

Genre

sci\_phys

Author Info

Марио Г. Бертолотти

История лазера

Книга, которую Вы взяли в руки — редкий сплав добротного изложения основ современной физики и ее истории. История науки предстает здесь в неразрывной связи драмы идей в познании природы и судеб конкретных людей. Все эти выдающиеся исследователи были захвачены в круговорот жестокой истории XX века, которой в книге уделено немало страниц.

Автору удалось совместить рассказы о жизненном пути замечательных личностей с пристальным, шаг за шагом, анализом гипотез, теории и эксперимента.

Для широкого круга читателей, интересующихся современной физикой.

The history of the Laser

1.0 — создание файла

М. Бертолотти

История лазера

#### ПРЕДИСЛОВИЕ ПЕРЕВОДЧИКА

Пятьдесят лет назад произошло знаменательное событие. Теодор Мейман, сотрудник Исследовательской лаборатории фирмы Говарда Хьюза (США), 16 мая 1960 г. продемонстрировал совершенно новый источник высококогерентного света — лазер. В честь этого события 2010 г. был объявлен Международным годом лазера, и научная общественность многих стран отмечала юбилей этого выдающегося научного и технологического достижения. Создание этого замечательного устройства имеет свою продолжительную и драматическую историю. Ей посвящен ряд книг, в том числе книга самого Меймана «Лазерная одиссея». В ней он откровенно и увлекательно рассказал историю создания своего рубинового лазера в условиях жесткой конкуренции между исследовательскими лабораториями могучих фирм и ведущих университетов США. Они начали гонку в стремлении первыми создать генератор световых волн, после того как в 1954 г. был создан генератор радиоволн, использующий вынужденное излучение молекул аммиака (мазер).

Разумеется, созданию лазера предшествовало развитие многих физических фундаментальных идей и экспериментальных результатов. В книге профессора М. Бертолотти «История лазера» описывается это развитие, начиная с античных времен. Эта книга является одной из лучших по этой теме, она выдержала два издания, и ее перевод предлагается российскому читателю. К достоинствам книги относится стремление автора к объективному описанию, не умаляя роль российских ученых. Так, он отмечает выдающуюся роль А.С. Попова в изобретении радио. Естественно, что Бертолотти подробно описывает достижения своего соотечественника Маркони, и читатель узнает, в каких комфортных условиях работал Маркони в отличие от поистине ужасных условий и обстоятельств, выпавших на долю Попова. Касаясь научных результатов, которые имели прямое отношение к исследованиям, приведшим к созданию лазеров, Бертолотти отмечает замечательное открытие Е.К. Завойским электронного парамагнитного резонанса, которое он сделал в Казани в годы войны. Американские исследователи, получившие аналогичные результаты, были удостоены Нобелевской премии. Также Бертолотти воздает должное советским ученым Н.Г. Басову, Б.М. Вулу, О.Н. Крохину

и Ю.М. Попову, которые показали возможность создания полупроводникового лазера еще до того, как был создан первый рубиновый лазер.

Как известно, фундаментальной основой принципа работы лазера является концепция вынужденного излучения, разработанная А. Эйнштейном. Еще до войны советский ученый В.А. Фабрикант показал в своей диссертации, что при определенных условиях можно получить усиление света, а не поглощение, при прохождении его через слой вещества. Правда, его расчеты и оценки показывали, что этот эффект чрезвычайно мал и трудно рассчитывать на его использование, тем более что уже существовали фотоэлектронные умножители и электронно-оптические преобразователи — приборы, позволяющие регистрировать и усиливать очень слабые оптические сигналы. И Фабрикант не считал необходимым опубликовать свой результат в научных журналах.

Для использования слабого эффекта усиления за счет вынужденного излучения требовалось использование положительной обратной связи, превращающей усилитель со слабым усилением в генератор. Однако концепция генератора и резонатора, с помощью которых можно осуществить положительную обратную связь, была чуждой для специалистов-оптиков. Демонстрация использования эффекта вынужденного излучения для генерации электромагнитного излучения была осуществлена в радиодиапазоне. Ч. Таунс и Н.Г. Басов с А.М. Прохоровым независимо создали принципиально новый источник радиоволн. Свой прибор американские исследователи назвали мазером (английская аббревиатура фразы: усиление радиоизлучения с помощью вынужденного излучения), подчеркивая роль вынужденного излучения. Советские исследователи назвали свой прибор молекулярным генератором, подчеркивая тот факт, что колебательной системой были молекулы, в которых реализовывался эффект вынужденного излучения. Поскольку фундаментальный эффект вынужденного излучения имеет место для электромагнитных волн независимо от их длины, было очевидно, что в принципе можно построить генератор и оптического диапазона. Вот почему Ч. Таунс, Н.Г. Басов, А.М. Прохоров получили в 1964 г., после создания лазера, Нобелевскую премию по физике за свой фундаментальный вклад в решение проблемы создания принципиально нового источника (генератора) света — лазера.

Следует подчеркнуть, что практическая реализация переноса концепции генератора, использующего эффект вынужденного излучения, из радиодиапазона в оптику представлялась крайне трудной. Одной из принципиальных проблем был необходимый резонатор. В радиодиапазоне резонаторы обычно имеют размер, определяемый длиной волны. Длина волны света исключала возможность использования подобных резонаторов в оптике. Здесь важнейший результат был получен А.М. Прохоровым, который предложил и со своими сотрудниками экспериментально продемонстрировал резонатор электромагнитных волн нового типа, образованный двумя параллельно расположенными пластинами с высоким коэффициентом отражения. Можно вспомнить, что так же устроен интерферометр Фабри-Перо, изобретенный в 1899 г. Но это был спектроскопический прибор с высоким разрешением. Никто не рассматривал его как особый тип резонатора. Прохоров показал, что такой резонатор является открытым и в него можно поместить вещество, обладающее, пусть даже малым, коэффициентом усиления.

Создание такого вещества — активной среды — также представлялось чрезвычайно сложной проблемой. Дело в том, что условия получения усиления — инверсной населенности уровней, соответствующих кванту излучения, — предполагают сильно неравновесный термодинамический

процесс. Ч. Таунс и А. Шавлов рассмотрели в своей статье в *Physical Review* (1958 г.) проблемы распространения представлений микроволновой мазерной генерации в область инфракрасного и видимого диапазона. Указав на принципиальную разрешимость проблемы и предполагаемые пути ее решения, они, тем не менее, подчеркивали трудность практической реализации; в частности, А. Шавлов считал рубин непригодным для этой цели.

Поэтому совершенно удивительным стал факт создания лазера на рубине Теодором Мейманом, мало известным физиком, работающим в промышленной фирме, который не находился в числе людей, уже старающихся реализовать предложения Таунса и Шавлова. Величайшая заслуга Меймана в том, что он показал, как легко построить действующий лазер вопреки всем опасениям. В связи с этим следует сказать, что в Советском Союзе очень быстро была воспроизведена конструкция Меймана. В Государственном оптическом институте (г. Ленинград) рубиновый лазер был запущен 2 июня 1961 г., а в Физическом институте им. П.Н. Лебедева АН СССР — 18 сентября 1961 г. Причем для запуска лазера не потребовалось сложных технологий и особых экспериментальных методик. Оказалось возможным использовать рубиновый образец, вырезанный из искусственных камней, используемых в часовой промышленности, а для накачки использовались стандартные импульсные лампы, применяемые в авиации.

Как часто случается, как только был открыт способ создания нового устройства, множество людей вскочили на подножку набирающего скорость поезда. Возникла целая лавина работ по лазерам самых различных типов. Появились и претензии на приоритет. В книге целая глава посвящена «войне патентов». К сожалению, Мейман так и не получил Нобелевской премии за свое гениальное достижение. Но его приняли в Зал славы Национальных изобретателей США, чести которой удостоена такая личность, как Эдисон. Книга М. Бертолотти будет весьма полезной всем, кто интересуется историей науки и техники.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Удивительно, как человеческое воображение предвидело изобретение лазера. Герберт Уэллс в своем знаменитом романе «Война миров» (1898) описывал лучи смерти, а в комиксах Флэш Гордона (1950) широко использовались пистолеты, испускающие световые лучи, — оружие, которое сейчас можно было бы идентифицировать как сверхмощные лазеры.

Слово «лазер» теперь хорошо известно и неспециалисту, который буквально окружен применениями лазерного света, в области в области медицины (хирургия и диагностические процедуры), телекоммуникации (волоконно-оптические линии связи, запись и воспроизведение информации на компакт-дисках, голограммы), а также в технологии (сверление, резка и сварка материалов лазерным излучением, геодезические измерения, печатание газет).

Лазеры имеют разную конфигурацию, размеры и стоимости, а также названия, такие как рубиновый (созданный первым), гелий-неоновый, аргоновый, полупроводниковый и др. Несмотря на их популярность, мало кто из людей по-настоящему знает, что собой представляет лазер и как он действует. В этой книге я постараюсь объяснить как можно более просто (хотя и не удастся избежать некоторых технических рассмотрений), как люди ухитрились создать первые лазеры, а также принципы их действия (вместе с мазерами, работающими в радиодиапазоне, которые являются их предшественниками).

Здесь уместно сказать, что лазер является источником света с особыми свойствами, радикально

отличающимися от обычных источников, таких как свеча или лампочка. В самом деле, свет лазера одного цвета (а не смесь цветов белого света) и испускается в одном направлении (а не во всех направлениях, как свет лампочки). Это позволяет нам собирать его линзой и фокусировать в область очень малых размеров. Спектральная чистота и направленность лазерного света сильно улучшают эффективность этой процедуры, позволяя концентрировать значительную мощность в малой области, что важно для различных операций, таких как плавление или резка металла.

В упомянутых выше применениях лазер в основном используется как очень мощная лампа. Однако существуют другие применения (например, оптическая связь), в которых наиболее важными характеристиками являются спектральная ширина полосы и угловая апертура испускаемого пучка. Чтобы понять это, нам нужно рассмотреть, что собой представляет свет и как он испускается, что, в свою очередь, зависит от излучателя, атома, и поэтому требуется введение в некоторые основные концепции квантовой механики. Мы обсудим различные механизмы излучения, а именно, спонтанное излучение — доминирующий процесс для всех естественных источников, и стимулированное излучение — процесс, порождающий свет лазера и ответственный за его особые характеристики.

Для того, чтобы объяснить различные явления согласно исторической последовательности, мы проследим историю света и первые шаги квантовой механики. При этом мы учитываем, что развитие науки испытывает зигзаги так, что многие идеи оказываются слишком передовыми для своего времени и не находят признания и пользы, в то время как другие могут возникать одновременно и независимо в умах многих людей как неизбежное следствие предыдущих идей, являющихся необходимыми предпосылками.

## ВВЕДЕНИЕ

Рождение мира, как оно описывается в Книге Бытия, фактически не противоречит большинству новейших космологических теорий Большого Взрыва, согласно которым Вселенная возникла в результате огромного взрыва с яркой вспышкой света.

Но как образуется свет? У ребенка этот вопрос не вызывает удивления, и он отвечает, что свет приходит от Солнца, или от электрической лампочки или от огня. Вообще говоря, это правильно. Однако почему Солнце испускает свет и, в продолжение вопроса, почему оно горит? На протяжении тысяч лет человечество не задавалось этим вопросом, а связывало свет с философскими и религиозными концепциями, делая упор на проблемы, связанные со зрением. В греческой мифологии мы встречаем титана Эпиметея который согласно мифу давал каждому живому существу при Создании специфические особенности, нужные для своей защиты и выживания. Так, он снабдил черепаху прочным панцирем, осу жалом и т.д. до тех пор, пока он не дошел до людей, и, исчерпав все возможности природы, не мог ничего найти для человека. Платон пишет, что человек стоял «наг, бос, без дома и защиты». Эпиметей попросил своего брата Прометея помочь ему. Тот похитил огонь у Зевса и подарил его человеку, способствуя тем самым прогрессу человечества, культуры и технологий. Зевс, полный злости и ревности, наказал Прометея, приковав его цепями к горам Кавказа, где каждый день орел терзал его печень. Желая не дать возможности людям насладиться этим даром, он приказал Эфесу создать первую зловещую женщину, прекрасную Пандору, которая стала женой Эпиметея. Она, сгорая от любопытства, открыла ящик, который должна была охранять и не открывать. Этот ящик был полон всеми демонами мира, и они разлетелись, принося несчастья

всем людям.

Подобным же фантастическим образом природа света мыслилась древними египтянами, для которых свет получался как взгляд Ра, их бога Солнца.

В 1300 до н.э. некий жрец писал: «Когда бог Ра открывает свои глаза — возникает свет, когда он закрывает свои глаза — наступает ночь».

Можно было бы привести много других примеров, показывающих, что в античные времена происхождение и природа света рассматривались в религиозном и фантастическом духе.

Представления о свете древних греков

В VI в. до н.э., когда в Греции философия и наука развивались совместно, Пифагор сформулировал теорию света, согласно которой прямолинейные видимые лучи испускаются глазом и ощупывают объект, давая зрительное ощущение.

Согласно Эмпедоклу (около 483—423 до н.э.), Афродита (богиня любви) снабдила наши глаза четырьмя элементами, которые, по его мнению, являются сущностью всех вещей (земля, вода, воздух и огонь) и свет огня подобен человеку, использующему фонарь для освещения своего пути в темноте. Зрение получается в результате действия глаза на объект: глаза испускают свой собственный свет.

