльская встреча Эйнштейна и Гильберта была взаимно стимулирующей, но по-разному. Эйнштейна она могла подтолкнуть к последнему решающему шагу — возврату на путь общей ковариантности. Для Гильберта же она могла послужить исходным пунктом для его работы в области ОТО.

Несмотря на критическое отношение Эйнштейна к единой теории Гильберта и ее аксиоматико-дедуктивной направленности, некоторые основные результаты Гильберта были оценены им достаточно высоко (вариационный вывод уравнений поля и теорема Гильберта о четырех тождествах, важная для понимания проблем причинности и сохранения энергии-импульса в ОТО). Гильберт же всегда подчеркивал бесспорное лидерство Эйнштейна в области ОТО, считая его автором всех основных физических идей и большинства конкретных следствий. Между ними никогда не возникало приоритетных разногласий, напротив, отношения между ними были вполне дружескими.

Программа единых теорий поля, основанных на ОТО, была выдвинута впервые Гильбертом еще в 1915 г. Эйнштейн же до начала 20-х годов весьма критически относился к этой программе, полагая, что ОТО связана исключительно с гравитацией. После того, как Гильберт окончательно отошел в начале 20-х годов от физической проблематики и центр тяжести своих интересов перенес в область оснований математики, Эйнштейн встал на рельсы программы единых геометризованных теорий поля, которую безуспешно пытался реализовать на протяжении тридцати лет. Тем самым, он, осуществив свою программу релятивизации физики, принял затем программу Гильберта, к которой первоначально относился критически.

В самом начале 20-х годов физики знали и помнили о фундаментальном вкладе Гильберта в ОТО и проблему единых теорий поля (прежде всего, его вариационный вывод уравнений поля независимо от Эйнштейна). Это нашло отражение в наиболее глубоких монографиях по ОТО, написанных Вейлем и Паули. Но затем постепенно об этом стали забывать, и в современных работах по ОТО и даже по ее истории имя Гильберта встречается редко. Это забвение объясняется не только тем, что современные ученые зачастую не знают историю вопроса и не всегда читают классику, но, главным образом, тем, что огромная фигура Эйнштейна, бесспорного лидера в этой области, ставшая, благодаря его гигантским усилиям и неповторимому творческому облику, легендарной, заслонила некоторых других исследователей проблемы гравитации, в частности Гильберта. ОТО в своем развитии органически впитала важные результаты, полученные им, и хотя имя Гильберта не всегда связывается с этими результатами, методы и идеи, развитые им, входят в золотой фонд современной релятивистской теории поля*.

* В последние годы положение изменилось: появился ряд работ, посвященных гильбертовскому вкладу в ОТО [3, 21, 23, 29, 343, 383, 458, 459, 504].

Приложение

Переписка Эйнштейна и Гильберта в ноябре 1915 г. *

Появление статьи Дж. Ирмена и К. Глимора в ноябрьском выпуске трудов Делловского «Архива» [343] дополняет картину открытия уравнений гравитации, описанную в третьей и четвертой главах. Авторы этой статьи разыскали в прinstonском архиве Эйнштейна переписку Эйнштейна и Гильберта [347]. Оказалось, что именно в ноябре 1915 г. состоялся интенсивный обмен письмами между теоретиками и что письма эти были связаны как раз с последним этапом создания ОТО — открытием общековариантных уравнений гравитации.

Напомним, что Эйнштейн делал свои «академические» доклады 4, 11, 18 и 25 ноября, а Гильберт — 20 ноября [29]. 4 ноября Эйнштейн отказался от своей теории 1914 г., в которой уравнения поля не были общековариантными, и вернулся к общековариантным по замыслу уравнениям:

$$R_{ik} = -\kappa T_{ik} \quad (\text{П.1})$$

с одним, впрочем, ограничением: условием унимодулярности $\sqrt{-g}=1$. 7 ноября он посылает Гильберту корректуру этого доклада и открытку, в которой сообщает свои результаты. В открытке имеется замечание, что он уже «примерно за четыре недели» до этого понял «иллюзорность» своих нековариантных уравнений 1914 г. Это, кстати говоря, подтверждается письмом Эйнштейна к Лоренцу от 12 октября, в котором он выражает сомнение в обоснованности полевых уравнений 1914 г. (переписка Эйнштейна и Лоренца также хранится в прinstonском архиве Эйнштейна и еще не опубликована [347]). Из письма можно заключить, что Гильберт мог сыграть существенную роль в возникновении этих сомнений.

Ответное письмо Гильберта не сохранилось, но ясно, что оно было написано до 12 ноября, так как 12 ноября, сразу после своего доклада 11 ноября, Эйнштейн пишет новое письмо, в котором благодарит своего геттингенского коллегу за «доброе письмо», в нем он сообщает об установлении им полностью общековариантных уравнений поля. Самых этих уравнений нет в тексте письма, но, несомненно, имеются в виду полевые уравнения

$$G_{ik} = -\kappa T_{ik}, \quad (\text{П.2})$$

ограниченные условием обращения в нуль следа тензора энергии-импульса материи T_{ik} , что означало принятие гипотезы об электромагнитной природе материи.

* См. статью [37].

Через день, то есть 14 ноября, Гильберт отвечает сравнительно длинным письмом, написанном на двух отдельных открытках. Он рассказывает о своей единой теории поля, изложенной в его докладе «Основания физики» [29], который был сделан через неделю после этого письма. Хотя уравнения гравитации, обнародованные Гильбертом 20 ноября,

$$G_{ik} - 1/2 g_{ik} G = -\kappa T_{ik}, \quad (\text{П.3})$$

где T_{ik} совпадает с соответствующим тензором теории Ми (и поэтому имеет нулевой след), в этом письме отсутствуют, текст письма говорит о том, что к этому времени теория Гильберта была закончена. Об этом же говорит и то, что Гильберт приглашает Эйнштейна на свой доклад в Геттингенском математическом обществе, который был назначен на 23 ноября (но состоялся, как мы знаем, 20 ноября). Гильберт подчеркивает также радикальное отличие своей теории от теории Эйнштейна. Не вполне ясно, имел ли он в виду эйнштейновскую теорию 4 ноября, 11 ноября или обе эти теории. Вероятно, он имел в виду то, что его теория была не столько теорией тяготения, сколько единой теорией гравитации и электромагнетизма, и существенно опиралась при этом на нелинейную электродинамику Ми.

15 ноября Эйнштейн уже пишет ответное письмо. Поражает, кстати говоря, четкость и быстрота почтового обслуживания. Эйнштейн проявляет большой интерес к теории Гильберта, называя ее «мостом между гравитацией и электромагнетизмом», и просит прислать текст подготовленного Гильбертом доклада: «Идя навстречу моему нетерпению, пришлите мне, пожалуйста, если можно, корректуру Вашего исследования» («Schicken Sie mir bitte, wenn möglich, ein Korrektur — exemplar Ihrer Untersuchung, um meiner Ungeduld entgegenzukommen») [343, с. 301]. Но от приглашения приехать в Геттинген Эйнштейн отказывается, ссылаясь на усталость и нездоровье. Тем не менее, в эти дни, предшествующие докладу 18 ноября, Эйнштейн работал исключительно интенсивно, занимаясь расчетом движения перигелия Меркурия на основе уравнений

$$G_{ik} = 0 \text{ или } R_{ik} = 0, \quad (\text{П.4})$$

в которые при отсутствии T_{ik} переходят уравнения (П.1), и (П.2), и (П.3).

Текст гильбертовского доклада он получает до 18 ноября, так как в этот день он пишет новое письмо в Геттинген, в котором благодарит своего адресата и замечает, что уравнения Гильберта согласуются с его собственными (очевидно, уравнениями 11 ноября): «Насколько я могу судить, полученная Вами система в точности совпадает с тем, что я нашел в течение последних недель и представил в Академию» [343, с. 302].

Почему Эйнштейн считал одинаковыми свои уравнения (П.2) и гильбертовские уравнения (П.3)? Ведь уравнения (П.3), скорее, эквивалентны окончательным уравнениям гравитации, обнародованным Эйнштейном 25 ноября:

$$G_{ik} = -\kappa(T_{ik} - 1/2 g_{ik} T). \quad (\text{П.5})$$

Дело в том, что в теории Гильберта предполагается, как и в эйнштейновской теории 11 ноября, «бесследовость» тензора T_{ik} , а в этом случае уравнения (П.5) и эквивалентные им в общем случае уравнения (П.3) сводятся к уравнениям (П.2). Но исключает ли это возможность влияния гильбертовских уравнений (П.3) на установление Эйнштейном уравнений (П.5)? Конечно нет, хотя логика рассуждений и способ получения этих последних в работе Эйнштейна не имеют ничего общего с формальной вариационной процедурой

гильбертовского вывода. В этом же письме Эйнштейн сообщает о полученном им объяснении на основе уравнений (П.4) аномальной прецессии перигелия Меркурия.

Последним известным письмом этого цикла переписки была открытка Гильберта от 19 ноября, в которой он поздравил Эйнштейна с блестящим результатом относительно Меркурия и заметил, что, если бы он умел считать так же быстро, как Эйнштейн, он объяснил бы, почему электрон в атоме водорода не излучает. В этом замечании еще раз проявилась устремленность Гильберта к полевому синтезу физики, в частности, к решению на этой основе проблемы квантов и строения атома. На этом переписка обрывается. 20 ноября Гильберт докладывает свою теорию и, в частности, уравнения тяготения (П.3) с «бесследовым» тензором T_{ik} , характерным для теории Ми. 25 ноября докладывает Эйнштейн об уравнениях (П.5), эквивалентных по форме гильбертовским уравнениям, но с произвольным тензором T_{ik} . Опубликованный текст доклада Гильберта содержит ссылки на все четыре ноябрьские статьи Эйнштейна. Это означает, что он подготавливался к печати уже после эйнштейновского доклада 25 ноября, в опубликованной версии которого нет упоминаний о Гильберте и его уравнениях.

Авторы нашли еще одно письмо Эйнштейна к Гильберту, написанное через месяц после описываемых событий (20 декабря). Оно в какой-то мере объясняет резкий обрыв переписки и отсутствие ссылки на Гильберта в эйнштейновском докладе 25 ноября. «Случай побуждает меня,— писал Эйнштейн,— сказать Вам то, что для меня важнее. В наших отношениях возникла известная трещина («eine gewisse Verstimmung»), причины которой мне не хочется анализировать. Я старался, и не без успеха, противостоять связанному с этим чувству горечи. Я снова думаю о Вас с искренним радушием («in ungetübter Freundlichkeit») и прошу Вас попытаться думать обо мне так же. Действительно, досадно, когда два настоящих парня («zwei wirkliche Kerle»), которые с трудом вырвались из этого подлого мира, не доставляют друг другу радости» («nicht gegenseitig zur Freude gereichen»). «Трещина» в отношениях теоретиков возникла, вероятно, после доклада Гильберта (19 ноября датировано последнее письмо этого цикла). Возможно, кем-то из них были сказаны обидные или резкие слова, связанные с приоритетом в установлении уравнений гравитации (3) или (5). Возможно, первоначальная версия гильбертовского доклада, которой мы не располагаем, недостаточно, с точки зрения Эйнштейна, учитывала основополагающий вклад Эйнштейна в развитие проблемы. Последнего, впрочем, никак нельзя сказать про опубликованный вариант доклада Гильберта, с корректурой которого Эйнштейн, как предполагают авторы, познакомился лишь во второй декаде декабря. Гильберт цитировал все ноябрьские работы Эйнштейна, говорил о «грандиозной теории общей относительности, выдвинутой Эйнштейном в его последних работах», называл свои уравнения (П.3) «созвучными» теории Эйнштейна, не претендуя тем самым на открытие полевых уравнений и завершение ОТО. По-видимому, Эйнштейн расценил это как шаг Гильберта к примирению, чем и объясняется тон и содержание декабрьского письма Эйнштейна. Так, увлекательная история открытия уравнений гравитации, благодаря обнаружению ноябрьской переписки Эйнштейна и Гильберта, становится более понятной и более драматичной. Может лишь пожалеть о том, что авторы статьи не опубликовали этот замечательный документ истории человеческой мысли и человеческих отношений.

Литература

1. *Алексеев И. С., Печенкин А. А.* Принцип наблюдаемости.— В кн.: «Методологические принципы физики. М.: Наука, 1975, с. 451—477.
2. *Алексеев И. С.* Единство физической картины мира как методологический принцип.— Там же, с. 128—203.
3. Альберт Эйнштейн и теория гравитации: Сб. статей. М.: Мир, 1979.
4. *Арзелье А.* Исторические и библиографические заметки.— В кн.: Эйнштейновский сборник. 1973. М.: Наука, 1974, с. 267—359.
5. *Баранов А. Г.* Искривление световых лучей в гравитационном поле и скорость распространения гравитации.— В кн.: Эйнштейновский сборник. 1969—1970. М.: Наука, 1970, с. 99—107.
6. *Бергман П.* Загадка гравитации/Пер. В. А. Угарова. М.: Наука, 1969.
7. *Богородский А. Ф.* Всмирное тяготение. Киев: Наукова думка, 1971.
8. *Бологовский Б. М.* Уникальное издание.— Природа, 1979, № 3, с. 58—61.
9. *Больцман Л.* О принципах механики.— В кн.: Статьи и речи. М.: Наука, 1970, с. 136—162.
10. *Борн М.* Физика в жизни моего поколения/Пер. под ред. С. Г. Суворова. М.: ИЛ, 1963.
35.
11. *Борн М.* Моя жизнь и взгляды. М.: Прогресс, 1973.
12. *Брагинский В. Б.* Экспериментальная проверка теории относительности.
13. *Борн М.* Размышления и воспоминания физика. М.: Наука, 1977, с. 24—М.: Знание, 1977.
14. *Брумберг В. А.* Релятивистская небесная механика. М.: Наука, 1972.
15. *Вавилов С. И.* Экспериментальные основания теории относительности. М.: Л.: ГИЗ, 1928.
16. *Ван дер Варден Б. Л.* Алгебра. М.: Наука, 1976.
17. *Вебер Дж.* Гравитация и свет.— В кн.: Гравитация и относительность/Под ред. Х. Цю и В. Гоффмана; Пер. Д. В. Белова и Н. В. Мицкевича. М.: Мир, 1965, с. 374—387.
18. *Вейль Г.* Комментарий к мемуару Римана.— В кн.: Об основаниях геометрии. М.: ГИТТЛ, 1956, с. 325—341.
19. *Вейль Г. Д.* Гильберт и его математические труды.— В кн.: *Рид К.* Гильберт. М.: Наука, 1977, с. 308—360.
20. *Вейнберг С.* Гравитация и космология/Под ред. Я. А. Смородинского. М.: Мир, 1975.
21. *Визгин В. П.* Развитие взаимосвязи принципов инвариантности с законами сохранения в классической физике. М.: Наука, 1972.
22. *Визгин В. П.* Роль М. Гроссмана в генезисе общей теории относительности.— Тр. XIV и XV науч. конф. аспирантов и мл. науч. сотр. ИИЕТ АН СССР. М.: ВИНТИ, 1974, с. 12—16.
23. *Визгин В. П.* Эйнштейн и Гильберт.— Там же, с. 17—26.
24. *Визгин В. П.* Из истории конформной симметрии в физике.— Историко-математические исследования. М.: Наука, 1974, вып. 19, с. 188—219.
25. *Визгин В. П.* Эрлангенская программа и физика. М.: Наука, 1975.
26. *Визгин В. П.* Путь Эйнштейна к общековариантным уравнениям гравитационного поля.— История и методология естественных наук. М.: МГУ, 1975, вып. 17, с. 56—75.
27. *Визгин В. П.* Принцип симметрии.— В кн.: Методологические принципы физики/Под ред. Б. М. Кедрова и Н. Ф. Овчинникова. М.: Наука, 1975, с. 268—342.

