



МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)

А.Ф. СМЫК

ИСТОРИЯ ФИЗИКИ В ОТКРЫТИЯХ И ИЗОБРЕТЕНИЯХ

В печать
Ректор МАДИ

Ажгиревич А.И.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)»

Кафедра «Физика»

А.Ф. СМЫК

ИСТОРИЯ ФИЗИКИ В ОТКРЫТИЯХ И ИЗОБРЕТЕНИЯХ

МОНОГРАФИЯ

МОСКВА
МАДИ
2023

УДК 530.
ББК 22.314
С 524

Рецензент
д-р физ.-мат. наук, проф. А.А. Сонин

Смык, А.Ф.

С 524 История физики в открытиях и изобретениях: монография /
А.Ф. Смык. – М.: МАДИ, 2023. – 204 с.

ISBN 978-5-7962-0300-2

В монографии представлены наиболее значимые открытия и изобретения в истории физики с момента зарождения научных представлений до настоящего времени. Эти открытия являются фундаментом современной науки и определяют содержание курса общей физики. Книга позволяет проследить генезис и эволюцию экспериментальных научных исследований, возрастание сложности физического эксперимента по мере углубления в микромир, миниатюризацию приборов и средств измерения, а с другой стороны, коллективной работы большого числа научных лабораторий по обработке полученных экспериментальных результатов. Помимо изложения хода экспериментальных исследований, результатом которых стали открытия новых явлений или подтверждения ранее выдвинутых гипотез, значительное внимание уделяется анализу положенных в их основу методов и принципов. Описана приборная база экспериментальных открытий, а также устройств, с помощью которых проводились экспериментальные исследования.

Книга предназначена для всех, интересующихся историей науки и техники, преподавателей физики и технических дисциплин, а также студентов технических специальностей.

УДК 530
ББК 22.314

ISBN 978-5-7962-0300-2

© МАДИ, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ. Роль эксперимента в развитии научного знания.....	5
1. МЕХАНИКА.....	9
1.1. Архимед и закон рычага	9
1.2. Задача о выталкивающей силе.....	11
1.3. Винт Архимеда	12
1.4. Галилей: изучение движения тел	13
1.5. Гюйгенс и физический маятник.....	15
1.6. Закон Паскаля	17
1.7. Классическая механика Ньютона	20
1.8. Машина Обербека	24
2. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ	25
2.1. Опыты Гильберта.....	25
2.2. Генератор электрических зарядов Герике	26
2.3. Лейденская банка	27
2.4. Электрическая природа молнии	29
2.5. Закон взаимодействия электрических зарядов	33
2.6. Опыты Гальвани и открытие «животного электричества»	36
2.7. Опыты А. Вольта и открытие контактной разности потенциалов.....	36
2.8. Открытие «вольтова столба».....	38
2.9. Явление электрической дуги.....	39
2.10. Опыты Эрстеда как доказательство взаимосвязи электрических и магнитных явлений.....	42
2.11. Закон Ампера о взаимодействии электрических токов.....	45
2.12. Изобретение мультипликатора.....	49
2.13. Эффект Зеебека	51
2.14. Термоэлектричество в электролитах и ферромагнитных жидкостях... 53	
2.15. Установление закона электрических цепей	55
2.16. Закон Джоуля-Ленца	64
2.17. Электрические лампы Лодыгина, Яблочкова и Эдисона	66
2.18. От наблюдения электрического тока в вакууме к электронному выпрямителю	71
2.19. Открытие индукционных токов.....	73
2.20. Изобретение электрических трансформаторов.....	75
2.21. Опыт Милликена и заряд электрона	78
2.22. Визуализация электронов	81
2.23. Экспериментальное изучение электрического разряда.....	85
2.24. Опыты Тесла	88
2.25. Эксперименты с «лучами электрической силы».....	91
2.26. Изобретение радио.....	97
2.27. Явление электромагнитной индукции. Опыты Д. Генри и М. Фарадея.....	104
2.28. Направление индукционного тока: опыты Ленца	109

2.29.	Катодные лучи	113
2.30.	Открытие рентгеновского излучения	115
2.31.	Установление природы катодных лучей и модель атома Томсона ..	117
2.32.	Опыты Томсона по определению удельного заряда электрона	119
3.	ОПТИКА	121
3.1.	Опыты Ньютона по интерференции, дифракции и поляризации света	121
3.2.	Опыты Юнга и объяснение колец Ньютона	130
3.3.	Открытие поляризации света	132
3.4.	Опыты Френеля	133
3.5.	Развитие метода оптической спектроскопии	136
3.6.	Давление света	139
3.7.	Определение скорости света	141
4.	МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА	147
4.1.	Определение атмосферного давления	147
4.2.	Открытие газовых законов	149
4.3.	Изобретение паровой машины	151
4.4.	Механический эквивалент тепла	156
4.5.	Опыт Штерна	157
5.	АТОМНАЯ ФИЗИКА И КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА	160
5.1.	Явление фотоэффекта и опыты Столетова	160
5.2.	Опыты Томсона	163
5.3.	Опыты Ленарда	164
5.4.	Квантовая гипотеза Эйнштейна и ее экспериментальная проверка	166
5.5.	Открытие атомного ядра	168
5.6.	Дифракция рентгеновских лучей	170
5.7.	Опыты Комптона	175
5.8.	Экспериментальные исследования радиоактивности	177
5.9.	Опыты Дж. Чедвика по открытию нейтрона	180
5.10.	Открытие электронного парамагнитного резонанса	182
5.11.	Создание лазера	189
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	195
	ЛИТЕРАТУРА	196
	ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ	201

ВВЕДЕНИЕ. РОЛЬ ЭКСПЕРИМЕНТА В РАЗВИТИИ НАУЧНОГО ЗНАНИЯ

Знания истории физики являются неотъемлемой составляющей общего физического образования. При изучении курса общей физики студенты сталкиваются со сложным математическим описанием явлений, за которым часто не видят наглядного и ясного объяснения, почему это происходит, забывая, что за каждым установленным физическим законом или понятием стоит экспериментальное исследование и совершенное открытие. Открытое явление требует объяснения, для этого привлекаются гипотезы, а затем выстраивается теоретическое объяснение в рамках существующих представлений о физическом мире. И наоборот, в истории физики существуют примеры выдающихся экспериментальных результатов, которые удалось понять только после теоретических догадок (озарений), о которых ранее никто не подозревал. Так произошло с идеей о волновой природе вещества французского физика Луи де Бройля. Его теоретическое открытие (1923 г.) позволило объяснить наблюдаемые ранее в экспериментах максимумы и минимумы интенсивности, характерные для дифракционной картины, которые были получены американскими исследователями К.Дж. Девиссоном и Л.Х. Джермером в результате отражения пучка медленных электронов от поверхности кристаллического никеля. К таким примерам можно отнести и гипотезу о световых квантах А. Эйнштейна (1905 г.), позволившую объяснить явление фотоэффекта, экспериментальное наблюдение которого началось Г. Герцем в 1887 году, а еще ранее в 1839 году наблюдавшийся французским физиком А. Беккерелем «фотовольтаический эффект» (возникновение электрического тока под действием света) в электролите.

Часто изобретения в области техники становились точкой роста для развития научного знания и появления новых областей в физике. Так, паровой двигатель был создан практически без помощи физического научного знания, хотя дальнейшее его совершенствование и повышение коэффициента полезного действия были невозможны без развития термодинамики. Закон Ома для участка электрической цепи был открыт без представлений о природе электрического тока, только при наличии средств измерения силового действия того, что называли «электрической жидкостью».

Техника научных инструментов появилась в начале XVIII века, хотя многие приборы, такие как, например, микроскоп и телескоп существовали задолго до этого в качестве занимательных устройств, в которых использовались линзы. Для того чтобы превратить их в научные инструменты потребовалось преодолеть ряд сложностей, связанных с качеством стекла для линз, разработкой приспособлений для фокусировки и исправления хроматических и сферических аберраций, дальности видения. Научные приборы и инструменты, методы исследования активно проникли в технику на протяжении XIX и XX веков.

В XXI веке наука превратилась в индустрию. Сегодня научные открытия, такие как доказательство существования топ-кварков, открытие новой планеты по анализу колебаний далекой звезды, обнаружение гравитационных волн, не

под силу одному человеку, за ними стоят огромные материальные затраты и научные коллективы. Эти открытия порождают терабайты информации, для изучения которых необходимы суперкомпьютеры, превратившиеся в фабрики по производству расчетов и излучающие столько тепловой энергии, что для их охлаждения требуются установки, потребляющие не меньше электричества, чем небольшие города. Тем не менее история физики содержит выдающиеся научные открытия, которые делались учеными в одиночку на лабораторном столе. Среди них открытия в области полупроводниковой электроники, сделанные в 1920-х гг. советским ученым и изобретателем О.В. Лосевым, который первым продемонстрировал усиление и генерацию электромагнитных колебаний полупроводниковыми устройствами, а также наблюдал электролюминесценцию в полупроводниках. Во всех своих научных статьях и патентах О.В. Лосев был единственным автором.

Успехи экспериментальной физики всегда будут связаны с усовершенствованием методов и средств измерения, усовершенствованием приборов и установок. Что такое научный эксперимент? У него есть две функции – исследовательская и проверочная. Вначале, когда никакого знания еще нет и его надо получить непосредственный предметный опыт выступает в качестве источника научного знания – в функции исследовательского эксперимента [1]. Перед экспериментатором находятся предметы, и он должен получить знания о них. Когда же мы имеем развитую теоретическую систему, то задача эксперимента состоит в том, чтобы подтвердить или опровергнуть теоретически полученное утверждение. Ученый занимается различными предметами и явлениями природы потому и затем, что хочет найти в них всеобщее. Мы ставим опыты с деревянными весами, свинцовыми шарами, заряженными листочками, химически определенными газами, но хотим увидеть в них действие законов сохранения, ускорения, электростатического взаимодействия, термодинамики газов вообще.

Галилео Галилей (1564–1642) считается одним из основоположников опытного естествознания, «отцом современной физики» его назвал А. Эйнштейн. Именно Галилей впервые сформулировал требования к научному эксперименту, которые состоят в устранении побочных обстоятельств, в умении видеть главное и отвлекаться от несущественного. Он обосновал научный метод, который является основой современной физики. Свое понимание современной физики Эйнштейн описал следующей схемой¹. На рисунке Эйнштейна (рис.1) буквами обозначены: А (аксиомы) – основы теории, «свободные изобретения человеческого духа, не выводимые логически из эмпирических данных», а возникающие на основе эмпирических наблюдений Э благодаря (крутому взлету стрелы) интуиции. Из основ теории А выводятся конкретные утверждения У, которые проверяются сопоставлением с эмпирическими наблюдениями (пунктирные стрелки) [2].

¹ Эта схема появилась в письме А. Эйнштейна к М. Соловину, 7.05.1952

Нобелевский лауреат французский физик Луи де Бройль писал: «Эксперимент, неотъемлемая основа любого прогресса естественных наук, ... лишь он один может служить нам источником знаний о реальных фактах, которые стоят выше любой теоретической концепции, любой предвзятой идеи. Но эксперимент не должен сводиться к простому, пассивному наблюдению. Он должен всякий раз, когда это возможно, активно вмешиваться в реальность, изменяя условия возникновения явлений, вопрошая природу строго определенным образом, так, чтобы видеть, каков будет ее ответ. ... Эксперимент должен быть точным, для того чтобы быть действительно плодотворным, он должен выражать свои конечные результаты в количественной форме, то есть численно» [3].

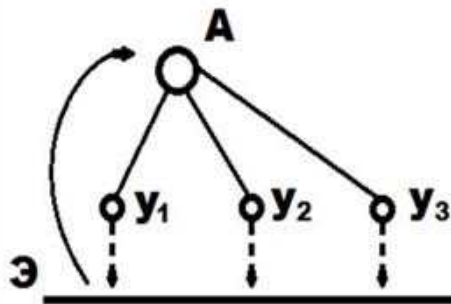


Рис. 1. Схема А. Эйнштейна

История физики содержит много примеров, демонстрирующих равнодушие и непонимание крупных научных достижений со стороны научного сообщества, которые связаны с инертностью мышления. Часто выдающийся результат не может быть оценен, если не существует достаточных знаний в той области, к которой он относится. «*Великие открытия часто являются серендипными*» – говорила на церемонии награждения лауреатов Нобелевской премии по химии 2012 года член Нобелевского комитета Сара Сногеруп Линсе [4]. Серендипность означает способность делать глубокие выводы из случайных наблюдений, находить то, чего не искал намеренно². В русском языке наиболее близки к понятию «серендипность» слова «озарение» и «провидение». К таким примерам случайного открытия можно отнести открытие рентгеновского излучения К.В. Рентгеном, открытие взаимосвязи электричества и магнетизма Эрстедом. «*Даже в скрупулезном мире научных исследований в игру (почти всегда) вступает случайность. Согласно исследованиям, от 30 до 50% важнейших научных открытий произошли неожиданно или в результате совпадений*» [5]. Серендипные открытия часто не требуют больших материальных затрат, ведь они нередко происходят побочно, по ходу работы над чем-то другим. Существует популярная фраза, которую приписывают разным

² В английском языке термин «*serendipity*» прочно закрепился с XVIII века, он связан с именем Хораса Уолпола (1717-1797), который назвал «искусство использовать неожиданные случайности – *serendipity* (серендипность)».

учёным «*Serendipity favors the prepared mind*», которую можно перевести так: «Счастливая догадка приходит в ту голову, которая к ней готова».

Самое дорогостоящее открытие в истории физики – это открытие в 2013 году бозона Хиггса на Большом адронном коллайдере (БАК). Эта элементарная частица завершает теоретическую конструкцию в физике элементарных частиц (Стандартную модель). Стоимость БАК сопоставима с годовым бюджетом небольшого государства, в строительстве и научных исследованиях на БАК участвуют более 10 тысяч ученых и инженеров из более чем 100 стран мира. Возможность экспериментально обнаружить бозон Хиггса была основной целью строительства этого гигантского сооружения, к этому открытию шли целенаправленно, и оно не являлось серендипным.

На рисунке 2 изображены научные инструменты и приборы, представленные на Всемирной промышленной выставке в 1876 году, которые отражали уровень развития науки и техники во второй половине XIX века. Почти 150 лет отделяют нас от этих научных инструментов до современных средств измерения и обработки экспериментальных данных, которые наиболее полно представлены в ускорителе БАК. На рисунке 3 изображен участок 27-километрового подземного тоннеля, в котором размещен Большой адронный коллайдер, ускорителя заряженных частиц на встречных пучках, предназначенный для разгона протонов и тяжелых ионов и изучения продуктов их соударений. В 2012 году были получены первые научные результаты, которые подтвердили Стандартную модель.

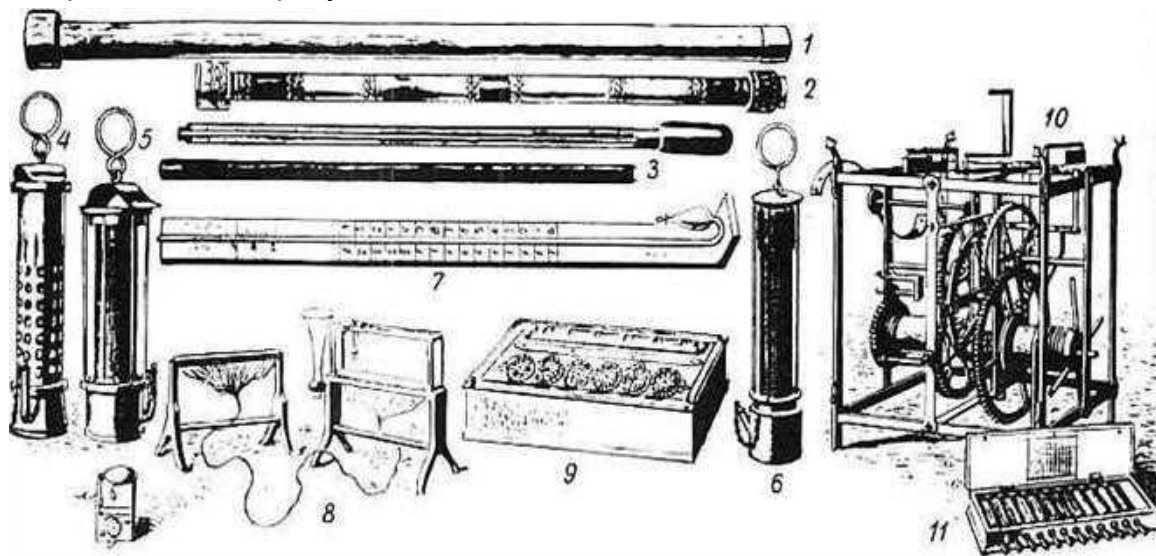


Рис.2. Исторические научные приборы, представленные на Всемирной промышленной выставке 1876 года: 1-2 – телескоп Галилея; 3 – горный барометр Дальтона; 4,5,6 – различные варианты безопасной лампы Дэви; 7 – аппарат Дальтона для измерения парциального давления паров эфира; 8 – электрический телеграф Земмеринга; 9 – счетная машина Паскаля; 10 – старинные швейцарские часы; «счеты Нэпера» – для деления и умножения [6. С.86]

Нобелевский лауреат американский физик Ч. Таунс писал: *«Представления человека об окружающем мире и о самом себе, возникшее в результате научного исследования, есть нечто более ценное, чем просто «практический результат» в узком смысле. Открытие новых явлений, их понимание расширяет наш кругозор, является источником нового вдохновения, дает удовлетворение нашей врожденной любознательности и укрепляет уверенность в достижимости самых великих целей. Рассматривать науку исключительно с точки зрения ее практического выхода было бы также нелепо, как доказывать важность музыки для человечества, ссылаясь лишь на кассовые сборы»* [7].



Рис. 3. 27-километровый подземный тоннель, в котором размещен БАК (Википедия)

1. МЕХАНИКА

1.1. Архимед и закон рычага

С Древней Греции начинается период преднауки, когда впервые выделяется наука о природе – физика. Термин «механика» в переводе с греческого означает «мастерство», касающееся машин. В современной физике «механика» присутствует в названиях таких разделов как классическая механика, теоретическая механика, статистическая механика, квантовая механика и других. Мы будем рассматривать здесь открытия в области классической механики – это научное знание о движении макроскопических тел со скоростями, много меньшими скорости света, их взаимном расположении в пространстве и изменениями с течением времени. Общие законы движения и взаимодействия макроскопических тел со времен Исаака Ньютона (1643-1727) устанавливались на основе опытов и их обобщений. До формирования основных положений классической механики прошло почти 2000 лет, когда в IV веке до н.э. древнегреческие ученые предприняли первые попытки научных обобщений в области статики (воздействие приложенных сил на равновесие тел). С помощью научных знаний в области механики греки строили дома, в военных целях на

основе рычага были сконструированы краны, легко опрокидывающие корабли противника. Механика рассматривалась как чисто прикладная, практическая наука, не имеющая ничего общего с высокой чистой наукой, «просветляющей душу человека».

Архимед родился около 287 г. до н.э. Он знаменит тем, что открыл число π (пи) для вычисления длины окружности в зависимости от ее радиуса, нашел объем шара, а также способ вычисления расстояния от Земли до некоторых планет. Этот гениальный механик-изобретатель написал только один труд по прикладной механике «Об изготовлении небесной сферы», в остальных его трудах нет ни одного описания механизма, из них тщательно устранено то, что имеет прикладной характер, не описан ни один прибор. Сделанный им небесный глобус, на котором можно было наблюдать не только движения светил, но и затмения, и который приводился в движение водой; изобретенная им машина для полива египетских полей, целый ряд сложнейших военных машин – дают право говорить об Архимеде как инженере-изобретателе, проявлявшего гениальность в технической области. Он изобрел особый вид рычага и винт для подъема воды при искусственном орошении [8].

Рычаг был одним из древнейших орудий, который позволил выйти человеку из беспомощного первобытного состояния. Этот загадочный механизм, при помощи которого можно малой силой поднимать большой груз, не мог казаться первобытному человеку чем-то сверхъестественным. Человек видел два ряда явлений: большое плечо рычага, описывающего большую дугу, и малое плечо, описывающее в тоже время малую дугу, причем оба сектора, описываемые плечами рычага, подобны друг другу. Эти аналогичные ряды явлений связаны между собой стержнем рычага. Воздействуя на одно плечо рычага, можно вызвать аналогичное действие в другом плече. Архимед объяснил принцип действия рычага. Он обнаружил, что в каждом теле есть центр тяжести (точка О на рис. 4). Это точка, за которую можно подвесить тело, чтобы оно сохраняло равновесие. Архимед ограничил себя изучением законов равновесия: нахождением центров тяжести и исследованием уравновешенного и неподвижного рычага, и стал основателем новой науки – статики. Вопросам теоретической механики посвящена первая книга дошедшего до нас сочинения «О равновесии плоских тел или о центрах тяжести плоских тел» в двух книгах. Как же обосновывает закон рычага Архимед? Он выдвигал предварительные условия (постулаты).

1. Равные веса, находящиеся на равных расстояниях (от точки опоры), находятся в равновесии, а равные веса, находящиеся на неравных расстояниях, не находятся в равновесии, но перевес происходит в сторону того веса, который находится на большем расстоянии.
2. Если два веса, находясь на определенных расстояниях, уравновешивают друг друга и если к одному из этих весов что-либо прибавить, то весы не

будут уравнивать друг друга, но наклонятся к тому весу, который увеличили.

3. Если подобным образом отнять что-либо от одного из весов, то весы не останутся в равновесии, но склонятся к тому, от которого не отнимали.
4. Если равные и подобные плоские фигуры при наложении совпадают, то совпадают и их центры тяжести.
5. Если две величины, находясь на известных расстояниях, уравнивают друг друга, то и равновеликие им величины (линии, плоскости и тела), находясь на тех же расстояниях, уравниваются друг друга.

На основании этих постулатов Архимед сформулировал закон рычага: *«Соизмеримые величины уравниваются на длинах, которые будут обратно пропорциональны тяжестям. Если величины будут несоизмеримы, то они точно также уравниваются на длинах, которые обратно пропорциональны этим величинам»* [8, 9]. Легенда об Архимеде говорит о том, что восхищенный своим открытием правила рычага, он воскликнул: *«Дайте мне точку опоры, и я переверну Землю»*.

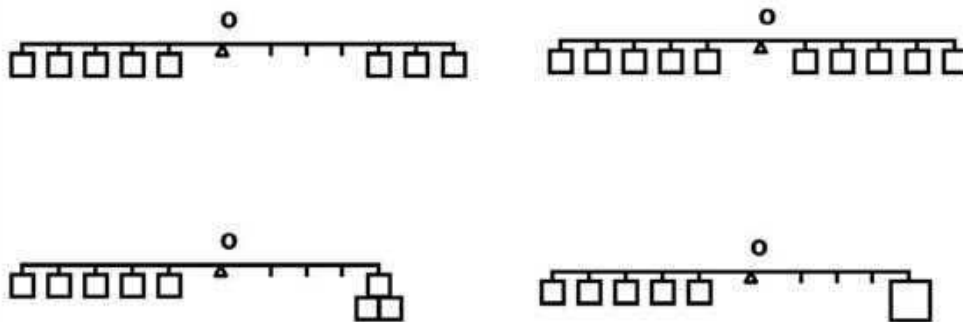


Рис. 4. Равновесие тел

1.2. Задача о выталкивающей силе

Царем Гиероном (III век до н.э.) была заказана мастеру корона, которую должны были изготовить из чистого золота. Когда заказ был выполнен царь усомнился, не подменил ли мастер часть золота серебром, поэтому обратился к Архимеду, чтобы тот определил сколько пошло золота на изготовление короны. Историческая притча говорит о решении этой задачи, осенившей Архимеда, когда он погрузился в наполненную водой до краев ванну и увидел, как вода перелилась через край. Архимед обнаружил, что корона изготовлена не из чистого золота, а имеет примесь серебра. Как он пришел к этому выводу? Пусть имеется три тела – корона, слиток золота, слиток серебра с равными массами M . Наполняя сосуд до краев водой и опуская в него по очереди эти три тела, измерим объемы вытекающей воды: V_K , $V_З$, $V_С$. Тогда плотности изучаемых тел: $\rho_K = M/V_K$, $\rho_З = M/V_З$, $\rho_С = M/V_С$. Если корона содержит кроме золота серебро, то для короны масса равна $M = M_З + M_С$. Если при образовании сплава объем

сохраняется, то $V_K = \frac{M_3}{\rho_3} + \frac{M_c}{\rho_c}$. Корона вытеснила при погружении в воду больше воды, чем золотой слиток. При одной и той же массе объем короны оказался больше, чем объем золотого слитка, а значит корона содержала еще и серебро. Таким образом был открыт принцип, который мы сегодня называем законом Архимеда. Закон Архимеда: *«На тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, равная весу объема жидкости, вытесненного частью тела, погруженной в жидкость»*. Эта выталкивающая сила называется силой Архимеда $F_A = \rho_{ж}gV_{пог}$ (рис. 5).

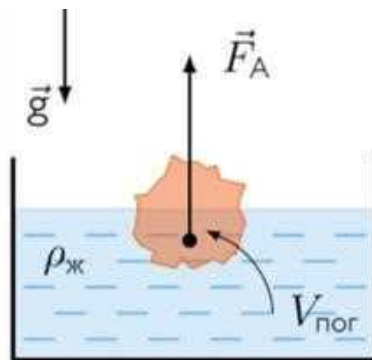


Рис. 5. Сила Архимеда

1.3. Винт Архимеда

Винт Архимеда иногда называют «улиткой Архимеда» или водяным винтом. Устройство предназначено для подъема воды, например, для орошения полей. Винт Архимеда представляет собой спираль, которая вращается внутри трубы и переносит воду на винтовых лопастях вверх. Вращение спирали задавалось вращением специальной ручки сверху. Саму ручку мог вращать человек, а в более позднее время использовалось водяное колесо или ветряная мельница. При помощи винта кроме воды можно транспортировать гранулированные материалы (зола, песок). Современные архимедовы винты используются для осушения польдеров (низменных участков побережья (рис.7)).

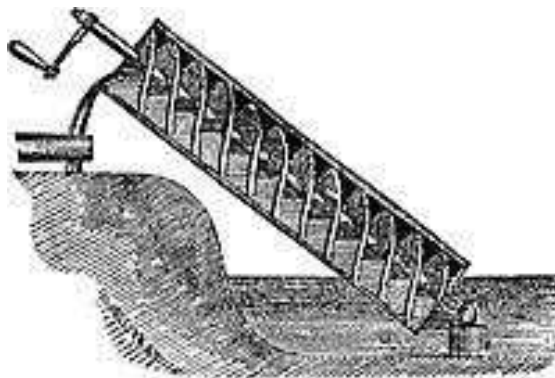


Рис.6. Схема Архимедова винта



Рис. 7. Современные архимедовы винты, используемые для осушения пolders (низменный участок побережья) в Голландии (Интернет)

В автомобильной технике архимедовы винты могут применяться вместо колес. Принцип движения шнекороторного вездехода прост. Машина оборудована двумя или более соосными с направлением движения роторами – винтами Архимеда. При вращении они отталкиваются от кашеобразной или жидкой субстанции, по которой движется вездеход, и продвигают его вперед. Недостаток: крайне низкая скорость движения при высоких энергетических затратах. Именно невозможность существования шнекохода в качестве самостоятельной транспортной единицы и не позволило подобным вездеходам получить должное распространение.

1.4. Галилей: изучение движения тел

В начале XVII века физические знания находились еще в довольно хаотическом состоянии, и прогресс со времен Аристотеля и Архимеда был весьма незначителен. Начало установления законов классической механики связано с именем Галилео Галилея (1564–1642), который является одним из основоположников опытного естествознания (рис. 8). Как гласит легенда, будучи профессором математики в Пизанском университете, Галилей проводил публичные опыты по сбрасыванию тел с падающей Пизанской башни. В этих опытах он опровергал учение Аристотеля о пропорциональности скорости падения весу тела. Галилей брал два тела, одинаковых по форме и размерам, например, чугунный и деревянный шары. Находя соотношение между скоростью и временем падения шаров, между пройденным путем и временем падения, он доказал, что тела падают с одинаковым ускорением (конечно, без учета сопротивления воздуха). Позже в университете в Падуе Галилей изучал падение тел, движение их по наклонной плоскости и под углом к горизонту, занимался вопросами гидростатики, теории простейших машин и сопротивлением материалов.

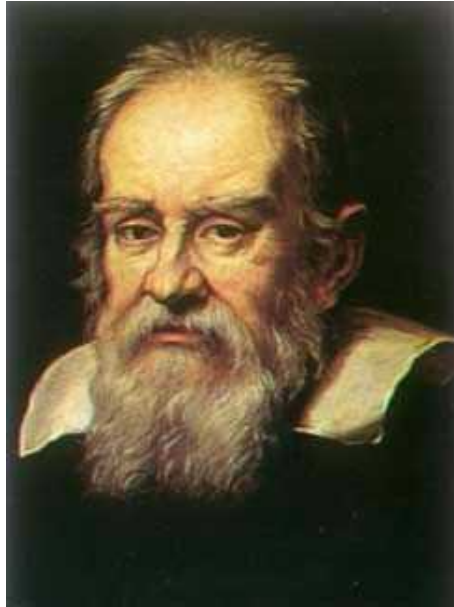


Рис. 8. Галилео Галилей. Картина Ю. Сустерманса, 1636 г.

Что конкретно сделал Галилей в механике? Он пришел к открытию закона инерции и сформулировал механический принцип относительности движения, обобщенный позднее А. Эйнштейном. Галилей дал впервые строгое определение равноускоренного движения, нашел законы изменения скорости и пути в этом движении. Он показал, что такое движение свойственно свободно падающему телу. Галилей доказал, что тело, брошенное под углом к горизонту, будет лететь по параболе [10]. Он дал метод расчета траектории для любых углов вылета и различных начальных скоростей, показав, что наибольшая дальность полета достигается при вылете тела под углом 45 градусов к горизонту. Галилей впервые установил, что период колебаний математического маятника зависит лишь от длины подвеса (если массой подвеса можно пренебречь по сравнению с массой тела) и не зависит от амплитуды качаний (если она мала). Так как движение маятника можно рассматривать как последовательный ряд падений и подъемов тела по дуге окружности, то в случае независимости скорости падения тела от его тяжести маятники одинаковой длины должны иметь равные периоды колебаний независимо от веса грузов. Взяв два маятника с одной и той же длиной подвеса, одинаковые по форме и размерам, но разные по весу, Галилей установил одинаковость их периодов колебания, опровергнув тем самым положение Аристотеля о большей скорости падения тяжелых тел.

Величие Галилея состоит в том, что он утвердил в исследовании природы научный экспериментальный метод, придав ему современные черты (инструментарий, моделирование реального процесса, неоднократное повторение опытов). Научная революция в физике, произошедшая в XVII веке и ставшая отправной точкой формирования физики как науки, начинается с Галилея [11]. Галилей считал математику основой теоретической модели,

которая нужна для осмысления результатов эксперимента. Он писал: *«книга природы написана на языке математики», «Тот, кто хочет решать вопросы естественных наук без помощи математики, ставит неразрешимую задачу. Следует измерять то, что измеримо, и делать измеримым то, что таковым не является».*

1.5. Гюйгенс и физический маятник

Продолжил учение Галилея Христиан Гюйгенс (1629–1695) (рис. 9). Он развил понятие ускорения при криволинейном движении точки. Изучал движение тел по круговым траекториям, колебание маятника, законы упругого удара. Его полноценное изобретение в виде маятниковых часов сделано после открытых Галилеем законов маятника. В 1657 г. Гюйгенс издал описание изобретенных им часов с маятником, до этого времени точные часы, как экспериментальный прибор, отсутствовали (рис.10). Маятник со времен Галилея употребляли отдельно для точного измерения небольших промежутков времени, при этом было необходимо вести счет числа колебаний. А. Зоммерфельд назвал Гюйгенса *"гениальнейшим часовым мастером всех времен"* [12. С. 130].

Один из основных мемуаров Гюйгенса, содержащих его результаты по математике и механике, вышел в 1673 г. под названием "Маятниковые часы или геометрические доказательства, относящиеся к движению маятников, приспособленных к часам". Многие придумал Гюйгенс, пытаясь решить одну из основных задач своей жизни - создать часы, которые можно было бы использовать в качестве морского хронометра; многое он продумал с точки зрения возможностей применения к этой задаче (циклоидаальный маятник, теория развертки кривых, центробежные силы и т. д.).



Рис. 9. Христиан Гюйгенс. Гравюра с картины К. Нечера

Исследуя криволинейное движение тяжелой точки, Гюйгенс, продолжая развивать идеи, высказанные еще Галилеем, показал, что тело при падении с некоторой высоты по различным путям приобретает конечную скорость, не зависящую от формы пути, а зависящую лишь от высоты падения, и может подняться на высоту, равную (в отсутствие сопротивления) начальной высоте. Это положение, выражающее по сути дела закон сохранения энергии для движения в поле силы тяжести, Гюйгенс использовал для теории физического маятника. Он нашел выражение для приведенной длины маятника, установил понятие центра качания и его свойства. Формулу математического маятника для циклоидального движения и малых колебаний кругового маятника Гюйгенс выразил следующим образом: *«Время одного малого колебания кругового маятника относится к времени падения по двойной длине маятника, как окружность круга относится к диаметру»* [13]. В конце своего сочинения Гюйгенс сделал ряд предложений о центростремительной силе, в которых впервые определено, что центростремительное ускорение пропорционально квадрату скорости и обратно пропорционально радиусу окружности. Этот результат подготовил ньютоновскую теорию движения тел под действием центральных сил.

Гюйгенс вывел формулу периода колебания маятника в зависимости от ускорения свободного падения g

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Эта формула позволяет по периоду колебаний нитяного маятника определить ускорение свободного падения. Формула Гюйгенса очень скоро нашла применение для измерения силы тяжести на земной поверхности. В формулу Гюйгенса входит длина простого (математического) маятника, то есть нерастяжимой и невесомой нити, на которой колеблется материальная точка. Чтобы можно было пользоваться этой формулой, в течение всего XVIII века применяли для наблюдений нитяные маятники – тонкую нить с маленьким металлическим шариком на конце. Весом нити можно было пренебречь. Поэтому длиной маятника можно было считать расстояние от точки подвеса до центра шарика.

До 70-х годов XVII века никто не подозревал, что сила тяжести не везде одинакова. Но в 1672 году один парижский астроном, посланный в экваториальную часть Америки для наблюдений, сделал удивительное открытие: оказалось, что маятниковые часы, идущие совершенно точно в Париже, вблизи экватора начинают отставать. Пришлось немного укоротить маятник, чтобы часы шли правильно. По возвращении же в Париж часы стали уходить вперед. Для исправления их хода уже понадобилось удлинить маятник. Это явление объяснилось тем, что сила тяжести по мере приближения к экватору немного ослабевает, а к полюсу – усиливается.

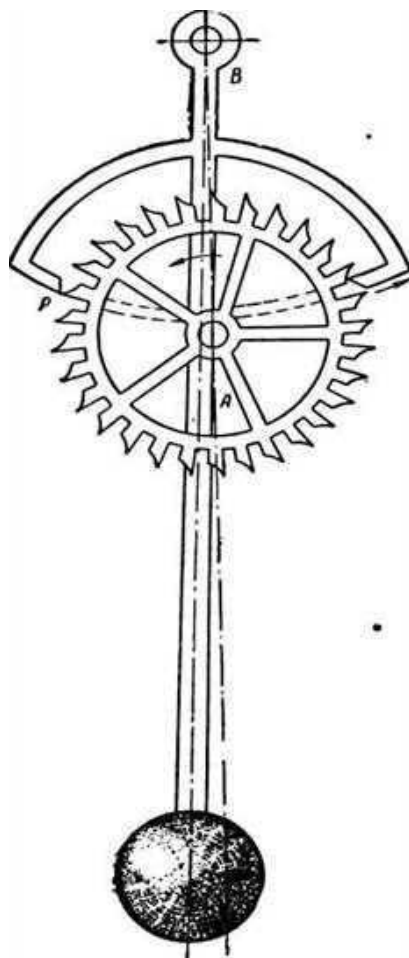


Рис. 10. Модель часов с маятником

Гюйгенс разработал также теорию физического маятника, то есть стержня с тяжелой чечевицей на конце, который применяется в часах (рис. 10). Он указал способ, позволяющий определить длину простого маятника, совершающего колебания с тем же периодом, что и данный физический маятник. После этого стало возможным пользоваться формулой Гюйгенса и при наблюдениях над колебаниями физического маятника. Занимаясь исследованием колебаний маятника, Гюйгенс столкнулся с новым вопросом для механиков – взаимодействием между телами, соединенными связями в одну систему.

1.6. Закон Паскаля

Одним из важнейших практических приложений, открытых Блезом Паскалем (1623–1662) (рис. 11), было изобретение им «новой машины» для увеличения человеческих сил «в желаемой степени» – гидравлического пресса. Действие гидравлического пресса основано на законе Паскаля, который говорит о том, что давление на поверхность жидкости, производимое внешними силами, передается жидкостью одинаково во всех направлениях. Несколько ранее Паскаль изобрел два весьма простых, но очень полезных приспособления для перевозки тяжестей – тачку и роспуски (длинные дроги или сани).



Рис. 11. Портрет Блеза Паскаля (1623-1662)

Б. Паскаль усовершенствовал барометр, идея которого была предложена Торричелли: столбик ртути колеблется не только от перемены атмосферного давления, но и от температуры воздуха, его влажности, направления ветров и других факторов. Кроме того, Паскаль установил, что с помощью барометра можно измерять высоту местности, предложив идею высотомера (альтиметра).

Когда воду качают насосом, вода сама поднимается вслед за поршнем, не позволяя образоваться пустому пространству между поршнем и поверхностью воды. В древности Аристотель объяснял это тем, что «природа не терпит пустоты». Галилей предположил, что высота подъёма жидкости зависит от её плотности: во сколько раз плотность жидкости больше, во столько раз высота подъёма меньше. Он поручил своим ученикам Э. Торричелли (1608-1647) и В. Вивiani (1622-1703) разобраться в этом непонятном явлении. Чтобы не возиться с длинными стеклянными трубками, ученики стали использовать вместо воды ртуть. В результате этих исследований на свет появился простой опыт, который каждый мог если не повторить, то увидеть, как это делает кто-то другой. Запаянная с одного конца метровая стеклянная трубка полностью заполняется ртутью. Открытым концом трубка переворачивается и погружается в сосуд с ртутью. Уровень ртути в трубке понизится и остановится на высоте 2,5 фута (760 мм) над поверхностью ртути в сосуде (рис. 12). Уровень воды в трубке в 13,6 раза выше уровня ртути, и именно во столько же раз плотность воды меньше плотности ртути – замечательное подтверждение сделанного Галилеем предположения. Торричелли сделал вывод, что в трубке над ртутью ничего нет (знаменитая «торричеллиева пустота»). Вылиться ртути из трубки не позволяет воздействие давления атмосферного воздуха. В этом заключается принцип действия первого ртутного барометра.

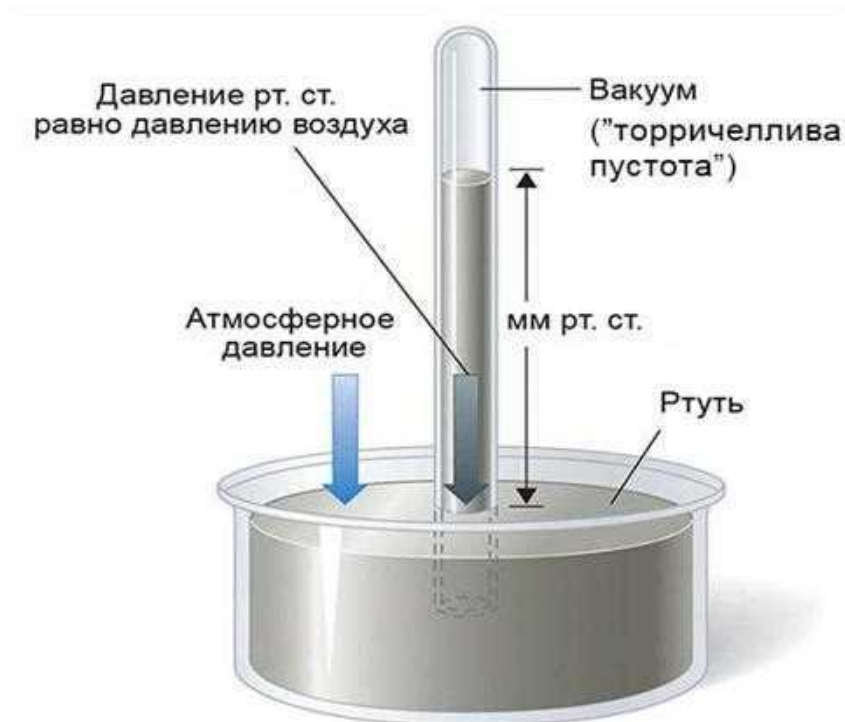


Рис. 12. Давление воздуха, удерживающее ртуть на высоте 760 мм, называется давлением в 1 атм.

Б. Паскаль проверил зависимость высоты столба жидкости от её плотности. В ход пошли различные масла, сахарные и соляные растворы, плотность которых можно менять, добавляя новые порции сахара или соли. В 1647 году Б. Паскаль опубликовал трактат, где описал опыты с «торричеллиевой пустотой» и объяснил их результаты. Наконец, в связи с работами о пустоте Паскаль вычислил общий вес атмосферного воздуха, получив цифру 8,5 триллиона французских фунтов, приближающуюся к современным расчетам. Паскаль написал еще два трактата «О равновесии жидкостей» и «О тяжести воздушной массы», и наряду с Архимедом и голландским ученым Симоном Стевином (1548-1620) заложил основы гидростатики. Он доказал, что гидростатическое давление зависит не от веса жидкости, а от перепада высот. Он продемонстрировал этот принцип, прикрепив тонкую трубку к бочке с водой и наполнив трубку водой до уровня третьего этажа здания. Из-за малого диаметра трубки вода в ней поднялась до большой высоты и давление в бочке увеличилось настолько, что крепление бочки не выдержали и бочка треснула. Этот эксперимент известен в истории физики как эксперимент Паскаля с бочкой (рис.13).



Рис.13. Эксперимент Паскаля с бочкой

Б. Паскаль реализовал идею измерения атмосферного давления на различных высотах. Он установил зависимость высоты ртутного столба от высоты места измерения и от состояния погоды [14].

1.7. Классическая механика Ньютона

Исаак Ньютон (1643–1727), так же как Галилей, полагал, что в основе всех процессов природы лежит механическое движение. Механистические взгляды Ньютона оказались неверны – не все явления природы вытекают из механического движения. Начиная с Ньютона, естествознание развивается, твёрдо уверенное в том, что мир познаваем, потому что природа устроена по простым математическим принципам. Три закона Ньютона завершили труды Галилея, Декарта, Гюйгенса по созданию механики и стали основой для ее дальнейшего развития. Ньютон писал о задачах физики: *«Сочинение это нами предлагается как математические основания физики. Вся трудность физики... состоит в том, чтобы по явлениям движения распознать силы природы, а затем по этим силам объяснить остальные явления»* [15].

С.И. Вавилов написал в книге «Исаак Ньютон» о том, что понять значение и историческое место «Математических начал» Ньютона можно только представив состояние механики и учения о силе тяжести до Ньютона. В запутанном движении планет, благодаря Кеплеру, была обнаружена простота, которая позволила ставить задачи механики. Чем дальше планета от Солнца, тем медленнее она движется; Солнце вращается вокруг неподвижной оси в том же направлении, что и планеты, как бы увлекая их за собою. От Солнца по

прямым линиям распространяется сила, заставляющая планеты вращаться вместе. Различие времен обращения планет происходит от уменьшения солнечной силы с расстоянием. Свет и сила, исходящие от Солнца, во многих отношениях схожи, но одновременно и различны. Свет излучается с поверхности и убывает с расстоянием, как поверхность (т.е. обратно пропорционально квадрату расстояний), сила же, исходящая от Солнца, по Кеплеру, убывает пропорционально расстоянию. Эта сила распространяется в отличие от света только в плоскости, в которой расположено Солнце и планеты, и не «тратится бесполезно» по другим направлениям.



Исаак Ньютон. Портрет кисти Г. Кнеллера, 1689 г.

В 1609 г. Кеплер опубликовал два эмпирических закона движения планет, открытые им при обработке данных, относящихся к Марсу. Закон I: планеты движутся по эллипсам, в фокусе которых находится Солнце. Закон II: линия, соединяющая планету и Солнце, или радиус-вектор, описывает в равные времена равные площади (закон площадей).

В 1618 г. Кеплер нашел третий закон, связывающий движения различных планет вокруг Солнца: квадраты времен обращений планет пропорциональны кубам их средних расстояний от Солнца. Таким образом, было получено ясное математическое выражение для движения тел солнечной системы. Насколько точны эти эмпирические законы можно судить по тому, что даже при современных тонких методах астрономических наблюдений только в движении ближайших к Солнцу планет обнаруживаются некоторые чрезвычайно малые отклонения от законов Кеплера (если только учтены так называемые возмущения, производимые другими планетами). Наряду с работами Кеплера результаты, достигнутые Галилеем при изучении законов падения тел, подготовили Ньютону почву в другом направлении, в создании учения о

движении тел под действием сил. О значении научного труда Исаака Ньютона С.И. Вавилов писал: *«В истории естествознания не было события более крупного, чем появление «Начал» Ньютона. Причина была в том, что эта книга подводила итоги всему сделанному за предшествующие тысячелетия в учении о простейших формах движения материи. Сложные перипетии, развития механики, физики и астрономии, выраженные в именах Аристотеля, Птолемея, Коперника, Галилея, Кеплера, Декарта, поглощались и заменялись гениальной ясностью и стройностью «Начал» [16. С. 117]. В 1713 году во втором издании «Начал» Ньютон выразил отношение к гипотезам: «Гипотез не измышляю (Hypotheses non fingo). Все же, что не выводится из явлений, должно называться гипотезой; гипотезам же метафизическим, физическим, механическим, скрытым свойствам не место в экспериментальной философии».*

Закон, описывающий гравитационное взаимодействие, был открыт Ньютоном около 1666 года и опубликован в 1687 году в «Началах». Он вывел закон тяготения, основываясь на эмпирических законах Кеплера. Ньютон показал, что наблюдаемые движения планет свидетельствуют о наличии центральной силы и, наоборот, центральная сила приводит к эллиптическим или гиперболическим орбитам. Закон утверждает, что сила гравитационного притяжения между двумя материальными точками с массами m_1 и m_2 , находящимися на расстоянии r , действует вдоль соединяющей их прямой и равна

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

G – гравитационная постоянная, равная $6,67430 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$

Закон всемирного тяготения был предметом активной дискуссии на протяжении всего XVIII века. Британский ученый Генри Кавендиш (1731–1810) в 1798 г. осуществил прямую проверку закона тяготения, измерил на опыте при помощи так называемых крутильных весов тяготение между двумя шарами. Главной целью Кавендиша было определение плотности Земли, это он называл «взвешиванием мира». При известных значениях плотности ρ и радиуса Земли R , а также ускорения свободного падения g на ее поверхности, можно найти гравитационную постоянную G

$$G = \frac{3g}{4\pi\rho R}$$

Таким образом, Кавендиш был первым ученым, который с удовлетворительной точностью определил плотность Земли, а, следовательно, и гравитационную постоянную. Значение плотности им получено $\rho = 5,48 \text{ г/см}^3$ (истинное значение $\rho = 5,53 \text{ г/см}^3$).

На рисунке 14 представлена схема крутильных весов Кавендиша. Сила гравитационного притяжения F измеряется между массами M и m для получения

гравитационной постоянной G . M – масса неподвижных свинцовых шаров, m – масса подвижных свинцовых шаров, θ – угол закручивания упругой нити подвеса. Экспериментальная установка Кавендиша представлена на рис. 15, где шестифунтовый стержень закреплен на медном волокне длиной 1 м, а к плечам коромысла прикреплены два свинцовых шара по 775 грамм, образуя своего рода гантельку. Рядом с маленькими шарами были размещены крупные шары по 49,5 кг, гравитационное притяжение между шарами удалось измерить по углу поворота гантельки и известным упругим свойствам меди (рис.16) [17].

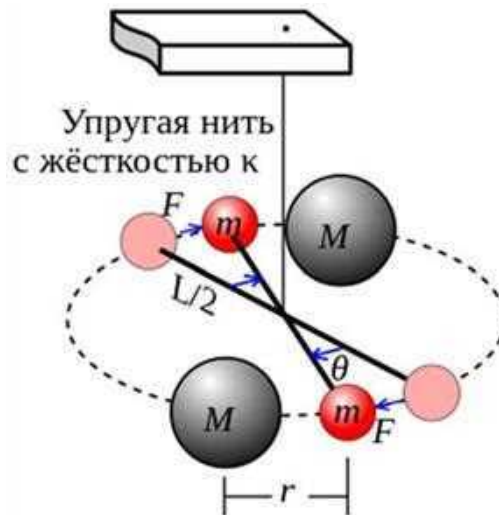


Рис. 14. Схема крутильных весов Кавендиша

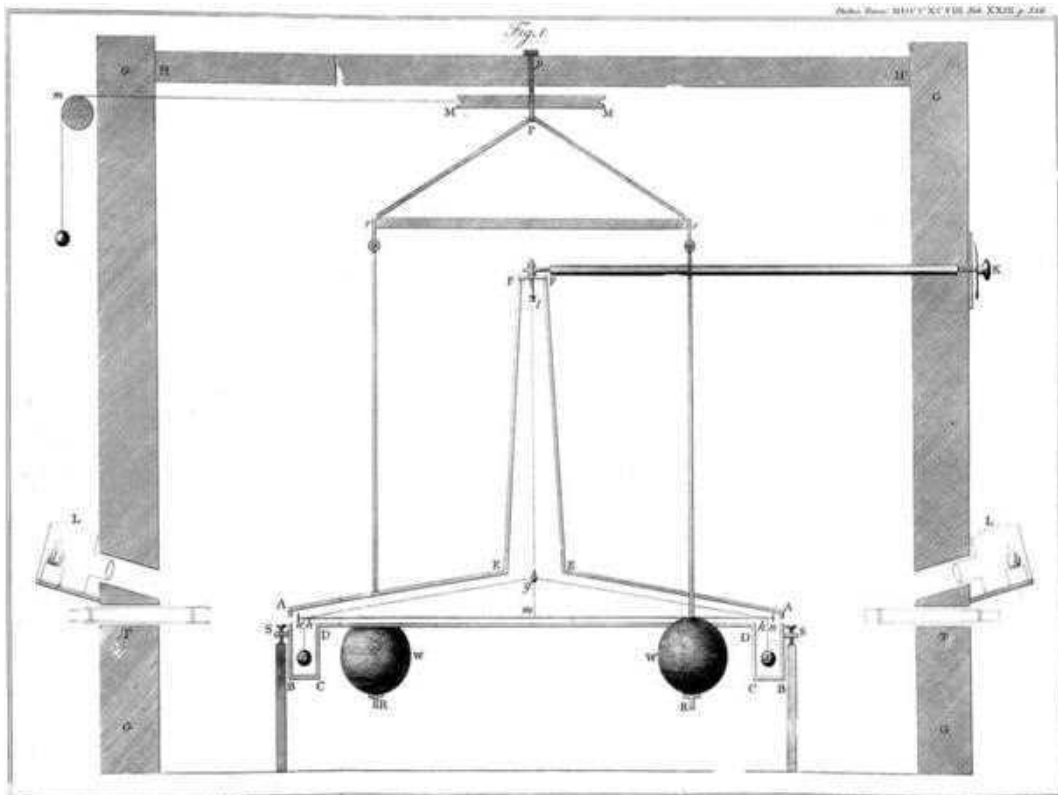


Рис. 15. Установка в опыте Кавендиша из его статьи «Эксперименты по определению плотности Земли» [20]

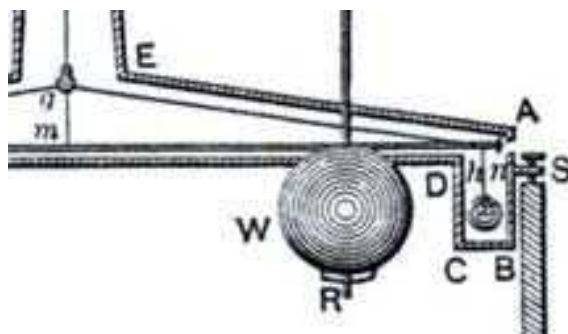


Рис. 16. Деталь крутильных весов Кавендиша

В 1895 году английский экспериментатор Чарльз Бойз усовершенствовал метод Кавендиша, уменьшив установку почти в 20 раз за счет использования кварцевых нитей вместо медного подвеса, меньших масс шаров, и сделал наблюдение тяготения столь доступным, что оно теперь легко демонстрируется на лекциях, как магнитное и электрическое притяжение [18].

Существенно новый и крайне важный шаг вперед в экспериментальном изучении тяготения со времен Ньютона был сделан только в 1919 г. На основании предсказания А. Эйнштейна в 1915 году, основанного на выводах общей теории относительности, английские астрономы С. Эддингтон, Э. Кроммелин и Ф. Дайсон обнаружили во время солнечного затмения 29 мая 1919 года отклонение световых лучей от их прямолинейного пути при прохождении около тяжелого тела (Солнца) [19]. Это наблюдение было подтверждено во время нескольких последующих полных солнечных затмений. Световые лучи, проходя около тяжелого тела, притягиваются им до известной степени, подобно тому, как планеты и кометы притягиваются Солнцем. Отклонение это даже для Солнца ничтожно мало, но тем не менее оно может быть измерено. Закон Ньютона выполняется на громадных расстояниях (свыше 4 500 млн км) всей солнечной системы. Движения так называемых двойных звезд, лежащих далеко за пределами солнечной системы, также подчиняются закону тяготения.

1.8. Машина Обербека

Устройство для изучения законов динамики вращательного движения и проверки теоремы Гюйгенса-Штейнера об определении момента инерции твердых тел относительно произвольной оси вращения, создано немецким физиком, профессором университета Антоном Обербеком (1846–1900).

Идеальная машина Обербека имеет следующую конструкцию: на горизонтальную ось насажена свободно вращающаяся втулка с двумя взаимно-перпендикулярными стержнями. К стержням симметрично прикреплены грузы. Со втулкой связан шкив с ободом, служащим для намотки нити, на которую подвешивается груз (рис. 17). Машина Обербека начинает свою работу с опускания под действием силы тяжести подвешенного на нити груза. Сила натяжения нити создает вращающий момент, приводящий в ускоряющееся вращение грузы на стержнях. После того, когда груз полностью опустится на всю

длину нити, нить начнет вновь наматываться на обод шкива под действием вращающихся по инерции грузов на стержнях. Затем на определённой высоте груз вместе со стержнями прекращает свое движение и затем вновь начинается его движение вниз. Вследствие потерь механической энергии на трение процесс опускания и подъёма груза повторяется при последовательно уменьшающейся высоте подъёмов груза.

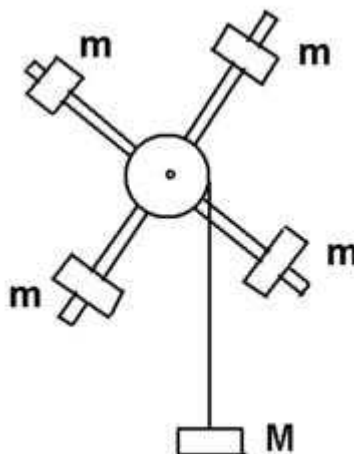


Рис. 17. Машина Обербека

Вследствие закона сохранения энергии при работе машины Обербека потенциальная энергия тела в поле силы тяжести mgh преобразуется в кинетическую энергию вращающихся грузов и бесполезные потери энергии на трение A .

$$mgh = \frac{1}{2}I\omega^2 + A$$

Здесь I – момент инерции стержней с грузами относительно оси вращения, ω – угловая скорость вращения при полном опускании груза, h – высота полного опускания груза. Из последней формулы видно, что чем больше момент инерции (то есть, чем дальше расположены грузы относительно оси вращения), тем меньше угловая скорость вращения маятника.

2. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

2.1. Опыты Гильберта

В развитии научных знаний об электричестве можно выделить два периода – исследование явлений макроскопического размера и затем явлений атомного масштаба. Начало исследований электрических и магнитных свойств вещества связано с именем Фалеса Милетского, древнегреческого ученого, жившего в VI в. до н.э. Подлинные труды древнегреческого мыслителя не дошли до нас, но остались работы более поздних ученых, в которых сообщается об опытах Фалеса с янтарем. Объяснение электризации в результате трения

шерсти о янтарь, он предположил наличием души у янтаря. Вплоть до 1600 года в области электричества ничего нового кроме опытов с янтарем не происходило, а начало научных исследований связано с именем Уильяма Гильберта (1544–1603), английского естествоиспытателя и придворного врача королевы. Его исследования носили строго экспериментальный характер. Итогом его многолетней работы явился изданный в 1600 году трактат «О магните, магнитных телах и о большом магните – Земле. Новая физиология, доказанная множеством аргументов и опытов». Для своих экспериментов Гильберт использовал изобретенный им прибор – версор. Он описывает его так: *«Для того, чтобы иметь возможность узнать на основании ясного опыта, каким образом происходит такое притяжение и каковы материи, притягивающие таким образом другие тела... сделай себе из любого металла стрелку длиной 3-4 дюйма достаточно подвижную на своей игле, наподобие магнитного указателя. К одному концу ее приложи янтарь или блестящий и гладкий камешек, слегка потерев его: стрелка немедленно поворачивается»* [21. С.5]. В области магнетизма Гильберт сделал фундаментальное открытие причины ориентации магнитной иглы в определенном направлении относительно Земли, это открытие состояло в том, что сама Земля – гигантский магнит, один из полюсов которого находится на самой высокой северной широте, а другой – на самой высокой южной.

У. Гильберт проводил четкое разделение электрических и магнитных явлений, и все последующие десятилетия электричество и магнетизм будут рассматриваться как два явления, не связанные между собой³. Открытие Гильберта и ряд других наблюдений возвели магнетизм в ранг отдельной науки, а «родственная ему наука об электричестве пребывала в более плачевном состоянии» [22. С.55].

2.2. Генератор электрических зарядов Герике

Следующие заметные исследования в области электричества были выполнены Отто фон Герике (1602-1686). Он изучил трактат Гильберта, и желая получить более сильные эффекты электризации, пришел к идее создания специального устройства. Созданную Герике машину можно представить себе следующим образом: стеклянный шарообразный баллон наполнен растолченной серой, которую надо расплавить, после охлаждения серы баллон надо разбить и вынуть серный шар. Этот шар можно использовать как генератор электрических зарядов, если просверлить по диаметру отверстие и вставить металлический стержень (рис.18).

Стержень закрепляется на опорах и шар приводится во вращение, натирая его руками или кусками кожи, Герике получал большие электрические заряды на

³ Предыстория научного этапа изучения явлений магнетизма, связанная с именем У.Гильберта рассмотрена в статье Форш Е.А., Смык А.Ф. Представления о магнетизме в научных работах У. Гильберта// История науки и техники. 2023. №4. С.31-38.

нем. Таким образом он установил, что заряженные тела могут не только притягиваться, но и отталкиваться, а также экспериментально обнаружил, что электричество может передаваться на расстояние через некоторые тела, названные позже проводниками. Позже в опытах Ш.Ж. Дюфе (1698-1739) было установлено два рода электричества, однородные «электричества» отталкивались, а разнородные «электричества» притягивались.



Рис. 18. Гравюра 1750 г. с устройством О. Герике

2.3. Лейденская банка

Большое значение для дальнейшего изучения электричества имело изобретение голландского ученого Питера ван Мушенбрука (1692–1761) в 1745 году лейденской банки, первого электрического конденсатора – прибора, позволявшего накапливать электрический заряд. Благодаря лейденской банке удалось впервые искусственным путем получить электрическую искру.

«Лейденская банка» – термин, существовавший для особой конструкции конденсатора, которая использовалась экспериментаторами особенно широко в XIX веке. Почти одновременно «лейденская банка» была изобретена соборным деканом Эвальд-Георгом фон Клейстом в Померании и Кюнеусом в Лейдене (Голландия) в 1746 г. Оба старались наэлектризовать воду, находившуюся в сосуде, присоединяя к электростатической машине погруженную в воду спицу, сосуд при этом они держали в руке. Прикоснувшись другой рукой к спице, они получали сильный электрический удар [21. С.94].

На рисунке 19 изображена наполненная водой лейденская банка, состоящая из бутылки с металлическим стержнем через пробку для контакта с водой. Жидкость в банке играла роль одной из обкладок, а ладонь руки была другой обкладкой конденсатора. Изобретение этого первого конденсатора способствовало развитию электричества и магнетизма, повышало интерес общественного внимания и решало задачи популяризации естественнонаучного знания, потому что опыты с лейденской банкой становились своего рода зрелищем для широкой публики. В этот период электрические явления демонстрировались на площадях и в королевских дворцах. При этом полное понимание процессов при зарядке и разрядке конденсатора отсутствовало вплоть до конца XIX века.



Рис.19. Один из ранних вариантов лейденской банки



Рис. 20. Почтовая марка СССР с портретом Б. Франклина

В истории электричества начальный этап развития в изучении электрических явлений связан с известным американским ученым и общественным деятелем Бенджаминем Франклином (1706–1790) (рис. 20) [6].

Первые наблюдения сильных электрических разрядов заинтересовали и способствовали тому, что Б. Франклин стал заниматься экспериментами в области электричества и их объяснением⁴. В его работах появились впервые такие термины как заряд, разряд, положительный заряд, отрицательный заряд, конденсатор, батарея. К 1746 году лейденская банка обрела уже обкладки из металлической фольги с внутренней и внешней стороны, а также было установлено, что электричества накапливается тем больше, чем больше площадь обкладок и тоньше стекло [23]. Франклин усовершенствовал лейденскую банку, сделав ее конструкцию разборной – две обкладки и между ними слой стекла. Он ошибочно обнаружил заряд в банке, сосредоточенным на стекле, и в силу этого в науке существовало ошибочное представление вплоть до 1922 года, когда удалось в конструкции, содержащей парафин вместо стекла, понять, что заряд остается на металлических пластинах и не переходит в диэлектрик [6].

2.4. Электрическая природа молнии

Электроскоп стал первым прибором для индикации электрического заряда, который позволял также оценить его величину. Один из вариантов простейшего электроскопа представляет собой металлический стержень – электрод и подвешенные к нему два листочка фольги или бумаги (рис. 21). При прикосновении к электроду заряженным предметом заряды стекают через электрод на листочки фольги (бумаги), листочки оказываются одноименно заряженными и поэтому отклоняются друг от друга. Для того, чтобы листочки фольги не колебались от движения воздуха, их обычно помещают в стеклянный сосуд. Из сосуда при этом может быть откачан воздух для предотвращения быстрой утечки заряда с фольги. Если к заряженному электроскопу поднести тело, заряженное противоположно, то угол между его листочками начнёт уменьшаться. Следовательно, электроскоп позволяет определить знак заряда наэлектризованного тела. Первый электроскоп создал У. Гильберт, примерно в 1600 году, а в 1754 году английский изобретатель Дж. Кантон создал электроскоп с шариком. При электризации листочки расходились. Будучи снабжен шкалой, такой прибор мог измерять, как тогда говорили, «электрическую силу». Но что такое «электрическая сила», этого еще никто не знал, то есть неизвестно было, какую физическую величину измеряет этот прибор. Данный вопрос был выяснен значительно позже.

⁴ Франклин выдвинул унитарную теорию электричества: вся материя заключает в себе электрическую субстанцию, «тонкий электрический флюид», не двух родов, как считалось, а только одного. Распределение электрического флюида нарушается в процессе трения. Исследования Франклина в основном изложены в виде писем к члену Лондонского королевского общества П.Коллинсону. Такого рода письма представляли обычное средство общения между учеными в XVIII веке. Перевод на русский язык: Вениамин Франклин. Опыты и наблюдения над электричеством. /Пер. с англ. В.А. Алексеева. - М.: Изд-во АН СССР, 1956.

Прообразом электроскопа явился прибор, созданный российским ученым Георгом Вильгельмом Рихманом (1711–1753) в 1745 году [22]. Вместе с М.В. Ломоносовым (1711–1765) он экспериментально установил электрическую природу молнии (рис. 22) и на основании этих исследований создали теорию грозового электричества.

В домашней лаборатории Рихман регулярно проводил опыты над атмосферным электричеством и сообщал о результатах в «Петербургских ведомостях» на протяжении 1752–1753 годов. От установленного на крыше дома, где жил Рихман, железного изолированного шеста в одну из комнат квартиры была проведена проволока, к концу которой крепились металлическая шкала с квадрантом и шелковая нить, по углу отклонения которой под воздействием атмосферного электричества Рихман делал измерения (рис. 23). Он неумолимо работал со своим прибором, который усовершенствовал, соединив его с лейденской банкой (рис. 24).

К верхнему концу вертикальной металлической рейки высотой 520 мм прикреплена свободно висящая льняная нить длиной 450 мм и весом 31 мг. Рейка железной полосой присоединялась к хорошо изолированному от земли кондуктору электростатической машины трения. При электризации рейки нить отклонялась на определенный угол, пропорциональный приложенному потенциалу, деревянная дуга со шкалой позволяла измерять угол.



Рис. 21. Простейший электроскоп



Рис. 22. Фотография разряда молнии

Рихман назвал свой прибор «указателем электричества» и это был первый электрометр. Он имел все элементы электроизмерительного прибора: неподвижную и подвижную части, взаимодействие которых создает вращающий момент, наличие противодействующего момента, шкалу и стрелку. Рихман градуировал свой прибор, то есть старался соблюсти постоянство веса и длины нити. Фактически это прибор явился родоначальником класса электростатических вольтметров.

Следует отметить, что до этого не существовали количественные измерения в экспериментальных исследованиях электричества. Ни одна электрическая величина фактически не измерялась и, следовательно, не было возможности обнаружить какие-либо количественные закономерности. Исследования по электричеству с 1745 по 1746 годы опубликованы Рихманом в большой статье на латинском языке «Новые данные о возбуждении в телах электричества». Приступая к систематическим исследованиям Рихман обратил внимание на методику возбуждения электрического состояния и на методику его измерения. Вначале он применял стеклянные трубки для возбуждения электричества, затем он реконструировал электрическую машину голландского физика Гравезанда с вращающимся стеклянным шаром. Затем им был придуман способ определения электрической силы, «указатель электричества». В состав экспериментальной установки Рихмана входили электростатическая машина, электрометр Рихмана, устройство для измерения «электрической силы» при помощи весов, а также «устройство для определения интенсивности электрической силы» с использованием электрического звонка. Трагическая гибель Рихмана в 1753 году от шаровой молнии при исследовании атмосферного электричества «электрическим указателем», который не был заземлён, имела большой резонанс во всем мире, в России временно запретили исследования электричества [24, 26, 27].