Платон (около 428-427 до 348-347 до н.э.) предполагал, что огонь в глазу испускает свет и этот внутренний свет смешивается с дневным светом, образуя связь между объектами внешнего мира и душой, являясь, таким образом, мостом, благодаря которому мельчайшие движения внешних предметов создают зрительное ощущение. Согласно этому философу две формы света — одна внутренняя и другая внешняя — смешиваются и действуют как посредник между человеком и с темнотой внешнего мира.

Начальные попытки механистического подхода к сущности зрения начались с Эвклида, великого александрийского математика, который жил около 300 до н.э. В своих сочинениях по оптике он дал четкую геометрическую теорию зрения. Он продолжал верить, что свет исходит из глаза, но в отличие от смутных светящихся и эфемерных испусканий, предполагаемых Эмпедоклом и Платоном, он рассматривал прямолинейные лучи света, к которым применима математическая дедукция. В своих развернутых математических работах он дал геометрическую форму зрительных лучей и вывел некоторые из законов геометрической оптики, которые известны по сегодняшний день. Он, а также как Архимед (около 287-212 до н.э.) и Герон (III или II в. н.э.) разделяли учение Пифагора. Напротив, Демокрит (470-360 до н.э.) и атомисты предполагали, что светящиеся предметы испускают атомы, которые создают образы этих предметов и которые, когда попадают в глаз, создают видение.

Ущерб, нанесенный Аристотелем

Позднее Аристотель (384-322 до н.э.) определял свет как «действие прозрачного тела и что свет сам по себе прозрачен», наблюдая, что прозрачное тело имеет «силу» пропускать свет, но только пока свет проходит через него, т.е. свет включает способность быть прозрачным.

Если мы смотрим на глаза кошки в темноте, то мы замечаем, что они ярко светятся и кошка легко передвигается в темноте; этот факт убеждал древних людей в реальном существовании огня в глазах, как это утверждали Эмпедокл и Платон. Однако возникал колкий вопрос: если в глазу имеется источник света, то почему человек не может видеть в темноте? Ответов было много, но Аристотель

положил конец дискуссиям, настаивая, что темный воздух не прозрачен: только когда лампа зажигается, он становится прозрачным из-за того, что свет активизирует его скрытую прозрачность, после чего человек способен видеть. Мы снова можем спросить: почему эти же соображения не применимы к кошке, которая видит и без зажженной лампы? Во всяком случае, все эти соображения не дают ответа на вопросы, касающиеся природы света и его возникновения. В течение Средних веков, когда проблемы природы обсуждались на основе аристотелевой философии, согласно которой «природа» вещей заключается, в конце концов, в них самих, не было никакого прогресса найти решение.

Святой Фома Аквинский (1227—1274) провозглашал, что «происхождение нашего знания заключается в восприятиях, и даже в отношении тех вещей, которые лежат за пределами чувств», и что «метафизика, получает свое название («за физикой»), из-за того, что для нас, которые естественно приходят к знанию о невещественном путем чувственных восприятий, разумно считать, что этот объект изучения лежит за пределами физики».

Аристотелизм был полностью признан в Европе в XIII в., доминируя, по крайней мере четыре столетия, настолько, что даже в 1624 г. парламент в Париже декларировал, что под страхом смерти никто не смеет учить доктринам, противоречащим Аристотелю.

Ученые средневековья рассматривали аристотелев энциклопедический свод знаний как не подлежащий совершенствованию. Они принижали взгляд святого Фомы, касающегося соотношения между физикой и метафизикой, утверждая «не дело физики теоретизировать относительно фактов и законов или заниматься реконструкцией космологии или метафизики... если физическая теория не совместима с полученными метафизическими учениями, ее не следует принимать, поскольку метафизика, а не физика является высшей наукой о природе». В согласии с этим они истолковывали окружающий мир только путем применения формальной логики, т.е. дедуктивных выводов из темных, бесплодных принципов, которые фактически являлись окаменелостью порочной аристотелевой физики. Этот подход не мог принести ничего кроме пространной софистики и тормозил научный прогресс.

Хотя Аристотеля следует рассматривать как величайшего философа — одного из основателей логики, — его учение появилось в момент упадка творческого периода греческих мыслителей, и вместо стимулирования дальнейшей интеллектуальной активности оно было принято как догма и положило конец любой другой философской активности. Два столетиями позже, во времена роста новых философских концепций, практически любой прогресс в науке, в логике и в философии начинался с оппозиции к аристотелевым теориям.

#### Появление современной науки

Необходимым условием появления современной науки было освобождение от философии Фомы Аквинского. Прогрессу способствовал ряд обстоятельств. В течение XV в. различные причины привели к упадку папства, что привело к быстрым политическим и культурным изменениям в обществе. Изобретение пороха усилило центральную власть в феодальном обществе, а новая — по существу классическая — культура превозносила Грецию и Рим и порицала средневековье.

Решающими обстоятельствами для возрождения науки были: новое соотношение между Землей и Солнцем, предложенное Николаем Коперником (1473-1543) в 1543 г., согласно которому, Земля вращается вокруг Солнца, а не наоборот, как это предполагалось со времен Птолемея (египетский

астроном, математик и географ, около 100—178 н.э.) (рис. 1), а также успехи теорий Кеплера (1571 — 1630), появившихся в начале XVII в, Кеплер, сформулировав три закона, которые управляют движением планет вокруг Солнца, продемонстрировал ошибочность аристотелевых принципов, согласно которым небесные тела принципиально отличаются от земных.

Рис. 1. (а) Модель Птолемея, принятая вплоть до начала 17-го столетия: Земля в центре, а Солнце и планеты вращаются вокруг нее. Планеты описывают малые окружности (эпициклы), центры которых движутся по большим окружностям (дифферентам) с Землей в центре, (б) Версия Солнечной системы по Копернику: Солнце в центре, а планеты вращаются вокруг него по концентрическим круговым орбитам

Кеплер родился в маленьком городке Вейль в Вюрттемберге. Он учился с намерением стать протестантским пастором, но, будучи сторонником идей Коперника, он вряд ли мог на это рассчитывать. Его профессор математики и астрономии рекомендовал его для преподавания в Граце, где он опубликовал в 1596 г. свою первую работу, *Mysterium Cosmographicum*, в которой ясно выразил свою веру в математическую гармонию Вселенной. Будучи протестантом, он был изгнан, когда курфюрст Фердинанд начал жестокую контрреформацию, и переехал в Прагу по приглашению астронома Тихо Браге (1546—1601), с которым он сотрудничал вплоть до его смерти. Он использовал точные астрономические наблюдения Тихо, чтобы разработать свои законы планетарного движения. После смерти императора Рудольфа II он отправился в Линц, чтобы защитить свою мать, которую обвиняли в колдовстве (надо отметить, это ему успешно удалось). Когда курфюрст Фердинанд в 1619 г. стал императором под именем Фердинанд II, преследования протестантов усилились, и в 1626 г. Кеплер был вынужден покинуть Линц. После многих странствий он умер в 1630 г. по дороге в Ратисбон, куда он направлялся, добиваться правосудия от парламента. Разразившаяся вскоре Тридцатилетняя война уничтожила следы его захоронения, которое было за городскими воротами. Кеплер, один из вождей астрономической революции, всю свою жизнь занимался составлением гороскопов, хотя и не верил в них, с целью поправить свои скудные финансы.

Кеплер восхищался старой идеей Пифагора, в которой превозносилась сферическая форма, и старался найти в движениях планет такие же пропорции, которые проявляются в музыкальных гармониях и в правильных многоугольниках. В его представлении планеты, так же как и Земля, были как бы живыми существами с индивидуальными душами. Отказ от такого фантастического взгляда на физический мир начатый Галилеем и законченный Ньютоном, у Кеплера это не было столь явным, и его научный метод рассмотрения проблем сочетался с отклонениями в сторону магических символических положений, типичных, например, для алхимии.

Небесные тела с Солнцем в центре, по Кеплеру, являются воплощением, хотя и несовершенным, сферического образа Святой Троицы. Уже в *Mysterium Cosmographicum* он писал: «Образ триединого Бога — сферическая поверхность, т.е. Бог-Отец в центре, Солнце является внешней поверхностью, а Святой Дух подобен лучам, испускаемым из центра к сферической поверхности». Из своих наблюдений за движением планет он заключил, что они обращаются вокруг Солнца, описывая эллипсы с Солнцем в одном из фокусов (первый закон) и, что линия, которая соединяет планету с Солнцем, покрывает равные площади за равные времена (второй закон). Кроме того, он продемонстрировал, что эти орбиты не произвольны, а именно, максимальное расстояние планеты от

Солнца является некоторым соотношением с временем, которое требуется для совершения полного обращения вокруг Солнца (третий закон, рис. 2).

Рис. 2. Законы Кеплера, (а) Первый закон утверждает, что планеты движутся по эллиптическим орбитам с Солнцем в одном из фокусов. Соответственно перигелий и афелий — точки минимального и максимального расстояния от Солнца, (б) Второй закон утверждает, что линия, которая соединяет Солнце с планетой, покрывает равные площади за равные промежутки времени. Поэтому, две заштрихованные области равны, если их покрытие происходит за одно и то же время, и планета должна двигаться с большей скоростью, когда проходит сегмент, который ближе к Солнцу, чем когда она проходит сегмент с большим удалением от Солнца. Третий закон устанавливает, что квадрат времени, которое планета затрачивает на полный оборот вокруг Солнца, пропорционален кубу главной полуоси эллипса орбиты

Декарт

Рене Декарт (Картезий, 1596—1650), младший современник Галилея, был первым, кто предпринял намерение провести полную реконструкцию идей, касающихся физической Вселенной.

Период, предшествующий его рождению, и тот, в котором он жил, были отмечены событиями, которые сильно изменили концепцию мира. Открытие Америки, кругосветное путешествие Магеллана вокруг Земли, изобретение телескопа, падение системы Птолемея в астрономии и общая неудовлетворенность схоластикой ослабили старые основы и обеспечили фундамент для нового построения.

Декарт считается основателем современной философии и одним из создателей науки XVII в. Его отец, Иохим, советник парламента Бретани, был скромным землевладельцем, его мать, умерла, когда он был ребенком. Выбрав военную профессию молодой Декарт принимал участие в кампаниях Мориса Баварского. В возрасте 24 лет он после глубокого психического расстройства решил посвятить себя философии.

Он был одарен сильным ярким воображением, которое сделало его целеустремленным человеком как в личной жизни, так и в его способах рассуждений. Вольтер говорил о нем без иронии, что «природа сделала его почти поэтом, и фактически он сочинил для шведской королевы *divertissement*, в стихах, которые не были напечатаны». Полагая, что для свободного развития философии нужно избегать политического давления со стороны правительства его родины, он стал беженцем и уехал в Голландию. Но его идеи не принимались ни там, ни во Франции (позже когда его гений был признан, Франция звала его обратно, обещая блестящее положение, которое он так и не получил). 1649 году он принял приглашение от королевы Швеции Кристины. Страстно увлеченная философией королева, хотела чтобы Декарт давал ей уроки в ранние утренние часы. По приезде в Стокгольм философ, заболел пневмонией и спустя несколько месяцев умер.

Стремлением Декарта было создать теорию Вселенной, разработанную как можно детальней. Такая теория с необходимостью заставляла иметь метафизическую основу, и, действительно, метафизика является большей частью хорошо известных его работ. Первым шагом было отбросить бесполезные методы средневековья, попытки интерпретировать природу в понятиях действия и силы, материи и формы, сущности и случайности, десяти категорий, подобных аристотелевым концепциям, уже предложенными другими философами. Действительно, уже Френсис Бэкон (1561—1626) и Галилео Галилей (1564—1642) начали преобразования, которые привели к отказу от аристотелева правила,

что в физике все обусловлено конечной причиной. Галилей установил новую науку, (введя экспериментальный метод) основанную на необходимости наблюдать внешний мир и задавать вопросы природе путем постановки соответствующих экспериментов.

Галилей

Галилео Галилей родился в Пизе в 1564 г., и, следуя желанием отца, ученого и способного музыканта, поступил в 1581 г. в Пизанский университет, чтобы стать врачом. Однако медицина его мало интересовала, а сильно привлекала математика. В 1583 г, он сделал свое первое важное открытие. Наблюдая люстры, подвешенные в Пизанском соборе, которые раскачивались под действием ветра, он обнаружил, что период колебания не зависит от амплитуды.

После ряда безуспешных попыток он получил кафедру математики в Пизанском университете. Это была второстепенная профессорская позиция со скромным жалованием 60 скуди в год. Финансовые обстоятельства заставили его в 1592 г. отправиться в Падую. Его все еще скромные доходы вынуждали давать частные уроки и в маленькой мастерской заниматься с подручным изготовлением механических инструментов. В Падуе, в 1606 г., он узнал, что годом ранее один голландский ученый изобрел телескоп. Он сам сумел сделать телескоп и, наблюдая Луну, сразу же увидел, что она не является гладким и однородным объектом, как утверждал Аристотель. Он также открыл пятна на Солнце, но наиболее выдающийся момент наступил, когда он открыл четыре спутника Юпитера. Это были новые тела, не упоминаемые Аристотелем, и они определенно не вращались вокруг Земли. Он немедленно опубликовал свои наблюдения в *Sidereus Nuncius* (1610).