28. *Визгин В. П.* Один из аспектов методологии Эйнштейна.— *Вопр. истории естествозн. и техники*, 1976, вып. 3, с. 16—24.
29. *Визгин В. П.* Гильберт и проблема общековариантных уравнений гравитация.— *Историко-математические исследования*. М.: Наука, 1979, вып. 24, с. 226—246.
30. *Визгин В. П.* Теория тяготения на рубеже XIX и XX вв.— В кн.: *Эйнштейновский сборник*. 1975—1976. М.: Наука, 1978, с. 245—282.
31. *Визгин В. П.* Эйнштейн и другие. К истории создания общей теории относительности.— *Природа*, 1979, № 3, с. 27—43.
32. *Визгин В. П.* Эйнштейн и проблема построения научной теории (на материале общей теории относительности).— *Вопросы философии*, 1979, № 10, с. 56—64.
33. *Визгин В. П.* Роль принципа соответствия в генизисе общековариантных уравнений гравитационного поля.— В кн.: *Принцип соответствия/ Под ред. Б. М. Кедрова и Н. Ф. Овчинникова*. М.: Наука, 1979, с. 152—160.
34. *Визгин В. П.* Эксперимент и общая теория относительности.— *Вопр. истории естествозн. и техники*, 1980, вып. 67/68, с. 22—33.
- 35/36. *Визгин В. П., Смородицкий Я. А.* От принципа эквивалентности к уравнениям тяготения.— *УФН*, 1979, т. 128, с. 393—434.
37. *Визгин В. П.* К истории открытия уравнений гравитации (Эйнштейн и Гильберт).— *Историко-математические исследования*, 1980, вып. 25, с. 261.
38. *Владимиров Ю. С.* Квантовая теория гравитации.— В кн.: *Эйнштейновский сборник*. 1972. М.: Наука, 1974, с. 280—340.
39. *Вокулер Ж.* *Астрономическая фотография*. М.: Наука, 1975.
40. *Вяльцев А. Н.* Предсказания в физике элементарных частиц.— В кн.: *Прогнозирование в учении о периодичности*. М.: Наука, 1976.
41. *Гарцер П.* *Звезды и пространство*.— В кн.: *Новые идеи в математике*. СПб.: Образование, 1913, вып. 3, с. 71—116.
42. *Гельфер Я. М.* *История и методология термодинамики и статистической физики*. М.: Высшая школа, 1973, т. 2.
43. *Гернек Ф.* *Альберт Эйнштейн/Пер. В. Я. Фридмана*. М.: Прогресс, 1966.
44. *Гильберт Д.* *Основания геометрии/Пер. И. С. Градштейна*. М.; Л.: ГИТТЛ, 1948.
45. *Гильберт Д.* *Основания физики*.— В кн.: *Вариационные принципы механики/Под ред. Л. С. Полака*. Е.: ГИФМЛ, 1959, с. 589—598.
46. *Гильберт Д.* *Математические проблемы*.— В кн.: *Проблемы Гильберта/ Под ред. П. С. Александрова*. М.: Наука, 1969, с. 11—64.
47. *Гинзбург В. Л.* *Альберт Эйнштейн. Собрание научных трудов (в четырех томах)*.— В кн.: *Эйнштейновский сборник*. 1969—1970. М.: Наука, 1970, с. 390—404.
48. *Гинзбург В. Л.* *Гелиоцентрическая система и общая теория относительности (от Коперника до Эйнштейна)*.— В кн.: *Эйнштейновский сборник*. 1973. М.: Наука, 1974, с. 19—83.
49. *Гинзбург В. Л.* *Как и кто создал теорию относительности?*— В кн.: *Эйнштейновский сборник*. 1974. М.: Наука, 1976, с. 351—384.
50. *Гинзбург В. Л.* *Об экспериментальной проверке общей теории относительности*— *УФН*, 1979, т. 128, с. 435—458.
51. *Гинзбург В. Л.* *О теории относительности*. М.: Наука, 1979.
52. *Голдберг С.* *Молчание Пуанкаре и теория относительности Эйнштейна*.— В кн.: *Эйнштейновский сборник*. 1972. М.: Наука, 1974, с. 341—358.
53. *Гольдгаммер Д.* *Возрождение гипотезы Лесажа*. Н. Новгород, 1901.
54. *Григорьян А. Т., Розенфельд Б. А.* *Теория винтов и неевклидова механика*— В кн.: *История механики с конца XVIII в. до середины XX в./ Под ред. А. Т. Григорьяна и И. Б. Погребысского*. М.: Наука, 1972, с. 338—346.
55. *Делокаров К. Х.* *Эйнштейн и Мах*.— В кн.: *Эйнштейн и философские проблемы физики XX века*. М.: Наука, 1979, с. 484—503.
56. *Джеммер М.* *Понятие массы/Пер. Н. Ф. Овчинникова*. М.: Прогресс, 1967.
57. *Дикке Р.* *Об экспериментальном базисе общей теории относительности*.— В кн.: *Гравитация и относительность/Под. ред. Х. Цю и В. Гоффмана; Пер. Д. В. Белова и Н. В. Минкевича*. М.: Мир, 1965, с. 48—72.

58. Дикке Р. Многоликий Мах.— Там же, с. 221—250.
59. Дикке Р. Теория гравитации и наблюдения. В кн.: Эйнштейновский сборник. 1969—1970. М.: Наука, 1970, с. 108—139.
60. Дикке Р. Гравитация и Вселенная. М.: Мир, 1972.
61. Дискуссия по докладу А. Эйнштейна «К современному состоянию проблемы гравитации» на 85-м собрании немецких естествоиспытателей в Вене в 1913 г.— В кн.: Эйнштейновский сборник. 1971. М.: Наука, 1972, с. 361—370.
62. Зелиг К. Альберт Эйнштейн. М.: Атомиздат, 1964.
63. Зельдович Я. Б. Творчество Эйнштейна и астрономия.— Земля и Вселенная, 1979, № 2, с. 10—19.
64. Зельдович Я. Б. Альберт Эйнштейн, его время и творчество.— Природа, 1979, № 3, с. 5—7.
65. Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Релятивистская астрофизика. М.: Наука, 1967.
66. Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Теория тяготения и эволюция звезд. М.: Наука, 1971.
67. Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Стрoение и эволюция Вселенной. М.: Наука, 1975.
68. Зоммерфельд А. Примечания к работе Г. Минковского «Пространство и время».— В кн.: Принцип относительности. Л.: ОНТИ, 1935, с. 203—213.
69. Зоммерфельд А. Электродинамика. М.: ИЛ, 1958.
70. Зоммерфельд А. Пути познания в физике/Под ред. Я. А. Смородинского. М. Наука, 1973.
71. Иваненко Д. Д., Фредерикс В. К. Примечания.— В кн.: Принцип относительности. Л.: ОНТИ, 1935, с. 360—387.
72. Иваненко Д. Д. Основные идеи общей теории относительности.— В кн.: Очерки развития основных физических идей/Под ред. А. Т. Григорьяна и Л. С. Полака. М.: Изд-во АН СССР, 1959, с. 288—322.
73. Иваненко Д. Д. Главные периоды исследования гравитации.— Вопр. истории естествозн. и техники, 1974, № 2—3, с. 42—48.
74. Иваненко Д. Д. Непреходящая актуальность теории гравитации Эйнштейна.— Вопр. истории естествозн. и техники, 1979, вып. 67/68, с. 3—14.
75. Идлис Г. М. Теория относительности и структурная бесконечность Вселенной.— Астрономический журнал, 1956, т. 33, с. 622—626.
76. Из переписки Зоммерфельда с Эйнштейном.— В кн.: А. Зоммерфельд. Пути познания в физике. М.: Наука, 1973, с. 191—246.
77. Инфельд Л. Несколько замечаний о теории относительности.— Вопросы философии, 1954, № 5, с. 173—178.
78. Инфельд Л. История развития теории относительности.— В кн.: Эйнштейн и современная физика. М.: ГИТТЛ, 1956, с. 183—196.
79. Инфельд Л. Мои воспоминания об Эйнштейне.— Там же, с. 197—260.
80. Итенберг И. Я., Френк А. М. Комментарий к статье А. Пуанкаре «Динамика электрона».— В кн.: А. Пуанкаре. Избранные труды. М.: Наука, 1974, т. 3, с. 733—736.
81. Кагальникова И. П. История развития нерелятивистских представлений о природе гравитации.— Учен. зап. Ярослав. пед. ин-та, 1963, вып. 56, с. 87—188.
82. Кассирер Э. Теория относительности Эйнштейна/Пер. К. С. Берловича и И. Я. Колубовского. Петроград: Наука и школа, 1922.
83. Клиффорд В. О пространственной теории материи.— В кн.: Альберт Эйнштейн и теория гравитации. М.: Мир, 1979, с. 36—37.
84. Клиффорд В. Здравый смысл точных наук.— Там же, с. 38—48.
85. Кобзарев И. Ю. Доклад А. Пуанкаре и теоретическая физика накануне создания теории относительности.— УФН, 1974, т. 113, с. 679—694.
86. Кобзарев И. Ю. Эйнштейн, М. Планк и атомная теория.— Природа, 1979, № 3, с. 8—26.
87. Кобзарев И. Ю. Эйнштейн и теоретическая физика первой половины XX в.— В кн.: Эйнштейн и современная физика. М.: Знание, 1979, с. 3—21.

88. *Коноплева Н. П.* Гравитационные эксперименты в космосе.—УФН, 1977, т. 123, с. 537—567.
- 89/90. *Коноплева Н. П.* Об эволюции понятия инерции Ньютон, Мах, Эйнштейн.—В кн.: Эйнштейновский сборник. 1975—1976. М.: Наука, 1978, с. 216—244.
91. *Коноплева Н. П.* Понятие инерции и принцип симметрии.—В кн.: Принцип симметрии/Под ред. Б. М. Кедрова и Н. Ф. Овчинникова. М.: Наука, 1978, с. 196—221.
92. *Коноплева Н. П., Попов В. Н.* Калибровочные поля. М.: Атомиздат, 1972.
93. *Копф А.* Основы теории относительности Эйнштейна/Пер. В. К. Фредерикса. М.; Л.: ГТТИ, 1933.
94. *Козн Б.* Беседа с Эйнштейном.—В кн.: Эйнштейновский сборник, 1962. М.: Наука, 1967, с. 45—56.
95. *Кудрявцев П. С.* История физики. М. Учпедгиз, 1956, т. 2.
96. *Кудрявцев П. С.* История физики. М.: Просвещение, 1971, т. 3.
97. *Кузнецов Б. Г.* Основы теории относительности и квантовой механики в их историческом развитии. М.: Изд-во АН СССР, 1957.
98. *Кузнецов Б. Г.* Принцип относительности в античной, классической и квантовой физике. М.: Изд-во АН СССР, 1959.
99. *Кузнецов Б. Г.* Эйнштейн. М.: Изд-во АН СССР, 1962.
100. *Кузнецов Б. Г.* Этюды об Эйнштейне. М.: Наука, 1965.
101. *Кун Т.* Структура научных революций. М.: Прогресс, 1975.
- 102/103. *Лакатос И.* История науки и ее рациональные реконструкции.—В кн.: Структура и развитие науки/Под ред. Б. С. Грязнова и В. Н. Садовского. М.: Прогресс, 1978, с. 203—269.
104. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теория поля. М.: Наука, 1973.
105. *Ландсберг Г. С.* Отклонение свста в гравитационном поле Солнца (результаты английских экспедиций по наблюдению солнечного затмения 1919 г.).—УФН, 1921, т. 2, с. 189—193.
106. *Ланжевэн П.* Избранные произведения. Статьи и речи по общим вопросам науки/Пер. З. А. Цейтлина. М.: Изд-во иностр. лит., 1949.
107. *Ланжевэн П.* Исследования в области ионизированных газов.—В кн.: Избранные труды/Пер. под ред. О. А. Старосельской-Никитиной. М.: Изд-во АН СССР, 1960, с. 7—196.
108. *Ланцош К.* Эйнштейн и строение космоса/Пер. В. А. Угарова. М.: Наука, 1967.
109. *Лауэ М.* История физики. М.: ГИТТЛ, 1956.
110. *Лауэ М.* К экспериментальной проверке общей теории относительности.—В кн.: *Лауэ М.* Статьи и речи/Пер. под ред. Л. С. Фреймана. М.: Наука, 1969, с. 77—78.
111. *Лауэ М.* К теории красного смещения спектральных линий у Солнца.—Там же, с. 79—85.
112. *Лауэ М.* О движении перигелия Меркурия (историко-критический очерк).—Там же, с. 86—89.
113. *Лауэ М.* Вилли Вин.—Там же, с. 103—118.
114. *Лауэ М.* Д-р Людвиг Ланге.—Там же, с. 153—162.
115. *Лауэ М.* Инерция и энергия.—Там же, с. 163—197.
116. *Лауэ М.* Жизненный путь Зоммерфельда.—Там же, с. 198—210.
117. *Лауэ М.* Теория познания и теория относительности.—Там же, с. 241—249.
118. *Лауэ М.* Альберт Эйнштейн.—Там же, с. 250—257.
119. *Лауэ М.* Эйнштейн и теория относительности.—Там же, с. 258—272.
120. *Лауэ М.* От Коперника до Эйнштейна.—Там же, с. 278—295.
121. *Левитская М. А.* Всемирное тяготение с исторической точки зрения.—ЖРФХО, Физ. отд., 1910, т. 42, с. 191—375; 1911, т. 43, с. 20—32.
122. *Ленар П.* О принципе относительности, эфире, тяготении/Пер. под ред. А. К. Тимирязева. М.: ГИЗ, 1922.
123. *Ленин В. И.* Полн. собр. соч. М.: Политиздат, 1958—1970.
124. *Лоренц Г. А.* Теория электронов/Пер. М. В. Савостьяновой. М.: ГИТТХ, 1956.