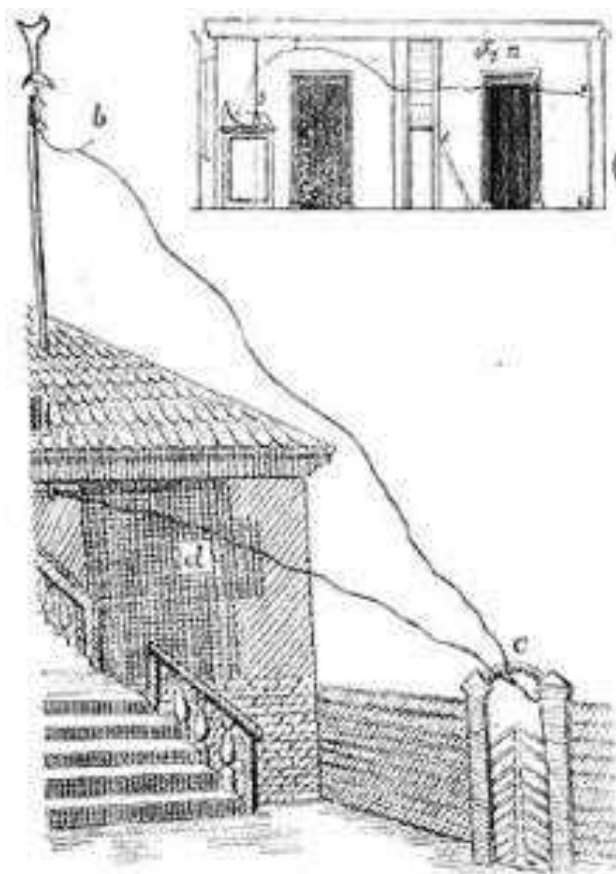


Рис. 23. Домашняя лаборатория Г.В. Рихмана, рис. М.В. Ломоносова

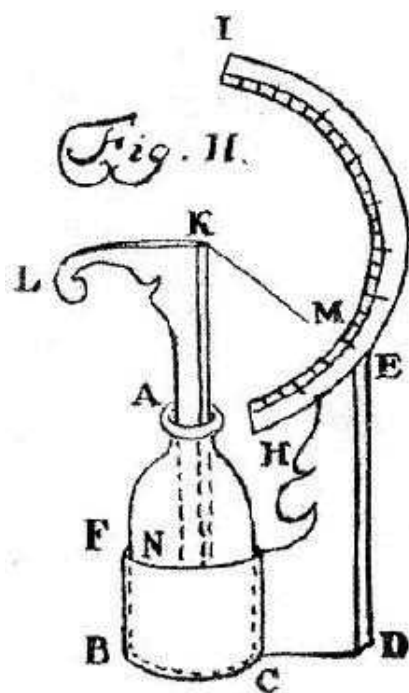


Рис. 24. Усовершенствованный электрометр Рихмана, 1753 г. [24]



Рис. 25. Молния ударяет в Эйфелеву башню. Фотография 1902 г.

На рисунке 25 приведена фотография разряда молнии, ударяющей в Эйфелеву башню. На ней видно устройство для защиты от удара молнии – молниеотвод или громоотвод. В начале XX века с помощью атмосферных зондов измерили электрическое поле Земли, напряженность электрического поля у поверхности составляет около 100 В/м , что соответствует суммарному заряду $400\,000 \text{ Кл}$. Переносчиком зарядов в атмосфере Земли служат ионы, концентрация которых достигает максимума на высоте около 50 км . Поэтому электрическое поле Земли – это поле сферического конденсатора с приложенным напряжением около 400 кВ . Электрическая природа молнии физикой установлена, но остаются не полностью исследованными вопросы механизма выработки электричества в грозовых облаках и сами параметры грозового разряда. Например, сила тока в разряде молнии на Земле может достигать 200 кА , а напряжение – десятков миллионов вольт. Физические процессы образования грозовых облаков до сих пор окончательно не раскрыты [25].

2.5. Закон взаимодействия электрических зарядов

Количественный закон взаимодействия электрических зарядов установил в 1784 г. французский инженер и физик Шарль Огюстен Кулон (1736–1806). Он путем изучения упругой силы, возникающей в нити при кручении, установил, что сила пропорциональна углу закручивания и зависит от длины нити, ее диаметра и материала, из которого она изготовлена. Используя полученные им зависимости, Кулон сконструировал и изготовил установку, получившую

название крутильных весов. Исследование кручения тонких металлических нитей имело важное практическое следствие – создание крутильных весов. С их помощью Кулон установил закон взаимодействия электрически зарядов:

$$F \sim q_1 q_2 r^{-2}$$

q_1, q_2 – взаимодействующие заряды, r – расстояние между ними.

Оказалось, что для магнитной стрелки, подвешенной на нити, существует много помех, таких как колебания точки подвеса, сквозняки и различие температуры слоев воздуха в закрытом помещении. Для устранения этих помех прибор Кулона был помещен в подвале обсерватории. Однако это только вызвало новые помехи. Стрелка реагировала на статическое электричество, имеющееся в небольшом количестве на теле наблюдателя. Кулон указал два способа уменьшения этого воздействия: помещение стрелки в медный кожух, играющий роль экрана, и замена шелковой нити подвеса металлической, имеющей контакт с медным кожухом, что должно было уменьшить индукционные эффекты. Нужно было тщательно исследовать процесс кручения металлических нитей цилиндрической формы. Кулон использовал метод колебаний и с его помощью установил закон упругого качения нитей. При гармонических колебаниях тела угол его поворота изменяется с течением времени по закону: $\varphi(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0)$. Угловое ускорение можно найти двумя способами – из определения $\varepsilon = \omega^2 \varphi$, и из основного закона вращательного движения $I\varepsilon = M$. Тогда круговая частота

$$\omega = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varphi}} = \sqrt{\frac{M}{I\varphi}}.$$

Период колебаний $T = 2\pi \sqrt{\frac{I\varphi}{M}}$. Следовательно, измеряя период, можно определить действующую силу. Кулон установил, что сила $F \sim T^{-2}$. Изменяя расстояние r между шарами ($22 \text{ см} < r < 65 \text{ см}$) и измеряя период ($1,3 \text{ с} < T < 4 \text{ с}$), Кулон получил, что $T \sim r$, а, следовательно, $F \sim r^{-2}$.

Результаты опытов Кулона были обобщены в работе «Теоретические и экспериментальные исследования силы кручения и упругости металлических проволок». Кулон так описал сущность метода, примененного для наблюдения крутильных колебаний: *«Метод для определения на опыте силы кручения состоит в том, что на металлической нити подвешивается цилиндрический груз так, чтобы его ось была вертикальной и проходила бы через нить подвеса. Пока нить подвеса остается совершенно не закрученной, груз будет пребывать в покое; но если заставить груз повернуться вокруг своей оси, нить закрутится и создаст усилие для возникновения более или менее длительных колебаний в зависимости от того, насколько совершенна упругая*

реакция кручения... Варьируя вес груза, длину нити подвеса и ее толщину, можно надеяться определить закон реакции кручения в отношении натяжения, длины, толщины и природы этой нити» [20].

Впервые закон «обратных квадратов», который получил впоследствии название «закона Кулона», был экспериментально установлен английским ученым Генри Кавендишем около 1773 года. На основании своих опытов с помощью сферического конденсатора и расчетов Кавендиш сделал вывод: *«Электрическое притяжение и отталкивание обратно пропорционально расстоянию в степени, лежащей между $2 - 1/50$ и $2 + 1/50$, и нет оснований полагать, что закон отличается от закона обратных квадратов»*. Кавендиш по неизвестным причинам не опубликовал результаты своих исследований, и описание их результатов обнаружил среди рукописей Кавендиша английский физик Джеймс Клерк Максвелл лишь спустя сто лет после их проведения. Следует отметить, что результаты исследований Кавендиша никак не повлияли на работу Кулона. Поэтому основной закон электростатики носит не имя Кавендиша, а имя Кулона.

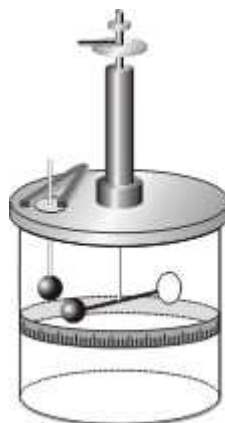


Рис. 26. Схематичное изображение опытной установки Ш. Кулона

В 1784 году Кулон начинает работу над проблемами электричества и магнетизма с помощью созданных им крутильных весов (рис. 26). В работе Кулона под названием «Первый мемуар по электричеству и магнетизму. Конструкция и применение электрических весов, основанных на свойстве металлических нитей иметь силу реакции при кручении, пропорциональную углу кручения» подробно представлена конструкция весов с характерными размерами, с помощью которых был установлен «фундаментальный закон электричества»⁵. Кулон заложил основы электро- и магнитостатики с помощью количественного физического эксперимента [28]. Крутильные весы Кулона использовал в своих исследованиях и Майкл Фарадей (1791-1867). Он считал их «весьма ценным прибором».

⁵ Таким образом Ш. Кулон назвал сделанный им вывод: «отталкивающая сила двух маленьких шариков, наэлектризованных электричеством одного рода, обратно пропорциональна квадрату расстояния между центрами двух шариков» [20. С.246]

2.6. Опыты Гальвани и открытие «животного электричества»

Итальянец Луиджи Гальвани (1737–1798) был известным анатомом и в течение многих лет изучал восприимчивость нервов к раздражению. После девяти лет анатомических исследований Гальвани совершил открытие, в котором есть немалая доля случайности. Он повесил пару лягушачьих лапок на проволочную сетку для просушки. Сетка была из железа, а крючки для подвеса из меди (рис. 27).

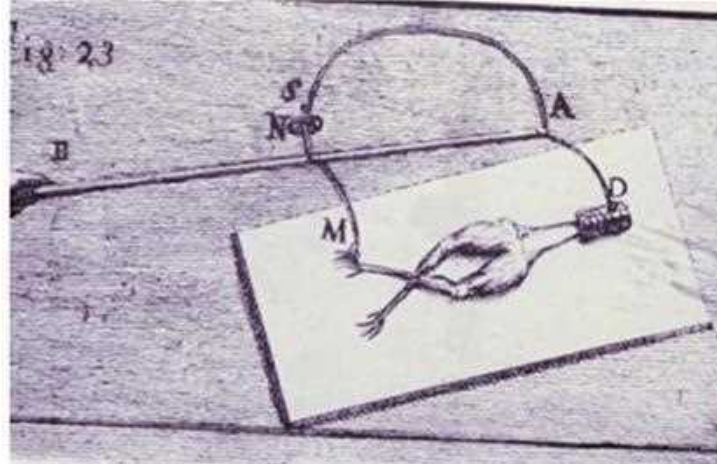


Рис. 27. Опыт Л. Гальвани

Неожиданно свежие лягушачьи лапки начали подергиваться. Гальвани обнаружил, что может повторить этот эффект, пользуясь заряженной лейденской банкой, когда попытался стимулировать «живую» мускулатуру электрическим разрядом. Этот эффект Гальвани назвал «животным электричеством». Книга Гальвани и результаты его экспериментов вызвали живой интерес среди европейских физиков. Но, если многие ученые соглашались с выводами Гальвани, то его соотечественник – выдающийся итальянский ученый Алессандро Вольта (1745–1827) пришел к совершенно иному заключению. Никакого «животного» электричества, по утверждению Вольты, не существует. Источником электричества в опытах Гальвани служит контакт двух разнородных металлов, а «лягушка, приготовленная по способу г. Гальвани, является чувствительнейшим электрометром» [22].

2.7. Опыты А. Вольты и открытие контактной разности потенциалов

Профессор Павийского университета Алессандро Вольта (1745–1827) относился с недоверием к так называемому животному электричеству. И тем не менее, по настоянию коллег, он повторяет описанные в работе Гальвани опыты. В результате его скептицизм стал рассеиваться, и 3 апреля 1792 года он написал Гальвани: *«Итак, вот я наконец обращен. С тех пор как я стал сам очевидцем и наблюдал эти чудеса, я, пожалуй, перешел от недоверия к фанатизму»*. В публичной лекции 5 мая 1792 года Вольта рассказывает об опытах Гальвани, превозносит их, но вместе с тем высказывает мысль, что лягушка может представлять собою лишь измерительный прибор, электрометр, в десятки раз

более чувствительный, чем уже давно существующий электрометр с золотыми листочками. Вольт настойчиво привлекает внимание к одной физической особенности опытов Гальвани: для того, чтобы вызвать сокращение мышц, образующие дугу металлы должны быть различными (рис. 28).

А. Вольта задался вопросом: действительно ли металлические проводники служат лишь для того, чтобы, соприкасаясь друг другом, установить связь, предоставляющую электрическому флюиду путь, по которому тот естественным образом стремится перейти из одного места в другое? Действительно ли их роль чисто пассивна, или же они являются активными агентами, приводящими в движение электрический заряд?

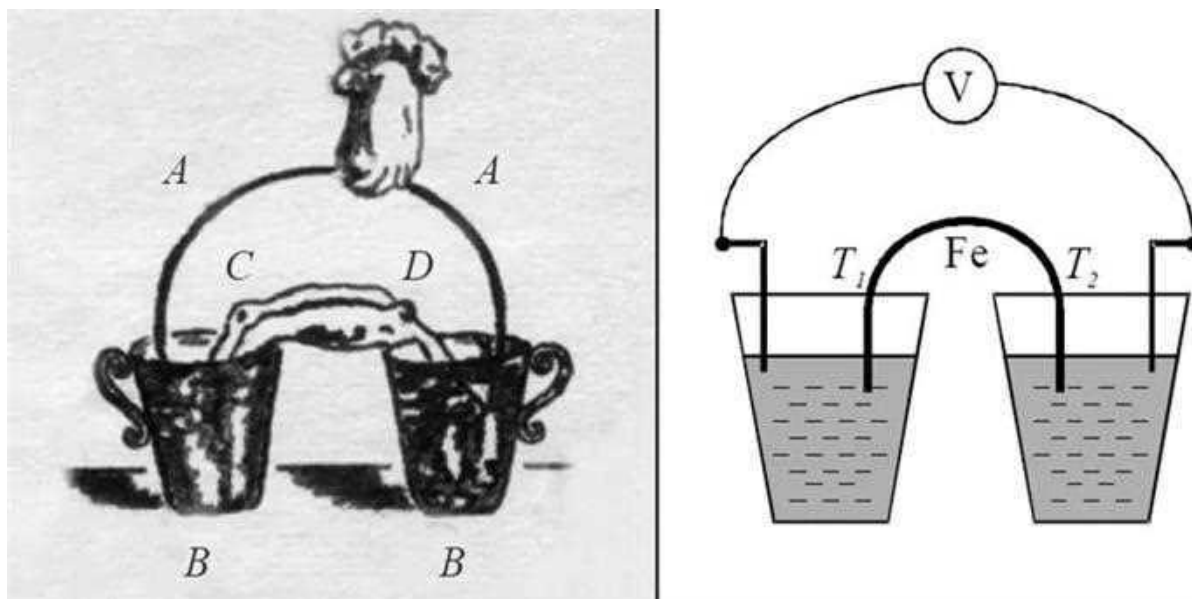


Рис. 28. Схема эксперимента Алессандро Волта, который привел к открытию термоэлектричества

В дальнейших своих опытах Вольта показывает, что мышца, по существу, не участвует в создании самого явления, ее сокращение есть эффект протекания заряда, генерируемого контактом двух различных металлов. Таким образом, фактически, он открывает явление, которое связано с контактной разностью потенциалов. В своих сомнениях Вольта идет далее. В качестве дуги он пробует использовать проводник из одного металла, но помещает концы мышцы лягушки и концы дуги в сосуды с холодной и горячей водой. Мышца сокращается и в этом эксперименте, что позволяет ученому объяснить протекание электрического флюида (заряда) неравномерным нагревом металлического проводника. Связь между электрическим током и разностью температур была обнаружена. Эти эксперименты он описывает 10 февраля 1794 года в своем письме аббату Антону Мариа Вассалли [22]. Однако Вольта не акцентировал свою дальнейшую работу на этом открытии: его больше заинтересовало практическое применение обнаруженного эффекта, в результате дальнейших исследований которого он создал свою батарею, называемую также вольтовым столбом.

2.8. Открытие «вольтова столба»

В 1799 г. в результате многочисленных экспериментов А. Вольта создает первый источник «непрерывного» электрического тока, получивший название «вольтова столба». Он представлял собой сложенные попарно цинковые и медные кружки, причем между каждой такой парой прокладывались картонные или суконные кружки, пропитанные водой или кислотой (рис.29).

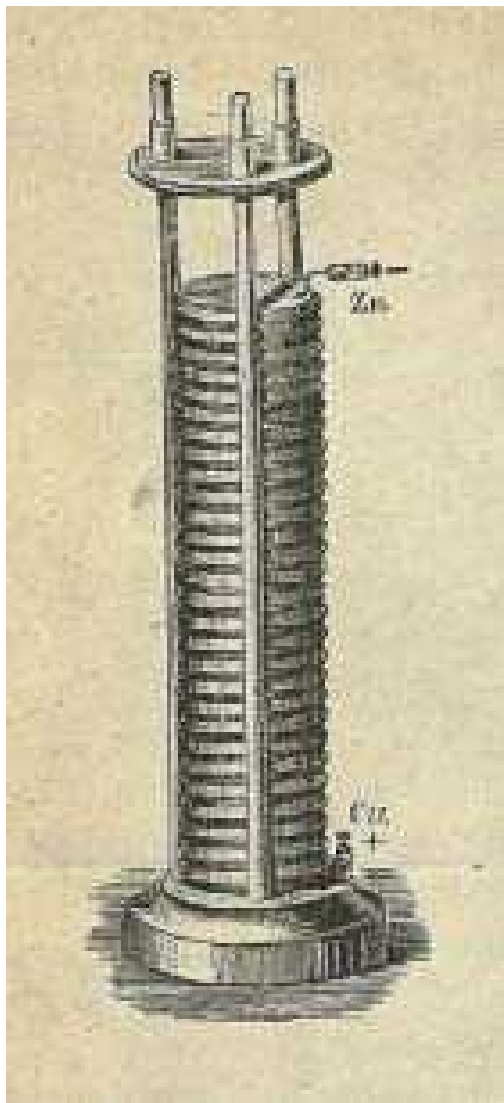


Рис. 29. Вольтов столб

Вначале, основываясь на своей теории, Вольта старался получить эффект только за счет контакта медных и цинковых пластин, но это оказалось безрезультатным. Ученый попытался найти объяснение этому явлению: в каждой паре пластинок (при их контакте) возникают электрические силы, направленные от какого-то одного металла (допустим цинка) к другому (меди). Если одну пару («цинк-медь») положить на вторую такую же пару, то возбужденные при контакте электрические силы будут направлены навстречу и поэтому нейтрализуют друг друга. Но если каждую пару разделить какой-либо

электропроводящей средой, например, смоченной в растворе кислоты шерстяной прокладкой, то тогда направление электрических сил в каждой паре будет совпадать и возникнет электрический ток⁶.

Таким образом, Вольта опытным путем пришел к созданию первого электрохимического генератора – источника постоянного электрического тока. В период 1800-1820 гг. применение гальванических батарей привело к открытию электролиза и доказательству сложного строения вещества, а также к изобретению электрической дуги. Однако само понятие электрического тока в то время еще не существовало, а явления рассматривались как результат конфликта электрических зарядов.

2.9. Явление электрической дуги

Изучая действия вольтова столба, академик Российской академии наук Василий Владимирович Петров (1761–1834) установил, что эффективность источника тока зависит не только от числа пластин и их размеров, но и от внешней части цепи. В 1803 году в России вышла из печати монография В.В. Петрова «Известия о Гальвани-Вольтовых опытах», в которой было дано подробное описание экспериментов, осуществленных им с помощью батареи, состоящей из 4200 медных и цинковых дисков (рис.30). Он впервые вводит в науку об электричестве термин «сопротивление». В этой работе Петров описывает явление электрической дуги. *«Если на стеклянную плитку или на скамеечку со стеклянными ножками, – пишет по этому поводу Петров, – будут положены два или три древесных угля, способные для произведения светящихся явлений посредством Гальвани-Вольтовой жидкости, и если потом металлическими изолированными направителями (directores), сообщенными с обоими полюсами огромной батареи, приближать оные один к другому на расстояние от одной до трех линий, то является между ними весьма яркий белого цвета свет или пламя, от которого оные угли скорее или медлительнее загораются и от которого темный покой довольно ясно освещен быть может»* (рис.31). Электрическая дуга, впервые полученная Петровым, представляла собой источник не только мощного света, но и высокой температуры, что было очень важно для металлургии [29].

⁶ Подробное описание механической конструкции своего прибора А. Вольта дает в работе «Об электричестве, возбуждаемом простым соприкосновением различных проводящих веществ» [20. С.279-283]

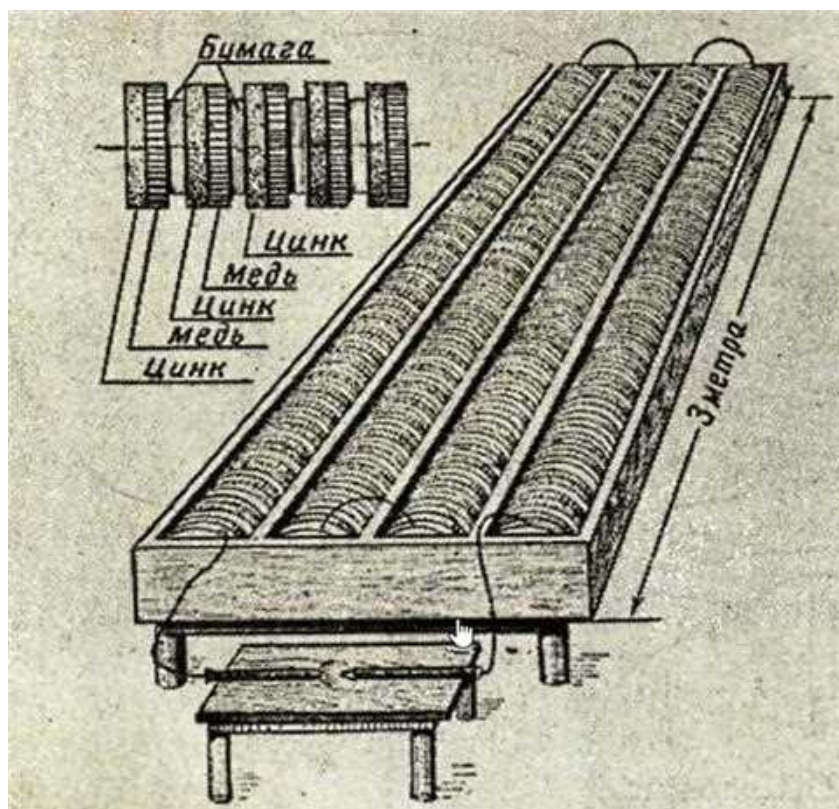


Рис.30. Гальваническая батарея В.В. Петрова

В 1810 г. британский ученый Г. Дэви (1778–1829), не зная об исследованиях русского физика, выполнил опыты с батареей из 2000 элементов и пришел к тем же результатам, что и Петров в 1801–1803 гг. Экспериментируя далее с электрической дугой, Дэви заметил, что пламя дуги отклоняется магнитом, предвосхитив тем самым открытие Эрстедом связи электричества и магнетизма. Чрезвычайно интересны опыты Дэви по исследованию электрических цепей. Дэви первому из ученых удалось определить проводимость металлов, которая оценивалась по скорости накаливания проволок из этих металлов, замыкающих полюса гальванической батареи. В дальнейших опытах Дэви использовал тот факт, что процесс разложения воды начинается при строго определенном значении напряжения. В электрическую цепь параллельно установке для разложения воды он включал испытуемые проводники. Уменьшая длину проводника, он замечал, при каком ее значении прекращается разложение воды. В результате этих исследований ему удалось установить, что 1 дюйм платиновой проволоки, 6 дюймов серебряной, 5,5 медной, 4 золотой, 3,8 свинцовой, 0,9 проволоки из палладия и 0,9 дюйма железной проволоки имеют одинаковое сопротивление. В этих же экспериментах он указал на существование обратной пропорциональности между сопротивлением проводника и его поперечным сечением.

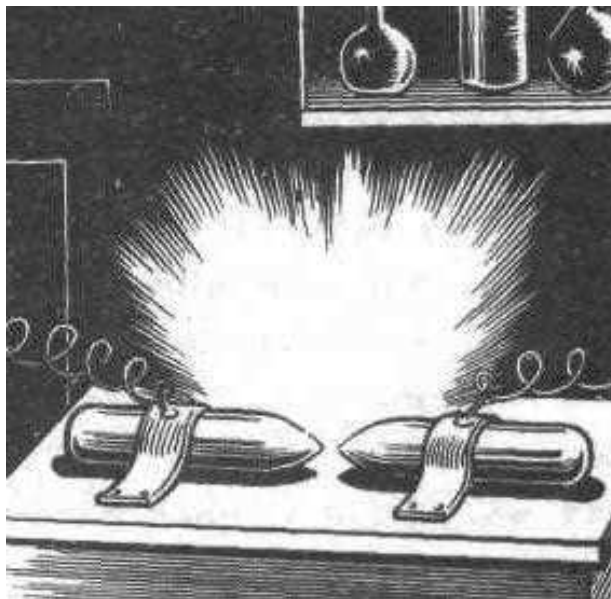


Рис. 31. Электрическая дуга между угольными электродами

Согласно современным оценкам, созданная Петровым батарея создавала напряжение около 1500 – 1700 В (рис. 30) [30]. Автор доказал, что ее действие связано с химическими процессами, протекающими между металлом и электролитом. Пользуясь этим источником тока, Петров провел ряд исследований, результатом которых стали важные открытия. Так он впервые убедительно показал, какое важное значение для действия электрического тока имеет не только сама батарея, но и соединительные провода – их размеры и материал. То есть он делает первые шаги по установлению количественных закономерностей в электрической цепи. В своей работе он совершенно четко указывает на зависимость скорости движения «гальвани-вольтовой жидкости и силы ее действия» от площади поперечного сечения проводника.

В главе об электролизе различных жидкостей Петров отмечает, что эффективность действия батареи возрастает при употреблении проводов большого сечения: *«И поелику серебряная клиппель часто бывает столь тонка, что она составляет только четвертую или пятую долю линии и надобно свивать ее вчетверо и даже вшестеро для получения сильного действия и весьма скорого движения гальвани-вольтовой жидкости, поелику я заметил, что для всех прочих одинаковых обстоятельств происходит весьма великое различие в следствиях опытов тогда, когда гальвани-вольтовая жидкость протекает по металлическим проводникам большего или меньшего состава». Чем скорее двигалась «гальвани-вольтовая жидкость» по проводнику, тем большее количество электричества протекало в единицу времени через его поперечное сечение и, следовательно, тем больше была сила тока в проводнике. Он подробно описывает наблюдавшиеся им явления прохождения тока через различные «выжатые масла, чистейший винный спирт», которые по сравнению с водой являются «худшими проводниками гальвани-вольтовой жидкости». Таким образом В.В. Петров впервые в мире установил одну из важнейших зависимостей между параметрами*

электрической цепи, которая явилась составной частью известного закона электротехники, сформулированного четверть века спустя в 1827 г. немецким физиком Г. Омом.

Кроме того, Петрову удалось доказать, что разные вещества ведут себя неодинаково при электролизе. Так для разложения растительного масла потребовалась огромная батарея из 4200 пар, а для воды – хватало и двух пар пластинок. На протекание этого физико-химического процесса влияет температура. Батарея, исчерпавшая свой запас на холоде, вполне может ожить, будучи занесенной в теплое помещение, утверждал Петров [31]. Проводя исследования, связанные с разложением жидкостей с помощью электричества, он одним из первых выяснил, что металл подвержен тем же процессам, что и жидкость. Изменение скорости ее окраски связано с особенностями материала, из которого выполнен электрод. Петров стал пионером в выделении металлов из солей и растворов с помощью электротока; изучал электрические явления, которые наблюдались в разреженном пространстве с наэлектризованными объектами.

В.В. Петров уделял огромное внимание изучению проблем свечения тел, детально исследуя явление фотолюминесценции и хемилюминесценции. При этом он четко разделял эти два понятия. В первом случае речь шла о свечении, возникающем посредством подводимой энергии света, а во втором – за счет химических трансформаций в теле. Петров стал первым применять с целью изоляции проводов сургуч, а для многожильной проводки использовал специальное изоляционное покрытие. Оно состояло из шелковой нити или медной проволоки, покрытой небольшим восковым слоем. Он одним из первых в мире применил параллельное соединение проводников, что позволило добиться более сильного действия.

Именно русскому ученому принадлежит самое раннее описание электрической дуги, которая появляется во время сближения двух угольков, имеющих соединение с источником тока. Вот так В.В. Петров описывал этот опыт: *«Если на стеклянную плитку или на скамеечку со стеклянными ножками будут положены два или три древесных угля, способные для произведения светоносных явлений, и если потом металлическими изолированными направлятелями, сообщенными с обоими полюсами огромной батареи, приближать оные один к другому на расстояние от одной до трех линий, то является между ними весьма яркий белого цвета свет или пламя, от которого оные угли скорее или медлительнее загораются, и от которого темный покой довольно ясно освещен быть может»* [31].

2.10. Опыты Эрстеда как доказательство взаимосвязи электрических и магнитных явлений

21 июля 1820 г. в Копенгагене на латинском языке вышла статья «Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam» датского физика Ганса Христиана Эрстеда (1777–1851), содержащая описание опытов, благодаря которым ему удалось установить связь между электричеством и

магнетизмом, которую так категорически отрицал У. Гильберт. Эрстед помещал над магнитной стрелкой прямолинейный металлический проводник, направленный параллельно стрелке. При пропускании через проводник электрического тока стрелка поворачивалась почти перпендикулярно проводнику (рис. 32). При изменении направления тока стрелка разворачивалась на 180° . Аналогичный разворот наблюдался, если провод переносился на другую сторону, располагаясь не над, а под стрелкой.



Г.Х. Эрстед

Принято считать, что это открытие было совершенно случайно: профессор Эрстед демонстрировал студентам опыт по тепловому воздействию электрического тока, при этом на экспериментальном столе находилась также и магнитная стрелка. Один из студентов обратил внимание профессора на то, что в момент замыкания электрической цепи стрелка немного отклонялась. Позднее Эрстед повторил опыт с более мощными батареями, усилив тем самым эффект. При этом сам он в своих поздних работах отрицал случайный характер открытия: «Все присутствующие в аудитории — свидетели того, что я заранее объявил о результате эксперимента. Открытие, таким образом, не было случайностью...»

«Основной вывод из этих опытов, – писал Эрстед, – состоит в том, что магнитная стрелка отклоняется от своего положения равновесия под действием вольтаического аппарата, и что этот эффект проявляется, когда контур замкнут, и он не проявляется, когда контур разомкнут». Эрстед решил проверить действие проводников из различных металлов на стрелку, из платины, золота, серебра, латуни, свинца, железа. В результате он обнаружил, что металлы, которые никогда не проявляли магнитных свойств, приобретали их, когда через них протекал электрический ток. Эрстед стал экранировать стрелку от провода стеклом, деревом, смолой, гончарной глиной, камнями, диском электрофора, но стрелка упорно отклонялась. Отклонялась даже тогда, когда её поместили в сосуд с водой. Последовал вывод: «Такая передача действия сквозь различные вещества не наблюдалась у обычного электричества и электричества вольтаического» [32].

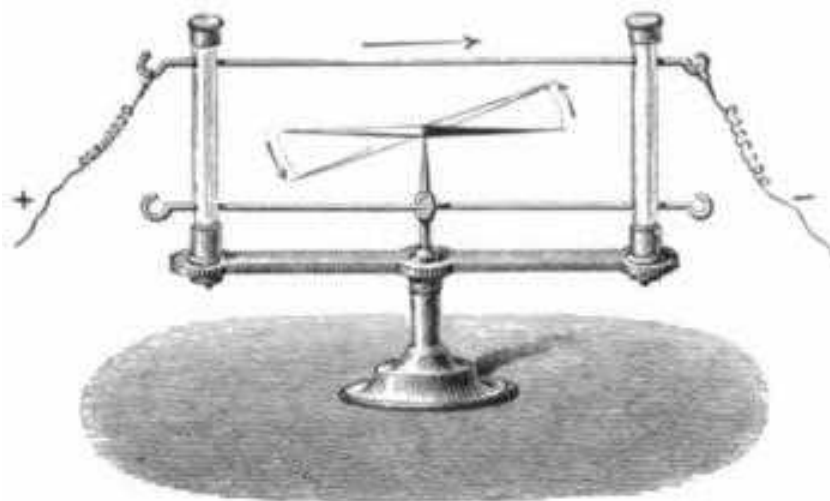


Рис.32. Установка для демонстрации влияния электрического тока на магнитную стрелку

Когда соединительную проволоку Эрстед ставил вертикально, то магнитная стрелка совсем не указывала на неё, а располагалась как бы по касательной к окружности с центром по оси проволоки. Исследователь предложил считать действие проволоки с током *вихревым*, так как именно вихрям свойственно действовать в противоположных направлениях на двух концах одного диаметра.

Кроме этого, Эрстедом была установлена пропорциональность между интенсивностью движущегося электричества (силой тока) и углом отклонения магнитной стрелки. Понимая важность своего открытия, Эрстед разослал отдельные оттиски своей работы всем крупным физикам, во все научные учреждения. Результат этой акции не заставил себя долго ждать: интерес, который ученые проявили к опытам Эрстеда, был беспрецедентным.

Описывая историю электромагнетизма, английский физик В. Брэгг, получивший Нобелевскую премию за изучение структуры кристаллов с помощью рентгеновских лучей, писал: *«приходится удивляться не тому, что Эрстед «случайно» открыл действие электрического тока на магнитную стрелку, а тому, что открытия нужно было ждать целых 20 лет с момента изобретения вольтова столба»* [33]. В десятках лабораторий находились и вольтовы столбы, и компасы, два предмета тысячи раз оказывались рядом, и магнитная стрелка отклонялась, когда проволочка замыкалась на концы вольтова столба (рис. 33).

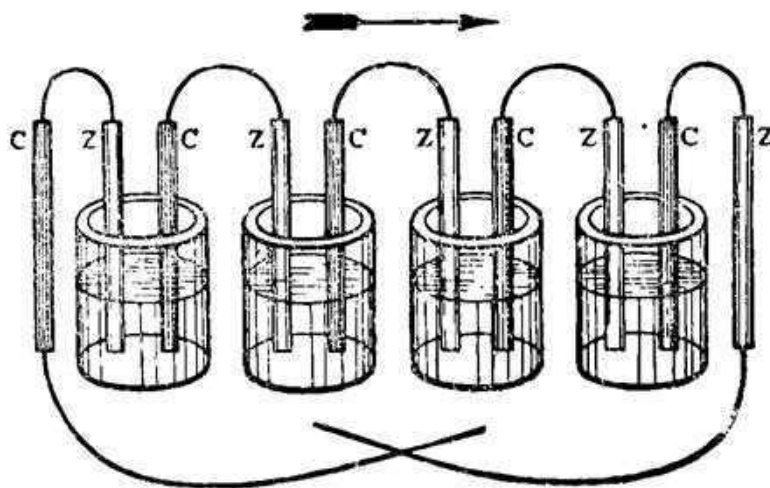


Рис. 33. Опыты Эрстеда по действию электрического тока на магнитную стрелку

2.11. Закон Ампера о взаимодействии электрических токов

Понятие электрического тока было введено французским физиком Андре-Мари Ампером (1775–1836) в сентябре 1820 г. в докладах Французской Академии наук. В этих же докладах Ампер сообщил об открытии им закона взаимодействия электрических токов (который ныне носит имя Ампера) и ввел понятие "направление тока" [34, 35]. Исследования Ампера в области электромагнетизма возникли сразу после и вследствие открытия весной 1820 г. Г.Х. Эрстедом влияния гальванического тока на магнитную стрелку. К этому времени 45-летний Ампер был уже признанным ученым, наибольшее число его научных трудов относится к математическому анализу. Но его работы по электричеству в период с 1820 по 1826 годы содержали совокупность новых гениальных идей. Ампер дал название «электродинамика» совокупности новых электрических явлений и отказался от понятия «электромагнетизм», которое тогда уже существовало в физике. Ампер считал, что пока речь шла о взаимодействиях между током и магнитом, название «электромагнитные явления» было уместно, оно подразумевало одновременное проявление электрических и магнитных эффектов, открытых Эрстедом. Но когда было установлено взаимодействие между токами, стало ясно, что здесь участвуют не магниты, а два или несколько электрических токов. Ампер писал: *«Поскольку явления, о которых здесь идет речь, могут быть вызваны лишь электричеством, находящимся в движении, я счел нужным обозначить их наименованием электродинамические явления»* [35. С.155].



А.-М. Ампер



Ж.-Б. Био

О том, как стремительно развивались идеи Ампера можно судить по содержанию его письма к сыну: *«Все мое время было занято важным в моей жизни обстоятельством: с тех пор как я узнал впервые о замечательном открытии г. Эрстеда, профессора в Копенгагене, о действии гальванических токов на магнитную стрелку, я, не переставая, только об этом и думал, я только и желал дать обширную теорию этих явлений, затронуть и ранее известные теории магнетизма и вести опыты, указываемые моей теорией, которые полностью удались и обнаружили много новых фактов. Начало мемуара я прочел на заседании в понедельник, т.е. неделю тому назад. В последующие дни я производил, то с Френелем, то с Дебрецем, опыты, подтвердившие выводы. В пятницу я все опыты повторил у Пуассона... Все прекрасно удалось, но заключительный опыт, который я рассматривал как окончательное доказательство, производившийся с помощью двух слишком слабых столбов, у нас с Френелем совсем не удался.... Вчера я получил у Дюлона большой столб... Опыты после этого прошли с полным успехом... Вот новая теория магнита, сводящая все явления к явлениям гальванизма»* [35. С.178]. Ампер был первым, кто обнаружил действие тока на ток и поставил опыты для выяснения этого. Результаты Ампера были опубликованы в труде «Теория электродинамических явлений, выведенная исключительно из опыта».

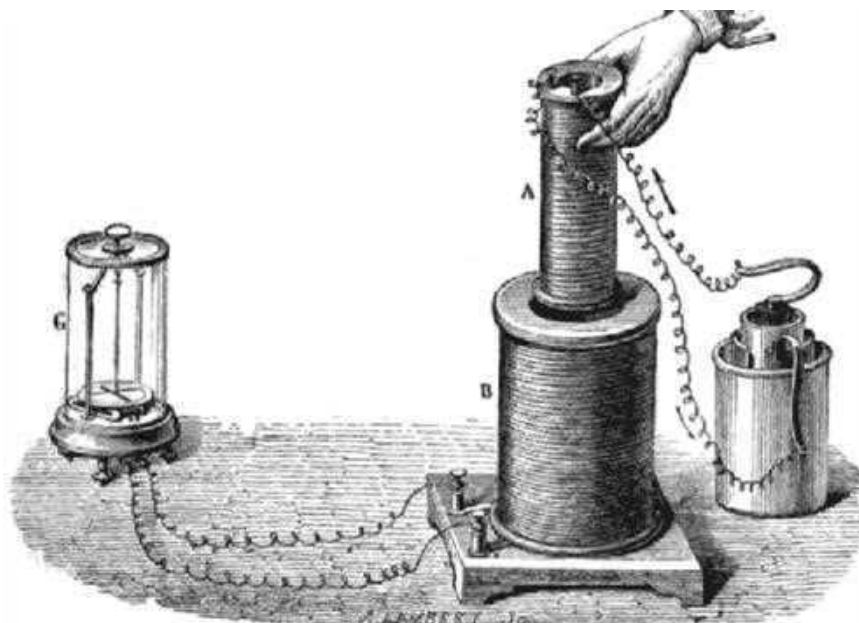


Рис. 34. Опыт Ампера с использованием соленоида

Ампер доложил об установлении им количественного выражения закона взаимодействия токов (закон Ампера) и показал ряд разработанных им экспериментов по взаимодействию токов (рис.34). На следующем заседании он сообщил о том, что свободно подвешенный соленоид с током в магнитном поле Земли ориентируется так же, как и магнитная стрелка. На этом же заседании коллеги Ампера Ж.-Б. Био (1774–1862) и Ф. Савар (1791–1841) доложили о результатах своих опытов по установлению закона действия прямого проводника с током на магнитную стрелку. Эти поиски были удачно завершены после того, как член Французской академии П.С. Лаплас (1749–1827) поделился с экспериментаторами некоторыми математическими соображениями⁷.

Ампер нашел закон взаимодействия токов в строгой математической форме, который носит сейчас его имя. Закон Ампера – это выражение функциональной зависимости силы взаимодействия между двумя малыми проводниками, длиной ds и ds' , по которым протекают токи i , i' соответственно, в виде

$$\frac{ii' ds ds' (\sin\theta \sin\theta' \cos w + 0,5 \cos\theta \cos\theta')}{r^2}$$

где r – длина прямой, соединяющей середины проводников, θ и θ' – углы между этой прямой и прямыми, проходящими через проводники, w – двугранный угол, образуемый плоскостями, проведенными через проводники и через прямую, соединяющую их середины.

⁷ История открытий в физике, совершенных французскими учеными, рассмотрена в статье: Визгин В.П. «Французская революция» в физике, «математическое рождение» классической физики и С. Карно // Исследования по истории физики и механики. 1995-1997. М.: Наука, 1999. С.15-38.

По определению Ампера электрический ток понимается как сумма двух токов – положительного и отрицательного (такое представление в физике сохранится вплоть до середины XIX в., когда перешли к пониманию тока как движения только положительных зарядов). При этом Ампер обнаружил, что взаимодействие токов носило разный характер – в одних случаях провода с токами притягивались, в других – отталкивались. Чтобы различать эти два случая, Амперу и понадобилось ввести направление электрического тока (*direction du courant électrique*), определив его как движение «положительного электричества», но, не вкладывая в это определение какой-либо особый смысл. Это упростило формулировку открытия Ампера – провода с токами, текущими в одном направлении, притягиваются, а с токами, текущими в разных направлениях, отталкиваются. При этом Ампер сохранял представления, что положительные и отрицательные электрические заряды взаимодействуют между собой и это приводит к возникновению магнитных сил вокруг проводов. Ампер считал нужным внести также уточнения в наименование полюсов магнита. Он назвал южным полюсом магнитной стрелки тот, который обращен на север, а северным полюсом тот, который направлен на юг.

В 1820 году благодаря Амперу в физике для измерений электрического тока появился амперметр. До Ампера существовали лишь электрометры, показывавшие напряжение и его интенсивность. Ампер предложил прибор, «который показывал бы наличие тока в вольтовом столбе или в проводнике, его энергию и направление». Он предложил для него название «гальванометр», которое сохранилось для амперметров на малые токи.

В зале Мюнхенского музея шедевров науки и техники, в шкафу, украшенном портретом А.-М. Ампера, хранятся невзрачные проволочные контуры, висящие и вращающиеся в чашечках с ртутью, с помощью которых они соединены с источниками тока. Именно при изучении поведения этих «проволочных паутин» выросла мощная и красивая наука о связи электрических и магнитных явлений – электродинамика, сыгравшая огромную роль в дальнейшем развитии физики и породившая плеяду технических наук: электротехнику и радиотехнику. Л.Д. Белькинд пишет: *«Экспериментируя, Ампер пользовался разнообразными приемами и аппаратурой, начиная с простых комбинаций проводников или магнитов и кончая построением довольно сложных приборов. Результаты опытов и наблюдений служили для него основанием для объяснения характеристик или свойств явлений, создания теории и указания возможных практических выводов»* [35. С.181].

Ампер не делал сам детали своих установок, идея создания которых принадлежала ему, он заказывал их мастерам-механикам, но изготовление вспомогательных деталей, монтаж и эксперимент – все это делалось лично Ампером, вообще работавшим практически без помощников. Кроме упоминавшегося выше гальванометра, важнейшую роль в становлении теории Ампера сыграл прибор, получивший название «станок Ампера», на котором он

исследовал взаимодействие двух проводников. Ампер создал соленоид, т. е. проводник, имеющий (в буквальном переводе) форму трубки или канала и называвшийся им, правда, по-другому – электродинамический цилиндр, действие и поведение которого оказались совершенно аналогичными действию и поведению прямого магнита. Для исследования действия магнитного поля Земли на магнитную стрелку Ампер создал два прибора. В основе первого лежало изучение воздействия магнитного поля на расположенный в вертикальной плоскости контур, имеющий форму окружности, а в основе второго – действие магнитного поля Земли на прямоугольный контур, лежащий в экваториальной плоскости. Ампер решил проблему узла контакта подвижных токоведущих элементов и источника тока в приборе. Этим решением была идея и реализация ртутного контакта, сыгравшего огромную роль в развитии электротехники вообще.

2.12. Изобретение мультипликатора

Для исследования электрических цепей были совершенно необходимы электроизмерительные приборы. Путь конструирования одного из важных электроизмерительных приборов указал опыт Эрстеда, когда о силе тока в цепи стало возможным судить по углу, на который отклонялась магнитная стрелка, расположенная около проводника с током.

Следующий шаг на пути создания электроизмерительных приборов был сделан французским математиком, физиком, астрономом П.С. Лапласом (1749–1827). Он высказал предположение, что увеличения угла отклонения магнитной стрелки можно добиться, если изогнуть проводник с током так, чтобы он проходил снизу и сверху магнитной стрелки. Это высказывание Лапласа было услышано: им воспользовался немецкий исследователь И. Швейггер (1779–1857), который в сентябре 1820 г. сконструировал и построил первый электроизмерительный прибор, названный впоследствии мультипликатором (или гальванометром) (рис. 35). Мультипликатор – первый прибор, прототип современного амперметра, сыгравший важную роль в дальнейших экспериментальных исследованиях, предназначен для измерения силы и направления гальванического тока. Прибор представлял собой несколько витков проволоки, расположенных определенным образом. В центре одной из петель помещалась магнитная стрелка. Если под действием некоторого тока в прямом проводнике стрелка отклонялась на угол 30° , то эта же стрелка, внесенная в центр тройной петли, по которой проходил такой же ток, отклонялась на угол 90° . При внесении стрелки в другие витки этого же устройства поворот стрелки происходил в противоположном направлении вследствие другого направления тока (рис.36).

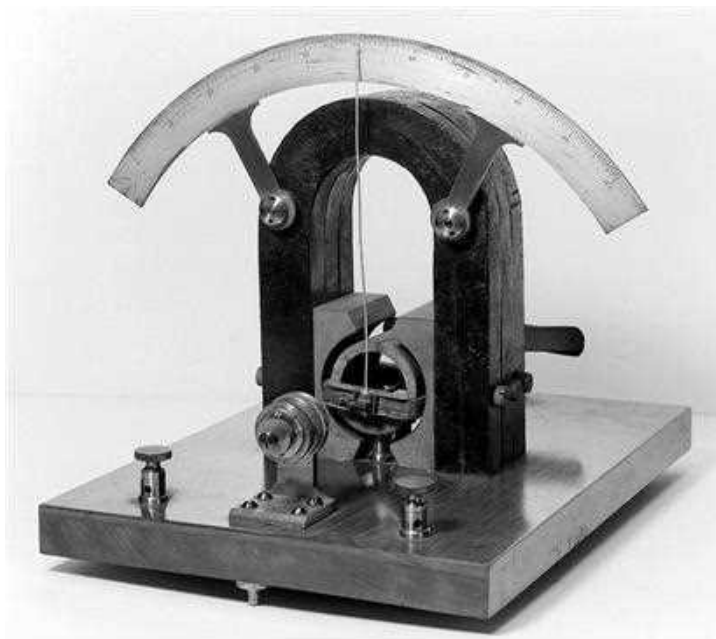


Рис. 35. Мультипликатор Швейгера

Немецкий физик и издатель научных журналов И.Х. Поггендорф (1796–1877) усовершенствовал прибор Швейгера, свернув изолированную шелком проволоку в круговые витки. Намотка имела минимальный радиус, достаточный для того, чтобы магнитная стрелка могла поворачиваться внутри нее. Чувствительность мультипликатора Швейгера–Поггендорфа определялась до некоторого предела числом витков проволоки.

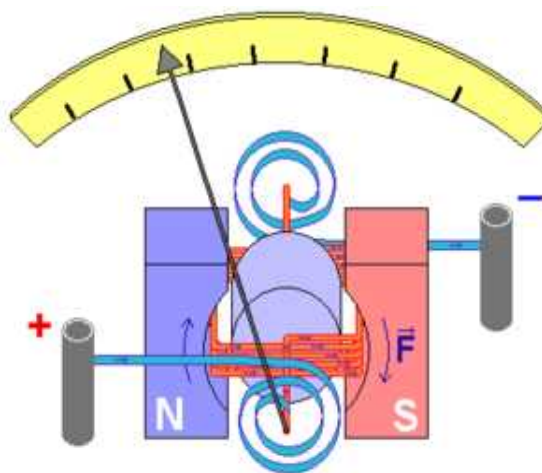


Рис. 36. Схема работы гальванометра

2.13. Эффект Зеебека

В 1821 году, используя мультипликатор Швейггера–Поггендорфа, немецкий физик Томас Иоганн Зеебек (1770–1831) открыл термоэлектрический эффект, который иногда называют просто эффектом Зеебека.

Т. Зеебек опубликовал результаты своих опытов в статье «К вопросу о магнитной поляризации некоторых металлов и руд, возникающей в условиях разности температур». В ней он описал один из своих многочисленных опытов следующим образом. Небольшой кусок висмута был припаян с обоих концов к медной спирали. Если один конец нагревался с помощью лампы, а другой оставался холодным, то магнитная стрелка, заключенная внутри опирали, поворачивалась, указывая на прохождение тока, который в холодном спае шел от меди к висмуту (рис.37).

Эффект Зеебека заключается в том, что в электрической цепи, составленной двумя последовательно соединенными проводниками из разного материала, возникает возбуждающая сила (ЭДС), если контакты между этими проводниками находятся при различной температуре. Величина электродвижущей силы пропорциональна разности температур контактов. Электрическая цепь, состоящая только из двух различных проводников, называется термоэлементом или термопарой (рис.38). Два проводника А и В, спаи которых имеют абсолютные температуры T_1 и T_2 , V – измерительный прибор. Величина термо-ЭДС составляет единицы милливольт на 100 град разности температур спаев. Например, пара медь-константан даёт 4,28 мВ/100 °С, хромель-алюмель – 4,1 мВ/100 °С. Токи, создаваемые термоэлектрическими парами, обычно слабые.

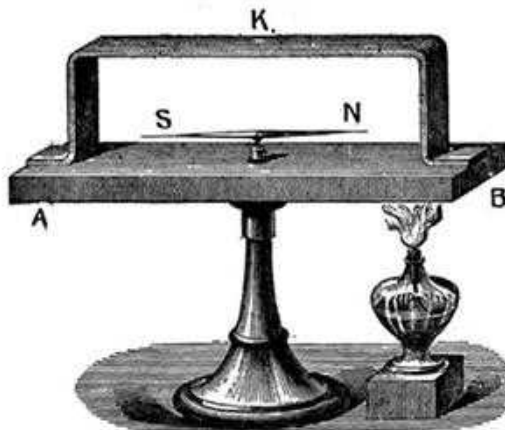


Рис. 37. Внешний вид установки Зеебека

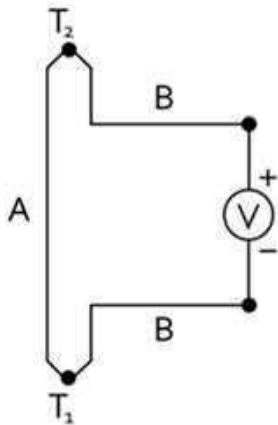


Рис. 38. Термопара двух проводников А и В

Если вдоль проводника существует градиент температуры, то электроны на горячем конце приобретают более высокие энергии и скорости, чем на холодном; в полупроводниках, в дополнение к этому, концентрация электронов проводимости растет с температурой. В результате возникает поток электронов от горячего конца к холодному. На холодном конце накапливается отрицательный заряд, а на горячем остаётся нескомпенсированный положительный заряд. Процесс накопления заряда продолжается до тех пор, пока возникшая разность потенциалов не вызовет поток электронов в обратном направлении, равный первичному, благодаря чему установится равновесие. Количественной характеристикой термоэлектрического эффекта служит коэффициент Зеебека (S) – разность потенциалов между концами проводника ΔV , возникающая при поддержании между ними разности температур ΔT :

$$S = -\Delta V / \Delta T = E / \Delta T,$$

где $E = -\Delta V / \Delta x$ – величина возникающего в проводнике электрического поля, а $\nabla T = \Delta T / \Delta x$ – градиент температуры. Соответственно, напряжение, вырабатываемое термопарой, созданной двумя различными металлами, имеющими температуры T_1 и T_2 , определяется разностью напряжений между их концами:

$$V = S_B(T_2 - T_1) - S_A(T_2 - T_1) = (S_B - S_A)(T_2 - T_1).$$

К сожалению, в обычных металлах оно оказывается весьма малым (см. табл. 1). Например, при приложении доступной разности температур в 300°C к термопаре, одним из электродов которой является висмут, а вторым – сурьма, создаваемое напряжение составляет около 36 мВ. Таким образом, чтобы заменить две обычные пальчиковые батарейки, используемые в компьютерных мышках, пультах и многих других гаджетах, пришлось бы соединить 100 таких термопар и поддерживать между их электродами разность температур в 300°C .

Таблица 1

Коэффициент Зеебека для металлов

Металл	Коэффициент Зеебека (мкВ/К)	Металл	Коэффициент Зеебека (мкВ/К)
Висмут	-73,0	Серебро	+7,1
Никель	-16,4	Медь	+7,4
Палладий	-5,6	Железо	+16,0
Калий	-9,0	Сурьма	+47,0

В 1834 г. в ходе экспериментальных исследований проводимости сурьмы и висмута Жан Шарль Пельтье (1785–1845) намеревался определить, как изменяется температура вдоль однородного или разнородного проводника, по которому проходит ток. В связи с этим Пельтье исследовал температуру в разных точках термоэлектрической цепи с помощью термопары, соединенной с гальванометром, причем обнаружил, что в местах спаев разных металлов температура резко меняется, имеются даже случаи охлаждения. Наибольшего эффекта ему удалось добиться с парой висмут – сурьма. Таким образом, электроток может вызывать и охлаждение (рис. 37). Многие физики отнеслись с недоверием к опытам Пельтье, вероятно, потому что он был в науке случайным человеком – до тридцати лет Пельтье был часовщиком. Чтобы исключить всякие сомнения, Пельтье подтвердил открытое им явление непосредственно с помощью воздушного термометра.

В других своих опытах Пельтье спаивал накрест два куска металла, затем, подключив гальванометр, пропускал через два последовательных конца креста и через гальванометр термоэлектрический ток, а спустя некоторое время цепь разъединял и подсоединял тот же гальванометр, но к другим двум концам креста – и гальванометр показывал ток, вызывавшийся либо нагреванием, либо охлаждением спая креста. В каких случаях получается нагревание, а в каких охлаждение в месте спая, точно определил в 1838 году И.Х. Поггендорф. Наиболее заметен эффект Пельтье у полупроводников, на основе контакта двух полупроводников с разным типом проводимости созданы элементы Пельтье, с помощью которых разность температур может достигать 70 градусов [36].

2.14. Термоэлектричество в электролитах и ферромагнитных жидкостях

Сегодня ученые продолжают искать экологически чистые и экономичные новые типы термоэлектрических материалов, таких как полимеры, ионные проводники и другие (рис. 39). Одним из таких объектов не так давно стали жидкие электролиты. Оказывается, что значения коэффициента Зеебека у них обычно на порядок больше ($S \approx 0,5 \text{ мВ/К}$), чем у полупроводниковых

материалов. Кроме того, они состоят из доступных и нетоксичных элементов. К сожалению, электрическая проводимость таких жидкостей на несколько порядков меньше, чем у легированных полупроводников, поэтому жидкие электролиты считались неэффективными для использования рассеиваемого тепла.

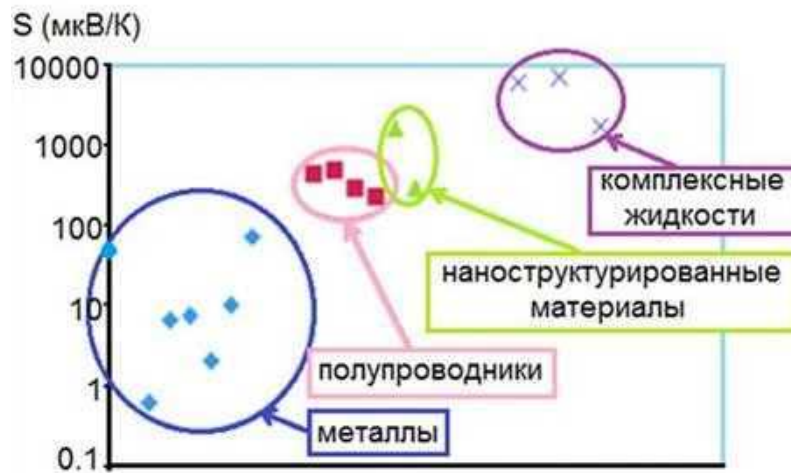


Рис. 39. Характерные величины коэффициента Зеебека для различных классов термоэлектрических материалов [37]

Новый импульс поискам пригодных для практического применения термоэлектрических материалов придали исследования ионных жидкостей, которые представляют собой расплавленные соли, жидкие как при комнатной температуре, так и при температурах, намного превышающих 100°C (некоторые могут превышать и 300°C). В отличие от жидких электролитов, наряду с большими коэффициентами Зеебека, ионные жидкости обладают высокой электропроводностью, что обеспечивает их высокую эффективность. В настоящее время самое высокое значение коэффициента Зеебека, полученное в широком диапазоне температур в системе с ионной жидкостью, превышает 2 мВ/К . Таким образом, ионные жидкости являются перспективными кандидатами для утилизации тепловых потерь, например, преобразования тепла выхлопной трубы автомобиля в электроэнергию, которой будет достаточно для работы кондиционера, охлаждающего его салон. Коэффициент Зеебека жидких электролитов может быть также увеличен посредством введения в их объем магнитных наночастиц (феррожидкость – это взвешенные в несущей жидкости наночастицы магнетита, гематита или другого материала, содержащего железо). Их медленный дрейф под воздействием разности температур и взаимодействие с электродами улучшают термоэлектрические свойства жидкости [37]. Феррожидкости почти одновременно были синтезированы в США и СССР в 1960-х годах в результате механического измельчения частиц магнетита в шаровых мельницах в присутствии поверхностно-активного вещества в течение 1000 часов [38]. Область инженерии открыла множество идей для применения материала, многие приобрели большую коммерческую ценность.

2.15. Установление закона электрических цепей

Для описания процесса протекания электрического тока необходимо было установить количественные связи величин, которые измерялись в экспериментах. Однако в начале 20-х годов XIX века такие понятия, как напряжение, падение напряжения, сопротивление проводников, еще не укрепились в физике или не существовали совсем. Следствием неопределенности величин, характеризующих процесс протекания тока в цепи, было, отсутствие приборов для их измерения. Не был известен и механизм работы гальванических и термоэлектрических элементов. Разные токи по-разному нагревали проводники, что сказывалось на их сопротивлении. Несмотря на неоднократные попытки экспериментаторов найти соотношение между величинами, характеризующими ток, задача не поддавалась разрешению. Только благодаря упорству, настойчивости, физической интуиции, уверенности в своих силах и особой тщательности Георгу Ому (1789-1854) удалось преодолеть все препятствия и установить основной закон электрических цепей, справедливо названный его именем (рис. 40).



Рис. 40. Георг Симон Ом (Википедия)

Создание приборов, измеряющих величину тока, открыло возможность количественного исследования законов электротехники и привело к открытию законов Ома (1826 г.) и правил Кирхгофа (1845 г.). Первоначально в обеих своих статьях, в которых был обоснован закон Ома – линейное соотношение между напряжением и электрическим током, Г. Ом использовал «силовые» термины как в отношении напряжения (*der erregenden Kraft*), так и в отношении величины тока (*die Stärke/Kraft des elektrischen Stromes*) [34]. До некоторой степени это было оправдано, поскольку Ом электрическому сопротивлению сопоставлял длину проводника. Однако уже в книге 1827 г. Ом переходит к термину «величина тока» (*die Grösse des Stromes*), который широко использует, а для величины тока выбирает символ S – первую букву от *Strom*.

В основу своего электроизмерительного прибора Ом положил конструкцию крутильных весов Кулона (рис. 41). Магнитную стрелку подвешивали с помощью металлической проволоки над проводником, расположенным в направлении магнитного меридиана. При включении тока магнитная стрелка отклонялась на некоторый угол, и, чтобы вернуть ее в первоначальное положение, Ом закручивал головку, расположенную в верхней части установки, к которой был прикреплен подвес. Изменяя условия опыта, Ом измерял углы, на которые необходимо было повернуть головку, чтобы действием упругой силы в подвесе совместить магнитную стрелку с визирной линией. В качестве источника тока Ом использовал элемент Вольта из меди и цинка, помещенных в раствор соляной кислоты. Исследуемые проволоки, предварительно зачищенные для лучшего контакта, опускались в чашечки со ртутью, куда были помещены концы проводов от источника тока. Для своих первых экспериментов Ом использовал пять проволок из платинированной меди различной длины, но одинакового поперечного сечения.

С помощью описанного выше прибора Ом измерял значение «потери силы» – уменьшение магнитного действия тока за счет включения проволок различной длины. «Потеря силы», согласно рассуждениям Ома, должна быть пропорциональна углу поворота магнитной стрелки относительно магнитного меридиана. В 1820-30-е гг. под "силой тока" понималась реальная механическая сила, поворачивавшая магнитную стрелку. В те времена господствовало представление о мгновенности действия сил, и поэтому явление механического поворота магнитной стрелки понималось как свидетельство того, что электрический ток обладает "силой", приводящей к повороту стрелки компаса.

Кроме этого, сам поворот стрелки на определенный угол стал инструментом измерения величины электрического тока, на этой основе появились такие приборы как мультипликаторы, гальванометры и амперметры. Вплоть до 2019 г. эталон 1 ампер (единицы тока) определялся из силы механического взаимодействия двух электрических токов – закона Ампера (в настоящее время эталон единицы электрического тока определяется на основе выбора точного значения величины элементарного заряда). Вероятно, именно такое операциональное определение величины тока послужило причиной для переноса термина "сила тока" с силовой величины (механической силы, поворачивающей магнитную стрелку) на чисто количественную – величину тока [34].

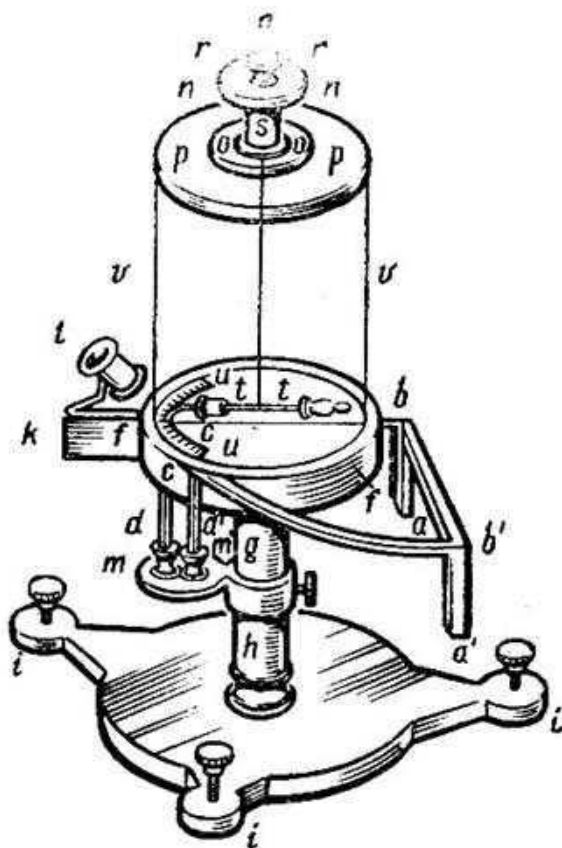


Рис. 41. Экспериментальная установка Г. Ома

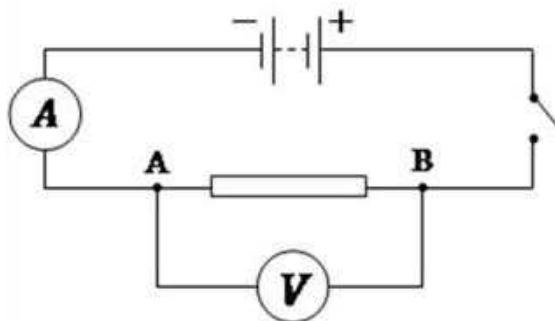


Рис. 42. Электрическая схема экспериментов Г. Ома

Для проволок, обозначенных по возрастающей длине a , b , c , d , e , Ом нашел следующие значения «потери силы» (в условных единицах): 0,12; 0,25; 0,35; 0,43; 0,58. Если считать остальную часть цепи неизменной во все время опыта, то полученные данные, как определил Ом, хорошо удовлетворяют формуле

$$X = \frac{a}{b + x}$$

где X – «потеря силы», магнитное действие тока; x – длина проволоки в футах, a и b – постоянные величины (рис.43).

Следующий шаг в исследованиях Ома – попытка обобщить полученное выражение для проволок произвольной длины. Дифференцируя найденную им формулу, ученый приходит к выражению:

$$dU = m \frac{dx}{1+x}$$

и далее, по словам Ома, *«...возникает мысль, не может ли быть общей формулой выражение*

$$dU = m \frac{dx}{a+x}$$

где постоянные m и a характеризуют неизменяемую часть цепи». Интегрируя последнее выражение, Ом получает формулу:

$$U = m \ln\left(1 + \frac{x}{a}\right)$$

При значениях $a = 2,9$ и $m = 0,525$ результаты, полученные экспериментально и вычисленные по формуле, найденной Омом, совпадают с достаточной точностью.

Кроме поисков закона, «по которому металлы проводят контактное электричество», Ом провел опыты по исследованию проводимости металлов. Для этой цели он брал несколько проволок одинакового сечения, изготовленных из различных материалов, и поочередно включал их в цепь (рис. 42). За стандартную эталонную проволоку Ом брал медную, имеющую длину один фут. При включении проволоки из другого материала Ом постепенно укорачивал ее до тех пор, пока отклонение магнитной стрелки не становилось таким же, как и отклонение эталонной. Остающаяся длина проволоки из исследуемого материала и принималась Омом за характеристику проводящих свойств данного материала.