В конце 1610 г. он вернулся в Пизу, где изучал некоторые проблемы, касающиеся движения, результаты работы он частично опубликовал в *Diagolo sopra I due massimi sistemi del mondo* (1632). Содержание этой книги строго астрономическое и содержит «сократовское» опровержение старой физики и космологии (защищаемой Симплициусом), которое делается Сальвиати, приверженцем Коперника. Все свои механические наблюдения Галилей позднее собрал в *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove science attenenti alia meccanica e ai movimenti locali* (1638).

Галилей открыл важность ускорения, которое изменяет скорость во времени как по величине, так и по направлению. До этого люди полагали, что движение земного тела постепенно прекратится, если оно предоставлено само себе.

Почему тела двигаются? В течение почти двух тысяч лет каждый полагал на основе ложных предположений, сделанных Аристотелем, что необходима сила для поддержания тела в движении. Это убеждение представлялось разумным, например если лошадь перестанет тащить повозку, то она быстро остановится. Последователи Аристотеля распространяли свои соображения о причинах движения и на метательные снаряды, утверждая, что выпущенная стрела продолжает движение из-за того, что воздух обтекает ее от наконечника к хвосту и тем самым толкает ее; это прекрасный пример аристотелевой логики.

На самом деле даже сам вопрос «что заставляет тело двигаться?» обманчив. Он имел смысл для Аристотеля, который полагал, что естественным состоянием для тела является покой. Галилей выполнил серию экспериментов, которые убедили его в том, что движущееся тело обладает количеством движения (импульсом), которое сохраняется само по себе. Он утверждал, что любое тело, предоставленное само себе, сохраняет свое движение по прямой с постоянной скоростью. Поэтому ключевой вопрос не «что заставляет тело двигаться?», а «что изменяет движение тела?».

Галилей дал ответ, что любое изменение скорости или направления движения должно получаться в результате действия некоторых сил. Такой принцип был позднее выражен Ньютоном как первый закон движения, или закон инерции; сегодня мы можем легко проверить это, пуская шайбу скользить по поверхности льда: чем более гладкая поверхность, тем дольше продолжается движение.

Мы также можем поставить эксперименты, используя объекты, движущиеся в специальных условиях, снижающих влияние воздуха и трения. Они дают возможность убедиться, что даже малый толчок позволяет телу двигаться хотя и с малой, но постоянной скоростью. Экстраполируя такие результаты, можно сказать, что если трение полностью исключить, то тело будет продолжать двигаться бесконечно с постоянной скоростью. Таким образом, внешняя сила нужна, чтобы заставить тело двигаться, но как только оно начало двигаться, не требуется ни какой силы, чтобы оно двигалось с постоянной скоростью.

В дальнейшем Галилей сформулировал закон, управляющий движением падающих тел, утверждая, что когда тело свободно падает, его ускорение, если пренебречь сопротивлением воздуха, остается постоянным и одним и тем же для всех тел. Конкретно он экспериментально продемонстрировал, что тяжелые свинцовые шары падают с той же быстротой, что и легкие тела. Он также задался вопросом в своем труде *Discorsi intorno a due nuove scienze*, распространяется ли свет с бесконечной или конечной скоростью, и предложил соответствующий эксперимент, который можно считать предшественником эксперимента, выполненного Физо (1819-1896) в 1849 г.

Он горячо принял гелиоцентрическую систему; переписывался с Кеплером и признавал его открытия. С помощью своего телескопа он открыл, что Млечный Путь образован большим числом звезд, и смог наблюдать фазы Венеры, существование которых следовало из теории Коперника, но которые не наблюдались невооруженным глазом. Когда 7-го января 1610 г. он открыл четыре спутника Юпитера, которых в честь своего покровителя Козимо Медичи II назвал «медициейскими звездами», он столкнулся с проблемой. Все знали, что существуют семь небесных тел, а именно пять планет: Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн, а также Солнце и Луна. Семь рассматривалось как священное число: разве суббота не седьмой день? Разве не существует семисвечника и семи церквей в Риме? Разве нет семи смертных грехов? Что может быть более правильным, чем существование семи небесных тел? Если мы теперь добавим четыре луны Юпитера, то число небесных тел станет одиннадцать, а это число не имеет мистического смысла. Поэтому традиционалисты отказались признать телескоп, не желали смотреть через него, и утверждали, что он показывает только фантазии. Галилей вместе с Кеплером смеялся над этим, но вскоре ему было не до смеха. Инквизиция бросила его в тюрьму и обязала его отказаться от идеи движения Земли. Развитие науки в Италии остановилось на несколько столетий, но инквизиция не смогла противостоять гелиоцентрической теории, которую принимали люди науки, особенно в протестантских странах.

На склоне лет Галилею позволили вернуться в свой дом в Арцетри, где он, слепой старик, умер в 1642 г. Церемония похорон в церкви Санта Кроче во Флоренции была запрещена Римом, поскольку она могла бы «скандализировать благонамеренных людей» и «оскорбить репутацию» инквизиции. Запрет на чтение трудов Галилея был отменен лишь в 1757 г. Частичная реабилитация была проведена папой Иоанном Павлом II в 1981 г. с назначением комиссии понтифика, которая должна была проанализировать и вынести решения по четырем группам исследований, касающихся аспектов

толкования Священного писания, культуры, науки, а также исторически-юридических особенностей судебного процесса. В октябре 1992 г. комиссия вынесла окончательное заключение, не реабилитируя Галилея, но признавая, что все поборники прогресса без исключения имеют равные права при отсутствии неблагоприятных документов. Это был довольно завуалированный способ сказать, что в то время суд мог бы пройти и по-другому.

### Физика Декарта

Открытие Кеплером трех законов движения планет указало на исключительную важность математики в изучении природы, и воодушевило Декарта, чьи исследования основывались на убеждении, что теоремы математики дают точность, определенность и универсальный подход, не доступные другим дисциплинам. Как следствие, Декарт основывал все свои построения на аксиоме, считая, что ясность и определенность являются отличительными чертами подлинного знания. Он начал с отрицания, что тела на расстоянии могут действовать друг на друга, утверждая, что они могут взаимодействовать только, когда они в контакте. Как следствие, пространство между Луной и Землей, и в более широком смысле, все пространство не может быть пустым, но частично заполнено некоторыми телами, подобно воздуху и материальным объектам. Промежутки между частицами, составляющие эти тела, а также остальное пространство предполагалось «физической средой», наполненной субстанцией, которая хотя и не поддается человеческим ощущением, способна передавать силу и воздействовать на тела, погруженные в нее. Эту среду он назвал «эфиром». Таким образом, термин эфир терял значение, данное античной греческой космологией, т.е. некий совершенный элемент, составляющий небесные сферы и тела. Декартовские частицы находятся в постоянном движении, образуя вихри, и свет является просто передачей давления, производимого на глаз движением этих вихрей. В своей книге *Dioptrique* ученый сравнил зрение с ощущением предмета, получаемого слепым человеком с помощью своей палки.

Основываясь на идее, что эффекты, производимые контактами и столкновениями, являются простейшими и наиболее понятными явлениями внешнего мира, он не нуждался в каких-либо других посредниках. Он не требовал, как мы делаем сегодня, чтобы его схема имела экспериментальное подтверждение, поскольку он больше верил в простоту и точность умозрений, чем в соответствие с наблюдаемыми фактами.

Его труды следует рассматривать как исключительно важные умозрительные попытки показать, что вся Вселенная и ее происхождение можно представить в виде логически согласованной механической схемы, которая зависит от немногих фундаментальных действий, и что полное понимание принципов ее действия можно полностью понять с помощью математики. Он стал родоначальником идеи механистической философии, согласно которой неодушевленный внешний мир может с научными целями рассматриваться, как автоматический механизм, и для каждого физического явления можно вообразить соответствующую механическую модель.

Подобная точка зрения не могла быть принята до Возрождения, когда было слишком мало — если и было — самодействующих механизмов, которые способны были работать без участия человека.

Люди имели только некоторые инструменты, которые, чтобы работать, требовали умелого управления ими, и поэтому любое проявление регулярности понималось как результат действия некоторого разума. Уже античные греки верили, что порядок и гармония, наблюдаемые в движении небесных тел, основано на их душах, и многие явления получили абсурдные объяснения в

аристотелевой философии. Например, падение тяжелого тела объяснялось предположением, что тяжелое вещество стремится занять свое естественное место: центр Вселенной. Это объяснение стало неудовлетворительным, когда была принята коперниковская теория Солнечной системы, поскольку теперь Земля двигалась в бесконечном пространстве и нельзя было указать точку центра Вселенной. Революционным образом Декарт предположил, что космос можно рассматривать, как огромную машину и вследствие этого все происходящее в материальном мире можно предсказать с помощью математических вычислений.

Он пошел и дальше, утверждая, что физика, подобно геометрии Эвклида, может быть просто выведена из априорных принципов без какой бы то ни было необходимости наблюдений и экспериментов, т.е. на основе гносеологического рационализма. В этом убеждении он отступал от новых доктрин Бэкона и Галилея и подвергался даже критике Гюйгенсом.

По существу, создавая всеобъемлющую теорию Вселенной без необходимости изучения в деталях любого процесса, Декарт скорее продолжал традицию греков, чем следованию новым путям, проложенным Тихо Браге, Кеплером и в особенности Галилеем. Он никогда не держался принципа, что достоверное знание можно последовательно постигать путем терпеливого изучения природы, и его гипотеза, что сила может получаться только путем передачи через давление или удар, не давала возможности ему объяснить любую из сил, существующих в природе. Дефекты его методологии привели к тому, что менее чем за столетие почти все его теории были отвергнуты; однако его идеи стимулировали научную мысль на высочайшем уровне.

#### Закон преломления

В работе *Dioptrique* Декарт излагает свою теорию света, основанную на вихрях, и обсуждает законы отражения и преломления, впервые выразив принцип, что отношение углов падения и преломления зависит от среды, через которую проходит свет.

Уже греки знали, что если световой луч проходит из одной среды в другую, он частично отражается, а частично проходит через поверхность раздела двух этих сред (рис. 3). Каждый может выполнить эксперимент с куском стекла, освещаемым лучом света от окна. Часть солнечного света отражается от поверхности стекла, образуя пятно света, которое двигается по стене при движении стекла, а другая часть проходит сквозь стекло. Явление, при котором часть света проходит через стекло, называется преломлением (рефракция). Термин происходит от латинского слова *refraction* и отражает тот факт, что объект, который частично находится в одной среде, а частично — в другой (например, палка частично в воздухе, а частично в воде), кажется сломанным (на латыни *refractus*).

Рис 3. (а). Падающий, отраженный и преломленный лучи. Закон преломления утверждает, что  $\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = v_1 / v_2$ , где  $v_1$  и  $v_2$  — скорости света в первой и во второй средах, соответственно, (б)

Пучок света, отраженный и преломленный к куску стекла

Имеются три закона геометрической оптики: первый утверждает, что свет распространяется по прямой линии, если только не встречает помех; вторым и третьим законами являются законы отражения и преломления. Первый закон уже можно найти в труде по оптике, написанном Эвклидом (300 лет до н.э.), там же содержится и закон отражения; но оба они были известны и ранее.

Без сомнения явление преломления света было известно Аристотелю. Позднее Птолемей старался, правда безуспешно, вывести количественный закон. Из измерений, сделанных им для сравнительно малых углов, он сделал ошибочное утверждение, что угол преломления пропорционален углу

падения. Много позднее арабский оптик Альхазен (Абу Али аль-Хасан ибн аль Хаитам 965—1038) нашел, что отношение между углами падения и преломления не остается постоянным при изменении угла падения, но он не смог дать верной формулировки. До него было около сотни публикаций; в одной из наиболее важной, переведенной на латинский язык в XII в. и опубликованной в 1572 г. под заглавием *Opticae Thesaurus*, теория греков, согласно которой глаз испускает лучи, впервые авторитетно отвергалась.

Правильная формулировка закона преломления была дана Виллебродом Снеллиусом (1591 — 1676), профессором математики в Лейдене, который установил экспериментально в 1620 г., что отношение косекансов углов падения и преломления постоянно, и выразил это в своей рукописи, которая получила некоторое распространение. Однако дальнейшие исторические исследования показывают, что закон преломления был открыт английским астрономом и математиком Томасом Херриотом (1560-1621) в Ислворте (Мидлсекс) около 1601 г. Кроме того, математик Абу Сайд аль-Ала в своей книге «О зажигательных инструментах» (написанной около 984 г.) устанавливал закон и рассчитывал с его помощью зажигательного стекла. Декарт в своей книге *Dioptrique* приводит современную формулировку закона, утверждая, что отношение между синусами углов падения и преломления равно скорости света во второй среде, деленной на скорость в первой (т.е. в среде, из которой выходит свет). Используя свою теорию света, в которой предполагалось наличие малых испускаемых частиц, он показывал, что закон преломления обусловлен изменением скоростей частиц при переходе их из одной среды в другую. Гюйгенс утверждает, что Декарт был знаком с рукописью Снеллиуса и использовал его результаты.