125. *Лоренц Г. А.* Старые и новые проблемы физики/Пер. А. Г. Баранова. В кн.: *Лоренц Г. А.* Старые и новые проблемы физики. М.: Наука, 1970, с. 69—99.
126. *Лоренц Г. А.* Две статьи Анри Пуанкаре о математической физике.— Там же, с. 155—170.
127. *Максвелл Д. К.* Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. М.: ГИТТЛ, 1959.
128. *Максвелл Д. К.* Речи и статьи/Под ред. Л. С. Фреймана. М.: Наука, 1968.
129. *Максвелл Д. К.* Атом.— В кн.: Речи и статьи. М.: Наука, 1968, с. 121—165.
130. *Максвелл Д. К.* Притяжение.— Там же, с. 166—173.
131. *Максвелл Д. К.* О действиях на расстоянии.— Там же, с. 48—62.
132. *Максвелл Д. К.* Эфир.— Там же, с. 193—206.
133. *Мамчур Е. А.* Проблема выбора теории. М. Наука, 1975.
134. *Мандельштам Л. И.* Лекции по физическим основам теории относительности.— В кн.: *Л. И. Мандельштам.* Лекции по оптике, теории относительности квантовой механике. М.: Наука, 1972.
135. *Мах Э.* Механика. СПб.: Общественная польза, 1909.
136. *Мах Э.* Принцип сохранения работы, СПб.: Общественная польза, 1909.
137. *Мах Э.* Познание и заблуждение.— В кн.: Альберт Эйнштейн и теория гравитации. М.: Мир, 1979, с. 73—84.
138. *Меллер К.* Теория относительности/М.: Атомиздат, 1975.
139. Методологические принципы физики/Под ред. Б. М. Кедрова и Н. Ф. Овчинникова. М.: Наука, 1975.
140. *Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж.* Гравитация. М.: Мир, 1977, т. 1.
141. *Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж.* Гравитация. М.: Мир, 1977, т. 2.
142. *Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж.* Гравитация. М.: Мир, 1977, т. 3.
143. *Ми Г.* Молекулы, атомы, мировой эфир. СПб. Изд. П. П. Сойкина, 1913.
144. *Ми Г.* Курс электричества и магнетизма. Одесса: Матезис, 1914.
145. *Минковский Г.* Пространство и время.— В кн.: Принцип относительности/Под ред. В. К. Фредерикса и Д. Д. Иваненко. Л.: ОНТИ, 1935.
146. *Овчинников Н. Ф.* Уровни методологического исследования.— В кн.: Методологические принципы физики. М.: Наука, 1975, с. 3—25.
147. *Оппенгеймер Р.* Летающая трапеция. М.: Атомиздат, 1967.
148. *Оппенгеймер Р.* Присутствие Эйнштейна.— В кн.: Эйнштейновский сборник. 1969—1970. М.: Наука, 1970, с. 264—269.
149. От многообразия к единству (дискуссия).— Там же, с. 230—263.
150. *Паннекук А.* История астрономии. М.: Наука, 1966.
151. *Пантюшин А. А.* Теория прямого гравитационного взаимодействия. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Алма-Ата, 1971.
152. *Паули В.* Этюды об Альберте Эйнштейне.— В кн.: Физические очерки. М.: Наука, 1975, с. 176—179.
153. *Паули В.* Альберт Эйнштейн и его роль в развитии физики.— Там же, с. 180—185.
154. *Паули В.* Теория относительности и наука.— Там же, с. 187—193.
155. *Паули В.* Теория относительности/Пер. В. Л. Гинзбурга и А. И. Левина. М.; Л.: ГИТТЛ, 1947.
156. *Переписка А. Эйнштейна и М. Борна.*— Эйнштейновский сборник, 1971, М.: Наука, 1972, с. 7—54; Эйнштейновский сборник. 1972. М.: Наука, 1974, с. 7—103; Эйнштейновский сборник. 1975—1976. М.: Наука, 1978, с. 5—42.
157. *Переписка А. Эйнштейна и М. Бессо/Пер. И. Л. Гандельсмана, В. Френкеля, А. М. Френка.*— Эйнштейновский сборник, 1974. М.: Наука, 1976, с. 5—112; Эйнштейновский сборник, 1975—1976. М.: Наука, 1978, с. 5—42.
158. *Планк М.* Принцип относительности и основные уравнения механики.— В кн.: Избранные труды. М.: Наука, 1975, с. 445—448.
159. *Планк М.* Отношение новейшей физики к механическому мировоззрению.— Там же, с. 634—648.
160. *Планк М.* Кауфмановские измерения отклонения β -лучей и их значение для динамики электронов.— Там же, с. 449—461.

161. Планк М. К динамике движущихся систем.— Там же, с. 466—493.
162. Планк М. Замечания о принципе действия и противодействие в общей динамике.— Там же, с. 494—497.
163. Планк М. Теоретическая физика. Восемь лекций. СПб.: Образование, 1911.
164. Планк М. Теория физического познания Эрнеста Маха/Пер. под ред. А. К. Тимирязева.— В кн.: Философия науки. М.; Л.: ГИЗ, 1924, ч. 1, вып. II, с. 33—40.
165. Планк М. Единство физической картины мира.— В кн.: Избранные труды. М.: Наука, 1975, с. 613—633.
166. Планк М. Ответ на вступительную речь А. Эйнштейна.— Там же, с. 667—669.
167. Погребысский И. Б. От Лагранжа к Эйнштейну. Классическая механика XIX века. М.: Наука, 1966.
168. Принцип относительности: Сб. работ классиков релятивизма/Под ред. В. К. Фредерикса и Д. Д. Иваненко Л.: ОНТИ, 1935.
169. Принцип относительности: Сб. работ по специальной теории относительности/Сост. А. А. Тяпкин. М.: Атомиздат, 1973.
170. Пуанкаре А. Наука и гипотеза/Пер. А. В. Чернявского. СПб., 1906.
171. Пуанкаре А. Наука и метод/Пер. И. К. Брусилковского. Одесса: Матезис, 1910.
172. Пуанкаре А. Новая механика. Эволюция законов/Пер. Г. А. Гуревича. М.: Современные проблемы, 1913.
173. Пуанкаре А. О динамике электрона.— В кн.: Принцип относительности. Л.: ОНТИ, 1935, с. 51—132.
174. Пуанкаре А. О динамике электрона.— В кн.: Принцип относительности: Сб. работ по СТО. М. Атомиздат, 1973, с. 90—96.
175. Пуанкаре А. Измерение времени.— В кн.: Избранные труды. М.: Наука, 1974, т. 3, с. 419—428.
176. Пуанкаре А. Динамика электрона.— Там же, с. 487—515.
177. Пуанкаре А. Настоящее и будущее математической физики.— Там же, с. 559—578.
178. Пуанкаре А. Аналитическое резюме.— Там же, с. 579—663.
179. Пуанкаре Л. Эволюция физики. СПб., 1910.
180. Рид К. Гильберт/Пер. И. В. Долгачева. М.: Наука, 1977.
181. Рис М., Руффини Р., Уилер Дж. Черные дыры, гравитационные волны и космология. М.: Мир, 1977.
182. Риман Б. Сочинения/Пер. под ред. В. Л. Гончарова. М.: Л.; Гостехиздат, 1948.
183. Риман Б. О гипотезах, лежащих в основании геометрии.— В кн.: Об основаниях геометрии/Под ред. А. П. Нордена. М.: ГИТТЛ, 1956, с. 309—325.
184. Родный Н. И. Очерки по истории и методологии естествознания. М.: Наука, 1975.
185. Розенбергер Ф. История физики. М.; Л.: ОНТИ, 1935, ч. 3, вып. 1.
186. Розенбергер Ф. История физики. М.; Л.: ОНТИ, 1936, ч. 3, вып. 2.
187. Розенфельд Б. А. История неевклидовой геометрии. М.: Наука, 1976.
188. Сагитов М. У. Постоянная тяготения и масса Земли. М.: Наука, 1969.
189. Саутернс Л. Определенные отношения массы к весу в случае радиоактивного вещества.— В кн.: Новые идеи в физике. СПб.: Образование, вып. 2, 1913, с. 93—106.
190. Синг Дж. Общая теория относительности/Пер. Б. Т. Вавилова. М.: Изд-во иностр. лит., 1963.
191. Степин В. С. Становление научной теории. Минск: БГУ, 1976.
192. Струве О., Зеберс В. Астрономия XX века. М.: Мир, 1968.
193. Суворов С. Г. Опыт и физическая теория.— В кн.: Эйнштейновский сборник. 1972. М.: Наука, 1974, с. 359—388.
194. Суворов С. Г. Эйнштейн: становление теории относительности и некоторые гносеологические уроки.— УФН, 1979, т. 128, с. 459—501.
195. Толмен Р. Относительность, термодинамика и космология. М.: Наука, 1974.

196. Томсон Дж. Дж. Взаимотношение между материей и эфиром по новейшим исследованиям в области электричества.— В кн.: Новые идеи в физике, вып. 2. СПб.: Образование, 1913, с. 71—92.
197. Томсон Дж. Дж. Материя, энергия и эфир. СПб.: Физика, 1911.
198. Тоннела М. А. Основы электромагнетизма и теории относительности. М.: Изд-во иностр. лит., 1962.
199. Тоннела М. А. Экспериментальные проверки общей теории относительности.— В кн.: Эйнштейновский сборник. 1969—1970. М.: Наука, 1970, с. 177—195.
200. Тредер Г.-Ю. Теория гравитации и принцип эквивалентности. М.: Атомиздат, 1973.
201. Тредер Г.-Ю. Относительность гравитации. М.: Атомиздат, 1975.
202. Тредер Г.-Ю. Эволюция представлений о тяжести, массовом эквиваленте света и аберрации от Лукреция до Эйнштейна.— В кн.: Актуальные проблемы теоретической физики/Под ред. А. А. Соколова. М.: 1976, с. 12—29.
203. Умов Н. А. Характерные черты и задачи современной естественно-научной мысли. СПб.: Естественный эксперимент, 1914.
204. Уэвелль В. История индуктивных наук/Пер. М. А. Антоновича и А. Н. Пынина. СПб.: Изд. Рус. кн. торговля, 1867, т. 2.
205. Фок В. А. Теория пространства, времени и тяготения. М.: Гостехиздат, 1955.
206. Фок В. А. Теория Эйнштейна и физическая относительность. М.: Знание, 1967.
207. Франкфурт У. И. Специальная и общая теория относительности. Исторические очерки. М.: Наука, 1968.
208. Франк Ф. Философия науки. Связь между наукой и философией. М.: Изд-во иностр. лит., 1960.
209. Фредерикс В. К., Фридман А. А. Основы теории относительности. Л.: Academia, 1924, вып. 1.
210. Фрейдлих Э. Основы теории тяготения Эйнштейна/Пер. Г. С. Ландсберга. М.; Пг.: ГИЗ, 1923.
211. Френкель В. Я. Пауль Эренфест. М.: Атомиздат, 1971.
212. Френкель В. Я. К истории эффекта Эйнштейна-де Гааза.— УФН, 1979, т. 128, с. 545—558.
213. Фридман А. А. Мир как пространство и время. Пг.: Academia, 1923.
214. Хенль Г. К истории принципа Маха.— В кн.: Эйнштейновский сборник. 1968. М.: Наука, 1968, с. 258—285.
215. Холтон Д. К генезису специальной теории относительности.— В кн.: Эйнштейновский сборник. 1966. М.: Наука, 1966, с. 177—194.
216. Холтон Д. Эйнштейн о физической реальности.— В кн.: Эйнштейновский сборник. 1969—1970. М.: Наука, 1970, с. 207—229.
217. Холтон Д. Новый подход к историческому анализу современной физики. XIII Международный конгресс по истории науки. М.: Наука, 1971.
218. Холтон Д. Эйнштейн, Майкельсон и «решающий» эксперимент.— В кн.: Эйнштейновский сборник. 1962. М.: Наука, 1974, с. 104—211.
219. Цейтлин Э. Закон движения Энгельса. М.: Изд. Гос. Тимирязевск. научно-исследовательского ин-та, 1927.
220. Чандрасекар С. О возрастающем значении общей теории относительности для астрономии.— В кн.: Эйнштейновский сборник. 1973. М.: Наука, 1974, с. 207—228.
221. Чудинов Э. М. Теория относительности и философия. М.: Политиздат, 1974.
222. Шварцшильд К. О допустимой мере кривизны пространства.— В кн.: Новые идеи в математике. СПб.: Образование, 1913, вып. 3, с. 56—70.
223. Шварцшильд К. О гравитационном поле точечной массы в эйнштейновской теории.— В кн.: Альберт Эйнштейн и теория гравитации. М.: Мир, 1979, с. 199—207.
224. Шенкланд Р. С. Беседа с Альбертом Эйнштейном.— В кн.: Эйнштейновский сборник. 1967. М.: Наука, 1967, с. 57—79.
225. Эддингтон А. Пространство, время и тяготение. Одесса: Матезис, 1923.

226. Эддингтон А. С. Теория относительности/Пер. под ред. Д. Д. Иваненко. М.; Л.: ОНТИ, 1934.
227. Эйнштейн А. Собрание научных трудов/Под ред. И. Е. Тамма, Я. А. Смо-родинского, Б. Г. Кузнецова. М.: Наука, 1965, т. 1.
228. Эйнштейн А. Собрание научных трудов/Под ред. И. Е. Тамма, Я. А. Смо-родинского, Б. Г. Кузнецова. М.: Наука, 1966, т. 2.
229. Эйнштейн А. Собрание научных трудов/Под ред. И. Е. Тамма, Я. А. Смо-родинского, Б. Г. Кузнецова. М.: Наука, 1966, т. 3.
230. Эйнштейн А. Собрание научных трудов/Под ред. И. Е. Тамма, Я. А. Смо-родинского, Б. Г. Кузнецова. М.: Наука, 1967, т. 4.
231. Эйнштейн А. Об одной эвристической точке зрения, касающейся возник-новения и превращения света (1905).— Собр. научн. трудов, т. 3, с. 92—107.
232. Эйнштейн А. К электродинамике движущихся тел (1905).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 7—35.
233. Эйнштейн А. Новое определение размеров молекул (1905).— Собр. научн. трудов, т. 3, с. 75—91.
234. Эйнштейн А. О принципе относительности и его следствиях (1907).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 65—114.
235. Эйнштейн А., Лауб И. Об основных электродинамических уравнениях дви-жущего тела (1908).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 115—122.
236. Эйнштейн А., Лауб И. О ponderomotorных силах, действующих в элек-тромагнитном поле на покоящиеся тела (1908).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 126—134.
237. Эйнштейн А. Новый электростатический метод измерения малых коли-честв электричества (1908).— Собр. научн. трудов, т. 3, с. 152—154.
238. Эйнштейн А. Элементарная теория броуновского движения (1908).— Собр. научн. трудов, т. 3, с. 155—163.
239. Эйнштейн А. К современному состоянию проблемы излучения (1909).— Собр. научн. трудов, т. 3, с. 164—179.
240. Эйнштейн А. О развитии наших взглядов на сущность и структуру излу-чения (1909).— Собр. научн. трудов, т. 3, с. 181—195.
241. Эйнштейн А. Принцип относительности и его следствия в современной физике (1910).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 138—164.
242. Эйнштейн А. О влиянии силы тяжести на распространение света (1911).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 165—174.
243. Эйнштейн А. Теория относительности (Доклад на заседании общества естествоиспытателей в Цюрихе 16 января 1911 г.).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 175—186.
244. Эйнштейн А. Замечание к закону Этвеша (1911).— Собр. научн. трудов, т. 3, с. 242—246.
245. Эйнштейн А. К парадоксу Эренфеста. Замечание к статье В. Варичака (1911).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 187—188.
246. Эйнштейн А. Скорость света и статическое гравитационное поле (1912).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 189—201.
247. Эйнштейн А. К теории статического гравитационного поля (1912).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 202—216.
248. Эйнштейн А. Относительность и гравитация. Ответ на замечание М. Абра-гама (1912).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 217—222.
249. Эйнштейн А. Существует ли гравитационное воздействие, аналогичное электродинамической индукции? (1912).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 223—226.
250. Эйнштейн А., Гроссман М. Проект обобщенной теории относительности и теории тяготения (1913).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 227—266.
251. Эйнштейн А. Физические основы теории тяготения (1913).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 267—272.
252. Эйнштейн А. К современному состоянию проблемы тяготения (1913).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 273—298.
253. Эйнштейн А. Макс Планк как исследователь (1913).— Собр. научн. тру-дов, т. 4, с. 9—13.