Обозначая проводимость медной проволоки числом 1000, для других материалов Ом нашел следующие значения (в условных единицах): золото – 574, серебро – 356, цинк – 333, латунь – 280, железо – 174, платина – 171, олово – 168, свинец – 97. Обращает на себя внимание тот факт, что проводимость серебра в опытах Ома получилась меньше, чем проводимость меди, тогда как по современным данным различия в проводимости меди и серебра не столь значительны. Сам исследователь отмечал, что приводимые им значения относительных проводимостей имели в его опытах большой разброс, и ему приходилось из нескольких измерений выбирать среднее. Нужно отметить, что точность измерений в этих опытах не удовлетворяла самого исследователя, и он обещает вернуться позднее к этому вопросу

mit dem Radius des Kreises $\frac{1}{r}$ umal größer
 die Gefährlichkeit mit m^2 größer, die Widerstand
 aber mit m größer als der Widerstand aber auf
 dieselbe Länge m mal größer, so erfüllt sich nicht
 wie bei Quadrat die Gefährlichkeit. Hiermit
 fülle man

$$-dv = \alpha v^2 dx \quad \text{oder}$$

$$-\frac{dv}{v^2} = \alpha dx \quad \text{oder}$$

$$\frac{1}{v} = \alpha x + C \quad \text{oder} \quad d v^{-1} = -\frac{dv}{v^2}$$

Bestimme die $v=i$ für $x=0$ so wird

$$\frac{1}{i} - \frac{1}{i} = \alpha x \quad \text{oder}$$

$$v = \frac{1}{\frac{1}{i} + \alpha x} \quad \text{oder}$$

$$iv = \frac{1}{1 + \alpha i x} \quad \text{oder}$$

$$X = \frac{a}{b+x} \quad X^0 = \frac{a}{b}$$

wobei auf die Beschränkung kein Rücksicht genommen
 werden ist $(b+x)X$ eine konstante Größe sein.
 und mit der unten gefundenen Methode zusammen
 zu bringen.

$$X^0 - X = V = \frac{a}{b} - \frac{a}{b+x} \quad \text{wenn } b \text{ sehr groß im Vergleich}$$

$\frac{1}{b+x}$

$$V = a \left(\frac{1}{b} + \frac{x}{b^2} + \frac{x^2}{b^3} + \frac{x^3}{b^4} + \dots \right)$$

$$= \frac{a}{b} \left(1 + \frac{x}{b} + \frac{x^2}{b^2} + \frac{x^3}{b^3} + \dots \right)$$

Рис. 43. Первая формулировка закона Ома, сделанная в записной книжке Г. Ома (хранится в Архиве Немецкого музея, Мюнхен)

В этой же серии экспериментов Ом провел исследования зависимости угла отклонения магнитной стрелки от площади поперечного сечения проводников. Для этой цели он брал проволоки из одного и того же материала, но разной толщины – от 0,12 до 1,4 линии и, экспериментируя с ними, нашел, что проволоки из одного и того же материала, но различного поперечного сечения имеют одинаковую проводимость, если их длины пропорциональны их поперечным сечениям. Результаты своих исследований Ом оформил в виде статьи под названием «Предварительное сообщение о законе, по которому металлы проводят контактное электричество». Статья была опубликована в 1825 г. в «Журнале физики и химии». Это была первая публикация Ома, посвященная исследованию электрических цепей. Выражение, найденное и опубликованное Омом, оказалось неверным, что впоследствии стало одной из

причин его длительного непризнания. Впрочем, и сам исследователь не претендовал на окончательное решение поставленной им задачи и даже подчеркивал это в названии вышедшей статьи. Поиски нужно было продолжать. Он самостоятельно сконструировал и изготовил экспериментальную установку. Исследуя электрическую цепь, он установил, что сила тока (его магнитное действие) одинакова в любых участках замкнутой цепи, хотя накал проволок различного диаметра был различным. Это означало, что определение значения тока по его тепловому действию не эквивалентно его значению, определяемому магнитным действием. В качестве характеристики тока он выбрал магнитное действие и был уверен в правильности сделанного шага.

Главным источником погрешностей была гальваническая батарея. Ом специально исследовал этот вопрос и нашел, что возбуждающая сила батареи беспрерывно убывает со временем и каждое замыкание и размыкание цепи вызывает резкое изменение ее. Вносили искажения и исследуемые проволоки: чистота их материала вызывала сомнения. Кроме того, Ом не совсем точно измерял диаметры тонких проволок, о чем он сам пишет в следующей работе. Следует отметить и такой немаловажный факт: внутреннее сопротивление гальванической батареи было очень большим в сравнении с сопротивлением исследуемых проволок, что снижало чувствительность установки.

Экспериментальных данных для установления закона электрических цепей было недостаточно, но Ом спешит объявить ученому миру о направлении своих поисков, торопится «застолбить» свой «золотоносный участок». Следует отметить, что Ом был не одинок в своей неудаче. В 1825 г., и тоже весной, в Англии, П. Барлоу (1776–1862) и во Франции А.С. Беккерелем (1788–1878) были опубликованы работы, посвященные этому же вопросу. Общим у них было и то, что обе эти работы, как и статья Ома, содержали ошибочные результаты. Несмотря на то, что в методике эксперимента у этих исследователей было много общего, результаты, к которым они пришли, были различны. Разнобой в экспериментальных данных мог привести в отчаяние. Новое явление упорно не поддавалось исследователям, все попытки были провальными. Но, чем загадочнее тайна, тем сильнее она притягивает исследователей, тем почетнее выйти из поисков победителем. Ученые не отступали, они только меняли тактику и предпринимали новые атаки. Ясно было одно: необходим совершенно новый подход к решению назревшей проблемы. Нужно было или использовать другой тип генератора электрической энергии из уже имеющихся: или создавать новый, или разрабатывать схему, в которой изменение ЭДС не сказывалось бы на результатах опыта. Ом пошел по первому пути. Немецкий физик и издатель И.Х. Поггендорф, комментируя работу Ома после выхода ее из печати, высказал мнение, что точность измерений можно повысить, если в качестве источника тока использовать не гальваническую батарею, а термоэлемент Зеебека. Термоэлемент имел преимущество в том, что, во-первых, значение термоэлектродвижущей силы было достаточно стабильно. Во-вторых, ввиду ее незначительной величины ток, возбуждаемый в цепи, был мал и нагревания проводов практически не наблюдалось, следовательно, сопротивление их

оставалось постоянным в течение опыта. В-третьих, внутреннее сопротивление термоэлемента было много меньше сопротивления гальванической батареи, что способствовало повышению чувствительности установки и точности измерений.

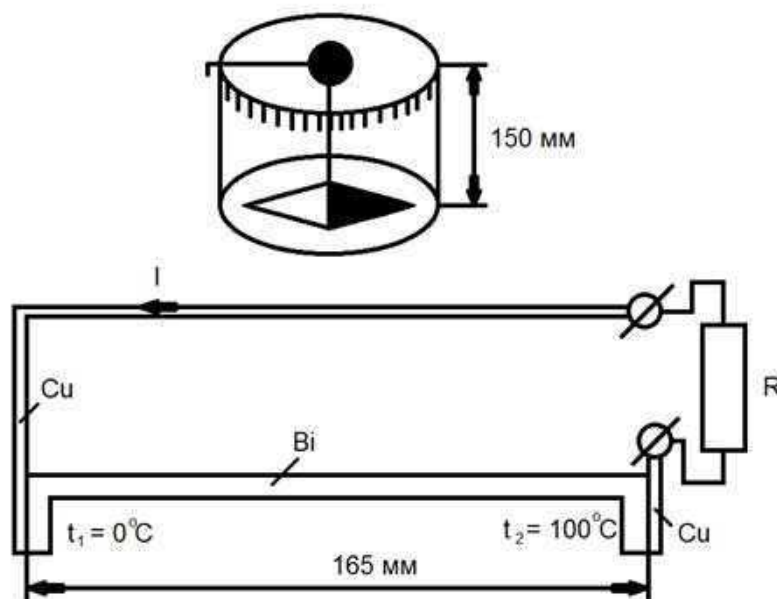


Рис. 44. Схема установки Г. Ома

Принципиально схема новой установки Ома почти не отличалась от той, которая использовалась в первых опытах (рис. 44). Но только принципиально. В качестве источника тока Ом использовал термоэлемент, представляющий собой пару «медь-висмут». Для своих первых экспериментов Ом выбрал 8 проводников, имеющих длину 2, 4, 6, 10, 18, 34, 66, 130 дюймов и обозначенных им порядковыми номерами по возрастающей длине. Все исследуемые проволоки были нарезаны из одного и того же медного платинированного провода толщиной $7/8$ линии. После того как на концах термопар устанавливалась температура 0 и 100 °С, Ом последовательно включал в цепь приготовленные им проволоки. Сняв показания магнитного действия тока, Ом проводит те же измерения, включая те же проводники, но в обратном порядке. Результаты своих измерений, вернее, средние их значения, Ом оформил в виде таблицы, из которой следовало, что отклонение магнитной стрелки при включении одного и того же проводника уменьшалось от опыта к опыту, хотя и незначительно. По этому поводу Ом замечает в своей работе: *«Не берусь утверждать, что является причиной этого уменьшения силы (магнитного действия): изменения, произошедшие в месте контакта, или то, что 8 и 11 января дни были очень холодные, а сосуд со льдом стоял на окне холодной комнаты»* [34]. Однако поясняет далее Ом, результаты двух серий опытов, выполненных 15 января, имеют очень малое расхождение, хотя время между 4 и 5 сериями, выполненными в этот день, составляло около четырех часов. Стабильность термоэлектрического источника тока в сравнении с гальванической батареей много выше, и Ом надеется на успешное завершение

начатых им исследований. В этом убеждает и хорошая повторяемость при обратном включении проволок.

Исследуя табличные данные, Ом находит, что они «очень хорошо удовлетворяют выражению

$$X = \frac{a}{b + x}$$

где X – сила магнитного действия проводника с током, длина которого x , a и b – постоянные величины, зависящие соответственно от возбуждающей силы и от остальной части цепи».

Открытие Г. Ома, в отличие от открытий А. Вольта, Г.Х. Эрстеда, М. Фарадея, не произвело революции в физике, но без него невозможно было бы развитие электротехники, создание электрических машин. Без знания закона Ома невозможен расчет электрических цепей, радиосхем, электроизмерительных приборов. Перечислим некоторые примеры использования закона Ома при изучении электрических цепей. В первую очередь, закон Ома в виде

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R}$$

служит для определения сопротивления проводника при наличии амперметра и вольтметра. Одним из наиболее точных и чувствительных способов определения сопротивления является метод мостовых схем, расчет которых производится также с использованием закона Ома. Применяя закон Ома для полной цепи, можно, изменяя внешнее сопротивление, вычислить ЭДС и внутреннее сопротивление источника тока, решив для этого систему уравнений:

$$I_1 = \frac{\varepsilon}{R_1 + r}$$

$$I_2 = \frac{\varepsilon}{R_2 + r}$$

Этот же закон позволяет рассчитать электрическую цепь, источником тока в которой является батарея, составленная из нескольких элементов. Разветвленные цепи в электротехнике рассчитывают с помощью двух правил Кирхгофа (сформулированных в 1845 году), одно из которых является правилом применения закона Ома к различным участкам замкнутой цепи (рис. 45).

Изучение нелинейных цепей также связано с применением закона Ома. Важнейшие характеристики электронных ламп и полупроводниковых приборов, такие как крутизна характеристики и внутреннее сопротивление, определяются с помощью закона Ома.

Закон Ома, который говорит о линейной зависимости плотности тока от напряженности электрического поля, имеет свои границы применимости. Он нарушается в случае искрового разряда в газах, когда при некоторых значениях

напряженности электрического поля заряженная частица приобретает такую энергию, которой достаточно для вторичной ионизации молекул газа и увеличения числа носителей зарядов. Не подчиняется закону Ома и ток в электронных лампах, ток через контакт между двумя полупроводниками или полупроводником и металлом. Катастрофическим нарушением закона Ома является ток в сверхпроводниках: о зависимости силы тока от напряжения в этом случае говорить не приходится. Следовательно, закон Ома не является фундаментальным законом природы. Но если бы закон Ома выполнялся во всех случаях прохождения тока через вещество, то электроника, построенная на нелинейной зависимости тока от напряжения, перестала бы существовать. Однако для металлов ни при каких условиях не удалось заметить отклонений от пропорциональности между плотностью тока и напряженностью электрического поля. Даже при плотностях тока 10^9 A/m^2 , что значительно выше обычной плотности в миллион раз, отклонение от закона Ома не будет превышать одного процента.

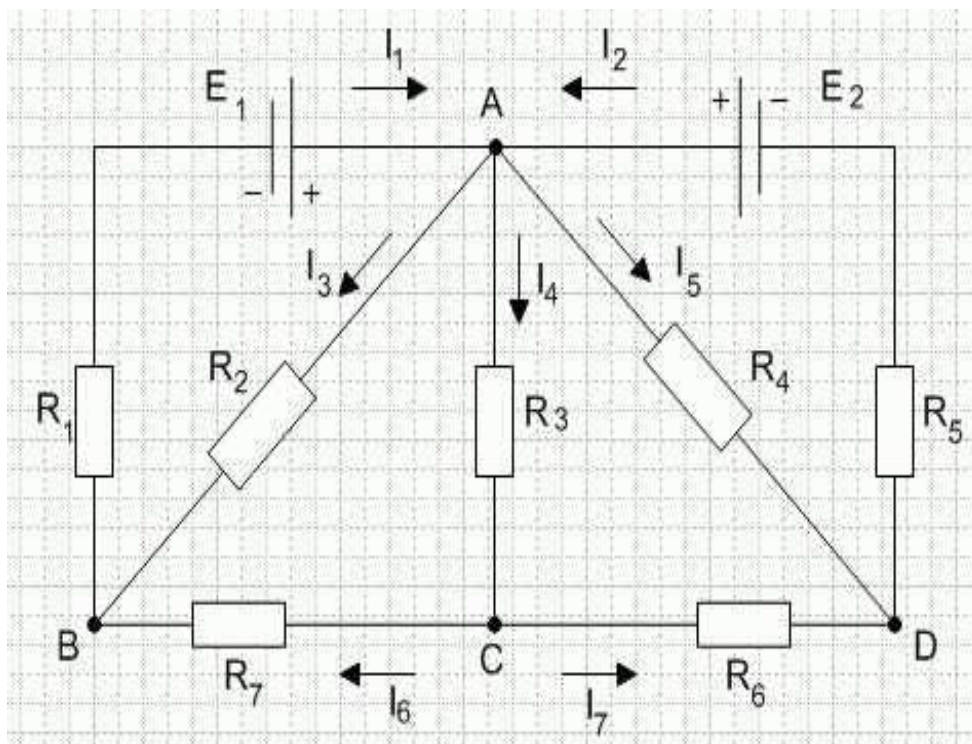


Рис. 45. Пример разветвленной электрической цепи

О значении исследований Ома хорошо сказал профессор физики Мюнхенского университета Е. Ломмель при открытии памятника ученому в 1895 г.: «...открытие Ома было ярким факелом, осветившим ту область электричества, которая до него была окутана мраком. Он указал единственно правильный путь через непроходимый лес непонятных фактов. Замечательные успехи в развитии электротехники, за которыми мы с удивлением наблюдали в последние десятилетия, могли быть достигнуты только на основе открытия Ома. Лишь тот в состоянии господствовать над силами природы и управлять ими, кто сумеет разгадать законы природы. Он

вырвал у природы так долго скрываемую ею тайну и передал ее в руки современников». В 1881 г. на электротехническом съезде в Париже ученые единогласно утвердили название единицы сопротивления – 1 Ом. Этот факт – дань уважения коллег, международное признание заслуг ученого.

2.16. Закон Джоуля-Ленца

При пропускании через металлический проводник электрического тока происходит столкновение электронов либо с нейтральными молекулами, либо с молекулами, которые потеряли электроны. Таким образом, движущийся электрон либо становится частью молекулы, которая потеряла свой электрон и образует нейтральную молекулу, либо вышибает из нейтральной молекулы электрон, затрачивая собственную кинетическую энергию, и образовав новый положительный ион. Во время столкновения молекул проводника с электронами расходуется энергия, именно она превращается в тепло. На любое движение, для осуществления которого требуется преодолеть сопротивление, затрачивается определенная энергия. Так, к примеру, чтобы переместить какое-либо тело нужно преодолеть сопротивление трения, а работа, которая затрачивается на это действие, превращается в тепло. Собственно, электрическое сопротивление проводника можно сравнить с сопротивлением трению, поскольку оно играет такую же роль. Таким образом, чтобы провести ток через проводник источнику тока требуется затратить некоторую энергию. Такой переход электроэнергии в тепловую нашел свое отражение в законе теплового действия тока, получившем название: закон Джоуля-Ленца.

Еще в 1832 – 1833 гг. российский академик Э.Х. Ленц (1804–1865) обратил внимание на то, что при нагревании металлических проводников их проводимость существенно изменяется [39]. Это осложняло расчет электрических цепей. Определить количественную зависимость между током и выделяемой им теплотой было невозможно, так как не было ни точных приборов для измерения тока, ни источника постоянной электродвижущей силы, ни надежного метода измерения сопротивления. Ленц использовал свои собственные или усовершенствованные им измерительные приборы и его «схема была собрана по последнему слову техники того времени» [40]. Ленц предложил «свои» единицы тока и напряжения. Он же сконструировал прибор-сосуд для измерения количества выделяемого в проволоке тепла. В сосуд заливался разбавленный спирт, обладающий значительно меньшей электропроводностью, чем вода, использованная в опытах Джоуля. Через платиновую проволоку пропускался ток. Ученый провел большую серию опытов, при которых измерялось время, необходимое для нагревания жидкости на 10°С. В 1843 г. Ленц опубликовал закон, сформулированный следующим образом: *«Нагревание проволоки гальваническим током пропорционально квадрату служащего для нагревания тока»*. Результаты, полученные Ленцем для различных металлов, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость электропроводности разных металлов
от температуры по Э. Х. Ленцу

Материал	Относительная электропроводность	Выражение, дающее зависимость электропроводности от температуры по отношению к исходной электропроводности
Серебро	100	$100 - 0,36568 t + 0,000590 t^2$
Медь	73,4	$100 - 0,31368 t + 0,000473 t^2$
Золото	58,6	$100 - 1,21340 t + 0,0003056 t^2$
Олово	22,6	$100 - 0,41420 t + 0,0007696 t^2$
Железо	13,1	$100 - 0,47200 t + 0,000847 t^2$
Платина	10,3	$100 - 0,27461 t + 0,000465 t^2$
Свинец	10,7	$100 - 0,40600 t + 0,0007696 t^2$

Эти результаты измерений были очень точными для своего времени, но были проведены в небольшом температурном интервале. Из полученной Ленцем зависимости – отрицательной первый член и положительный второй – вытекало как будто бы, что при достаточно высокой температуре, значительно большей, чем та, которая была достигнута в этих измерениях, электропроводность металлов должна увеличиваться, между тем, как известно сейчас, это не так. Таким образом эмпирические формулы, полученные Ленцем, не могут быть экстраполированы за пределы тех температур, в которых велись измерения. Сам Ленц, однако, думал, что его формулы могут иметь и более широкое значение. Он полагал (хотя и не настаивал на подобной гипотезе), что, может быть, электропроводность металлов при небольших изменениях температуры понижается, но затем снова начинает повышаться.

Прибор, которым воспользовался Ленц при установлении своего закона, изображен на рис. 46. Этот прибор представляет собою нечто вроде стеклянной банки, заткнутой стеклянной же пробкой с просверленным дном. Сквозь пробку в банку опускается термометр. Сквозь стеклянную пробку проходят внутрь банки две толстые медные проволоки, служащие вводами. Они соединены снаружи с зажимами S, а внутри банки со спиралью из платиновой проволоки, обладающей заметным сопротивлением. В банку наливался спирт. Пропуская по платиновой спирали токи разной силы и измеряя их силу, а также сопротивление проволоки

и время, в течение которого температура поднималась на один градус, Ленц смог доказать справедливость такого закона: *«Количество теплоты, выделяющейся током в сосуде, пропорционально квадрату силы проходящего через спираль тока, пропорционально сопротивлению спирали и пропорционально времени»*. Таким образом он установил закон в той форме, которой мы пользуемся и сейчас. Важно отметить, измерения Ленца относились только к металлическим проводникам, в отличие от Джоуля, который считал закон универсально приложимым ко всяким проводникам.

Английский физик Джеймс П. Джоуль опубликовал открытый им аналогичный закон в 1841 г. Реакция Ленца была по-научному корректной. Он подчеркнул, что, хотя его результаты «в основном совпадают с результатами Джоуля, они свободны от тех обоснованных возражений, которые вызывают работы Джоуля». Джоуль выполнил значительно меньше измерений и пользовался прибором, дававшим ряд погрешностей. Поэтому закон о тепловом действии тока благодаря исключительной точности и обстоятельности измерений Ленца вошел в историю науки под названием «закон Джоуля-Ленца».

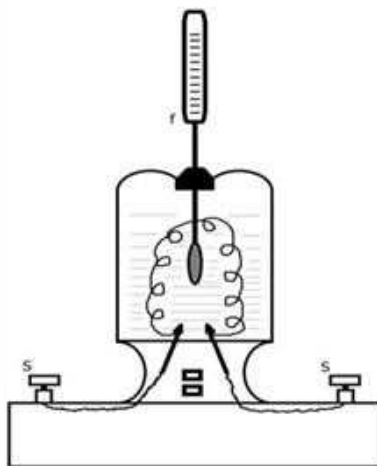


Рис. 46. Прибор Ленца

Так или иначе, оба ученых исследовали явление нагревания проводников электрическим током, они установили опытным путём следующую закономерность: количество теплоты, которое выделяется в проводнике с током, прямо пропорционально сопротивлению проводника, квадрату силы тока и времени прохождения тока.

2.17. Электрические лампы Лодыгина, Яблочкова и Эдисона

В 1803 году в Санкт-Петербурге была опубликована книга профессора кафедры физики Медико-хирургической академии Василия Владимировича Петрова «Известие о гальванн-вольтовых опытах», посвященная исследованиям явлений электрического тока. Петров провел исследования свойств созданной им батареи как источника электрического тока и изложил на русском языке опыты по электролизу различных жидкостей, исследования

явлений прохождения электрического тока в разреженном воздухе, наблюдения «светоносных» явлений, сопровождающих действие электрического тока [31]. Наибольший интерес представляет открытие Петровым в 1802 году явления электрической дуги между двумя угольными электродами, соединенными с полюсами «огромной» батареи, состоящей из 4200 медных и цинковых дисков, общей длиной 12 м.

Со времен открытия электродуги В.В. Петровым физики знали о том, что, если пропустить ток через два соприкасающихся проводника, между ними возникнет электрическая дуга и будет светить, пока не сгорят проводники-электроды. В 1837 году профессор физики Московского университета М.Г. Павлов, продолжатель дела Петрова, гусиным пером при свете свечи записал: *«Кажется, недалеко то время, когда электричество, сделавшись всеобщим средством освещения, заменит собой горение всех потребляемых на то материалов... нужно только явление изобретательного человека, могущего приспособить этот чудесный огонь к ожидаемому употреблению»* [41].

На принципе электродуги строились первые попытки сконструировать электрические лампы: два электрода (чаще всего из угля), между которыми при прохождении тока вспыхивала электродуга и светила в кислороде воздуха, пока не сгорали электроды. В стеклянные баллоны их не заключали. Свет дуги был мощным, ярким. В комнатах он казался ненужным и даже страшным. Но один крупный недостаток дугового освещения мешал даже помыслить о массовом его применении: для питания каждой дуговой лампы нужна была персональная динамо-машина. Были попытки сконструировать электрическую лампу накаливания – стеклянная колба, в которой горит не два, а один угольный стерженек. Но свет получался слабым, тусклым и мгновенно сникал. И такой тип освещения казался зашедшим в тупик. За реализацию идеи взялись почти одновременно три ученых – Павел Яблочков, Александр Лодыгин и Томас Эдисон, все они по совпадению родились в один год – 1847 (рис. 46).

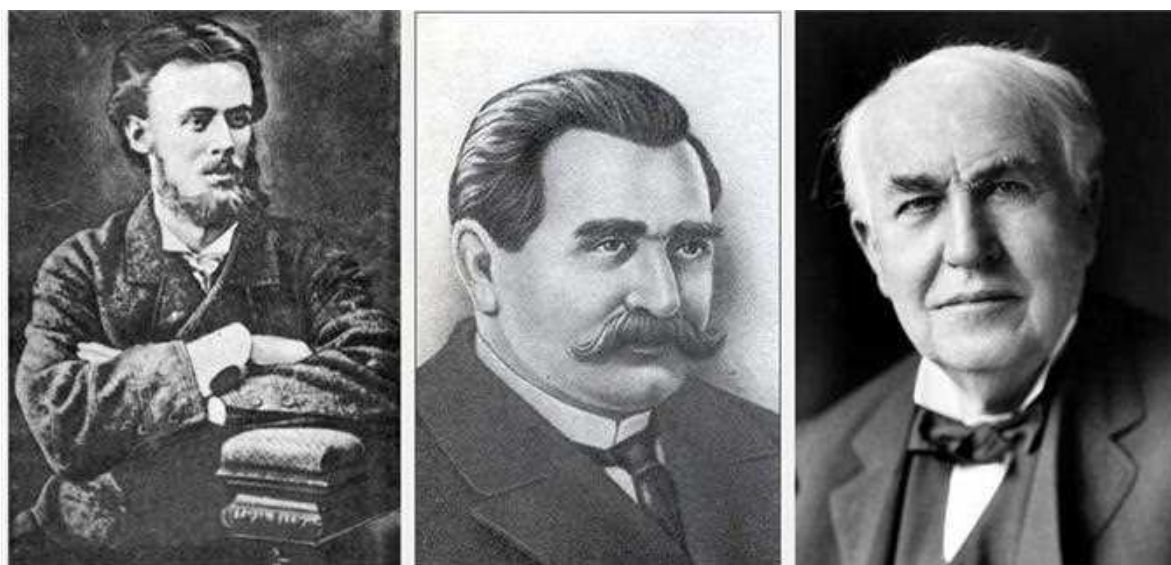


Рис. 46. Изобретатели электрической лампы:
А.Н. Лодыгин, П. Яблочков, Т. Эдисон

Александр Николаевич Лодыгин (1847-1923) первым предложил применять в лампах вольфрамовые нити и закручивать нить накаливания в форме спирали. В 1909 году Лодыгин получил патент на индукционную печь [41]. Он отбросил идею дуговых ламп и в нескольких теоретических работах обосновал отказ от них, переключив внимание на маломощные лампочки накаливания, которые решали пресловутую проблему «дробления света» в принципе – одна динамо-машина могла питать электротоком сколь угодно много маломощных лампочек накаливания. *«Изобретенное мной дешевое электрическое освещение имеет своим основанием свойства тел нагреваться и накаливаться под влиянием сильного электрического тока»*, писал Лодыгин.

Можно проследить путь рассуждений Лодыгина, когда он развивает свою идею о принципиально новой – лампе накаливания. Он рассуждает: *«При этом являются следующие вопросы:*

- 1. Точно ли тела имеют свойство раскаляться под влиянием электрического тока?*
- 2. Раскаление тел может ли быть достаточно для освещения известного пространства?*
- 3. Безразлично, могут быть употреблены для предназначенной цели?*
- 4. Можно ли достигнуть этого, чтобы тело, не разрушаясь и не изменяясь, давало свет?*
- 5. Есть ли возможность получить свет в известном количестве пунктов от действия одного и того же тока?*
- 6. Не будут ли под влиянием высокой температуры, при этом развивающейся, портиться осветительные аппараты, так что после каждого или, по крайней мере, после небольшого числа опытов потребуются значительные исправления, а вследствие этого такое освещение не будет ли очень дорого?*
- 7. Если на вышеозначенные вопросы получатся удовлетворительные ответы, то будет ли действительно предлагаемый способ освещения самый дешевый из всех существующих?»*

Здесь собраны все вопросы, которые А.Н. Лодыгин ожидал услышать от будущих оппонентов: в эпоху пара и газа электричество слыло столь таинственным и пугающим, что не мешало подготовиться не только к недоверию, но и к нападкам. Лодыгин не довольствуется проведением результатов своих опытов, но и дает сноски на труды физиков с мировым именем. «Опыты показывают, что всякий проводник, подвергнутый действию тока, может не только нагреваться, но более или менее накаливаться. Джоуль, занимающийся изучением этого явления, нашел следующий закон: «Развитие теплоты прямо пропорционально сопротивлению проволоки и прямо пропорционально квадрату силы тока». Закон этот подтвержден опытами Беккереля и Ленца; отсюда следует, что плохие проводники накаливаются лучше, чем хорошие».

Лодыгин пишет о возможности «легко расплавить железную и платиновую проволоку» – «трудноплавкие металлы» – при помощи электрического тока, то есть уже тогда, в начале 1870 годов, его занимало использование электричества в металлургии, и, уверовав во власть электричества над тугоплавкими металлами, он словно завязал узелок – на память, чтобы вернуться к этому открытию через короткое время, а пока продолжает исследовать другую способность электричества – давать свет.

В итоге опытов Лодыгину стало ясно, «какие тела могут быть употреблены для предложенной цели», а именно:

- 1) тело должно быть проводником;
- 2) представлять значительное сопротивление току;
- 3) иметь, по возможности, большую лучеиспускательную способность;
- 4) быть настолько твердым, небольших диаметров, чтобы из него можно было делать цилиндры;
- 5) чтобы оно не изменялось под влиянием высокой температуры.

Приводя далее таблицу степеней проводимости различных проводников, Лодыгин делает вывод: *«Из всех этих тел для нас представляют интерес только четыре, т. е. железо, платина, графит и хорошо прокаленный каменный уголь, не изменяющиеся от нагревания; в то же время эти тела представляют большое сопротивление току и достаточно твердые для предполагаемой цели; что же касается до лучеиспускательной их способности, то мы находим по опытам Меллони, что графит и каменный уголь испускают тепловых лучей больше, чем металлы...»* [42].

Но как быть с изменениями, которые могут произойти с проводником в момент горения? Ведь он под действием тока будет «химически разлагаться» и превращаться из твердого в жидкое или газообразное состояние. Лодыгин отвечает: *«Мы уже выше называли тела, которые могут не изменяться... графит, прокаленный каменный уголь и проч. Что же касается до химических соединений или разложений, которые могут явиться с веществами, окружающими проводник, то физика оказывает нам для этого способы: так, например, если ток пропустить через угли, помещенные в пустом пространстве или азоте (выделено Лодыгиным), то сгорания не происходит. Очевидно, азот можно заменить другими газами, не соединяющимися с элементами, входящими в состав проводника, и таким образом предохранить светящиеся центры от всевозможных изменений»* [42]. Чтобы продлить свет, в баллон вводились два угольных стержня: сгорал первый – тотчас включался второй. Действительно, пока присутствовал кислород воздуха, первый стержень горел лишь полчаса, а второй еще два часа. Осенью 1874 года Лодыгин демонстрировал эту лампу на заседаниях Русского технического общества (РТО) (рис. 47).

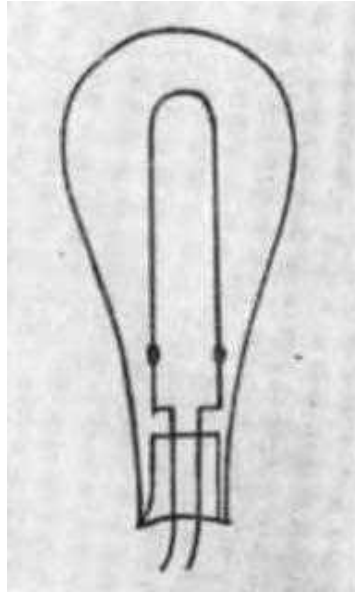


Рис. 47. Электrolампа Лодыгина (из описания к патенту 1893 г.)

Электрические лампочки с углеродной нитью накала были впервые продемонстрированы Томасом Эдисоном в октябре 1879 года (рис. 48).

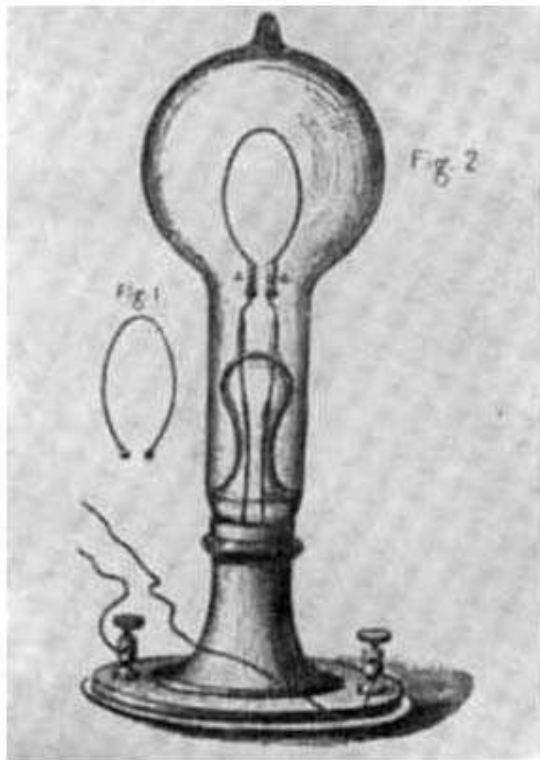


Рис. 48. Лампа Эдисона

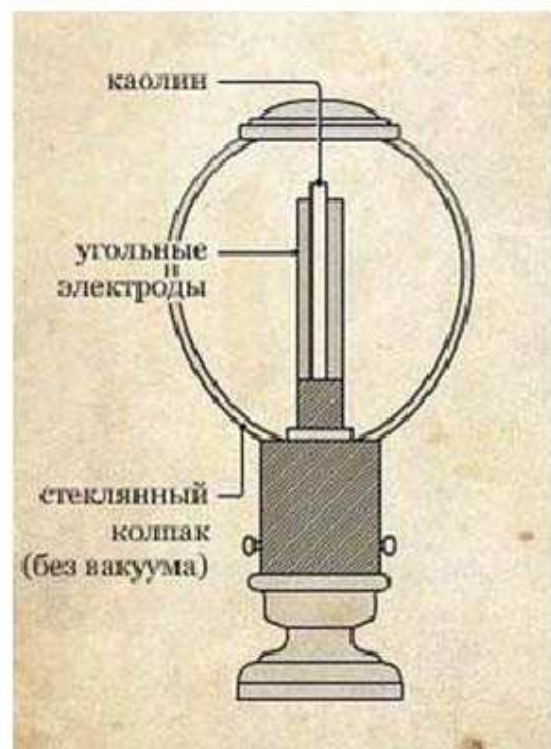


Рис. 49. Свеча Яблочкова

Патент на свечу Яблочкова был оформлен 23 марта 1876 года. В мире она получила название «русский свет» или «русское солнце». К созданию свечи Яблочкова привели многочисленные и упорные опыты по электролизу, которые он проводил в 1875 году. В одном из экспериментов угли, расположенные параллельно в электролитической ванне, случайно коснулись друг друга и на

мгновение вспыхнули, осветив лабораторию. Яблочков решил, что будущее именно за электрической угольной дуговой лампой, и вплотную занялся прибором. Много времени ушло на выбор изолирующего вещества и получение подходящих углей. Что представляла собой свеча Яблочкова? Очень простое и дешевое устройство: два стержня, разделенные изоляционной прокладкой из каолина, зажимались по отдельности в клемме подсвечника (рис. 49). На верхних концах возникал дуговой разряд, из-за чего пламя дуги ярко вспыхивало и горело, пока не сжигались угли. Свеча Яблочкова имела преимущества перед угольной лампой Лодыгина. Она оказалась проще и дешевле, первые образцы служили полтора часа, после этого нужно было вставить в фонарь новую свечу. Со временем появилось ноу-хау: фонари с автоматической заменой свечей.

2.18. От наблюдения электрического тока в вакууме к электронному выпрямителю

Американский инженер и изобретатель Томас Альва Эдисон (1847–1931) за свою жизнь получил в США 1093 патента на изобретения. Он впервые экспериментально наблюдал движение свободных электронов в вакууме, когда он работал над лампой с угольной нитью накаливания, помещенной в стеклянную колбу, из которой выкачан воздух. 27 января 1880 года Эдисон получил патент на свое изобретение. Предшествовало этому изобретение мощного вакуумного насоса. Материалы при накаливании в воздухе изменяют свои свойства, окисляются, а в вакууме процесс окисления затруднен. Главное, что отличало лампу накаливания Эдисона от других существовавших на тот момент, заключалось в использовании наиболее эффективного и надежного угля для нити накаливания. Начиная свои поиски Эдисон с использования обыкновенных швейных ниток, покрытых углем, которые могли находиться в раскаленном состоянии в течение 40 часов. Эдисон перепробовал все вещества, содержащие углерод – продукты питания, смолы, лучший результат дало растительное волокно бамбука. В 1883 году в процессе своих поисков угольных нитей накаливания Эдисон отметил, что внутренняя поверхность стеклянных ламп постепенно темнеет. Угольный налет равномерно покрывал всю поверхность лампы, кроме одной полосы в том месте, где крепилась нить. Это было похоже на тень. Эдисон предположил, что угольный налет на стекле появляется из нити накаливания, но не мог объяснить происхождение «тени». Он поместил маленькую металлическую пластинку между двумя ножками подпорки нити (рис. 50). К металлической пластинке можно было попеременно подключать конец нити накаливания с разными потенциалами. Когда пластинку соединяли с положительным полюсом источника тока, в пластинке появлялся небольшой электрический ток. При присоединении к отрицательному полюсу этого не происходило.

Через тринадцать лет, в 1896 году, открытие электрона Дж. Дж. Томсоном навело помощника Эдисона Джона Флеминга (1849–1945) на мысль, о том, что полузабытое явление, которое наблюдал Эдисон, объяснялось тем, что

раскаленная угольная нить испускала электроны, которые притягивались через вакуум к положительно заряженной пластине (рис.51). Когда пластина заряжалась отрицательно, электроны отталкивались от нее. В сконструированном Флемингом варианте прибора Эдисона нить накаливания окружала металлическая стенка, заряженная положительно. Прибор пропускал только положительную половину каждого цикла переменного тока. Это было не что иное, как первый электронный выпрямитель.

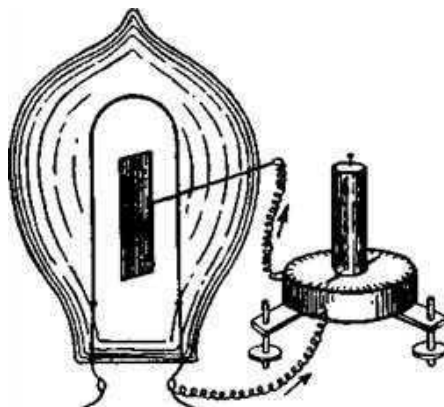


Рис. 50. Прибор Эдисона

В 1921 году, исследуя вольтамперные характеристики кристаллических цинкитных (ZnO) детекторов, выдающийся советский физик и изобретатель Олег Владимирович Лосев (1903–1942) наблюдал участки отрицательного сопротивления и сообщил об открытии генерации и усиления электромагнитных колебаний на контакте металла с кристаллом окиси цинка при пропускании через него электрического тока. Лосев был первым ученым, кто наблюдал, что детектор из цинкита дает устойчивые колебания при приложении к нему напряжения менее 10 В. Электрические характеристики контакта оказались столь стабильными, что изменяя напряжение на контакте и устанавливая его в области значений, меньше, чем напряжение начала генерации, Лосеву удалось получить значительное усиление электрических колебаний, не сопровождающееся значительными шумами⁸. Лосев установил, что усиление или генерацию можно при помощи двухполюсника (детектора или лампы) получить только в том случае, если он при определенных условиях обладает «падающей» вольтамперной характеристикой – отрицательным сопротивлением, т.е. падение напряжения на этом участке приводит к возрастанию тока) – рис. 52 [43].

⁸ Статья О.В. Лосева называлась «Детектор-генератор, детектор-усилитель», опубликована в феврале 1922 г. Источник: Лосев О. В. У истоков полупроводниковой техники. Избранные труды / отв. ред. Г. А. Остроумов – Л.: Наука, Ленингр. отд., 1971. С. 5–10.

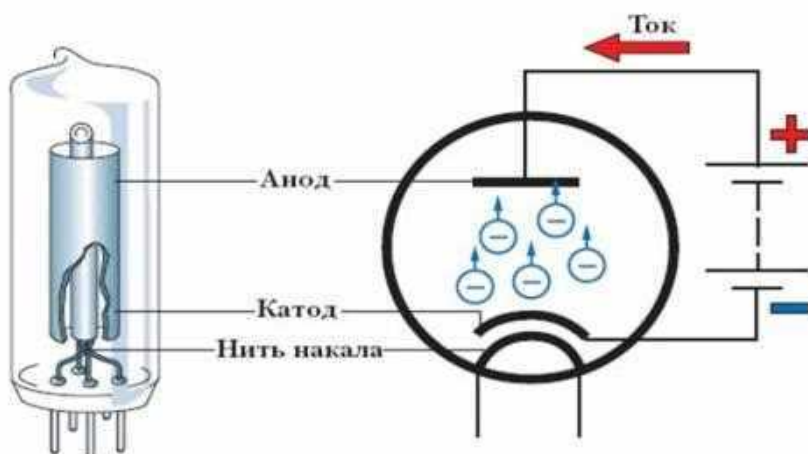


Рис. 51. Электронная лампа

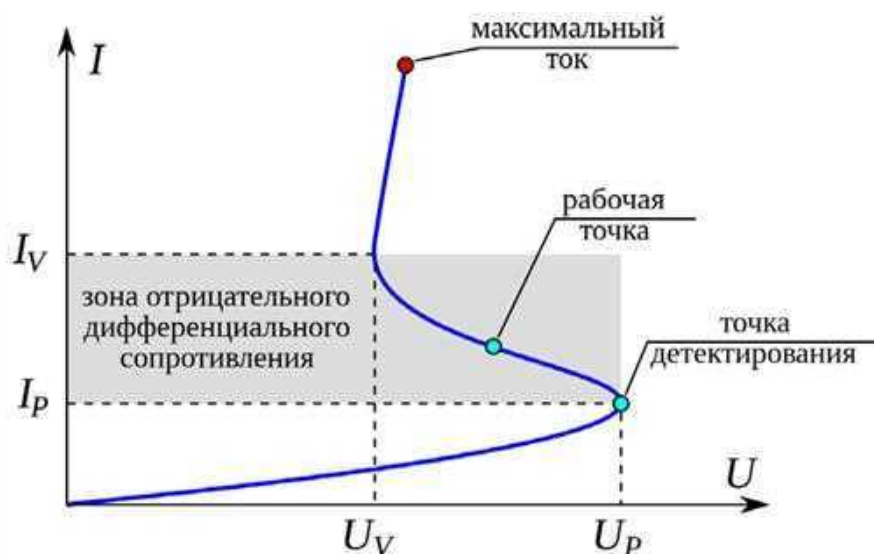


Рис. 52. Вольт- амперная характеристика кристаллического детектора в кристаллине Лосева

2.19. Открытие индукционных токов

В 1821 году Майкл Фарадей (1791–1867) обратил свое внимание к новой области, связанной с открытием Г.Х. Эрстеда. Он начал с того, что тщательно повторил все опыты, известные к этому времени в области электромагнетизма, в результате чего им был написан «Исторический очерк об электромагнетизме». А ровно через 10 лет непрерывных собственных исследований Лондонскому Королевскому обществу были представлены три тома Майкла Фарадея «Экспериментальные исследования в области электричества» («Experimental Researches in Electricity») [44]. В этих исследованиях Фарадея, по его собственному признанию, вдохновляла надежда найти аналогию между поведением электричества, наблюдаемого при движении в токах, и поведением электричества в остальных проводниках. Было уже известно, что статическое электричество обладает силой «индукции», или способностью создавать

электрический заряд противоположного знака в близко расположенных телах. Может быть, электрические токи имеют похожее свойство? Поиск аналогии привел Фарадея к идее: если заставить ток течь в любом контуре, то в любом соседнем контуре будет течь индуцированный ток, который будут существовать ровно столько времени, сколько длится индуцирующий ток. Фарадей обнаружил, что это не так, индукционный ток возникал, но существовал только мгновение, в тот момент, когда первичная обмотка замыкалась или размыкалась. Фарадей поставил цель определить законы индукции токов. Для этого он сформулировал понятие магнитные силовые линии, то есть такие кривые, направление которых в каждой точке совпадает с направлением вектора напряженности магнитного поля в этой точке. Подобные кривые можно увидеть с помощью железных опилок и магнита. Фарадей считал, что все пространство заполнено такими магнитными силовыми линиями, каждая силовая линия – это замкнутая кривая, которая в какой-то своей части проходит через магнит, который ее порождает. Все размышления Фарадея основывались на силовых линиях. *«Я не могу удержаться от повторного выражения своей убежденности в истинности такого представления магнитного действия, которое дает идея силовых линий. Все, что установили в отношении этого действия опытным путем, то есть все то, что не является гипотетическим, кажется хорошо и ясно представленным этой идеей»* – писал Фарадей [44. Параграф 3174].

Фарадей обнаружил, что ток в контуре индуцируется при изменении силы соседнего тока, при приближении к контуру магнита или при перенесении самого контура в присутствии другого тока или магнита. Во всех случаях индукция зависит от относительного движения контура и магнитных силовых линий, точную природу этой зависимости предстояло еще выяснить. В 1832 году Фарадей обнаружил, что токи, созданные индукцией при одних и тех же условиях в разных проводниках, пропорциональны проводящей способности этих проводников. Этот результат показал, что индукция заключается в создании определенной электродвижущей силы, которая не зависит от природы провода, а зависит только от пересечений провода с магнитными силовыми линиями. Электродвижущая сила создается независимо от того, образуют ли провода замкнутый контур. Фарадей писал: *«Независимо от того, движется провод через силовые линии прямо или косо, в одном направлении или другом, электродвижущая сила равна сумме величин сил, представленных линиями, которые пересекает провод»*. Наведенная электродвижущая сила пропорциональна количеству единичных магнитных силовых линий, пересеченных проводом за секунду. В этом заключается открытый Фарадеем фундаментальный принцип индукции токов.

Через три года после того, как Фарадей начал исследовать индукционные токи, он показал, что сильный кратковременный ток, который наблюдается при размыкании контура, является индукционным током, который подчиняется тем же законам, что и все индукционные токи, но с той особенностью, что в этом

случае индуцирующий и индукционный токи протекают в одном и том же контуре. Ток в установившемся состоянии создает вокруг себя магнитное поле, силовые линии которого связаны с контуром, а исчезновение этих силовых линий при размыкании создает индукционный ток, который значительно усиливает первичный ток перед его остановкой. Это явление назвали самоиндукцией.

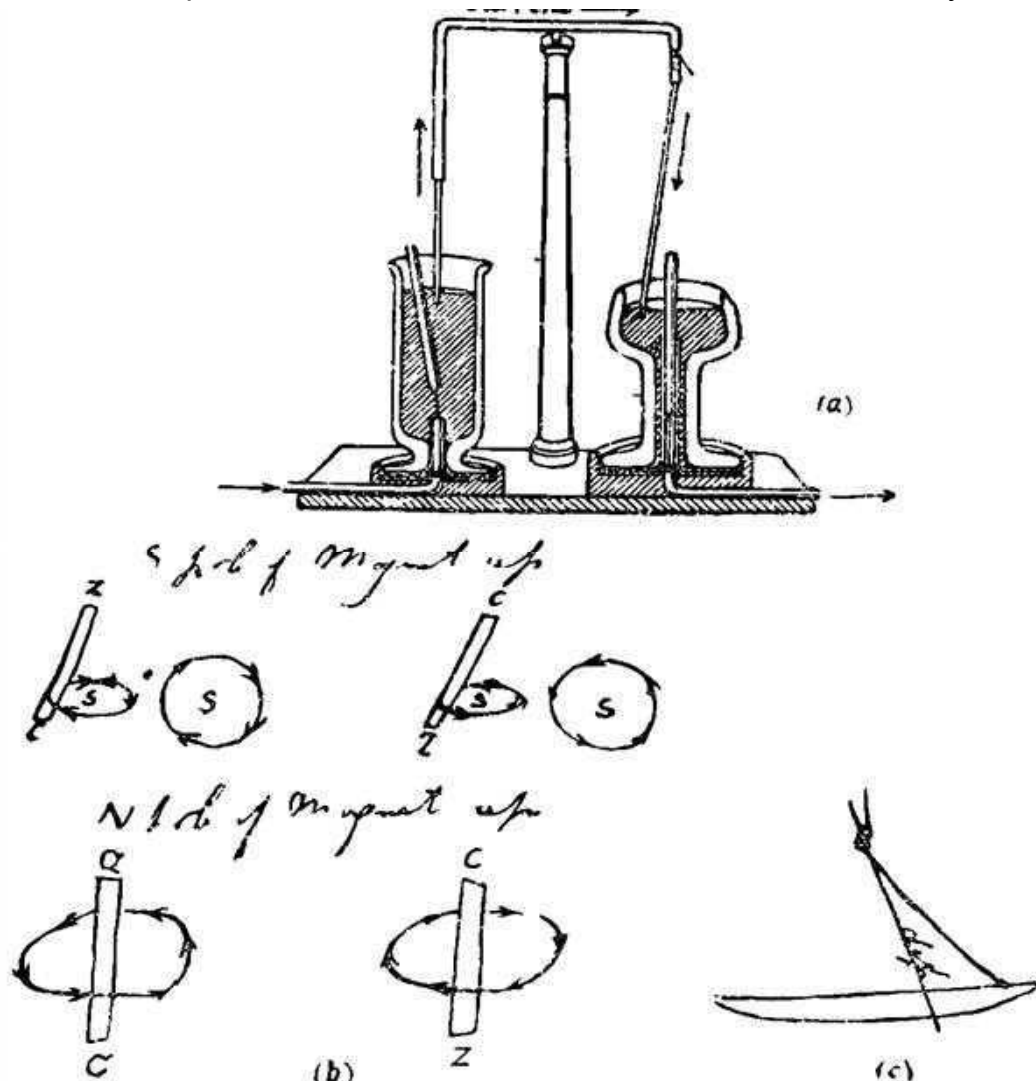


Рис. 53. Схема прибора для демонстрации вращения магнитного полюса вокруг тока и тока вокруг полюса. Эскизы в дневнике Фарадея, показывающие направления вращений.

2.20. Изобретение электрических трансформаторов

Первая лабораторная модель электрического трансформатора была создана М. Фарадеем в 1831 году. Он предназначался для исследования индуцированного напряжения во вторичной обмотке при замыкании (размыкании) электрической цепи первичной обмотки, подключенной к гальванической батарее постоянного напряжения. В этой модели был применен железный сердечник в виде кольца (тора), на который с диаметрально противоположных сторон были намотаны две изолированные друг от друга и от

сердечника обмотки (рис.54). Первичная обмотка была соединена через механический коммутатор с источником постоянного тока, а вторичная – с гальванометром для фиксации токового «броска». Исторически такая модель была названа «кольцом Фарадея».

Приведем отрывок из работы Фарадея, который позволяет понять стиль экспериментатора, простом по форме, но проникающем в суть изучаемых явлений. *"Из круглого брускового мягкого железа было сварено кольцо; толщина металла была равна семи-восемью дюймам, а наружный диаметр кольца - шести дюймам. На одну часть этого кольца было намотано три спирали, каждая из которых содержала около двадцати четырех футов медной проволоки толщиной в одну двадцатую дюйма. Спирали были изолированы от железа и друг от друга и наложены одна на другую. Ими можно было пользоваться по отдельности и в соединении; эта группа обозначена буквой А. На другую часть кольца было намотано таким же способом около шестидесяти футов такой же медной проволоки в двух кусках, образовавших спираль В, которая имела одинаковое направление со спиралями А, но была отделена от них на каждом конце на протяжении примерно полдюйма голым железом.*

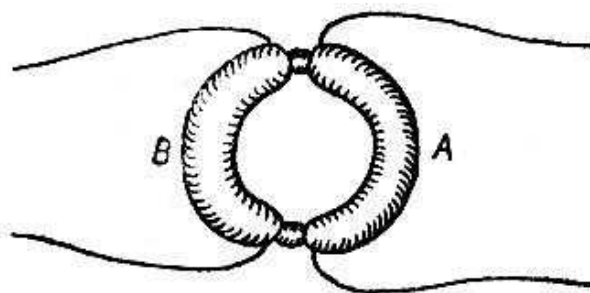


Рис. 54. Опыт Фарадея [20]

Спираль В соединялась медными проводами с гальванометром, помещенным на расстоянии трех футов от кольца. Отдельные спирали А соединялись конец с концом так, что образовали общую спираль, концы которой были соединены с батареей из десяти пар пластин в четыре квадратных дюйма. Гальванометр реагировал немедленно, притом значительно сильнее, чем это наблюдалось выше, при пользовании в десять раз более мощной спиралью без железа" [20, 44].

В 1848 году немецкий изобретатель, механик Генрих Румкорф (1803–1877) создал свои первые индукционные аппараты для высоких напряжений, назначением которых было получение искры. В 1851 году Г. Румкорф создал индукционную катушку, которая позволяла генерировать токи высокой частоты. С помощью данной катушки и ее выходного электрического напряжения амплитудой в десятки киловольт Румкорф получал в воздухе электрические искры длиной до 0,5 м. Через год Румкорф сконструировал катушку с двумя обмотками (рис. 55).

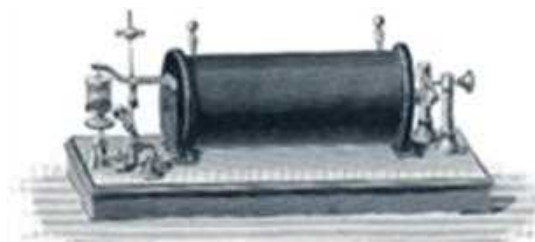


Рис. 55. Катушка Румкорфа

В цепь первичной обмотки он поставил прерыватель вибрационного типа (так называемый «молоточек Вагнера») и подключил к гальванической батарее. Во вторичной обмотке в связи с очень большим числом витков появилось высокое напряжение, что позволило получать искры длиной до 2 см. В 1859 году Г. Румкорф создал катушку, позволяющую получать искры длиной до 50 см. Катушка Румкорфа использовалась в экспериментальной работе всех исследователей после 1859 года, она была также частью экспериментальной установки Г. Герца по обнаружению электромагнитных волн.

В разработке и усовершенствовании электрических трансформаторов выдающихся успехов добился сербско-американский инженер и ученый-физик Никола Тесла (1856–1943), который изобрел высокочастотный резонансный трансформатор. Никола Тесла в 1891 году закончил конструирование прибора, сыгравшего исключительную роль в дальнейшем развитии самых различных отраслей электротехники и особенно радиотехники. Для создания токов высокой частоты и высокого напряжения он решил воспользоваться известным свойством резонанса, то есть явлением резкого возрастания амплитуды собственных колебаний какой-либо системы (механической или электрической) при наложении на них внешних колебаний с той же частотой. На основании этого известного явления Тесла создал свой резонанс-трансформатор. Действие резонанс-трансформатора основано на настройке в резонанс его первичного и вторичного контуров. Первичный контур, содержащий как конденсатор, так и индукционную катушку, позволяет получить переменные токи весьма высокого напряжения с частотами в несколько миллионов периодов в секунду. Искра между шариками разрядника вызывает быстрые изменения магнитного поля вокруг первичной катушки вибратора. Эти изменения магнитного поля вызывают возникновение соответствующего высокого напряжения в обмотке вторичной катушки, состоящей из большого числа витков тонкой проволоки, причем частота переменного тока в ней, соответственно количеству искровых разрядов, достигает нескольких миллионов в секунду. Наибольшей величины частота достигает в момент, когда периоды первичной и вторичной цепи совпадают, то есть, когда наблюдается явление резонанса в этих цепях.

В своей статье «Об опытах Тесла с переменными токами» профессор Одесского университета Г.Г. Де-Метц охарактеризовал эти опыты как *«явление крупной величины в современной физике и притом не только в чисто научном и кабинетном отношении, но также в практическом, в применении электричества к повседневной жизни»* [45]. Сегодня слова Тесла кажутся

пророческими: «*В будущем газеты будут печататься в домах без проводов в течение одной ночи*» [46]. При финансовой поддержке банкира Дж. Моргана Тесла построил на острове Лонг-Айленд станцию беспроводной передачи, известную как Ворденклиф, в которой он планировал продолжить свои теоретические и практические разработки установок по радиопередаче. Противостояние Эдисона, защищавшего применение постоянного тока для питания больших электросетей, и Тесла, демонстрировавшего использование переменного тока, вошла в историю техники как «война токов»⁹.

Среди главных достижений Теслы можно выделить открытие беспроводной передачи энергии. Исследуя свечение лампочки, подключенной к генератору высокочастотного тока, Тесла задействовал трансформатор, известный сегодня как высокочастотный резонансный трансформатор Тесла, и обнаружил, что лампы светятся, даже не подключенные к цепи. Катушки Тесла вырабатывают ток радиочастот очень высокого напряжения (Де-Метц описывал опыты Тесла, в которых он замыкал своим телом полюсы машины при разности потенциалов в 70 кВ) и поэтому в воздухе можно увидеть зрелищные электрические разряды, достигающие нескольких метров. Он понял, что электромагнитные волны передают электрическую энергию по воздуху без проводов, и такой энергии достаточно, чтобы заставить гореть лампу. Ключевую роль здесь играл электрический резонанс. По его мнению, беспроводная передача электроэнергии позволяла в будущем избежать дефицит энергетических ресурсов, он говорил о необходимости исследовать новые источники энергии, известные сегодня как возобновляемые. Исследования Теслы токов высокой частоты и напряжений заложили основы новой области электротехники – техники высокой частоты. Резонансный трансформатор Теслы, генерирующий колебательные импульсы напряжения частотой 1150 кГц и амплитудой до 7 Мега Вольт, в наши дни нашел применение в высоковольтной импульсной технике, радиотехнике, генерировании высокочастотного электромагнитного излучения и ускорении заряженных элементарных частиц, предназначенных для проведения ядерных исследований в вакуумных камерах и камерах Вильсона [47].

2.21. Опыт Милликена и заряд электрона

Все известные элементарные частицы либо не имеют электрического заряда (такие частицы называются нейтральными), либо имеют заряд, кратный по модулю заряду электрона. Заряд электрона измерил в 1909 году и позднее

⁹ История противостояния и электротехнического применения постоянного и переменного токов, которая показывает наличие у обоих видов тока в настоящее время своего технического предназначения, отражена в статье: Баранов М.И., Шерстюкова Т.Д. Электротехническая «война» постоянного и переменного токов: краткая история и области их современного применения// Электротехника и электромеханика, 2010, №4. С.3-9.

в 1913 году усовершенствовал свою установку американский физик Роберт Милликен (1868–1953). Он впрыскивал капельки масла между разноименно заряженными металлическими пластинами и наблюдал за движением капель (рис. 56). При облучении капли рентгеновскими лучами они выбивали из нее один или несколько электронов, в результате чего она приобретала электрический заряд. Если после этого капля останавливалась, это означало, что действующая на нее электрическая сила уравнивает силу тяжести. Так как силу тяжести можно узнать, измерив плотность масла и радиус капельки, то можно определить и электрическую силу, а вместе с ней и заряд капельки.

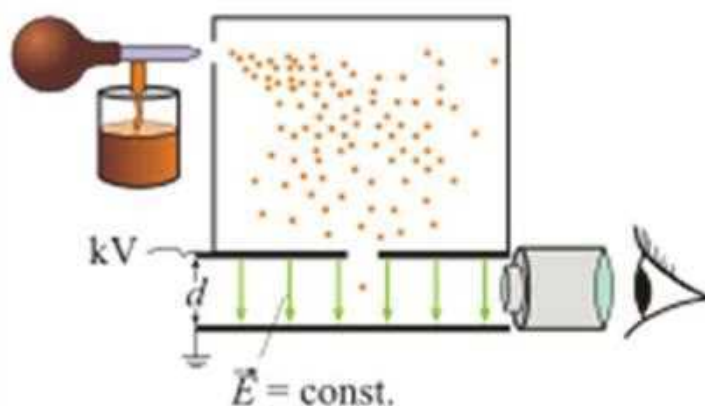


Рис. 56. Схематичное изображение устройства, использованного в опыте Милликена

На рисунке 57 представлена фотография экспериментальной установки Р. Милликена. Большой контейнер с моторным маслом обеспечивает постоянную температуру во внутренних камерах. Вверху слева находится распылитель, внизу слева — телескоп для наблюдения. Также для наблюдения можно использовать три окна. Справа сверху находится электрический провод, идущий от источника тока.



Рис. 57. Фотография внешнего вида установки Милликена (Википедия)

Проследим путь, проделанный Милликеном по определению заряда электрона. Падение капель масла в воздухе определяется законом Стокса, то есть скорость падения v_c , обусловлена вязкостью среды η (в данном случае воздуха). Эту скорость можно определить, разделив пройденную дистанцию d на время падения t (с). На тело действуют две силы: гравитационная (тяжести) и лобового сопротивления. В тот момент, когда обе силы уравниваются, ускорение тела становится равным нулю, а его скорость – постоянной. Джордж Габриель Стокс (1819–1903) определил силу трения d сферических тел, падающих в вязкой среде со скоростью движения v_c , которая представляет собой силу, противодействующую движению, и которая возрастает по мере увеличения скорости, размеров тела и вязкости среды. Выражение для силы Стокса

$$F_d = 6\pi a\eta v$$

где a – радиус падающей сферы, η – вязкость среды.

Милликен внёс поправку в это уравнение, потому что его капли были очень маленькими, и соответствующее трение меньше, чем определенное законом Стокса, поскольку в течение некоторого времени капли из-за своих малых размеров падают в вакууме. Уравнение Стокса верно для сфер размером более 0,1 см.

Если электрическое поле с напряженностью E включено, то сила, заставляющая двигаться каплю вверх с постоянной скоростью v – это сила Кулона, равная сумме сил, которые препятствуют её подъёму, то есть силе тяжести mg и силе трения Стокса, которая пропорциональна скорости bv

$$qE = mg + bv.$$

Когда воздух ионизируется, капли поглощают электроны. В отсутствие электрического поля они продолжают падать с той же скоростью, поскольку массы электронов очень малы. Включая электрическое поле между пластинами, падение капли можно остановить, в этом случае уравнив силу тяжести и электростатическую силу, или, если напряженность электрического поля ещё больше увеличится, то можно заставить капли двигаться вверх. Движение вверх, опять же по закону Стокса, представляет собой движение с постоянной скоростью. Одну и ту же каплю можно поднимать и опускать до тех пор, пока она не коснётся одной из пластин, поэтому для одной и той же капли можно провести серию измерений. Милликен наблюдал эти капли в виде отчетливых ярких точек (рис.58). *"История этих капель протекает обыкновенно так, – пишет он. – В случае небольшого преобладания силы тяжести над силой поля они начинают медленно падать, но так как они постепенно испаряются, то их нисходящее движение вскоре прекращается, и они на довольно долгое время становятся неподвижными. Затем поле начинает преобладать, и капли начинают медленно подниматься. Под конец их жизни в пространстве между*

пластинами это восходящее движение становится весьма сильно ускоренным, и они притягиваются с большой скоростью к верхней пластине".

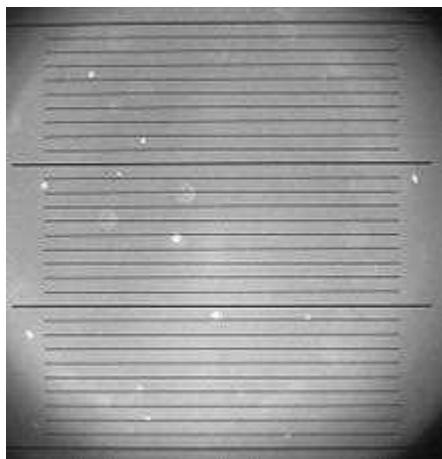


Рис. 58. Капли масла, наблюдающиеся в телескопе

Одним из основных моментов исследования Милликена является то, что капли были заряжены неопределенным количеством электронов, которое он не мог знать заранее. С помощью своих измерений он получал значения различных электрических зарядов q . Милликен правильно предположил, что существует элементарный заряд и его необходимо точнее измерить; e – электрический заряд электрона, и он должен был быть наибольшим общим делителем всех рассчитанных зарядов, то есть $q = n e$, где $n = 1, 2, 3, \dots$

Распыляя капли масла (диэлектрика), глицерина (полупроводника), ртути (проводника), Милликен доказал, что заряды на телах любой физической природы состоят во всех без исключения случаях из отдельных элементарных порций строго постоянной величины. В 1913 году Милликен суммировал результаты многочисленных экспериментов и дал для элементарного заряда следующее значение: $e = 4,774 \cdot 10^{-10}$ ед. заряда СГСЕ. Результаты Милликена были подтверждены опытами ученика К. Рентгена, российского физика Абрама Федоровича Иоффе, проведенными в Санкт-Петербургском политехническом институте в 1913 г. [48]. Иоффе использовал аналогичную камеру, но вместо масляных капель впрыскивал мельчайшие частицы цинка, а рентгеновский аппарат заменил ультрафиолетовым источником, выбивающим из цинка электроны за счет фотоэффекта. Опытами Милликена была установлена одна из важнейших констант современной физики – заряд электрона.

2.22. Визуализация электронов

Большую роль в укреплении мысли о реальности электрона сыграло открытие шотландского физика Ч.Т.Р. Вильсона (1869–1959) эффекта конденсации водяных паров на ионах, приведшее к возможности фотографирования трэков частиц. Установка, созданная Вильсоном в 1912 году для наблюдения этого эффекта, получила название камера Вильсона. В

развитии современной физики камера Вильсона, по словам Резерфорда, является «самым замечательным и оригинальным прибором в истории науки», сыграла важную роль [49]. В течение десятков лет она оставалась единственным эффективным способом наблюдения треков элементарных частиц, с ее помощью были открыты позитрон и мюон, исследованы некоторые ядерные реакции.

История создания этого прибора связана с существовавшими ранее экспериментами по наблюдению конденсации водяных паров в капельке тумана и непонятной роли частиц пыли в этом явлении. Пытаясь воспроизвести в лабораторных условиях образование тумана, различными учеными было обнаружено, что туман, появляющийся при небольшом адиабатическом расширении влажного, содержащего пыль воздуха, не образуется, если воздух очистить от пыли. При этом капельки тумана, появляющегося в пыльном воздухе, всегда образуются около пылинок. В момент возникновения капельки имеют конечный радиус, сравнимый с размерами пылинки. В 1897 году Ч.Т.Р. Вильсон прямыми опытами показал, что при определенных условиях заряженные ионы также могут принимать участие в образовании тумана. Он установил, что в камере, наполненной пыльным, влажным воздухом, уже при не очень большом расширении образуется плотный туман. Этот туман образуется из-за конденсации паров на частицах пыли. После того как воздух в камере очищен от пыли, Вильсоном было обнаружено критическое значение расширения равное 1,37 (то есть отношения конечного объема газа в камере к его начальному объему), при котором образуется сплошной туман, плотность которого растет с увеличением этого значения. Оставался вопрос, на который надо было найти ответ. Какова природа тех центров, около которых происходит конденсация в отсутствии частиц пыли? В 1898 году Дж. Дж. Томсон показал, что центрами конденсации, имеющей место в присутствии рентгеновских лучей, являются ионы. Этот эксперимент проводил Вильсон, позже он также обнаружил, отдельные капельки, которые образуются при расширении в газах, не подвергающихся радиации, в присутствии сильного электрического поля.