Хотя утверждение, что отношение синусов углов падения и преломления зависит от скоростей света в двух средах, справедливо, Декарт, используя законы механики к малым летящим частицам, которые по его представлению составляют свет, приходил к заключению, которое было неверным. Он считал, что для согласования с экспериментальными наблюдениями, а именно, что в более плотной среде свет отклоняется в меньшей степени, следует предположить, что в ней световые частицы движутся быстрее.

Во всяком случае его теория имела большой успех. Он дал математическое объяснение радуги, рассчитав отражение и преломление света в дождевых каплях, и это рассматривалось его современниками как изумительный результат. Радуга всегда рассматривалась как необъяснимый феномен, вплоть до того времени, когда архиепископ Сплита философ Марко Антонио де Домини (1560—1624) предположил, что этот феномен возможно связан с дождем и солнцем.

Теория света Декарта быстро заменила средневековые взгляды и способствовала новым знаниям. Однако попытки рационально объяснить природу и возникновение света привели к огромному противоречию в двух созданных и взаимно исключаемых теориях: волновой теории Гука и Гюйгенса, и корпускулярной теории, введенной Декартом и продолженной Ньютоном и его последователями.

## ГЛАВА 1

### ВОЛНОВАЯ И КОРПУСКУЛЯРНАЯ ТЕОРИИ СВЕТА

Людьми, которые сыграли центральную роль в истории теории света, были Гук, Гюйгенс и Ньютон. Гук и Ньютон были британцами, Гюйгенс — голландцем. Все они сделали замечательные вклады в различные области физики и установили основу современного понимания света, хотя и предложили

противоречащие теории. Одна была основана на волновых представлениях, в то время как другая рассматривала свет, состоящим из малых частиц. Эти две теории, которые казались непримиримыми, вызвали яростные дискуссии и споры среди последователей и их сторонников. Были написаны лавины слов об этом споре; мы не станем глубоко вникать в него, но ограничимся наиболее важными фактами.

Роберт Гук

Роберт Гук родился во Фрешвотере на острове Уайт в 1635 г. и умер в Лондоне в 1703 г. Он был целеустремленным человеком, который придумал и построил ряд инструментов и устройств: мы обязаны ему, например, новейшим использованием спиральной пружины в балансном механизме часов, что позволило обеспечить точность хода. Он ввел закон пропорциональности между упругими деформациями и силой, который носит его имя, провел ряд астрономических наблюдений и претендовал на результаты некоторых работ Ньютона, касающихся открытия закона всемирного тяготения, о котором, правда, он лишь смутно догадывался.

Благодаря своим тщательнейшим наблюдениям с помощью двадцатиметрового телескопа, колебавшегося даже под слабыми порывами ветра, он был первым, кто описал тень кольца Сатурна, бросаемую на планету, и составил детальные карты лунных кратеров. Он был назначен топографом и архитектором и помогал восстановлению Лондона после великого пожара 1666 г. Он был один из первых, кто явно выразил концепцию вымирания и предположил эволюцию двумя столетиями до Чарлза Дарвина.

Он начал свою научную карьеру в качестве ассистента хорошо известного английского химика Роберта Бойля (1627—1691), который после обучения в Итоне и в Женеве приступил к исследованиям свойств газов и вакуума. В 1658—1659 гг. Гук построил для Бойля вакуумный насос типа того, что в 1650 г. изобрел Отто фон Герике (1602—1686) и помогал Бойлю в демонстрациях, когда тот доказывал, что воздух играет важное значение в распространении звука, а также необходим для дыхания и горения. В тот же самый период Бойль сформулировал знаменитый закон, который в Великобритании носит его имя, а в континентальной Европе часто связывается с Мариоттом, согласно которому произведение давления газа на его объем является постоянным, если, как указал Мариотт, температура постоянна. Бойль настолько ценил Гука, что в 1662 г. назначил его куратором экспериментов в Королевском Обществе для улучшения знаний о природе Английской академии наук, основанном им в 1660 г. вместе с другими английскими учеными под покровительством Карла II. Роль Общества была «улучшать знания о природных вещах» путем наблюдений и экспериментов, а не обращения к книжным авторитетам: девизом общества было *Nullius in Verba* («ничего не принимать на слово»). С этой целью Общество назначало куратора экспериментов. В этой роли Гук был обязан, когда бы ни проводилось заседание, выполнить три или четыре эксперимента, даже если заседание проводилось раз в неделю. Эта обязанность была довольно обременительной и обязывающей. Однако он выполнял эти обязанности с большим мастерством в течение многих лет, пока не был назначен секретарем Общества.

В оптике он сделал два важных экспериментальных наблюдения, которые, однако, были предвосхищены другими. Первое открытие, которое он описал в своей *Micrographia*, опубликованной в 1667 г., содержало детальное наблюдение радужных цветов, которые можно наблюдать, когда свет падает на тонкий слой воздуха между двумя пластинами стекла или линзами, или на любую тонкую

пленку прозрачного вещества; это так называемые цвета тонких пластинок или кольца Ньютона, которые уже наблюдались Бойлем и впоследствии, были полностью изучены Ньютоном. Второе открытие Гука, сделанное после публикации его *Micrographia*, заключалось в том, что свет в воздухе не распространяется строго вдоль прямой линии, но некоторое освещение можно обнаружить в области геометрической тени непрозрачного предмета. Это явление также уже наблюдалось и было опубликовано в 1665 г. в посмертной работе Франческо Мария Гримальди (1613—1663), итальянского иезуита, который дал этому явлению название «дифракция». Теоретические исследования Гука природы света имели выдающуюся важность, так как они являлись переходом от картезианской (декартовой) системы к полностью волновой теории. В отличие от Декарта Гук считал, что условие, связанное с испусканием света светящимся телом, заключается в быстрых колебательных движениях очень малой амплитуды. Он писал о распространении света;

«...в Homogeneous medium это движение распространяется единообразно с равной скоростью, независимо от места, каждый импульс или колебание светящегося тела будут порождать сферу, которая станет последовательно увеличиваться, становясь все больше, совершенно таким же образом (хотя и бесконечно быстрее), как волны или круги на поверхности воды расходится вес большими кругами из точки паления камня. Отсюда следует, что все части этих сфер волнообразно распространяются в Homogeneous medium, с образованием лучей под прямыми углами к поверхности сферы».

Рис. 4. Волны на поверхности пруда. Круговая рябь представляет фронты волн. Лучи, перпендикулярные волновым фронтам, показывают направление движения волны. Гук ввел также концепцию «волнового фронта» или место точек, для которого, в каждый момент времени, возмущение (независимо от того, как определяется возмущение), первоначально порождаемое точечным источником, имеет одно и то же значение. Он утверждал, что это сфера, центром которой является точка испускания и радиусы которой соответствуют лучам света, испускаемого источником (рис. 4).

Гук пересмотрел теорию дифракции Декарта и вывел закон дифракции из отклонения волнового фронта. Он предположил, что отклонение волнового фронта ответственно за цвета, которые можно наблюдать, когда пучок белого света проходит через стеклянную призму. Он считал, что белый свет был простейшим типом возмущения, производимого простым и однородным импульсом под прямыми углами к направлению распространения, и предполагал, что цвет образуется за счет искажения этого возмущения во время процесса преломления. Мы увидим, что эта теория была полностью опровергнута через несколько лет после ее публикации.

Христиан Гюйгенс

Христиан Гюйгенс, один из основателей механики и физической оптики, родился в Гааге в 1629 г. Он был сыном Константина (1596—1687), известного поэта Возрождения. Первоначально он изучал риторику и юриспруденцию, но, будучи влюблен в науки, он предпочел занятия математикой. В 1655 г. Гюйгенс с помощью своего самодельного мощного телескопа прояснил проблему конфигурации Сатурна, открыв его кольца. Он также открыл один из спутников Сатурна: Титан. Затем он обнаружил, что Луна лишена атмосферы и ее «моря» не имеют воды. Годом позже он написал учебник по расчетам вероятностей, *De ratiociniis in ludo aleae*, а в следующий год построил

маятниковые часы.

В 1665 г. он по приглашению Кольбера, могущественного министра Людовика XIV, переехал в Париж, где в 1666 г. он был выбран членом вновь образованной Королевской Академии Наук, а в 1673 г. опубликовал *Horologium oscillatorium*. В этой книге вводилось понятие момента инерции, первые теоремы механики твердых тел и теория составного маятника. С помощью этих, а также ранее проведенных исследований упругих столкновений он выразил — хотя и в частном случае — теорему работы и энергии, исследовал вращательное движение, дал фундаментальные теоремы центробежной силы и установил, что ускорение под действием тяжести изменяется как функция высоты, продолжая в этом отношении исследования Г. Борели (1608—1679), и прокладывая путь для Исаака Ньютона.

Из-за жестокой кампании, проводимой Людовиком XIV против Голландии, Гюйгенс в 1681 г. был вынужден покинуть Францию и возвратиться на родину, где он вместе со своим братом занимался изготовлением линз для телескопов. В 1690 г. он опубликовал в Лейдене свою знаменитую книгу *Traite de Lumiere*, в которой, в противовес теории истечения Ньютона, он поддержал волновую теорию света. Он скончался в Гааге в 1695 г.

Гюйгенс соглашался с Гуком, что свет, по существу, является формой движений. Следовало решить, является ли это движением среды, или сравнимое с полетом стрелы, как это следует из корпускулярной теории. Он решил, что первая альтернатива единственно правильная.

Евангелиста Торричелли (1608—1647) — ученый, который после Галилея занял кафедру математики и философии герцогства Тосканы, — показал, что свет очень быстро распространяется как в воздухе, так и в вакууме. Это дало основание Гюйгенсу полагать, что среда, в которой распространяется свет, должна пронизывать все вещества Вселенной и даже так называемый вакуум. Эту среду он назвал «эфиром». Соответственно свет является возмущением этого эфира, состоящего из упругих колебаний, которые распространяются с большой скоростью в этой высоко упругой и тонкой среде. В 1675 г. датчанин Олаф Рёмер (1644—1710) уже измерил скорость света из астрономических наблюдений, получив значение 214 300 км/с, которое на треть меньше современного значения около 300 000 км/с.

Гюйгенс принимал точку зрения Декарта, согласно которой, каждое явление можно представить как некоторый механический процесс. Упругие явления были хорошо известны к тому времени, в частности, благодаря исследованиям Гука, и если для света нужны были волновые представления, то упругие колебания представлялись вполне уместными. Был уже известен целый ряд примеров упругих колебаний: морские волны — волновое явление колебаний воды; звуковые волны — волновое явление в воздухе, звук скрипичной струны, получаемый благодаря ее колебаниям. Все эти волны являются упругими колебаниями некоторых сред. Принимая, что эфир это среда, в которой распространяется свет, и что свет является волнами, естественно было принять, что он и является упругими колебаниями этого эфира.

При обсуждении волнового процесса распространения Гюйгенс в *Traite de la Lumiere* ввел знаменитый принцип, носящий его имя, с помощью которого он смог количественно вывести законы отражения и преломления. Затем он дал физическое объяснение изменениям скорости света при его распространении из одной среды в другую, предположив, что прозрачные тела состоят из твердых частиц, которые, взаимодействуя с эфиром, изменяют его упругость.

И Гук, и Гюйгенс предполагали, что свет представляет собой быстрое колебательное движение эфира. Эфир определялся, как особая среда, упругая и с необходимостью твердая, но которая столь тонка (весьма несовместимые свойства), что заполняет все пространство внутри и вне материальных тел. Это колебательное движение может напоминать, как писал Гюйгенс, волны на воде, получающиеся при падении камня.

Исаак Ньютон

Исаак Ньютон родился в Вулсторпе, Линкольншире, 25 декабря 1642 г. Он, без сомнения, является одним из самых выдающихся исследователей Природы. Его мать принадлежала к умеренной части благородного класса, а отец, который умер до его рождения, был мелким землевладельцем. Его строгое пуританское воспитание, усиливается отчужденностью от матери, которая вторично вышла замуж за протестантского священника, а затем восстановленные тесные, нежные отношения с ней, рассматриваются некоторыми биографами в духе фрейдистских интерпретаций, касающихся его нервных срывов, женоненавистничества, и причуд характера.

Он должен был стать мелким землевладельцем, и его обучение должно было ограничиться средней школой. Но его замечательная склонность к механическим изобретениям, а также к гуманитарным изучением в области древнееврейского языка и теологии дали основания его учителям рекомендовать его в Кембриджский университет. Он был принят в Тринити колледж в июне 1661 г., но его мать не оплатила обучение, и он был вынужден поступить в университет на положение *subsizar*. Так назывались бедные студенты, в которые должны были исполнять обязанности слуг по отношению к старшим студентам. Это тягостное для него положение, сделало его еще более замкнутым по отношению к окружающим его студентам, которые впоследствии, когда он стал знаменитым, не могли вспомнить встречи с ним. Он не выделялся в своих официальных занятиях и не следовал формальному курсу. Как в математике, так и в натуральной философии (физике, говоря современным языком) он был самоучкой, так как в то время обе эти дисциплины преподавались слабо. Механистический мир Декарта и атомистические концепции теолога, математика и астронома Пьера Гассенди (1592—1655), который был профессором Колледж де Франс в Париже, увлекли его, о чем он записал в своей записной книжке, которая в тот период называлась *Quaestiones quaedam philosophical*. Хотя, по-видимому, он не пришел к определенным заключениям, он явно склонялся к атомизму. Он критиковал теорию света Декарта, основанную на вихрях, отдавая предпочтение корпускулярной теории. С помощью натуральной философии он открыл для себя математику. Возможно, он купил «Геометрию» Эвклида, но прочел лишь первые страницы, находя их очевидными, хотя позднее он сожалел, что не уделил большего внимания тексту.