254. *Эйнштейн А.* Дополнительный ответ на вопрос Рейснера (1914).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 299—304.
255. *Эйнштейн А., Фоккер А. Д.* Теория гравитации Нордстрема с точки зрения абсолютного дифференциального исчисления (1914).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 305—312.
256. *Эйнштейн А.* К теории гравитации (1914).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 317—318.
257. *Эйнштейн А.* Принципиальные вопросы обобщенной теории относительности и теория гравитации (1914).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 319—325.
258. *Эйнштейн А.* Формальные основы общей теории относительности (1914).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 326—384.
259. *Эйнштейн А.* К проблеме относительности (1914).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 385—394.
260. *Эйнштейн А., Гроссман М.* Ковариантные свойства уравнений поля в теории тяготения, основанной на общей теории относительности (1914).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 399—409.
261. *Эйнштейн А.* Вступительная речь (1914).— Собр. научн. трудов, т. 4, с. 14—16.
262. *Эйнштейн А.* Рецензия на книгу Г. А. Лоренца «Принцип относительности» (1914).— Собр. научн. трудов, т. 4, с. 17.
263. *Эйнштейн А.* К общей теории относительности (1915).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 425—434.
264. *Эйнштейн А.* К общей теории относительности (Дополнение). (1915).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 435—438.
265. *Эйнштейн А.* Объяснение движения перигелия Меркурия в общей теории относительности (1915).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 439—447.
266. *Эйнштейн А.* Уравнения гравитационного поля (1915).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 448—451.
267. *Эйнштейн А.* Экспериментальное доказательство молекулярных токов Ампера (1915).— Собр. научн. трудов, т. 3, с. 359—362.
268. *Эйнштейн А., де Гааз В.* Экспериментальное доказательство существования молекулярных токов Ампера (1915).— Собр. научн. трудов, т. 3, с. 363—380.
269. *Эйнштейн А.* Основы общей теории относительности (1916).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 452—504.
270. *Эйнштейн А.* О статье Ф. Котлера «Гипотеза эквивалентности Эйнштейна и гравитация» (1916).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 505—507.
271. *Эйнштейн А.* Принцип Гамильтона и общая теория относительности (1916).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 524—529.
272. *Эйнштейн А.* Предисловие к книге Э. Фрейдлиха «Основы теории тяготения Эйнштейна» (1916).— Собр. научн. трудов, т. 4, с. 18.
273. *Эйнштейн А.* Эрнст Мах (1916).— Собр. научн. трудов, т. 4, с. 27—32.
274. *Эйнштейн А.* Вопросы космологии и общая теория относительности (1917).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 601—612.
275. *Эйнштейн А.* Принципиальное содержание общей теории относительности (1918).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 613—615.
276. *Эйнштейн А.* Диалог по поводу возражений против теории относительности (1918).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 616—625.
277. *Эйнштейн А.* О гравитационных волнах (1918).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 631—646.
278. *Эйнштейн А.* Закон сохранения энергии в общей теории относительности (1918).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 650—662.
279. *Эйнштейн А.* Мотивы научного исследования (1918).— Собр. научн. трудов, т. 4, с. 39—41.
280. *Эйнштейн А.* Рецензия на книгу Г. Вейля «Пространство, время, материя» (1918).— Собр. научн. трудов, т. 4, с. 42—43.
281. *Эйнштейн А.* Играют ли гравитационные поля существенную роль в построении элементарных частиц материи? (1919).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 664—671.
282. *Эйнштейн А.* Что такое теория относительности? (1919).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 677—681.

283. *Эйнштейн А.* Эфир и теория относительности (1920).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 682—689.
284. *Эйнштейн А.* Мой ответ. По поводу антирелятивистского акционерного общества (1920).— Собр. научн. трудов, т. 1, с. 693—696.
285. *Эйнштейн А.* Сущность теории относительности (1921).— Собр. научн. трудов, т. 2, с. 5—82.
286. *Эйнштейн А.* Геометрия и опыт (1921).— Собр. научн. трудов, т. 2, с. 83—94.
287. *Эйнштейн А.* Краткий очерк развития теории относительности (1921).— Собр. научн. трудов, т. 2, с. 99—104.
288. *Эйнштейн А.* О современном кризисе теоретической физики (1922).— Собр. научн. трудов, т. 4, с. 55—60.
289. *Эйнштейн А.* Рецензия на книгу А. Паули «Теория относительности» (1922).— Собр. научн. трудов, т. 4, с. 46.
290. *Эйнштейн А.* Основные идеи и проблемы теории относительности (1923).— Собр. научн. трудов, т. 2, с. 120—129.
291. *Эйнштейн А.* Механика Ньютона и ее влияние на формирование теоретической физики (1927).— Собр. научн. трудов, т. 4, с. 82—88.
292. *Эйнштейн А.* Оценка работ С. Ньюкома (1929).— Собр. научн. трудов, т. 4, с. 112—113.
293. *Эйнштейн А.* Некоторые замечания о возникновении общей теории относительности (1933).— Собр. научн. трудов, т. 2, с. 403—406.
294. *Эйнштейн А.* Памяти Пауля Эренфеста (1934).— Собр. научн. трудов, т. 4, с. 190—192.
295. *Эйнштейн А.* Физика и реальность (1936).— Собр. научн. трудов, т. 4, с. 200—227.
296. *Эйнштейн А.* Автобиографические заметки (1949).— Собр. научн. трудов, т. 4, с. 259—293.
297. *Эйнштейн А.* Замечания к статьям (1949).— Собр. научн. трудов, т. 4, с. 294—315.
298. *Эйнштейн А.* Автобиографические наброски (1955).— Собр. научн. трудов, т. 4, с. 350—356.
299. *Эйнштейн А.* Письма к М. Соловину.— Собр. научн. трудов, т. 4, с. 545—575.
300. Эйнштейн и философские проблемы физики XX века/Отв. ред. Э. М. Чудинов. М.: Наука, 1979.
301. *Эренфест П.* Принцип относительности.— В кн.: Относительность, кванты, статистика. М.: Наука, 1972, с. 1—11.
302. *Эренфест П.* Кризис в гипотезе о световом эфире.— Там же, с. 12—21.
303. *Эренфест П.* Равномерное вращательное движение тел и теория относительности.— Там же, с. 37—39.
304. *Эренфест П.— Иоффе А. Ф.* Научная переписка (1907—1933 гг.). Л.: Наука, 1973.
305. *Яковский И. О.* Всемирное тяготение как следствие образования всемоглой материи внутри небесных тел. СПб., 1912.
306. *Abraham M.* Zur Theorie der Gravitation.— Phys. Ztschr., 1912, Bd. 13, S. 1—4.
307. *Abraham M.* Das Elementargesetz der Gravitation.— Ibid., S. 4—5.
308. *Abraham M.* Die Erhaltung der Energie und der Materie im Schwerkraftfeld.— Ibid., S. 311—314.
309. *Abraham M.* Der freie Fall.— Ibid., S. 310—311.
310. *Abraham M.* Sulle onde luminose e gravitazionali.— Nuovo cim. Ser. 6, 1912, vol. 3, p. 211—219.
311. *Abraham M.* Erwiderung auf eine Bemerkung des Hrn. A. Einsteins.— Ann. Phys., 1912, Bd. 38, S. 1056—1058.
312. *Abraham M.* Nochmals Relativität und Gravitation: Bemerkungen zu A. Einsteins Erwiderung.— Ann. Phys., 1912, Bd. 39, S. 444—448.
313. *Abraham M.* Das Gravitationsfeld.— Phys. Ztschr., 1912, Bd. 13, S. 793—797.
314. *Abraham M.* Eine neue Gravitationstheorie.— Arch. Math. und Phys., 1912, Ser. 3, Bd. 20, S. 193—209.

315. *Abraham M.* Sur le probleme de la relativité.— *Scientia*, 1914, vol. 16, p. 101—103.
316. *Abraham M.* Die neue Mechanik.— *Scientia*, 1914, vol. 15, p. 8—27.
317. *Abraham M.* Neuere Gravitationstheorien.— *Jahrb. Radioaktiv. und Elektron.*, 1914, Bd. II, S. 470—520.
318. *Albert Einstein.* *Arnold Sommerfeld: Briefwechsel.* Hrsg. von A. Hermann. Basel, 1968.
319. *Albert Einstein in Berlin 1913—1933.* B.: Akademie-Verl., 1979, T. II, Spezialinventar.
320. *Albert Einstein in Berlin 1913—1933.* B.: Akademie-Verl., 1979. T. I, Darstellung und Dokumente. Hrsg. von H.-J. Treder.
321. *Behacker M.* Der freie Fall und die Planetenbewegung in Nordströms Gravitationstheorie.— *Phys. Ztschr.*, 1913 Bd. 14, S. 989—992.
322. *Bell E. T.* *Men of mathematics.* N. Y.: Simon and Schuster, 1965.
323. *Bernstein J.* *Einstein.* N. Y.: Fontana Kollins, 1973.
324. *Bonola R., Liebmann.* *Die nichteuklidische Geometrie.* Leipzig; Berlin: Teubner, 1908.
325. *Born M., Laue M., Max Abraham.*— *Phys. Ztschr.*, 1923, Bd. 24, S. 49—53.
326. *Broda E.* Der Einfluss von Ernst Mach und Ludwig Boltzmann auf Albert Einstein.— In: *Einstein-Cent.* B.: Akademie Wiss. DDR, 1979, S. 227—237.
327. *Broda E.* Einstein und Österreich: Vortrag in der Chemisch-Physikalischen Gesellschaft zu Wien im April 1979 (unpublished).
328. *Caldonazzo B.* Traiettorie dei raggi luminosi e dei punti materiali nel campo gravitazionale.— *Nuovo cim.*, 1913, Ser. 6, vol. 5, p. 267—300.
329. *Chandrasekhar S.* *Einstein and general relativity — historical perspectives.*— *Amer. J. Phys.*, 1979, vol. 47, p. 212—217.
330. *Chapek M.* *Philosophical impact of contemporary physics.* Princeton: D. van Nostrand Co., 1961.
331. *Chazy J.* *Théorie de la relativité et la mécanique céleste.* Paris, 1928, t. I.
332. *Chazy J.* *Théorie de la relativité et la mécanique céleste,* Paris, 1930, t. 2.
333. *Clarck R. W.* *Einstein, the life and times.* N. Y., 1972.
334. *Clifford W. K.* On the space-theory of matter.— In: *Proc. Camb. Phil. Soc.*, 1870, Febr., vol. 21.— In: *W. K. Clifford. Mathematical papers.* New York: Chelsea, 1882, p. 21—22.
335. *Cohen P. I.* *Relativity and the excess advances of perihelia in planetary orbits:* M. A. Diss. Univ. Pensilvania, 1971.
336. *Darwin G. H.* The analogy between Lesage's theory of gravitation and the repulsion of light.— *Proc. Roy. Soc. London*, 1905, vol. A76, p. 387—410.
337. *Drude P.* *Physik des Aethers.* Stuttgart, 1894.
338. *Drude P.* Ueber Fernwirkungen.— *Ann. phys. Chem.*, 1897, Bd. 62, S. 10—49.
339. *Dugas R.* *A history of mechanics.* L.: Routledge and Kegan Paul LTD, 1957.
340. *Earman J., Friedmann M.* The meaning and status of Newton's law of inertia and the nature of gravitational forces.— *Phil. Sci.*, 1973, vol. 40, p. 329—359.
341. *Earman J.* Covariance, invariance and the equality of frames.— *Foundat. Phys.*, 1974, vol. 4, p. 267—289.
342. *Earman J.* The role of covariance considerations in the development of Einstein's general theory of relativity (unpublished).
343. *Earman J., Glymour C.* Einstein and Hilbert: two months in the history of general relativity.— *Arch. Hist. Exact. Sci.*, 1978, vol. 19, p. 291—308.
344. *Earman J., Glymour C.* Lost in the tensors: Einstein's struggles with covariance principles 1912—1916.— *Stud. Hist. and Phil. Sci.*, 1978, vol. 9, p. 251—278.
345. *Ehrenfest P.* On Einstein's theory of the stationary gravitational field: *Versh. Akad. Amsterdam*, 1913, vol. 21, p. 1234—1239.— In: *Collected scientific papers.* Amsterdam, 1959, p. 328—332.
346. *Einstein A., Besso M.* *Correspondence 1903—1955: Traduction, notes et introduction de P. Speziali.* P.: Hermann, 1972.
347. *Einstein Papers.* Princeton Univ., microfilm reel I. B1.
348. *Einstein A.* *Předmluva k českému překladu knížky «Teorie relativity specialní i obecné».*— In: *Einstein a Praha/Sect. J. Bičák.* Praha, 1979, s. 42—43.

349. *Eötvös R.* Gesammelte Arbeiten/Hrsg. von P. Selenyi. Bp.: Akademiai Kiadó, 1953.
350. *Eötvös R.* Ueber den Zusammenhang der Oberflächenspannung mit der Molekularvolumen.— *Ann. phys. Chem.*, 1886, Bd. 27, S. 448—459. In: [349], S. 1—14.
351. *Eötvös R.* Ueber die Anziehung der Erde auf verschiedene Substanzen: Gelesen in der Sitzung der Akademie vom 20. Jan. 1889.— *Math. und Naturw. Ber. Ungarn*, 1890, Bd. 8, S. 65—68.
352. *Eötvös R.* Untersuchungen über Gravitation und Erdmagnetismus.— *Ann. phys. Chem.*, 1896, Bd. 59, S. 354—400.
353. *Eötvös R.* Etude les surfaces de niveau et la variation de la pesanteur et de la force magnétique.— In: *Rapports présentés au Congrès international de Physique réuni à Paris en 1900*. T. 3, p. 371—393.
354. *Eötvös R.* Bericht über Geodätische Arbeiten in Ungarn, besonders über Beobachtungen mit der Drehwaage.— In: *Verh. XVI. allg. Konf. Intern. Erdmessung*. London; Cambridge, 1909, Bd. 1, S. 319—350.
355. *Eötvös R., Pekár D., Fekete E.* Beiträge zum Gesetze der Proportionalität von Trägheit und Gravität.— *Ann. Phys.*, 1922, Bd. 68, S. 11—66.
356. *Feynman R.* Quantum theory of gravitation.— *Acta phys. pol.*, 1963, vol. 24, p. 697—722.
357. *Fierz M., Pauli W.* On relativistic wave equations for particles of arbitrary spin in an electromagnetic field.— *Proc. Roy. Soc. London*, 1939, vol. 173, p. 211—232.
358. *Fokker A. D.* A summary of Einstein's — Grossmann's theory of gravitation.— *Phil. Mag.*, 1915, vol. 29, p. 77—96.
359. *Forbes E.* A history of the solar red shift problem.— *Ann. Sci.*, 1961, vol. 17, p. 129—164.
360. *Forbes E.* Erwin Finlay Freundlich.— In: *Dictionary of scientific biography*. N. Y., 1971.
361. *Frank Ph.* Einstein, his life and times. N. Y. 1949.
362. *Freundlich E.* Ueber einen Versuch, die von A. Einstein vermutete Ablenkung des Lichtes in Gravitationsfeldern zu prüfen.— *Astr. Nachr.*, 1913, Bd. 193, S. 369—372.
363. *Freundlich E.* Zur Frage der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit.— *Phys. Ztschr.*, 1913, Bd. 14, S. 835—838.
364. *Freundlich E.* Ueber die Gravitationsverschiebung der Spektrallinien bei Fixsternen.— *Astr. Nachr.*, 1915, Bd. 202, S. 17—24.
365. *Freundlich E.* Ueber die Erklärung der Anomalien im Planetensystem durch die Gravitationswirkung interplanetarer Massen.— *Astr. Nachr.*, 1915, Bd. 201, S. 49—55.
366. *Gans R.* Gravitation und Elektromagnetismus.— *Phys. Ztschr.*, 1905, Bd. 6, S. 803—805.
367. *Gans R.* Ist die Gravitation elektromagnetischen Ursprungs?— In: *Festschrift H. Weber*. Leipzig, 1912, S. 75—94.
368. *Gehrke E.* Zur Kritik und Geschichte der neueren Gravitationstheorien.— *Ann. Phys.*, 1916, Bd. 51, S. 119—124.
369. *Gehrke E.* Kritik der Relativitätstheorie. B., 1924.
370. *Gerber P.* Die räumliche und zeitliche Ausbreitung der Gravitation.— *Ztschr. Math. und Phys.*, 1898, Bd. 43, S. 93—103.
371. *Gerber P.* Die räumliche und zeitliche Ausbreitung der Gravitation.— *Ann. Phys.*, 1917, Bd. 52, S. 415—422.
372. *Goldberg S.* In defence of the ether: the british response to Einstein's theory of relativity, 1905—1911.— In: *Historical studies in the physical sciences*/Ed. by R. McCormach. Princeton, 1970, vol. 2.
373. *Goldberg S.* The Abraham theory of the electron: the symbiosis of experiment and theory.— *Arch. Hist. Exact Sci.*, 1970—1971, vol. 7, p. 7—25.
374. *Goldberg S.* Toward the essential Einstein.— *Science*, 1973, vol. 180, p. 623.
375. *Grossmann M.* Die Konstruktion der geradlinigen Dreiecks der nicht-euklidischen Geometrie aus der drei Winkeln.— *Math. Ann.*, 1984, Bd. 58, S. 578—582.