В основе действия камеры Вильсона лежит следующий принцип. Определенный объем неконденсирующегося газа, насыщенного парами, подвергается резкому расширению, приводящему к тому, что газ, находящийся теперь при более низкой температуре, содержит паров больше, чем в состоянии насыщения, то есть к пересыщению. Избыточное количество паров конденсируется на ионах как центрах, делая видимым путь заряженной частицы. Схема камеры Вильсона изображена на рис. 59. Обычно, камера Вильсона состоит из цилиндра, содержащего насыщенный паром воздух, и поршня, который может двигаться в этом цилиндре. При опускании поршня воздух резко охлаждается, и камера становится пригодной для работы. В другом, более современном варианте вместо поршня использовалась резиновая диафрагма. В этом случае камера имеет перфорированное дно, под которым расположена диафрагма, в которую закачан воздух под давлением. Тогда для начала работы

нужно только выпустить воздух из диафрагмы в атмосферу или специальную ёмкость. Время активной работы камеры длится от сотых долей секунды до нескольких секунд, проходящих от расширения воздуха и до тех пор, пока камера не заполнится туманом, после чего камера очищается и может запускаться повторно. Полный цикл использования обычно составляет около минуты. Источник излучения может помещаться внутрь камеры, или находиться извне её. В этом случае частицы попадают в камеру через прозрачный экран.

Фотографии трэков электронов не только свидетельствовали о реальности электронов (рис. 60). Они подтверждали предположение о малости размеров электронов и позволяли сравнить с опытом результаты теоретических расчетов, в которых фигурировал радиус электрона.

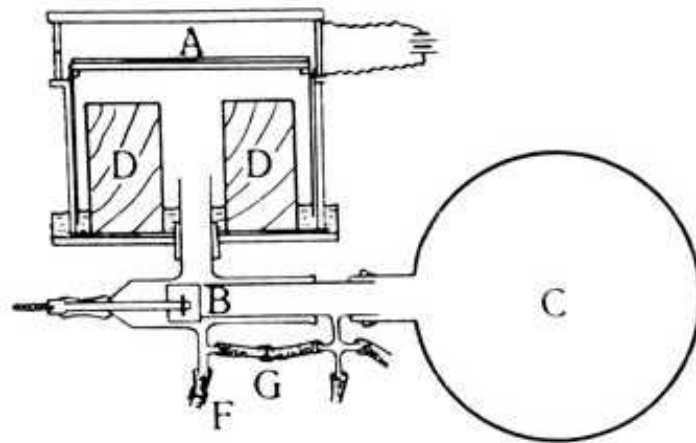


Рис. 59. Схема камеры Вильсона

Опыты, начало которым было положено немецким физиком-экспериментатором Филиппом фон Ленардом (1862–1947) при исследовании проникающей способности катодных лучей, показали, что очень быстрые электроны, выбрасываемые радиоактивными веществами, дают трэки в газе в виде прямых линий. Длина трэка пропорциональна энергии электрона. Фотографии трэков α -частиц большой энергии показывают, что трэки состоят из большого числа точек. Каждая точка – водяная капелька, возникающая на ионе, который образуется в результате столкновения электрона с атомом. Зная размеры атома и их концентрацию, мы можем вычислить число атомов, сквозь которые должна пройти α -частица на данном расстоянии. Простой расчет показывает, что α -частица должна пройти примерно 300 атомов, прежде чем она встретит на пути один из электронов, составляющих оболочку атома, и произведет ионизацию. Этот факт убедительно свидетельствует о том, что объем электронов составляет ничтожно малую долю объема атома. Трэк электрона, имеющего малую энергию, искривлен, следовательно, медленный электрон отклоняется внутриатомным полем. Он производит на своем пути больше актов ионизации.

Важным усовершенствованием, удостоенным Нобелевской премии в 1947 году, явилось создание управляемой камеры Вильсона. Автор этого изобретения

английский физик Патрик Блэкетт (1897–1974), который занимался научными исследованиями с использованием камеры Вильсона, экспериментально подтвердил открытие позитрона, экспериментально наблюдал рождение пары частица-античастица, и доказал наличие обратного процесса – аннигиляцию. Суть усовершенствований Блэкетта заключается в том, что специальные счетчики отбирают события, которые должны быть зарегистрированы камерой Вильсона и запускают камеру лишь для наблюдения таких событий [50].

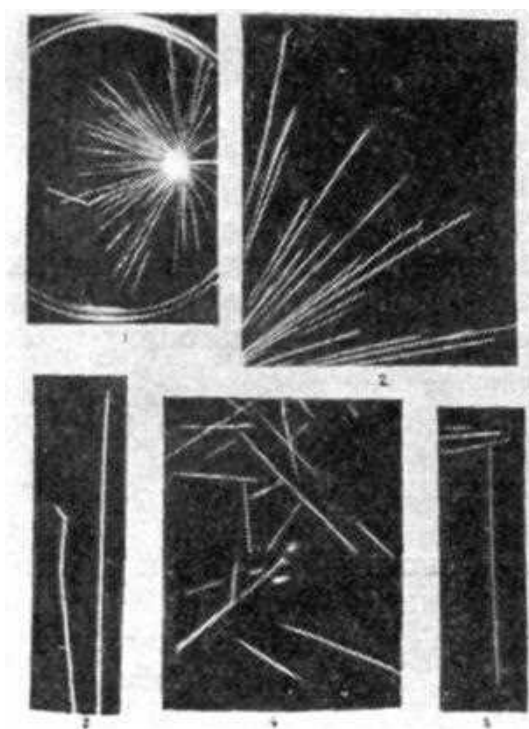


Рис. 60. Первые фотографии Вильсона [48]

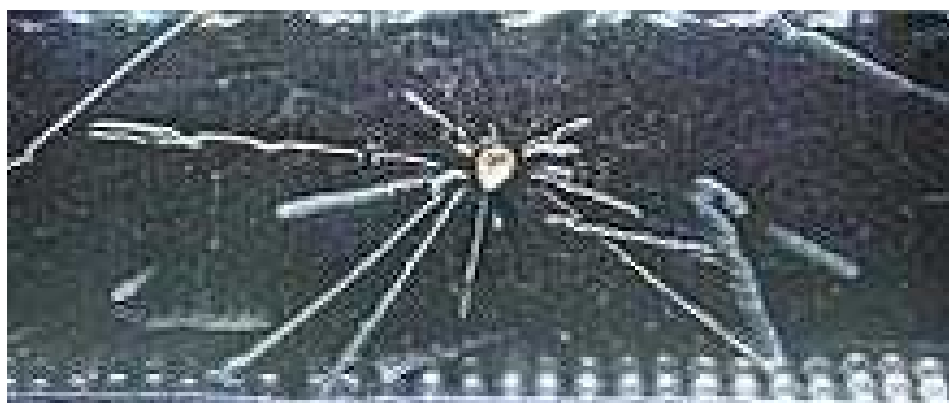


Рис. 61. Кусочек радиоактивного торита в камере Вильсона и треки излучаемых им частиц (Википедия)

Камера Вильсона сыграла важную роль в изучении строения вещества. На протяжении десятилетий этот детектор был практически единственным визуальным методом регистрации ядерных излучений (альфа – бета – частиц). Позже для этих целей появились пузырьковые и искровые камеры.

2.23. Экспериментальное изучение электрического разряда

Для того, чтобы созданная Джеймсом Клерком Максвеллом в 1873 году строгая математическая теория электромагнитного поля получила экспериментальные подтверждения прошли десятилетия исследований от первых наблюдений электрической искры до беспроводной передачи энергии с помощью электромагнитных волн. В истории беспроводной передачи энергии посредством электромагнитных волн существует многочисленная когорта ученых и инженеров, которые занимались экспериментальными исследованиями переменных токов высокой частоты, развивали это научное направление. Эти исследования в итоге привели к смене технологической парадигмы мировой индустрии, основанной на использовании электрической энергии.

Вероятно, первые опыты, в которых была обнаружена электрическая искра или свечение, были выполнены немецким физиком и инженером, философом Отто фон Герике с помощью примитивного электростатического генератора. Это устройство представляло собой большой шар, изготовленный из серы, его раскручивали и при трении о поверхность, например, руки шар наэлектризовывался. Можно было наблюдать в темноте легкое свечение наэлектризованного шара и слышать слабые разряды искр. Этот, один из первых электростатических (трибоэлектрических) генераторов, был изобретен Герике в 1663 году. 1 марта 1672 года немецкий физик, математик и философ Готфрид Вильгельм Лейбниц в письме к Отто фон Герике сообщил о наблюдении им искусственной электрической искры, полученной от электрической машины [51].

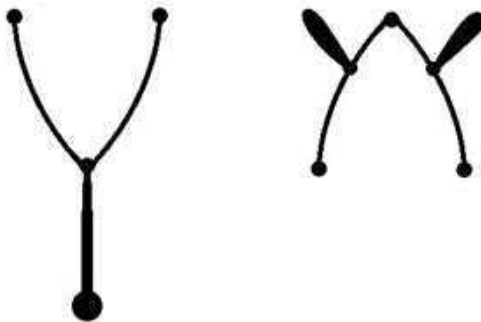


Рис. 62. Разрядник

Первые опыты по изучению электрических колебаний принадлежат французскому ученому Ф. Савари (1797–1841). В 1826 году Феликс Савари, поместив несколько стальных игл на разных расстояниях от проволоки, через которую проходил разряд «лейденской батареи», обнаружил, что иглы намагничиваются в различных направлениях. Таким образом, изучая разряд лейденской банки, он сделал вывод: *«электрическое движение во время разряда состоит из последовательности колебаний»* [22. С.271].

Подобное замечание сделал в 1842 году американский физик Джозеф Генри, также изучая разряд лейденской банки. Он писал: *«Явления требуют, чтобы мы приняли существование главного разряда в одном направлении, за которым следуют несколько ответных колебательных движений, причем каждое следующее движение слабее предыдущего, и так до восстановления равновесия»* [52. С.193]. Генри экспериментально доказал колебательный характер искрового разряда конденсатора. В 1850 году Генри наблюдал индуктивные взаимодействия двух катушек на расстоянии около 80 м. В истории науки отмечен вклад Генри развитие электромагнетизма, который связан с разработкой технологии изготовления электромагнита с многослойной обмоткой. Еще осенью 1834 года Генри впервые ввел в обиход экспериментаторов с электрическим током плоские катушки индуктивности, изготовленные из покрытой шелком полосовой меди шириной 12 и 37 мм и длиной, соответственно, 30 и 20 м, диаметр катушек достигал 1,5 м. Дж. Генри дал первое и отчетливое описание открытых им затухающих электрических колебаниях, предложил наиболее употребительный в течение ряда лет способ их возбуждения. Об этом явлении говорил и Герман Гельмгольц в своей речи «О сохранении силы», произнесенной 23 июля 1847 года перед берлинскими естествоиспытателями. Он повторил предположение Генри о том, что *«разряд лейденской банки надо рассматривать не как простое движение в одном направлении, а как движение его туда и обратно между обеими обкладками, как колебания, которые все более и более уменьшаются, пока их живая сила не уничтожится суммой сопротивлений»* [52]. Искра между шариками разрядника (рис. 62), кажущаяся однородной, в действительности состоит из нескольких миллионов искр, проходящих в короткий промежуток времени в обе стороны (рис. 63).



Рис. 63. Несколько искровых разрядов, снятых при длительной

Вильям Томсон (будущий лорд Кельвин) в 1853 году теоретически исследовал электрический разряд [53]. В статье «О преходящих электрических токах» Томсон, применяя принцип сохранения энергии, получил дифференциальное уравнение затухающих электрических колебаний в контуре, определил резонансную частоту, и положил начало теории электрических колебаний [54].

В отечественных учебниках, справочниках и пособиях по физике приводится формула периода T или частоты свободных незатухающих

электромагнитных колебаний, возникающих в идеальном электромагнитном контуре, которая называется формулой Томсона

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Теорию Томсона проверил в 1858–1862 годах немецкий физик В. Феддерсен в серии своих работ [55]. Ему удалось непосредственно сфотографировать до 20 колебаний при разряде конденсаторов большой емкости в замкнутых контурах с помощью метода вращающегося зеркала (рис. 64). Если зарядить конденсатор (лейденскую банку) а затем разрядить его через проводник (спираль из металлической проволоки с большим сопротивлением), то в проводнике возникнут переменные токи высокой частоты, частота определяется электроемкостью конденсатора C и индуктивностью проводника L . Изменяя число банок лейденской батареи и величину самоиндукции проводника, Феддерсен наблюдал периоды колебаний от 0,8 мс ($\lambda = 24$ км) до 2 мкс ($\lambda = 0,6$ км).

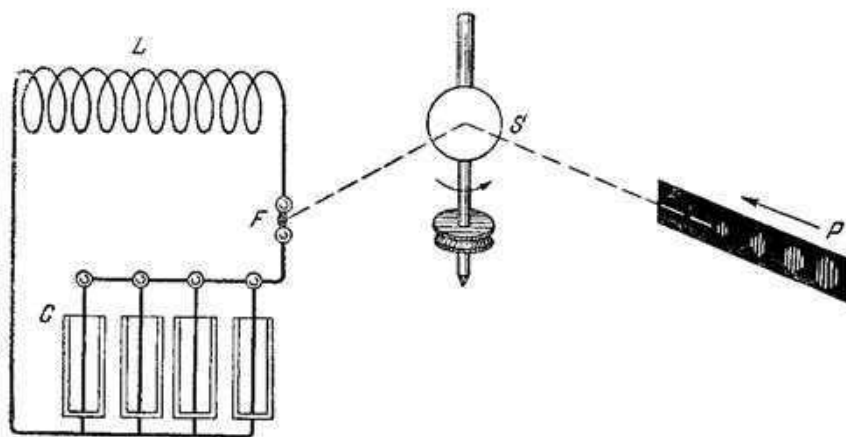


Рис. 64. Схема опыта В. Феддерсена [56. С.215]

Теория Томсона также нашла экспериментальное подтверждение в 1874 году в работе отечественного физика выпускника Московского университета Н.Н. Шиллера «Опытное исследование электрических колебаний» [57]. Эта экспериментальная работа была сделана им в Берлинской физической лаборатории, возглавляемой выдающимся немецким ученым Германом Гельмгольцем [58]. В ней Шиллер изложил результаты измерений диэлектрической проницаемости в переменных полях, диэлектрических свойств концов разомкнутых токов в диэлектрике, индуктивных токов в разомкнутых проводниках, наблюдений электрических колебаний. Впервые Г. Гельмгольц приступил к проблемам электричества и магнетизма в 1847 году, еще в студенческие годы он подготовил, а окончил во время службы военным врачом, работу «О сохранении силы». В ней значительное место занимает проблема объяснения энергетических проблем электричества, роль закона сохранения и превращения энергии. В работе «О сохранении энергии» Гельмгольц применил закон сохранения энергии к явлению разряда конденсатора, он выдвинул

предположение, не зная о том, что до него это сделал Дж. Генри, что такой разряд должен происходить в виде затухающих электрических колебаний. Будучи профессором физиологии, Гельмгольц исследовал скорость распространения возбуждения по нервам живого организма и связывал ее с продолжительностью «электрических токов, индуцированных колебаниями тока». В работе «О продолжительности и ходе электрических токов, индуцированных колебаниями тока» Гельмгольц впервые проявил себя в области физики как тонкий и опытный экспериментатор¹⁰. Герман Гельмгольц внес существенный вклад в развитие механики, термодинамики, оптики, акустики, электродинамики, физиологии. Конфигурация катушки, создающая однородное магнитное поле носит название катушки Гельмгольца, также, к его изобретениям относят миограф, глазное зеркало (офтальмоскоп), приборы для акустических исследований и многое другое. В 1871 году Г. Гельмгольц опубликовал работу «О скорости распространения электромагнитных действий», в которой изучались колебания в связанных контурах. При возбуждении колебаний в первом контуре индикатор во втором контуре фиксировал колебания с периодом $1/46000$ с (что соответствовало частоте 46 кГц), и напряжение индукционного тока в контуре на расстоянии 136 см. В результате многочисленных экспериментов была установлена скорость распространения электромагнитных сил более 314 400 м/с. В 1872-1874 годах в «Известиях Берлинской академии» вышли три статьи Гельмгольца под названием «К теории электродинамики».

В 1885 г. немецкий физик Антон Обербек (1846–1900) открыл явление резонанса колебательных контуров «О подобном резонансу явлении при электрических колебаниях» [52]. Он исследовал процесс резкого возрастания амплитуды колебаний при приближении частоты внешнего колебания к частоте собственных внутренних колебаний системы [59].

2.24. Опыты Тесла

В конце XIX века электротехника была той отраслью, в которой работали изобретатели–инженеры, известные ученые, проводившие исследовательские работы в самых передовых областях физики – электричества, тепловых двигателей и оптики. Возникновение разряда и дуги при прохождении токов высокой частоты в индукционной катушке описывал американский ученый сербского происхождения Никола Тесла (1856–1943). *«Когда ток через первичную обмотку возрастает, разряд становится шире и сильнее, и эффект емкости катушки становится видимым до тех пор, когда, наконец, при определенных условиях не образуется белая яркая дуга, рис. 65 (4b), часто толщиной в палец и бьющая через всю катушку. Она выделяет значительное тепло и еще может характеризоваться отсутствием высокого звука,*

¹⁰ Из характеристики, данной И.М. Сеченовым: Герман Гельмгольц как физиолог// Русская мысль. 1894. С.29

который сопровождает менее мощные разряды» [60]. Тесла описал типичные формы разряда индукционной катушки (рис. 65).

В 1881–1882 годах состоялись выступления Н. Теслы перед научной общественностью Лондона и Парижа, в которых он демонстрировал свои опыты с переменными токами высокой частоты (рис. 66). Он использовал генератор переменного тока (рис. 67), в котором на вращающийся с частотой 50 оборотов в секунду стальной диск диаметром 80 см были смонтированы 584 небольшие катушки. Переменный ток направляется в индукционную катушку, которая не имеет железного сердечника и помещена в емкость с льняным маслом, обеспечивающем хорошую изоляцию. Опыты Теслы описывались в научных и научно-популярных изданиях по всему миру на различных языках: на английском в журнале «La Nature» [61], на русском «Вестник опытной физики и математики» [62], французском [63].

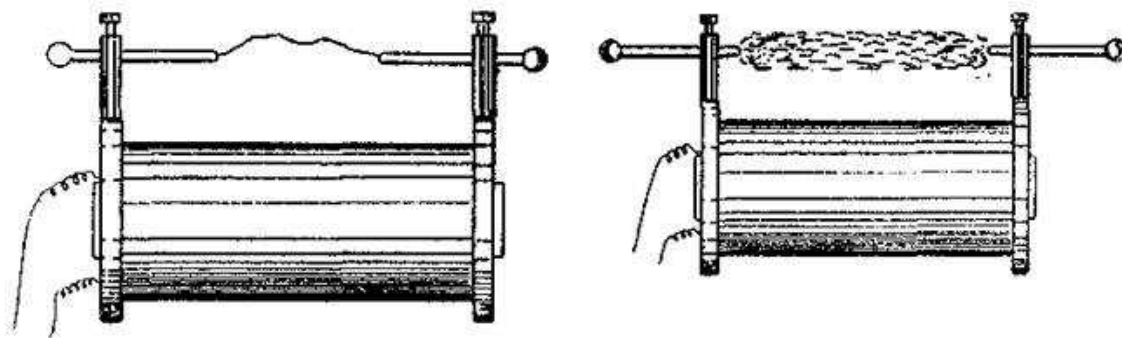


Рис. 4а.



Рис. 4б.

Рис. 65. Рисунки разряда индукционной катушки, выполненные Н. Теслой [60]

«В конце прошлого века, когда вел свои опыты Тесла, не существовало реальных путей к получению значительных мощностей на коротких волнах. Да и в высказываниях Теслы ничего не говорится о необходимости применения направленных потоков волн. Его положения о возможности передавать электроэнергию без проводов с малыми потерями, используя колебания потенциала земного шара, основаны на недоразумениях и ошибках ... Надо ожидать, что проблемы беспроводной передачи электроэнергии будут интенсивно разрабатываться... Инициатива Теслы будет вдохновлять новые поколения исследователей» – писал в 1959 году в своем предисловии книги о Николе Тесле профессор Г.И. Бабат [64].

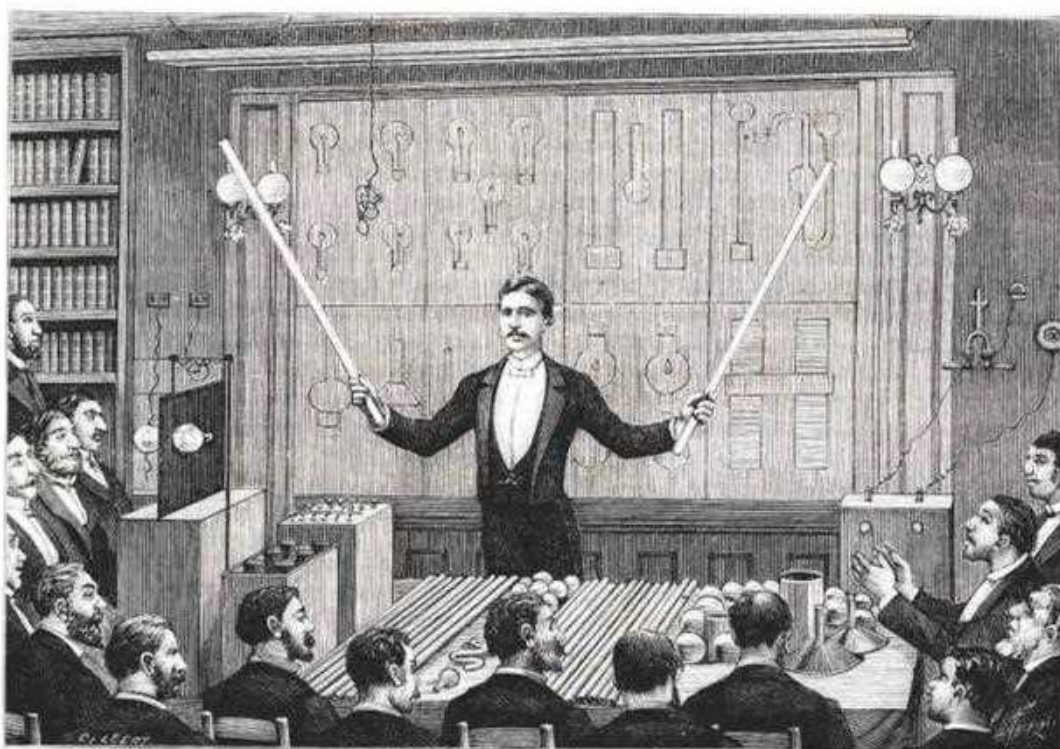


Fig. 1. — Conférence de M. Tesla devant la Société de physique et la Société internationale des électriciens, le 20 février 1892.

Рис. 66. Выступление Н. Теслы с демонстрацией опытов¹¹

В международной системе единиц СИ именем Теслы названа единица измерения магнитной индукции, что является величайшей степенью признания его научных заслуг. Популярность опытов Теслы не угасла в XXI веке, переиздаются и переводятся на многие языки мира его статьи и лекции, патенты. *«Не важно, что мы намерены предпринять, не важно, на что мы обратим наши усилия, мы зависим от энергии ... Электрическая энергия – это оплот нашего существования, первичный источник для производства других видов энергии» – эти слова Теслы и сегодня являются ключевыми в поисках новых технологий для получения надежных источников энергии [65. С.281].*

¹¹ Expériences de M. Tesla sur les courants alternatifs de grande fréquence – Gloubik Sciences

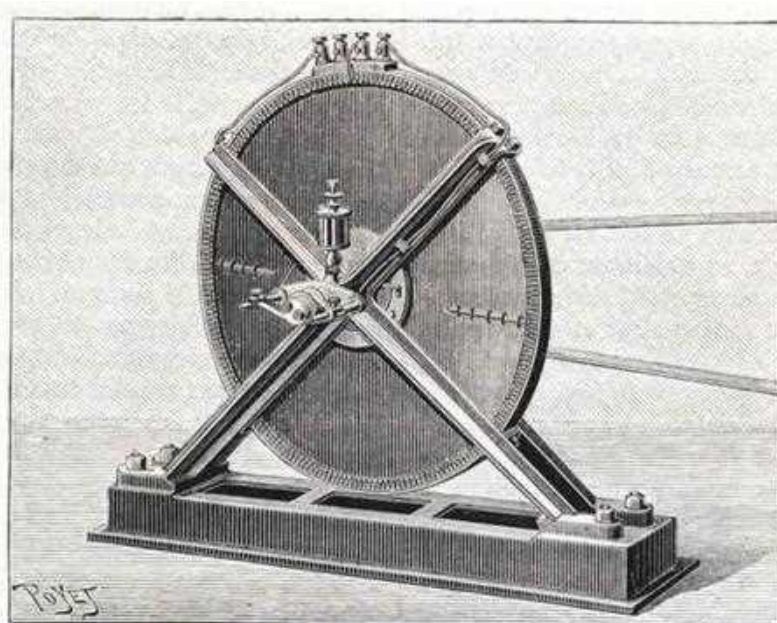


Fig. 2. — Alternateur à grande fréquence de M. Tesla.

Рис. 67. Генератор Теслы [63]

В 1883 году в работе ирландского физика Дж. Фицджеральда был приведен расчет энергии излучения «очень маленького кругового тока» — магнитного осциллятора. Предполагая, что ток меняется по гармоническому закону

$$I = a \cos \frac{2\pi t}{T}$$

Фицджеральд из уравнений Максвелла получил выражение для энергии электромагнитного поля, локализованного в сфере. Часть энергии, не зависящую от радиуса сферы, он считал излученной. Вывод, к которому пришел Фицджеральд: *«эта энергия действительно очень мала, пока период T не становится исключительно малым»*. Эта работа оставалась незамеченной для экспериментального обнаружения электромагнитной волны, для которой, как стало известно после опытов Г. Герца, необходимо повышение частоты колебаний тока. Теория подсказывала основное условие для генерирования электромагнитной волны — повышение частоты колебаний тока.

2.25. Эксперименты с «лучами электрической силы»

Генрих Рудольф Герц (1857–1894) стал ассистентом Г. Гельмгольца в Берлинском университете в 1878 году и приступил к серии блестящих исследований, тематику которых подсказал Гельмгольц. Он, поддержав концепцию Фарадея-Максвелла, поставил задачу экспериментального доказательства существования электромагнитных волн. Эти эксперименты должны были окончательно решить вопрос о существовании электродинамических явлений.



Фото. Генрих Рудольф Герц

В 1886 г. Г. Герц нашел возможность получения регулярных колебаний высокой частоты, способы увеличения частоты колебаний при сохранении их интенсивности. Об этом он сообщил в работе «О весьма быстрых электрических колебаниях». Герц писал: *«В коротких металлических проводниках могут быть возбуждены колебания, свойственные этим проводникам»*, тем самым был совершен переход к открытому колебательному контуру. Для возбуждения электрических колебаний не обязательно наличие сосредоточенных емкостей и индуктивностей. Для увеличения интенсивности электромагнитного излучения контура нужно уменьшить период колебаний, Герц повторил вывод Фицджеральда. Из формулы Томсона периода электрических колебаний

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

следовало, что для этого нужно уменьшить L и C .

Герц назвал распространяющиеся электрические колебания «лучами электрической силы», опыты с которыми были представлены 13 декабря 1888 года в докладе «О лучах электрической силы» на заседании Берлинской академии наук. Главная заслуга Герца заключается в том, что он доказал: переменные токи высокой частоты представляют собой форму энергии, распространяющуюся в окружающей среде. *«Герц был первым человеком, сознательно управлявшим электромагнитными волнами и доказавшим идентичность многих их свойств со свойствами света. Громадной заслугой Герца были создание вибраторов – приборов для излучения необходимых в лабораторных условиях длин волн, а также разработка резонатора для обнаружения этих волн»* – писал академик А.И. Берг [66. С.8]. Экспериментальные и теоретические исследования Герца установили, что электрическая энергия может быть передана без проводов тремя способами: электрической индукцией, электромагнитной индукцией и электромагнитной волной.

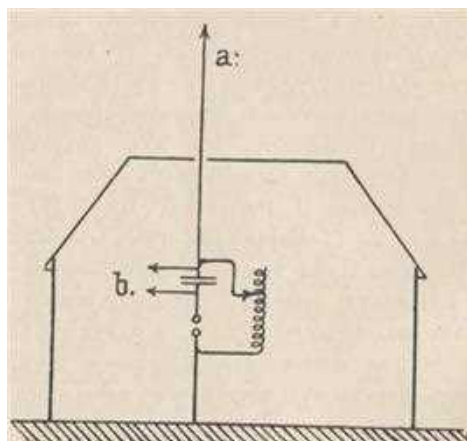


Рис. 68. Рисунок из речи Ф. Брауна «Мои работы по беспроволочной телеграфии и по электрооптике», произнесенной при получении премии Нобеля в Стокгольме 11 декабря 1909 г.

Первым генератором Герца был искровой разрядник с шариками на концах, колебания в котором возбуждались индукционной катушкой. Первым приемником электромагнитных волн служил также искровой разрядник. При резонансе в разрыве контура наблюдалась искра с помощью зрительной трубы. К достижениям Герца, установленным в ходе экспериментов, можно отнести следующее: колебания можно возбудить в линейном проводнике, электрическая искра является генератором электромагнитных колебаний, колебания можно обнаружить на значительном расстоянии от генератора с помощью контура, в котором индикатором колебаний служит электрическая искра. В журнале «Электричество» в 1890 году петербургский профессор О.Д. Хвольсон писал: *«Опыты Герца, классические на веки вечные, обратили на себя внимание не только ученых, занимающихся физикой, но и всего образованного мира. Ими навсегда будет отмечен один из важнейших моментов истории постепенного возникновения правильных взглядов на окружающие нас явления»* [52. С.411]. При укорочении длины волны возможно создание концентрированных пучков электромагнитных волн и осуществление эффективной беспроводной передачи электроэнергии на большие расстояния.

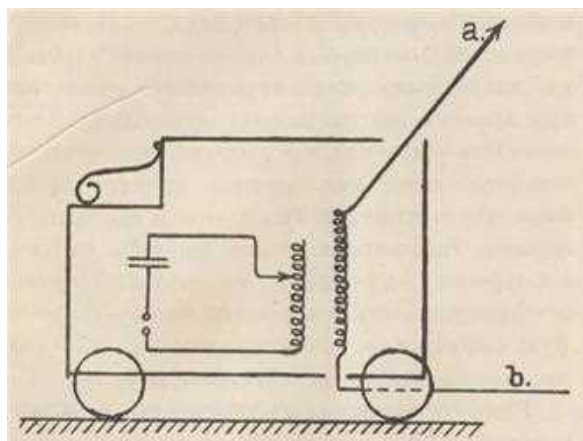


Рис. 69. Передатчик Брауна [67]

Проволочка, по которой протекают токи высокой частоты, излучает электромагнитные волны, подобно тому, как быстро колеблющееся тело излучает звуковые волны. Замкнутый контур не может излучать, поэтому нужен искровой промежуток, который изображен на рис. 68. Практически искру избежать невозможно, об этом писал Ф. Браун: *«Иногда беспроводную телеграфию определяют как искровую телеграфию, и до сих пор не удается обойтись без искры в том или ином случае... искра, порождающая волны, затем их же разрушает»* [67]. Он решил эту задачу и сделал передатчик более эффективным. Браун выделил два направления поисков: получение мощных токов высокой частоты и достижение рационального излучения электромагнитных волн. Заземленная антенна является хорошим излучателем, но генерировать токи высокой частоты она не способна. Сначала нужно получить мощные токи вне антенны и затем поставлять эти токи антенне, которая и будет излучать электромагнитные волны. В качестве генератора Браун ввел замкнутый колебательный контур. Схема такого передатчика изображена на рис.69.

Была продемонстрирована способность этих колебаний индуцировать токи в соседних проводниках в опытах немецкого физика Питера Рисса [68] и Николы Теслы [69]. Искровой микрометр (микрометр Рисса) был устройством, который физики во второй половине XIX века использовали для измерения потенциала в электрической цепи, изображен на рис.70. Этот прибор содержал два электрода, близко расположенных, один был прикреплен к микрометрическому винту с калиброванным циферблатом, и поворотом ручки можно было очень точно регулировать ширину зазора. Расстояние между двумя электродами, когда искра может просто перепрыгнуть через зазор, пропорционально разности потенциалов между электродами.

Экспериментальным наблюдением высокочастотных колебаний занимались в самом конце XIX века многие ученые. Профессор Людвиг Больцман в университете Граца в 1890 г. демонстрировал электрическую искру между шаром, соединенным с чувствительным электроскопом, и острием, соединенным с полюсом гальванической батареи, другой полюс которой был соединен с землей. В классических опытах Герца длина волны была 66 см, а колебания с более короткой длиной волны описал в своих опытах Августо Риги в 1893 году. Он построил прямолинейные резонаторы, соответствующие длинам волн в несколько сантиметров, и осцилляторы, способные возбуждать такие резонаторы. Длины волн были соответственно 20 и 7,5 см, для этих электрических волн он наблюдал интерференцию и дифракцию с помощью металлических пластин, от которых они отражались.

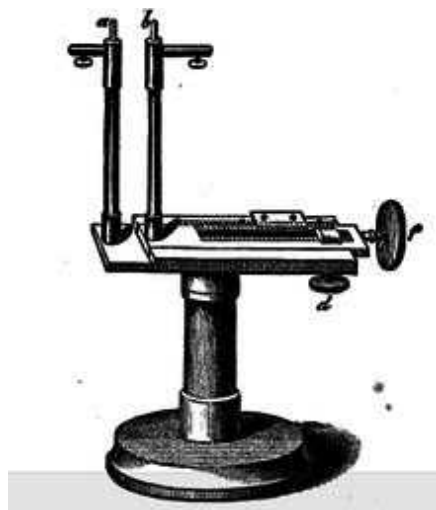


Рис. 70. Прибор Рисса для измерения потенциала

В 1895 году Петр Николаевич Лебедев опубликовал результаты своих экспериментов с «лучами электрической силы», с длиной волны меньше 1 см (порядка 0,6 см). Он наблюдал для маленьких призм не более 1 см двойное лучепреломление [52. С.398]. Схема его опыта изображена на рис. 71.

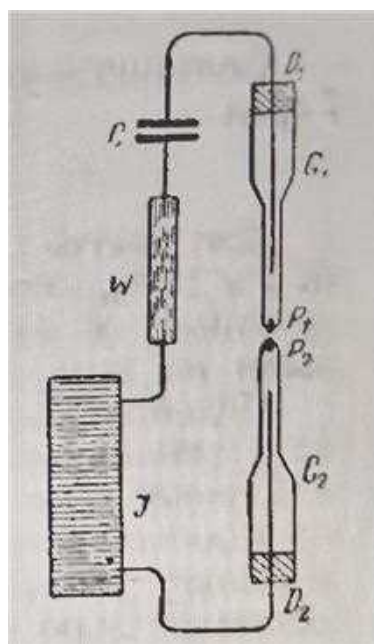


Рис. 71. Схема опытов П.Н. Лебедева [52]

В фокусе цилиндрического зеркала возбуждалось электрическое колебание, а в фокусе вторичного зеркала находились два прямолинейных резонатора, с помощью которых и обнаруживались «электрические лучи». Первичный проводник состоял из двух платиновых цилиндров P_1 и P_2 , которые были впаяны в стеклянные трубки G_1 и G_2 , заряды подводились искрами, которые перескакивали с проволок D_1 и D_2 .

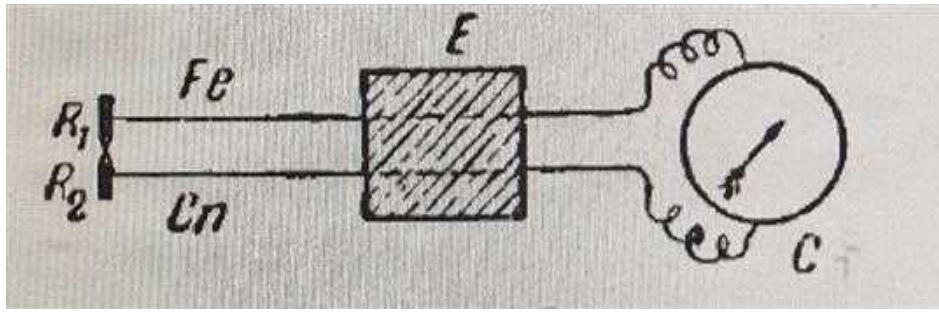


Рис. 72. Разряд резонаторов в опытах П.Н. Лебедева [52]

С помощью второго параболического зеркала лучи концентрировались на два прямолинейных резонатора длиной 3 см R_1 и R_2 (рис. 72). На концах резонаторов были припаяны петельки из очень тонкой проволоки, диаметром 0,01 мм, с одной стороны железной, с другой константановой. Когда резонаторы возбуждаются, они частично разряжаются через проволоки термоэлемента, нагревание которых измеряется отклонением очень чувствительного гальванометра. С помощью этой установки Лебедев повторил основные опыты Г. Герца – поляризацию, интерференцию, показал прямолинейное распространение, отражение (рис. 73). На изготовленной призме Николя П.Н. Лебедев наблюдал расщепление лучей на две компоненты (двойное лучепреломление). Одна проходит беспрепятственно, а другая испытывает полное внутреннее отражение. Также он с помощью пластинки, вырезанной из кристаллической серы и помещенной между скрещенными зеркалами, он наблюдал поляризацию, подобно оптическому явлению. Вывод, сделанный Лебедевым: *«описанные опыты ... еще раз показывают тождество в явлениях электрических и световых колебаний»* [52. С.403].

Хотя эксперименты Лебедева соответствовали опытам Герца, линейные размеры разработанных им приборов были в сто раз меньше, а их техническая реализация для своего времени была уникальной и вызывала восхищение современников. Комплект измерительных устройств, разработанных Лебедевым, включал проволочный поляризатор (решетка из 20 тонких проволок, натянутых на четырехугольную рамку размером 2,0 x 2,0 см²), металлические зеркала, призму из эбонита, а также призмы, николь, и четвертьволновую фазовую пластинку из двоякопреломляющих кристаллов ромбической серы.

П.Н. Лебедев предвидел, что создание монохроматических генераторов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов будет представлять наиболее сложную проблему: *«для получения колебаний, заключающихся между $\lambda = 3$ мм и $\lambda = 0,1$ мм нам необходимо найти новый источник. Измерять длины этих более коротких волн интерференцией и наблюдать их термоэлементом не составит трудности, но получать их известными уже приемами вряд ли возможно; вибратору и резонатору нужно было бы дать размеры, по сравнению с которыми самые тонкие произведения часовщика или ювелира – только неуклюжие металлические массы; количество энергии, которое в виде заряда можно запасти на таком микроскопическом вибраторе, неувовимо мало; сверх*

всего этого является совершенно неизвестным, возможны ли образования колебаний при искровом разряде таких ничтожных зарядов. Сейчас мы не имеем возможности предвидеть, как удастся разрешить это затруднение; но во всяком случае тут встретятся значительные затруднения, и способ получения еще более коротких волн будет очень крупным шагом вперед в области экспериментальной физики» [70].



Рис. 73. Комплект устройств, разработанных П.Н. Лебедевым [70]

2.26. Изобретение радио

В истории изобретения радио важное событие произошло в 1891 году, когда французский физик Эдуард Бранли открыл следующее явление: тонкие слои металла, осажденные на стекле, а также металлические порошки обладают способностью изменять свое сопротивление, если вблизи них произойдет разряд электрофорной машины или индукционной катушки. Механические сотрясения снова возвращают опилкам прежнее состояние, то есть большое сопротивление. Действие разряда опять может его уменьшить, и снова встряхивание восстанавливает сопротивление. Бранли изобрел когерер – стеклянную трубку с

металлическими опилками, оказавшуюся хорошим индикатором электромагнитных волн. Преподаватель военно-морского учебного заведения в С.-Петербурге А.С. Попов создал более совершенный, безотказно действующий индикатор электромагнитных волн и предложил оригинальный метод встряхивания когерера с помощью электромагнитного звонкового реле.

В 1894 году А.С. Попов с помощью возбuditеля электромагнитных колебаний, построенного по образцу вибратора Герца, и усовершенствованного когерера Э. Бранли и О. Лоджа¹², добился действия своей установки в несколько метров. Далее он обнаружил, что дальность увеличится, если к когереру присоединить провод – приемную антенну. Так был создан прибор, надежно регистрировавший грозозаряды на значительных расстояниях, знаменитый грозоотметчик Попова, ставший первой в мире приемной радиостанцией.

Датой изобретения радио принято считать 7 мая 1895 года, в этот день А.С. Попов выступил с публичным докладом «Об отношении металлических порошков к электромагнитным колебаниям» на заседании физического отделения Русского физико-химического общества [71]. В 1896 г. своей статье «Прибор для обнаружения и регистрирования электрических колебаний» А.С. Попов указал на все известные до него эксперименты по обнаружению электрических колебаний, которые привели его к созданию собственного прибора. Внутри стеклянной трубки длиной около 7 см и диаметром 1 см на стенках приклеены две полоски тонкой листовой платины, выведенные с разных концов трубки, наполненной металлическим порошком. Прибор Попова изображен на рис. 74. Трубка с опилками помещена между зажимами *M* и *N*. над трубкой расположен звонок, при своем действии он мог давать легкие удары молоточком посередине трубки. Ток от батареи 4-5 Вольт от зажима *P* идет к пластинке *A*, далее через порошок, к другой пластине *B*, по обмотке электромагнита реле обратно к батарее. Сила этого тока недостаточна для притягивания якоря реле, но, если молоточек ударит по трубке, сопротивление мгновенно уменьшится и ток увеличится, якорь реле притянется. В этот момент цепь, от батареи к звонку, прерванная в точке *C*, замкнется, и звонок начнет действовать, но сотрясения трубки опять уменьшат ее проводимость, и реле разомкнет цепь звонка. В своем приемнике Попов реализовал то, что мы теперь называем обратной связью. На одиночное колебание прибор отвечает коротким звонком.

А.С. Попов выражал надежду, его прибор, при дальнейшем усовершенствовании, *«может быть применен к передаче сигналов на расстояние при помощи быстрых электрических колебаний, как только будет найден источник таких колебаний, обладающий достаточной энергией»* [52. С.458]. А.С. Попов разработал первый пригодный для практического применения радиоприемник, но следует отметить, что за два года до этого Никола Тесла

¹² Оливер Лодж в 1894 году продемонстрировал квазиоптическую природу «волн Герца» и использовал детектор радиоволн, который он назвал «когерер»

использовал созданные им основные элементы – антенну, приемник и передатчик, настроенные в резонанс. В области электро- и радиотехники Тесла является автором более 110 патентов США на свои изобретения [72]

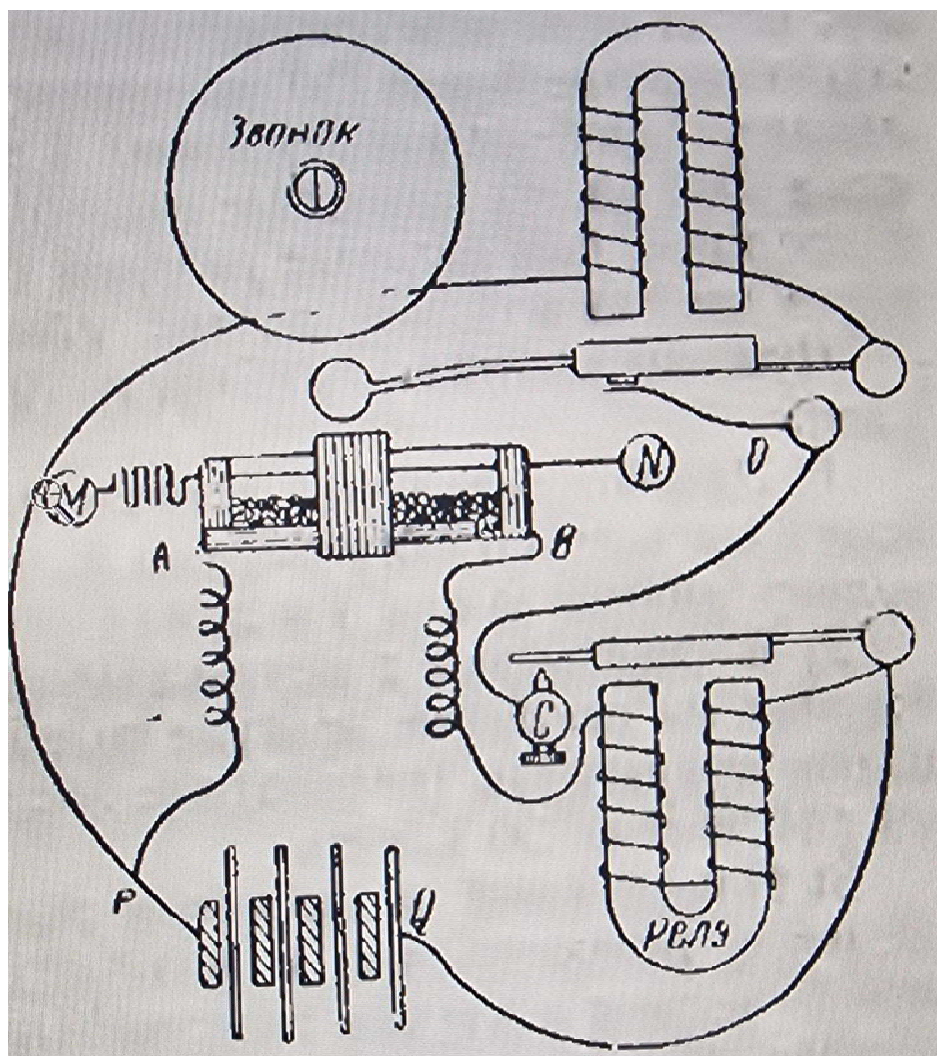


Рис. 74. Из статьи А.С. Попова «Прибор для обнаружения электрических колебаний» [52. С.453]

В 1896 году итальянец Г. Маркони получил патент на радиоприемник, схема которого была идентична схеме А.С. Попова. История приоритета в изобретении радио, преимущество Попова и практическое воплощение идеи радиосвязи Маркони рассмотрены академиком А.Н. Крыловым [73]. В январе 1896 года Попов напечатал сообщение «Прибор для обнаружения и регистрирования электрических колебаний», а Маркони оформил свой патент в июне 1896 года, и лишь через год, в 1897 году, он опубликовал сведения о своих опытах и приборах беспроволочного телеграфирования. Приборы Маркони представляли собой точное воспроизведение приборов Попова. Но поскольку коммерческое воплощение беспроволочной телеграфии было реализовано Маркони, основавшим акционерную компанию, которая занималась продажами средств радиосвязи, он вместе с Брауном разделил Нобелевскую премию по

физике в 1909 году «в знак признания заслуг в развитии беспроводной телеграфии». Именно Маркони осуществил радиосвязь через Атлантический океан, тем самым сделав своему имени мировую известность. Несмотря на это, в истории науки и техники приоритет и заслуги Попова в изобретении радио невозможно оспорить. Хронология наиболее важных открытий и изобретений на пути экспериментального исследования высокочастотных электромагнитных колебаний приведена в таблице 3.

Таблица 3

Хронология исследований высокочастотных электромагнитных колебаний

Год	Автор	Результат
1663	Отто фон Герике (1602–1686)	Первое наблюдение электрической искры
1745	Бенджамин Франклин (1706–1790)	Опыты, доказавшие тождество между молнией в атмосфере и электричеством. Гипотеза о сущности электризации – «два рода электричества являются результатом излишка или недостатка электрической жидкости»
1745	Питер ван Мушенбрук (1692–1761)	Изобретен электрический конденсатор - Лейденская банка
1803	Василий Петров (1761–1834)	Создан мощный гальванический элемент из 4200 медных и пластин. Открыто явление электрической дуги
1826	Феликс Савари (1797–1841)	Вывод о колебательном характере электрического разряда
1842	Джозеф Генри (1797–1878)	Экспериментальное оказательство колебательного характера искрового разряда. Изобретены катушки индуктивности
1848	Генрих Румкорф (1803–1877)	Индукционная катушка для высоких напряжений
1853	Вильям Томсон (1824–1907)	Теоретическое исследование электрического разряда $T = 2\pi\sqrt{LC}$
1858-1862	Беренд Вильгельм Феддерсен (1832–1918)	Экспериментальное наблюдение разряда с помощью метода вращающегося зеркала $\lambda = 24 \text{ км}$ до $\lambda = 0,6 \text{ км}$

1874	Николай Николаевич Шиллер (1848–1910)	Экспериментальное исследование электрических колебаний. Измерения диэлектрической проницаемости в переменных полях
1871	Герман Гельмгольц (1821–1894)	Изучение колебаний в связанных контурах. На расстоянии 136 см во втором контуре зафиксированы колебания с частотой 46 кГц
1885	Антон Обербек (1846–1900)	Открыл явление резонанса колебательных контуров
1883	Джордж Френсис Фицджеральд (1851–1901)	Проведен расчет энергии излучения «очень маленького кругового тока» - магнитного осциллятора. Впервые возникла идея повышения частоты колебаний для увеличения энергии излучения
1886	Генрих Рудольф Герц (1857–1894)	Переход к открытому колебательному контуру Распространяющиеся электрические колебания названы «лучами электрической силы». Доказано, что переменные токи высокой частоты представляют собой форму энергии, распространяющуюся в среде.
1890	Людвиг Больцман (1844–1906)	Опыты с электрической искрой, измерение диэлектрических постоянных
1891	Эдуард Бранли (1844–1940)	Изобретение «трубки Бранли», названной позже когерером
1894	Аугусто Риги (1850–1920)	Разработал новый тип генератора – сферический осциллятор сантиметровых волн. Наблюдение интерференции и дифракции электрических волн $\lambda = 20 \text{ см}$ и $\lambda = 7,5 \text{ см}$
1892	Никола Тесла (1856–1943)	Опыты с переменными токами высокой частоты. Разработка высокочастотного резонансного трансформатора. Идея передачи электрической энергии без проводов.
1894	Александр Степанович Попов (1859–1906)	Создание более совершенного когерера и способа его встряхивания с помощью электромагнитного звонкового реле. Изобретение грозоотметчика, первой в мире приемной радиостанции
1895	Александр Степанович Попов (1859–1906)	Доклад на заседании физического отделения Русского физико-химического общества «Об отношении металлических порошков к электромагнитным колебаниям». День его произнесения 7 мая считается Днем радио.

1895	Петр Николаевич Лебедев (1866–1912)	Эксперименты с «лучами электрической силы» $\lambda = 0,6$ см Наблюдение двойного лучепреломления, поляризации, интерференции, отражения, прямолинейного распространения, что подтверждает тождество электрических и световых колебаний
1896	Гульельмо Маркони (1874–1937)	Патент в США на радиоприемник (июнь 1896 г.), схема которого идентична схеме А.С. Попова, представленной в статье «Прибор для обнаружения и регистрирования электрических колебаний» (январь 1896 г.)
1898	Карл Фердинанд Браун (1850–1918)	Получение мощных токов высокой частоты и эффективное излучение электромагнитных волн. Изобрел колебательный контур большой емкости и с малым затуханием, идея разделить искровой разрядник и антенну.

«В будущем радио будет преобразовано в «большой мозг», все вещи станут частью единого целого, а инструменты, благодаря которым это станет возможным, будут легко помещаться в кармане» – такие перспективы развития радио в 1926 году предвещал Никола Тесла¹³. Изобретение радио стало началом века электроники, а развитие технологий, использующих распространяющиеся электромагнитные волны, позволило создать телевидение, мобильные телефоны и многое другое (схема областей применения радио приведена на рис. 75). Первую половину XX века можно назвать временем великих открытий, которые следовали одно за другим. В 1904 году Джон Флеминг изобрел вакуумный диод (двухэлектродную лампу). В 1907 году Ли де Форест доработал диодный детектор на вакуумной лампе Флеминга, он изобрел триод – анод, катод и управляющую сетку, что позволило не только детектировать, но и усиливать принятые сигналы. Создание трехэлектродной вакуумной лампы привело к разработке генераторов незатухающих колебаний. Значение изобретения Фореста выразил один из первооткрывателей квантовой механики Луи де Бройль, который с 1914 по 1919 гг. находился на военной службе в инженерном корпусе и занимался внедрением нового вида связи – ламповой радиотехники для военных нужд: *«Это великое открытие сослужило службу не только технике... Оно оказало неоценимую услугу электронике как науке и значительно способствовало ее*

¹³ Из интервью Н. Теслы для еженедельного американского журнала «Collier's Weekly», 1926 [Цит. по: Махровский О.В. От изобретения радио к Интернету вещей// Век качества, 2015. №2. С.66].

развитию» [74. С.18]. Благодаря применению ламп удалось значительно улучшить все качественные показатели радиоприемных устройств. С конца 1930 годов электродинамика сверхвысоких частот стала развиваться как самостоятельное направление, возникла радиоэлектроника как процесс миниатюризации радиоэлектронной аппаратуры [75] .

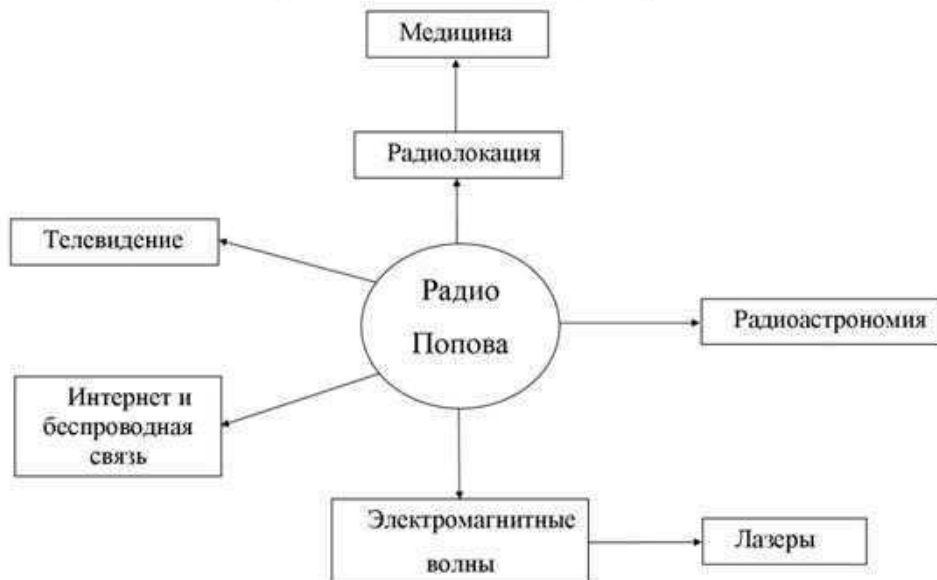


Рис. 75. Области применения радио [76]

Вторая половина XX века и наступивший XXI век стали для радиоэлектроники временем технологий: то, что было открыто и изобретено, нашло практическое применение и стало стимулом для дальнейшего развития [51]. История экспериментального изучения высокочастотных электрических колебаний показала, что при укорочении длины волны возможно создание концентрированных пучков электромагнитных волн и осуществление эффективной беспроводной передачи электроэнергии на большие расстояния [77]. Передатчик, излучающий радиоволны, и приемник, улавливающий и использующий часть излученной энергии, представляют собой первое практическое применение беспроводной передачи электроэнергии на большие расстояния. В XXI веке вопросы создания технологии беспроводной передачи электрической энергии являются актуальными и привлекают внимание многих ученых. Эти технологии характеризуются расстоянием, на которое они могут передавать мощность с максимальной эффективностью, и различаются диапазоном электромагнитных волн, с помощью которых энергия передается – радиоволны, сверхвысокочастотное излучение (СВЧ) и видимые световые волны. Используемые методы передачи делятся на два вида – электромагнитное излучение и электромагнитная индукция. Зарождение коммерчески жизнеспособной технологии беспроводной передачи электроэнергии на большие расстояния относится к концу XIX века, когда впервые опыты Н. Тесла захватили воображение многих людей и его идеи

получили широкую известность. В своей лекции, прочитанной в Франклиновском институте в 1893 г. Тесла писал: *«С каждым днем я все более убеждаюсь в практической осуществимости этого процесса (передача энергии без проводов – А.С.) ... это серьезная задача, которая ставится инженером-электриком и должна быть решена со дня на день»* [78]. Можно только удивляться полетом фантазии этого ученого, его способности заглянуть на столетие вперед.

2.27. Явление электромагнитной индукции. Опыты Д. Генри и М. Фарадея

Майкл Фарадей (1791–1867) принадлежит к числу выдающихся физиков-экспериментаторов, без трудов которого невозможно представить современное представление об электромагнитном поле. Не получивший никакого систематического образования, без дипломов и аттестатов, до 22-х лет проработавший учеником переплетного цеха, он собственными усилиями добился возможности заниматься научными исследованиями и за несколько лет превратился в первоклассного физика [79]. Все научные труды Майкла Фарадея содержат изложение физических экспериментов, постановка и анализ которых отличаются глубоким рассмотрением явлений и их обобщением без единой математической формулы. Указывая на математическую точность научного языка Фарадея, свободного от математических вычислений, Максвелл назвал Фарадея «математиком высокого порядка, у которого математики будущего будут черпать благотворные методы». Одна из первых статей о М. Фарадее, написанная вскоре после его смерти, была статья Максвелла «Фарадей» в журнале «Nature» [80]. Фарадей работал чрезвычайно методично, обнаружив эффект, он изучал его глубоко, число опытов, которые он публиковал в выпусках «Опытные исследования по электричеству» так велико, всего он провел более 30 тыс. экспериментов. Его называли «королем экспериментаторов» (рис. 76).



Рис. 76. М. Фарадей на лекции

А.Г. Столетов писал: «Никогда со времен Галилея свет не видал стольких поразительных открытий, вышедших из одной головы». Перечислим основные научные заслуги М. Фарадея:

- 1) установлено единство всех известных видов электричества и магнетизма;
- 2) открыт закон электромагнитной индукции;
- 3) открыт основной закон электрохимии;
- 4) экспериментально установлена взаимосвязь световых и магнитных явлений, подтверждена гипотеза Ампера;
- 5) создана терминология описания электрических и магнитных явлений. Он изобрел новые термины – электролиз, электрод, диэлектрический, силовое поле, силовые линии, индукция и др.

В 1820 г. Фарадей поставил принципиально новую проблему для того времени: "превратить магнетизм в электричество". Это было вскоре после открытия магнитного действия токов. В опыте Эрстеда электрический ток действует на магнитную стрелку. Поскольку, согласно Фарадею, все силы природы взаимопревращаемы, можно, наоборот, магнитной силой возбудить электрический ток. Фарадей сжижал газы, выполнял тонкие химические анализы, открыл новые химические свойства веществ, но все время возвращался к поставленной проблеме. В 1822 г. он описал попытку обнаружить "состояние", обусловленное течением тока: *"поляризовать луч света от лампы путем отражения и попытаться обнаружить, не окажет ли деполяризующее действие вода, расположенная между полюсами вольтовой батареи в стеклянном сосуде..."* Фарадей надеялся таким образом получить какую-нибудь информацию о свойствах тока. Далее в 1825 году Фарадей опубликовал статью "Электромагнитный ток (под влиянием магнита)", в которой высказал следующую мысль. Если ток действует на магнит, то он должен испытывать противодействие. *"По разным соображениям, - пишет Фарадей, - было сделано предположение, что приближение полюса сильного магнита будет уменьшать электрический ток"*. В дневнике от 28 ноября 1825 г. описан опыт, реализующий эту идею. Батарея гальванических элементов соединялась проводом. Параллельно этому проводу располагался другой (провода разделились двойным слоем бумаги), концы которого присоединялись к гальванометру. Фарадей рассуждал, по-видимому, так. Если ток есть движение электрической жидкости и это движение действует на постоянный магнит - совокупность токов (по гипотезе Ампера), то движущаяся жидкость в одном проводнике должна заставить двигаться неподвижную - в другом, и гальванометр должен зафиксировать ток. "Разные соображения", о которых писал Фарадей при изложении первого опыта, сводились к тому же, только там ожидалась реакция движущегося в проводнике электрического флюида со стороны молекулярных токов постоянного магнита. Но опыты дали отрицательный результат.

Решение пришло в 1831 г., когда Фарадей предположил, что индукция должна возникнуть при нестационарном процессе. Это была ключевая мысль, приведшая к открытию явления электромагнитной индукции.

Возможно, что к идее изменения тока заставило обратиться сообщение, полученное из Америки. Известие пришло от американского физика Джозефа Генри (1797–1878). В юные годы Генри не проявлял ни исключительных способностей, ни интереса к науке. Вырос он в нищете, был батраком на ферме, актером. Так же, как и Фарадей, он занимался самообразованием. Учиться начал с 16 лет в академии города Олбани. За семь месяцев он усвоил столько знаний, что получил место учителя в сельской школе. Затем Генри работал у профессора химии в качестве лекционного ассистента. Работу он совмещал с учебой в академии. После окончания курса Генри был назначен инженером и инспектором на канале Эри. Через несколько месяцев он оставил эту должность, приняв приглашение на должность профессора математики и физики в Олбани. В это время английский изобретатель Вильям Стерджен (1783–1850) сообщил о своем изобретении подковообразного магнита, способного поднять стальное тело весом до четырех килограммов. Генри увлекся электромагнетизмом. Он сразу же нашел способ увеличить подъемную силу до тонны. Достичь этого удалось новым в то время приемом: вместо изоляции тела магнита изолировался провод. Тем самым был открыт способ создания многослойных обмоток. На рисунке 77 представлен электромагнит, построенный Генри. На подковообразный магнит из мягкого железа было намотано большое количество витков изолированной проволоки. Ток от гальванической батареи *bc* превращал подкову в магнит, и она притягивала плоскую железную плиту, называемую якорем. К якорю была подвешена платформа, на которую можно было поместить груз.

Еще в 1831 г. Генри показал возможность построения электродвигателя, изобрел электромагнитное реле, и с его помощью демонстрировал передачу электрических сигналов на расстояние, предвосхитив изобретение Морзе (телеграф Морзе появился в 1837 г.).

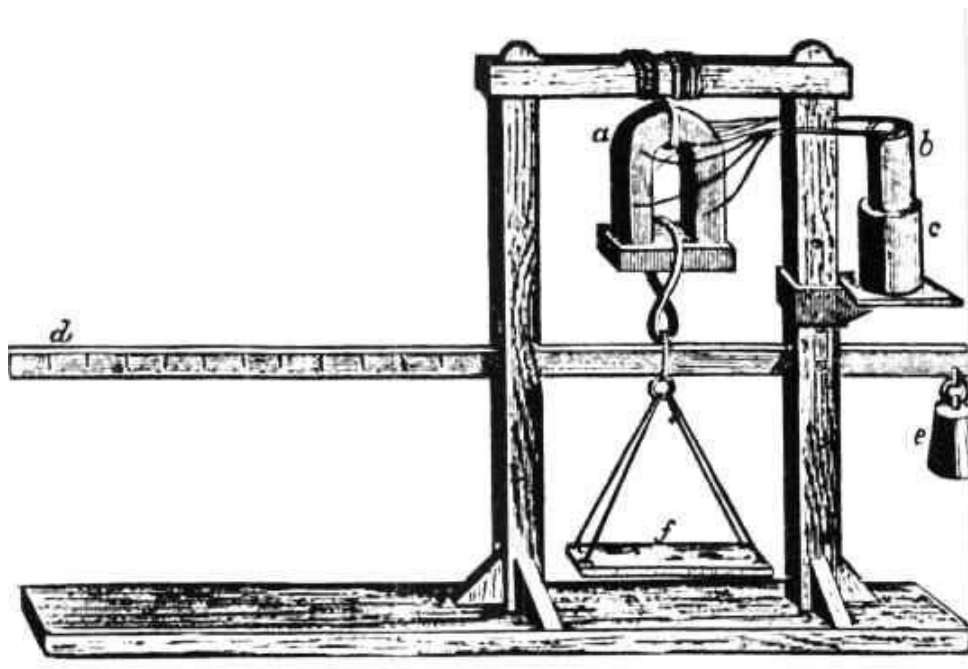


Рис.77. Электромагнит Дж. Генри [6]

Подобно Фарадею Генри поставил перед собой задачу получить электрический ток с помощью магнита. Но это была постановка задачи изобретателя, во многом интуитивной. Открытие произошло за несколько лет до опытов Фарадея. Ключевой эксперимент Генри был проведен с помощью установки, изображенной на рис. 78. Этот эксперимент легко повторить и сегодня, если вместо гальванического элемента возьмем удобный аккумулятор, а вместо крутильных весов воспользуемся гальванометром. Генри обнаружил, что в замкнутой проволочной катушке можно вызвать индуцированный ток, просто двигая рядом с катушкой магнит. Когда движение магнита прекращалось, магнитное поле становилось стационарным, и электрический ток исчезал. Генри предположил, если движущийся магнит может вызвать ток в проволоке, то и одна катушка проволоки может вызвать ток в другой. Так был открыт принцип трансформатора, сделавший возможным применение электрической энергии. Но Генри не сообщил об этом опыте никому, *"Мне следовало напечатать это раньше, – говорил он сокрушенно своим друзьям. - Но у меня было так мало времени! Хотелось свести полученные результаты в какую-то систему"* [6]. Генри не понял и не почувствовал глубины и важности нового открытия. В противном случае он, конечно, оповестил бы ученый мир о величайшем факте. Умолчав об индукционных опытах, Генри сразу же послал сообщение, когда ему удалось поднять электромагнитом целую тонну.