Чтобы остаться в Кембридже, Ньютону нужно было получить постоянную должность, в 1664 г. при поддержке спонсоров он был назначен преподавателем. Благодаря своему новому положению он получил возможность четыре года проводить исследования, а либерализм в отношении преподавания позволял полностью посвящать себя этим исследованиям. Когда он работал над проблемой, он забывал не только спать, но и есть. В результате, его еда доставалась его кошке или соседям по комнате, которым только и оставалось что изумляться такому поведению.

В то время университет Кембриджа был полон людей, которые заботились не столько о науке, сколько о своем финансовом благополучии; поэтому молодой Ньютон легко проходил ступени академической карьеры: в 1665 г. он получил степень бакалавра искусств, в 1667 г. стал младшим

сотрудником, а в 1668 г. — старшим сотрудником и мастером искусств. В 1669 г. его учитель, теолог, эллинист и математик Исаак Барроу (1630— 1670) уступил ему кафедру математики (в настоящее время причины этого не вполне ясны и есть некоторые сомнения, что он так поступил, видя гениальность своего ученика). Эту кафедру Ньютон занимал до 1701 г.

Между 1664 и 1665 г. Ньютон стал наиболее выдающимся математиком своего времени, установив основы исчисления бесконечно малых и получив другие важнейшие результаты в математике.

В возрасте 27 лет он уже был профессором математики в Кембридже и несколько позднее стал членом Королевского Общества. Традиции описывают его как помешанного профессора, постоянно погруженного в трудные проблемы. Рассказывали, что во время Великой Чумы, когда он вынужден был бежать в родную деревню, он, гуляя в саду и видя яблоко, падающее на землю, старался понять, почему Луна не падает на Землю. Эта нить размышлений привела его к открытию закона всемирного тяготения. Его быстрая академическая карьера поддерживалась надежными основами в физике и математике, а также приобретением знаний в гуманитарных дисциплинах при обучении в Кембридже. Его записные книжки дают представления о внимательном чтении Галилея, Декарта, Гассенди и др. Молодой «натуральный философ» считал себя, стоящим «на плечах гигантов», как он выразился однажды. Он смог усвоить все успехи новой науки и с исключительной ясностью разработать принципиальные темы своих великих вкладов в науку. Период 1665—1666 гг. был особенно плодотворен.

Изучая Кеплера, Декарта и Галилея, Ньютон рассматривал все еще нерешенные проблемы коперниковской астрономии и размышлял об атомизме, вакууме и об экспериментальных и математических методах Галилея. Он придал проблеме планетарных орбит, определяемых тремя законами Кеплера, новое теоретическое содержание, отвергая кеплеровскую гипотезу причин небесных движений. В это же время, он дал первую формулировку закона всемирного тяготения, позднее ставшей легендарной в знаменитом анекдоте о яблоке, распространяемом его биографами, и который сам Ньютон любил рассказывать в старости. На самом деле исследования показывают, что формулировка закона всемирного тяготения была дана позднее. Отвечая на вопросы, как он открыл этот закон, он говорил: «Постоянно размышлял об этом». Никакой другой ответ не мог бы лучше характеризовать этого человека, не только подчеркивая его образ жизни, посвященной скорее рассуждениям, чем действиями, но также давая понимание его рабочей методологии.

Рис. 5. Это представление эксперимента Ньютона с призмой. Пучок солнечного света OF после прохождения маленького круглого отверстия F преломляется призмой AαBβCγ и изображается в виде спектра PYZ на противоположной стене

В то же время он сконструировал первый телескоп-рефлектор, Сам изготовил зеркало путем плавления особого сплава и производя шлифовку и полировку. Он также решил проблему состава белого света путем постановки знаменитых экспериментов по дисперсии, выполненных со стеклянной призмой. Такие эксперименты были обычными для ученых в оптике того времени, но только Ньютон смог выполнить их на уровне точных математических методов. В 1666 г., когда он был еще студентом Тринити Колледжа в Кембридже, он взял стеклянную призму, «чтобы испытать с ней знаменитые Явления Цветов» (рис. 5). Он писал:

«находясь в темной комнате и сделав малое отверстие в ставне, чтобы пропустить достаточно света Солнца, я разместил мою призму так, чтобы свет мог быть преломлен к противоположной стене.

Первым очень приятным ощущением было увидеть яркие и интенсивные цвета, полученные в результате этого; но после более внимательного рассмотрения я к своему удивлению обнаружил, что они имеют вытянутую форму, хотя по закону преломления они должны были бы иметь круглую форму».

Тонкий луч солнечного света, который проходил через круглое отверстие, сделанное Ньютоном, имел круглое сечение, и согласно закону Снеллиуса должен был бы лишь смещаться, но не изменять свою форму.

#### Ньютон и свет

Ньютон сообщает нам, что, начав изучать это странное явление и вычисляя отношения между углом падения белого света на призму и углами преломления цветных лучей, выходящих из нее, сразу же обнаружил, что это отношение различно для разных цветов. Повторяя эксперимент и вводя вторую призму, он отметил, что каждый из основных цветов имеет свое отношение. Он заключил, что белый свет является «неопределенной совокупностью различных цветных лучей».

При описании этого эксперимента Ньютон совершает мистификацию; ключевой эксперимент (*experimentum crucis*, как его называет Ньютон), на котором он так сильно настаивает, был в значительной степени вымыслом, придуманным позднее для объяснений его рассуждений. На самом деле мы знаем, что Ньютон пришел к своим результатам более сложным путем, который мы не станем проследивать.

В заключение мы можем согласиться с Ньютоном, что угол преломления зависит от цвета света и что белый свет Солнца является таковым из-за того, что он содержит все цвета, и может быть разложен на свои разные цвета путем преломления, совершаемого призмой. Поскольку, как мы указывали ранее, угол преломления зависит от скорости распространения света, можем также сказать, что результаты Ньютона означают, что скорость распространения зависит от цвета света.

В настоящее время для явления, согласно которому скорость распространения света зависит от его цвета, принято название «дисперсия света», а «дисперсионная сила» описывает способность конкретного материала разлагать свет на различные цвета, наблюдаемые на экране, с помощью преломления в призме. Причина, почему свет каждого цвета распространяется с разной скоростью в одном и том же веществе, оставалась тайной вплоть до начала 20 столетия.

Преодолев свое странное нежелание публиковать свои открытия, Ньютон, обнародовал свои заключения в 1672 г., отправив письмо в Королевское Общество, и мы полагаем, что будет интересно вспомнить, как это случилось. Теория цветов, изложенная Робертом Гуком в *Micrographia*, не удовлетворяла Ньютона. Гук утверждал, что «синий цвет света получается из-за ощущений на сетчатке с помощью сложного импульса, чья слабая часть предшествует отстающей более сильной части», а красный получается из-за сложного импульса противоположного порядка. Ньютон в своей книге *Quaestiones* сразу же опроверг эти два фундаментальных предположения Гука и провел эксперименты, которые мы уже описали. Эти эксперименты показали, что белый свет является некоторой суммой цветных лучей, которые разбрасываются путем преломления в призме. Позднее он обнаружил, что этот результат имеет важное практическое значение. При работе с телескопами было установлено, что сферические линзы не отклоняют параллельные лучи, идущие от звезд, таким образом, чтобы собрать их в совершенный фокус (т.е. в точку). В своей работе *Dioptrique* Декарт показал, что линзы эллиптической или гиперболической формы могут, в согласии с законом

преломления, собирать преломленные параллельные лучи в совершенный фокус (т.е. в точку). Ньютон начал исследовать, как можно было бы изготовить такие поверхности, и обнаружил, что получается окрашенное изображение (сегодня этот дефект называется «хроматическая аберрация») из-за того, что синие лучи отклоняются сильнее, чем красные. Тогда он прекратил свою работу по несферическим линзам и никогда не возвращался к ней, решив построить отражательный телескоп, в котором увеличенное изображение получалось за счет использования вогнутых зеркал вместо линз, используемых в телескопе Галилея. Этот телескоп Ньютона имел увеличение в 40 крат. Позднее он построил второй телескоп с увеличением 150 и демонстрировал его в Кембридже. Сведения об этом дошли до Королевского Общества, которое просило ознакомиться с телескопом и в конце 1672 г. получило его от Барроу. Телескоп произвел такую сенсацию, что в январе 1672 г. Генри Олденбург, секретарь Королевского Общества, писал Ньютону, превознося его изобретение и заявляя, что Общество хотело бы послать чертеж Гюйгенсу, чтобы предотвратить присвоение другими людьми идеи Ньютона. Ньютон дал свое согласие и 6 февраля отправил в Общество доклад о своей теории цветов, в котором объяснял, как эта теория привела его к изобретению отражательного телескопа. Вначале он не формулировал каких бы то ни было гипотез по теории света, но позднее, под влиянием критики Гука, Гюйгенса и др., на которую резко реагировал, вынужден был обозначить свою позицию. В своей работе, *Royal Society Philosophical Transactions*, он принимал во внимание противников своей корпускулярной гипотезы природы света, не исключая, однако, волновой альтернативы. Резкое противодействие Гука, продолжающееся в течение многих лет, привело к тому, что он долго ничего не публиковал по оптике. Так работа Гука *Opticks* была опубликована только в 1704 г., после его смерти.

В то время когда он был назначен профессором в Кембридже осенью 1669 г., Ньютон выбрал темой своих инаугурационных лекций, прочитанных между 1670 и 1672 гг., теорию цветов и преломлений, которую он разработал в предыдущие пять лет. Эти *Lectiones opticae*, написанные на латыни, стали первым физическим трактатом и наиболее исчерпывающим изложением его теории цветов. Эти лекции были использованы как основа для его первой книги *Opticks*, написанной 20 годами позднее. Сравнивая *Lectiones* с *Optics*, мы можем проследить эволюцию взглядов Ньютона. В своих *Lectiones* Ньютон старался развить математическую науку цветов, в то время, как он сам провозглашал, *Optics* является экспериментальным учебником: «Мой замысел этой Книги не объяснять свойства света гипотезами, а выдвинуть предположения и проверить их здравым смыслом и экспериментами».

Великая революция Ньютона в физике

Позднее, в 1679 г., Ньютон продолжил свои исследования тел, подверженных действию гравитационных сил, и полностью решил эту проблему. Фактически интуитивные предположения сделанные им в 1666 г., не были полностью разработаны, поскольку он не располагал точными измерениями относительно Земли, из которых можно было рассчитать притяжение между Землей и Луной. После того как француз Жан Пикар (1620—1682) измерил длину меридиана между Амьеном и Мальвизином (1669—1670), что позволило точно оценить радиус Земли, Ньютон смог вернуться к своим первоначальным идеям, найдя прекрасное подтверждение в экспериментах. Он отвергал картезианское пространство, связанное с механическими гипотезами, но принимал принцип Декарта движения по инерции в вакууме, который Галилей не вполне явно ввел в своей космологической системе» Ньютон принял этот принцип как фундаментальную основу его законов в качестве первого:

«Каждое тело пребывает в состоянии покоя или равномерного, прямолинейного движения, до тех пор, пока действие внешних сил не выведет его из этого состояния».

Принцип инерции, полностью сформулированный им в 1680 г., был использован для объяснения движения небесных тел в пространстве. Инерция позволяет им продолжать бесконечно их прямолинейное движение, а сила гравитации между двумя массами, пропорциональная массам и обратно пропорциональная квадрату расстояния между ними, заставляет каждую планету искривлять своя траекторию по эллипсу.

Сложная аксиоматическая конструкция, устанавливающая фундаментальные основы «классической» механики, разработка теорем, относящихся к круговым и эллиптическим движениям, а также дифференцирование центральных сил, Все это было выполнено Ньютоном между 1684 и 1686 гг.

Представление и опубликование его принципиальной работы, *Philosophiae naturalis principia mathematica* в 1687 г. было поддержано и оплачено из собственных средств Эдмундом Галлеем, так как Королевское Общество, которое обещало оплатить расходы, испытывало финансовые трудности.

Галлей (1656—1742), который позднее был назначен Королевским Астрономом в Гринвиче, был знаменит своими изучениями комет. Он открыл, что события 1456, 1531, 1607 и 1682 гг. были вызваны одной и той же кометой, которая получила его имя и которая движется по сильно вытянутому эллипсу с периодом около 72 года. Последний раз эта комета появилась в 1985 г.

В первом томе содержались законы движения, криволинейные и эллиптические движения, законы столкновений, дифференцирование центральных сил и движение маятника. Второй том был посвящен движению твердых тел в сопротивляющихся средах и означал детальное и систематическое опровержение декартовой физики пространства. Эта физика изменяет реальное поведение тел, движущихся внутри жидкостей, и делает недоказуемым физические основы законов Кеплера. Оба эти тома имели рациональную аксиоматическую и дедуктивную структуру. Третий том начинался с этих же посылок, и в нем индуктивно разрабатывалось устройство Вселенной. Автор простым и изящным способом переформулировал гелиоцентрическую теорию Коперника, добавляя самые новейшие астрономические данные; после демонстрации вывода законов Кеплера из принципов, сформулированных Ньютоном, он разработал теорию движения Луны, приливов и рассчитал относительные траектории комет, а также проблему трех тел.