376. *Grossmann M.* Die fundamentalen Konstruktionen der nicht-euklidischen Geometrie.— In: Pr. Thurgauische Kantonschule. Frauenfeld. 1904.
377. *Grossmann M.* Projektive Konstruktionen in der hyperbolischen Geometrie.— *Math. Ann.*, 1910, Bd. 68, S. 141—144.
378. *Grossmann M.* Projektiver Beweis der absoluten Parallelkonstruktion von Lobatschewskij.— *Verh. Schweiz. Naturforsch. Ges.*, 1911, Bd. 35, S. 4—7.
379. *Grossmann M.* Einführung in die darstellende Geometrie. 2. Aufl. Basel, 1912.
380. *Gupta S. N.* Quantization of Einstein's gravitational field: linear approximation.— *Proc. Phys. Soc.*, 1952, vol. A65, p. 161—165.
381. *Gupta S. N.* Quantization of Einstein's gravitational field: general treatment.— *Proc. Phys. Soc.*, 1952, vol. A65, p. 608—613.
382. *Gupta S. N.* Einstein's and others theories of gravitation.— *Rev. Mod. Phys.*, 1957, vol. 29, p. 334—336.
383. *Guth E.* Contribution to the history of Einstein's geometry as a branch of physics.— In: *Relativity: Proc. Relativity Conf. Midwest, Ohio, Cincinnati*, 1969, June 2—6. New York; London, 1970, p. 161—207.
384. *Harvey A. L.* Brief review of lorentz-covariant scalar theories of gravitation.— *Amer. J. Phys.*, 1965, vol. 33, p. 449—461.
385. *Havas P.* Four-dimensional formulations of Newtonian mechanics and their relation to the special and general theories of relativity.— *Rev. Mod. Phys.*, 1964, vol. 36, p. 938—965.
386. *Heaveside O.* A gravitational and electromagnetic analogy.— *Electrician*, 1893, vol. 31, p. 281—282.
387. *Heisenberg W.* Tradition in science.— *Phys. Bull.*, 1974, vol. 25, p. 231—235.
388. *Heller K. D.* Ernst Mach: Wegbereiter der modernen Physik. Wien; New York, 1964.
389. *Hermann A.* 130 Jahre Deutsche physikalische Gesellschaft.— *Phys. Bl.*, 1975, Bd. 31, S. 544—547.
390. *Herneck F.* Zu einem Brief Albert Einsteins an Ernst Mach.— *Phys. Bl.*, 1959, Bd. 15, S. 563—564.
391. *Herneck F.* Die Beziehungen zwischen Einstein und Mach.— *Wiss. Ztschr. Driedrich-Schiller-Univ.*— Jena, 1966, Jg. 15, S. 1—14.
392. *Herneck F.* Zum Briefwechsel Albert Einsteins mit Ernst Mach.— *Forsch. und Fortschr.*, 1963, Bd. 37, S. 239—243.
393. *Herneck F.* *Bahnbrecher des Atomzeitalters.* B.: Morgen, 1970.
394. *Hilbert D.* *Gesammelte Abhandlungen.* B.: Springer, 1935, Bd. 3.
395. *Hilbert D.* Die Grundlagen der Physik. Zweite Mitteilung.— *Goett. Nachr.*, 1917, S. 53—76.
396. *Hilbert D.* Die Grundlagen der Physik.— *Math. Ann.*, 1924, Bd. 92, S. 1—32.
397. *Hirosige T.* A contribution to the origins of the theory of relativity.— *Jap. Stud. Hist. Sci.*, 1965, vol. 4, p. 117—123.
398. *Hirosige T.* Electrodynamics before the theory of relativity. 1890—1905.— *Jap. Stud. Hist. Sci.*, 1966, vol. 5, p. 1—49.
399. *Hirosige T.* Theory of relativity and ether.— *Jap. Stud. Hist. Sci.*, 1968, vol. 7, p. 37—53.
400. *Hirosige T.* The ether problem, the mechanistic worldview, and the origins of the theory of relativity.— *Hist. Stud. Phys. Sci.*, 1976, vol. 7, p. 3—82.
401. *Hoffmann D.* Albert Einstein und die Physikalisch-Technische Reichsanstalt. Berlin, Jan. 1979 (unpublished).
402. *Hoffmann W.* *Bewegung und Traegheit.* Wien, 1904.
403. *Hoffmann B.* Einstein and tensors.— *Tensor*, 1972, vol. 26, p. 157—162.
404. *Hoffmann B., Dukas H.* Albert Einstein, creator and rebel. New York, 1973.
405. *Holton G.* A new look at the historical analysis of modern physics.— In: XIII Intern. Congr. History of Sciences. Moscow, 1971, Aug. 18—24. Moscow, 1971.
406. *Holton G.* On the trying to understand scientific genius.— In: *Holton G. Thematic origins of scientific thought.* Cambridge: Harvard Univ. Press, 1973.

407. *Holton G.* Mach, Einstein and search for reality.— In: Holton G. Thematic analysis of scientific thought. Cambridge: Harvard Univ. Press, 1973.
408. *Hönl H.* Albert Einstein und Ernst Mach.— Phys. Bl., 1979, Jg. 35, S. 485—489.
409. *Hund F.* Höhepunkte der Göttinger Physik I, II.— Phys. Bl., 1969, Jg. 25, S. 145—153; 210—215.
410. Hundert Autoren gegen Einstein. Hrsg. von H. Israel, E. Rueckhaber, R. Weimann. Leipzig: Voigtlaender, 1931.
411. *Ily J.* Einstein eltávolodása a pozitivizmustól.— A Mag. fil. szemle, 1975, évi 1—2, s. 151—160.
412. *Ily J.* Az általános relativitáselmélet megszületése.— Fiz. szemle, 1976, t. 26, s. 293—305.
413. *Ily J.* Albert Einstein in Prague.— Isis, 1979, vol. 70, p. 76—84.
414. *Ishiwara I.* Zur Theorie der Gravitation.— Phys. Ztschr., 1912, Bd. 13, S. 1189—1193.
415. *Ishiwara I.* Die Grundlagen einer relativistischen und elektromagnetischen Gravitationstheorie, I.— Phys. Ztschr., 1914, Bd. 15, S. 294—298; S. 506—510.
416. *Isenkrahe C.* Das Raetsel von der Schwerkraft. Braunschweig, 1879.
417. *Jaki S. L.* Johann Georg von Soldner and the gravitational bending of light with an English translation of his essay on it published in 1801.— Found. Phys., 1978, vol. 8, p. 927—950.
418. *Jammer M.* Concepts of space. New York; Cambridge, 1954.
419. *Jammer M.* Concepts of force. New York; Cambridge, 1962.
420. *Jaumann G.* Theorie der Gravitation.— Wien. Ber. Abt. IIA, 1912, Bd. 121, S. 95—182.
421. *Jaumann G.* Feststellung einer Priorität in Gravitationstheorie.— Phys. Ztschr., 1914, Bd. 15, S. 159—160.
422. *Jost R.* Einstein und Zürich, Zürich und Einstein.— Vierteljahresschr. naturforsch. Ges. Zürich, 1979, Bd. 124, S. 7—12.
423. *Klein F.* Gesammelte mathematische Abhandlungen. B.: Springer, 1921, Bd. 1.
424. *Klein M.* Thermodynamics in Einstein's thought.— Science, 1967, vol. 157, p. 509—516.
425. *Klein M. J.* Paul Ehrenfest: The making of a theoretical physicist. Amsterdam: North-Holland, 1971.
426. *Kohlros L.* Die Erinnerungen eines Kommilitonen.— In: Helle Zeit-dunkle Zeit/Hrsg. von C. Seelig. Zürich etc.: Europa Verl., 1956, S. 17—35.
427. *Kolossvary B. G.* Eötvös balance.— Amer. J. Phys., 1959, vol. 27, p. 336—343.
428. *Kottler F.* Ueber die Raumzeitlinien der Minkowskischen Welt.— Wien Ber., Abt. 11A, 1912, Bd. 121, S. 1659—1759.
429. *Kottler F.* Relativitätsprinzip und beschleunigte Bewegung.— Ann. Phys., 1914, Bd. 44, S. 701—748.
430. *Kottler F.* Fallende Bezugssysteme von Standpunkte des Relativitätsprinzips.— Ann. Phys., 1914, Bd. 45, S. 481—516.
431. *Kottler F.* Beschleunigungsrelative Bewegungen und die konforme Gruppe der Minkowskischen Welt.— Wien. Ber., Abt. 11A, 1916, Bd. 125, S. 899—919.
432. *Kottler F.* Ueber Einsteins Äquivalenzhypothese und die Gravitation.— Ann. Phys., 1916, Bd. 50, S. 955—972.
433. *Kottler F.* Ueber die physikalischen Grundlagen der Einsteinschen Gravitationstheorie.— Ann. Phys., 1918, Bd. 56, S. 401—462.
434. *Kottler F.* Gravitation und Relativitätstheorie.— In: Encyklopaedie der mathematischen Wissenschaften. Leipzig: Teubner, 1922. Bd. VI, Teil 2B, Art. 22A, S. 159—237.
435. *Krasinski A.* Czy slonce jest kuliste? — Post. astron., 1975, N 23, s. 153—175.
436. *Kretschmann E.* Eine Theorie der Schwerkraft im Rahmen der ursprünglichen Einsteinschen Relativitätstheorie: Inauguraldiss. B., 1914.

437. *Kretschmann E.* Ueber die prinzipiellen Bestimmbarkeit der berechtigten Bezugssysteme beliebiger Relativitätstheorien.—*Ann. Phys.*, 1915, Bd. 48, S. 907—982.
438. *Kuhn T. S., Heilbron J. L., Forman P., Allan L.* Sources for history of quantum physics. Philadelphia: Amer. Phil. Soc., 1967.
439. *Lacatos I.* Criticism and methodology of scientific research programmes.—*Proc. Aristotelean Soc.*, 1968, vol. 69, p. 149—186.
440. *Lacatos I.* Falsification and the methodology of scientific research programmes.— In: *Criticism and the growth of knowledge*/Ed. by I. Lacatos, A. Musgrave. Cambridge, 1970, p. 91—195.
441. *Lanczos C.* Space through the ages. London; New York, 1970.
442. *Lanczos C.* Einstein's path from special to general relativity.— In: *General relativity; Papers in honour of J. L. Synge*/Ed. by L. O'Riada. Oxford, 1972, p. 5—19.
443. *Lanczos C.* The Einstein decade, 1905—1915. L., 1974.
444. *Larmor J.* Aether and matter. Cambridge, 1900.
445. *Laue M.* Das Relativitätsprinzip. Braunschweig: Vieweg, 1913.
446. *Laue M.* Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Gravitation. Bemerkungen zur gleichnamigen Abhandlung von P. Gerber.—*Ann. Phys.*, 1917, Bd. 53, S. 214—217.
447. *Laue M.* Die Nordstroomische Gravitationstheorie.—*Jahrb. Radioaktivität und Elektronik*, 1917, Bd. 14, S. 263—313.
448. *Laue M.* Das Relativitätsprinzip. Braunschweig: Vieweg, 1921, Bd. 2.
449. *Lecat M.* Bibliographie de relativité. Bruxelles; Lamartin, 1924.
450. *Levi M.* Sur l'application des lois électrodynamiques au mouvement des planètes.—*Compt. rend.*, 1890, vol. 110, p. 545—551.
451. *Lorentz H. A.* Considérations de la pesanteur.—*Versl. Kon. Akad. Wet. Amsterdam*, 1900, vol. 8, p. 603.— In: *H. A. Lorentz. Collected papers*. The Hague, 1937, vol. 5, p. 198—216.
452. *Lorentz H. A.* Alte und neue Fragen der Physik.—*Phys. Ztschr.* 1910, Bd. 11, S. 1234—1256.
453. *Lorentz H. A.* La gravitation.—*Scientia*, 1914, vol. 16, p. 28—59.
454. *Marcel Grossmann* Meeting on the Recent Progress of the Fundamentals on General Relativity, Trieste, 1975, July 7—12. Univ. Trieste.
455. *McCormach R. H. A.* Lorentz and the electromagnetic view of nature.—*Isis*, 1970, vol. 61, p. 459—497.
456. *McCormach R.* Einstein, Lorentz and the electron theory.— In: *Hist. Stud. Phys. Sci.*/Ed. by R. McCormach. Philadelphia, 1970, vol. 2, p. 41—48.
457. *McCormach R.* Editor's forward.—*Hist. Stud. Phys. Sci.*, Philadelphia, 1971, vol. 3, p. IX—XXIV.
458. *Mehra J.* Einstein, Hilbert and the theory of gravitation.— In: *The physicist's conception of nature*/Ed. by J. Mehra. Dordrecht; Boston, 1973, p. 92—178.
459. *Mehra J.* Einstein, Hilbert and the theory of gravitation. Dordrecht; Boston, 1974.
460. *Melcher H.* Albert Einstein wider Vorurteile und Denkgewohnheiten. B.: Akademie-Verl., 1979.
461. *Melcher H.* Albert Einstein und Experimentalphysik.—*Phys. Schule*, 1979, Bd. 17, S. 1—18.
462. *Meyerson E.* La déduction relativiste. P., 1924.
463. *Mie G.* Entwurf einer allgemeinen Theorie der Energieübertragung.—*Wien. Ber.*, 1898, Bd. 108, S. 1113—1181.
464. *Mie G.* Die Grundlagen einer Theorie der Materie.—*Ann. Phys.*, 1912, Bd. 37, S. 511—534; Bd. 39, S. 1—40; 1913, Bd. 40, S. 1—66.
465. *Mie G.* Bemerkungen zu der Einsteinschen Gravitationstheorie.—*Phys. Ztschr.*, 1914, Bd. 15, S. 115—122; 169—176.
466. *Mie G.* Das Prinzip von der Relativität des Gravitationspotentials.— In: *Arbeiten aus den Gebieten der Physik, Mathematik, Chemie: Festschrift J. Elster und H. Geitel zum 60-sten Geburtstage*. Braunschweig, 1915, S. 251—260.
467. *Mie G.* Die Einsteinsche Gravitationstheorie. Leipzig, 1921.