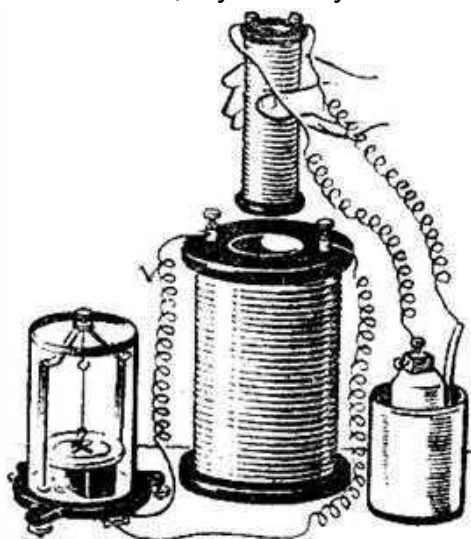


Рис. 78. Опыт Дж. Генри [6]

В опыте Генри 1825 года два провода отделялись бумагой. Индукция должна была быть, но не обнаруживалась вследствие слабости эффекта. Генри показал, что в электромагните эффект резко усиливается при применении многослойной обмотки. Фарадей знал, что индукция должна возрасти, если индуктивное действие будет передаваться по большой длине. Также на момент опытов Фарадея было известно, что магнит - собрание токов. Возбуждение намагничивания в стальном стержне при пропускании тока по обмотке есть индукция тока током. Она усиливается, если путь тока по обмотке становится длиннее. Такова возможная цепь логических умозаключений Фарадея. Вот

полное описание Фарадеем первого успешного опыта: *"Двести три фута медной проволоки в одном куске были намотаны на большой деревянный барабан; другие двести три фута такой же проволоки были проложены в виде спирали между витками первой обмотки, причем металлический контакт был везде устранен посредством шнурка. Одна из этих спиралей была соединена с гальванометром, а другая - с хорошо заряженной батареей из ста пар пластин в четыре квадратных дюйма с двойными медными пластинками. При замыкании контакта наблюдалось внезапное, но очень слабое действие на гальванометр, и подобное же слабое действие имело место при размыкании контакта с батареей"* [81].

Фарадей в ходе своих опытов установил: при замыкании и размыкании возникают индукционные токи противоположных направлений. Далее он перешел к изучению влияния железа на индукцию. Наконец, Фарадей произвел опыт, с которого до сих пор обычно начинают изложение вопроса об электромагнитной индукции. Это было точное повторение опыта Генри.

Задача, поставленная Фарадеем в 1820 году, была решена: магнетизм был превращен в электричество. Вначале Фарадей различает индукцию тока от тока (ее он называет "вольта-электрическая индукция" и тока от магнита ("магнито-электрическая индукция"). Но затем он показал, что все случаи подчиняются одной общей закономерности.

Закон электромагнитной индукции охватил и другую группу явлений, которая получила впоследствии название явлений самоиндукции. Фарадей назвал новое явление так: *"Индуктивное влияние электрического тока на самого себя"* [81. С.429]. Вопрос этот возник в связи со следующим фактом. Две пластины гальванической батареи соединяются проволокой небольшой длины. При этом никакими ухищрениями экспериментатору не удастся получить от этой проволоки электрического удара. Но если взять вместо проволоки обмотку электромагнита, то всякий раз при размыкании цепи ощущается удар. Фарадей писал: *«Одновременно наблюдается другое, давно известное ученым явление, а именно: в месте разъединения проскакивает яркая электрическая искра»*. Фарадей начал исследование этих фактов и вскоре открыл ряд новых сторон явления электромагнитной индукции. Ему понадобилось немного времени, чтобы установить *"тождественность явлений с явлениями индукции"*.

Опыты по наблюдению самоиндукции были поставлены Фарадеем в 1834 г. Для Фарадея самоиндукция была фактом, осветившим дальнейший путь поисков. Обобщая наблюдения, он пришел к заключениям принципиального значения: *"Не подлежит сомнению, что ток в одной части провода может действовать путем индукции на другие части того же самого провода, находящиеся рядом... Именно это и создает впечатление, что ток действует на самого себя"*. Не зная природы тока, Фарадей тем не менее точно указал на суть дела: *"Когда ток действует путем индукции на рядом с ним расположенное проводящее вещество, то, вероятно, он действует на имеющееся в этом проводящем веществе электричество, – все равно, находится ли последнее в состоянии тока или же оно неподвижно; в первом*

случае он усиливает или ослабляет ток, смотря по его направлению во втором - создает ток" [80].

Ключевой вклад М. Фарадея (рис. 79) в физику электромагнитных явлений заключается во введении понятия физического поля – формы материи, взаимодействующей с веществом. В своем дневнике 7 ноября 1845 года Фарадей впервые употребил термин «электромагнитное поле».

Математическое выражение закона электромагнитной индукции в 1873 г. дал Джеймс Клерк Максвелл в "Трактате по электричеству и магнетизму". Только после этого он стал основой количественных расчетов. Поэтому закон электромагнитной индукции следует называть законом Фарадея-Максвелла:

$$\mathcal{E}ДС = - \frac{d\Phi}{dt},$$

где ЭДС – электродвижущая сила, появляющаяся в замкнутом контуре, равна изменению магнитного потока Φ , пронизывающего этот контур.

Случай, когда поле постоянно, а проводник перемещается в этом поле, не описывается теорией Максвелла. Впервые на это обратил внимание А. Эйнштейн. Его основополагающая работа «К электродинамике движущихся тел» как раз и начинается с обсуждения недостаточности теории Максвелла в этом пункте. Явление возбуждения ЭДС в проводнике, движущемся в постоянном магнитном поле, может быть включено в рамки теории электромагнитного поля, если ее дополнить принципом относительности и принципом постоянства скорости света.



Рис. 79. Майкл Фарадей. Портрет кисти Т. Филлипса [36]

2.28. Направление индукционного тока: опыты Ленца

В установлении закона, определяющего направление индукционного тока, огромная заслуга профессора Санкт-Петербургского университета Эмилия Христиановича Ленца (1804–1865), российского физика немецкого происхождения (рис. 80).



Рис. 80. Э.Х. Ленц [Википедия]

Первым важнейшим изобретением Ленца была разработка баллистического метода измерений для изучения законов индукции. В 1832 г., узнав об открытии Фарадеем явления электромагнитной индукции, Ленц приступил к экспериментам с целью установления количественных законов индукции. Он считал, что «сила мгновенного тока индукции» действует подобно удару, причем сила этого удара может быть измерена по скорости, сообщаемой стрелке мультипликатора – единственного в то время индикатора электрического тока. Схема установки Ленца состояла в следующем. На столе укреплялся постоянный подковообразный магнит M с якорем A , имеющим обмотку, электрически соединенную с мультипликатором B , сконструированным ранее российским изобретателем П.Л. Шиллингом и состоящим из катушки медного провода и пары магнитных стрелок (рис.81). Показания мультипликатора можно было наблюдать через оптическую трубу T с помощью зеркала C . Когда по катушке протекал ток, стрелки отклонялись. Соединив якорную обмотку с катушкой мультипликатора и отрывая якорь от полюсов магнита, Ленц мог по отклонению стрелок судить об уровне электродвижущей силы, возникающей в обмотке.

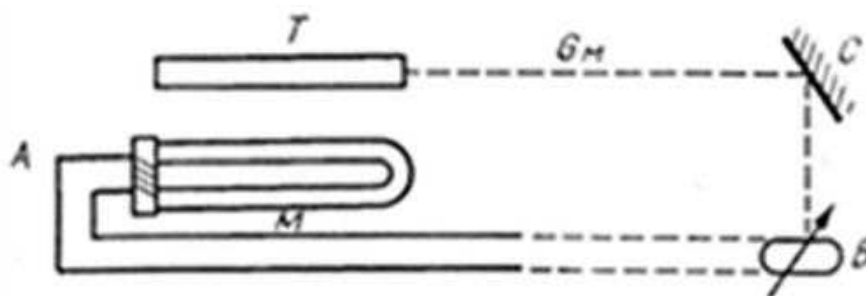


Рис. 81. Схема установки Ленца

Внимательно изучив все работы в этой области, Ленц в 1832 г. поставил ряд оригинальных опытов, а в ноябре 1833 г. выступил в Академии наук с докладом «Об определении направления гальванических токов, возбуждаемых электродинамической индукцией». Поскольку в литературе нередко неточно, а иногда и ошибочно формулируется закон Ленца, приводим первоначальный текст из его доклада. *«Если металлический проводник движется вблизи электрического тока или магнита, то в нем возбуждается гальванический ток такого направления, что он мог бы обусловить, в случае неподвижности данного проводника, его перемещение в противоположную сторону»*. В этой работе Ленц писал: *«По прочтении статьи Фарадея я пришел к мысли, что все опыты по электродинамической индукции могут быть легко сведены к законам электродинамических движений, так что если эти последние считать известными, то будут определены и первые; это мое представление оправдалось на ряде опытов»*. Ленц в полной мере оценил значение открытий Г. Ома и М. Фарадея. Одним из первых и немногих в тот период высказал убежденность в справедливости закона Ома. Узнав об открытии Фарадеем электромагнитной индукции, Ленц сразу же решил установить количественные характеристики этого явления. С этой целью он уже в 1832 г. создал теорию баллистического гальванометра и построил первый прибор. В это время электроизмерительная техника сводилась к использованию электрометра академика Рихмана и крутильных весов для измерения тока. Трудно было говорить об измерении электрических величин, которые не имели даже точного определения. Не существовало ни их эталонов, ни единиц измерения.

Гальванометр – это высокочувствительный прибор для измерения малых токов и напряжений. Баллистический гальванометр имеет ту особенность, что при поступлении короткого импульса угол отклонения стрелки прибора пропорционален количеству электричества. В основных своих чертах современные гальванометры удивительно напоминают устройство, созданное Ленцем. Ленц установил: ЭДС, которую возбуждает магнит в окружающей его обмотке, равна сумме ЭДС всех ее витков. Это была первая количественная оценка явления индукции.

Выдающимся открытием Ленца стал закон о направлении индукционного тока, носящий его имя. Впоследствии другие физики давали не раз более короткие формулировки этого общего правила, но и сегодня является одним из основных положений электромагнетизма.

Прекрасно понимая прикладное значение своих исследований, Ленц дал и первую формулу для расчета обмотки электромагнитного генератора, созданного вскоре его коллегой и другом Б.С. Якоби. Баллистический метод измерения позволил Ленцу приступить к количественному определению зависимости сопротивления проводника от температуры. Собрав большой статистический материал и математически его обработав, он выразил эту

зависимость в виде квадратного трехчлена. И окончательно убедился в том, что сопротивление катушки не влияет на ЭДС индукции. Главное же - опыты привели ученого к открытию в 1833 г. фундаментального закона электромагнитной индукции, носящего его имя. Закон Ленца утверждает, что при перемещении в магнитном поле замкнутого проводника в нем возникает электрический ток, препятствующий перемещению. Иными словами, механическая энергия, расходуемая на перемещение проводника с индуцируемым током, частично затрачивается на перемещение проводника без тока, частично же преобразуется в электромагнитную. Заслуга Ленца заключается не только в том, что он сформулировал общий закон о направлении индуцированного тока, но и убедительно доказал справедливость закона сохранения и превращения энергии при взаимных превращениях механической и электромагнитной энергии¹⁴. Действительно, если перемещать под действием внешней силы магнит или проводник с током вблизи замкнутого проводника кинетическая энергия перемещения магнита или проводника с током превращается в электромагнитную энергию тока индукции. По закону Ленца направление индуцированного тока таково, что вызываемая им сила препятствует движению, которым он был вызван, т. е. в присутствии магнита или проводника с током требуется большая затрата энергии, чем в их отсутствие. И эта часть механической энергии переходит в электромагнитную энергию индуцированного тока.

Закон Ленца был установлен за восемь лет до опубликования первой работы немецкого ученого Р. Майера, который считается одним из основоположников закона сохранения и превращения энергии. Поэтому Ленцу принадлежит заслуга в закладке основ этого фундаментального закона природы. В 1845 г. немецкий физик Ф. Нейман впервые математически сформулировал теорию индукции и предложил выражение для электродвижущей силы индукции, подтверждающее закон Ленца.

В 1834 г. Ленца избирают ординарным академиком Российской академии наук. Интересное и полезное продолжение получили работы Ленца по изучению тепловых явлений в цепи электрического тока. Им было установлено явление зависимости сопротивления проводника от температуры и вид этой зависимости. Ленц обнаружил еще в 1833 году нагревание проводника при прохождении тока, и притом тем больше, чем больше сопротивление проводника R , время t и сила тока I . Была поставлена серия очень точных опытов, заново созданы методика измерений температуры, аппаратура, приборы. Результатом этих работ Ленца стала формула, описывающая количественную оценку выделения тепла $Q = I^2 R t$.

¹⁴ В 1807 г. Т. Юнг впервые использовал термин «энергия» в современном смысле взамен понятия «живая сила». В 1851 г. У. Томсон впервые использовал термин «кинетическая энергия», а в 1853 г. У. Ренкин впервые ввел понятие «потенциальная энергия».

Результаты своих опытов Ленц изложил в 1842 г. в докладе “О законе выделения тепла гальваническим током” на заседании Академии наук. За несколько месяцев до этого, в октябре 1841 г., в английском журнале “Philosophical Magazine” появилось сообщение о работах Дж. П. Джоуля в этой области. Оно вызвало многочисленные возражения, связанные с отсутствием общепринятых единиц для измерения силы тока и сопротивления, а также приборов для точных электрических измерений. Ленц выполнил свои работы чрезвычайно тщательно и аккуратно, из-за чего и возникла задержка с публикацией его выводов. После сообщения Ленца возражения, выдвигавшиеся против работ Джоуля, сами собой отпали. Произошел редчайший случай в истории изобретательства: несмотря на более позднюю дату публикации изобретения, оно считается равнозначно принадлежащим обоим авторам и носит название закон Джоуля-Ленца (к сожалению, только в отечественной литературе; в зарубежной его именуют как закон Джоуля) [82, 83].

2.29. Катодные лучи

Немецкий физик Генрих Гейслер (1814–1879) с помощью изобретенного им ртутного вакуумного насоса добился высокого вакуума и создал газоразрядные трубки с ярким свечением (трубки Гейслера). Очевидно, что свечение молекул газа может вызываться только их бомбардировкой какими-то частицами, которые движутся между катодом и анодом. Они были названы катодными лучами, а открыл их в 1859 г. немецкий профессор физики в университете г. Бонна Юлиус Плюккер при проведении опытов с трубкой Гейслера. Позже трубки Гейслера были улучшены в 1875 г. британским ученым Уильямом Круксом в собственной лаборатории (рис. 82). Трубки Крукса сегодня используются исключительно для демонстрации катодных лучей, а в 1897 году Дж. Дж. Томсон идентифицировал их как поток отрицательно заряженных частиц, позже названных электронами.

Устройство трубки Крукса показано на рис. 83, где: 1 – вакуумная трубка, 2 – катод, 3 – анод, 4 – флуоресцирующий экран. При высоком напряжении, порядка 10 000 В, в центре экрана возникало светящееся пятно. Было выяснено, что катод испускал какие-то лучи, распространявшиеся прямолинейно и отклонявшиеся мощным электромагнитным полем. Однако, как показал Герц, электрическое поле на эти лучи не влияет. Крукс предположил, что открытые лучи – это поток отрицательно заряженных частиц. Но такая идея была поначалу опровергнута Герцем, показавшим, что катодные лучи легко проникают через экран из золотой фольги внутри трубки.



Рис. 82. У. Крукс. Рисунок Л. Уорда, 1902 г. [Википедия]

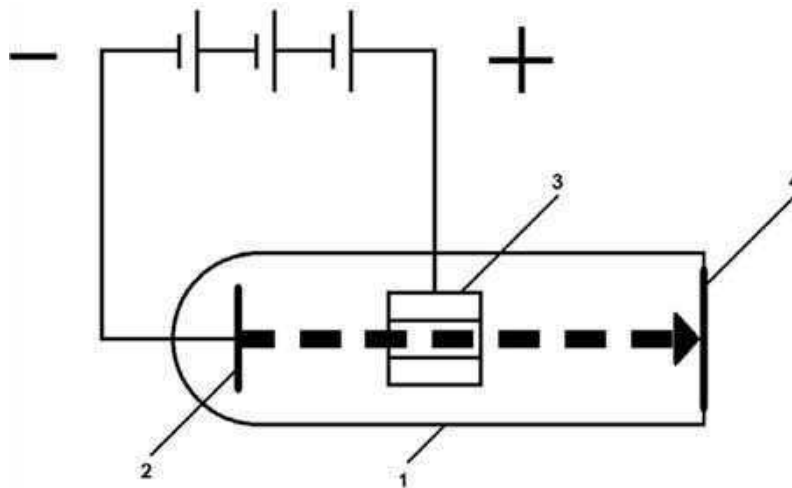


Рис. 83. Электрическая схема трубки Крукса

На рисунке 84 представлен эксперимент с молекулярными лучами в трубке Крукса, которые искривляются в присутствии магнитного поля. Пучок ограничивается слюдяной пластинкой bd , в ней прорезана тонкая щель e . Выходящие из щели лучи вызывают флуоресценцию вдоль линии ef на экране. Если к трубке приблизить магнит, пучок искривляется и вызывает флуоресценцию в точке g .

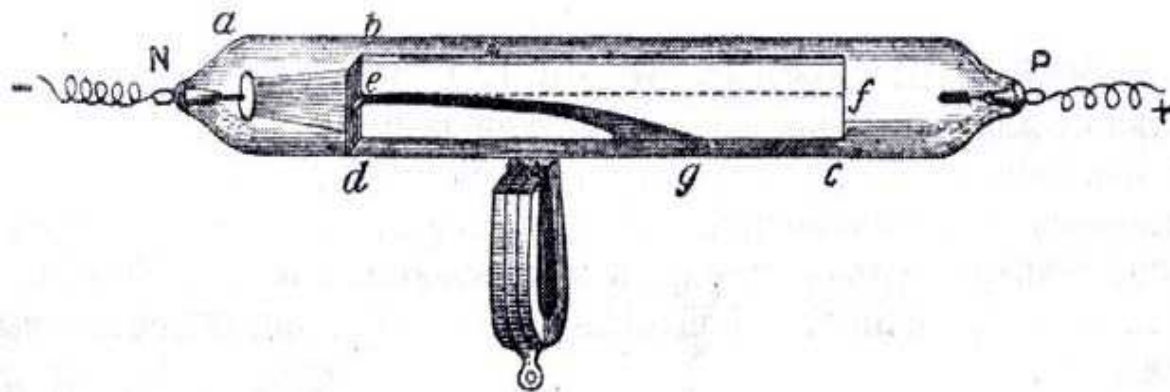


Рис. 84. Искривление молекулярных лучей в трубке Крукса в магнитном поле [36]

2.30. Открытие рентгеновского излучения

Немецкий физик Вильгельм Рентген (1845–1923), экспериментируя с мощными трубками Крукса, открыл в 1895 г. знаменитые X-лучи, которые часто называют рентгеновскими. Все произошло случайно. Задержавшись после работы в лаборатории, Рентген обнаружил, что фотопластинки, запечатанные в плотную черную бумагу, темнели вблизи трубки Крукса. Решив с этим разобраться, он продолжил исследования и через шесть недель опубликовал снимки, которые потрясли весь мир. Его рукопись содержала 30 страниц и называлась «О новом роде лучей» с припиской «Предварительное сообщение». Жаждающих прочесть эту статью было так много, что она вышла отдельной брошюрой, была переведена на английский, французский, русский и другие языки [84].

Установка Рентгена с трубкой Крукса на штативе показана на рис. 85. Рентгеновские лучи довольно быстро нашли применение, и уже во время Первой мировой войны полевые лазареты оснащались мобильными рентгеновскими установками, спасшими жизнь тысячам раненых солдат. В. Рентген стал первым Нобелевским лауреатом по физике в 1901 г. Остается только удивляться, сколько рук ученых держало катодную трубку за 40 лет, с тех пор как она была изобретена. Еще в 1869 г. немецкий ученый И. Гитторф наблюдал и описал катодные лучи, положив начало их изучения. Можно упомянуть Г. Герца и Ф. Ленарда. Все они не могли не наблюдать свечение флуоресцирующих веществ вдали от этого прибора – трубки Крукса, но не обратили внимания, не придали значения. Это открытие Рентгена вполне относится к разряду серендипных. С истинно немецкой аккуратностью Рентген приступает к методичному изучению неизвестной радиации. Он устанавливает экран, покрытый бариевой солью, на разных расстояниях от трубки, потом перегораживает путь икс-лучей всем что есть под рукой – книгой, доской, оловянной фольгой – все непрозрачные материалы оказываются прозрачными.

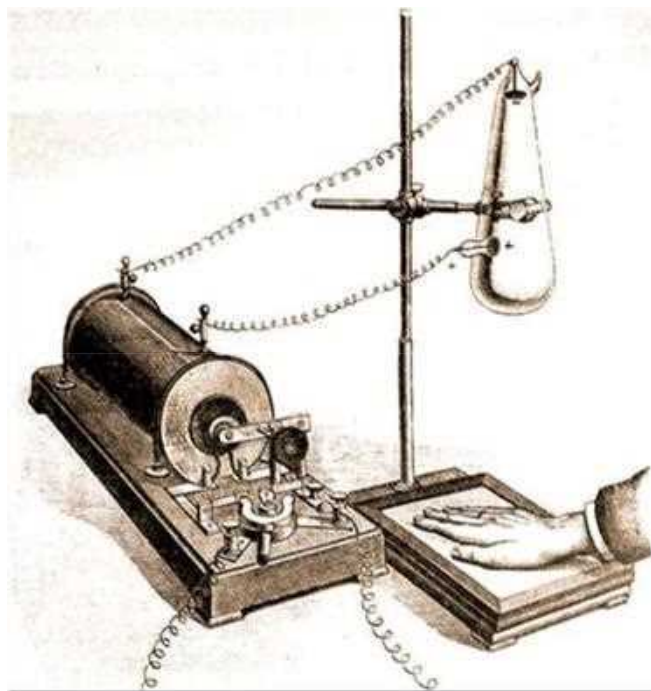


Рис. 85. Установка Рентгена

Непосредственно предшествующими открытию Рентгена можно считать опыты Филиппа фон Ленарда (1862–1947), который был ассистентом Г. Герца и с успехом продолжил его опыты после 1890 г. Он обнаружил, что катодные лучи, исходящие из газоразрядной лампы (рис. 86), могут проходить через тонкую алюминиевую фольгу, названную окном Ленарда. Таким образом, Ленард получил возможность изучать катодные лучи вне пределов газоразрядного пространства. При этом он установил, что атомы не представляют собой, как до этого предполагали, непроницаемые шарики, а являются частицами, масса которых концентрируется в очень незначительной части их общего объема. Тем самым Ленард заложил основу для модели атома, которую позднее описал Резерфорд. В 1905 году Ф. Ленард стал Нобелевским лауреатом по физике за изучение катодных лучей.

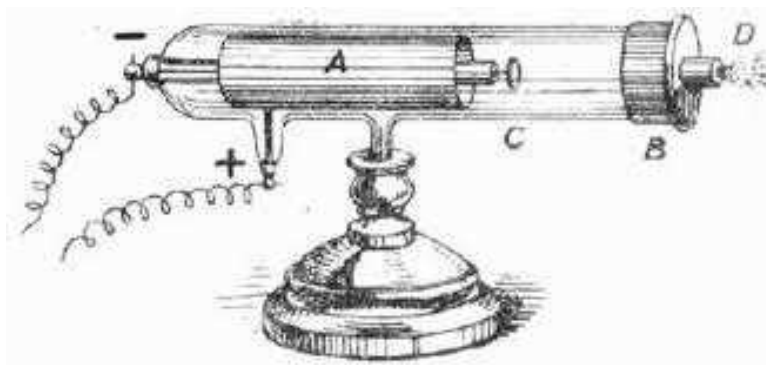


Рис.86. Опыты с катодными лучами Ф. Ленарда

Рентген, необыкновенная начитанность которого в области специальной литературы не раз поражала всех его учеников, очень скоро обратил внимание на опыты Ленарда. По этой причине он 3 мая 1894 г. написал письмо Ленарду, в котором сообщал коллеге о своем желании провести в открытой атмосфере важные опыты над катодными лучами и своим заказе мастеру из Брауншвейга на изготовление надежного газоразрядного аппарата. Но поскольку Рентгену, к сожалению, не был известен способ изготовления тонкой алюминиевой фольги, он просил Ленарда прислать ему по почте кусочек такой фольги.

Уже 7 мая 1894 г. Ленард прислал ответное письмо, в конверт которого был вложен кусочек фольги толщиной 0,005 мм. Спустя короткое время мастер прислал Ленарду готовую катодно-лучевую лампу. Она стоила 36,5 марки. Теперь в распоряжении Рентгена были искровой индуктор с прерывателем, газоразрядная лампа, «окно Ленарда» и люминесцентный экран. Все это ему нужно было для изучения свечения в газоразрядных лампах (лампах Гейслера). Эти приборы в то время стояли во многих физических лабораториях. 21 июня 1894 г. Рентген увидел свечение, испускаемое катодными лучами, как это было описано Ленардом. Открытие Рентгена вызвало беспрецедентный и повсеместный интерес среди ученых. Только в 1896 году было опубликовано свыше 1000 научных работ и около 50 книг, посвященных изучению свойств X-лучей, а в медицинской практике X-лучи стали использовать уже через несколько недель.

Хотя самим Рентгеном и его последователями было много сделано по изучению свойств рентгеновских лучей, однако природа их оставалась долгое время неясной. Одно из самых важных свойств рентгеновских лучей открыл Дж. Дж. Томсон, который обнаружил, что при прохождении их через газ они делают его проводящим (ионизированным). Дифракция рентгеновских лучей была открыта немецким физиком, лауреатом Нобелевской премии М. Лауэ (1879-1960).

2.31. Установление природы катодных лучей и модель атома Томсона

Отклонение катодного луча в электрическом поле было впервые получено в следующем опыте (рис. 87).

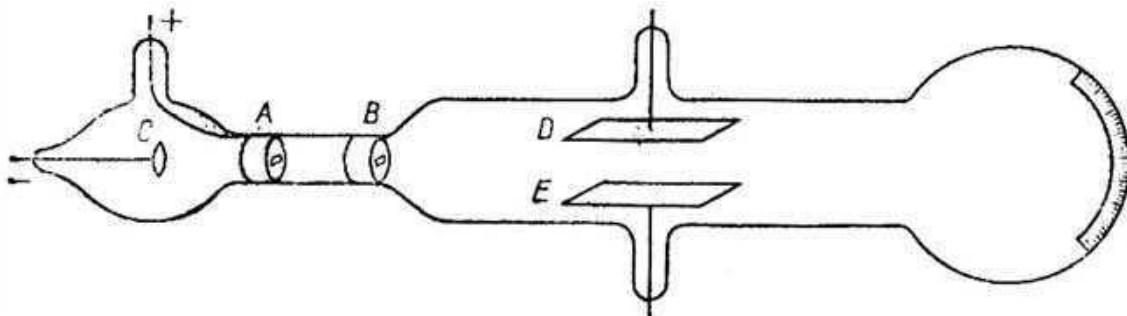


Рис. 87. Опыт Дж. Дж. Томсона по наблюдению катодных лучей

Луч от катода С проходил через щель в аноде А, представляющую металлическую пробку, притертую к трубке и соединенную с землей. После прохождения через вторую щель в другой заземленной металлической пробке В луч распространялся между двумя параллельными алюминиевыми пластинами D и E длиной 5 см и шириной 2 см, отстоявшими друг от друга на 1,5 см. Пройдя конденсатор, луч падал на экран, где давал резко очерченный фосфоресцирующий след. По шкале, наклеенной на внешней поверхности экрана, можно было измерять величину отклонения луча.

Английский физик Джозеф Джон Томсон (1856–1940) наблюдал отклонение катодного луча в электрическом и магнитном полях. Результат был однозначен: направление отклонения соответствует отрицательному знаку заряда частиц. После этого оставалось самое главное: выяснить, с какими частицами связан этот отрицательный заряд. Томсон задавался вопросом, что это за частицы: атомы, молекулы или еще более дробная материя. Открытию новых частиц материи, электронов, входящих в состав атомов привели эксперименты по установлению природы катодных лучей. Оказалось, что это поток частиц. Затем было выяснено, что все частицы одинаковы, все они отрицательно заряжены. Измерение отношения заряда к массе показало, что частицам следует приписать массу, примерно в тысячу раз меньшую массы легчайшего из атомов. Отсюда идея Томсона о том, что эти частицы – осколки атомов, причем осколки одинаковые. Томсон был убежден, что, кроме деления материи на атомы, есть еще «более тонкое дробление» на корпускулы, каждая из которых несет элементарный заряд e_0 . (Пока еще корпускула не называется электроном).

Открытие радиоактивного γ -излучения (1895), термоэлектричества (1897), исследование фотоэффекта (1898) еще более укрепило уверенность Томсона в существовании элементарной частицы материи. И он выступил в 1898 г. с решительным заявлением: *«Я рассматриваю атом составленным из большого числа малых тел, которые я буду называть корпускулами; эти корпускулы одинаковы... В нормальном атоме этот ансамбль корпускул образует электрическую нейтральную систему... Электризацию газа я рассматриваю как явление, сводящееся к расщеплению некоторых из атомов газа, что приводит к отделению корпускул от этих атомов. Отщепившиеся корпускулы ведут себя подобно отрицательным ионам, каждый из которых переносит постоянный отрицательный заряд, который мы будем для краткости называть единичным зарядом; в то же время оставшаяся часть атома ведет себя подобно положительному иону с единичным положительным зарядом и массой, большой по сравнению с массой отрицательного иона».*

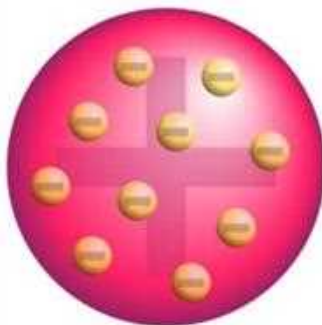


Рис. 88. Схематическое представление модели Томсона

Дж. Дж. Томсон стал лауреатом Нобелевской премии по физике 1906 года с формулировкой «за исследования прохождения электричества через газы». Он продолжил развивать концепцию электронов как частиц, входящих в состав атомов и в 1904 году предложил модель атома, в которой электроны находятся в стабильном статическом равновесии внутри положительно заряженной сферы (рис. 88). Она получила название «модель пудинга с изюмом». Эта модель была опровергнута в 1909 году в эксперименте по рассеянию альфа-частиц в лаборатории Э. Резерфорда. Тем не менее модель Томсона ценна в плане постановки: 1) проблемы связи числа электронов и их распределения с массой атома; 2) проблемы природы и распределения в атоме положительного заряда, компенсирующего общий отрицательный электронный заряд; 3) проблемы распределения массы атома. Эти проблемы решались в процессе последующего развития физики XX в., и их решение в итоге привело к современным представлениям о строении атома.

2.32. Опыты Томсона по определению удельного заряда электрона

В 1897 году будучи директором одной из лучших в мире физической лаборатории – Кавендишской лаборатории Кембриджского университета, Джозеф Джон Томсон попытался измерить заряд и массу электрона, которого он называл «корпускулой» (corpuscle). Установка Томсона показана на рис. 89, где: A , B – аноды, C – катод, D , E – отклоняющие пластины, F – электромагнит, Φ – магнитный поток, f – электромагнитная сила, приложенная к движущейся частице. Прежде всего Томсон добился отклонения катодных лучей в электрическом поле. Откачивая газ в течение нескольких дней, Томсон добился чрезвычайно высокого вакуума внутри трубки и наблюдал явные отклонения катодного луча – например вниз, как показано на рис. 89. Это отклонение могло быть скомпенсировано магнитным полем, отклоняющим катодный луч, подобно электрическому току, вверх, согласно правилу левой руки.

Далее, при проведении многократных опытов, меняя комбинацию потенциала анодов, напряжения на отклоняющих пластинах и тока электромагнита, Томсон безуспешно пытался отдельно измерить заряд электрона e и его массу m . Однако надежные результаты были получены только

для их отношения e/m , а также скорости электрона, которая оказалась равной $1/3$ скорости света, что было хорошим аргументом против электромагнитной природы катодных лучей. Позднее выяснилось, что величина e/m не зависит от материала катода, а также газа в трубке и вообще от вида электронной эмиссии.

Резюмируя свойства электрона, Томсон писал: «...Следовательно, кажется естественным рассматривать его в качестве одного из кирпичиков, из которых построен атом» [85]. К моменту выхода книги Томсона «Прохождение электричества через газы» было твердо установлено, что газ становится проводящим в результате процесса ионизации. «Газ приводится в проводящее состояние, когда через него проходят лучи Рентгена, Ленарда или катодные лучи, тот же самый эффект производится лучами от урана, тория или радиоактивных веществ, полония, радия, актиния, полученными из смоляной смеси соответственно Кюри, Кюном и Бёмоном и Дебьерном, а также, как показал недавно Ленард, посредством легко поглощаемого водой ультрафиолетового света».

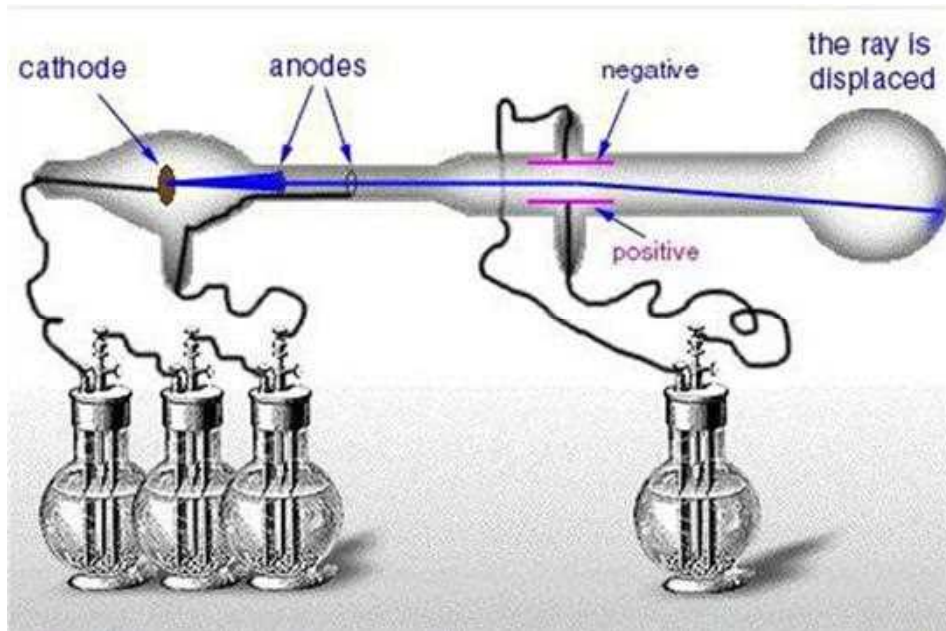


Рис. 89. Эксперимент Томсона по определению заряда и массы электрона

Таким образом, рухнуло представление о том, что атом является фундаментальной и неделимой частицей. Эксперименты Томсона по управлению потоком электронов были настолько убедительными, что 1897 год считается годом открытия электрона [86].

Таблица значений e/m для электрона, определенных в ходе различных экспериментальных методов разными учеными, из книги Дж. Дж. Томсона «Прохождение электричества через газы» приведена на рис. 90.

Источник ионов	Наблюдатель	Дата	Метод определения e/m	Значение e/m
Катодные лучи	Д. Д. Томсон	1897	Магнитное и электростатическое отклонение	$7,7 \cdot 10^6$
»	Д. Д. Томсон	1897	Магнитное отклонение и тепловой эффект	$1,17 \cdot 10^7$
»	Кауфман	1897	Магнитное отклонение и разность потенциалов	$1,86 \cdot 10^7$
»	Симон	1899	Магнитное отклонение и разность потенциалов	$1,865 \cdot 10^7$
»	Вихерт	1899	Магнитное отклонение и скорость ионов	$1,01 \cdot 10^7$ — $1,55 \cdot 10^7$
Лучи Ленарда (катодные лучи, выпущенные через тонкое алюминиевое окошко)	Ленард	1899	Магнитное и электростатическое отклонение	$6,39 \cdot 10^6$
	Ленард	1899	Магнитное отклонение и запаздывание в электрическом поле	$6,8 \cdot 10^6$
Ультрафиолетовый свет	Д. Д. Томсон	1899	Задерживание разряда магнитным полем	$7,6 \cdot 10^6$
	Ленард	1900	Магнитное отклонение и разность потенциалов	$1,15 \cdot 10^7$
Раскаленные металлы	Д. Д. Томсон	1899	Задерживание разряда магнитным полем	$8,7 \cdot 10^6$
Радий	Беккерель	1900	Магнитное и электростатическое отклонение	Приблизит. 10^7

Рис. 90. Таблица значений e/m для электронов из книги Дж. Дж. Томсона «Прохождение электричества через газы»

3. ОПТИКА

3.1. Опыты Ньютона по интерференции, дифракции и поляризации света

Одни из первых научных экспериментов со спектральным составом светового луча проводились чешским ученым Йоханесом Маркусом Марци (1594–1667) в 1648 году, который открыл дисперсию света и высказал идею о волновой природе света, а также итальянским ученым Франческо Гримальди (1618–1663), обнаружившего в 1650 году явление дифракции света. Именно Гримальди ввел в физику этот термин для названия явления огибания светом препятствия. Гримальди использовал тонкий пучок света, прошедший в темную комнату через щель. Данный пучок представлял из себя конус, поскольку солнце не является точечным источником света, а также в силу конечной ширины щели. На пути этого конуса Гримальди поставил деревянную жердь и наблюдал отбрасываемую ей тень. Оказалось, что, во-первых, тень была несколько меньше рассчитанных им предполагаемых геометрических размеров, а во-вторых, у краев тени наблюдались несколько радужных полос. Последние были едва различимы, однако их цветовая окраска говорила в пользу негеометрического характера распространения света. Действительно, лучи разных длин волн должны были распространяться по различным траекториям.

К оптике относятся первые научные работы И. Ньютона. В 1666 году, пропуская свет через трехгранную стеклянную призму, он обнаружил его

сложный состав, разложив на семь цветов, открыл явление дисперсии (рис. 91). Кроме того, обнаружив хроматическую aberrацию у линз и считая ее неустранимой, Ньютон пришел к выводу, что линзы в телескопе надо заменить сферическими зеркалами. В 1668 г. он построил первую миниатюрную модель рефлектора длиной 15 см, а позже усовершенствованный рефлектор длиной 120 см (рис. 92). В своих работах по оптике Ньютон поставил очень важный и сложный вопрос: *«Не являются ли лучи света очень мелкими частицами, испускаемыми светящимися телами?»*.

В 1704 году, спустя почти 30 лет после начала своих работ, Ньютон собрал все свои достижения в области световых явлений в трактате «Оптика или трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света». Книга была написана на английском языке, а поскольку за пределами Англии часто знали латинский язык и редко английский, ее перевели и издали в 1706 году на латинском языке. Три части этой книги содержат начала геометрической оптики, учение о дисперсии света, интерференцию света в тонких пластинках, дифракцию света, поляризацию света (рис. 93).

Поводом исследования цветов тонких пластинок явилось следующее обстоятельство. Складывая однажды случайно две призмы полного внутреннего отражения, гипотенузные плоскости которых были несколько искривлены, Ньютон заметил, что в месте касания двух призм появилось пятно, которое оставалось прозрачным даже при установке призм на полное отражение, в отраженном же свете всегда казалось темным. Для упрощения опыта Ньютон решил повторить его, наложив плоской стороной на двояковыпуклую линзу другую линзу, плосковыпуклую. Таким образом между двумя линзами образовался воздушный слой переменной толщины. При освещении системы линз появлялись правильные концентрические цветные кольца, окружавшие место соприкосновения стекол (рис. 94). Таким образом Ньютон нашел новый метод изучения цветов, возникающих при отражении света от двух граней тонких слоев.



Рис. 91. Опыт Ньютона по наблюдению дисперсии света

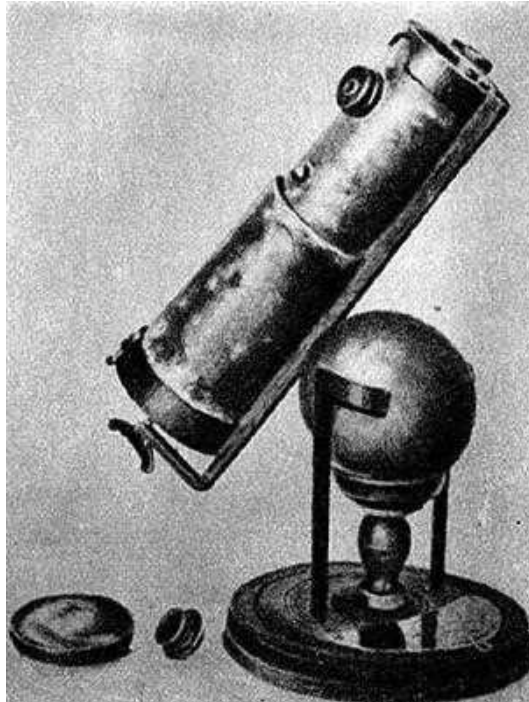


Рис. 92. Телескоп-рефлектор Ньютона
(хранится в Королевском обществе в Лондоне)

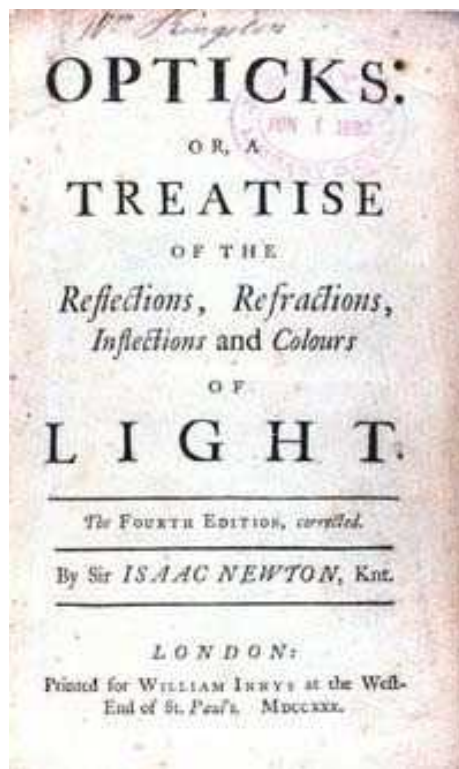


Рис. 93. Титульный лист «Оптики» И. Ньютона

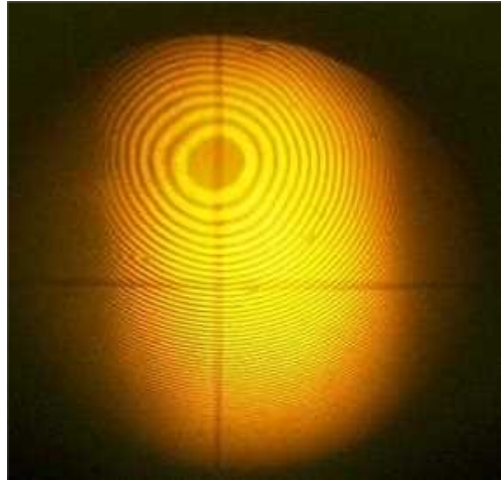


Рис. 94. Кольца Ньютона

Зная кривизну линз, Ньютон мог геометрически вычислить толщину воздушного слоя в различных местах между двумя линзами и таким образом связать каждый наблюдаемый цвет с определенной толщиной воздушного слоя. Освещая систему линз однородным красным или синим цветом, Ньютон увидел, что концентрические кольца делались одноцветными, причем они становились резче и число их заметно увеличивалось. Таким образом, многоцветная картина при освещении белым светом оказалась снова объясняющейся сложностью белого света. В этом случае цветные кольца, образующиеся для каждого отдельного цвета, входящего в состав белого, накладываются друг на друга.

Радиусы темных колец в отраженном свете в опытах Ньютона возрастают от центра к периферии как корни квадратные из четных целых чисел: $(0)^{1/2} - (2)^{1/2} - (4)^{1/2} - (6)^{1/2}, \dots$, радиусы же светлых колец растут, как корни квадратные из нечетных целых чисел: $(1)^{1/2} - (3)^{1/2} - (5)^{1/2} - (7)^{1/2} \dots$. Отсюда вытекает, что соответствующие воздушные промежутки между двумя линзами для темных кругов должны быть пропорциональны ряду четных чисел 0, 2, 4, 6, ..., для световых кругов – ряду нечетных чисел 1, 3, 5, 7... Ньютон заполнил пространство между линзами водой, вместо воздуха, и заметил, что кольца сжимаются; произведя количественные измерения, он нашел, что отношение радиусов кругов в воздухе и воде равняется показателю преломления при переходе из воды в воздух. Ньютон измеряет толщину слоя, отвечающего светлomu кольцу для различных цветов. В таблице на рис. 95 приведены некоторые цифры Ньютона:

	Цвет	Толщина воздушного слоя*	Длина волны, в $m\mu$
2-е кольцо	Фиолетовый	$11\frac{1}{6}$	373
	Желтый	$16\frac{2}{7}$	540
	Красный	$18\frac{1}{5}$	620
	Синий	$21\frac{2}{5}$	470
3-е кольцо	Желтый	$27\frac{1}{7}$	545
	Красный	29	580

Рис. 95. Таблица измерений в опытах с кольцами Ньютона

В последнем столбце приведены те длины волн в миллимикронах, которые можно вычислить по данным Ньютона на основании интерференционной теории колец, пользуясь соотношением

$$2d = \lambda/2, \quad 3\lambda/2, \quad 5\lambda/2, \dots$$

где d – толщина слоя, соответствующая различным кольцам, λ – длина волны. При определении цветности Ньютон мог пользоваться, к сожалению, только качественной характеристикой: «красный», «синий» и т.д., поэтому опытные измерения Ньютона можно проверить только приближенно. Мы можем лишь подтвердить, что, например, 375 нм действительно соответствуют крайнему фиолетовому цвету, 620 нм – красному и т.д.

Ньютон описывает наблюдавшееся им явление в толстых пленках: *«Солнце светило в мою затемненную комнату через отверстие в 1/3 дюйма. Я заставлял падать световой луч отвесно на стеклянное зеркало, вогнутое с одной стороны и выпуклое с другой, отшлифованное соответственно шару радиусом 5 футов 11 дюймов и амальгамированное с выпуклой стороны. Я помещал в центре шара непрозрачную бумагу таким образом, что луч проходил к зеркалу через небольшое отверстие в середине бумаги и отражался от зеркала к тому же месту; при этом я наблюдал на бумаге 4 или 5 радужных колец, окружавших отверстие... По мере уширения этих колец они становились более расплывчатыми и слабыми, так что пятое кольцо было едва видно...»*.

В своих опытах Ньютон всегда соблюдал точность и вел постоянный количественный учет, которые проявились особенно четко при изучении интерференционных колец. С.И. Вавилов писал: *«Чтение второй книги "Оптики" поэтому до сих пор - лучшее введение в искусство эксперимента. Речь идет об установлении эмпирических закономерностей в совершенно новой, достаточно таинственной в то время области; не было и признака теории, которая могла бы подсказывать цифры. Цифры Ньютона должны были выдержать испытание теории только 150 лет позднее, и выдержали они его блестяще»*¹⁵ [87]. Экспериментальная часть книги И. Ньютона выдержала испытание временем и осталась основой современной физической оптики. Научно-популярное представление Ньютона, как блестящего экспериментатора, и влияние работ Ньютона на дальнейшее развитие оптики рассмотрены в книге Е.И. Погребысской [88].

Экспериментальным путем Ньютон открыл периодичность в свойствах света, количественно изучил явление интерференции и установил сложность белого цвета для объяснения наблюдаемых цветных дифракционных полос. Ньютон пропускал в темную комнату солнечный луч через отверстие диаметром в 1/42 дюйма (0,6 мм). На расстоянии 12 футов помещался человеческий волос

¹⁵ «Оптика» И. Ньютона переведена на русский язык академиком С.И. Вавиловым и издана в 1927 году.

толщиною $1/280$ дюйма (0,09 мм). Тень волоса принималась на расстоянии 4 дюймов от волоса. Тень оказалась значительно шире, чем следовало бы из прямолинейности распространения света; кроме того, по обеим сторонам тени обнаружились три цветных полосы с синей каймой внутрь и красной наружу. Для объяснения этих цветных полос Ньютон произвел опыт в однородном цвете, причем полосы по краям тени оказались одноцветными, светлыми и темными; расстояние между полосами менялось при изменении цвета, Ньютон доказал далее, что дифракция происходит одинаково, находится ли волос в воздухе, или между стеклами. Вещество дифрагирующего тела не влияет на характер явления. Ньютон повторил и опыт Гука, заставляя широкий пучок света проходить мимо острого края ножа, и в этом случае обнаружились дифракционные полосы.

«Производя эти наблюдения, – заключает Ньютон описание своих опытов, – я намеревался повторить их с большей точностью и тщательностью и поставить новые опыты... Однако в те времена я был прерван в моей работе, а теперь не имею возможности приняться вновь за исследования. Оставляя эту часть моей работы незаконченной, я хочу в заключение предложить только некоторые вопросы для того, чтобы другие могли последовать данному предмет дальше».

Дифракционные явления, нарушение прямолинейности распространения света – самый сильный аргумент в пользу волновой теории света. Во времена Ньютона защитники волновой теории – Гюйгенс и Гук – этого совершенно не понимали. Гюйгенс пытался даже доказать, что по теории волн дифракции не существует. С другой стороны, для теории истечения явления огибания были немалым затруднением. Для объяснения огибания Ньютон мог выставить только следующее предположение: *«Не действуют ли тела на свет уже на некотором расстоянии, загибая световые лучи? И не будет ли это действие при прочих равных обстоятельствах тем сильнее, чем меньше расстояние?»*

В следующих вопросах Ньютон собрал аргументы против волновой теории света. Главный аргумент – прямолинейность распространения света. В форме вопроса он пытается изложить корпускулярную точку зрения на природу света: *“Не являются ли световые лучи очень небольшими телами, посылаемыми светящимся веществом?... Прозрачные вещества действуют на некотором расстоянии на световые лучи, преломляя их, отражая и заставляя загибаться; лучи же в свою очередь действуют на вещество, приводя на расстоянии его части в колебательные движения и нагревая его. Эти действия и противодействия в высшей степени похожи на проявления силы притяжения между телами».*

Для объяснения цветов тонких пластинок им выдвигается гипотеза о колебаниях, возбуждаемых световыми частицами в веществе. Явления двойного преломления приводят к предположению о том, что у световых частиц имеется нечто вроде магнитных полюсов (поляризация), притягиваемых или отталкиваемых частицами кристалла [87].

«Ньютон соединял в себе качества гениального экспериментатора, теоретика и математика» – писал Вавилов. Качества Ньютона-экспериментатора характеризует процесс изготовления им несферических стекол, к которому он приступил в 1666 году. Сначала он убедился в том, что главные ошибки в изображении получаются не от сферической аберрации, а от радужного окаймления, неизбежно сопровождающего изображение точки как в сферических, так и в несферических линзах. В результате упорного труда и опытов над изготовлением сплавов и над полировкой металлических поверхностей Ньютону спустя два года удалось построить первую модель телескопа-рефлектора, с помощью которого можно было видеть спутники Юпитера. Однако вследствие несовершенства сплава, из которого было изготовлено зеркало, и неудовлетворительной полировки, изображения были тусклыми и размытыми. Много лет спустя в своей «Оптике» Ньютон подробно описал выработанный им способ полировки металла для зеркала: *«Полировка, которой я пользовался, была такого рода. Я имел две круглых медных пластинки, шесть дюймов в диаметре каждая, одну выпуклую, другую вогнутую, точно притертые одна к другой. К выпуклой пластинке я притирал металл объектива, или вогнутое зеркало, которое нужно было полировать до тех пор, пока оно принимало форму выпуклой пластинки и было готово к полировке. Затем я покрывал выпуклый металл очень тонким слоем смолы, капая расплавленной смолой на металл и нагревая его; чтобы сохранить смолу мягкой, в это время я притирал ее вогнутой медной пластинкой, смоченной для того, чтобы распределить смолу поровну по всей поверхности... Затем я брал очень тонкую золу, отмытую от больших частиц, и, положив немного ее на смолу, притирал к смоле вогнутой медью до тех пор, пока не прекращался шорох; после этого я притирал быстрым движением металл объектива к смоле в течение двух или трех минут, сильно на него нажимая. Далее, я насыпал на смолу свежей золы, притирал ее снова до исчезновения шума и после этого, как и прежде, притирал объективный металл. Эту работу я повторял до тех пор, пока металл не отполировался, притирая его напоследок со всей моей силой в течение изрядного времени и часто дыша на смолу для того, чтобы держать ее сырой, не подсыпая свежей золы»*.

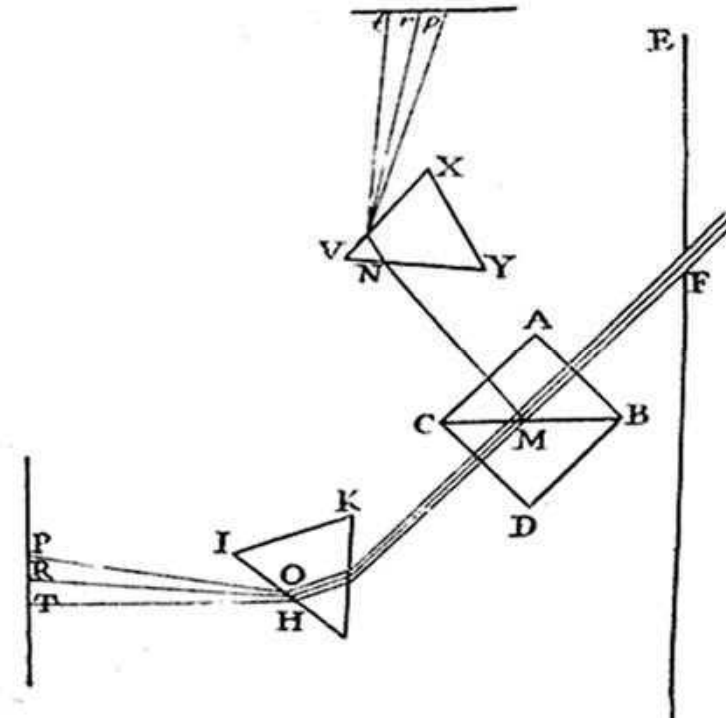


Рис. 96. Схема опыта Ньютона с разделением белого луча на две спектрально взаимно дополняющие части. Рисунок из «Оптики»

Далее, за этими двумя призмами я ставил третью, преломлявшую выходящий свет; посредством такого преломления на противоположной стене отбрасывались обычные цвета призмы. Я вращал затем параллелепипед вокруг его оси. и нашел, что в том случае, когда соприкасающиеся грани двух призм становились настолько наклонными к падающим лучам, что все лучи начинали от них отражаться, то лучи, претерпевающие в третьей призме наибольшее преломление и освещающие стену фиолетовым и синим светом, исчезали первыми, благодаря полному отражению из проходящего света; остальные же лучи оставались и окрашивали бумагу в свои цвета - зеленый, желтый, оранжевый и красный, как прежде; при дальнейшем вращении двух призм исчезали остальные лучи по порядку, также вследствие полного отражения, соответственно их степеням преломляемости.

Следовательно, свет, выходящий из двух призм, складывается из лучей различной преломляемости, в виду того, что более преломляемые лучи могут быть от него отняты, менее же преломляемые остаются. Но этот свет, проходящий только через параллельные поверхности двух призм, если и претерпевает какие-либо изменения на одной поверхности вследствие преломления, то теряет их при обратном преломлении на другой поверхности и, восстанавливаясь таким образом в своем первоначальном строении, приобретает ту же природу и свойства, как вначале, до падения на призму: поэтому и до падения свет также был составлен из лучей различной преломляемости, как и после».

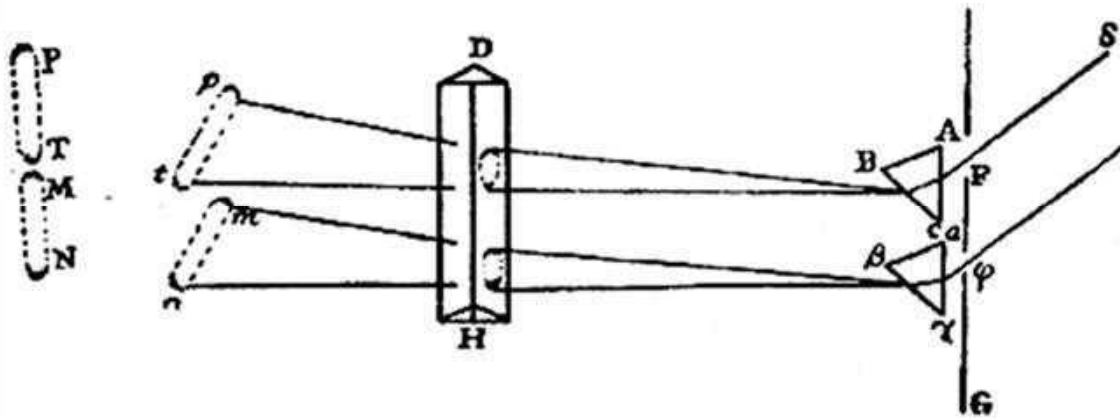


Рис. 97. Схема опыта Ньютона со скрещенными призмами

Для доказательства сложности состава солнечного света из лучей разной преломляемости Ньютон описывает такой опыт.

«Я пропускал солнечный свет в темную комнату через два малых круглых отверстия **F** и **φ** (рис. 97), сделанных в окне, и две параллельные призмы **ABC** и **αβγ**, помещенные около отверстий (рядом); они преломляли два пучка света к противоположной стене комнаты таким образом, что два спектра **PT** и **MN**, отбрасываемые на стене, соприкасались концами и лежали на одной прямой, причем красный конец **T** одного изображения прикасался к синему концу **M** другого. Если поместить третью призму **DN** на-крест к двум первым, то два преломленных луча преломлялись в сторону; спектры **pt** и **mn** не лежат уже на одной прямой линии, соприкасаясь концами, как прежде, но расходятся один от другого и становятся параллельными».

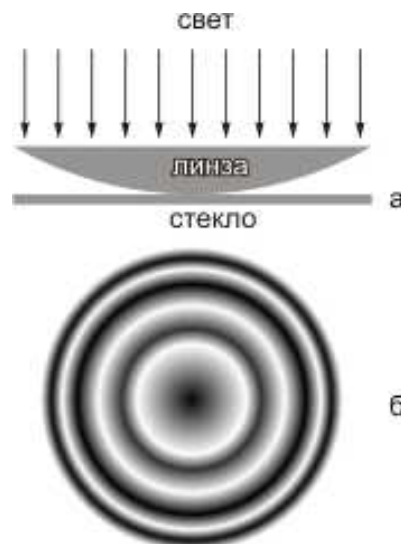


Рис. 98. Схема наблюдения колец Ньютона в отраженном свете

Метод скрещенных призм, придуманный Ньютоном, постоянно применяется оптиками и поныне. Направляя свет вертикально вниз на лежащую

на стекле линзу, Ньютон наблюдал в отраженном свете отчетливые цветные кольца, названные впоследствии «кольцами Ньютона» (рис. 94). Сам Ньютон не смог объяснить природу «колец Ньютона»: в рамках построенной им корпускулярной теории света этому опыту просто нет объяснения, так как он противоречит корпускулярной теории. Но Ньютон был настолько убежден в справедливости корпускулярной теории света, что даже поставленный им самим опыт не смог поколебать этой уверенности.

3.2. Опыты Юнга и объяснение колец Ньютона

Объяснить «кольца Ньютона» долгое время не удавалось никому из ученых, хотя этот простой и красивый опыт с успехом повторяли больше ста лет. Разгадку «колец Ньютона» нашел английский ученый Томас Юнг (1773–1829) в начале XIX века. Он догадался, что «кольца Ньютона» являются результатом интерференции световых волн, отраженных от нижней поверхности линзы и поверхности лежащего под линзой стекла. Там, где волны усиливают друг друга, наблюдаются светлые кольца, а там, где они гасят друг друга – темные кольца.

Юнг занялся исследованием акустических и оптических явлений (интерес к акустике был вызван любовью к музыке). Аналогия между многими явлениями оптики и акустики убедила его в справедливости волновых представлений о природе света. Эти результаты наблюдений Юнг изложил в работе «Исследования и проблемы звука и света» (1800), где подверг критике корпускулярную теорию света и с точки зрения волновой теории впервые рассмотрел проблему суперпозиции волн. Он сформулировал принцип суперпозиции волн, который гласит: *«световые колебания распространяются в эфире от различных источников, не мешая друг другу»*. На основании этого принципа Юнг установил следующий закон: *«Везде, где части одного и того же света попадают в глаз по разным направлениям, свет становится или более сильным, где разность путей есть целое кратное некоторой длины, и наименее сильным в промежуточных состояниях... и эта длина различна для света различных цветов»*. Все это Юнг подтвердил на известном опыте, освещая светом из небольшого отверстия в ставне экран с двумя маленькими отверстиями, проколотыми булавкой. Этот опыт сейчас называется «опытом Юнга» (рис. 99). Измеряя ширину полос, полученных на экране, Юнг впервые определил длину световой волны и ввел понятие длины волны. Он доказал также волновую природу ультрафиолетовых лучей, открытых в 1802 году.

В 1801 году Т. Юнг сформулировал принцип интерференции и продемонстрировал его эффективность в ряде работ. Он же впервые и ввел это название (от латинских слов интер – взаимно и ферио – ударяю). Видимо, интерференцию Юнг открыл, наблюдая это явление для водяных волн. Во всяком случае, описывая это явление, он рассматривал именно водяные волны. Он писал: *«Представим себе, что некоторое количество одинаковых водяных волн движется по поверхности гладкого озера с некоторой постоянной*

скоростью и попадает в узкий канал, выходящий из озера. Представим себе также, что под действием другой причины образовался такой же ряд волн, который, как и первый, доходит до этого канала с той же скоростью. Ни один из этих рядов не разрушит другого, а их действия соединятся. Если они вступают в канал так, что гребни одного ряда совпадают с гребнями другого, то образуется ряд волн с увеличенными гребнями. Но если гребни одного ряда будут соответствовать впадинам другого, то они в точности заполнят эти впадины и поверхность воды останется гладкой. Я полагаю, что подобные эффекты имеют место всякий раз, когда подобным образом смешиваются две части света. Это явление я называю законом интерференции света».

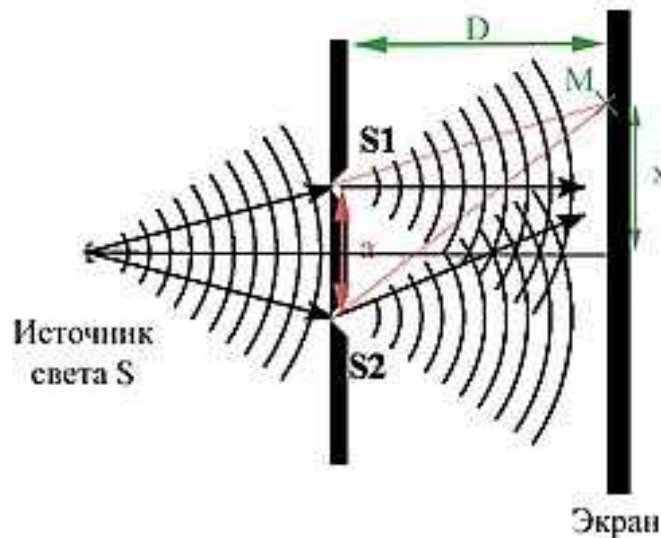


Рис. 99. Схема опыта Юнга

Открытие Юнга стало началом развития волновой оптики. Свою теорию Юнг применил, прежде всего, для объяснения цветов тонких пленок и колец Ньютона. Кольца возникали в отраженном свете в результате интерференции двух лучей света, отраженных в воздушной прослойке между линзой и стеклянной пластинкой от их поверхностей. Толщина прослойки влияет на усиление либо гашение лучами друг друга, в результате получаются светлое и темное кольца. Если установку освещает белый свет, будут наблюдаться цветные кольца. По расположению колец для разных цветов можно подсчитать длину волны соответствующих цветных лучей. На основании сделанных Ньютоном измерений зазоров между кольцами (к тому же достаточно точных), Юнг вычислил длину волны для разных участков спектра.

В докладе «Теория света и цветов»¹⁶, прочитанном в 1801 году в Лондонском Королевском обществе, Юнг не только изложил все вышеупомянутые проблемы, но и распространил принцип интерференции на инфракрасные и ультрафиолетовые лучи. В специальном опыте по

¹⁶ Перевод этого доклада на русский язык в кн.: Голин Г.М., Филонович С.Р. Классики физической науки: М.: Высш. шк., 1989. С.287-291.

интерференции света, проведенном Юнгом, наблюдается также и явление дифракции света. Если одно из двух отверстий закрыть пальцем, то на экране видны дифракционные кольца, образованные при прохождении света через малое отверстие.

В 1803 году Юнг дополнил свою теорию цветов тонких пластинок указанием на то, что при отражении луча от более плотной среды он «теряет» полволны. Этим и объясняется темное пятно, находящееся в центре системы колец Ньютона.

Основные результаты исследований и наблюдений были подытожены в фундаментальном труде «Курс лекций по натуральной философии», два тома которого были изданы в 1807 году. Курс был подготовлен на основе лекций, прочитанных Юнгом в 1802-1803 годах в бытность его на посту профессора Королевского института в Лондоне, и содержал обширный научный материал. В частности, в «Курсе» впервые был употреблен термин «энергия» и рассмотрен модуль упругости, который известен под названием «модуль Юнга». Там же ученый впервые высказал идею цветного видения, которая основывалась на допущении, что в сетчатке глаза имеются три вида чувствительных волокон, которые реагируют на три основных цвета – красный, синий и желтый.

3.3. Открытие поляризации света

В 1808 году французский инженер, физик Этьен Луи Малюс (1775–1812) наблюдал возникновение поляризации света при отражении от прозрачных сред (стекла, воды и других). Он обнаружил это явление случайно, рассматривая сквозь пластинку исландского шпата отблеск солнца в окнах Люксембургского дворца. После прохождения сквозь пластинку лучи существенно теряют свою интенсивность. Затем он повторил наблюдение при отражении света свечи от прозрачных тел. Исходя из ньютоновской гипотезы об асимметрии световых частиц, Малюс впервые ввел термин «поляризация», понимая под ним одинаковую ориентацию «полюсов» этих частиц в луче. В обычном свете полюсы разных частиц направлены хаотично, при поляризации остаются лишь частицы света с определенными направлениями полюсов.

Явление поляризации света при отражении свойственно только диэлектрическим отражающим поверхностям – стеклу, воде, различным пластмассам, но не свойственно проводникам. В частности, свет, отраженный от металлического зеркального слоя, сохраняет свою поляризацию.

Малюс получил два фундаментальных результата, касающихся поляризации: во-первых, это закон, носящий его имя, а во-вторых, это так называемый *угол поляризации* (угол Малюса–Брюстера). Закон Малюса описывает наблюдаемую интенсивность линейно поляризованного света, прошедшего через идеальный поляризатор, которая равна

$$I(\theta) = I_0 \cos^2 \theta$$

где I_0 – интенсивность падающего света, θ – угол между плоскостью поляризатора и плоскостью поляризации падающего света. Идеальный

поляризатор – это система, которая пропускает одну из двух поляризаций падающего на него света без изменений, а перпендикулярную ей полностью поглощает. Такой прибор можно построить из кристалла исландского шпата, поставив непрозрачный экран на пути одного из двух лучей внутри него. На усовершенствовании данного принципа построена так называемая призма Николя (изобретена шотландским физиком Уильмом Николем (1768–1851) в 1828 году), которая в XX веке была вытеснена более простыми и дешевыми поляроидами.