Первое издание *Principia* (около тысячи копий) получило широкое распространение в Европе, даже несмотря на недостаточное понимание содержания.

Ньютон как публичный человек

Вскоре после публикации *Principia*, незадолго до своего 50-летия Ньютон стал интересоваться политикой. В канун Славной революции 1688 г. Ньютон открыто противостоял попыткам Якоба (II) Стюарта заставить академический корпус Кембриджа принять бенедиктинского монаха в университет с его строгими протестантскими традициями. В 1688 г. Ньютон был выбран в Парламент как представитель Кембриджского университета. Парламент ратифицировал падение Стюартов и возведение на трон Вильгельма Оранского, так же принял Билль о правах. Потом последовала череда нескольких нервных кризисов. А в 1693 г. Ньютон был назначен смотрителем лондонского монетного двора и управлял важнейшей операцией замены циркулирующих денег на новые монеты. В 1697 г. он оставил Кембридж и кафедру. После ухода из университета он начал играть значительную роль в культурной и политической жизни столицы, будучи введенным в

Королевский Суд, и получив рыцарское звание от королевы Анны. В Лондоне он поселился в районе Кенсингтона со своей племянницей Катериной Бартон, прекрасной и практичной женщиной, которая позднее вышла замуж за Джона Кондуита — первого биографа знаменитого ученого. Позднее, в период между 1704 и 1727 гг. Ньютон был президентом Королевского общества.

Ньютон был крайне изменчивой личностью и проводил также исследования в области теологии и алхимии, которые он продолжал в старости, что дало основание экономисту Лорду Кейнсу в 1930-х гг. сказать: «Ньютон был последним из колдунов». Действительно, он полностью соответствовал тенденции XVII в., сочетать точные науки с магией. В его библиотеке было 138 книг по алхимии, которые составляли около двенадцатой доли всех его книг.

Когда он умер 20 марта 1727 г., король оказал ему честь быть похороненным в Вестминстерском аббатстве, где о нем напоминает простая цитата Лукреция: «Ньютон, qui genus humanum ingeniosuperavit».

Его вклад в понимание оптических явлений был увековечен в знаменитой эпитафии поэта Александра Попа (1688—1744): «Природа и законы Природы были в темноте, и Бог сказал: «Да будет Ньютон», и свет настал».

#### Ньютоновская теория света

Учебник Optics (1704) начинается с определения характеристик луча света: лучи света возникают на Солнце и доходят до нас через пространство. Каждый сорт лучей производит разное ощущение в глазу; красное, зеленое, синее и т.д. Естественный свет Солнца является суммой всех этих лучей и оказывается белым; эти различные лучи можно разделить с помощью стеклянной призмы.

Хотя Ньютон при помощи искусного философского языка попытался скрыть свои соображения относительно определенной модели света, он не смог устоять от искушения сформулировать свою точку зрения, предполагая, что световые лучи состоят из малых частиц (корпускул), испускаемых Солнцем и другими источниками света. Он полагал, что частицы меньшего размера вызывают ощущения синего и фиолетового, а частицы большего размера вызывают ощущения желтого, оранжевого и красного. Поэтому наши ощущения цветов можно понять как отражение объективной реальности размеров частиц,

В Principia Ньютон применил эти соображения к выводу закона преломления. Свет представляет собой материальное тело и, следовательно, подвержен тем же самым законам механики, которые управляют движением планет. Без внешних воздействий свет распространяется по прямой линии согласно закону инерции, который справедлив для всех материальных тел. Это соображение напоминает подходы пифагорийцев, которые уже были поддержаны Декартом. Но точки зрения обоих ученых очень различны.

Вольтер во время своего путешествия в 1728 г. писал:

«Француз, приехавший в Лондон, обнаружит, что философия, как и многое другое, здесь весьма отличаются. Он теперь не в мире физического пространства, а в вакууме. В Париже Вселенная представляется в виде вихрей тонкой, неосязаемой материи. Но ничего подобного нет в Лондоне. Во Франции давление Луны вызывает приливы, а в Англии моря притягиваются Луной. [...]. Вы далее обнаружите, что Солнце, до которого во Франции мало дела, здесь проявляет свое влияние. Согласно вашим картезианским представлениям все обусловлено неким импульсом, которому мы уделяем мало внимания. А согласно сэру Исааку Ньютону, все обусловлено притяжением, которое мало

известно нам. [...] Последователь Декарта утверждает, что свет существует в воздухе. Но последователь Ньютона считает, что он приходит от Солнца за шесть с половиной минут».

И добавляет:

«Очень мало людей в Англии читают Декарта, чьи труды теперь, конечно, бесполезны. Но, с другой стороны, малое число и тех, кто читал сэра Исаака, так как для этого студент должен быть искушен в математике, в противном случае чтение этих работ будет непонятно ему. Но, несмотря на это, такие люди, прочитавшие Ньютона, являются предметом уважительных разговоров. Сэру Исааку Ньютону воздают должное, а Декарту — нет. Поэтому, если некто не испытывает страха по отношению к вакууму, знает, что воздух обладает весом, использует стекло, то все это благодаря Ньютону. Сэр Исаак Ньютон здесь подобен Геркулесу из легенд, которому невежество приписывает все подвиги античных героев».

Спустя примерно сто лет, 28 декабря 1817 г., группа поэтов, включая Вордсворта, собрались в студии художника Бенджамена Хэйдона и поносили его за то, как он изобразил голову Ньютона на своей картине. Они говорили, что он был «человеком, который верил лишь в то, что также ясно, как три стороны треугольника», а Ките добавил, что Ньютон разрушил всю поэтичность радуги, сведя ее к призматическим цветам. Они подняли тост «за здоровье Ньютона и за неразбериху в математике».

Волновая теория со временем становится доминирующей

Как волновая, так и корпускулярная теории приводили к горячим спорам среди их приверженцев, пока эксперименты и теоретические рассуждения Т. Юнга (1773-1829), Е. Л. Малюса (1775-1812), Л. Эйлера (1707-1783), А. Френеля (1788-1827), Йозеф Фраунгофера (1787-1826) и др. не подтвердили первую теорию.

Леонард Эйлер — великий швейцарский математик, член Академий наук Польши и России — привлек внимание Европы серией писем, опубликованных в 36 изданиях на девяти языках, написанных между 1760 и 1762 годами к немецкой принцессе Анхальт-Дессау, которая спрашивала его мнения по каждому аспекту науки. Касаясь солнечного света, Эйлер задавался вопросом: «Что собой представляют эти лучи? Это, без сомнения, один из важнейших вопросов физики» и добавлял, что, безусловно, поддерживало волновую теорию, что лучи Солнца «соотносятся с эфиром таким же образом, как звук соотносится с воздухом».

Теория электромагнетизма Максвелла

Столетием позже, в 1864 г., Дж. К. Максвелл (1831-1879) открыл электромагнитную, а не упругую природу световых колебаний, обобщив это в знаменитых уравнениях, которые носят его имя и описывают различающиеся электрические и магнитные явления (электромагнетизм) в общей форме и из которых можно предсказать существование света. Электромагнитные волны получаются за счет колебаний в пространстве и во времени электрических и магнитных полей. Они распространяются с впечатляющей скоростью  $300\,000\text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$ , т.е. с той же скоростью, с которой, согласно измерениям, сделанным уже в 1675 г. Рёмером и позднее с высокой точностью И. Л. Физо (1819—1896) в 1849 г., распространяется свет. Максвелл предложил способ искусственного получения этих волн, и в 1887 г. Г. Герц (1857—1894) действительно смог получить электромагнитные волны с длиной волны порядка метров.

Джеймс Клерк Максвелл рассматривается вместе с Ньютоном и Эйнштейном как один из трех величайших гениев физики. Не случайно у Эйнштейна в его кабинете в Принстоне висел портрет

Максвелла.

Максвелл родился в Эдинбурге (Шотландия) в семье среднего достатка. Его отец, Джон Клерк, был юристом, который унаследовал имение Максвеллов в Шотландии и стал членом их семьи. Он построил дом вблизи Глейнэйра, куда семья переехала вскоре после рождения Джеймса. Когда ему исполнилось восемь лет, его мать (с которой он был очень близок) умерла, и он остался с любящим отцом, который так и не женился больше. Максвелл любил рисовать, сочинял стихи и любил животных. У него было слабое здоровье, и он часто болел. Еще в школьные годы он заинтересовался математикой и геометрией. Его преподаватель в Эдинбургском университете профессор Джеймс Д. Форбс (1809—1868), который в течение многих лет был его наставником, представил в Эдинбургское Королевское общество одну из первых математических работ Максвелла 1846 г., касающуюся описания некоторых кривых. С 1847 по 1850 г. он учился в местном университете. В 1849 г. его профессор по математике Келланд представил в Эдинбургское Королевское общество еще одну его работу по кривым, а в 1850 г. работу по равновесию упругих тел. В эти же годы Максвелл интересовался цветным зрением. Он в 1850 г. поступил в Кембриджский университет и в 1855 г. получил ученую степень. Здесь он стал членом престижного Клуба Апостолов и в нескольких выступлениях показал свою глубокую заинтересованность в этико-философских, религиозных, логических и методологических вопросах. При подготовке к экзаменам на степень он стал интересоваться электричеством и магнетизмом. В то же время он изучил рыбий глаз и, получив математическое описание его свойств, показал условия совершенного фокусирования. Спустя примерно полвека, Р. К. Люнебург заново открыл это, рассматривая линзы, обладающие свойствами, указанными Максвеллом. После получения степени для Максвелла в Кембридже не нашлось места, и он возвратился в Шотландию. С 1856 по 1860 г. он был профессором натуральной философии в Маришаль колледже Абердина. Эта должность хоть и не давала большого дохода, зато летние каникулы предоставляли массу свободного времени. Максвелл мог проводить шесть месяцев в своем имении Глейнэйра. В это же время он женился. Один из его студентов в Абердине, Давид Гилл (1843—1914), который позднее стал пионером применения фотографии в астрономии и Королевским Астрономом, так описывает уроки Максвелла: «В те дни профессор был немногим лучше школьного учителя, а Максвелл не был хорошим учителем. Лишь четверо или пятеро из нас в классе с семьюдесятью или с восьмьюдесятью учениками получали от него знания. Мы оставались с ним на пару часов после лекций, до тех пор, пока его ужасная жена не утаскивала его на скудный обед в 3 часа дня. Сам он был симпатичным и очаровательным — часто задумывающимся и внезапно пробуждающимся чтобы сказать, о чем он размышлял. Многого мы не могли понять в то время, но впоследствии вспоминали и осознавали». Исследования стабильности колец Сатурна позволили ему в 1857 г. выиграть приз и утвердили его как одного из лучших математических физиков своего времени. Проанализировав эту проблему, он получил вывод, что кольца образованы многими частицами, что в настоящее время подтверждается более точными астрономическими наблюдениями. С 1860 г. до 1865 г. он работал в Королевском колледже в Лондоне, где тщательно разрабатывал свои принципиальные работы, там же он встретился и часто общался с Майклом Фарадеем (1791—1867), отцом учения об электричестве, к которому относился с восхищением и от которого он многому научился в области электричества и магнетизма.

В 1865 г. почувствовав усталость, он на шесть лет уединился в своем доме в Гленлэре. Покидал он его только для коротких путешествий, одно из которых было в Италию в 1867 г. В Гленлэре, он закончил свою кинетическую теорию газов и написал свой знаменитый труд *Treatise on Electricity and Magnetism*, который содержит полностью разработанную теорию электромагнитного поля. В отношении уравнений, которые являются квинтэссенцией всей его работы, Эйнштейн сказал:

«Специальная теория относительности обязана своим происхождением уравнениям Максвелла электромагнитного поля», а Больцман вопрошал: «Разве это не Бог, кто написал эти символы?»

В 1871 г. Максвелл занял кафедру экспериментальной физики в Кембридже и стал директором Кэвендишской лаборатории. Эта лаборатория была организована, в октябре 1870 г., когда герцог Девонширский, декан Кембриджского университета, решил поддержать строительство физической лаборатории и обеспечить ее оборудованием. Лаборатория была названа именем одного из родственников герцога, Генри Кэвендиша (1731—1810), который посвятил свою жизнь химии и экспериментальной физике, особенно интересуясь электричеством. Максвелл, активно работая по организации лаборатории, находил время для своего труда, который он опубликовал двумя годами позднее (1873). Он умер в Кембридже 5 ноября 1879 г.