468. *Mie G.* Molekuele, Atome, Weltaether. Leipzig, 1904.
469. *Mie G.* Die Materie. Stuttgart, 1912.
470. *Minkowski H.* Das Relativitaetsprinzip: Vortrag gehalten in der mathematische Gesellschaft zu Goettingen am 5. Nov. 1907.—Ann. Phys., 1915, Bd. 47, S. 927—938.
471. *Minkowski H.* Die Grundgleichungen fuer die elektromagnetischen Vorgaenge un bewegten Koerpern.—Goett. Nachr., 1907, S. 1—59; 1908, S. 53—111; [472], S. 352—404; S. 405—430.
472. *Minkowski H.* Gesammelte Abhandlungen. Leipzig: Teubner, 1920. Bd. II.
473. *Mueller A.* Das Problem des absoluten Raumes und seine Beziehung zum allgemeinen Raumproblem. Braunschweig: Vieweg, 1911.
474. *Neumann C.* Die Prinzipien der Galilei-Newton'schen Theorie. Leipzig: Teubner, 1870.
475. *Neumann C.* Ueber die Kraefften elektrodynamischer Ursprungs zuzuschreibenden Elementargesetze.—Abh. math. Kl. Koenigl Saechs. Ges. Wiss., Leipzig, 1873, Bd. 10, S. 417—524.
476. *Neumann C.* Allgemeine Untersuchungen ueber das Newton'sche Prinzip der Fernwirkung. Leipzig, 1896.
477. *Newcomb S.* The elements of the four inner planets and fundamental constants of astronomy. Wash., 1895.
478. *Nordstroem G.* Zur Elektrodynamik Minkowskis.—Phys. Ztschr., 1909, Bd. 10, S. 681—687.
479. *Nordstroem G.* Zur elektromagnetischen Mechanik.—Phys. Ztschr., 1910, Bd. 11, S. 440—445.
480. *Nordstroem G.* Zur Relativitaetsmechanik deformierbarer Koerper.—Phys. Ztschr., 1912, Bd. 12, S. 854—857.
481. *Nordstroem G.* Relativitaetsprinzip und Gravitation.—Phys. Ztschr., 1912, Bd. 13, S. 1126—1129.
482. *Nordstroem G.* Traege und schwere Masse in der Relativitaetsmechanik.—Ann. Phys. 1913, Bd. 40, S. 856—878.
483. *Nordstroem G.* Zur Theorie der Gravitation vom Standpunkt des Relativitaetsprinzips.—Ann. Phys., 1913, Bd. 42, S. 533—554.
484. *Nordstroem G.* Die Fallgesetze und Planetbewegungen in der Relativitaetsmechanik.—Ann. Phys., 1914, Bd. 43, S. 1101—1110.
485. *Nordstroem G.* Ueber den Energiesatz in der Gravitationstheorie.—Phys. Ztschr., 1914, Bd. 15, S. 375—380.
486. *Nordstroem G.* Ueber die Moeglichkeit das elektromagnetische Feld und das Gravitationsfeld zu vereinigen.—Ibid., S. 504—506.
487. *Nordstroem G.* Zur Elektrizitaets- und Gravitationstheorie.—Oefv. Finska Vet. Soc. Foerh., 1914/1915, vol. 57, mem. 4, p. 1—15.
488. *Nordstroem G.* Ueber eine moegliche Grundlage einer Theorie der Materie.—Ibid., mem. 28, p. 1—21.
489. *Nordstroem G.* Einstein's gravitation theory and Herglotz' mechanics of continua.—Proc. Kon. Akad. Wet. Amsterdam, 1917, vol. 19, p. 884.
490. *Nordstroem G.* On the mass of material system according to the gravitation theory of Einstein.—Proc. Kon. Akad. Wet. Amsterdam, 1918, vol. 20, p. 1076—1080.
491. *Nordstroem G.* On the energy of the gravitational field in Einstein's theory.—Ibid., p. 1238—1241.
492. *Nordstroem G.* Calculation of some special cases in Einstein's theory of gravitation.—Proc. Kon. Akad. Wet. Amsterdam, 1918, vol. 21, p. 68—72.
493. *Nordvedt K. L.* Gravitational theory: empirical status from solar system experiments.—Science, 1922, vol. 178, p. 1157—1164.
494. *North J. D.* The measure of the Universe. Oxford, Clarendon, 1965.
495. *Oppenheim S.* Zur Frage nach der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Gravitation.—Ann. Phys., 1917, Bd. 53, p. 163—168.
496. *Oppenheim S.* Kritik des Newton'schen Gravitationsgesetzes.—In: Encyclopaedic der mathematischen Wissenschaften. Leipzig, 1922, Bd. 6, T. 2, H. 2, S. 80—158.
497. *Pavanini G.* Prime conseguenze d'une recente teoria della gravitazione.—Rend. Accad. Lincei, 1912, vol. 21, p. 648—655; 1913, vol. 22, p. 369.
498. Physiker ueber Physiker. Wahlvorschlaege zur Aufnahme von Physikern

- in die Berliner Akademie, 1870—1929/Mit einer Einleitung von H.—J. Treder. B.: Akademie-Verl., 1975.
499. *Pick G.* Sur les notions: droites parallèles, et la géométrie différentielle dans l'espace non-euclidien.— *Compt. rend.*, 1912, vol. 153, p. 1447.
 500. *Pick G.* Sur les notions: droites parallèles et translation et sur la géométrie différentielle dans l'espace non-euclidien.— *Compt. rend.*, 1912, vol. 154, p. 263—265.
 501. *Pick G.* Zur nichteuclidische Geometrie.— *Arch. Math. und Phys.*, 1916, Bd. 25, S. 135—137.
 502. *Planck M.* Zur Machschen Theorie der physikalischen Erkenntnis. Eine Erweiterung.— *Phys. Ztschr.*, 1910, Bd. 11, S. 1186—1190.
 503. *Pyenson L. R.* What is connection between the history of scientific disciplines and the development of scientific ideas? A note on two institutional approach to physics, circa 1910, and the reception of general relativity (unpublished paper presented at the History of Science Society Meeting, San Francisco, 1973, Dec.).
 504. *Pyenson L. R.* The Göttingen reception of Einstein's general theory of relativity. Baltimore: Ph. D. Diss., John Hopkins Univ., 1974.
 505. *Pyenson L. R.* Entre des harmonies pré-établies et des réalités physiques: conceptions de mathématique en physique, 1880—1920, Janvier 1975 (unpublished material).
 506. *Pyenson L. R.* La réception de la relativité généralisée: disciplinarité et institutionnalisation en physique.— *Rev. hist. sci.*, 1975, vol. 28, p. 61—73.
 507. *Pyenson L. R.* Einstein's early scientific collaboration.— *Hist. Stud. Phys. Sci.*, 1976, vol. 7, p. 83—123.
 508. *Pyenson L. R.* Hermann Minkowski and Einstein's special theory of relativity.— *Arch. Hist. Exact Sci.*, 1977, vol. 17, p. 71—95.
 509. *Pyenson L. R.* Physics in the shadow of mathematics: the Göttingen electron-theory seminar of 1905.— *Arch. Hist. Exact Sci.*, 1979, vol. 21, p. 55—89.
 510. *Pyenson L. R.* Mathematics, education, and the Göttingen approach to physical reality, 1890—1914.— *Europa J. Interdisciplinary Studies*, 1979, vol. 2, p. 91—127.
 511. *Reid C.* Hilbert. B.: Springer, 1970.
 512. *Reinhardt M.* Mach's principle — a critical review.— *Ztschr. Naturforsch.*, 1973, Bd. 28a, S. 529—537.
 513. *Reissner H.* Ueber die Relativität der Beschleunigungen in der Mechanik.— *Phys. Ztschr.*, 1914, Bd. 15, S. 371—375.
 514. *Reissner H.* Ueber eine Möglichkeit die Gravitation als unmittelbare Folge der Relativität der Trägheit abzuleiten.— *Phys. Ztschr.*, 1915, Bd. 16, S. 179—185.
 515. *Reissner H.* Ueber die Eigengravitation des elektromagnetischen Feldes nach der Einsteinschen Theorie.— *Ann. Phys.*, 1916, Bd. 50, S. 106—120.
 516. *Ritz W.* Recherches critiques sur l'électrodynamique générale.— *Ann. chim. phys.*, 1908, vol. 13, p. 145—275.— In: *W. Ritz. Oeuvres*. P.: Gauthier—Villars, 1911, p. 317—426.
 517. *Ritz W.* Du rôle d'éther en physique.— *Scientia*, 1908, v. 3, p. 260—274.
 518. *Ritz W.* La Gravitation.— *Scientia*, 1909, v. 5, p. 152—165.
 519. *Ricci G., Levi-Civita T.* Méthodes de calcul différentiel absolu et leurs applications.— *Math. Ann.*, 1901, vol. 54, p. 125—201.
 520. *Sachs M.* Ideas of the theory of relativity. Jerusalem: Isr. Univ. Press, 1974.
 521. *Schwarz H. M.* Introduction to special relativity. N. Y.: McGraw—Hill, 1968, Appendix 7B.
 522. *Schwarz H. M.* Poincaré's rendiconti paper on relativity, pt III.— *Amer. J. Phys.*, 1972, vol. 40, p. 1282—1287.
 523. *Seelig C.* Albert Einstein. Eine dokumentarische Biographie. Stuttgart, 1954.
 524. *Seeliger H.* Ueber das Newtonsche Gravitationsgesetz.— *Astr. Nachr.*, 1895, Bd. 137, cols. 129—136.
 525. *Seeliger H.* Bemerkung zu P. Gerbers Aufsatz «Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Gravitation».— *Ann. Phys.*, 1917, Bd. 53, S. 31—33.

526. *Seeliger H.* Weitere Bemerkungen zur «Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Gravitation».— Ann. Phys., 1917, Bd. 54, S. 38—40.
527. *Selenyi P.* Roland Eoelvoes, der Mensch und der Gelehrte, 1848—1919.
528. *Sitter W. de.* On the bearing of the principles of relativity on gravitational astronomy.— Mon. Not. Roy. Astr. Soc., 1911, vol. 71, p. 388—415.
529. *Sitter W. de.* Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences.— Mon. Not. Roy. Astr. Soc., 1916, vol. 76, p. 699—728; 1917, vol. 77, p. 155—184; vol. 78, p. 3—28.
530. *Sitter W. de.* Ein astronomischer Beweis fuer die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit — Phys. Ztschr., 1913, Bd. 14, S. 429.
531. *Soldner J.* Ueber die Ablenkung eines Lichtsstrahls von seiner Bewegung durch die Attraktion einer Weltkoerpers, an welchem er nahe vorbeigeht.— Astr. Nachr., 1801, S. 161—172; Ann. Phys., 1921, Bd. 65, S. 593—604.
532. *Sommerfeld A.* Zur Relativitaetstheorie. I. Vierdimensionale Vektoralgebra.— Ann. Phys., 1910, Bd. 32, S. 749—776.
533. *Sommerfeld A.* Zur Relativitaetstheorie. II. Vierdimensionale Vektoranalysis.— Ann. Phys., 1910, Bd. 33, S. 647—689.
534. *Southern L. A.* determination of the ratio of mass to weight for a radioactive substance.— Proc. Roy. Soc. London, 1911, vol. 84, p. 325—344.
535. *Stachel J.* Einstein's Odyssey: His journey from Special to General Relativity.— Sciences (France), 1979, Mar., p. 14—15, 32—34.
536. *Stachel J.* The genesis of general relativity.— In: Einstein Symp., Pcoe.: Lecture notes in physics, Berlin, 1980 (unpublished).
537. *Stachel J.* Einstein and the rigidly rotating disk.— Gen. Rel. and Grav., 1979, vol. 1, p. 30—45.
538. *Strauss M.* The Huygens — Leibniz — Mach criticism in the light of present knowledge.— In: Strauss M. Modern physics and its philosophy. Dordrecht; Boston, 1972, p. 18—22.
539. *Strauss M.* On the logic of «inertial frame» and mass.— In: Strauss M. Modern physics and its philosophy. Dordrecht; Boston, 1972, p. 119—129.
540. *Strauss M.* Einstein's theory and the critics of Newton-intertheoretical relations.— II.— In: Strauss M. Modern physics and its philosophy. Dordrecht; Boston, 1972, p. 152—183.
541. *Thirring W.* Lorentz-invariante Gravitationstheorien.— Fortschr. Phys., 1959, Bd. 7, S. 79—97.
542. *Thirring W.* An alternative approach to the theory of gravitation.— Ann. Phys. (USA), 1961, vol. 16, p. 96—117.
543. *Thomson J. J.* On electric theory of gravitation.— Proc. Camb. Phil. Soc., 1909, vol. 15, p. 65—69.
544. *Thomson W.* On the ultramundane corpuscles of Le Sage.— Proc. Roy. Soc. Edinburgh, 1872, vol. 7, p. 577—589.
545. *Thuring B.* Die Gravitation und die philosophische Grundlagen. B. 1967.
546. *Tisserand F.* Mécanique céleste. Paris, 1896, vol. 4.
547. *Todhunter I.* A history of the mathematical theories of attraction and figure of the Earth from time of Newton to that of Laplace. L., 1873.
548. *Tommasina Th.* La physique de la gravitation et la dynamique de l'univers. P.: Gauthier — Villars, 1928.
549. *Tonnelat M.-A.* Théories euclidiennes de la gravitation.— Rend. mat. appl., 1965, vol. 24, p. 401—450.
550. *Tonnelat M.-A.* Histoire du principe de relativité. P., 1971.
551. *Trautman A.* Foundations and current problems of general relativity.— In: Lectures on general relativity. Brandels Summer Institute in theoretical physics, 1964. (N. J.): Prentice-Hall, 1965, vol. 1.
552. *Trautman A.* Comparison of newtonian and relativistic theories of spacetime.— Orgaon, W., 1965, N 2, p. 123—130.
553. *Treder H.-J.* Die ersten Kritiker des allgemeinen Relativitaetsprinzips von Abraham bis Kretschmann.— In: XIII. Intern. Kongr. fuer Geschichte der Wissenschaft. Moskau, 1971.
554. *Treder H.-J.* Die Schwere des Lichtes von Lukrez bis Einstein.— Spektrum, 1974, Bd. 5, S. 19—21.