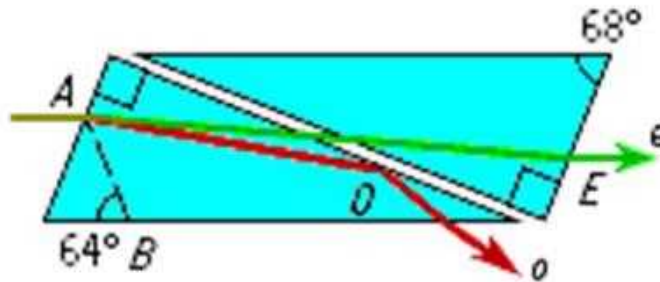


Рис.100. Призма Николя

На рисунке 100 изображена призма Николя: две прямоугольные призмы из исландского шпата с оптической осью AB , склеены своими катетами с помощью канадского бальзама, имеющего показатель преломления больше, чем у исландского шпата. Угловые параметры николя подбираются таким образом, что после двойного лучепреломления обыкновенный луч (обозначен буквой o) испытывает полное внутреннее отражение от границы «шпат-канадский бальзам». Необыкновенный луч (e), составляющий с этой границей больший угол, проходит в слой бальзама, а из него – во вторую призму. В итоге для необыкновенного луча с поляризацией в плоскости рисунка николь выглядит как плоскопараллельная пластина, а для луча, поляризованного перпендикулярно этой плоскости – как зеркало.

3.4. Опыты Френеля

Французский инженер Огюстен Жан Френель (1788–1827) начал свои исследования оптических явлений с изучения интерференции. Взяв за основу принцип Гюйгенса для построения фронта механических волн, он дополнил его принципом интерференции. Так в физике появился принцип Гюйгенса-Френеля. Суть этого принципа состоит в том, что для определения освещенности какой-либо точки экрана надо светящуюся поверхность разбить на элементарные площадки и рассматривать их действие в данной точке экрана с учетом разности хода волн. На основе этого принципа Френель объяснил прямолинейное распространение света, законы отражения и преломления.

Прочитав работу Френеля, французский физик, астроном Франсуа Араго (1786–1853) написал ему о том, что принцип интерференции ранее уже был

сформулирован Томасом Юнгом. В ответном письме в сентябре 1815 года Френель сообщил, что, совершенно не зная английского языка (и, следовательно, не читая работ Юнга), он заново «открыл» закон интерференции, добавив к опытам английского ученого несколько новых и среди них – опыт с «бизеркалами Френеля».

Экспериментальные исследования Френеля отличались точностью и тщательностью, и были осуществлены в исключительно скромных технических условиях. Немецкий физик Кирхгоф писал: *«Поистине Френель в высшей степени обладал искусством, которого требовал от физика Веньямин Франклин: уметь пилить надфилем и шлифовать пилой»* [89. С.17]. Например, Френелю для проверки дифракционной картины требовался микрометр для точного измерения расстояний между дифракционными полосами. Френель пишет: *«Для выполнения опытов я построил себе микрометр, при помощи которого имел возможность измерить ширину тени с точностью по меньшей мере до одной сороковой миллиметра. Этот микрометр состоит из двух шелковых нитей, исходящих из одной и той же точки и заканчивающихся в двух точках, удаленных друг от друга на пять миллиметров. Я разглядываю тень через очень сильную лупу таким образом, чтобы нити микрометра находились в фокусе лупы и представлялись резко отделенными от каемок. Маленький передвижной картонный указатель служит мне для того, чтобы отмечать то место, где расстояние между нитями равно ширине тени. Рамка, на которой находятся нити, разделена на миллиметры по длине, и, таким образом, я могу судить о расстоянии между точкой схождения нитей и указателем с точностью до одного миллиметра... При помощи этого микрометра, несмотря на его несовершенство, я получил результаты, которые настолько хорошо совпадают с вычислениями, что не остается никаких сомнений в отношении правильности формул, положенных в основу этих расчетов»* [90. С.25].

В начале 1817 года Парижская Академия наук объявила конкурс на лучшую работу по дифракции. По результатам исследований Френель написал работу «Заметка о теории дифракции» и в апреле 1818 года представил ее в Академию. Работа поступила под девизом: «Природа проста и плодотворна», написанном на конверте. Когда комиссия рассматривала ее, знаменитый математик и физик С.Д. Пуассон (1781–1840) заметил, что из предлагаемой теории должен следовать странный вывод: в центре тени от непрозрачного круглого препятствия должно быть светлое пятно. Чтобы проверить этот неожиданный вывод, Араго тут же поставил опыт, и предсказание подтвердилось. Этот опыт вошел в историю науки как «пятно Пуассона» (рис.101). Так предубеждение Пуассона против теории Френеля превратилось в одно из доказательств ее справедливости.

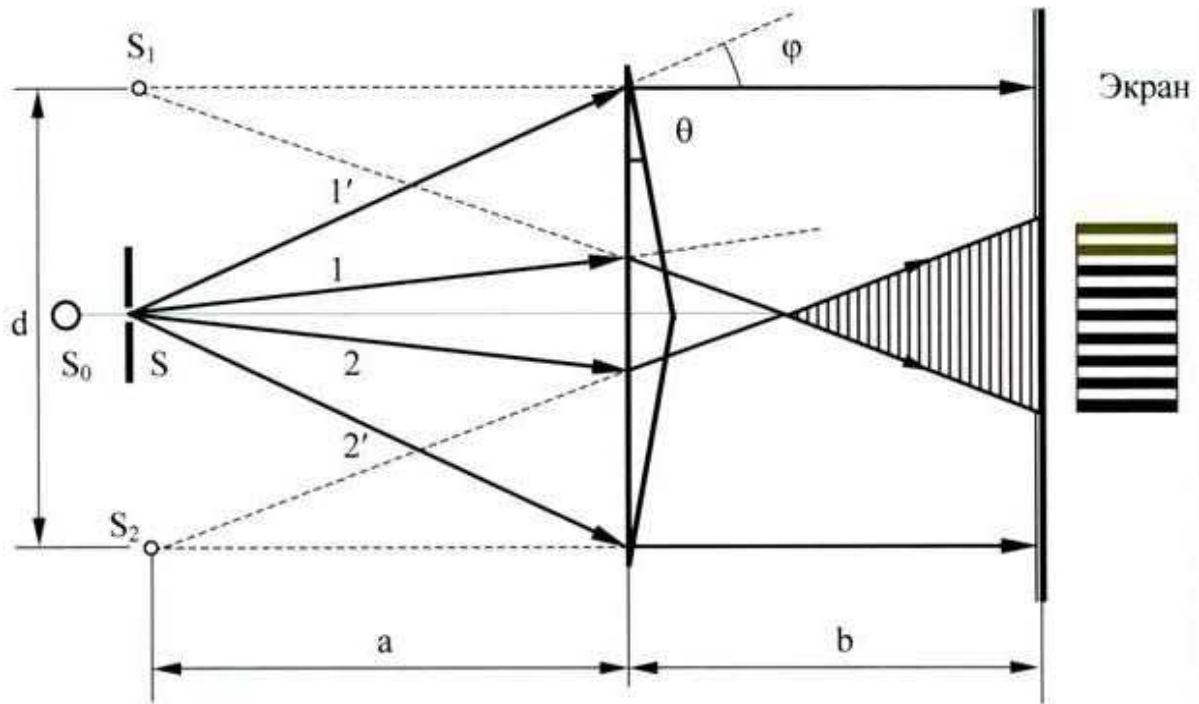


Рис.102. Изучение интерференции с помощью бипризмы Френеля

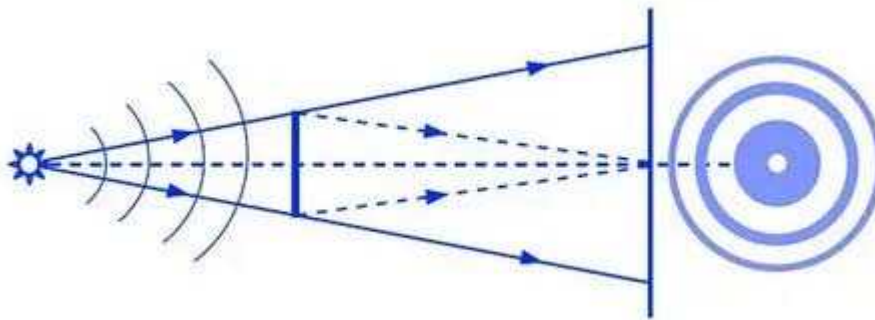


Рис.101. Пятно Пуассона при наблюдении дифракции на непрозрачном диске

Кроме того, в этой работе Френель изложил ряд случаев интерференции света, которые исследовал. В частности, он описал опыт по интерференции света при прохождении через две соединенные вместе призмы – так называемую бипризму Френеля (рис. 102). С помощью этого опыта Френель определил длину волны для красного света, и она получилась равной длине волны для красного света, определенной из других опытов. Совпадение расчетов Френеля с опытными данными было очень хорошим.

Еще в 1816 году Френель писал, что для объяснения явления поляризации света волновая теория должна быть видоизменена; это видоизменение состоит в принятии предположения о поперечном направлении движения световых волн. К такому же мнению в последние годы жизни пришел и Юнг, что отражено в его письмах к Френелю. Однако Френель не торопился публиковать это мнение, предвидя большие трудности согласования его с механикой упругих сред. Он создает свою теорию поляризации и двойного лучепреломления.

Предвосхищая многие идеи теории упругости, Френель смог благодаря своей физической интуиции дать теорию явлений отражения, преломления и полного внутреннего отражения, объяснив эмпирически найденные законы Малюса и Брюстера. Он предложил фундаментальные идеи в области кристаллооптики, которые используются и сейчас.

Среди важнейших результатов, полученных Френелем, редко упоминается работа по созданию новой оптической системы маяка со ступенчатыми линзами. Линза, предложенная в 1819 году Френелем, не имела таких недостатков обычных линз, как: поглощение света массой стекла, неправильное преломление лучей вследствие неравномерной плотности оптического стекла, значительный вес (для маяка). Линза Френеля состояла из отдельных примыкающих друг к другу концентрических колец небольшой толщины, которые имели в сечении форму призм специального профиля. Благодаря конструкции система в целом даже при большом угле охвата имела небольшую толщину, а следовательно, небольшой вес и малое поглощение [91].

3.5. Развитие метода оптической спектроскопии

Начало развития метода спектроскопии, позволяющего изучать спектральный состав излучения, связано с работами немецкого физика Иозефа Фраунгофера (1787–1826). Ученый редкого экспериментаторского дарования и физической интуиции он начал как шлифовальщик оптических стекол и пришел к точным оптическим измерениям. Фраунгофер изобрел механизмы и измерительные инструменты для вращения и полировки линз, нашел метод определения формы линз, усовершенствовал ахроматический телескоп, изготовил дифракционные решетки, ввел их в практику спектроскопических исследований. Он открыл существование темных линий в солнечном спектре (они вошли в физику под названием фраунгоферовых линий) и начал их количественное исследование. С помощью своего спектрографа и дифракционных решеток Фраунгофер произвел первые точные измерения длин волн спектральных линий и уточнил значения показателей преломления различных веществ. Особенное внимание привлекла линия, обнаруженная в желтой части спектров множества излучателей. Она получила специальное название Д-линии. В 1815 году Фраунгофер сделал открытие, важность которого была осознана позже, положение светлой Д-линии спектра пламени масляной горелки совпадает с положением темной (фраунгоферовой) линии солнечного спектра. Он же установил факт тождественности спектров, полученных от Луны и планет, и их отличие от спектров звезд.

Представим в хронологическом порядке основные экспериментальные исследования в области оптической спектроскопии, последовавшие после И. Фраунгофера.

В 1834 году Фокс Тальбот (1800–1877) – один из изобретателей фотографии – после многочисленных исследований спектра пламени спирта, в котором были растворены различные соли, пришел к следующему заключению:

"Когда в спектре пламени появляются какие-нибудь определенные линии, они характеризуют металл, содержащийся в пламени". Так появилась первая мысль, что оптический анализ дает возможность определить химический состав излучающего вещества.

В 1835 г. Ч. Уитстон (1802–1875), исследуя спектр электрической искры, подтверждает мысль Тальбота: линии спектра зависят только от качества электродов, причем для каждого материала характерен свой спектр.

В 1849 г. Л. Фуко установил совпадение длин волн фраунгоферовой Д-линии и желтой линии в спектре натрия.

В 1853 г. А. Ангстрем (1814–1874) показал, что излучение раскаленного газа имеет такую же преломляемость, как и излучение, поглощаемое этим газом; понижая давление газа, можно получить характерный для него спектр излучения.

В 1857 году В. Сван установил, что в спектре каждого вещества можно указать некоторую характеристическую линию с неизменным положением.

После накопления экспериментальных результатов последовал теоретический анализ, приведший к их обобщению в единый закон природы. Это было сделано великим немецким физиком Густавом Робертом Кирхгофом (1824–1887) (рис. 103).



Рис. 103. Г.Р. Кирхгоф

Кирхгоф был выдающимся теоретиком и экспериментатором. Он получил фундаментальные результаты во многих областях физики, но особенную известность приобрел открытый им принцип спектрального анализа. Кирхгоф впервые увидел в пестром многообразии экспериментальных фактов действие единого закона природы. Начало было положено разгадкой происхождения фраунгоферовых линий, для чего Кирхгоф поставил следующий эксперимент: через спектроскоп наблюдал темную фраунгоферову Д-линию солнечного излучения (внешний вид спектроскопа, прибора для разделения светового или любого другого излучения на его составляющие, имеющие различные длины волн, показан на рис. 104). Далее перед щелью спектроскопа помещал пламя горелки с поваренной солью. Солнечный свет, прежде чем попасть в

спектроскоп, проходил через пары натрия. При этом на месте темной линии появлялась яркая желтая линия. Так было открыто явление, которое вошло в физику под названием эффекта обращения спектральных линий. Кирхгоф дал следующее объяснение эффекту обращения. В составе солнечного излучения имеется компонента, принадлежащая излучению натрия. При прохождении через атмосферу Земли она поглощается, и в спектре на месте желтой линии появляется провал – темная линия. При прохождении через пары натрия солнечное излучение снова обогащается желтой компонентой, и Д-линия становится яркой. Отсюда решающий шаг к принципу спектрального анализа. В работе "О фраунгоферовых линиях" (1859) Кирхгоф писал: *"Я заключаю, что темные линии солнечного спектра, которые не вызваны земной атмосферой, возникают благодаря присутствию в раскаленной солнечной атмосфере тех веществ, которые в спектре пламени дают яркие линии на месте темных линий солнечного спектра. Следует допустить, что яркие линии спектра, совпадающие с Д-линиями солнечного спектра, обусловлены присутствием натрия в пламени; темные Д-линии солнечного спектра позволяют поэтому заключить, что натрий находится в солнечной атмосфере. Брюстер нашел в спектре пламени селитры линии на месте фраунгоферовых линий А и В; эти линии указывают на присутствие калия в солнечной атмосфере. Из моего наблюдения, что красной литиевой полоске не соответствует в спектре Солнца никакой темной линии, с вероятностью следует, что литий в солнечной атмосфере отсутствует или встречается в относительно малых количествах"*.



Рис. 104. Внешний вид спектроскопа

Кирхгоф установил соответствие между спектром и качеством излучающего источника. Открывалась поразительная возможность анализа источника излучения, причем можно было не рассматривать вопрос о механизме излучения.

Хотя уже было известно о существовании связи между спектром и химическим составом излучающего вещества, никто еще не доказал, что эта

связь универсальна и дает всегда однозначный результат, например, что в случае наличия натрия в излучающем веществе любого состава спектр последнего должен содержать линии натрия независимо от качества пламени, которое возбуждает его свечение. Здесь нужна была кропотливая экспериментаторская работа.

Кирхгоф и Бунзен провели совместно большой цикл исследований спектров щелочных и щелочно-земельных металлов и в середине 1860 г. могли уже заключить: *"Разнообразие соединений, в которые входили металлы, разнообразие химических процессов, происходивших в различных пламенах, и огромный интервал температур – все это не оказывает никакого влияния на положение спектральных линий отдельных металлов"*.

Была установлена фантастическая чувствительность нового метода химического анализа. Прибор обнаруживал присутствие в смеси ничтожного количества примесей. Было открыто существование двух новых щелочных металлов – рубидия и цезия.

В работе "Исследование солнечного спектра и анализ солнечной атмосферы" (1861 г.), выполненной с усовершенствованным спектроскопом, Кирхгоф установил совпадение линий ряда химических элементов с фраунгоферовыми линиями спектра и получил возможность говорить о начале химического анализа Солнца и звезд.

3.6. Давление света

Давление света – это давление, которое оказывает световое излучение, падающее на поверхность тела. Впервые представление о световом давлении сформулировал И. Кеплер (1571–1630), когда он наблюдал за кометой и обнаружил, что ее хвост всегда направлен в сторону Солнца. Предполагали, что возможная причина этого явления – существование механического давления света.

В 1862 году Дж. К. Максвелл предположил, что электромагнитное излучение обладает импульсом. Впервые Максвелл на основании своей электромагнитной теории света вычислил теоретическое значение давления света, равное, для случая падения света на вполне поглощающую поверхность, частному от деления энергии света, приходящей в секунду, на скорость света. Для солнечного света, падающего на земную поверхность, это давление приблизительно равно пяти стомиллионным долям грамма на квадратный сантиметр.

Экспериментальное доказательство существования светового давления было получено русским физиком-экспериментатором П.Н. Лебедевым (1866–1912) в 1901 году [9]. В своих опытах он установил, что давление света зависит от интенсивности света и от отражающей способности тела.

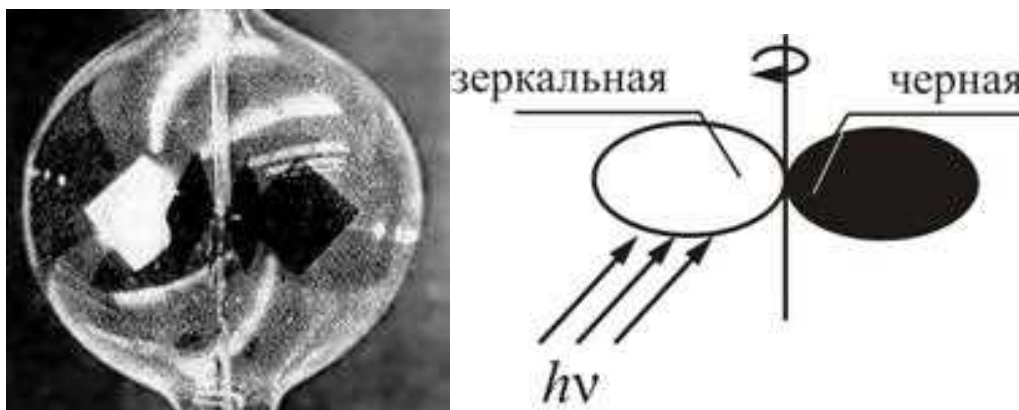


Рис. 105. Вертушка в опытах Лебедева

В опытах Лебедева была использована вертушка – легкий стержень на тонкой стеклянной нити, по краям которой прикреплялись черные и зеркальные лепестки (крылышки), помещенная в вакуумированную колбу (рис. 105). Свет от вольтовой дуги падает на крылышки, расположенные по одну сторону стерженька. О значении давления можно судить по углу закручивания нити. Трудность точного измерения давления света была связана с тем, что из сосуда невозможно было выкачать весь воздух. При проведении эксперимента начиналось движение молекул воздуха, вызванное неодинаковым нагревом крылышек и стенок сосуда (рис. 106). Крылышки невозможно повесить абсолютно вертикально. Нагретые потоки воздуха поднимаются вверх, действуют на крылышки, что приводит к возникновению дополнительных вращающих моментов. Также на закручивание нити влияет неоднородный нагрев сторон крылышек. Сторона, обращенная к источнику света, нагревается больше, чем противоположная. Молекулы, отражающиеся от более нагретой стороны, передают крылышку больший импульс. Лебедев сумел преодолеть все трудности, несмотря на низкий уровень экспериментальной техники в те времена. Он взял очень большой сосуд и очень тонкие крылышки. Крылышко состояло из двух пар тонких платиновых кружочков. Один из кружочков каждой пары был блестящим с обеих сторон. У других сторон одна сторона была покрыта платиновой чернью. При этом обе пары кружочков различались толщиной. Для исключения конвекционных потоков, Лебедев направлял пучки света на крылышки то с одной, то с другой стороны. Таким образом, силы, действующие на крылышки, уравнивались.

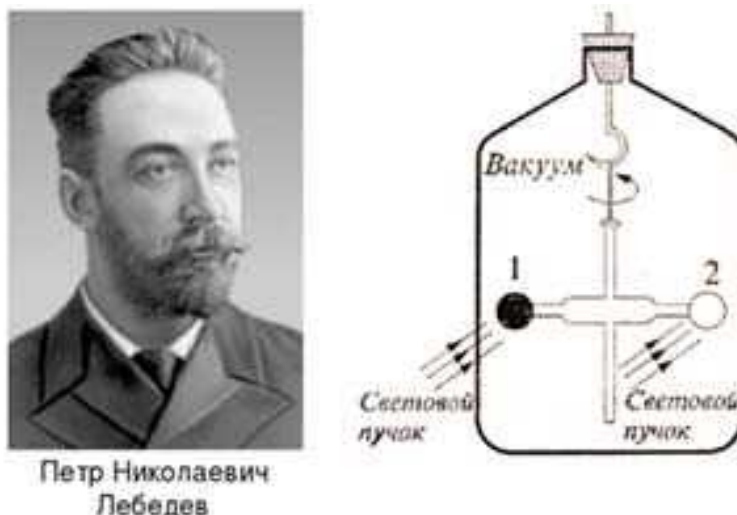


Рис. 106. Схема эксперимента П.Н. Лебедева

Появление квантовой теории света позволило более просто объяснить причину давления света. Фотоны обладают импульсом и при поглощении их телом они передают ему свой импульс. Такое взаимодействие можно рассматривать как абсолютно неупругий удар. Экспериментальные результаты были опубликованы Лебедевым в статье «Опытное исследование светового давления» [20].

Опыты Лебедева можно рассматривать как экспериментальное доказательство того, что фотоны обладают импульсом. Хотя в обычных условиях световое давление очень мало, его действие может оказаться существенным. На основе давления Солнца был разработан парус для космических кораблей, который позволит перемещаться в космосе под давлением света

Разгадка вопроса о световом давлении, однако, ещё не была доведена до конца. Оставались экспериментально необследованными специальные случаи давления эллиптически поляризованного света, а самое главное, ещё не удалось экспериментально обнаружить характер светового давления на отдельную частицу вещества. Это сделал много позднее А. Комптон, наблюдавший элементарный эффект светового давления и рассеяния лучей Рентгена и гамма-лучей на электроны в камере Вильсона. Элементарное световое давление оказалось квантовым, имеющим прерывный характер. Световое давление, измерявшееся П.Н. Лебедевым, было средним статистическим значением давлений в множестве элементарных процессов. П. Н. Лебедеву не пришлось принять участие в раскрытии статистической природы явления [93].

3.7. Определение скорости света

В 1849 году французский физик Ипполит Физо (1819–1896) в ходе опытного наблюдения измерил скорость света. Его экспериментальная установка представлена на рис. 107. Он посылал импульсы света на удаленное

зеркало и измерял время, через которое луч возвращался. Свет разбивался на импульсы следующим образом. Луч проходил сквозь промежутки между выступами на окружности быстро вращающегося диска (зубчатого колеса). При достаточно быстром вращении диска импульс света доходил до зеркала и возвращался обратно как раз за то же время, в течение которого диск поворачивался на небольшой угол – на ширину одного промежутка между выступами. На диске Физо было 720 выступов, и он делал ровно 25 оборотов в секунду (рис.108).

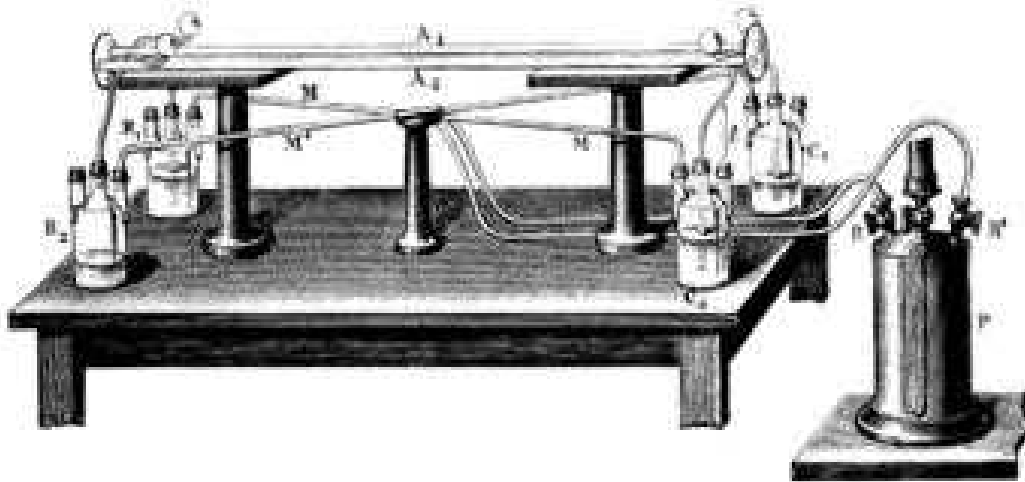


Рис. 107. Установка в опыте Физо

Зная расстояние от источника света до зеркала и обратно, Физо подсчитал скорость света и получил 194000 миль в секунду или 313 247 304 м/с. Миля – мера для измерения расстояния, введенная в Древнем Риме, равна 1482 метра.

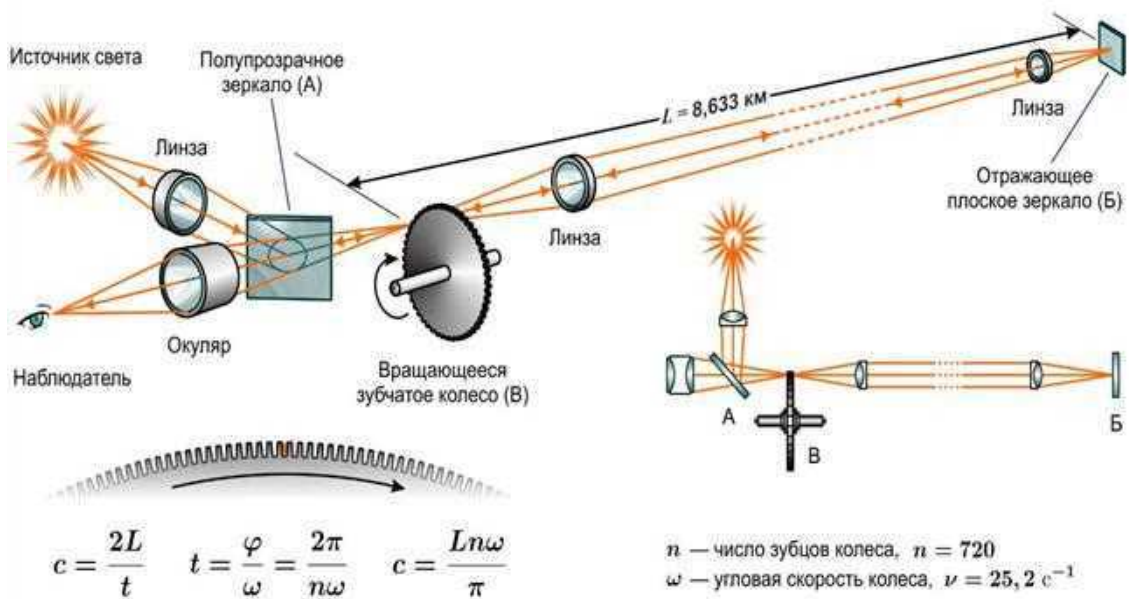


Рис. 108. Измерение скорости света. Опыт Физо [94]

Проблема измерения скорости света приобрела новое, важное значение после появления теории электромагнитного поля Дж. Максвелла, в которой утверждалось, что скорость света в воде должна быть меньше, чем в воздухе. С другой стороны, из теории Ньютона о корпускулярной природе света следовало, что скорость света в воде больше, чем в воздухе. Необходимо было найти способ точного измерения скорости света в любой среде. А. Майкельсон писал: *«Тот факт, что скорость света непостижима для человеческого представления и, с другой стороны, существование принципиальной возможности ее измерения с чрезвычайной точностью, делают эту задачу одной из самых увлекательных проблем, когда-либо стоявших перед исследователем»* [6. С.98].

Американский физик Альберт Абрахам Майкельсон (1852–1931) был известным экспериментатором, изобрел среди прочих точных оптических инструментов интерферометр, прибор, позволивший выполнить прецизионные (с высокой точностью) измерения скорости света. С помощью интерферометра Майкельсона можно с одинаковой легкостью измерить длину одной световой волны и диаметр звезды, которая в 250 раз больше Солнца. Прибор Майкельсона дал А. Эйнштейну первое экспериментальное подтверждение его теории относительности. Майкельсон, будучи офицером военно-морских сил США, заинтересовался экспериментальным измерением скорости света и в 28 лет изобрел свой первый интерферометр. Результат измерения скорости света Майкельсоном составил $299\,895 \pm 30$ километров в секунду, он был опубликован в 1878 году в статье «О методе измерения скорости света». В течение всей своей жизни Майкельсон возвращался к этому измерению, пытаясь бесчисленными способами еще более уточнить результат.

В теории Максвелла утверждалось, что вселенная заполнена веществом, которое называлось эфиром. Все физические теории до опыта Майкельсона основывались на существовании эфира и предполагалось, что свет распространяется в некоторой универсальной среде. Ряд оптических явлений приводил к заключению, что эфир неподвижен или частично увлекается телами при их движении. Майкельсон поставил перед собой задачу экспериментально установить существование эфира. Согласно гипотезе неподвижного эфира, можно наблюдать «эфирный ветер» при движении Земли и скорость света по отношению к Земле должна зависеть от направления светового луча относительно направления ее движения в эфире.

Метод Майкельсона был основан на том же явлении, которое вызывает радужные цвета в тонкой пленке масла на поверхности воды, явлении интерференции. Интерферометр Майкельсона расщеплял луч света надвое, подобно тому, как две поверхности масляной пленки разделяют солнечный луч (рис.109). Майкельсон заставил каждый луч света проходить свой особый путь, а потом соединял их. Если между этими двумя лучами существовала разность хода, то наблюдатель мог видеть интерференционную картину – чередующиеся светлые и темные полосы (рис. 110) или чередующиеся кольца (рис. 111). Так как длина световой волны известна, то можно подсчитать эту неуловимо ничтожную разницу в расстоянии, которое проходил каждый луч.



Рис.109. Внешний вид интерферометра Майкельсона



Рис. 110. Интерференционная картина, полученная при помощи интерферометра зеркалами под углом немного отличающимся от перпендикулярности

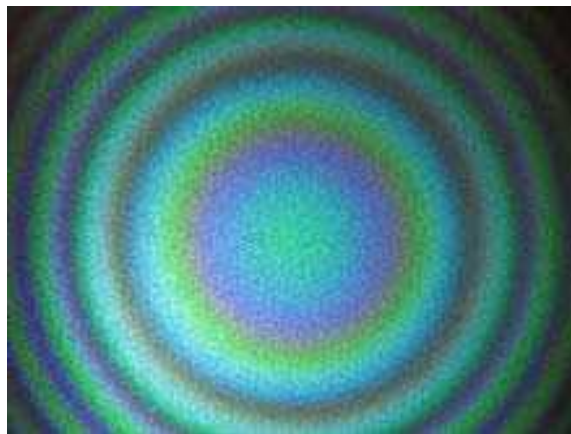


Рис. 111. Интерференционная картина, полученная при помощи интерферометра со строго перпендикулярными зеркалами

Оригинальность идеи Майкельсона заключалась в том, что прежде чем соединить два луча, он направлял их под прямым углом друг к другу. Если один световой луч идет в направлении движения Земли в эфире, а другой направлен под прямым углом, то должна быть заметная разница в расстояниях, пройденных обоими лучами. Для понимания экспериментальной задачи, которую решал Майкельсон, можно представить себе задачу на определение скорости течения реки, в которой один пловец пересекает реку и плывет обратно, а другой проплывает определенное расстояние (равное ширине реки) по течению реки и возвращается обратно. Зная время, затраченное каждым пловцом, можно вычислить скорость течения. Световой эксперимент Майкельсона по наблюдению полос интерференции должен был показать скорость движения эфира по отношению к Земле. Но оба луча в опытах Майкельсона распространялись с одинаковой скоростью. Эти опыты производились им в Берлине в лаборатории Германа фон Гельмгольца. В своей статье в 1881 году Майкельсон высказал смелое по тем временам утверждение: *«Таким образом, показано, что гипотеза о стационарном эфире неверна»*. Хотя важность эксперимента Майкельсона была широко признана, некоторые физики указали на возможные источники ошибок в схеме эксперимента, позволявшие усомниться в правильности выводов.

Для того чтобы сохранить теорию эфира независимо друг от друга Фитцджеральд и Х. Лоренц предложили объяснение полученному Майкельсоном результату. Предметы, движущиеся навстречу эфиру, подобно одной трубке интерферометра, сокращаются в длину вдоль направления своего движения, в зависимости от того, как близко их скорость к величине скорости света. При обычных скоростях сокращение практически равно нулю. При скорости, равной половине скорости света, сокращение может увеличиться до 15%. Теория относительности Эйнштейна (1905 г.) показала, что сокращение Лоренца-Фитцджеральда на самом деле существует, но оно не имеет ничего общего с эфиром. В этой теории отвергалось существование стационарных систем отсчета и абсолютного движения. Эйнштейн ввел совершенно новые постулаты:

- 1) все законы физики одинаковы в системах, движущихся прямолинейно и равномерно по отношению друг к другу, поэтому наблюдатель, находящийся в одной системе, не может обнаружить движения этой системы при помощи наблюдений, сделанных только в ее пределах;
- 2) скорость света в любой системе независима от скорости источника света;
- 3) скорость света независима от относительной скорости источника света и наблюдателя.

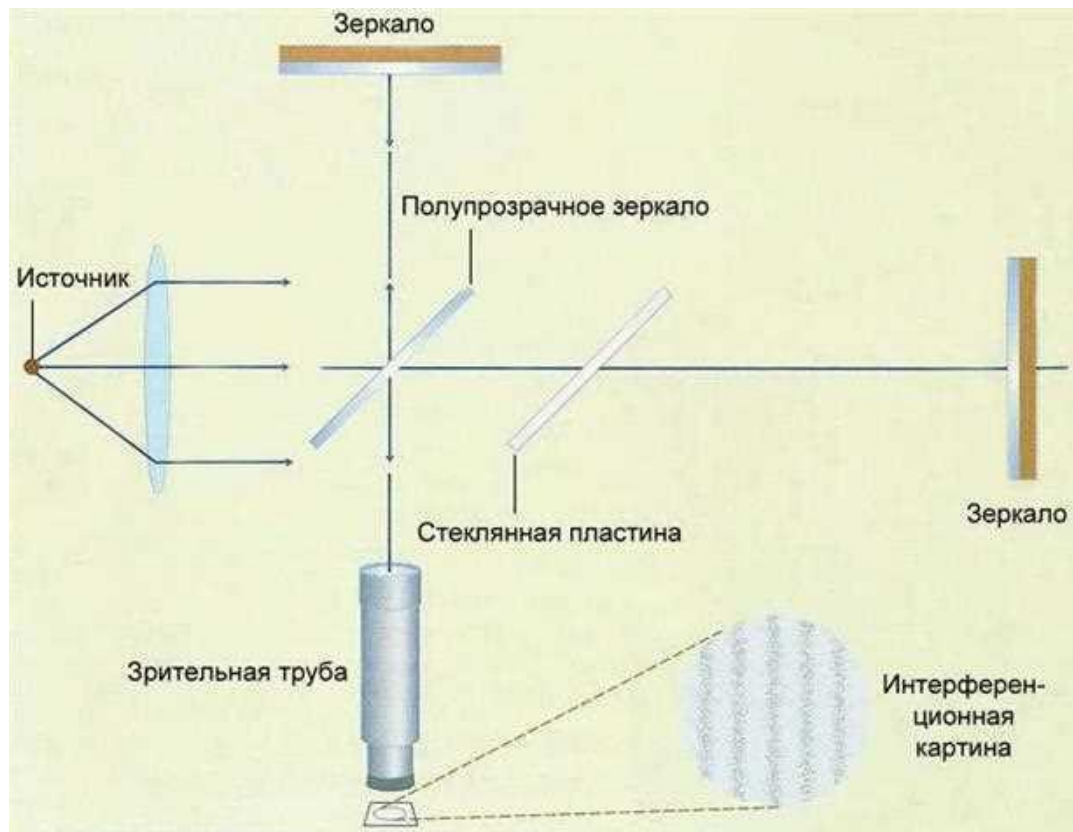


Рис. 112. Усовершенствованный эксперимент Майкельсона-Морли

Усовершенствованный эксперимент Майкельсон проводил совместно с американским физиком и химиком Эдвардом Уильямсом Морли (1838–1923), сотрудничество с которым началось в 1882 году. Суть опыта Майкельсона-Морли, выполненного в 1887 году, не изменилась – световой пучок, собранный при помощи линзы, падал на полупрозрачное зеркало, установленное под углом 45 град. Он делился на два: один луч проникал сквозь делитель, второй уходил в перпендикулярном направлении. Каждый из лучей затем отражался обычным плоским зеркалом, возвращался на светоделитель, после чего попадал в зрительную трубу (рис. 112). Ученые проводили тщательные наблюдения в течение года, вращали плиту, на которой располагалась установка, по часовой и против часовой стрелки, наблюдали интерференционную картину для различных направлений, но при любом положении интерферометра скорость света не менялась. Проверка результатов эксперимента Майкельсона-Морли проводилась и другими учеными, с использованием лазерных источников света и микроволновых резонаторов, но величина скорости света оставалась константой.

Хотя эксперимент Майкельсона – Морли лишь косвенно способствовал становлению специальной теории относительности (в 1905 г. Эйнштейну не было известно о нем), ретроспективно он явился важным ее подтверждением.

4. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

4.1. Определение атмосферного давления

Понятие атмосферного давления связано с именем Г. Галилея. Когда в 1595 г. к нему обратились с просьбой объяснить, почему насосы не могут поднять воду с глубины более 10 м, он привлек известную со времен Аристотеля гипотезу: природа боится пустоты. Боязнью пустоты объясняли многие явления – всасывание, прилипание двух гладко отшлифованных пластинок, поднятие воды в насосах. Эмпирический результат породил проблему, к решению которой Галилей привлек и своих учеников – Эваижелиста Торричелли (1608–1647) и Винченцо Вивiani (1622–1703). Они проделали ставший классическим опыт: стеклянную трубку длиной около 1 м наполнили ртутью и трубку опустили в сосуд с ртутью, предоставив ей опускаться. Столб остановился на высоте 760 мм. Наблюдая за уровнем ртути в трубке, они пришли к объяснению: атмосфера давит на поверхность ртути в сосуде. Поскольку давление столба ртути уравнивает атмосферное давление, а оно может меняться, то уровень ртути тоже изменяется. Отсюда Торричелли вывел, что причиной подъема как воды, так и ртути является вес столба воздуха, давящего на открытую поверхность жидкости. Таким образом был изобретен барометр и явилось очевидное доказательство весомости воздуха.

Предшествовал такому объяснению знаменитый опыт Галилея по взвешиванию воздуха. Схема его опыта изображена на рисунке 113. В сосуд А накачивали насосом воздух, после чего сосуд А взвешивали. Затем его соединяли кожаной трубкой с сосудом В, наполненным водой. При открывании крана К сжатый воздух вытеснял часть воды, которую Галилей взвешивал. Затем он снова определял массу сосуда А (в нем устанавливалось атмосферное давление). Вычислив отношение массы воздуха к массе вытесненной им воды, Галилей нашел, что плотность воздуха составляет около $1/400$ плотности воды. Учитывая несовершенство установки Галилея, результат следует считать относительно точным: по порядку величины он совпадает с современным ($1/700$).

Решающими в объяснении стали опыты с водой французского ученого Блеза Паскаля. Он брал трубки длиной более 10 м. Если действительно атмосферное давление уравнивается весом столба жидкости в трубке, то высота этого столба должна быть различной на различной высоте от поверхности Земли. По мере подъема на гору ртуть понижалась в трубке – и так значительно, что разница на вершине горы и у ее подошвы составила более трех дюймов. Эти наблюдения были проверены на обратном пути. Эти опыты окончательно убедили Паскаля в том, что явление подъема жидкостей в насосах и трубках обусловлено весом воздуха.

Чтобы утвердить представление об атмосферном давлении, Паскаль придумал еще один убедительный опыт. Трубка была сделана в виде, изображенном на рисунке 114. Части *ab* и *cd* имели длину около метра. Отверстие закрывали пальцем, трубка наполнялась ртутью; затем трубку

опрокидывали и погружали в сосуд со ртутью концом *a*. Если открыть только конец *b*, то ртуть в *cd* и *ab* опускается и останавливается на одном уровне, как в сообщающихся сосудах. Палец, закрывающий отверстие *b*, присасывается под действием атмосферного давления (что физически ощутимо). Если его отнять, то ртуть уходит из *cb* и устанавливается в *cd* на высоте, соответствующей атмосферному давлению. Недостаточно знать, что высота ртути в барометре определяется весом давящего на ртуть столба воздуха: необходимо выяснить, каким образом передается давление воздуха и чем оно отличается, например, от давления твердых тел. Всего непонятнее казалось, каким образом давление воздуха может передаваться без всякой потери не только вниз, но и вверх. Явления, предсказанные Паскалем, оправдались на опыте с буквальной точностью. Они были описаны в труде Паскаля «Трактат о равновесии жидкостей» [20].

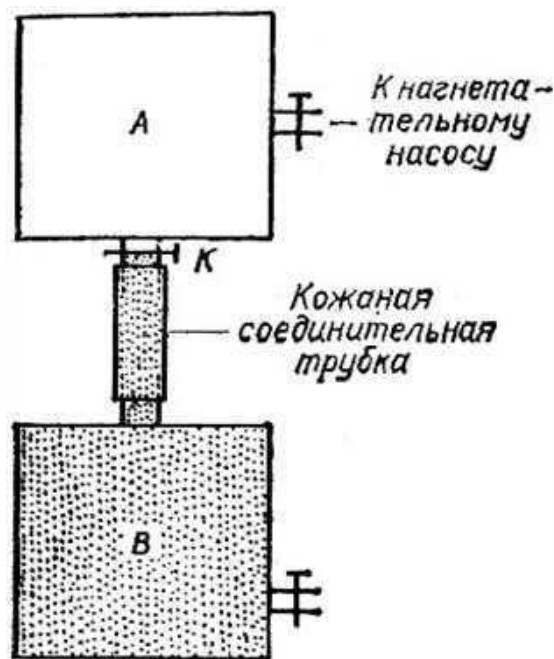


Рис.113. Опыт Галилея по взвешиванию воздуха

Паскаль, знавший об опытах Архимеда над жидкостями, напал на простую, но гениальную мысль сравнить давление воздуха с давлением, существующим внутри жидкостей. Архимед доказал, что всякое твердое тело, частью или целиком погруженное в жидкость, теряет в своем весе, и что эта потеря как раз равна весу вытесненной телом жидкости. Голландский ученый Симон Стевин (1548–1620) пошел еще дальше и сказал, что давление жидкости на дне сосуда зависит лишь от высоты жидкости, то есть от высоты ее уровня над дном сосуда, и совсем не зависит от формы сосуда. Наконец, Паскаль не только подтвердил вполне истину, высказанную Стевином, но и показал, что давление жидкости распространяется во все стороны равномерно и что из этого свойства жидкостей вытекают почти все остальные их механические свойства; затем Паскаль показал, что и давление воздуха по способу своего распространения совершенно подобно давлению воды.

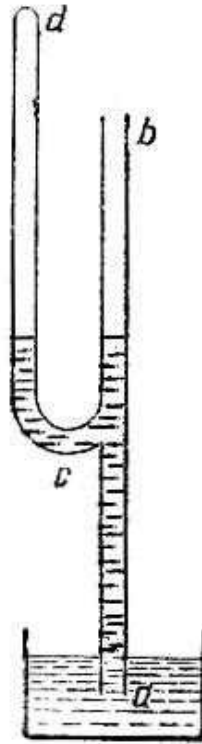


Рис.114. Опыт Паскаля

Еще несколько лет Паскаль посвятил экспериментам с вакуумом. В ходе этих экспериментов он открыл закон, который с тех пор носит его имя: жидкости передают оказываемое на них давление во все стороны одинаково. Паскаль усовершенствовал барометр, идея которого была предложена Торричелли: столбик ртути колеблется не только от перемены атмосферного давления, как думал Торричелли, но так же и от температуры воздуха, его влажности, направления ветров и других факторов. Кроме того, Паскаль установил, что с помощью барометра можно измерять высоту местности, предложив идею высотомера (ныне альтиметр).

4.2. Открытие газовых законов

Газовые законы были установлены экспериментальным путем. Английский физик Роберт Бойль (1627–1691) проводил очень простые опыты с трубкой, в которой над столбиком ртути находился воздух. Подливая ртуть в воронку, Бойль наблюдал уменьшение объема воздуха и в 1662 году пришел к выводу: «Воздух сгущается пропорционально сдввливающей его силе». Французский ученый Э. Мариотт (1620–1684) продолжил опыты по изучению изменения объема воздуха как при увеличении, так и уменьшении давления воздуха. Он описал их в книге «Опыт о природе воздуха», вышедшей в 1679 году. В обоих случаях он нашел, что объем воздуха изменяется обратно пропорционально давлению. Этот закон Мариотт предложил использовать для измерения зависимости давления воздуха от высоты. Таким образом, была установлена первая связь между параметрами состояния газа.

Следующим этапом было установление зависимости между объемом данной массы газа и температурой. Закон открыл также французский ученый Жозеф Луи Гей-Люссак (1778–1850). Установление зависимости между объемом газов и температурой было давней задачей науки. Можно назвать около двух десятков ученых, которые занимались ее решением, но все они получали не согласующиеся друг с другом результаты. Некоторые утверждали даже, что не существует пропорциональности между объемом газа и температурой. Только Гей-Люссаку и независимо от него Дж. Дальтону (1766–1844) удалось получить однозначный результат. Однако Дальтон не сделал правильного вывода. Он считал, что при возрастании температуры в арифметической прогрессии объем газа возрастает в геометрической прогрессии.

Гей-Люссак обнаружил причину неоднозначности результатов, полученных различными исследованиями: присутствие воды в измерительных приборах. Пары воды увеличивали неопределенным образом объем газа при нагревании. Только после тщательного осушения сосудов и очистки газов Гей-Люссаку удалось установить закон, который он сформулировал так: *"Атмосферный воздух, кислород, водород, азот, пары азотной, соляной, серной и угольной кислот – все расширяются равномерно при одинаковом повышении температуры. Поэтому величина расширения не зависит от физических свойств или особой природы газов..."* Этот закон Гей-Люссак установил в 1802 году, исследуя упругости газов в зависимости от температуры, а также процессы парообразования.

Гей-Люссак и Дальтон получили очень близкие друг другу результаты. При увеличении температуры от 0 до 100°C расширение в среднем составляло 0,375. Это близко к современному значению 0,366.

В 1804 году Гей-Люссак предпринял подъем на воздушном шаре с целью определить зависимость магнитного поля Земли и температуры атмосферы от высоты подъема. Проведенные до этого опыты обнаружили некоторое снижение магнитного поля с высотой. 16 сентября 1804 года Гей-Люссак достиг высоты 7016 метров, установив мировой рекорд высоты подъема на воздушном шаре. На этой высоте он произвёл замеры температуры воздуха, которая оказалась равной $-9,5^{\circ}\text{C}$ по сравнению с $+27,75^{\circ}\text{C}$ на поверхности земли. Тем самым Гей-Люссак доказал, что снега, покрывающие высочайшие вершины, не являются результатом действия гор на окружающий воздух. В то же время, из-за слишком большой скорости подъема шара Гей-Люссаку не удалось измерить точную зависимость температуры от высоты. При помощи гигрометра Гей-Люссак измерил также относительную влажность воздуха, обнаружив, что она быстро уменьшается с высотой. Эти измерения, однако, были признаны ошибочными, так как использовавшийся прибор не учитывал снижение температуры.

В 1804 году было уже известно, что содержание кислорода и азота в воздухе одинаково на разных широтах и вблизи поверхности земли не зависит от высоты подъема. Гей-Люссак получил образец атмосферного воздуха на высоте 6636 метров, исследования которого подтвердили эти данные и не обнаружили в воздухе примесей водорода. Эти опыты опровергли бытовавшие

в то время представления, что метеоры и другие сходные явления вызваны горением водорода в верхних слоях атмосферы. В процессе подъёма Гей-Люссак исследовал физиологическое действие разреженного воздуха на организм человека (стеснение дыхания, учащение сердцебиения, сухость в горле), однако счёл условия на высоте 7016 м достаточно приемлемыми, чтобы не прерывать исследования.

Напряжённость магнитного поля Земли определялась обычным для того времени способом – путём измерения периода качания магнитной стрелки, отклоненной от положения равновесия. Во время второго подъёма Гей-Люссак получил следующие данные: 0 м – 4,22 с, 4808 м – 4,28 с, 5631 м – 4,25 с, 6884 м – 4,17 с. На основании этих результатов Гей-Люссак и Жан-Батист Био (1774–1862), участвовавший в этом подъёме на воздушном шаре, сделали вывод о неизменности магнитного поля с высотой, что с учётом невысокой точности измерительных приборов того времени было практически верно. Ж.Л. Гей-Люссак внес большой вклад в развитие экспериментальной техники, изобрел ряд приборов – гидрометр, спиртометр, барометр, насос.

Французский изобретатель и ученый Жак Александр Шарль (1746–1823) известен как изобретатель воздушного шара, наполняемого водородом или другим газом, легче воздуха. Он много занимался изучением газов, но преследовал, прежде всего, инженерные цели. Гей-Люссак в своей работе 1802 г. писал, что Шарль за 15 лет до него заметил, что при нагревании давление газа равномерно возрастает, но не опубликовал результатов. Это послужило основанием назвать закон зависимости давления газа от температуры именем Шарля.

В первой половине XVIII в. в связи с нуждами развивающейся паровой техники внимание ученых сосредоточивается на точных измерениях параметров газов и паров. Французский физик Анри Виктор Реньо (1810–1888), производя тщательные измерения коэффициента теплового расширения газов, обнаружил отступления реальных газов от законов Бойля–Мариотта и Гей-Люссака. Не все газы расширяются одинаково при нагревании. Реньо установил, что эти законы справедливы лишь до известных границ и выполняются тем точнее, чем более разрежен газ. Отсюда зародилась мысль о том, что строго следуют этим законам лишь газы, молекулы которых не взаимодействуют между собой. А.В. Реньо в связи с этим ввел понятие идеального газа, которым и сегодня мы широко пользуемся в молекулярной физике.

4.3. Изобретение паровой машины

Прообраз паровой машины был создан древнегреческим инженером, математиком Героном Александрийским во II в. до н.э. [95]. Созданная им техническая игрушка называлась «Эолипил Герона», которая состояла из железного шара, способного вращаться вокруг горизонтальной оси. В верхней части шара имелась выводная трубка, согнутая под прямым углом. А в нижней такая же, согнутая в противоположную сторону. Пар, поднимающийся по

боковым трубкам, выбрасывался выпускными трубками. Реакция паровой струи приводит шар во вращение (рис. 115).

Особое значение имеют опыты французского физика и изобретателя Дени Папена (1647–1713), который в 1690 г. предложил паровую машину, состоящую из цилиндра и поршня (рис. 116). Он смог поднять груз, присоединённый к поршню верёвкой, перекинутой через шкив. Система работала только как демонстрационная модель: для повторения процесса весь аппарат должен был быть демонтирован и повторно собран. Папен быстро понял, что для автоматизации цикла пар должен быть произведён отдельно в котле. Поэтому Папен считается изобретателем парового котла, проложив таким образом путь к паровому двигателю Ньюкомена.



Рис. 115. Эолипил Герона

Томас Ньюкомен (1663–1729) – английский изобретатель первого парового двигателя мощностью 8 л.с., что обеспечивало подъем воды с глубины 80 метров и расход 25 кг угля в час на 1 л.с. Паровая машина Ньюкомена стала одним из первоисточников для изучения и установления закона преобразования энергии. Пар, образующийся в котле при давлении немного выше атмосферного, поступает в поршневую камеру, затем конденсируется путем разбрызгивания холодной воды в паровую камеру. Конденсация пара уменьшает давление в камере, и поршень идет вниз. Поступательное движение поршня вниз тянет вниз одно плечо балки. Движение вверх другого плеча балки ведет к подъему воды из угольной шахты (рис. 117).

Машина Ньюкомена послужила основой для создания парового двигателя Джеймса Уатта (1736–1819), английского инженера, изобретателя и ученого (рис. 118). В 1763 г. К нему как механику обратились с просьбой отремонтировать сломанную действующую модель водоотливной паровой установки Ньюкомена¹⁷. Исправив модель, Уатт убедился в её низкой эффективности и

¹⁷ В то время механики не разделялись по специальностям и Уатту приходилось заниматься изготовлением самых разнообразных механизмов, в том числе и музыкальных инструментов. Также он занимался планами различных городских сооружений. Кроме паровых машин на счету Уатта другие изобретения, например, копировальный пресс, микрометр, арифметическая счетная машина.

понял, что основной недостаток состоял в попеременном нагревании и охлаждении цилиндра.

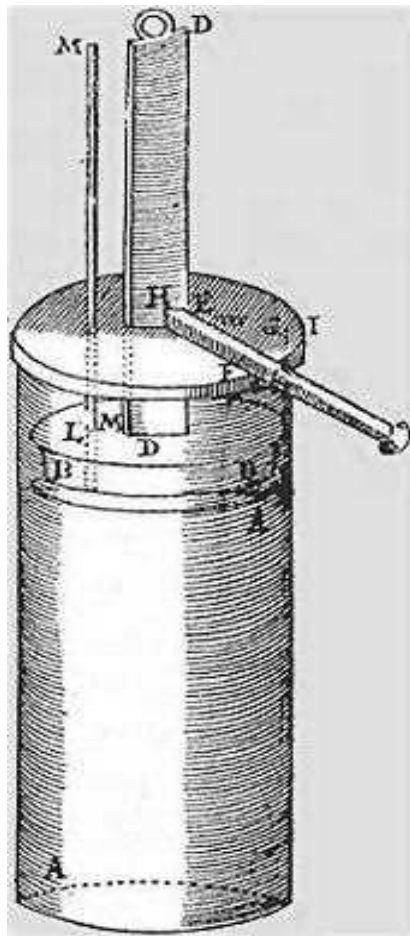


Рис. 116. Паровая машина Д. Папена

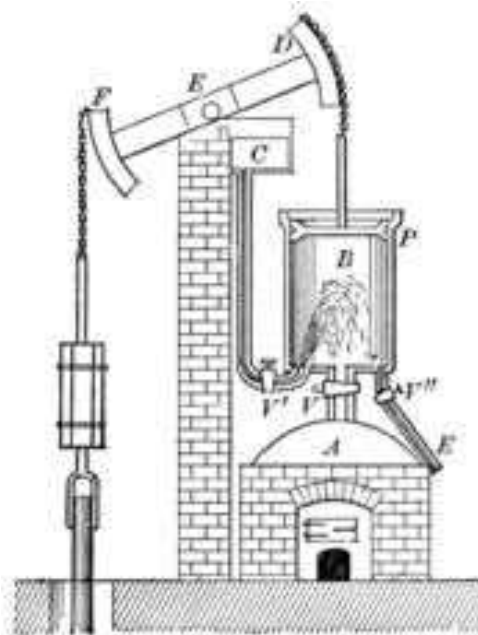


Рис. 117. Машина Ньюкомена

Уатт обратил свои исследования на изучение теории работы машины. В 1763–1764 гг. он определил экспериментально: увеличение удельного объема воды при переходе из жидкости в пар, удельную теплоту парообразования воды, количество воды, которую может испарить известная масса угля, упругость водяных паров, а также количество холодной воды, впрыскиваемой в цилиндр, необходимое для опускания поршня цилиндра с известной силой [96]. То есть, Уатт впервые провёл научные исследования и расчёты, предваряющие создание машины. «В его руках все становилось началом научной работы, все превращалось в науку» - писал его друг и биограф Робисон¹⁸ [99].



Рис. 118. Портрет Джеймса Уатта

Упорно проработав над моделью, Уатт нашёл принципиально новое решение: пар должен конденсироваться не в цилиндре машины, а в отдельном пустом резервуаре сгустителе - конденсаторе, куда пар сам бы устремлялся.

Кроме этого, Уатт внес и другие усовершенствования в машину: закрыл рабочий цилиндр сверху и устроил сальник, через который шток поршня мог двигаться, не пропуская воздуха, создал паровую рубашку вокруг цилиндра. При этом перенос процесса конденсации пара за пределы цилиндра способствовал снижению расхода пара более чем вдвое уменьшило расход топлива при том же эффекте. В 1765 г. Уатт создал экспериментальную машину с диаметром цилиндра 14 см и ходом поршня 61 см. Историю о том, как Уатт пришёл к своему изобретению, мы знаем со слов самого Уатта¹⁹.

¹⁸ Профессор Робисон был приглашен в 1770 году на место директора Морского училища в С.-Петербург и спустя три года звал Дж.Уатта приехать в С.-Петербург и взять на себя постройку паровой машины для наполнения водой доков. Даже получив официальное предложение от российского правительства принять назначение с окладом в 10 тысяч рублей, Уатт отказался [99].

¹⁹ Незадолго до смерти он написал об этом записку для Британской энциклопедии: первые опыты он уже проделал в 1759 г.; в 1761–1762 гг. ставил «опыты над силой пара в котел Папина».

Паровая машина Уатта образца 1769–1776 гг. была машиной простого действия, в отличие от машины Ньюкомена, поршень приводился в движение непосредственно паром, а не атмосферой. Если в машине Ньюкомена рабочее усилие, создаваемое поршнем, зависело лишь от площади цилиндра – атмосферное давление было постоянно, то в машине Уатта оно было величиной переменной, так как зависело от давления пара, следовательно, мощностью машины можно было управлять. Однако в этой машине рабочим был лишь ход поршня вниз, вверх поршень поднимался в «холостую», как и в машине Ньюкомена с помощью противовеса. Машина этой конструкции была непригодна для рабочих машин, требовавших непрерывного, равномерного и кругового действия.

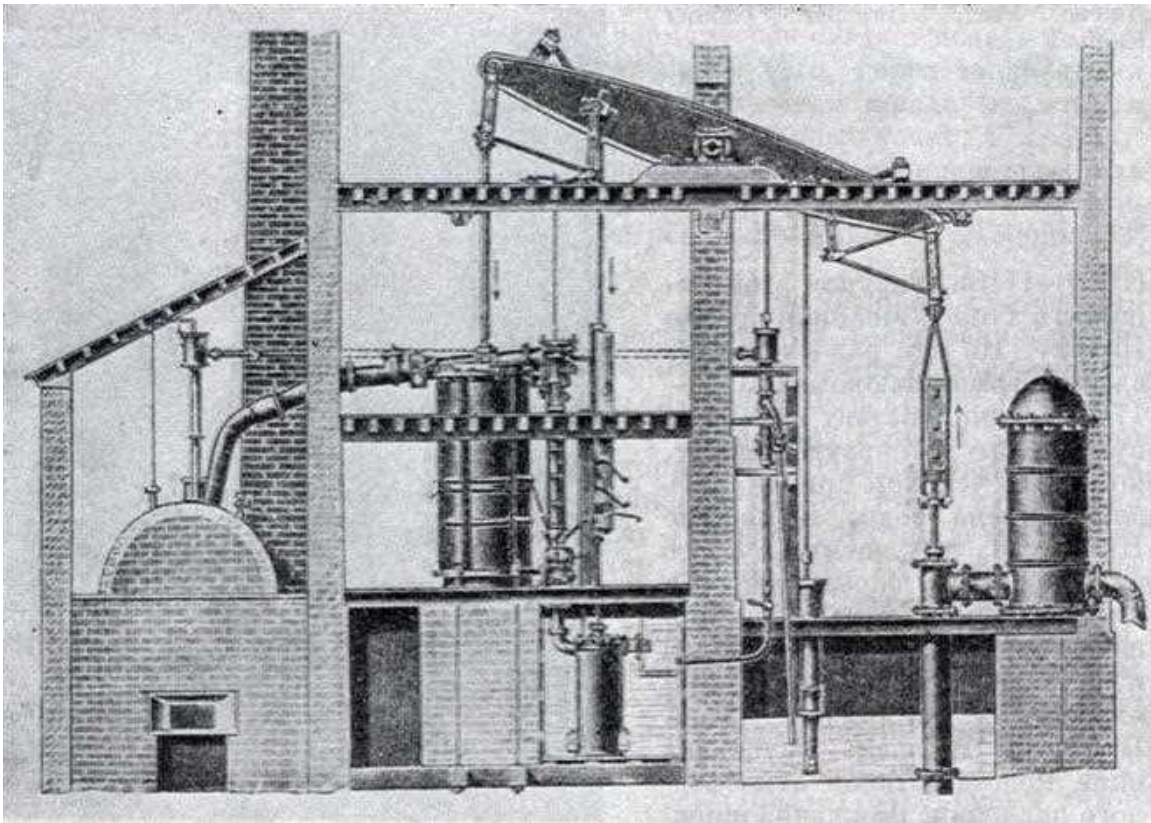


Рис. 119. Паровая машина Уатта, соединенная с гидравлическим насосом, начало XIX в.

Дальнейшим и самым важным, шагом в усовершенствовании паровой машины явилось введение преобразования качательного движения балансира в непрерывное вращательное движение вала (рис.119). Уатт стал упорно работать над машиной с вращательным движением вала. Пришлось ещё немало потрудиться над изысканием способа соединения прямолинейно движущегося поршня с концом балансира, описывающим дуги окружности. Так как для получения вращательного движения в своей машине Уатт не мог применить шатунно-кривошипный механизм (на такую передачу был взят патент французским изобретателем Пикаром), он получил патент (1781 г.) на пять своих способов преобразования качательного движения в непрерывно-вращательное.

Принципиально новое решение преобразования движения было найдено в форме так называемого параллелограмма Уатта; патент от 1784 года [97].

В 1784 г. Уатт патентует и известный центробежный регулятор для автоматического регулирования равномерности хода машины, что было, например, важно для ткацких станков [98]. В 1784 году он получил патент на универсальный паровой двигатель двойного действия с непрерывным вращением.

Для оценки эффективности своих новых машин Уатт должен был выработать особый критерий сравнения, так как прежний – высота подъема воды не годился. Он производил опыты над работой особенно сильных лошадей Лондонских пивоварен и ввёл понятие единицы мощности «лошадиная сила», её определили как работу в 33000 фут-футов в минуту, такую мощность могли развивать только самые сильные лошади в течение короткого времени. Кроме этого, Уатт разработал методику её измерения и счётчик оборотов вращающегося вала – тахометр. Лошадиная сила (л.с.) и сегодня остается единицей измерения мощности или скорости совершения работы и обычно применяется для определения мощности двигателей или моторов. Метрическая л.с. составляет приблизительно 735,5 Вт. В 1882 году Британская ассоциация инженеров решила присвоить его фамилию единице мощности (Ватт). Это был первый в истории техники случай присвоения имени собственного единице измерения.

4.4. Механический эквивалент тепла

До опытов английского физика Дж. П. Джоуля и немецкого врача Р. Ю. Майера²⁰ физики считали, что теплота является невидимой, невесомой жидкостью (флюидом), причем ее проникновение в тело или выход из тела вызывает повышение или понижение температуры тела. Это предположение хорошо объясняет нагревание тела при соприкосновении с пламенем или другим нагретым телом. Но она не в состоянии объяснить нагревание при трении или ударе. Джоуль опытным путем доказал, что существует механический эквивалент теплоты, то есть при превращении некоторого количества работы в теплоту всегда получается одно определенное количество теплоты, независимо от того, каким путем это превращение произошло [20].

Джоуль рассуждал следующим образом: если теплота, развивающаяся при трении и других явлениях, действительно есть только механическая энергия, сообщенная молекулам нагретого тела, тогда при исчезновении некоторого определенного количества механической энергии всегда должно появляться то

²⁰ К сожалению, открытие Майера много лет оставалось незамеченным. Еще в 1840 году корабельный врач отправился в тропики и там наблюдал необычный цвет (ярко-красный) венозной крови пациентов. Майер сообразил, что дело в разнице температур тела и окружающей среды. В тропиках различие меньше, чем в Европе, и организм тратит меньше ресурсов на обогрев. В этом он увидел связь между механической работой и теплотой [100].

же самое количество калорий. Для проверки своих рассуждений Джоуль заставлял механическую энергию исчезать самыми различными способами и во всех случаях измерял количество появившегося тепла. В первом опыте Джоуля в сосуде с водой с помощью падающих грузов W вращалась мешалка (рис.120).

Работа силы тяжести, заставлявшая грузы опускаться, равнялась произведению их веса на пройденный путь. При медленном и равномерном опускании грузов, вся эта работа затрачивалась на преодоление сопротивления воды движению мешалки. Джоуль измерял повышение температуры воды и получил, что для развития тепла, необходимого для повышения температуры 1 г воды на один градус, необходимо затратить 427 г·м работы. Затем Джоуль заменил воду ртутью и получил, что для получения 1 кал теплоты необходимо затратить 425 г·м работы. Джоуль произвел еще другие измерения, исследуя соотношение между теплотой и работой. Как среднее из всех наблюдений в 1848 году он опубликовал значение механического эквивалента калории равным 426,4 г·м в работе «О механическом эквиваленте теплоты». Столетний опыт усовершенствования техники измерений улучшил результат Джоуля менее чем на 1%. На основании опытов Джоуля и множества других наблюдений, путем обобщения опытных данных был сформулирован фундаментальный закон физики – закон сохранения энергии.