Благодаря ему, мы обладаем фундаментальными основами теории электромагнетизма, а также термодинамики и кинетической теории газов, в которой он является одним из основателей наряду с Людвигом Больцманом (1844—1906) и Джошуа Виллардом Гиббсом (1839—1903). Кинетическая теория рассматривает газ, состоящим из огромного числа атомов или молекул, которые свободно движутся в пространстве, соударяясь друг с другом и со стенками сосуда. С помощью этой модели теория позволяет нам интерпретировать макроскопические свойства газов. Джон Херапат (1790-1868) первым установил связь между температурой газа и скоростью его молекул, хотя соотношение, которое он нашел, было ошибочным. Это также исследовалось англичанином Джеймсом П. Джоулем (1818—1889) и немцами Рудольфом Клаузиусом (1822—1888) и Людвигом Больцманом. Максвелл вывел из теории конкретные свойства газов, установив закон распределения скоростей молекул, рассматривая молекулы как маленькие бильярдные шары. Он получил выражения для давления, вязкости, диффузии и др. Он вывел теорему равномерного распределения энергии, о которой мы будем говорить в дальнейшем. Максвелл рассматривал два возможных способа описания газа. Один основан на законах динамики и описывает детерминистическое поведение индивидуальных составляющих газа. Это дает полное описание системы. Другой метод является статистическим по природе и не принимает во внимание знание поведения индивидуальной молекулы, а имеет дело с огромным числом молекул. Система рассматривается, используя законы статистики. Это позволяет получить величины, которые описывают глобальные свойства газа, такие, как давление, температура и др.

Максвелл также интересовался теорией цветов, он развил и дополнил теорию физика и врача Томаса Юнга, который утверждал, что цветовое зрение получается комбинацией трех изображений в основных цветах, для которых в человеческом глазу имеются три вида соответствующих рецепторов. Максвелл идентифицировал эти три первичных цвета, из которых можно получить все цвета, как красный, синий и зеленый, и указал, что случай цветовой слепоты обусловлен отсутствием в глазу одного из трех рецепторов. Он указал, что если сделать фотографию через фильтры этих цветов, а затем соединить изображения, то получится цветная фотография объекта. Он практически

продемонстрировал это собранию Королевского Общества в 1861 г., сделав фотографию закрученной в узел ткани с шотландским национальным рисунком. Эта была первая цветная фотография, полученная методом, который в существенных чертах используется и в наше время. Однако теория электромагнитного поля — наиболее важный результат, полученный Максвеллом, и это, без сомнения, одно из важнейших достижений науки, на котором основана современная наука и техника.

В середине XIX в. электромагнетизм включал огромное число экспериментальных результатов, в которые значительный вклад внес Фарадей, но ожидалась общая теория, которая могла бы эти результаты интерпретировать.

Майкл Фарадей (1791-1867) является исключительным примером новаторского исследователя. Он был сыном кузнеца и начал работать с 13 лет подмастерьем в переплетной мастерской. Здесь он читал книги по химии и электричеству и делал эксперименты с помощью самодельных устройств. В 1813 г. он познакомился с химиком Хемфри Дэви (1778—1829) и стал его ассистентом в Королевском институте. Он был очень искусным экспериментатором и открыл фундаментальные явления, которые послужили основой электромагнитной теории Максвелла. Он разработал метод визуализации силовых линий электрических и магнитных полей. В качестве ассистента Дэви он в 1813—1815 гг. путешествовал по Европе, где знакомился с работами самых выдающихся исследователей континента.

В 1821 г. он, продолжая эксперименты датского физика Г. К. Эрстеда (1777—1851), показал, что магниты оказывают механическое действие на проводники, по которым протекает электрический ток. Позже он изучал явления электролиза, выраженные в законах, носящих его имя. В 1830—1831 гг. он открыл явление электромагнитной индукции. Среди его последующих открытий — действие магнитного поля на поляризованный свет (эффект Фарадея) и диамагнетизм. В 1862 г. он пытался изучить действие магнитного поля на спектры света, пионерские исследования, которые позднее с успехом были выполнены П. Зеemanом.

Максвелл блестящим образом интерпретировал результаты Фарадея и других исследователей, показав, что явления электрических и магнитных явлений тесно связаны, и в некоторых случаях электромагнитное поле может распространяться в виде волны. Отсюда следует, что свет является волной такого вида. Электромагнитная теория Максвелла встретила сильное сопротивление. Даже сам Максвелл и его ученики долгое время старались описать электромагнитное поле с помощью механических моделей. Только после продолжительных попыток объяснить его уравнения на основе механических моделей была окончательно принята концепция, что электрические и магнитные поля являются реальностью.

Рис. 6. Синусоидальная волна, видимая в заданный момент времени, как функция положения

Волновая теория рассматривает свет как колебания эфира и замечательно объясняет отражение, преломление, дифракцию и интерференцию, а также другие явления. Свойство света восприниматься окрашенным укладывается в свойствах волны. Белый свет есть ни что иное, как смесь всех цветов (факт, который еще Ньютон экспериментально продемонстрировал). Определенный цвет определяется длиной волны излучения (рис. 6), т.е. расстоянием между двумя соседними пиками волны. В видимой области эта длина волны обычно измеряется в ангстремах (один ангстрем или  $\text{Å}$  равен  $10^{-8}$  см) и видимая область простирается от  $\sim 3800 \text{ Å}$  (фиолетовый свет) до  $7000 \text{ Å}$  (красный

свет). Число пиков волны, проходящих в секунду через заданную точку, является частотой волны и измеряется в герцах (Гц). Произведение длины волны и частоты равно скорости распространения волны. Например, зеленый свет имеет в вакууме длину волны  $5500 \text{ \AA}$ , распространяется со скоростью  $300000 \text{ км с}^{-1}$  и имеет частоту  $545\,000 \text{ млрд. Гц}$ . Излучения с большими длинами волн последовательно заполняют инфракрасные, микроволновые и радиоволны, а излучение с укороченными длинами волн являются ультрафиолетовым, рентгеновским и гамма-лучами (рис. 7).  
Рис. 7. Электромагнитный спектр. Слева обозначены частоты, а справа — соответствующие длины волны

## ГЛАВА 2

### СПЕКТРОСКОПИЯ: АКТ I

Если свет, испускаемый Солнцем или лампой накаливания, направляется на стеклянную призму, то мы увидим (так же как и Ньютон) цвета, расположенные в последовательности от фиолетового до красного. Ньютон назвал это «спектром». Это слово остается для обозначения изображения, которое получается в результате разложения любого света с помощью призмы или другой более сложной аппаратуры. Когда интенсивность постепенно изменяется от одного цвета до другого, мы говорим о «непрерывном спектре». В общем случае свет, получающийся путем электрического разряда в газе (неоновая реклама), состоит из очень ярких линий на темном фоне; в этом случае спектр обозначается как «линейчатый спектр».

В спектроскопах, инструментах, используемых в настоящее время для изучения таких спектров, свет проходит через тонкую щель, установленную на входе в инструмент, а в плоскости наблюдения каждая линия является изображением входной щели в соответствии с той монохроматической (т.е. одного цвета) компонентой исследуемого излучения. Каждая из этих линий имеет хорошо определенное положение и интенсивность, что и является характеристикой спектра. Это положение определяется длиной волны и соответственно, частотой монохроматического излучения, которое и составляет линию.

Если мы рассматриваем субстанцию свободных атомов одного и того же сорта, т.е. элементы в газовой фазе обнаруживаем, что их спектры являются, в значительной степени, линейными. Точнее говоря, эти спектры содержат линии с последовательно уменьшающимися длинами волн, причем интервал между линиями становится все меньше и меньше, и, начиная с некоторой длины волны, они сливаются в непрерывный спектр.

#### Истоки спектроскопии

Изучение состава света, испускаемого раскаленными телами, является предметом спектроскопии. Эта дисциплина родилась в XIX в. и сыграла фундаментальную роль в изучении света и строения атомов, являясь совершенной необходимостью для понимания принципов работы мазеров и лазеров. Мы можем сказать, что она возникла в 1802 г. с открытием английским физиком Вильямом Волластоном (1766—1828) присутствия темных линий в спектре солнечного света.

Волластон стал богатым человеком, когда в 1804 г. изобрел процесс получения чистой ковкой платины, пригодной для изготовления сосудов. Он также выделил два новых элемента, палладиума (в 1804 г.) и родия (в 1805 г.). Первый был назван в честь астероида Паллас, который был открыт в 1804 г., а второй — за розовый цвет его соединений. В 1807 г. Волластон запатентовал особую камеру, в которой призма отражала свет от объекта, который хотели зарисовать, на бумагу и в глаз

художника. Тем самым у художника создавалась иллюзия, что изображение уже на бумаге, и он мог просто зарисовать его, обводя контуры. Волластон был другом Томаса Юнга и был приверженцем волновой теории света. В 1802 г. он наблюдал темные линии в спектре Солнца, он не понял их важности и полагал, что они просто естественные контуры цветных линий.

Рис. 8. Солнечный спектр с темными линиями Фраунгофера. Некоторые из них снабжены буквами, использованными Фраунгофером.

Двенадцатью годами позже Джозеф Фраунгофер (1787—1826), сотрудник Бенидиктинского оптоmechanического института в Баварии, снова открыл темные линии в солнечном спектре, когда измерял дисперсионную силу разных стекол, и стал изучать эти линии. Он установил их положение в спектре, для большого числа (576, если говорить точно), и обозначил наиболее заметные из них буквами от А в крайней красной области до Н в фиолетовой (рис. 8). Эти темные линии указывают, что определенные длины волн отсутствуют в солнечном свете, достигающем Землю. В то же самое время Фраунгофер открыл, что яркая желтая линия (на самом деле две тесно расположенные линии), которая присутствует в свете всех пламен, наблюдаемых в спектроскоп, занимает то же положение, что и темная линия, которую он обозначил буквой D, в солнечном спектре.

Фраунгофер был сыном бедного стекольщика. Сперва он работал подмастерьем в гранильной мастерской, а затем рабочим на фабрике зеркал. Случилось так, что здание фабрики рухнуло, и 15-летний мальчишка оказался под обломками. Он чудом выжил, и в честь его чудесного спасения и король дал ему 18 дукатов. Для мальчика это было настоящим сокровищем, на эти деньги он купил инструменты и книги. Позднее Фраунгофер станет знаменитым оптиком.

Он хотел улучшить ахроматические линзы (линзы, свободные от эффектов дисперсии), которые изучал английский оптик Джон Доллонд (1706—1761). В 1756 г. Доллонд сложил вместе два стекла с почти противоположными силами дисперсии, с целью исключить хроматическую aberrацию.

Большой трудностью было измерить силу дисперсии разных стекол, используемых для изготовления линз. Фраунгофер, занимаясь измерениями с призмами из различных стекол, и открыл темные линии в солнечном спектре.

Его открытие явилось предшественником того, что позднее было названо «спектральным химическим анализом». Началом можно считать 1826 г., когда Вильям Тальбот (1800—1877) обнаружил точную связь между спектром свечения пламени и вещества, содержащегося в нем. Он предположил, что цвет пламени можно использовать вместо продолжительного химического анализа для установления природы горящего вещества.

К началу XIX в. века были успешно разработаны инструменты (спектроскопы), нужные для измерения структуры спектров с необходимой точностью и методы измерения длин волн. Это произошло в значительной мере благодаря работам Фраунгофера и Френеля. Таким образом, предположение Тальбота могло быть практически реализовано.

Рис. 9 показывает простейший спектроскоп, подобный тем, что все еще используются в школах. Основной частью прибора является стеклянная призма, помещенная между двумя небольшими телескопами. Один из них снабжен узкой (регулируемой) щелью, через которую исследуемый свет (пламя на рисунке) попадает на призму. Второй телескоп собирает разложенный свет. Используется еще и третий телескоп, который является просто трубкой, на конце которой располагается штрихи шкалы, подсвечиваемой извне. Штрихи шкалы проектируются на спектр, что позволяет определять

положение линий.

Рис. 9. Старинная модель спектроскопа с бунзеновской горелкой

Решающий, заключительный шаг, в отношении спектрального химического анализа приписывается ученым из Гейдельбергского университета химику Роберту Бунзену (1811—1899) и физику Густаву Кирхгофу (1824—1887), которые вместе работали над этой проблемой в 1860—1861 гг. Они построили стандартный прибор для анализа спектров элементов, входящих в состав солей, которые вносились в пламя (использовалась горелка Бунзена — газовая горелка, в которой сжигалось исследуемое вещество). Они открыли, что яркие линии спектра раскаленных солей металлов являются характерными для определенного металла. Первым практическим доказательством огромных возможностей спектрального анализа для изучения химического состава веществ было открытие новых элементов: цезия и рубидия. Используя эту экспериментальную методику, Кирхгоф идентифицировал многие темные линии Фраунгофера. Например, D-линия принадлежит натрию (рис. 10). Давид Брюстер (1781—1868) в 1832 г. уже объяснял происхождение темных линий солнечного спектра тем, что свет, испускаемый горячей поверхностью Солнца, прежде, чем достигнуть Земли, проходит через внешнюю более холодную атмосферу Солнца, компоненты которой поглощают практически на тех же длинах волн, которые испускаются при более высокой температуре. Таким образом, темная линия появляется там, где должна была бы быть яркая линия, если бы не было атмосферы. Например, пары натрия (легко получаемые добавлением в пламя горелки обычной поваренной соли) испускают характерный желтый свет, образуемый двумя узкими и близкими друг к другу линиями (D -линия). Где бы ни появлялись в спектре эти линии, мы можем с уверенностью утверждать, что в источнике спектра содержится натрий. Этот мощнейший метод химического анализа позволяет обнаруживать минимальные следы вещества и не зависит от расстояния до исследуемого объекта, позволяя, например, исследовать звезды.