555. *Treder H.-J.* Aberration, Schwere und Massen-Aequivalent des Lichtes.— *Wiss. und Fortschr.*, 1974, Bd. 24, S. 338—343.
556. *Treder H.-J.* Die Lichtgeschwindigkeit im Gravitationsfeld der Sonne nach Relativitaetstheorie.— *Sterne*, 1975, Bd. 51, S. 17—24.
557. *Wacker F.* Ueber Gravitation und Elektromagnetismus.— *Phys. Ztschr.*, 1906, Bd. 7, S. 300—302.
558. *Wacker F.* Ueber Gravitation und Elektromagnetismus: Diss. Tuebingen, 1909.
559. *Weliner M., Sandri G.* Scalar gravitation.— *Amer. J. Phys.*, 1964, vol. 32, p. 36—39.
560. *Weyl H.* Gesammelte Abhandlungen. B. etc., 1968, Bd. I—IV.
561. *Weyl H.* Zur Gravitationstheorie.— *Ann. Phys.*, 1917, Bd. 54, S. 117—145.
562. *Weyl H.* Gravitation und Elektrizitaet.— Berlin Ber., 1918, S. 465—480.
563. *Weyl H.* Raum. Zeit. Materie. B.: Springer, 1918.
564. *Weyl H.* Raum. Zeit. Materie. 5. Aufl. B.: Springer, 1923.
565. *Weyl H.* Philosophie der Mathematik und Naturwissenschaft. Muenchen: Berlin; Oldenbourg-Verl., 1927.
566. *Weyl H.* Zu D. Hilberts siebzigstem Geburtstag.— *Naturwissenschaften*, 1932, Bd. 20, S. 57—58.
567. *Weyl H.* D. Hilbert and his mathematical work.— *Bull. Amer. Math. Soc.*, 1944, vol. 50, p. 612—654.
568. *Weyl H.* How far can one get with a linear field theory of gravitation in flat space-time?— *Amer. J. Math.*, 1944, vol. 66, p. 591—604.
569. *Weyl H.* 50 Jahre Relativitaetstheorie.— *Naturwissenschaften*, 1950, Bd. 38, S. 73—83.
570. *Whitrow G., Morduch G.* Relativistic theories of gravitation.— *Nature*, 1960, vol. 118, p. 790—794.
571. *Whitrow G., Morduch G.* Relativistic theories of gravitation.— In: *Vistas in astronomy*/Ed. by A. Beer. New York: Pergamon Press, vol. 6, p. 1—68.
572. *Whittaker E. T.* A history of the theories of aether and electricity. L. 1910.
573. *Whittaker E. T.* A history of the theories of aether and electricity, L., 1953, vol. 2.
574. *Wiechert E.* Perihelbewegung des Merkur und die allgemeine Mechanik.— *Goett. Nachr.*, 1916, S. 124—141; *Phys. Ztschr.*, 1916, Bd. 17, S. 442—448.
575. *Wiechert E.* Die Gravitation als elektromagnetische Erscheinung.— *Ann. Phys.*, 1920, Bd. 63, S. 301—381.
576. *Wien W.* Ueber die Moeglichkeit einer elektromagnetischen Begrueundung der Mechanik.— *Ann. Phys.*, 1901, Bd. 5, S. 501—514.
577. *Wien W.* Ueber Elektronen. Leipzig, Teubner, 1909.
578. *Wilkens A.* Zur Elektronentheorie.— *Vierteljahrschr. Astr. Ges.*, 1904, Bd. 39, S. 209—212
579. *Wilkens A.* Zur Gravitationstheorie.— *Phys. Ztschr.*, 1906, Bd. 7, S. 846.
580. *Will C. M.* Einstein on the firing line.— *Phys. Today*, 1972, vol. 25, p. 23—29.
581. *Will C. M.* Gravitation theory.— *Sci. Amer.*, 1974, vol. 231, p. 25—33.
582. *Will C. M.* The theoretical tools of experimental gravitation.— In: *Rend. d. Scuola Intern. di Fisica «Enrico Fermi», LYI Corso, Varenna, 17—29 Luglio 1972. Varenna, 1974, t. 56, p. 1—110.*
583. *Williams L. P.* The origins of field theory. N. Y., 1966.
584. *Woodward J.* The search for a mechanism: action -at-a distance in gravitational theory: Ph. D. Diss., Univ. Denver, 1972.
585. *Wright E.* Invariants of quadratic differential forms.— *Cambr. Tracts Math. and Math. Phys.*, 1908, N 9.
586. *Zahar E. G.* Why did Einstein's programme supersede Lorentz's?— *Brit. J. Phil. Sci.*, 1973, vol. 24, p. 95—123; 223—262.
587. *Zeemann P.* Some experiments on gravitation. The ratio of mass to weight for crystals and radioactive substance.— *Proc. Acad. Amsterdam*, 1917, vol. 20, p. 542—553.
588. *Zenneck J.* Gravitation.— In: *Encyklopaedie der mathematischen Wissenschaften*. Leipzig, 1903, Bd. 5, Art. 24, S. 26—72.
589. *Zoellner F.* Erklaerung der unversellen Gravitation aus den statischen Wirkungen der Elektrizitaet. Leipzig, 1882.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абрагам М. 8—10, 16, 65—68, 82, 86—92, 125, 136—151, 159—182, 187—189, 198, 201, 207, 224, 237, 240, 245, 246, 251, 253, 254, 257, 258, 259, 272, 274—282, 296, 305, 314, 335, 337, 338
- Адам М. Г. 12
- Адамар Ж. 11
- Адамс Дж. К. 25, 27
- Адлер Ф. 230
- Александров П. С. 300, 329
- Алексеев И. С. 5, 328
- Альберт А. 300
- Андлинг Э. 38
- Андрад Б. Ж. 36
- Арзелье А. 11, 12, 328
- Аррениус С. 272
- Артнн Э. 300
- Ауверс А. 28
- Аустин Л. 31, 40
- Баклунд О. А. 28
- Баранов А. Г. 12, 328
- Барахас А. 269
- Бартоли А. 57
- Бейли Ф. 31
- Белл Э. Т. 338
- Бернаulli Д. 24
- Бернаulli И. 24
- Бертран Ж. 46, 48
- Бессель Ф. 39, 94—96
- Бессо М. 11, 120, 227, 274, 276, 313, 323, 332
- Бешакер М. 187, 188, 269, 338
- Биркгоф Г. 268, 269
- Богородский А. Ф. 11, 328
- Богоявленский О. И. 224
- Бойс Дж. 31
- Бологовский Б. М. 12, 328
- Больцман Л. 9, 22, 38, 52, 84, 134, 270, 291, 328
- Бор Н. 92, 296, 314, 322
- Борель Э. 272
- Борн М. 11, 14, 64, 97, 115, 165, 214, 255, 270, 271, 294, 318, 320, 321, 323, 328, 332, 338
- Боскович Р. И. 44
- Брагинский В. Б. 39, 259, 328
- Бранс К. 29, 252
- Браун К. 28, 31
- Брауэр Р. 300
- Бриллюэн М. 272
- Брода Э. 10, 123, 338
- Брумберг В. А. 328
- Буассон А. 129, 132
- Бутру П. 272
- Бухерер А. 67, 137, 173
- Бьеркнес К. 30, 40
- Бьянки Л. 290
- Бэйтман И. Г. 64, 207, 208
- Вавилов С. И. 328, 333
- Вакер Ф. 59, 60, 67—69, 81, 84—86, 90, 114, 115, 346
- Варбург Э. 275
- Варден Б. Л. ван дер. 300, 328
- Варичак В. 126, 335
- Ваши А. 30
- Вебер В. 10, 33, 34, 40, 43—53, 57, 59, 61, 84, 89, 296, 301, 305, 328
- Веблен О. 321
- Вейль Г. 11, 254—256, 269, 292, 296, 300, 301, 306—308, 311, 316, 320, 321, 323, 328, 336, 346
- Вейнберг С. 11, 328
- Веллнер М. 252, 346
- Вигнер Е. 8
- Визгин В. П. 328, 329
- Викер 31, 38
- Вилкенс А. 59, 60, 67, 69, 82, 84—86, 90, 114, 346
- Вильзинг И. 31
- Вин В. 34, 44, 60, 63, 65, 67, 114—116, 331, 346
- Вихерт Э. 53, 207, 296, 305, 346
- Владимиров Ю. С. 329
- Вольтерра В. 140, 141
- Вудворд Дж. 10, 346
- Вьяльцев А. Н. 5, 329
- Габихт К. 114, 115
- Гайль В. 67
- Галллей Г. 38, 39, 58, 93, 107
- Гамель Г. 110
- Гамильтон В. Р. 199, 200, 299, 316, 336
- Ганс Р. 34, 60—67, 84, 115, 137, 256, 339
- Гарцер П. 36, 41, 84, 329
- Гаусс К. Ф. 33, 36, 44—48, 59, 69, 84, 197, 296, 305
- Гельм Г. 30, 38, 40
- Гельмгольц Г. 36, 110, 215, 291

¹ Именной указатель составлен Х. Бобадильей.

- Гензель М. 31
 Геппергер И. 33, 40, 55
 Гербер П. 40, 48—51, 339
 Герглотц Г. 64, 207, 214, 220, 296
 Герке Э. 50, 339
 Гернек Ф. 7, 10, 230, 231, 329, 340
 Гершель Дж. 25
 Герц Г. 23, 37, 38, 42, 52, 110
 Геффлер А. 37
 Гильберт Д. 8, 9, 16, 84, 135, 220,
 254—256, 282, 292—329, 340
 Гинзбург В. Л. 11, 12, 329, 332
 Гитторф И. 180
 Глимор К. 7, 9, 15, 292, 325, 338
 Гольдберг С. 7, 12, 70, 86, 339
 Горелик Г. Е. 5
 Гоффман Б. 4, 7, 8, 11, 340
 Гоффман В. 234
 Граеф К. 269
 Григорьян А. Т. 329, 330
 Гроссман М. 8, 9, 11, 15, 16, 65, 98,
 125, 170, 174, 179—196, 198, 201—
 215, 218, 220—224, 227, 229, 232,
 236, 237, 245—254, 260—272, 276,
 279—284, 297, 298, 304, 305, 328,
 335, 336, 339—340, 342
 Гук Р. 30
 Гумм Р. Я. 308
 Гупка Э. 173
 Гупта С. Н. 269, 340
 Гурса Э. 207, 208
 Гут Э. 7, 8, 15, 311, 312, 340
 Гюйгенс Х. 24
 Дарвин Дж. Х. 56, 63, 338
 Дебай П. 97, 296, 314
 Декарт Р. 24
 Делокаров К. Х. 10, 329
 Деллинсгаузен Н. 30
 Девилл Л. 129, 131
 Джеммер М. 11, 329, 341
 Джеки С. Л. 7, 10, 341
 Дженочки А. 36
 Дикке Р. 10, 12, 29, 39, 245, 251, 259,
 273, 329, 330
 Дирак П. А. М. 119
 Долежалек Ф. 180
 Допплер Х. 111, 131
 Друде П. 18, 33, 52, 61, 296, 338
 Дюга Р. 11, 338
 Дюгем П. 38
 Дюкас Э. 8, 11, 340
 Егер Г. 270, 271
 Захар Э. 10, 70, 109, 110, 347
 Зеегерс К. 34, 46, 48
 Зеелигер Г. 29, 34, 38, 41, 50, 51, 81,
 82, 90, 273, 345
 Зеeman П. 39, 347
 Зелиг К. 11, 330, 345
 Земплан Г. 259, 270, 271
 Зельдович Я. Б. 12, 162, 330
 Зервус Г. 34, 48
 Зиммель Г. 273
 Зольднер И. 10, 32, 48, 50, 318, 345
 Зоммерфельд А. 14, 17, 64, 78, 79, 84,
 85, 90, 115, 122, 134, 174, 178, 179,
 202, 206, 214, 220, 222, 252, 275, 277,
 285, 286, 291, 296, 311—315, 323,
 330, 331, 345
 Иваненко Д. Д. 11, 12, 330, 332, 333,
 335
 Идлис Г. М. 5, 88, 330
 Изенкраге К. 30, 341
 Илли Й. 5, 7, 10, 15, 123, 341
 Инфельд Л. 4, 13, 330
 Йордан П. 10
 Иоффе А. Ф. 126, 337
 Ирмел Дж. 7, 9, 15, 292, 325, 338
 Ишивара Дж. 176—178, 246, 277, 279,
 341
 Йолли Ф. 31
 Кагальникова Н. И. 10, 330
 Кальдонаццо Б. 176, 338
 Калуща Т. 320
 Каптейн Дж. 273
 Карман Т. 97, 295
 Картан Э. 320, 321
 Кассирер Э. 11, 330
 Кастельнуово Г. 272
 Кауфман В. 53, 61, 67, 87, 137, 296,
 332
 Келлер Е. 30
 Келлер О. 62
 Келлер Ф. 30
 Киллинг В. 36, 41
 Кирсанов В. С. 5
 Кирхгоф Г. 37, 38, 291
 Клайперон Б. 26
 Кларк Р. В. 11, 338
 Клаузиус Р. 43, 45
 Клейн М. 12, 341
 Клейн Ф. 9, 37, 84, 110, 127, 133, 135,
 295, 306, 307, 311, 312, 318, 319, 341
 Клейнпетер Г. 38
 Клеро А. К. 25
 Клиффорд В. 37, 38, 41, 330, 338
 Кобзарев И. Ю. 5, 330
 Коен Б. 11, 331
 Кольерос Л. 201, 341
 Колмогоров А. Н. 300
 Кон И. 36
 Ковоплева Н. П. 12, 331
 Коперник Н. 329, 331
 Кофф А. 331
 Корн А. 30, 40, 278
 Котельников А. П. 36, 110
 Коттлер Ф. 10, 83, 137, 207—209, 220,
 314, 341
 Коши О. 26

- Крейхгауэр Д. 31, 40
 Кремье 31, 40
 Кречман Э. 10, 137, 259, 277—279, 314, 341—342
 Кригер-Менцель О. 31
 Кристоффель Э. Б. 191, 198, 205, 207, 208, 211, 213, 221—223, 249, 250, 285
 Кроль Д. Ж. 30
 Круль В. 300
 Кузнецов Б. Г. 11, 12, 331, 335
 Кулон Ш. 39, 44, 54, 79, 152
 Кун Т. 18, 19, 20, 21, 24, 331, 342
 Курант Р. 97, 292
 Курош А. Г. 300
 Кюри П. 110
 Кэмпбелл В. В. 227, 228
- Лагранж Ж. Л. 25, 27, 158, 187, 300, 333
 Ладенбург Р. 115
 Лакатос И. 18, 21, 25, 331, 342
 Лаланд Ж. 25
 Ламс Г. 26
 Ламла Э. 278
 Лампа А. 123
 Ланге Л. 38, 110, 331
 Ландау Л. Д. 14, 331
 Ланде А. 295
 Ландольт Г. 31, 40, 62
 Ланжевел П. 34, 39, 58, 60, 64, 85, 86, 272, 275, 331
 Ланцош К. 7, 8, 14, 331, 342
 Лаплас П. С. 10, 25—27, 33, 34, 44, 55, 74, 124, 147, 148, 171, 211, 213, 218, 279
 Лармор Дж. 18, 52, 53, 64, 110, 255, 342
 Лассвиц К. 38
 Лауб Я. 10, 64, 103, 115, 116, 121, 135, 137, 192, 335
 Лауэ М. 11, 14, 50, 51, 64, 103, 137, 165, 189, 206, 214, 239, 240, 244, 251—254, 275, 276, 314, 318, 331, 338, 342
 Леверрье У. 25, 27, 28, 4547, 114
 Леви М. 34, 46—49, 342
 Левн-Чивита Т. 127, 191, 194, 197, 198, 205—208, 221—224, 344
 Левитская М. А. 31, 331
 Лейбниц Г. В. 24
 Лека М. 342
 Леман-Фильсс Р. 33, 40, 55
 Ленар П. см.—Ленард Ф.
 Ленард Ф. 10, 263, 318, 331
 Лепил В. И. 18, 20, 331
 Лерэ К. 30
 Лесаж Ж. 30, 39, 56, 57, 63, 87, 107, 329
 Ли С. 110, 294, 298, 300
 Лиги А. 30
 Лиман О. 34, 46, 48
 Линдеман Ф. 36
- Лифшиц Е. М. 14, 224, 331
 Лишнеровиц А. 224
 Лобачевский Н. И. 36
 Лове 38
 Лодж О. 52, 53
 Лоренц Г. А. 9, 11, 18, 23, 34, 40, 42, 44, 46, 52, 53, 56—68, 70—72, 77—87, 89, 92, 94, 108, 110, 114—122, 134, 137, 145—147, 168, 171, 174, 181, 186, 195, 197, 199, 207, 214, 235, 245, 248, 256, 272, 275, 277, 291, 292, 294, 314, 316, 322, 325, 331, 332, 342
 Лориа С. 115
 Лукреций Ю, 334
 Луммер О. 115
- Маделунг Э. 97
 Майер Р. 10, 178
 Майкельсон А. 97, 98, 103, 294, 334
 Мак-Грегор Дж. 38
 Маккензи А. 31, 40
 Мак-Кормак Р. 45, 46, 53, 342
 Маклорен К. 24
 Максвелл Дж. К. 23, 27, 30, 32, 37, 38, 43, 45, 53—61, 63, 86, 109, 119, 140, 145, 151, 152, 177, 207, 208, 255, 260, 296, 301, 332
 Мандельштам Л. И. 11, 332
 Мансон П. 38
 Мах Э. 7, 10, 15, 16, 32, 37, 38, 41, 42, 49, 50, 94, 110, 111, 117, 123, 124, 127, 191, 192, 202, 203, 206, 218, 228—236, 253, 273, 274, 281, 329—336
 Маурер 84
 Мейерсон Э. 11, 342
 Мехра Дж. 7, 8, 15, 165, 295, 312, 320, 342
 Ми Г. 16, 93, 107, 125, 137, 138, 189, 224, 237, 245, 246, 253—264, 267—271, 276—279, 281, 282, 287, 295—299, 301—304, 307—317, 320, 322, 326, 332, 342—343
 Мизнер Ч. 11, 332
 Минковский Г. 9, 11, 16, 18, 37, 64, 69, 72, 75—94, 100—103, 106, 115, 116, 122, 135, 137, 138, 142—146, 180, 181, 194—197, 199, 201, 206, 207, 213, 214, 246, 251, 255, 277, 279, 280, 294, 295, 296, 305, 314, 330, 332, 343
 Миннигероде Б. 110
 Мозенгайль К. 103
 Мордух Дж. 83, 92, 346
 Морли Э. 103, 294
 Морозов Н. А. 278
 Моссотти О. 43, 44, 51, 52, 53, 57, 61, 65
 Мотт-Смит 37
 Мюллер А. 37, 343
- Наан Г. И. 11, 12
 Навье А. 26