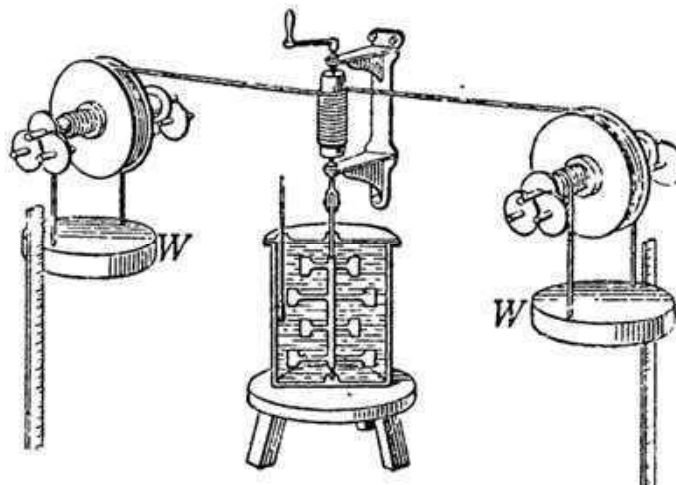


Рис. 120. Опыт Джоуля с теплотой, развиваемой при трении

4.5. Опыт Штерна

Опыт Штерна – это первое экспериментальное подтверждение состоятельности молекулярно-кинетической теории строения вещества. В нем были непосредственно измерены скорости теплового движения молекул и получено подтверждение существования распределения молекул по скоростям.

Отто Штерн (1888–1969) был выдающимся экспериментатором, лауреатом Нобелевской премии в 1943 году «за вклад в развитие метода молекулярных лучей и открытие магнитного момента протона». В 1920 году в немецком научном журнале «Zeitschrift für Physik» было опубликовано

сообщение сотрудника института теоретической физики в Франкфурте-на-Майне О. Штерна «Непосредственное измерение молекулярной тепловой скорости», в котором описывался метод прямого измерения скоростей молекул. Идея нового метода заключалась в следующем. Два жестко соединенные коаксиальные цилиндры, по оси во внутреннем цилиндре располагалась платиновая нить с нанесенным на нее слоем серебра, которая нагревалась при пропускании электрического тока. Атомы серебра испарялись при температуре около 1230 град Кельвина (температура плавления серебра) и свободно разлетались от нити во все стороны, поскольку воздух во внутреннем цилиндре был откачан. Вдоль поверхности внутреннего цилиндра была вырезана узкая щель С (рис. 121) и диафрагма, которая позволяла вырезать из потока атомов серебра тонкий пучок. На поверхности внешнего цилиндра располагалась съемная латунная пластинка, температура которой была комнатной. На ней осаждались атомы серебра, охладившись, и оседали в виде тонкой полоски. С помощью специального устройства вся установка приводилась во вращение с частотой 25-45 оборотов в секунду. Если установка не вращалась, то на латунной пластинке было просто изображение щели из атомов осажденного серебра (все атомы двигались прямолинейно и равномерно). При вращении каждый атом по-прежнему двигался прямолинейно и равномерно, но за время полета от диафрагмы до внешнего цилиндра последний успевал повернуться на некоторый угол и атом осаждался не точно против щели, а несколько в стороне (рис. 122).

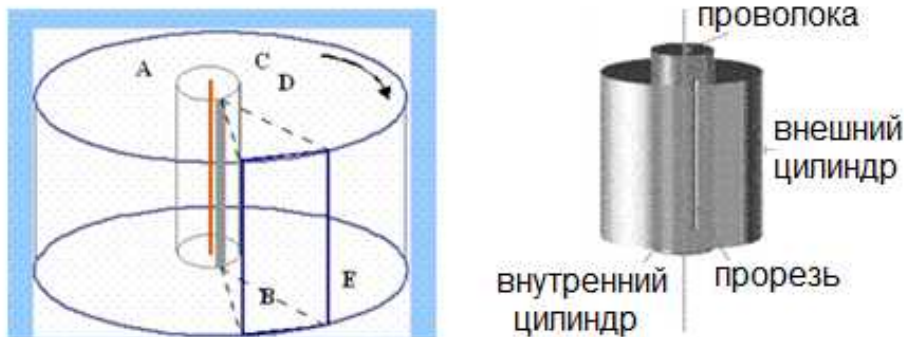


Рис. 121. Схема установки О. Штерна

Атом, двигаясь со скоростью v , (рис.122) проходил расстояние между цилиндрами за время t

$$L = R - r = vt$$

Любая точка внешнего цилиндра за это время проходила путь $s = wRt$. Следовательно, скорость движения атомов равна

$$v = \frac{wR(R - r)}{s}$$

Измеряя значения входящих в эту формулу величин w, R, r, s , можно рассчитать усредненную скорость атомов серебра при температуре нагретой нити (она составила около 600 м/с), а изменяя температуру накала, найти температурную зависимость скорости теплового движения атомов. При этой температуре среднеквадратичная скорость, согласно формуле, полученной в молекулярно-кинетической теории, составляет 588 м/с. Изучение профиля полосы серебра позволило ученому сделать вывод о существовании наиболее вероятной средней скорости движения частиц (то есть скорости, с которой движется наибольшее число молекул). С ростом температуры профиль полосы серебра смещался меньше, что убедительно свидетельствовало о зависимости средней скорости движения частиц от температуры металла. Экспериментальные результаты Штерна находились в согласии с полученным теоретически Дж. К. Максвеллом распределением молекул по скоростям (рис.123).

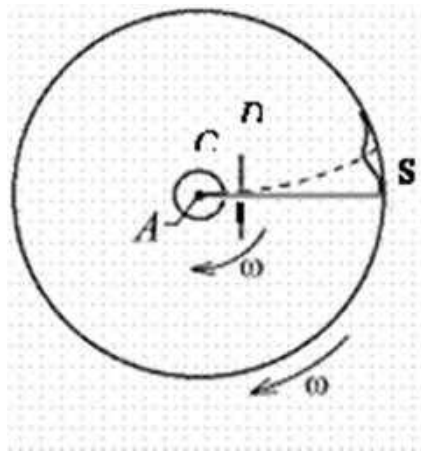


Рис. 122. Смещение атомов серебра при вращении установки Штерна



Рис. 123. Функции плотности распределения молекул в зависимости от скорости при высоких и низких температурах

5. АТОМНАЯ ФИЗИКА И КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

5.1. Явление фотоэффекта и опыты Столетова

В 1887 году Генрих Герц в ходе своих экспериментов по изучению свойств электромагнитных волн обнаружил, что разряд между двумя металлическими шариками происходит при меньшем напряжении, если их освещать ультрафиолетовым светом (рис. 124).

Количественное изучение явления, приведшее к установлению определенных закономерностей, а затем к раскрытию его природы, было начато русским физиком Александром Григорьевичем Столетовым (1839–1896). В работе «Актиноэлектрические исследования» Столетов писал: *«Повторяя в начале 1888 года интересные опыты гг. Герца, Э. Видемана и Эберта, Гальвакса относительно действия лучей на электрические разряды высокого напряжения, я вздумал испытать, получится ли подобное действие при электричестве слабых потенциалов. Кроме прямого ответа на заданный вопрос, такое видоизменение опытов представляло, на мой взгляд, двоякий интерес: с одной стороны, оно позволило бы ярче выставить на вид загадочное действие лучей, не смешивая его с обыкновенным рассеиванием электрических зарядов (которое в случае слабых потенциалов бывает вообще ничтожно); с другой стороны, явилась бы возможность подвергнуть явление более точному измерительному изучению, чем это имело место в опытах названных ученых. Моя попытка имела успех выше ожидания. Первые мои опыты начаты около 20 февраля 1888 года и продолжались непрерывно, насколько позволяли другие занятия, по 21 июня 1888 года. В течение этого времени мне удалось, полагаю, осветить некоторые любопытные вопросы относительно "актиноэлектрических действий».*

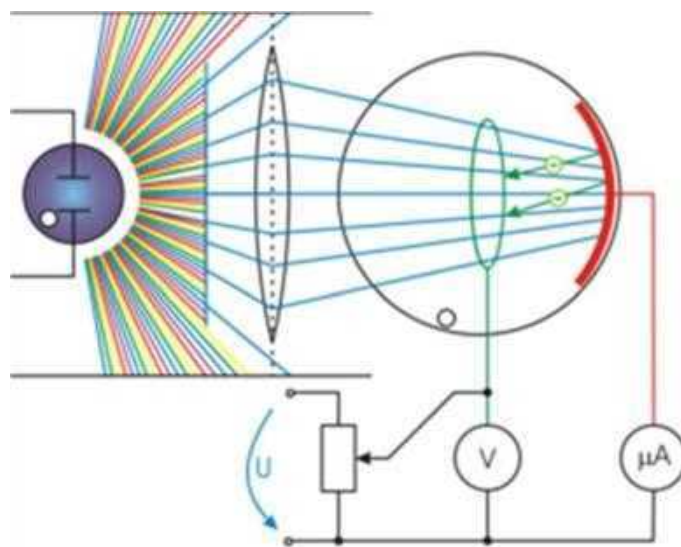


Рис. 124. Схема учебного эксперимента по исследованию фотоэффекта

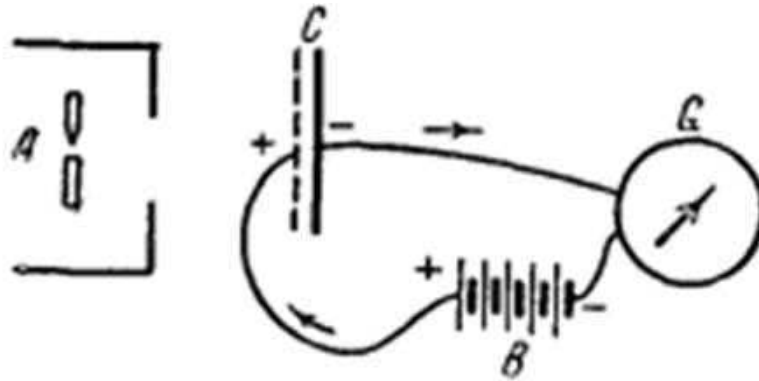


Рис. 125. Схема основного эксперимента А.Г. Столетова [101]

Основной опыт А.Г. Столетова состоял в следующем (рис. 125). Два металлических диска диаметрами 22 см (один сплошной, другой – из металлической сетки) были установлены вертикально против дугового фонаря, мощного источника света (А). Диски (С) соединялись через источник напряжения и чувствительный гальванометр (его внутреннее сопротивление было 5212 Ом). При освещении сплошного металлического диска, присоединенного к отрицательному полюсу батареи, возникал ток, причем гальванометр фиксировал его до напряжения 0,01 В. «Слово «ток», – писал Столетов, – употреблено в своем общем смысле, не решая пока, какого рода процесс здесь происходит, – кондуктивный, электролитический или конвективный». В этом исследовании Столетов впервые применил гальванометр для изучения тока через газ (воздух).

Электронная теория в то время еще не была построена, и физики различали три вида тока проводимости. Открытие электрона показало, что все токи проводимости по сути конвекционные токи. А пока природа этого явления была не ясна, приходилось накапливать и классифицировать факты. Столетов в своей работе формулирует следующие результаты:

«1. Лучи вольтовой дуги, падая на поверхность отрицательно заряженного тела, уносят с него заряд. Смотря по тому, пополняется ли заряд и насколько быстро, это удаление заряда может сопровождаться заметным падением потенциала или нет.

2. Это действие лучей есть строго униполярное; положительный заряд лучами не уносится.

3. По всей вероятности, кажущееся зарядение нейтральных тел лучами объясняется той же причиной.

4. Разряжающим действием обладают, если не исключительно, то с громадным превосходством перед прочими лучами, лучи самой высокой преломляемости, недостающие в солнечном спектре ($\lambda \approx 295 \cdot 10^{-6}$ мм). Чем спектр обильнее такими лучами, тем сильнее действие.

5. Для разряда лучами необходимо, чтобы лучи поглощалась поверхностью тела. Чем больше поглощение активных лучей, тем поверхность чувствительнее к их разряжающему действию.

6. Такой чувствительностью, без значительных различий, обладают все металлы, но особенно высока она у некоторых красящих веществ (анилиновых красок).

7. Разряжающее действие лучей обнаруживается даже при весьма кратковременном освещении, причем между моментом освещения и моментом соответственного разряда не протекает заметного времени.

8. Разряжающее действие *ceteris paribus* (лат. при прочих условиях) пропорционально энергии активных лучей, падающих на разряженную поверхность.

9. Действие обнаруживается даже при ничтожных отрицательных плотностях заряда; величина его зависит от этой плотности; с возрастанием плотности до некоторого предела оно растет быстрее, чем плотность, а потом медленнее и медленнее.

10. Две пластинки разнородных в ряду Вольты металлов, помещенные в воздухе, представляют род гальванического элемента, как скоро электроотрицательная пластинка освещена активными лучами.

11. Каков бы ни был механизм актиноэлектрического разряда, мы вправе рассматривать его как некоторый ток электричества, причем воздух (сам ли по себе или благодаря присутствию в нем посторонних частиц) играет роль дурного проводника. Кажущееся сопротивление этому току не подчиняется закону Ома, но в определенных условиях имеет определенную величину.

12. Актинэлектрическое действие усиливается с повышением температуры».

Из этих экспериментальных фактов А.Г. Столетов делает вывод, который наметил направление дальнейших исследований. Он указывает на главное: для возникновения актиноэлектрического действия (фотоэлектрического) «нужна газовая среда, то есть нужен простор и полная удобоподвижность частиц». Интересно заключение работы Столетова: «Как бы ни пришлось окончательно сформулировать объяснение актиноэлектрических разрядов, нельзя не признать некоторой своеобразной аналогии между этими явлениями и давно знакомыми, но до сих пор малопонятными разрядами гейслеровых и круковских трубок. Желая при моих первых опытах ориентироваться среди явлений, представляемых моим сетчатым конденсатором, я невольно говорил себе (понимая всю странность этих слов), что предо мною – гейслерова трубка, могущая действовать и без разрежения воздуха, трубка не с собственным, а с посторонним светом. Там и здесь явления электрические тесно связаны со световыми, там и здесь катод играет особенную роль и, по-видимому,

распыляется. Изучение актиноэлектрических разрядов обещает пролить свет на процессы распространения электричества в газах вообще».

А.Г. Столетов открыл существование тока насыщения в газах, построил первый фотоэлемент, который назвал воздушным элементом, установил закон разряда в газах, который носит его имя. Закономерности, открытые Столетовым, легли в основу современных теорий электрического разряда в газах.

5.2. Опыты Томсона

В 1897 году английский физик Джозеф Джон Томсон (1856–1940) открыл электрон и приступил к серии экспериментов с целью доказать, что электрон является элементарной частицей вещества и обуславливает множество физических явлений. Явление фотоэффекта сыграло при этом одну из главных ролей. Томсон, по существу, продолжил исследование А.Г. Столетова.

Идея опыта с фотоэлектронами заключалась в следующем. Рассмотрим конденсатор Столетова в магнитном поле с индукцией $\vec{B}$. Томсон показал, что траекторией фотоэлектронов в перпендикулярном электрическом и магнитном полях будет циклоида с радиусом $\frac{2E_x m}{eB_z^2}$, где E_x – компоненты электрического поля, B_z – магнитного, m и e – масса и заряд электрона. Если расстояние между пластинами А и В будет больше радиуса циклоиды, то электроны не достигнут пластины В, и ток в цепи прекратится. Измерив расстояние между А и В, при котором магнитное поле начнет уменьшать ток, зная E и B , можно определить удельный заряд фотоэлектрона (рис.126).

Схема установки Томсона показана на рисунке 127. Здесь АВ – тщательно отшлифованная цинковая пластинка диаметром около 1 см, CD – решетка с квадратными ячейками площадью 1 мм² из тонкой проволоки, припаянная к проволочному кольцу, EF – кварцевая пластинка, толщиной 4 мм, L – стержень, проходящий через восковую пробку; к проводникам К и М подключалась батарея аккумуляторов и электромметр. Магнитное поле создавалось дугообразным электромагнитом, через обмотку которого пропусклся ток от 1 до 4,5 А. Через отверстие N сосуд откачивался до давления порядка 10⁻² мм рт. ст.

Опыты Томсона дали среднее значение отношения заряда к массе $e/m = 7,3 \cdot 10^6$ СГСЕ (в системе единиц СИ отношение равно $1,7588047 \cdot 10^{11}$ Кл/кг). Заряд электронов измерялся тем же методом, который был описан выше. Томсон получил для фотоэлектронов среднее значение $e = 6,8 \cdot 10^{-10}$ ед. заряда СГСЕ (для газовых ионов было $6,5 \cdot 10^{-10}$ ед. заряда СГСЕ). Изучение катодных лучей привело к выводу: электроны входят в состав всех атомов.

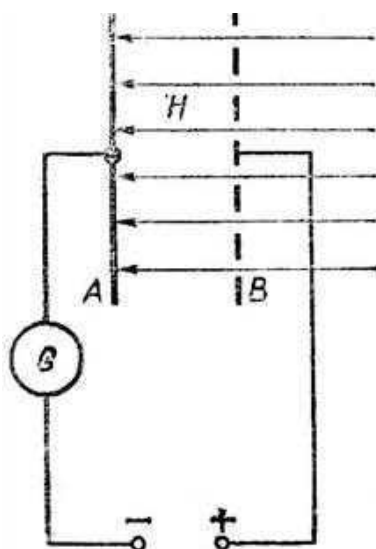


Рис. 126. Фрагмент схемы наблюдения фототока

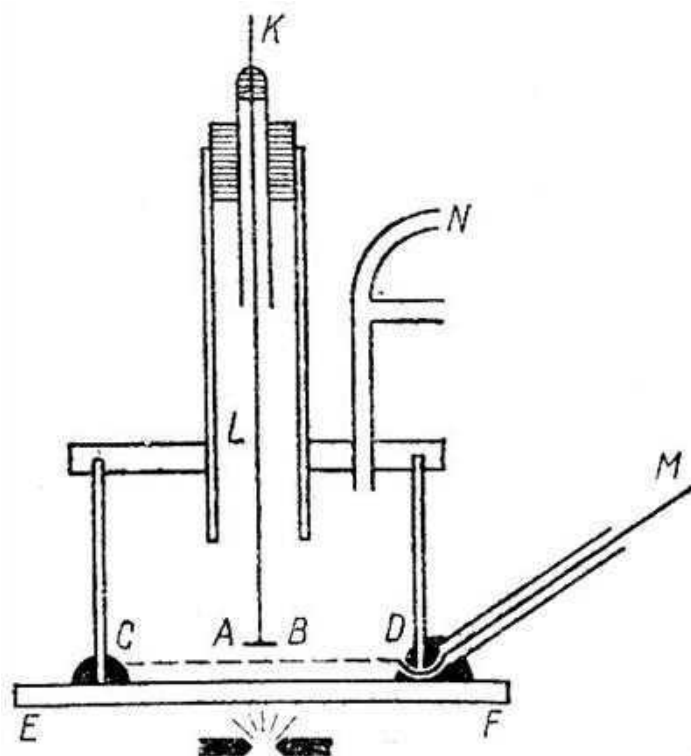


Рис. 127. Схема установки Дж. Дж. Томсона

5.3. Опыты Ленарда

В 1902 году немецкий физик Филипп Ленард (1862–1947) использовал методику определения удельного заряда электрона с целью изучения энергии фотоэлектронов. Схема установки Ленарда изображена на рисунке 128.

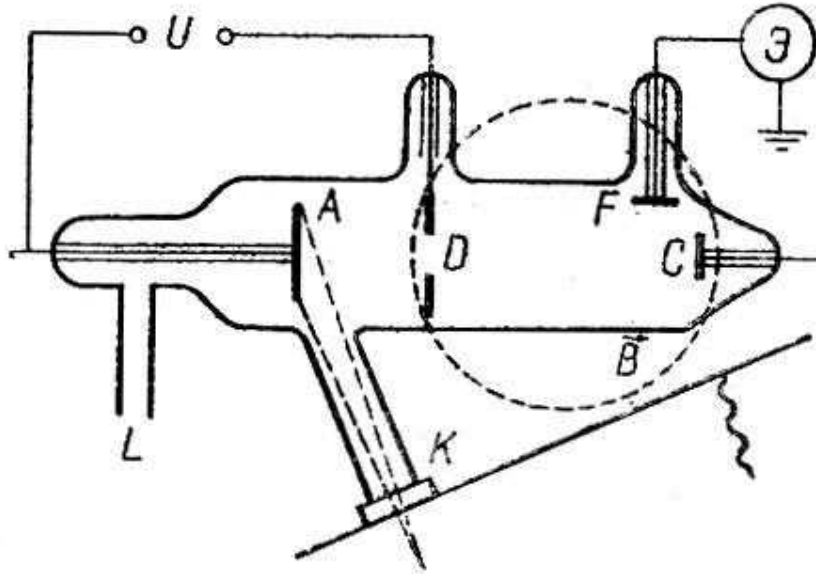


Рис. 128. Опыт Ф. Ленарда

Стеклянная трубка с электродами откачивалась до высокого вакуума через патрубок L . Алюминиевая пластинка $Л$, которая освещалась через кварцевое окошко K ультрафиолетовым светом, служила источником фотоэлектронов. Диафрагма D выделяла узкий пучок электронов, падающий на электрод C . Между пластинкой A и диафрагмой D создавалось электрическое поле напряжением от 300 до 1000 В. Это поле разгоняло фотоэлектроны, вырванные из пластинки $Л$. За диафрагмой фотоэлектроны попадали в магнитное поле, индукция которого B перпендикулярна к плоскости чертежа. Магнитное поле заставляло электроны двигаться по окружности, и они при известном значении магнитной индукции B попадали на диск F , соединенный с электрометром. Максимальное отклонение электрометра $\mathcal{E}$ означало, что почти все фотоэлектроны попадали на диск F . По положению диафрагмы и диска можно было определить радиус окружности r , описываемой электронами при $B = B_{\text{max}}$. По измеренным значениям B можно было определить отношение mv/e . С другой стороны, зная ускоряющее напряжение U , можно было написать по закону сохранения энергии: $mv^2/2 = eU$, так как начальные скорости фотоэлектронов пренебрежимо малы, отсюда вычислялись величины e/m и v . Зная массу и скорость, легко вычислить кинетическую энергию фотоэлектронов.

Исследования зависимости энергии фотоэлектронов от интенсивности и частоты падающего света привели к поразительному открытию. Оказалось, что энергия фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего света. При этом безразлично, меняется ли интенсивность благодаря изменению расстояния от источника или ее уменьшают поглощающие экраны.

Еще до опытов Ф. Ленарда был известен другой факт, необъяснимый с точки зрения привычных представлений: для каждого вещества существуют критические частоты излучения, ниже которых фотоэффект не возникает (красная граница фотоэффекта).

Единственно возможным объяснением механизма фотоэффекта, с точки зрения классических представлений о взаимодействии излучения с электронами, является резонанс: электрон вырывается из металла при совпадении частоты падающего излучения с частотой его собственных колебаний. Но если это так, то эмиссия фотоэлектронов должна была бы наблюдаться на отдельных частотах или в узких обособленных диапазонах, а не во всем спектре частот. Резонансный механизм не мог объяснить зависимость энергии фотоэлектрона от частоты падающего излучения.

5.4. Квантовая гипотеза Эйнштейна и ее экспериментальная проверка

Объяснение законов фотоэффекта дал в 1905 г. Альберт Эйнштейн, исходя из принципиально нового представления о физических свойствах света. Эйнштейн возродил идею Ньютона о том, что свет обладает двойственностью свойств: в одних явлениях он ведет себя как волновой процесс, в других - как поток корпускул. При этом он использовал квантовую гипотезу Планка. Суть идеи Эйнштейна сводилась к следующему. Если предположить, что луч света представляет собой поток своеобразных частиц, каждая из которых несет квант энергии $h\nu$ (ν – частота, h – постоянная Планка), и при столкновении с атомом частица света может полностью передать свою энергию электрону, то согласно закону сохранения энергии

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + A_{\text{вых}},$$

где $A_{\text{вых}}$ – работа выхода электрона из облучаемого вещества. Написанное уравнение сразу же объясняло результат опытов Ф. Ленарда с фотоэлектронами.

Идея Эйнштейна была революционной. Физики уже свыклись с представлением о свете, как волновом процессе в эфире. Световые кванты никак не вписывались в эту картину непрерывных процессов. Ясно, что новое воззрение могло войти в физику только после обстоятельного экспериментального обоснования. Это было сделано американским физиком Робертом Миллиkenом (1868–1953). В 1923 году он получил Нобелевскую премию по физике за работы в области фотоэлектрического эффекта и за измерение заряда электрона.

Милликен был одним из немногих физиков, быстро настроившихся на идею дискретности. Естественно, что гипотеза Эйнштейна была воспринята им с исчерпывающей глубиной, и он осветил все стороны проблемы ее экспериментального доказательства. Указав на предсказание Эйнштейна, что кинетическая энергия фотоэлектронов определяется уравнением

$$\frac{1}{2}mv^2 = eU = h\nu - A_{\text{вых}} \quad (1)$$

Милликен писал: «Когда было сделано это предсказание, оно было таким же смелым, как и гипотеза, на которой оно основывалось. Действительно, в то время вообще не было никаких экспериментальных данных, которые указывали бы на характер зависимости разности потенциалов U от частоты ν , или на то, является ли гипотетическая величина в уравнении (1) чем-нибудь большим, чем числом, совпадающим по величине с постоянной Планка h . Тем не менее, по-видимому, последующие результаты экспериментов показали, что по крайней мере пять из поддающихся экспериментальной проверке положений, фактически содержащихся в уравнении (1), выполняются весьма точно. Эти положения можно сформулировать в виде следующих утверждений.

1. Для каждой возбуждающей частоты ν , превышающей некоторую определенную критическую величину, существует поддающаяся точному измерению максимальная скорость имитируемых частиц.

2. Между U и ν существует линейная зависимость.

3. Значение $dU/d\nu$ (или наклон прямой $U=f(\nu)$) численно равно отношению h/e .

4. Для критической частоты ν_0 , при которой $U=0$, работа $P=h\nu_0$, т. е. точка пересечения прямой $U-f\nu$ с осью ν , определяет самую низкую частоту, при которой исследуемый металл еще может испускать фотоэлектроны.

5. Контактная разность потенциалов между любыми двумя проводниками описывается уравнением $U_k = (h/e) (\nu_0 - \nu_0^1) (\phi - \phi^1_0)$.

Ни один из этих пунктов не был проверен даже приблизительно к тому моменту, когда Эйнштейн выдвинул свою гипотезу. Что касается пункта 4, то еще в 1891 г. немецкие физики-экспериментаторы Ю. Эльстер и Х.Ф. Гейтель при изучении щелочных металлов действительно пришли к выводу, что, чем выше электроположительность металла, тем ниже частота ν , при которой он становится фоточувствительным²¹. Однако в течение долгого времени казалось, что этому утверждению противоречат результаты более поздних исследований на не щелочных металлах. В течение десяти лет, с тех пор как Эйнштейн предложил свое уравнение, пятое из перечисленных утверждений никогда не проверялось совсем, а третье и четвертое никогда не подвергались тщательной экспериментальной проверке в таких условиях, которые позволили бы дать точный и определенный ответ: впрочем такая проверка и не могла быть произведена без одновременных измерений в вакууме контактной разности потенциалов и фотопотенциалов, если исследуемые металлы были чувствительны ко всему широкому спектру доступных наблюдению частот» [102].

²¹ Юлиус Эльстер (1854–1920) и Ханс Фридрих Гейтель (1855–1923) семь раз номинировались на Нобелевскую премию по физике. Среди их достижений – создание промышленного образца вакуумного фотоэлемента, которые были внедрены в технику в 1910 году. В 1903 году они пришли к выводу о сосуществовании излучения, способного постоянно ионизировать воздух.

Ситуация, очерченная Миллиkenом, действительно была сложной. Речь шла об эксперименте, требовавшем длительных усилий. Опыты завершились лишь в 1916 г. Достаточно беглого взгляда на схему одной из трубок, использованных Миллиkenом при изучении фотоэффекта (рис. 129), чтобы оценить сложность экспериментальной техники. Это, по выражению Милликена, «мастерская в вакууме».

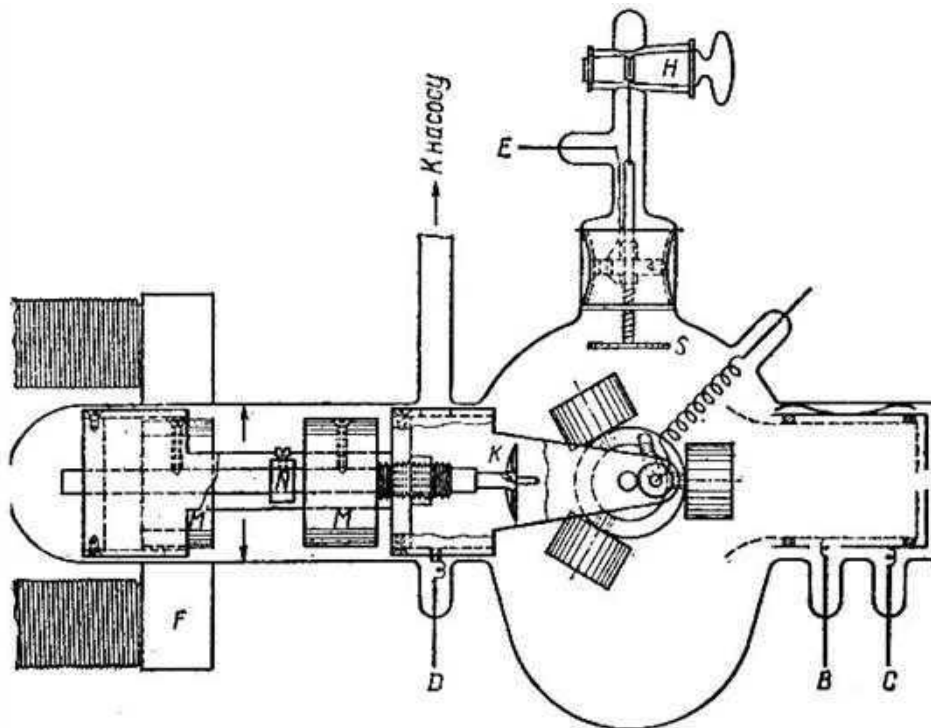


Рис. 129. Прибор Милликена

5.5. Открытие атомного ядра

В модели Томсона была важная деталь, которая не следовала из опыта. В ней положительный заряд считался равномерно распределенным по всему объему атома (рис. 130 а). Опыт не давал оснований для этой гипотезы. Отрицательный заряд связан с частицами, делится на одинаковые порции, почему же положительный заряд представляется в виде какой-то гипотетической жидкости?

Структура атома была установлена экспериментально в лаборатории университета в Манчестере (Англия), руководимой британским физиком новозеландского происхождения Эрнестом Резерфордом (1871–1937). Он стал лауреатом Нобелевской премии по химии 1908 года за работы по радиохимии (химии радиоактивных элементов). Опытным путем он показал, что альфа-частица – это ионы ${}^4_2\text{He}$ с зарядом $(+2e)$, то есть ядра гелия. После этого в 1911 году Резерфорд осуществил опыт по рассеянию альфа-частиц, доказал существование в атомах положительно заряженного ядра и отрицательно

заряженных электронов вокруг него и приобрел широкую известность как «отец ядерной физики».

Проблема рассеяния α -частиц веществом привлекла Резерфорда еще в 1906 г., когда он заметил, что если отверстие коллиматора, через который проходил пучок α -частиц, закрыть пластинкой слюды толщиной всего 20 мкм, то пятно на фотопластинке, поставленной за коллиматором, расплывается. Расплывание соответствовало отклонению альфа-частиц приблизительно на 2° . Расплывание могло быть только результатом действия внутреннего электрического поля атомов. Резерфорд оценил напряженность поля и, получив значение порядка 10^8 В/см, заключил: *«Такой результат определенно означает, что в атомах материи должны быть сосредоточены огромные электрические силы»*.

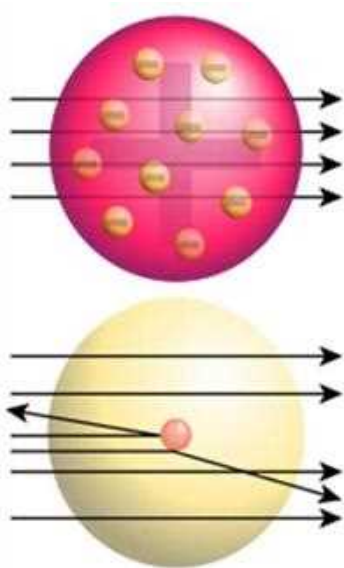


Рис. 130. Ожидаемый результат прохождения альфа-частиц через ядро атома (модель Томсона) и наблюдаемый в лаборатории Резерфорда результат (внизу)

В 1908 году Резерфорд поручил своему аспиранту из Германии Гансу Гейгеру (ставшему затем знаменитым благодаря изобретению счетчиков частиц – счетчиков Гейгера) изучить картину рассеяния α -частиц. Руководящей была идея Резерфорда: картина рассеяния атомами заряженных частиц должна содержать информацию о структуре атома. В качестве зондирующих снарядов естественно было выбрать α -частицы. Во-первых, природа предоставила естественные источники α -частиц – радиоактивные препараты; во-вторых, эти частицы обладают достаточно большой массой и энергией для получения четкой картины рассеяния; в-третьих, преимуществом α -частиц было то, что от них легко видимы сцинтилляции.

Хотя визуальный подсчет сцинтилляций представлял утомительную процедуру, он был единственным в то время надежным способом измерения угла рассеяния α -частиц тонкими пластинками. Вначале Гейгер подсчитал число

сцинтилляций, вызванных α -частицами, отклоненными от оси пучка лишь до 10 мм по экрану. При расстоянии от щели до экрана 54 см это соответствовало примерно отклонению на 1° . Далее Гейгер вместе с аспирантом Резерфорда Эрнстом Марсденом начали подсчет сцинтилляций, вызванных α -частицами, отклоненными на большие углы (рис.130, б). Резерфорд впоследствии писал: *"Я не верил в это, потому что мы знали, что α -частица, т. е. очень быстрая тяжелая частица с огромной энергией, и можно показать, что если рассеяние обусловлено накоплением эффекта от последовательных рассеяний на малые углы, то вероятность рассеяния α -частиц назад должна быть очень мала"*.

Однако Гейгер и Марсден обнаружили множество случаев рассеяния α -частиц на большие углы. Резерфорд вспоминал: *"Я помню, ко мне пришел очень взволнованный Гейгер и сказал: "Мы, кажется, получили несколько случаев рассеяния α -частиц назад". Это самое невероятное событие; которое было в моей жизни. Это почти так же невероятно, как если бы вы выстрелили 15-дюймовым снарядом в папиросную бумагу и он, отразившись от нее, пошел бы в вас. При анализе этого я понял, что такое рассеяние назад должно быть результатом однократного столкновения, и, произведя расчеты, увидел, что это никоим образом невозможно, если не предположить, что подавляющая часть массы атома сконцентрирована в крошечном ядре. Именно тогда у меня зародилась идея об атоме с крошечным массивным центром, в котором сосредоточен заряд"*.

В 1911 году Э. Резерфорд опубликовал теорию рассеяния α -частиц ядрами атомов, из которой следовала доступная прямой экспериментальной проверке закономерность: вероятность отклонения α -частицы фольгой толщиной l на угол ϕ пропорциональна $l \cdot \cos^4 \phi/2$. Существование атомных ядер стало реальностью [103].

5.6. Дифракция рентгеновских лучей

Открытие дифракции рентгеновских лучей принадлежит Макс фон Лауэ (1879–1960), который в 1914 году за это открытие получил Нобелевскую премию. В сообщении Нобелевского комитета было написано: *«В результате открытия Лауэ неопровержимо установлено, что рентгеновское излучение представляет собой световые волны очень малой длины. Кроме того, оно привело к наиболее важным открытиям в области кристаллографии... Открытие Лауэ позволяет определить положение атомов в кристаллах и получить много полезных сведений»*. Схематично опыт Лауэ изображен на рис. 131.

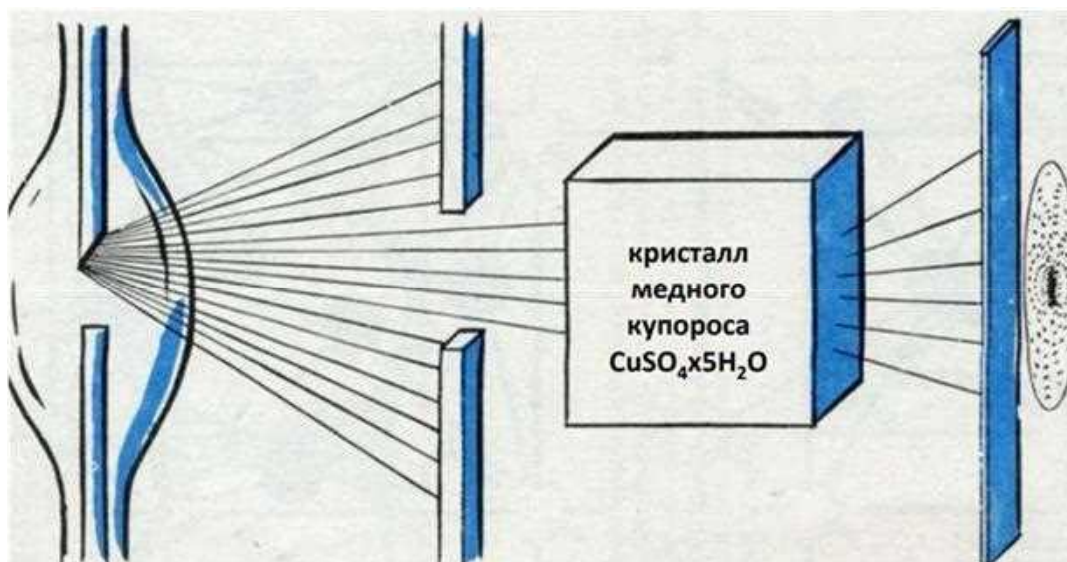


Рис. 131. Дифракция рентгеновских лучей на кристалле

Лауэ предложил эксперимент, который выполнили молодые сотрудники Мюнхенского университета. Направив на кристалл медного купороса (сульфата меди) узкий пучок рентгеновского излучения и зафиксировав рассеянное на кристалле излучение на фотопластинке, они получили, когда проявили пластинку (темные пятна на негативе соответствуют большой засветке), дифракционную картину из темных точек. Сегодня такие дифракционные картины носят название лауэграмм. Даже если падающее рентгеновское излучение состояло из смеси различных длин волн, в темные точки приходило излучение с одной и той же длиной волны. Это было еще одним подтверждением того, что наблюдалась интерференция электромагнитных волн. Соотношения между фазами волн различной длины слишком сложны для того, чтобы порождать четкую дифракционную картину. Но присутствующие в смеси излучения с какой-либо определенной длиной волны могут селективно порождать четкую дифракционную картину, хорошо различимую на общем фоне. Вдохновленный подтверждением своей гипотезы, Лауэ справился со всеми математическими трудностями. Он обнаружил, что для описания дифракции на двумерной решетке необходимо несколько раз повторить расчеты, проводимые в случае рассеяния на одномерной решетке.

Излучающий элемент (рентгеновская трубка) представляет собой вакуумный сосуд с тремя электродами: катодом, накалом катода и анодом (рис. 132). Катод при нагревании испускает электроны (термоэлектронная эмиссия). Большая разность потенциалов между анодом и катодом (от 10 до 100 кВ) ускоряет поток электронов. Пучок электронов с большой кинетической энергией попадет на положительно заряженный анод, испытывает резкое торможение и теряет часть энергии. Возникает тормозное излучение рентгеновского излучения.

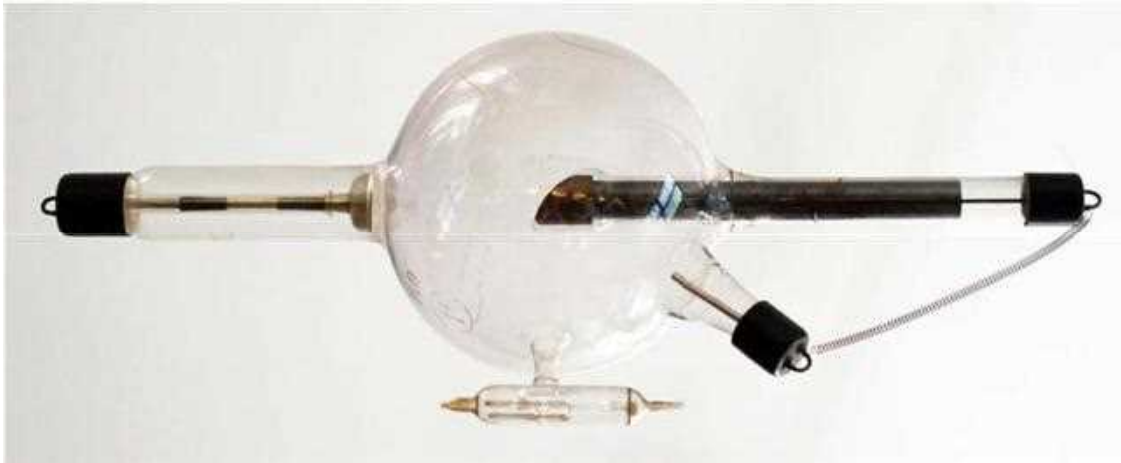


Рис. 132. Одна из ранних моделей рентгеновской трубки

На рисунке 133 представлена схема работы рентгеновской трубки, а на рисунке 134 изображен спектр излучения.

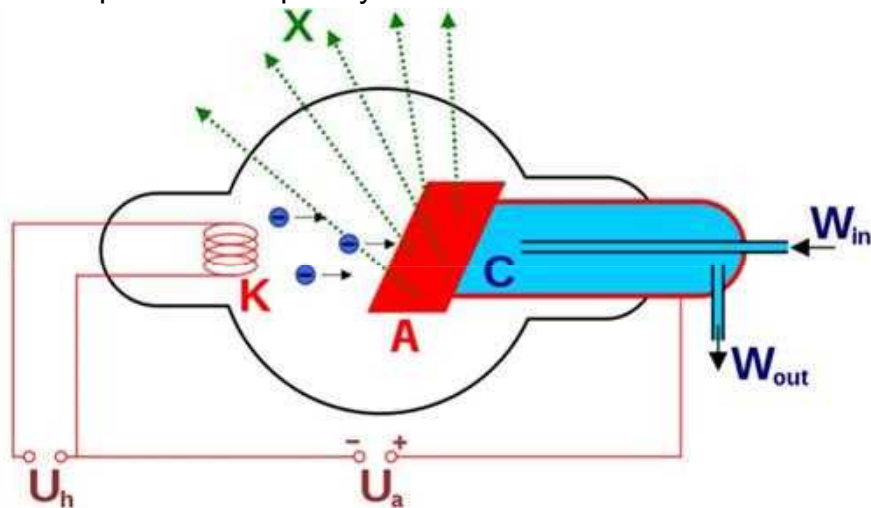


Рис. 133. Схема рентгеновской трубки:

X – рентгеновские лучи; K – катод; A – анод; C – теплопровод;
 U_h – напряжение накала катода; U_a – ускоряющее напряжение;
 W_{in} – впуск водяного охлаждения; W_{out} – выпуск водяного охлаждения

Английский физик сэр Уильям Генри Брэгг (1862–1942) разделил со своим сыном Уильямом Лоуренсом Брэггом (1890–1971) Нобелевскую премию по физике 1915 года «за заслуги в анализе кристаллической структуры с помощью рентгеновских лучей». Именно Брэгг-младший сделал первый шаг к познанию структуры кристалла, вскоре и Брэгг-отец проявил немалый интерес к изучению кристаллических структур. Он сконструировал для этой цели специальный прибор – ионизационный спектрометр, конструкция которого в основе своей предвосхищала прибор для рентгеноструктурного анализа – автоматический дифрактометр (рис.135). В качестве первых объектов были выбраны NaCl, KCl, KBr, алмаз, ZnS (сфалерит). Спектрометр регистрировал дифрагированные рефлексy при разных ориентациях различных атомных плоскостей относительно первичного пучка.

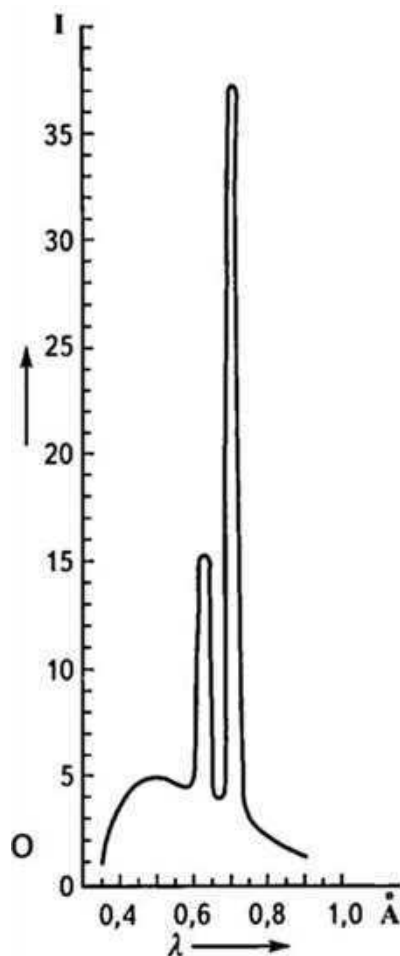


Рис. 134. Спектр X-луча, выходящего из рентгеновской трубки

«Спектрометр X-лучей, вспоминал в последствии У.Л. Брэгг, – открыл новый мир. Он оказался более мощным средством анализа кристаллической структуры, чем фотографии Лауэ ... Это было подобно золотой россыпи с разбросанными самородками, ожидающими, чтобы их подобрали. На этом этапе отец и я объединили силы и неустово работали все лето 1913 года ... Это было восхитительное время, когда мы трудились ежедневно до глубокой ночи, изучая новые миры, которые раскрывались перед нами в безмолвной лаборатории. В 1915 г. увидела свет первая монография У.Г. Брэгга и У.Л. Брэгга, посвященная рентгеноструктурному анализу, в которой было описано строение 33-х веществ. В том же году отец и сын Брэгги были удостоены Нобелевской премии, причем Брэгг-сын стал самым молодым Нобелевским лауреатом за всю историю присуждения этих престижных премий в XX веке. Вскоре к определению кристаллических структур подключилась большая группа исследователей из разных стран, но Брэгги – основоположники рентгеноструктурного анализа – еще долгие годы оставались лидерами этого важнейшего научного направления.

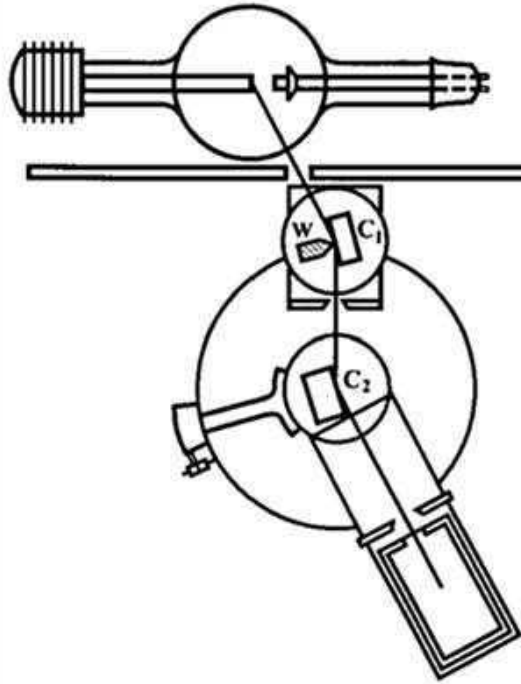


Рис. 135. Ионизационный спектрометр Брэггов

Когда рентгеновский луч падает на кристалл, представляющий собой системы плоскостей, одинаково усыпанных атомами и отстоящих друг от друга на определенное расстояние d , каждый атом становится центром испускания вторичной волны Гюйгенса. Кристалл можно разбить на набор параллельных плоскостей, определяемых атомной структурой решетки (условно говоря, первая плоскость определяется направлением от атома к двум его ближайшим соседям, вторая – направлением от атома к двум следующим соседям по кристаллической решетке и так далее). Вторичные дифракционные волны в общем случае взаимно усиливаться не будут, за исключением тех случаев, когда они попадают в точку наблюдения (на экран или приемник) со сдвигом по фазе, равным целому числу длин волн. Это условие, определяющее пики интенсивности дифракционной картины, можно записать следующим образом:

$$2d\sin\theta = n\lambda,$$

где d – расстояние между параллельными плоскостями кристаллической решетки, θ – угол рассеяния рентгеновских лучей, λ – длина волны рентгеновских лучей, а n – целое число (порядок дифракции). При $n = 1$ мы наблюдаем пик взаимного усиления волн дифракции на атомах, удаленных друг от друга на одну длину волны, при $n = 2$ – второй пик дифракции (разность хода составляет две длины волны) и т. д.

Это условие, известное теперь как закон Брэгга, говорит нам, что при данных длинах волн рентгеновское излучение усиливается под определенными углами рассеяния, и по этим углам отклонения мы можем рассчитать расстояние между плоскостями кристаллической решетки. Каждой из таких плоскостей будет соответствовать пик яркости рентгеновских лучей на дифракционной картине при соблюдении условия Брэгга. Поэтому при облучении кристалла

сфокусированным рентгеновским лучом на выходе мы получаем рассеянный в результате дифракции луч с выраженными пиками яркости. По углам отклонения пиков яркости от направления исходного луча ученые сегодня с большой точностью рассчитывают расстояния между атомами кристаллической решетки. Этот метод называется дифракционной рентгенографией. Метод Брэггов положил начало рентгеноспектроскопии (определение длины волны), а при исследовании структуры кристалла (определение постоянной кристаллической решетки) он стал основой рентгеноструктурного анализа.

5.7. Опыты Комптона

Наряду с фотоэффектом, при котором вся энергия фотона передается атомному электрону, взаимодействие гамма – излучения с электронами атомов среды может приводить к его рассеянию, то есть отклонению от первоначального направления распространения на некоторый угол. В 1922 году американский физик Артур Комптон (1892–1962) открыл явление рассеяния рентгеновских лучей, которое явилось экспериментальным подтверждением существования световых квантов (фотонов), частиц, обладающих энергией и импульсом (рис. 136). Комптон с 1918 года вел экспериментальные исследования рентгеновского излучения. Продолжая изучать рассеяние гамма- и рентгеновских лучей на веществе, Комптон применил рентгеновский спектрометр Брэггов и снова обнаружил странное: оказалось, что рассеянное излучение было двух сортов. В одном случае длина волны рассеянного излучения совпадала с исходным, в другом – была больше. Увеличение длины волны было пропорционально углу рассеяния Θ . Опять при помощи классической физики это было не объяснить. Комптон предположил, что рентгеновские лучи представляют собой частицы несмотря на то, что все физики на тот момент полагали, что рентгеновское излучение – это электромагнитные волны. Действительно, если частица X-лучей сталкивается с электроном, то она должна передать ему часть своей энергии, соответственно, ее энергия уменьшается, соответственно – увеличивается длина волны. За это открытие Комптон стал лауреатом Нобелевской премии по физике за 1927 год.

Статья А. Комптона с результатами экспериментов называлась «Рассеяние рентгеновских лучей и квантовая теория» [Комптон А. Рассеяние рентгеновских лучей как частиц // Эйнштейновский сборник 1986–1990. – М.: Наука, 1990. – С. 398–404]. В ней А. Комптон вывел математическую связь между сдвигом длины волны и углом рассеяния рентгеновских лучей, предположив, что каждый рассеянный рентгеновский фотон взаимодействует только с одним электроном. Его статья завершается отчетом об экспериментах, которые подтвердили полученное им соотношение:

$$\Delta\lambda = \lambda'(\Theta) - \lambda = \lambda_c(1 - \cos\Theta)$$

$\lambda_c = 2,426 \cdot 10^{-12} \text{ м}$ – комптоновская длина волны.

Энергия рассеянного фотона с длиной волны λ' измерялась Комптоном с помощью брэгговского рассеяния в кристалле в сочетании с ионизационной камерой. Камера могла измерять полную энергию, выделяемую с течением времени, а не энергию отдельных рассеянных фотонов.

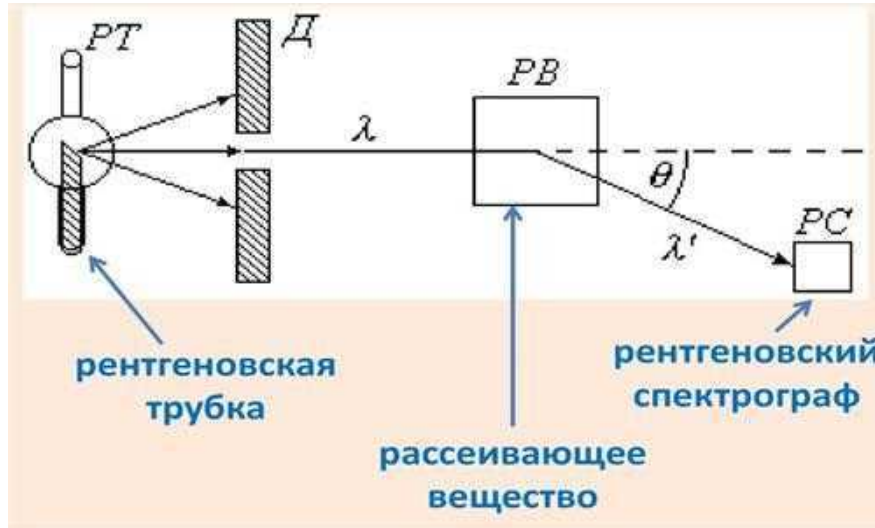


Рис. 136. Схема эксперимента А. Комптона

Величина, на которую изменяется длина волны падающего излучения, называется комptonовским сдвигом $\Delta\lambda$. На рисунке 137 представлен график из статьи А. Комптона, на котором показана зависимость интенсивности излучения от угла рассеяния θ .

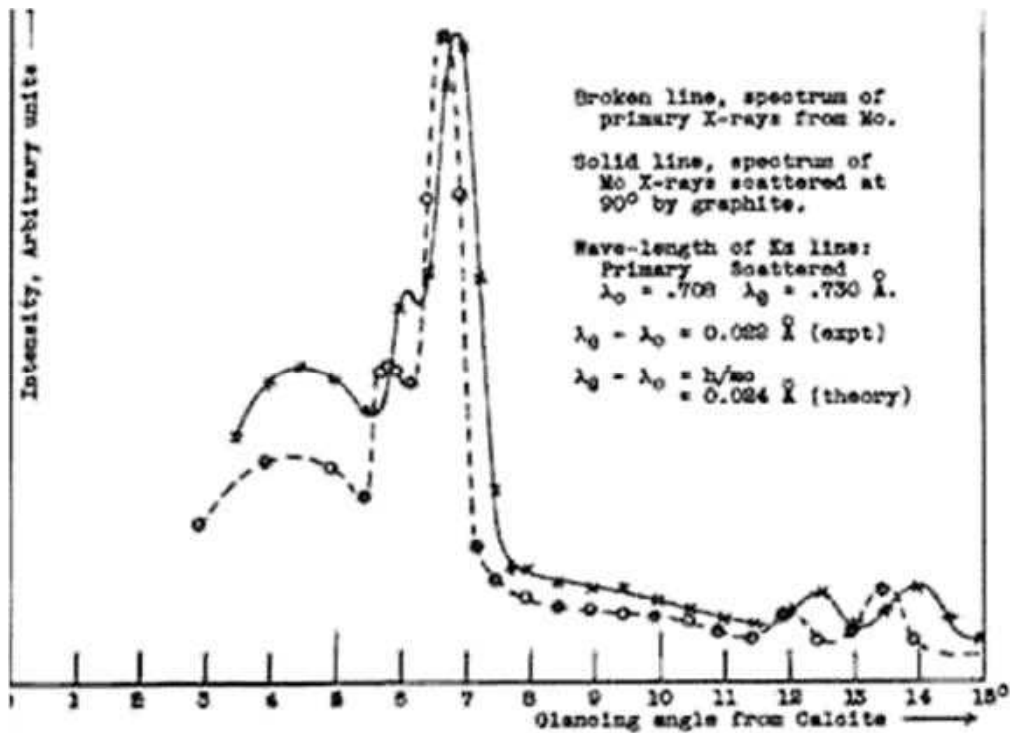


Рис. 137. График из статьи А. Комптона

Наблюдаемый экспериментально А. Комптоном эффект становится объяснимым, если предположить, что электромагнитное излучение представляет поток фотонов, каждый из которых обладает энергией $h\nu$ и импульсом и ведет себя как движущийся шарик. В легких веществах, с которыми проводил опыты А. Комптон, энергия связи электронов мала по сравнению с энергией, передаваемой ему квантами рентгеновского излучения, и электроны можно считать свободными. При комптоновском рассеянии происходит упругое столкновение фотона со свободным электроном. По образному выражению Макса Борна эффект Комптона – это игра в бильярд фотонами и электронами.

5.8. Экспериментальные исследования радиоактивности

Первые годы исследований радиоактивности были связаны с открытием в конце 1895 года Вильгельмом Рентгеном рентгеновских лучей.

Явление радиоактивности открыл в 1896 году французский ученый Антуан Анри Беккерель (1852–1908). Это открытие было сделано случайно при исследовании фосфоресценции (это вид фотолюминисценции) в солях урана, Беккерель искал новые источники рентгеновских лучей в фосфоресцирующих веществах. Он завернул флюоресцирующий материал – уранилсульфат калия $K_2(UO_2)(SO_4)_2 \cdot 2H_2O$ – в непрозрачный материал вместе с фотопластинками, с тем, чтобы приготовиться к эксперименту, требующему яркого солнечного света. Однако ещё до осуществления эксперимента Беккерель обнаружил, что фотопластинки были полностью засвечены. Это открытие побудило Беккереля к исследованию спонтанного испускания ядерного излучения. Он обнаружил, что соли урана засвечивают фотопластинку даже, если она защищена темной бумагой. При этом излучение урана не зависит от солнечного света, в отличие от другого типа свечения – люминесценции.

Кроме Беккереля радиоактивный распад исследовали Пьер и Мария Кюри. В 1898 году они открыли радиоактивность тория, а несколько позже – радия и полония. К началу 1898 года все физики считали, что лучи Беккереля представляют собой смесь первичных и вторичных рентгеновских лучей неизвестного происхождения. Предполагалось, что источниками этих лучей может быть внешнее излучение или сам атом. Открытие двух новых химических элементов, полония и радия, побудили физиков заняться поисками источника их энергии. Юлиус Эльстер (1854–1920) и Ганс Гейтлер (1855–1923) в Германии захотели проверить, как воздействует магнитное поле на проводимость, вызванную лучами Беккереля. Они поместили радий, содержащийся в алюминиевом сосуде, внутрь стеклянной трубы на электрод, находившийся под потенциалом 500 В (рис. 138).

Другой электрод был соединен с заземленным электрометром. Затем Ю. Эльстер и Г. Гейтель откачивали трубу до давления 1 мм рт. ст. (так же, как они делали в более ранних экспериментах) и качественно определяли влияние электромагнита на скорость разряда электрометра. Они обнаружили, что разряд,

вызываемый лучами радия, заметно замедлялся при включении магнитного поля, подобно тому, что наблюдалось в их прежних экспериментах, и, как и прежде, сделали вывод, что магнитное поле отклоняет ионы газа. Однако оставалось возможным, что в этом эксперименте сами лучи Беккереля, так же как ионы газа, отклонялись магнитным полем, в результате чего уменьшалась ионизация в пространстве между электродами.

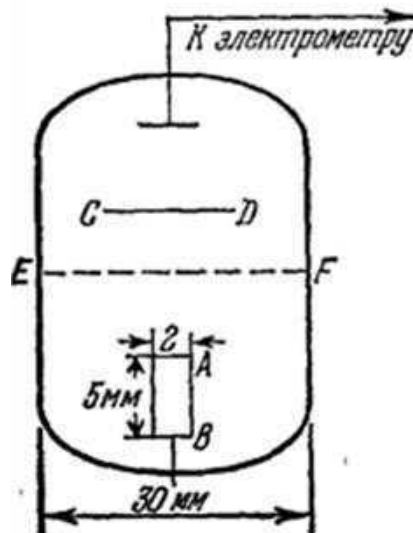


Рис.138. Экспериментальная установка Эльстера и Гейтлера для изучения влияния магнитного поля на ионизацию, вызванную лучами радия

Для проверки этой гипотезы Эльстер и Гейтель использовали фосфоресцентный экран, позволявший определить направление прохождения лучей. Чтобы предотвратить попадание на экран частиц атомных размеров, они закрыли трубу на расстоянии около 15 мм от радиевого источника воздухонепроницаемой алюминиевой пластинкой толщиной 1 мм. Как и ожидали Эльстер и Гейтель, магнит не оказывал влияния на положение светящегося пятна, создаваемого на экране лучами радия. Они пришли к выводу, что «...лучи Беккереля при воздействии магнитных сил не испытывают отклонения, которое можно было бы сравнить с отклонением катодных лучей. Таким образом, и в этом отношении – как и по всем другим характеристикам, известным в настоящее время, – они подобны лучам Рентгена» [104].

Беккерель также проверил отклонение открытых им лучей в магнитном поле, он располагал препараты в различных точках в поле электромагнита с регулируемой напряженностью поля, используя для наблюдений фотопластинки. Его статьи с результатами были опубликованы 11 и 26 декабря 1899 года. До этого никто всерьез не предполагал, что лучи Беккереля могут содержать материальные частицы. Из экспериментов с катодными лучами и из эффекта Зеемана следовало существование тел меньших, чем атомы.

Пьер Кюри показал, что отклонение испытывает только более проникающее, или бета-излучение. Он и Мария Кюри обнаружили, что бета-лучи несут отрицательный заряд [105]. Другим экспериментаторам удалось отклонить

бета-лучи электрическим полем. Этот результат далее дал возможность определять отношение заряда к массе для бета-частиц, пропуская их через перекрещивающиеся магнитное и электрическое поля. Первое такое измерение было выполнено Беккерелем, который получил отношение того же порядка величины, как у частиц в катодных лучах. К середине 1900 г. большинство ученых считали бета-лучи частицами катодных лучей, движущимися с высокой скоростью. Может показаться, что отождествление частицы бета-излучения с «корпускулой» Дж. Дж. Томсона должно было немедленно обнаружить несостоятельность теории рентгеновского происхождения радиоактивности. Однако на деле открытия 1899 г. вначале усилили позиции этой теории. Поскольку лучи Беккереля содержали корпускулы, можно было ожидать, что вторичное рентгеновское излучение тоже будет содержать их. Этот вывод был подтвержден в апреле 1900 г., когда Пьер Кюри и Жорж Саньяк, один из пионеров изучения вторичных рентгеновских лучей, сообщили, что вторичное рентгеновское излучение действительно несет отрицательный заряд. Этот результат хорошо согласовался с представлением о лучах Беккереля как о смеси первичных и вторичных рентгеновских лучей. Тем не менее, открытие того факта, что часть излучения Беккереля составляют материальные частицы, дало пищу для более радикальных гипотез. Бета-лучи, обладавшие наибольшей скоростью, достижимой в то время для материальных частиц, были полезны для изучения теоретически важного эффекта – зависимости отношения e/m от скорости. Исследования Вальтера Кауфмана, который показал, что это отношение убывает примерно в соответствии с электродинамикой токов, привели ряд физиков к постановке вопроса о том, может ли вся масса иметь неэлектродинамическое происхождение [106].

Более непосредственное отношение к радиоактивности имели идеи, которые привели к представлению о расщеплении атома и превращении элементов. Например, супруги Кюри в 1900 г., как и большинство, считали, что возможно несколько объяснений радиоактивности, однако они отдавали предпочтение «баллистической» гипотезе. Согласно этой гипотезе «...радий непрерывно испускает маленькие отрицательно заряженные частицы». В следующем году два других французских физика постулировали, что причиной радиоактивности являются субатомные превращения.

Французский физик, лауреат Нобелевской премии по физике 1926 года, Жан Перрен (1870–1942), исследования которого помогли подтвердить существование корпускул Томсона, предложил модель атома, в которой эти отрицательно заряженные частицы обращались вокруг положительно заряженных «солнц» большей массы. Перрен предположил, что наружные «планеты» в наиболее тяжелых атомах настолько легко отделяются от своих «солнц», что эти элементы оказываются спонтанно радиоактивными. Позднее, в 1901 г., Беккерель разработал для объяснения радиоактивности теорию атомного расщепления, в которой он представлял атом как совокупность томсоновских корпускул и положительно заряженных частиц атомных размеров.

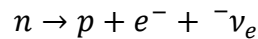
Беккерелю также удалось сделать ещё одно «случайное» крупное открытие, относящееся к радиоактивности. В апреле 1902 года для публичной лекции ему понадобилось радиоактивное вещество, он взял его у супругов Кюри и положил пробирку с ним в жилетный карман. Прочтя лекцию, он вернул пробирку с хлоридом радия (RaCl_2) владельцам, а на следующий день обнаружил на теле под жилетным карманом покраснение кожи в форме пробирки, на месте которого позже образовалась язва. Беккерель рассказал об этом Пьеру Кюри, и тот поставил на себе опыт: в течение десяти часов носил привязанную к предплечью пробирку с радием. Через несколько дней у него тоже появилось покраснение, перешедшее затем в тяжелейшую язву, от которой он страдал в течение двух месяцев. Так впервые было открыто биологическое действие радиоактивности. В 1903 году Беккерель совместно с П. и М. Кюри получили Нобелевскую премию по физике «В знак признания выдающихся заслуг в открытии самопроизвольной радиоактивности».

5.9. Опыты Дж. Чедвика по открытию нейтрона

В 1912 году, анализируя результаты опытов по рассеянию α -частиц на большие углы, Э. Резерфорд пришел к мысли о существовании внутри «большого» ($\sim 10^{-8}$ см) атома очень маленького ($\sim 10^{-12}$ см) положительно заряженного ядра. Позже в 1919 году он же обнаружил внутри ядра протоны, что привело к созданию первой довольно успешной протон-электронной модели атомного ядра. Читая лекцию для физиков об этой модели Резерфорд высказал предположение о том, что наряду с простейшим заряженным ядром – протоном должно существовать простейшее нейтральное ядро, обладающее нулевым электрическим зарядом, высокой проникающей способностью и сильным взаимодействием с атомными ядрами. В это время в лабораторию Резерфорда был приглашен в качестве нового сотрудника 30-летний Джеймс Чедвик (1891–1974). Совместно с Резерфордом он пытался обнаружить нейтрон, но по разным причинам это не удалось.

Первые статьи с экспериментальными результатами, в которых сообщалось о существовании новой нейтральной частицы, появились в 1930 году. Немецкие физики Вальтер Боте и Ганс Беккер, облучив α -частицами полония ядра бериллия и лития, обнаружили вместо ожидаемых протонов новое нейтральное излучение, которое очень слабо поглощалось в свинце. В 1932 году супруги Ирен и Фредерик Жолио-Кюри, применив камеру Вильсона, установили, что новое излучение при встрече с легким веществом выбивает из него ядра отдачи, происхождение которых и на этот раз нельзя было отнести за счет γ -квантов, не хватало энергии. Разрешил эту загадку Джеймс Чедвик в этом же 1932 году. Он исследовал новое излучение с помощью ионизационной камеры, поочередно наполняемой водородом и азотом. Ядра отдачи, возникающие под действием нового излучения, создавали на своем пути ионы, которые регистрировала камера в виде импульсов тока. По величине импульсов тока можно было судить о кинетической энергии ядер отдачи. Из законов сохранения

энергии и импульса можно получить соотношение, связывающее между собой максимальные значения кинетической энергии ядер отдачи азота и водорода, массы этих ядер и массу ядра нового излучения в предположении, что оно состоит не из γ -квантов с $m=0$, а из частиц с $m \neq 0$. Подсчет дал для нее близкое к массе протона значение $m_n \approx m_p \approx 1840 m_e \approx 1,66 \cdot 10^{-24}$ г. Точную величину массы нейтрона нашли из энергетического баланса ядерных реакций с участием нейтронов. Превышение массы нейтрона по сравнению с массой протона на $2,5 m_n$ позволяет свободному нейтрону распадаться по схеме:



где p – протон, e^- – электрон, $\bar{\nu}_e$ – электронное антинейтрино.

Схема опыта Чедвика изображена на рис. 139. В эксперименте поток α -частиц от полониевого источника падал на пластинку из бериллия, и возникающее в результате излучение взаимодействовало с водородом или азотом в ионизационной камере. Ядра атомов этих газов испытывали отдачу и двигались, создавая на своем пути ионы, которые регистрировались в виде электрических импульсов.

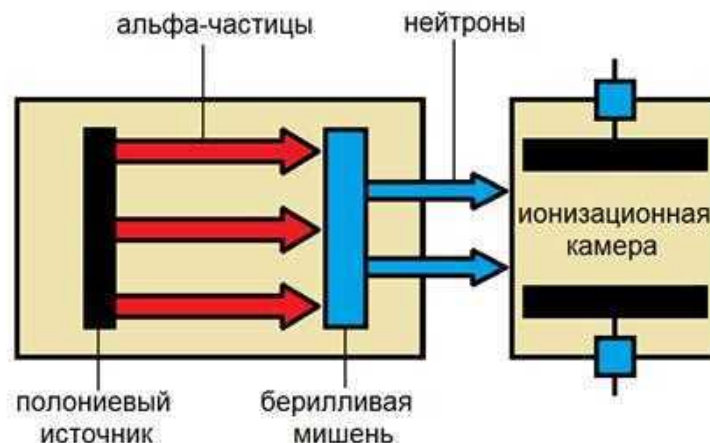


Рис. 139. Схема опыта Дж. Чедвика

«За открытие нейтрона» – с такой формулировкой Д. Чедвику в 1935 году была присуждена Нобелевская премия. Вскоре после открытия нейтрона была предложена протон-нейтронная модель состава ядра, которая до сих пор считается единственно правильной моделью атомного ядра, а 1932 год – годом рождения современной ядерной физики. Нейтроны живут в ядрах, не распадаясь, столько же времени, сколько атомы, в состав которых входят ядра. Свободные нейтроны имеют конечное время жизни (≈ 900 с), после чего распадаются. В отличие от ядерных, свободные нейтроны никогда не находятся в покое, а всегда куда-то летят, пока не распадутся или их не поглотят какие-то атомные ядра.

5.10. Открытие электронного парамагнитного резонанса

Открытие электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) было сделано в 1944 году в городе Казани советским физиком-экспериментатором Евгением Константиновичем Завойским (1907–1976) (рис. 140). А спустя два года, в 1946 году, в США было открыто родственное явление ядерного магнитного резонанса (ЯМР) Эдвардом Парселлом (1912–1997) и независимо от него Феликсом Блохом (1905–1983)²². С тех пор круг применений ЭПР и ЯМР и родственных им явлений, называемых обобщающим термином магнитно-резонансные явления, чрезвычайно вырос. Только одно из многих применений магнитно-резонансных явлений, а именно магнитно-резонансная томография (МРТ), известно почти всем.

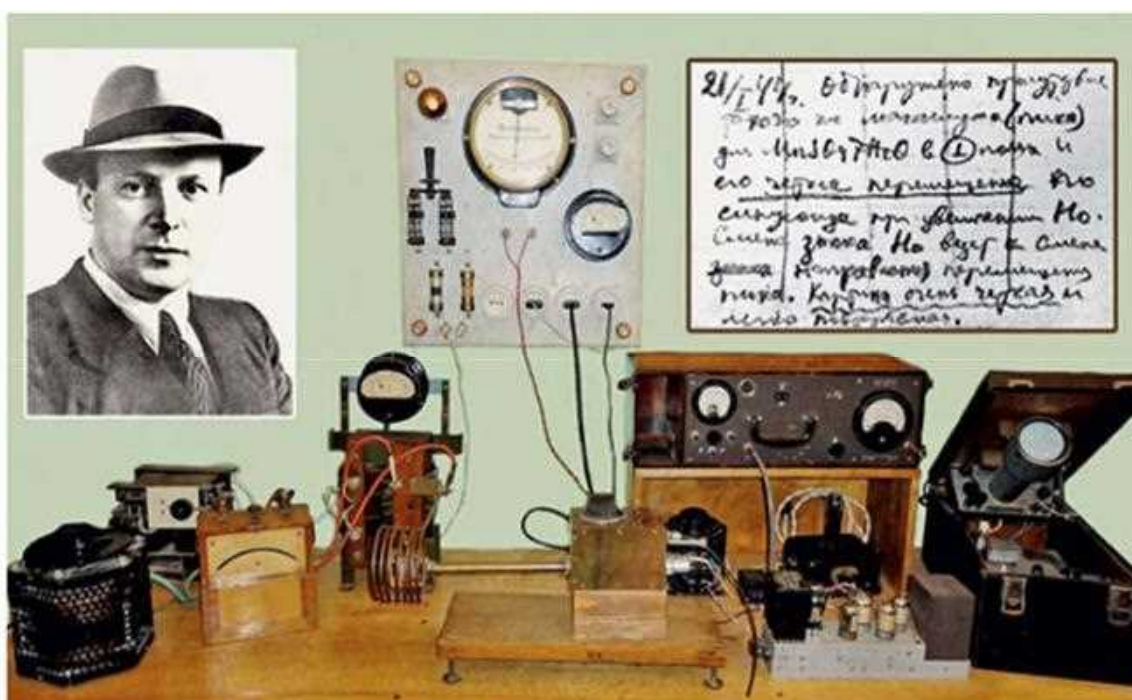


Рис. 140. Установка Е.К. Завойского, на которой впервые был получен сигнал ЭПР (Казанский федеральный университет)

История открытия магнитного резонанса начинается в конце XIX века: с открытия электромагнитных волн Генрихом Герцем в 1888 году и изобретения радио в 1895 году Александром Степановичем Поповым. Далее последовало бурное развитие радиотехники, различных устройств, генерирующих электромагнитные волны, усиливающих, преобразующих и принимающих электромагнитные колебания и волны радиодиапазона. В физике начинаются работы по применению радиотехники для исследования свойств вещества и в первую очередь атомного ядра. В первые десятилетия XX века рождается

²² Этому открытию и 60-летию Нобелевской премии за открытие ЯМР посвящена статья: Кессених А.В. Эдвард Миллз Пёрселл и «открытие» магнитного резонанса (ufn.ru)

квантовая механика, описывающая поведение и свойства микроскопических объектов, которыми являются элементарные частицы в атоме.

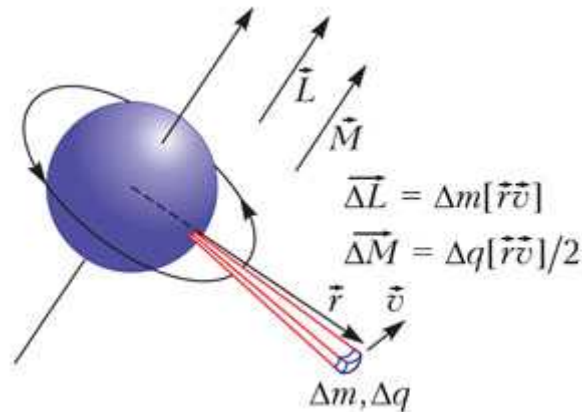


Рис. 141. Возникновение момента импульса и магнитного момента у вращающегося заряженного тела [107]

В классической механике момент импульса – это мера вращательного движения тела, тем большая, чем дальше находятся его точки от оси вращения и чем большую тангенциальную скорость они имеют. Но вращение заряженной частицы – электрона – это одновременно вращение и массы, и заряда. Первое создает момент импульса $\vec{L}$, а второе – магнитный дипольный момент $\vec{M}$. (рис. 141). В своей теории квантовых переходов Нильс Бор в 1913 году предположил, что момент импульса электрона, и энергия электрона квантуются, принимают дискретный ряд значений. Вопрос о существовании резонансного излучения при переходе между уровнями энергии, возникающими при различных ориентациях магнитных моментов во внешнем поле, был впервые поставлен П. Эренфестом и А. Эйнштейном [108].

Магнитный дипольный момент (который является векторной величиной) можно сориентировать во внешнем магнитном поле любым образом. Немецкие физики Отто Штерн и Вальтер Герлах в эксперименте с пучками атомов (1922 г.) обнаружили, что ориентация магнитного дипольного момента атома в магнитном поле также квантуется. Они заставляли атомы серебра пролетать (в вакууме) через зазор магнита с очень неоднородным полем (рис. 142). В таком поле траектория частицы, имеющей магнитный дипольный момент, искривляется: она втягивается в область более сильного магнитного поля или выталкивается из нее в зависимости от ориентации своего магнитного момента относительно направления магнитного поля. В итоге атомы с разной ориентацией магнитного момента прилетали в разные участки детектора (пластинки) на выходе из магнита. Однако вместо произвольного набора траекторий наблюдались только две.

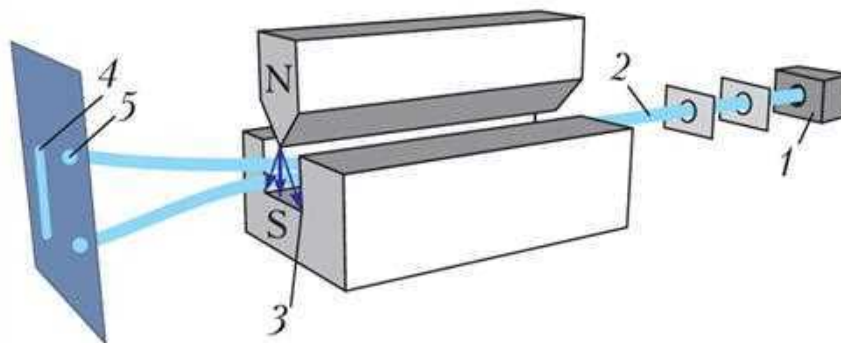


Рис. 142. Схема эксперимента Штерна и Герлаха. Здесь 1 – нагреватель; 2 – пучок атомов серебра; 3 – неоднородное магнитное поле; 4 – результат, ожидаемый на основе классических представлений о магнитном моменте; 5 – наблюдаемый результат эксперимента

Для объяснения эксперимента Штерна и Герлаха Альберт Эйнштейн и Пауль Эренфест в 1922 году предположили, что при переходе атома между состояниями с разными ориентациями его дипольного момента также должны излучаться или поглощаться электромагнитные волны, подобно тому, как это происходит при переходах электрона между разными орбитами в атоме (рис. 143). На языке классической физики частица ведет себя как заряженный волчок. Под действием внешнего постоянного магнитного поля этот волчок начинает прецессировать вокруг направления поля. Если же одновременно подействовать на него дополнительным переменным магнитным полем соответствующей ориентации и частоты, то волчок, не переставая прецессировать, развернется относительно постоянного магнитного поля. На квантовом языке, частица, находящаяся на нижнем магнитном уровне, поглотит квант энергии переменного магнитного поля и перейдет на верхний магнитный уровень.

В 1937 году это поглощение было обнаружено американским физиком Исидором Раби (1898–1988), также в экспериментах с пучками, правда на этот раз – молекулярными, а исследуемый магнитный момент принадлежал ядрам, а не электронам. Его эксперимент был похож на эксперимент Штерна и Герлаха, только наряду с зазорами магнитов с сильно неоднородным полем молекулы также пролетали через участок с однородным полем, в котором их облучали радиочастотным излучением [109]. При поглощении этого излучения молекулы могли изменить ориентацию магнитного момента своих ядер и в результате «перейти» с одной траектории на другую. Такое поглощение было обнаружено И. Раби. Причем, что важно, оно было резонансным, то есть происходило только при определенной частоте, которая соответствовала величине кванта электромагнитного излучения, как раз равной разности между энергиями двух соседних ориентаций ядра в магнитном поле. Это было первое в мире экспериментальное обнаружение ядерно-магнитного резонанса. В 1944 году И. Раби был удостоен Нобелевской премии с формулировкой: «за резонансный метод измерений магнитных свойств атомных ядер».

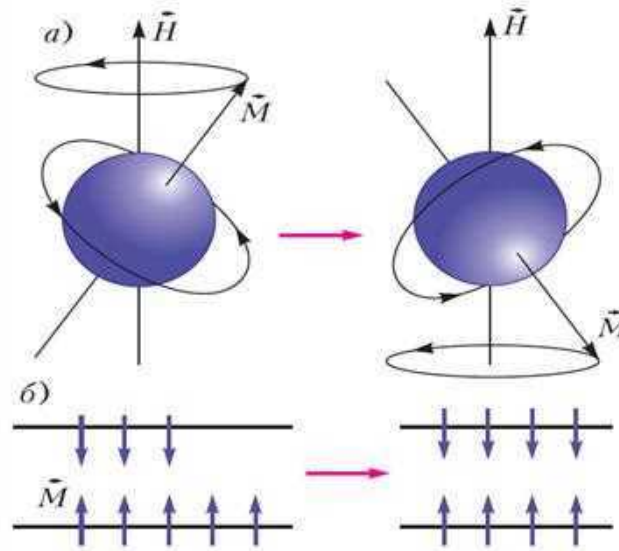


Рис. 143. Иллюстрация переходов между состояниями с разными ориентациями дипольного момента частицы $\vec{M}$ относительно внешнего магнитного поля напряженности $\vec{H}$ в терминах классической (а) и квантовой (б) физики. В обоих случаях переход обозначен красной стрелкой

На пути к своему открытию Е.К. Завойскому еще надо было преодолеть ряд затруднений. Дело в том, что нужно не только поглотить излучение, но еще и избавиться от поглощенной энергии. В результате поглощения и вызванного им перехода между энергетическими уровнями происходит обеднение нижнего уровня, т.е. становится меньше таких частиц, которые могли бы поглотить следующую порцию энергии. А на верхнем уровне, наоборот, частиц становится все больше, и они могут возвращаться на нижний, испуская излучение. В конечном итоге их станет одинаковое количество (произойдет выравнивание заселенностей уровней) и поглощение электромагнитной энергии прекратится, возникнет равновесие. Чтобы поглощение не прекращалось, нужно, чтобы частицы возвращались на нижний уровень без излучения и разность заселенностей уровней всегда оставалась ненулевой. Обычно так и происходит в системе любых частиц. Безызлучательная потеря энергии, или релаксация возбужденного состояния, происходит в любой системе, где есть взаимодействие частицы с каким-либо окружением. В вакууме этого взаимодействия нет. А в веществе ядра находятся в составе кристаллической решетки (если исследуется твердое вещество) или же окружены молекулами растворителя (если вещество жидкое). Взаимодействия, которые испытывает ядерный спин с окружением, очень разнообразны, и именно они определяют характеристики резонансного поглощения радиоизлучения магнитным диполем ядра: форму, положение и интенсивность линий поглощения, их зависимость от интенсивности излучения, температуры, механических напряжений и многих других факторов, которые только могут играть роль в каждом конкретном случае. И именно эта связь характеристик сигнала магнитного резонанса со свойствами окружения и делает его таким замечательным методом исследования вещества.

То, что удалось сделать Раби в пучке невзаимодействующих молекул, никак не удавалось сделать в конденсированном состоянии (в жидкости или твердом теле). Важную роль здесь играл и метод регистрации, и выбор вещества. Для наблюдения электронного парамагнитного резонанса необходимо было исследовать парамагнитные вещества, которые обладают собственными микроскопическими магнитами электронного происхождения. Наблюдать ядерный магнитный резонанс можно было и в диамагнитных веществах, обладающих только ядерными магнитами. Еще за несколько лет до Раби поиском ЯМР в кристаллических диамагнитных солях начал заниматься голландский физик-экспериментатор Корнелис Якоб Гортер (1907–1980). Его поиски оказались безуспешными, но приобретенный им опыт работ позволил ему дать ценные советы Раби, которые и помогли сделать открытие [110]. А опыты Раби, в свою очередь, вдохновили Завойского на поиск ЯМР.

К тому времени Завойский уже активно занимался изучением взаимодействия радиочастотных электрических полей с веществом, но сведения об открытии Раби указали ему наиболее интересное направление поисков. Поиски эти были на грани технических возможностей того времени, поскольку поглощаемая веществом при резонансе энергия радиочастотного излучения чрезвычайно мала. Чтобы ее зарегистрировать, Гортер использовал прямой метод: он измерял, насколько нагрелось исследуемое вещество в результате облучения. Завойский же разработал метод, основанный на изменениях свойств самого генератора радиоизлучения; этот косвенный метод оказался очень чувствительным. Полностью погрузившись в исследования поглощения радиоизлучения веществом, помещенным в магнитное поле, весной 1941 года Евгений Константинович Завойский со своими единомышленниками Семеном Александровичем Альтшулером и Борисом Михайловичем Козыревым смогли увидеть первые сигналы ЯМР от ядер водорода воды. Но начавшаяся война и непонимание коллег не позволили довести исследования до конца. Работы Завойского были признаны бесперспективными, экспериментальная установка уничтожена. Условия военного времени вскоре заставили его заняться работами, имеющими военное приложение, а также многочисленными общественными работами, характерными для военного времени: дежурством в пожарных командах, рытьем окопов, военной подготовкой, заготовкой сена и дров для университета и т.п. Однако в 1943 году, как только появилась малейшая возможность заняться своими основными научными работами, Завойский вернулся к предвоенным исследованиям. Было ясно, что для этих измерений нужно однородное магнитное поле. Из-за отсутствия хороших магнитов он стал работать с магнитными полями, создаваемыми обычным соленоидом (катушка из нескольких витков провода) – более однородными, но относительно слабыми. В таких слабых полях измерить поглощение радиоволн атомными ядрами очень сложно: у ядра очень маленький магнитный момент, его взаимодействие со слабым магнитным полем приводит к совсем ничтожному эффекту. По сравнению с ядром электрон является гораздо более сильным магнитом – его магнитный момент в тысячи раз больше, чем у ядра. И наблюдать, как

поворачивается магнитный момент электрона в слабом магнитном поле (поглощая при этом энергию радиоволн), было гораздо проще. В 1944 году Завойский смог обнаружить резонансное поглощение радиоизлучения в парамагнитных кристаллах, помещенных в магнитное поле (рис. 144). Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) был открыт.

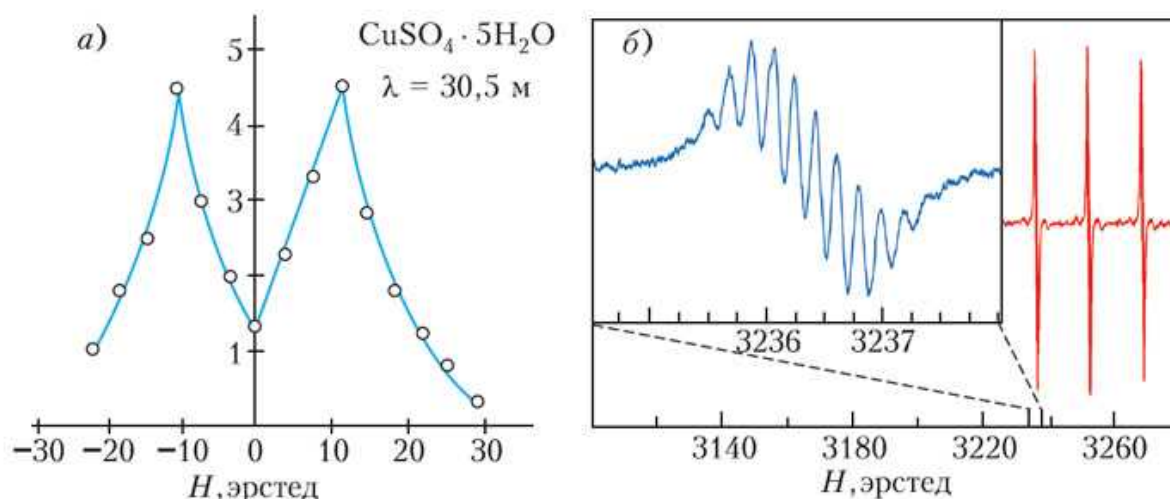


Рис. 144. Спектр электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), впервые полученный Е.К. Завойским в 1944 году (а) и один из «современных» примеров спектра ЭПР (б)

Спустя два года два американских физика, Эдвард Парселл и Феликс Блох, независимо друг от друга открыли поглощение энергии радиоволн ядрами водорода (ЯМР) в воде и в парафине. Эти открытия сразу были оценены физиками, начался вал исследований в этой области. Одна за другой, открывались все новые и новые разновидности магнитных резонансов (поглощение радиоизлучения ядрами, обладающими квадрупольным электрическим моментом, ферромагнитными и антиферромагнитными веществами и др.), все новые их свойства (например, сверхтонкая структура спектров ЭПР, обусловленная магнитным взаимодействием электронов и ядер), все новые методы (импульсные варианты магнитно-резонансной спектроскопии, так называемые двойные резонансы и др.). В нашей стране С.А. Альтшулер теоретически предсказал акустический парамагнитный резонанс – резонансное поглощение звука парамагнитным веществом, помещенным в магнитное поле.

На рисунке 145 дана схема формирования начала развития идей магнитного резонанса, которые стали развиваться после установления электронной теории с возможностью определения массы и заряда электрона, после гипотезы Ампера о молекулярных токах, открытия эффекта Зеемана. У открытия этого явления большая предыстория, уходящая в начало XIX века.

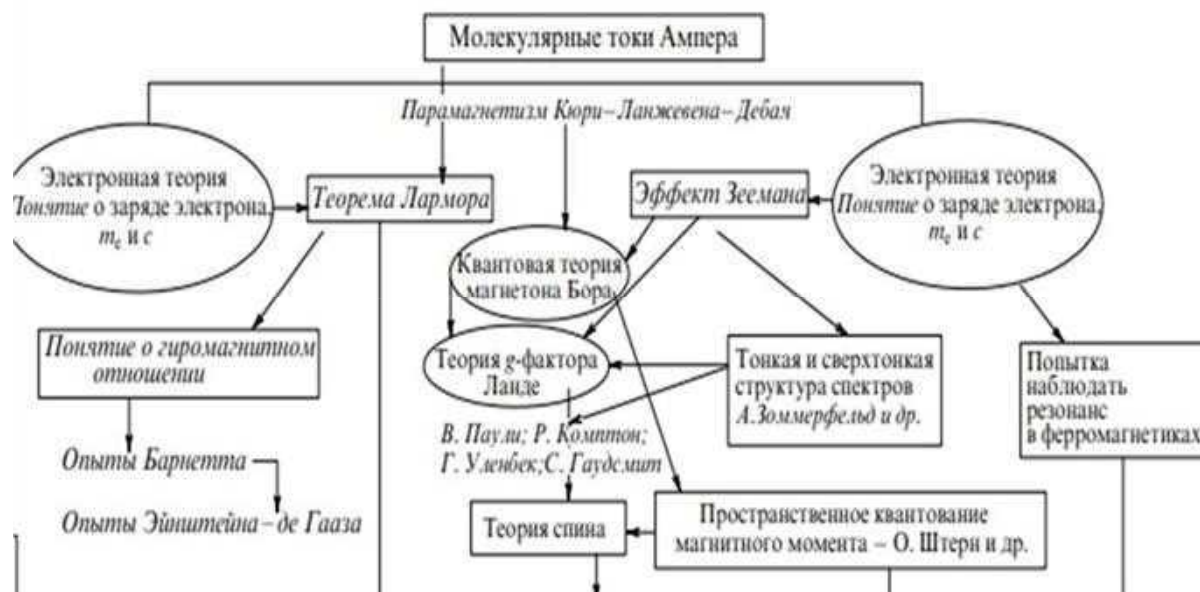


Рис. 145. Схема последовательного формирования идей и методов изучения магнитного резонанса

Одно из наиболее перспективных современных применений магнитного резонанса – это магнитная резонансная интроскопия в медицине. В работе медицинских магниторезонансных (ЯМР) томографов в настоящее время добиваются лучшего разрешения, чувствительности, развивают методы контрастирования изображения. На рисунке 146 представлена томограмма (срез) головного мозга практически здорового пациента.



Рис. 146. Сагиттальный срез магниторезонансного изображения головы практически здорового человека. Снято в Центре магнитной спектроскопии и томографии МГУ Н.В. Анисимовым [111]

5.11. Создание лазера

Благодаря своим уникальным свойствам лазер широко используется как в науке, так и в быту; как в мирной промышленности, так и в военном деле. Лазер (акроним от light amplification by stimulated emission of radiation – усиление света посредством вынужденного излучения) – это устройство, преобразующее энергию накачки в энергию когерентного, монохроматического, поляризованного и узконаправленного потока излучения. В основе работы лазера лежит квантово-механическое явление вынужденного (индуцированного) излучения.

Лазер не был детищем одного человека – скорее, он стал кульминацией научных наблюдений и идей, которые учёные разных стран развивали в первой половине XX века. В основе работы лазера лежит понимание того, что свет излучается и поглощается дискретными пучками энергии – фотонами. Первый намёк на существование фотонов появился в работах немецкого физика Макса Планка, когда в 1900 году он пытался объяснить наблюдаемые свойства так называемого “излучения чёрного тела”.

Возможность построения этого устройства была предсказана сначала теоретически. Она заключается в том, что при сильном возбуждении некоторых веществ возникает инверсия населенностей, то есть резко неравновесное состояние, при котором на верхних энергетических уровнях в атомах оказывается больше электронов, чем на нижних. Возврат в равновесное состояние сопровождается особым видом излучения – стимулированным или индуцированным, вынужденным излучением. Вынужденное излучение было объяснено Эйнштейном в статьях, опубликованных в 1916 и 1917 гг. Стимулированное излучение характеризуется высокой монохроматичностью, острой направленностью луча и другими свойствами когерентности. При слабом возбуждении тех же веществ существует лишь спонтанное излучение, лишенное признаков когерентности, для перехода от одного режима к другому интенсивность возбуждения (или накачки) должна превысить некоторый порог. За порогом возникает сверхлинейная зависимость интенсивности генерации, а также резкое сужение спектра генерации, усиливаемое размещением активного вещества в резонаторе, настроенном на частоту генерации. В течение долгового времени физикам не удавалось проверить эти теоретические предсказания.

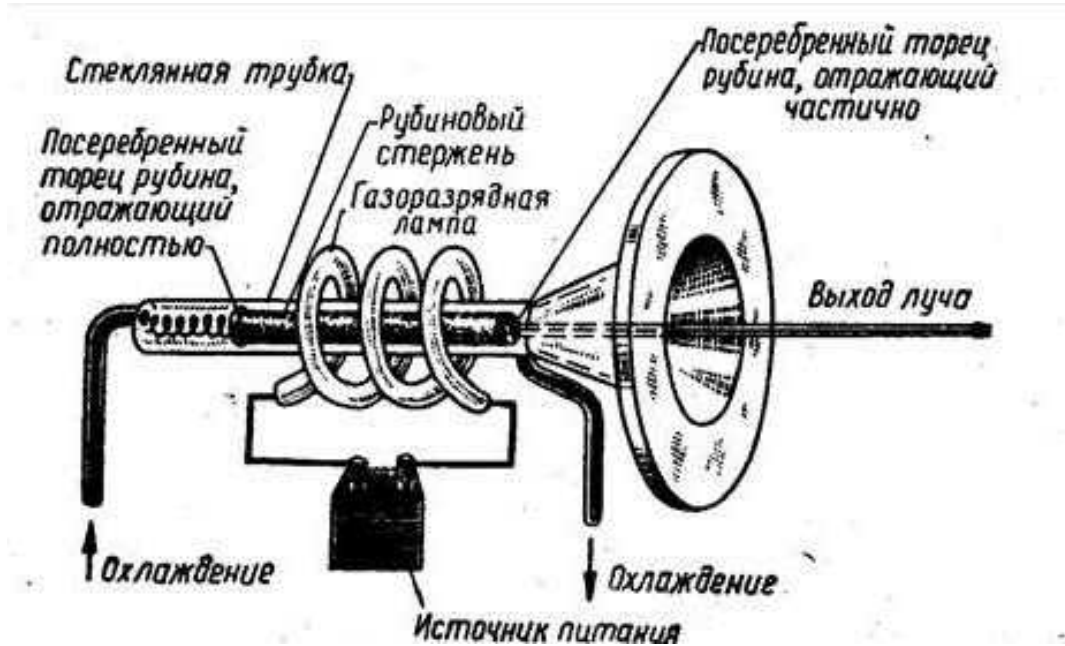


Рис. 147. Устройство твердотельного лазера

В 1950 году французский физик Альфред Кастлер (1902–1984) открыл метод оптической накачки – способ, позволяющий сдвигать электроны в атомах с одного магнитного подуровня на другой, и через два года вместе с коллегами смог воплотить его на практике [112]. Американский физик Джозеф Вебер (1919–2000) на конференции выступил с докладом об использовании вынужденного излучения для усиления микроволновых сигналов. Суть его идеи была в том, что вынужденное излучение можно применять для создания “лавины” синхронных фотонов, когда небольшое количество частиц запускает целый их каскад, подобно тому, как несколько камней могут вызвать оползень.

К созданию самого устройства, способного к усилению света путем вынужденного излучения пришли намного позже. В 1952 году советские физики Николай Басов и Александр Прохоров представили модель генератора, который они назвали микроволновым квантовым генератором – мазером (рис.147) [113]. Чарльз Таунс (1915–2015) независимо от А.М. Прохорова (1916–2002) и Н.Г. Басова (1922–2001) выдвинул идею нового принципа генерации и усиления электромагнитных волн и совместно с сотрудниками создал мазер на аммиаке (1954 г.). Американскому физiku Теодору Майману (1927–2007) удалось создать первый действующий оптический генератор (он назвал его лазер) на кристалле рубина размером в кубический сантиметр (рис.147). Сообщение об этом было сделано в журнале «Nature» 6 августа 1960 года. После того, как Майман в июле 1960-го представил миру работающий лазер, аналогичные устройства начали демонстрировать и другие исследовательские группы. Американский физик, Нобелевский лауреат Артур Шавлов (1921-1999) со своим техником сделали лазер на основе другого типа рубина. Экспериментаторы, использовавшие кристалл фторида кальция, показали свою разработку в ноябре того же года – их лазеру требовалось на 1% меньше мощности, чем рубиновому лазеру. В СССР

первый лазер был запущен 2 июня 1961 года, в Государственном оптическом институте имени С.И.Вавилова (ГОИ). Он тоже был рубиновым, причём все его детали – от самого кристалла до покрытия на торцах и лампы накачки были сделаны на месте, в ГОИ (детали представлены на рис. 148). После этого в институте началась интенсивная работа по созданию твердотельных и газовых лазеров.



Н.Г. Басов



А.М. Прохоров

Ч. Таунс вместе с А.М. Прохоровым и Г.Г. Басовым стали лауреатами Нобелевской премии *«за фундаментальные исследования в области квантовой электроники, которые привели к созданию генераторов и усилителей нового типа – мазеров и лазеров»*.

В середине XX века с возникновением мазеров и лазеров в физике получила развитие квантовая электроника. Четыре прибора определяют важнейшие реперные точки истории квантовой электроники. Мазер (Ч. Таунс, А.М. Прохоров, Г.Г. Басов, 1954 г.) обозначил само рождение этой научно-технической области, связанной с приборами, использующими стимулированное излучение. Лазер (Т. Мейман, 1960 г.) ознаменовал ее переход на высшую ступень развития – лазерную физику и технику. Полупроводниковый инжекционный лазер (Р. Холл, 1962 г.) подтвердил универсальность принципов квантовой электроники и породил надежду на развитие оптоэлектроники как специфической сферы информатики. Гетеролазер (Ж.И. Алферов, 1968 г.) превратил эти надежды в реальность благодаря изменению физических основ и устройства инжекционного лазера [114]. В 2000 году Ж.И. Алферову (1930–2019) была присуждена Нобелевская премия за работы по созданию полупроводниковых гетероструктур и приборов на их основе (в частности, полупроводниковых лазеров) [115]. На рисунке 149 дано схематичное изображение структуры первого инжекционного лазера. Сегодня гетеролазер

производится массово, он получил широчайшее применение в информатике и телекоммуникации. Только благодаря гетеролазеру стали возможны волоконно-оптическая связь и оптические дисковые накопители, с ним связывают будущее сверхпроизводительных вычислителей [116, 117].



Ж.И. Алферов

В 1960 г. был создан и продемонстрирован первый газовый гелий-неоновый лазер в научной лаборатории Bell Telephone Laboratories. Джаваном Али (1926–2016) – американским физиком, автором многочисленных исследований в области лазерной теле- и радиосвязи, в сотрудничестве с У.Р. Беннетом и Д.Р. Херриотом. В таком лазере инверсия заселенностей уровней атомов неона создается за счет электрического разряда в смеси газов *He* и *Ne*. В 1962 году американскими и советскими физиками были представлены первые полупроводниковые лазеры.

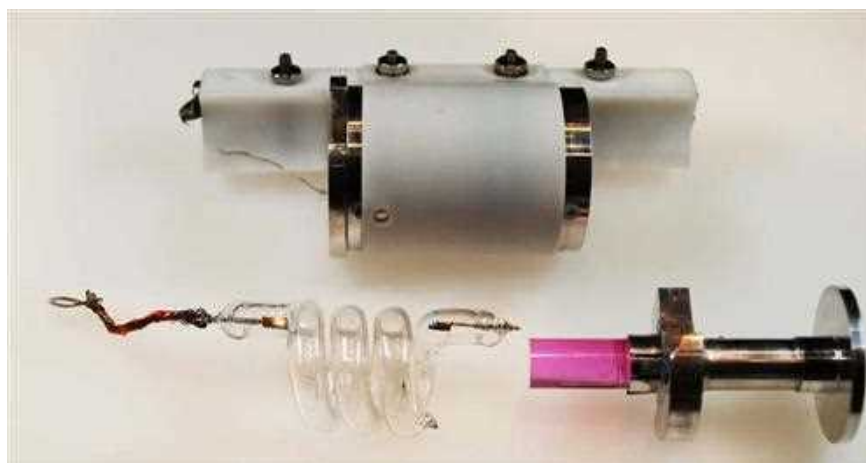


Рис.148. Детали лазера: кристалл рубина, спиральная лампа-вспышка, излучающая головка

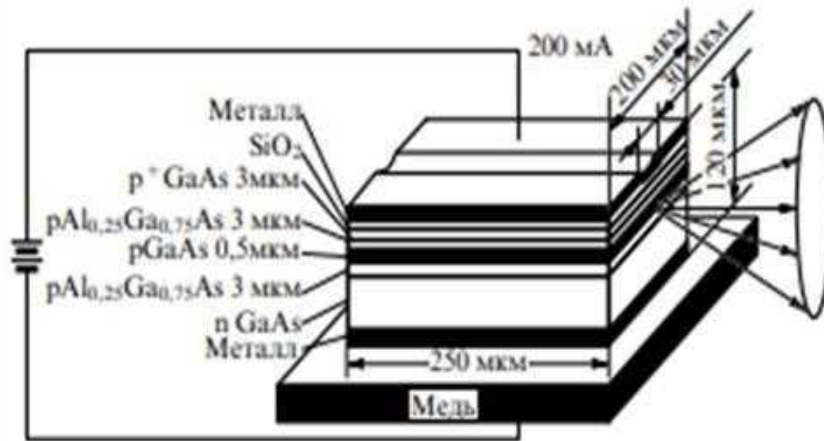


Рис.149. Схематичное изображение структуры первого инжекционного лазера [115]

Процесс сообщения рабочему телу лазера для перевода атомов в возбужденное состояние называют накачкой. Существуют различные физические механизмы накачки. В рубиновом лазере (рис. 150) используется импульсная оптическая накачка. Для этого кристалл рубина Р освещается ксеноновой лампой Л, работающей в импульсном режиме. Длительность вспышки имеет порядок 10^{-3} с, а мощность накачки в одном импульсе составляет десятки миллионов ватт. За счет прохождения импульса тока через газовый промежуток ксенон нагревается до нескольких тысяч градусов и испускает мощный световой импульс, содержащий оптическое излучение различных длин волн.

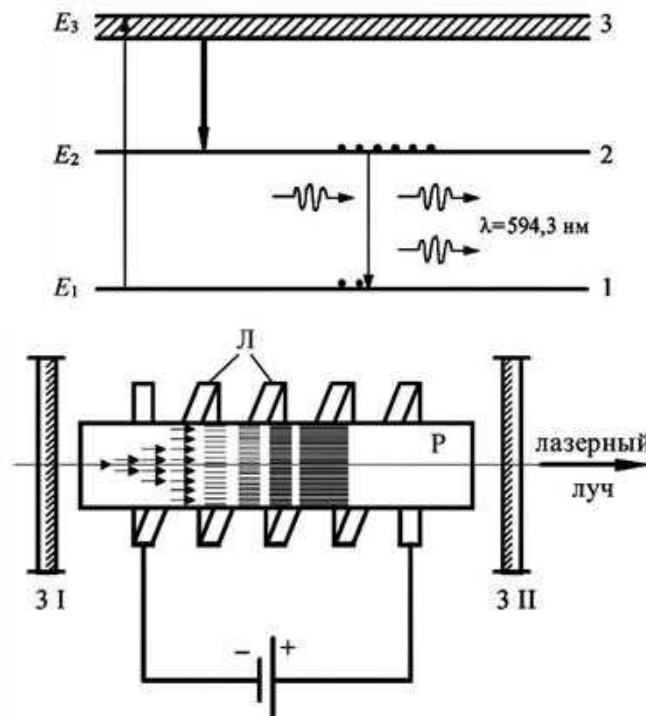


Рис.150. Накачка и генерация излучения рубинового лазера

Поглощая это излучение, атомы хрома переходят в возбужденное состояние с энергией E_3 (стрелка $1 \rightarrow 3$ на рис. 150. Время жизни таких возбужденных атомов меньше 10^{-7} с. За это время атомы хрома переходят на более низкий метастабильный энергетический уровень с энергией E_2 . Такой переход $3 \rightarrow 2$ является безызлучательным, то есть происходит без испускания фотона, а избыток энергии при этом передается от атома хрома к кристаллической решетке рубина, в результате чего кристалл нагревается.

Метастабильность уровня 2 обеспечивает на некоторое время инверсию заселенностей уровней 1 и 2. На это время рубиновый стержень превращается в активную среду, которая может усиливать вынужденное излучение с длиной волны $\lambda = 594,3$ нм, соответствующее переходу $2 \rightarrow 1$. Поэтому, если в результате спонтанного перехода вблизи левого торца стержня рождается фотон с такой длиной волны, то, взаимодействуя с атомами хрома, он индуцирует новые фотоны, точно копирующие первоначальный. Процесс рождения вынужденных фотонов при распространении в рубине излучения носит лавинообразный характер. В результате вынужденное излучение с длиной волны $\lambda = 594,3$ нм (красный свет), распространяясь вдоль оси рубинового стержня, усиливается.

Для того, чтобы такой оптический усилитель превратить в оптический генератор когерентного лазерного излучения, необходимо обеспечить положительную обратную связь, то есть усиленный пучок излучения снова направить в активную среду. Такую обратную связь обеспечивает оптический резонатор, состоящий из двух строго параллельных плоских зеркал (ЗІ и ЗІІ), расположенных вблизи торцов рубинового стержня. Отражающими зеркалами могут служить и хорошо отполированные и посеребренные торцы самого кристалла.

В обычном свободном режиме генерации одно из зеркал, например, ЗІІ, делается полупрозрачным. Поэтому после многократного отражения от зеркал и усиления лазерный пучок становится достаточно интенсивным и получает возможность выхода через полупрозрачное зеркало. Затем следует новая вспышка лампы накачки и процесс повторяется.

В режиме генерации гигантских импульсов одно из зеркал закрывается оптическим затвором. Задерживая генерацию, такой затвор позволяет увеличить инверсию заселенностей уровней и накопить энергию активной среды. При открытии затвора создаются условия быстрого развития генерации, которая реализуется в виде короткого (около 20 - 50 нс) мощного (гигантского) импульса с энергией от 1 Дж до 100 Дж, что соответствует мощности более 10^{10} Вт. Лазер на рубине работает в импульсном режиме с частотой порядка нескольких импульсов в минуту. Для отвода тепла рубиновый лазер приходится охлаждать с помощью жидкого воздуха.

В 1980-х годах в телекоммуникационных системах использовались громоздкие, занимавшие много места медные кабели, едва справляющиеся со всё возрастающими потребностями человечества в передаче информации. Но лазерный свет, идущий по тончайшим нитям оптоволоконного кабеля, может проводить более полумиллиона телефонных разговоров, тысячи компьютерных подключений и телеканалов. Без оптоволокна интернет не существовал бы в его современном виде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперимент сыграл в развитии физических знаний решающую роль, он обусловил и то, что физика показала пример использования экспериментальных методов во всех других науках. История важных открытий и изобретений в области физики показывает нам постепенное возрастание сложности приборной базы и физических экспериментальных установок. Мы постарались проследить генезис и эволюцию экспериментальных научных исследований, возрастание сложности физического эксперимента по мере углубления в микромир, миниатюризацию приборов и средств измерения, а с другой стороны, коллективной работы большого числа научных лабораторий по обработке полученных экспериментальных результатов. Большая часть приборов и установок до XX века создавались эмпирическим путем, часто, строилась на гениальных догадках, значительно опережая теорию. В XX и XXI веке такое положение немыслимо. Эмпирическим путем невозможно было создать транзистор, лазер, туннельный микроскоп, ускорители элементарных частиц и многое другое. Без физических основ, опирающихся на теоретическое знание, развитие техники и технологии в настоящее время немыслимо. Но без гениальных озарений, как показывает история физики, это тоже невозможно.

В заключении приведем слова Нобелевского лауреата Ч. Таунса, в которых подчеркивается важность исторического опыта при выполнении фундаментальных исследований. Он писал: *«Можно ли запланировать новую идею и новое, пока еще не известное техническое изобретение? Конечно, нет. Мы не можем доказать, что данное научное направление приведет к новым техническим достижениям, если мы пока не знаем даже сути этих достижений. С другой стороны, упорный скептик вряд ли удовлетворится тем, что данное фундаментальное исследование, даже если оно не приносит новых знаний и новых идей, приведет к важным, хотя и не известным пока успехам, полезным для общества. Пожалуй, лучшим способом в какой-то мере объективно разобраться в этих вопросах является анализ исторического опыта. Основным заключением, которое следует из такого анализа – рассмотрения ряда примеров из истории науки, является то, что человечество систематически ошибается вследствие недостатка воображения и способности предвидеть. Мы постоянно недооцениваем возможности науки и техники в будущем. ... Элемент неожиданности – постоянная составная часть технического прогресса»*. [7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахутин, А.В. История принципов физического эксперимента. От античности до XVII века / А.В. Ахутин. – Москва: Наука, 1976.
2. Эйнштейн, А. Собрание научных трудов. Т.4. / А. Эйнштейн. – Москва: Наука, 1967. – С. 569-570.
3. Луи де Бройль. По тропам науки / Луи де Бройль. – Москва: Изд-во иностр. лит., 1962. – С. 162
4. Рулев, А. Научное провидение, или искусство совершать открытия / Рулев А. // Наука и жизнь. – 2017. – №3. – С. 2-12.
5. Буш, К. Неслучайная случайность. Как управлять удачей и что такое серендипность / Буш К. – Москва: ООО «Альпина Паблицер», 2022.
6. Уилсон, М. Американские учены и изобретатели / М. Уилсон. – Москва: Изд-во «Знание», 1964.
7. Таунс, Ч. Квантовая электроника и технический прогресс (Проблема планирования исследовательской работы) / Ч. Таунс // Успехи физических наук. – 1969. – Т.98. – Вып.5. – С.168.
8. Лурье, С.Я. Архимед / С.Я. Лурье. – М.-Л.: АН СССР, 1945. – 144 с.
9. Архимед. Сочинения. – М.: Физматгиз, 1962.
10. Галилео Галилей. День четвертый // Математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей науки, относящихся к механике и местному движению. – М.-Л.: ГИТТЛ, 1934
11. Антисери, Д. Западная философия от истоков до наших дней / Д. Антисери, Дж. Реале. – СПб.: Пневма, 2002.
12. Зоммерфельд, А. Механика / А. Зоммерфельд. – М.: Гос. изд-во иностр. лит., 1947.
13. Веселовский, И.Н. Христиан Гюйгенс. – М.: Учпедгиз, 1959. – 112 с.
14. Стрельцова, Г.Я. Блез Паскаль. – М.: Мысль, 1979. – 236 с.
15. Дягилев, Ф.М. Из истории физики и жизни ее творцов. – М.: Просвещение, 1986. – С.49
16. Вавилов, С.И. Исаак Ньютон: 1643-1727. – 4-е изд., доп. – М.: Наука, 1989. – 271 с.
17. Кавендиш Г. Опыты по определению плотности Земли // Классики физической науки / Голин Г.М., Филонович С.Р. – М.: Высшая школа, 1989. – С. 253–268.
18. Boys C.V. On the Newtonian constant of gravitation // Philos. Trans. Roy. Soc. 1895. A186. – P. 1–72
19. Earman J., Glymour C. Relativity and eclipses: the British eclipse expeditions of 1919 and their predecessors. // HSPS. 1980. 11:1. P. 49-85
20. Голин Г.М., Филонович С.Р. Классики физической науки (с древнейших времен до начала XX века). – М.: Высш.шк., 1989. – 576 с.
21. Кошманов В.В. Георг Ом. Пособие для учащихся. – М.: Просвещение, 1980. – 112 с.

22. Уиттекер, Э. История теории эфира и электричества / Э. Уиттекер. – Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2001.
23. Дорфман, Я.Г. Опыты и наблюдения над электричеством / Я.Г. Дорфман // УФН. – 1957. – Т.63. – вып.4. – С.859-860.
24. Дорфман, Я.Г. Выдающийся русский физик Г.В. Рихман и его роль в истории науки об электричестве / Я.Г. Дорфман // Электричество. – № 8. – 1953. – С27. 61–67.
25. Базелян, Э.М. Физика молнии и молниезащиты / Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер. – М.:Физматлит, 2001. – 319 с.
26. Кравец, Т.П. К 200-летию со дня смерти академика Г.В. Рихмана / Т.П. Кравец, М.И. Радовский // УФН. –1953. – 51. – С.287-299.
27. Цверева, Г.К. Георг Вильгельм Рихман. – Л.: Наука, 1977.
28. Сухов, Б.П. Развитие электроизмерительной техники в XVIII веке / Б.П. Сухов // Наука. Вопросы истории естествознания и техники: Сборник. – Л., 1966. – вып. 20. – С. 84
29. Смык, А.Ф. Выдающиеся открытия в исследованиях постоянного тока (К 260-летию со дня рождения академика Василия Владимировича Петрова) / А.Ф. Смык, Л.В. Спиридонова // История науки и техники. – 2022. – №1. – С.3-11.
30. Елисеев, А.А. Первый электрик крепостной России. // В кн.: Техники, изобретатели крепостной России. – Л.: Мол.гвардия, 1934. – С.185-202.
31. Петров. Собрание физико-химических новых опытов и наблюдений. – СПб.1801.
32. Эрстед, Г.Х. Опыты, относящиеся к действию электрического конфликта на магнитную стрелку // В книге: Ампер А.М. Электродинамика. – М.: АН СССР, 1954. – 492 с.
33. Брэгг, В. История электромагнетизма. – М.-Л.: ОГИЗ, 1947.
34. Томилин, К.А. Формирование понятия электрического тока в первой половине XIX века / К.А. Томилин // История науки и техники. – №5. – 2022.
35. Белькинд, Л.Д. Андре-Мари Ампер (1775-1836). – М.: Наука, 1968.
36. Льюи, М. История физики. – М.: Изд-во Мир, 1970.
37. Варламов, А. Термоэлектричество: от дуги Алессандро Вольта до ферро-жидкостных термоэлектрических генераторов / А. Варламов, С. Шарапов, Ю. Шикина // Троицкий вариант. – №9 (328). – 2021.
38. Шлиомис, М.И. Магнитные жидкости // Успехи физических наук. – 1974. Т.112. – вып.3. – С.427- 458
39. Ржонсницкий, Б.Н. (соавтор: Лежнева О. П.). Эмилий Христианович Ленц. (1804--1865). – М.-Л., 1952.
40. Гогоберидзе, Д.Б. Замечательный русский физик Э.Х. Ленц // Вестник Ленинградского университета. –1950. – №2. – С.3-29
41. Жукова, Л.Н. Серия «Жизнь замечательных людей». – М.: Молодая гвардия, 1989.

42. Лодыгин, А.Н. Теория дешевого электрического освещения и отопления / А. Лодыгина // Труды Донского отделения РТО. – Ростов-на-Дону, 1909. – № 2.
43. Остроумов, А.Г. Олег Владимирович Лосев / А.Г. Остроумов // в сб. У истоков полупроводниковой техники. – Л.: Наука, 1972. – С.175.
44. Фарадей, М. Экспериментальные исследования по электричеству. В 3-х т. – М., 1947-1951.
45. Де-Метц, Г.Г. Об опытах Тесла с переменными токами. – Одесса, 1893.
46. Наука. Величайшие теории: вып. 36: Двустороннее движение электричества. Тесла. Переменный ток / Пер. с исп. М.: Де Агостини. – 2015. – 176 с. С.10.
47. Баранов, М.И. Ретроспектива, современное состояние и перспективы развития исследований в области создания электроустановок с мощными накопителями электрической и магнитной энергии / М.И. Баранов // Электротехника и электромеханика. – 2007. – № 5. – С. 48-56.
48. Кудрявцев, П.С. История физики. Т.3. – М.: Просвещение, 1971
49. Дас Гупта Н.Н., Гош С.К. Камера Вильсона и ее применения в физике // УФН. – 1947. – 31. – вып.4. – С. 491-583.
50. Дуков, В.М. Исторические обзоры в курсе физики средней школы. – М.: Просвещение, 1983. – 160 с.
51. Шарыгина, Л.И. События и даты в истории радиоэлектроники / Л.И. Шарыгина. – Томск: ТУСУР, 2011.
52. Из предистории радио. Сборник оригинальных статей и материалов под ред. Л.И. Мандельштама. – М.Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1948. – 481 с.
53. Томсон В. (лорд Кельвин) О преходящих электрических токах. Перевод С.О. Майзель // Электромагнитные колебания и волны. Под ред. В.К. Лебединского. – Вып. 2. – СПб., 1910. – С. 11-34.
54. Смык, А.Ф. Формула Томсона / А.Ф. Смык, К.А. Томилин // Годичная научная международная конференция института истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН: сборник. – 2020. – С. 632-635.
55. Феддерсен, В. Материалы к познанию электрической искры / Феддерсен В. Перевод М. Левитской // Электромагнитные колебания и волны. Под ред. В.К. Лебединского. – Вып. 2. – СПб., 1910. –С. 35-50.
56. Лебедев, П.Н. «Шкала электромагнитных волн в эфире». Собрание сочинений. – М.: Изд-во АН СССР, 1963.
57. Шиллер, Н.Н. Опытное исследование электрических колебаний. – М.: Унив.тип, 1874
58. Бухгейм, Г. Электродинамические исследования Гельмгольца и их связь с работами русских физиков. Диссертация на соискан уч. степен. канд. физических наук. – М.: Институт истории естествознания и техники, 1965.
59. Смык, А.Ф. Физика. Электромагнетизм. Курс лекций / А.Ф. Смык. – Москва: МГУП, 2007. – 160 с.
60. Тесла Н. Лекции. Статьи. М.: Tesla Print. 2001.

61. Hospitalier E., La Nature, N°979 - 5 Mars 1892.
62. Де-Метц, Г.Г. Об опытах Тесла с переменными токами. – Одесса, 1893.
63. Nikola Tesla Expériences avec les courants alternatifs de grande frequence et de haute tension. Seances de la Societe Francaise de physique. Janvier-Avril 1892. Paris, p. 62-128.
64. Ржонсницкий, Б. Никола Тесла. – М.: Молодая гвардия, 1959. – 105 с
65. Никола Тесла. Лекции. – Самара: Издательский дом «Агни», 2008.
66. Берг, А.И. Изобретатель радио А.С. Попов // Электричество. – 1945. – №5.
67. Браун, Ф. Мои работы по беспроволочной телеграфии и по электрооптике. Речь при получении Нобелевской премии. Перевод с нем. Л.И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси. – Одесса: изд-во "Матезис", 1910.
68. Riess P. Die gesammten Naturwissenschaften. 1873.
69. Tesla N. Journal of the Institution of Electrical Engineers 1892. 21. P.62.
70. Лебедев, П.Н. // Журнал русского физико-химического общества. – 1895. – Т.27. – часть физическая, отдел первый. – вып.7. – С. 213-220.
71. Попов, А.С. Об отношении металлических порошков к электромагнитным колебаниям // Журнал Русского физ.-хим. общества. СПб. – Т.27. – часть физическая. – отд.1. – вып.8. – с. 259-260.
72. Геворкян, С.Г. К проблеме передачи электрической энергии: патент Н. Теслы от 20 марта 1900 г. / С.Г. Геворкян // Пространство и время. – 2016. – №3-4 (25-26). – С.64–71.
73. Крылов, А.Н. Попов и Маркони // Электричество. – 1945. – №5. – С.31-32.
74. Смык, А.Ф. От волн де Бройля к квантовой механике: монография / А.Ф. Смык. – Москва: МАДИ, 2013.
75. Мальцев, П. СВЧ-технологии – основа электроники будущего / П. Мальцев, И. Шахнович // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2015. – №8 (148). – С.72–84.
76. Смык, А.Ф. История экспериментального наблюдения переменных токов высокой частоты / А.Ф. Смык // История науки и техники. – 2022. – №7. – С. 3-13.
77. Тетельбаум, С.И. О беспроводной передаче электроэнергии на большие расстояния с помощью радиоволн / С.И. Тетельбаум // Электричество. – 1945. – №5. – С. 43–47.
78. Смык, А.Ф. Экспериментальное и теоретическое исследование электрического разряда: исторический аспект / А.Ф. Смык // История науки и техники. – 2021. – №2. – С.3-11.
79. Абрамов, Я. В. Майкл Фарадей. Его жизнь и научная деятельность. – 1892. – (Жизнь замечательных людей. Биограф. библиотека Ф. Павленкова). – М.: Книга, 2011.
80. Максвелл Дж. К. Статьи и речи. – М.: Наука, 1968.
81. Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству. Пер с англ. – Т.1. – Изд-во АН СССР, 1947.
82. Иванов, Б.И. Звездное небо петербургской электротехники / Б.И. Иванов // Природа. – 2003. – №9.

83. Шрамков, Е.Г. Электрические и магнитные измерения. – М.: ОНТИ, 1937.
84. Микеров, А.Г. История науки и техники в области управления и технических систем / А.Г. Микеров, А.В. Вейнмейстер. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016.
85. Lorentz H. A., Zeeman P. The Theory of Electrons and the Propagation of Light. Nobel Lecture 1902 // Nobel Lectures. Physics. 1901-1921. Amsterdam: Elsevier Publishing Company. 1967.
86. Thomson J. J. Discovery of the Electron. Nobel Lecture 1906 // Nobel Lectures. Physics. 1901–1921. Amsterdam: Elsevier Publishing Company. 1967.
87. Вавилов, С.И. Исаак Ньютон. – М.-Л.: Изд.АН СССР, 1945.
88. Погребысская, Е.И. Оптика Ньютона. – М.: Наука, 1981.
89. Дорфман, Я.Г. Всемирная история физики. – М.: Изд-во ЛКИ, 2011.
90. Ландсберг, Г.С. Огюстен Френель – в кн.: Френель О. Избранные труды по оптике. – М.: Гостехиздат, 1955.
91. Френель, О. Избранные труды по оптике. Пер. с франц. З.А. Цейтлина. – М.: Гостехиздат, 1955.
92. Капцов, Н.А. Петр Николаевич Лебедев. 1866-1912. – М., 1950.
93. Фабрикант В. Работы П.Н. Лебедева по световому давлению // Успехи физических наук. – 1950. – Т.42. – вып.2. – С. 282.
94. Филонович, С.Р. Самая большая скорость. – М.: Наука, 1983.
95. Криволапова, Ю.К. История науки: учебное пособие / Ю.К. Криволапова. – Москва: ИПЦ МИТХТ, 2015. – 116 с.
96. Митрович, Й. Термодинамика Джеймса Уатта – проигнорирована или непонята? / Й. Митрович, А.Ф. Смык // ВИЕТ. – 2021. – Т.42. – № 3. – С. 397- 442.
97. Радциг, А.А. Джемс Уатт и изобретение паровой машины. – Петроград: Научное химико-техническое изд-во, научно-технический отдел ВСНХ, 1924.
98. Данилевский, В. Очерки истории техники XVIII–XIX вв. – М.-Л.: Гос. соц.-эконом. изд-во, 1934.
99. Каменский, А.В. Джеймс Уатт. Его жизнь и научно-практическая деятельность. Серия: Жизнь замечательных людей. Биографическая библиотека Ф. Павленкова, 1891.
100. Майер, Р. Законы сохранения и превращения энергии. Четыре исследования 1841-1851. – М., 1933.
101. Хлебников, Н.С. Работы А.Г. Столетова по фотоэффекту // УФН. –1939. – Т.22. – вып.4. – С.384-394.
102. Милликен, Р. Электроны, протоны, фотоны, нейтроны и космические лучи. – М.–Л.: Государственное объединенное научно-техническое издательство НКТП СССР, 1939.
103. Резерфорд, Э. Рассеяние α - и β -частиц веществом и строение атома. В кн. Э. Резерфорд Избранные научные труды. – М.: Наука, 1971. – С. 207.
104. Мэлли, М. История открытия бета-излучения // Успехи физических наук. – 1973. – Вып.2. – С.389-398.

105. Curie P., Curie M. // Comp. Rend. Ac. Sci., 1900. 130, 73. p. 647.
106. Джеммер, М. Понятие массы в классической и современной физике. – М.: Прогресс, 1967.
107. Птушенко, В. На перекрестке идей: история открытия магнитного резонанса / В. Птушенко // Квант. – 2019. – №12. – С.2-9.
108. Einstein A., Ehrenfest P. Quantentheoretische Bemerkungen zum Experiment von Stern und Gerlach. //Zschr. Phys. 1922. Bd.11. S. 31-34.
109. Кастлер, А. Оптические методы изучения низкочастотных резонансов // УФН. – 1967. – Т. 93. – вып.1. – с. 5–18.
110. Waals J.H. Gorter's footprints on the trail that led to magnetic resonance. In: Encyclopedia of nuclear magnetic resonance. Wiley, 1966. Vol.1. P. 677.
111. Кессених, А.В. Открытие, исследования и применения магнитного резонанса / А.В. Кессених // Успехи физических наук. – 2009. – Т.179. – №7. – С. 737-764.
112. Кастлер, А. Оптические методы изучения низкочастотных резонансов // Успехи физических наук. – 1967. – Т. 93. – выпуск 1. – С.5-18.
113. Басов, Н.Г. Молекулярный генератор и усилитель / Н.Г. Басов, А.М. Прохоров // Успехи физических наук. – 1955. – Т.вып.3. – С.485-501
114. Инжекционные лазеры на основе гетеропереходов в системе AlAs-GaAs с низким порогом генерации при комнатной температуре / Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, Е.Л. Портной, М.К. Трукан // Физика и техника полупроводников. – 1969. – Т.3. – С.1328-1332.
115. Алферов, Ж.И. Двойные гетероструктуры: концепция и применение в физике, электронике и технологии / Ж.И. Алферов // Успехи физических наук. – 2002. Т.172. – №9. – С. 1068-1086.
116. Носов, Ю.Р. История рождения микроэлектроники / Ю.Р. Носов // История науки и техники. – 2015. – №2. – С.80-113.
117. Носов, Ю. Страсти по лазеру / Ю. Носов, А. Сметанов // Электроника: наука, технологии, бизнес. – 2012. – №8 (00122) . – С.130-139.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Дальтон Джон (1766–1844) 8, 150
 Джоуль Джеймс Прескотт (1818–1889) 66, 68, 156, 157
 Дэви Гемфи (1778–1829) 40
 Завойский Евгений Константинович (1907–1976) 182, 185, 186, 187
 Иоган (1571–1630) 21, 139
 Кавендиш Генри (1731–1810) 22, 35
 Кастлер Альфред (1902–1984) 190
 Кауфман Вальтер (1921–1980) 179
 Кеплер Иоганн (1571–1630) 21, 139
 Кирхгоф Густав Роберт (1824–1887) 50, 62, 134, 137, 138
 Козырев Борис Михайлович (1905–1979) 186

Комптон Артур (1892–1962) 141, 175, 176, 177
 Крукс Уильям (1832–1919) 113, 114, 115
 Кулон Шарль Огюстен (1736–1806) 33, 34
 Кюри Мария (1867–1934) 177, 178, 179
 Кюри Пьер (1859–1906) 177, 178, 179
 Лаплас Пьер-Симон (1749–1827) 47, 49
 Лауэ Макс фон (1879–1960) 117, 170, 171
 Лебедев Петр Николаевич (1866–1912) 95, 96, 102, 139, 140, 141
 Ленард Филипп фон (1862–1947) 83, 115, 116, 117, 120, 164, 165
 Ленц Эмилий Христианович (1804–1865) 64, 66, 68, 109, 110, 112, 113
 Лодыгин Александр Николаевич (1847–1923) 67, 68, 69, 70
 Ломоносов Михаил Васильевич (1711–1765) 30, 32
 Лоренц Хендрик Антон (1853–1928) 145
 Лосев Олег Владимирович (1903–1942) 6, 72, 73
 Майер Роберт Юлиус (1814–1879) 112, 156
 Майкельсон Альберт Абрахам (1852–1931) 143, 145, 146
 Майман Теодор Харолд (1927–2007) 190
 Максвелл Джеймс Клерк (1831–1879) 35, 85, 139, 143
 Малюс Этьен Луи (1775–1812) 132, 136
 Мариотт Эдм (1620–1684) 149
 Маркони Гульельмо (1874–1937) 99, 100, 101
 Марсден Эрнст (1889–1970) 170
 Марци Йоханес Маркус (1594–1667) 121
 Милликен Роберт Эндрюс (1868–1953) 79, 80, 166, 168
 Морли Эдвард Уильямс (1838–1923) 146
 Мушенбрук Питер ван (1692–1761) 27, 100
 Николь Уильм (1768–1851) 133
 Ньюкомен Томас (1663–1729) 152, 155
 Ньютон Исаак (1643–1727) 20, 122, 124, 125, 126, 129
 Обербек Антон (1846–1900) 24, 88, 101
 Папен Дени (1647–1713) 152
 Парселл Эдвард (1912–1997) 182, 187
 Паскаль Блез (1623–1662) 17, 20, 147, 149
 Пельтье Жан Шарль Атаназ (1785–1845) 53
 Перрен Жан (1870–1942) 179
 Петров Василий Владимирович (1761–1834) 39, 41, 66, 100
 Плюккер Юлиус (1801–1868) 113
 Поггендорф Иоганн Христиан (1796–1877) 50, 53, 60
 Попов Александр Степанович (1859–1906) 98, 99, 101
 Прохоров Александр Михайлович (1916–2002) 190
 Пуассон Симеон Дени (1781–1840) 134
 Раби Исидор (1898–1988) 184, 186
 Резерфорд Эрнест (1871–1937) 168, 169, 170, 180
 Рентген Вильгельм (1845–1923) 7, 81, 115, 116, 117

Рихман Георг Вильгельм (1711–1753) 30, 31
 Румкорф Генрих Даниэль (1803–1877) 76, 77, 100
 Савар Феликс (1791–1841) 47
 Савари Феликс (1797–1841) 85, 100
 Саньяк Жорж (1869–1928) 179
 Стевин Симон (1548–1620) 19, 148
 Стерджен Вильям (1783–1850) 106
 Столетов Александр Григорьевич (1839–1896) 160, 161, 162, 163,
 Тальбот Фокс (1800–1877) 136, 137
 Таунс Чарлз Хард (1915–2015) 190, 191
 Тесла Никола (1856–1943) 77, 78, 88, 101, 104
 Томас Иоганн Зеебек (1770–1831) 51, 53, 54, 60
 Томсон Вильям (1824–1907) 86, 87, 100
 Томсон Джозеф Джон (1856–1940) 71, 82, 113, 117, 118, 119, 120 163
 Торричелли Эваижелиста (1608–1647) 18, 19, 147, 149
 Уатт Джеймс (1736–1819) 152, 153, 154, 156
 Уитстон Чарльз (1802–1875) 137
 Фарадей Майкл (1791–1867) 35, 73, 74, 104, 105, 106, 108, 109
 Феддерсен Беренд Вильгельм (1832–1918) 87, 100
 Физо Ипполит (1819–1896) 141, 142
 Фицджеральд Джордж Фрэнсис (1851–1901) 91, 101, 145
 Флеминг Джон Амброс (1849–1945) 71, 72, 102
 Фраунгофер Иозеф (1787–1826) 136, 137, 138, 139
 Френель Огюстен Жан (1788–1827) 133, 134, 135, 136
 Фуко Жан Бернар Леон (1819–1868) 137
 Чедвик Джеймс (1981–1974) 180, 181
 Шарль Жак Александр (1746–1823) 151
 Швейггер Иоганн Соломон Христофор (1779–1857) 49, 50
 Шиллер Николай Николаевич (1848–1910) 87, 101
 Штерн Отто (1888–1969) 157, 158, 159, 183
 Эдисон Томас Альва (1847–1931) 67, 70, 71, 72, 78
 Эйнштейн Альберт (1879–1955) 5, 6, 24, 109, 143, 145, 166, 184, 189
 Эльстер Юлиус (1854–1920) 167, 177, 178
 Эренфест Пауль (1880–1933) 184
 Эрстед Ганс Христиан (1777–1851) 42, 43, 44, 49, 73, 105
 Юнг Томас (1773–1829) 130, 131, 132, 133
 Яблочков Павел Николаевич (1847–1894) 67, 70

Научное издание

СМЫК Александра Федоровна

ИСТОРИЯ ФИЗИКИ
В ОТКРЫТИЯХ И ИЗОБРЕТЕНИЯХ

Редактор В.В. Виноградова

Редакционно-издательский отдел МАДИ. e-mail: rio.madi@mail.ru

Подписано в печать 02.11.2023 г. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 10,5. Тираж 500 экз. Заказ .

МАДИ, 125319, Москва, Ленинградский пр-т, 64.