- Нейман К. 34, 37, 38, 41, 43, 45, 49,
 51, 67, 89, 94, 110, 343
 Нейман Ф. 291
 Нернст В. 180, 275
 Нетер Э. 300, 301, 305, 318
 Новиков И. Д. 12, 162, 330
 Нордстрем Г. 7, 8, 16, 92, 93, 100, 107,
 125, 128, 137, 138, 159, 163, 179—
 189, 193, 224, 227, 237—270, 275—
 283, 296, 302, 314, 336, 343
 Норгс Дж. 10, 343
 Ньюком С. 28, 35, 45, 47, 337, 343
 Ньютон И. 10, 13, 23, 24, 28, 32, 34,
 35, 38, 39, 48, 54, 56, 58, 70—74, 83,
 86—88, 92—96, 99, 130, 143, 225,
 230, 236, 246, 274, 331, 337
 Овчинников Н. Ф. 328, 329, 331, 332
 Опленгейм С. 46, 50, 51, 343
 Опленгеймер Р. 13, 33, 332
 Опшольцер Т. 28, 33, 55
 Оствальд В. 273
 Паванини Дж. 344
 Пайнсон Л. Р. 5, 7, 9, 10, 15, 76, 116,
 134, 180, 294, 344
 Паули В. 11, 174, 174, 256, 268, 269,
 296, 302, 306, 311, 312, 320—323,
 332, 337, 338
 Пашен Ф. 67, 84
 Пекар Д. 39, 62, 100, 259
 Пенроуз Р. 224
 Перрен Ж. 86
 Песталоцци И. Г. 110
 Пик Г. 16, 123—127, 205—208, 344
 Пекар Э. 38, 279
 Пикте Р. 31, 40
 Пирсон К. 30, 38, 40, 55
 Планк М. 13, 18, 22, 38, 64, 67, 84, 99,
 103, 107, 108, 115, 118, 119, 124, 134,
 137, 193, 199, 214, 229, 233, 275, 276,
 282, 291, 292, 314, 322, 330, 332, 333,
 335
 Погребынский И. Б. 26, 329, 333
 Пойнтинг Дж. 31, 40, 52
 Полак Л. С. 5, 329, 330
 Поллак Л. В. 133
 Понтрягина Л. С. 300
 Престол С. 30, 40
 Пуанкаре А. 11, 18, 23, 30, 36, 37, 38,
 52, 56, 58, 60, 63—66, 69—94, 99—
 103, 106, 110, 115, 122, 142, 246,
 251, 277, 294, 313, 329—333
 Пуассон С. Д. 26, 27, 35, 44, 82, 90—
 92, 100, 101, 124, 125, 136, 138, 142,
 145, 147, 148, 150, 167, 171, 186, 210,
 211, 213, 216, 218, 248, 257, 266, 283
 Райт Дж. 207, 346
 Райхенбахер Э. 10
 Рассел Б. 36, 37, 41, 273
 Ратновский С. 67, 173
 Рей А. 20, 273
 Рейспер Г. 137, 254, 270—274, 336, 344
 Реннер Я. 39
 Ризанек А. 30
 Рикке Э. 270, 271
 Риман Б. 10, 14, 30, 33, 34, 37, 40,
 45—49, 59, 84, 89, 191, 194—198,
 211, 221, 236, 249, 250, 270, 296, 301,
 305, 333
 Ритц В. 10, 62, 63, 84, 115, 201, 272,
 296, 344
 Рихард А. 31
 Риччи-Курбастро Г. 127, 159, 191, 194,
 199—201, 205—215, 218, 221—224,
 250, 283, 288, 298, 309, 344
 Родичев В. И. 12
 Родный Н. И. 333
 Розенбергер Ф. 38, 333
 Розенфельд Б. А. 329, 333
 Рубенс Г. 275
 Руффини Р. 224, 333
 Рэй Л. 62
 Сагатов М. У. 333
 Сакс М. 344
 Сандоваль-Вайярта М. 269
 Сандри Дж. 252, 346
 Саутсерн Л. 31, 96, 100, 259, 333, 345
 Секки П. 30
 Сексл Р. 253
 Сен-Венан А. 26
 Синг Дж. 333
 Сирл Дж. 53, 60
 Ситтер В. де 4, 79—85, 88, 90, 115, 345
 Смородинский Я. А. 5, 6, 11, 289,
 328—330, 335
 Соколов А. А. 334
 Соловин М. 11, 115, 337
 Суворов С. Г. 333
 Сталло Дж. 38
 Старобинский А. А. 224
 Старосельская-Никитина О. А. 331
 Степин В. С. 333
 Стечел Дж. 7, 15, 127, 345
 Столетов А. Г. 52
 Струве Г. О. 228, 333
 Схоутен Я. А. 321
 Сэнфорд Ф. 62
 Тамм И. Е. 11, 335
 Тауб А. 224
 Твняг Ч. 31
 Тийн Ж. 36
 Тимирязев А. К. 331, 333
 Тирринг Г. 235
 Тирринг В. 265, 269, 345
 Тодхантер И. 345
 Толмэн Р. 333
 Томмазина Т. 63, 278, 345
 Томсон В. 37, 40, 291, 345
 Томсон Дж. Дж. 18, 30, 31, 34, 37, 38,
 52, 53, 56, 60, 61, 99, 100, 115, 334,
 345
 Тошела М.-А. 7, 11, 12, 334, 345

- Торн К. 11, 334
 Траутман А. 345
 Тредер Г.-Ю. 7, 10, 12, 45, 165, 250,
 251, 334, 344, 346
 Триккер 67
 Тюринг Б. 345
 Тялкин А. А. 333
 Угаров В. А. 331
 Уилер Дж. А. 11, 332, 333
 Уитроу Дж. 83, 92, 346
 Уиттекер Э. Т. 11, 207, 346
 Умов Н. А. 52, 334
 Урысон П. С. 300
 Уэвселл В. 24, 25, 334
 Фабри Ш. 129, 131
 Файербэнк В. 224
 Фарадэй М. 23, 31, 32, 43, 44
 Федоров Е. С. 110
 Фейнман Р. 269, 339
 Фекетс Э. 39, 100, 259
 Фенпл А. 35, 38, 55, 59, 255
 Филлипс П. 31
 Фирц М. 268, 269, 339
 Фицджеральд Дж. 52, 108
 Фишер Э. 228
 Фок В. А. 4, 165, 334
 Фоккер А. Д. 189, 248—250, 283, 297,
 336, 339
 Фонсенз Д. де 36
 Фонтенель Б. 24
 Форбс Э. 229, 339
 Франк Ф. 11, 23, 127, 205, 206, 334,
 339
 Франклин Б. 44
 Франкфурт У. И. 12, 334
 Фредерикс В. К. 11, 330—334
 Фрсйд З. 273
 Фрейндлих Э. 10, 16, 133, 134, 188,
 227—229, 252, 270, 275, 282, 314,
 316, 334, 336, 339
 Френель О. Ж. 32
 Френк А. М. 12, 330, 332
 Френкель В. Я. 12, 332, 334
 Фридлендер Б. 38
 Фридлендер И. 38
 Фридман А. А. 4, 329, 334
 Хаббл Э. 4
 Хавас П. 340
 Хазенорль Ф. 9, 214, 270, 271
 Хайльброн Дж. 342
 Харвей А. 7, 10, 83, 92, 253, 340
 Хассе Г. 300
 Хевнсайд О. 34, 52, 53, 56, 58, 60, 255,
 256, 340
 Хейдвайлер А. 31, 62
 Хейль 10, 12, 334, 340
 Херман А. 340
 Хертль Е. 28
 Хирсиягэ Т. 340
 Холл М. 35
 Холтон Дж. 5, 7, 10, 11, 86, 108, 109,
 110, 334, 340, 341
 Хольцмюллер К. 34, 46, 48
 Хопф Л. 178, 300
 Хунд Ф. 341
 Хэйл Дж. 227, 228
 Цейтлин З. А. 51, 331, 334
 Целльнер Ф. 34, 44, 46, 51, 57, 61, 65,
 86, 347
 Ценнек И. 30, 49, 347
 Чандрасекхар С. 224, 334, 338
 Чапск М. 338
 Челлис Дж. 30
 Чудинов Э. М. 334
 Шази Ж. 11, 47, 84, 334
 Шайбнер В. 46, 50
 Шварц Х. 10, 344
 Шварцшильд К. 4, 36, 41, 69, 84, 207,
 228, 296, 334
 Шеленьи П. 97, 345
 Шенкланд Р. 11, 334
 Шенфлис А. 110
 Шеринг Э. 36, 41
 Шмидт О. Ю. 300
 Шоке-Брюа И. 224
 Шредингер Э. 321
 Шрейер О. 300
 Штарк И. 103
 Штраус М. 7, 345
 Штрейнц Г. 38
 Шюккинг Э. 224
 Шютц А. 270
 Шютц И. 110
 Эвальд П. 295, 311, 312
 Эверитт Ф. 224
 Эддингтон А. 11, 118, 119, 256, 306,
 321, 334, 335
 Эйлер Л. 10, 24, 25, 158, 300
 Эйнштейн А. 4—18, 23, 32, 35, 37, 38,
 42, 43, 50, 63—65, 70, 80, 84, 86, 88,
 90—95, 97, 98, 100—139, 143—240,
 243—252, 254, 257, 258, 259—299,
 303—348
 Элерс Дж. 224
 Энке И. 28, 29
 Энрикес Ф. 272
 Энског Д. 295
 Эпикур 10
 Эпинаус Ф. 44
 Эренфест П. 9, 16, 125, 126, 127, 152,
 158, 316, 322, 335, 337, 338
 Этвеш Л. 39, 41, 94, 95, 96—98, 102,
 202, 203, 245, 251, 259, 270, 273, 277,
 339
 Юнг Т. 32
 Ютнер Ф. 214
 Яковский И. О. 30, 278, 337
 Яумани Г. 124, 125, 136, 138, 341

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	7
Глава I	
ПРОБЛЕМА ГРАВИТАЦИИ НАКАНУНЕ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ	17
1. Трудности ньютоновской теории тяготения и попытки их преодоления	17
Замечания методологического характера	17
Классико-механическая программа	21
Краткий очерк истории гравитационной проблемы после Ньютона	24
Экспериментально-эмпирические трудности	27
Логико-теоретические трудности	29
2. Электромагнитные теории тяготения	43
Электродинамические теории тяготения до возникновения электромагнитно-полевой программы	43
Электромагнитно-полевая программа и проблема гравитации	52
Электромагнитная теория тяготения Лоренца	56
Электромагнитные теории гравитации накануне СТО	60
Глава II	
РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ПРОГРАММА И ПРИНЦИП ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ	64
1. Специальная теория относительности и гравитация	64
Релятивистская программа	64
Лоренц-ковариантная теория гравитации Пуанкаре	69
Теория тяготения Минковского	75
Развитие теорий Пуанкаре—Минковского в начале 1910-х годов	79
Обсуждение теорий Пуанкаре—Минковского и их роль в генезисе релятивистской теории гравитации	82
2. Принцип эквивалентности, 1907 г.	93
Вопрос о равенстве инертной и гравитационной масс до Эйнштейна	93
СТО и равенство $m_g = m_{ин}$	98
Открытие принципа эквивалентности	103
Проблема гравитации в 1908—1910 гг.	113
3. Принцип эквивалентности, 1911 г.	123
Пражские контакты Эйнштейна	123
Принцип эквивалентности	127

Глава III

СКАЛЯРНЫЕ ТЕОРИИ	136
1. Первая теория Абрагама	136
2. Эйнштейновские теории статического гравитационного поля	144
Первая статическая теория Эйнштейна	144
Вторая статическая теория Эйнштейна	153
Значение статических теорий Эйнштейна в подготовке ОТО	157
3. Вторая теория Абрагама	166
4. Первая теория Нордстрема	179

Глава IV

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ	190
1. Решающий поворот — тензорно-геометрическая теория Эйнштейна — Гроссмана, 1912—1913 гг.	190
Работы, предшествующие «Проекту»	198
«Проект» — первое изложение теории	202
Проблема уравнений гравитационного поля	240
Венский доклад Эйнштейна	224
2. Конкуренция гравитационных теорий, 1913—1915 гг.	237
Вторая теория Нордстрема	237
Теории Ми	254
Отношение физиков к теории Эйнштейна — Гроссмана, 1913—1914 гг.	270
3. Возврат Эйнштейна к общековариантным уравнениям гравитационного поля	283
4. Гильберт и проблема общековариантных уравнений гравитации	292
Гильберт и физика	292
«Основания физики» Гильберта	297
Эйнштейн и Гильберт	304
Приложение	324
ПЕРЕПИСКА ЭЙНШТЕЙНА И ГИЛЬБЕРТА В НОЯБРЕ 1915 г.	324
ЛИТЕРАТУРА	327
ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ	346

ВЛАДИМИР ПАВЛОВИЧ ВИЗГИН

Релятивистская теория тяготения.
 (ИСТОКИ И ФОРМИРОВАНИЕ. 1900—1915)

Утверждено к печати
 Институтом истории естествознания и техники Академии наук СССР

Редактор В. М. Еремьина. Редактор издательства И. М. Мататова
 Художник Н. А. Седелников. Художественный редактор Т. П. Полесова
 Технический редактор А. М. Сатарова. Корректоры Л. В. Лукичева, В. Г. Петрова

ИБ № 17016

Сдано в набор 18.08.80. Подписано к печати 09.03.81 Т-04155 Формат 60×90^{1/16}
 Бумага № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая
 Усл. печ. л. 22. Уч.-изд. л. 25. Тираж 2000 экз. Тип. зак. 5117. Цена 3 р 30 к
 Издательство «Наука» 117864 ГСП-7, Москва, В-485, Профсоюзная ул., 90
 2-я типография издательства «Наука» 121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 10