Длины волн излучения, которое испускается веществом, может также и поглощаться им на тех длинах волн. Если, например, мы посылаем интенсивный свет, содержащий все видимые длины волн (непрерывный спектр излучения), через пламя в котором сгорает натрий, то в пропущенном свете обнаружится отсутствие длин волн, соответствующих двум желтым линиям D-линии натрия. В спектре две темные линии появляются в тех местах, в которых наблюдаются две яркие линии в спектре излучения. Это объяснение применимо не только для нашего Солнца, но и для любой звезды. Действительно, темные линии, подобные тем, что Фраунгофер наблюдал в солнечном спектре, наблюдаются и в спектрах звезд, и положение этих линий указывает, какие длины волн поглощаются веществами в звездных атмосферах, что позволяет определить эти вещества.

Рис. 10. Обращенные линии. На верхней части показаны D-линии натрия (дублет), которые проявляются как черные линии в солнечном спектре. На нижней части показаны яркие D-линии натрия, которые получаются в лаборатории в парах пламени

Фундаментальные открытия новой науки спектроскопии были сделаны Кирхгофом, Брюстером, Дж. Гершелем (1792—1871), Тальботом, Чарльзом Уитстоном (1802—1875), А. Ангстремом (1814—1874) и Вильямом Сваном.

Тот факт, что спектры веществ иногда состоят из набора дискретных линий, а иногда представляют полосы, был, наконец, после многих дискуссий, объяснен Джорджем Сале (1875) путем сопоставления линейчатых спектров с атомами, а спектров полос — с молекулами.

## Атомы

Уже Демокрит и Лесипс в V в. до н.э. говорили об атомах. Римский поэт Лукреций (98—55 до н.э.) в *De rerum natura*, объясняя теорию Демокрита, говорил, что воздух, земля и все другие вещи мира сделаны из набора частиц или корпускул — атомов, находящихся в безостановочном и очень быстром движении, которые столь малы, что не видимы человеческим глазом. Атомы предполагались быть крайним результатом последовательного деления вещества на все меньшие части. Слово «атом» по-гречески означает «неделимый».

Однако идеи Демокрита и Лукреция далеки от нашего понимания атомов, поскольку они не рассматривали существования многих сортов атомов и того, что атомы определенного вещества одинаковы.

Выраженная смутным и неконкретным образом атомистическая теория Демокрита теряла свое значение, и слово «атом» стало употребляться для обозначения объекта крайне малого размера. Лукреций имел успех совсем в другой области, высказав гипотезу, что заразные болезни распространяются очень малыми частицами. В эпоху Возрождения итальянский философ и врач Джироламо Фракасторо (1483—1553) возродил эту теорию. Однако эта идея бактериологии оставалась секретом, пока Луи Пастер (1822—1895) вновь не обратился к ней.

Во всяком случае, атомистическая гипотеза Демокрита и Лесипса была принята священником Гассенди (1592—1655), который активно провозглашал, что даже если эта гипотеза находит подтверждение у «развратных» Эпикура и Лукреция, но она не имеет прямой связи с религиозными философиями их античных последователей — и может быть принята христианами. Идеи Гассенди оказали глубокое влияние на химика Роберта Бойля, которому мы обязаны обозначениями химических элементов. Эти обозначения стали более точными, когда А.-Л. Лавуазье (1743—1794) открыл, что определенные химические соединения содержат элементы в определенных пропорциях и что масса веществ остается постоянной до и после протекания химической реакции. Эти исследования получили завершение в работе Джона Дальтона (1766—1844), который изложил их в своей книге *A New System of Chemical Philosophy* (опубликованной в Манчестере в 1808 г.) концепцию, что существует много сортов атомов, каждый из которых характеризует разные вещества и что атомы в определенном веществе идентичны. Дальтон доказал, что каждому химическому элементу можно приписать число, которое представляет вес одного атома данного элемента.

## Атомный вес

В настоящее время атомный или молекулярный вес измеряется сравнением веса атома данного вещества с атомом водорода. Вес атома водорода удобно считать приблизительно одной единицей атомной массы (вес одной атомной массы  $1,66 \cdot 10^{-24}$  г), так, вес атома углерода 12. Атомный вес кислорода почти 16 (точно 15,9994) и поскольку молекула кислорода состоит из двух атомов, один моль молекулы кислорода весит около 32 г. Из определения моля следует, что моль всегда содержит одно и то же число атомов и молекул (так, называемое число Авагадро  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ ).

Однако существование атомов все еще было спорным, поскольку никто не мог сказать, что видел их, и в ходу были различные идеи. В 1860 г. на Химическом конгрессе в Карлсруе, первом международном собрании, участники продолжительно обсуждали различия между атомами и молекулами и не пришли к определенному заключению. Сегодня мы определяем молекулу как

химическую комбинацию двух или более идентичных или различных атомов, которая может стабильно существовать и которая представляет наименьшее количество вещества и обладает характеристическими свойствами данного вещества.

Электрон появляется

В то время, как развивались атомные и молекулярные теории в химии, в исследованиях в области электрической проводимости в жидкостях и электрических разрядов в газах при низком давлении обнаружилось, что атом вовсе не «неделимый», но содержит в себе электрические заряды. Г. Дж. Стони (1826—1911) в 1874 г., пытаясь простым способом объяснить законы электролиза, установленные Фарадеем в 1833 г., ввел «атом» электричества, который он позднее (1891 г.) назвал «электроном». До этого Г. Гельмгольц (1821 — 1894) говорил: «Если мы принимаем гипотезу, что элементарные субстанции состоят из атомов, мы не можем избежать заключения, что электричество также, положительное и отрицательное, разделяется на элементарные порции, которые ведут себя подобно атомам электричества».

Таким образом, умозраительный электрон допускался только как свойство, относящееся к электрическому разряду. Однако английский физик Дж. Дж. Томсон (1856—1940) открыл в 1897 г., что в электрических разрядах в газах присутствуют очень маленькие частицы с отрицательным зарядом, которые испускаются атомами. Томсон измерил их удельный заряд ( $e/m$ ), т.е. отношение заряда к массе. Поскольку атом сам по себе нейтрален, открытие электрона — за это Томсон в 1906 г. получил Нобелевскую премию по физике — означает, что атом должен включать в себя как отрицательные заряды (электроны), так и положительные заряды.

Нобелевская премия

Поскольку многие из упоминаемых здесь исследователей были удостоены этой престижной премии, уместно несколько отвлечься, и сообщить, как она возникла и как присуждается.

10 декабря 1896 г. шведский химик Альфред Нобель скончался в возрасте 63 лет, в своем доме в Сан-Ремо. Он сделал возможным практическое применение нитроглицерина, создав динамит.

Нитроглицерин был синтезирован в 1846 г. А. Собrero (1812—1888), а Альфред Нобель применил для его стабилизации некоторые инертные вещества. В результате в 1875 г. был получен первый динамит, представляющий собой желатинообразную смесь нитроглицерина с клетчаткой. В 1889 г., смешивая в различных пропорциях коллоидную клетчатку с нитроглицерином, он сумел создать баллистит, который до сих пор используется, как бездымное взрывчатое вещество. Изготавливался динамит на фабрике вблизи г. Турина (Италия). Благодаря своим патентам, а также эксплуатации нефтяных месторождений в Баку, Нобель стал обладателем огромного состояния, исчислявшимся на современные деньги в несколько сотен миллионов евро. Это состояние, желая сгладить возможное разрушительное использование людьми его изобретений, он завещал использовать как фонд для премий. Уместно процитировать отрывок из его завещания:

«Все, что останется от моего состояния должно быть распределено следующим образом: капитал, сохраняемый моими душеприказчиками, должен составлять фонд, цель которого — быть распределяемым в виде ежегодных премий, которые присуждаются тем, кто в предыдущий год принес великую пользу человечеству. Выше упомянутый капитал следует распределить пятью равными частями следующим образом: одна часть тому, кто сделал наиболее важное открытие или изобретение в области физики, одна часть тому, кто сделал наиболее важное открытие или

улучшение в химии, одна часть тому, кто сделал наиболее важное открытие в области физиологии и медицины, одна часть тому, кто проявил себя выдающимся образом в литературе, одна часть тому, кто наилучшим образом способствовал установлению братства между народами, отмене или сокращению армий, и проведением конгрессов мира. Премии по физике и химии должны быть присуждаемы Шведской академией наук; премии по работам в области медицины и физиологии — Каролинским институтом в Стокгольме; по литературе — Академией в Стокгольме, а для поборников мира — комитетом пяти членов, выбираемых Норвежским Стортингом. Я желаю, чтобы присуждение этих премий не связывалось с национальностью кандидатов, но чтобы эти премии присуждались наиболее достойным, независимо от того скандинавы они или нет».

Каждая премия составляет в наше время около 50 000 евро, и она, безусловно, самая высокая. Правила отбора победителей примерно сходные в разных областях. В случае физики ученая группа, образованная из нобелевских лауреатов, и других хорошо известных персон, членов Шведской академии наук, профессоров шведских университетов, а также университетов Копенгагена, Хельсинки, Осло, и еще других шести университетов, причем состав группы меняется ежегодно, делает предложения. Эти предложения оцениваются комитетом из пяти членов, формируемым президентом Нобелевского Института по физике, и четырьмя членами, избираемыми физическим отделением Академии. Предложения этих комитетов в конечном счете, рассматриваются собранием Академии. Члены Академии получают памятную золотую медаль всякий раз, когда они собираются для голосования, кроме того, все члены комитетов щедро награждаются. Никаких протоколов заседания не ведется и участникам запрещено разглашать обсуждения. Окончательное решение должно выноситься до 15 ноября. Премии вручаются в Стокгольме и Осло (для премии мира), на официальной церемонии 10 декабря, в годовщину смерти основателя. Лауреат читает публичную лекцию и получает награду из рук короля Швеции.

Согласно желанию Альфреда Нобеля премия должна предназначаться человеку, который своим открытием или изобретением принес пользу человечеству. Вначале это создало определенные трудности предоставления премии за теоретические исследования. Первым лауреатом по физике был в 1901 г. Вильгельм Конрад Рентген (1845—1923) «за особые заслуги, которые он оказал открытием замечательных лучей, впоследствии названных его именем».

#### Формула Бальмера

Гипотеза Сале, что спектры являются характерными для атомов и молекул, была полностью подтверждена электромагнитной теорией Максвелла, согласно которой колеблющиеся электрические заряды испускают излучение. Начались исследования с целью выяснить, существует ли соотношение между спектральными линиями одного и того же вещества или между линиями разных веществ.

Рис. 11. Спектр атома водорода. На верхнем спектре показаны линии Бальмера в видимой области; нижний спектр — увеличенная область конца правой части спектра с линиями Бальмера в ультрафиолете

25 июня 1884 г. швейцарец Иоганн Якоб Бальмер (1825-1898) представил Научному Сообществу Базеля работу на эту тему. Бальмер, шестидесятилетний преподаватель женской школы, особый интерес уделял числами. Он создал реконструкцию Иерусалимского храма на основании измерений, сделанных исходя из данных видения библейского персонажа Иезекииля. Его интересовало число

ступеней великих пирамид и т.д. Однажды, беседуя с приятелем, он пожаловался, что ему нечего делать, на что приятель ответил: «Ну, раз ты так интересуешься числами, то почему бы тебе не заняться числами, которые получаются из спектра простейшего элемента, водорода? Он дал ему длины волн трех линий, известных в то время в видимой области спектра. Занимаясь этой проблемой, Бальмер установил, что последовательность этих трех линий можно выразить аналитически

$$\lambda = 3,36 \cdot 10^{-5} n / (n^2 - 4)$$

где  $\lambda$  — длина волны, см;  $n$  — целое число, принимающее значения 3, 4 и 5. Соответственно, эту формулу можно записать, используя волновые числа  $\nu_0$ , т.е. величиной обратной длине волны и представляющее число волн, которые укладываются в сантиметре. Это волновое число, умноженное на скорость света, обозначаемое буквой  $c$ , дает частоту  $f$  или число колебаний в секунду. При использовании волнового числа формулу Бальмера можно записать как

$$\nu_0 = 1/\lambda = 109678 \cdot (1/4 - 1/n^2),$$

где  $\lambda$  — по-прежнему длина волны, см, а число 109 678, которое позднее было обозначено буквой  $R$ , получило название «константы Ридберга». Эта формула дает волновые числа и длины волн не только для трех известных в то время линий, но и для новых, открытых позднее линий (рис. 11).

Во время затмения Солнца в 1898 г. были измерены 29 линий серии Бальмера: значения всех их получались этой формулой при изменении  $n$  от 3 до 31.

Ридберг и комбинационный принцип

В 1886 г. Александ С. Гершель, сын великого астронома Джона Гершеля, и Генри Десландрес (1853—1948) нашли математические описания различных полосатых спектров. Более того, шведский физик теоретик Иоганн Роберт Ридберг (1854—1919) опубликовал результаты анализа спектров, который он провел в 1890 году. Этот анализ показал, что спектральные серии Бальмера, а также другие серии линий водорода в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра можно представить общим выражением, которое сегодня носит его имя.

Ридберг интересовался вопросами спектров и начал свои исследования задолго до того, как Бальмер опубликовал свою формулу. Он также интересовался периодической классификацией элементов, которую дал русский химик Дмитрий Менделеев (1834—1907). Менделеев установил, что единственный метод классификации элементов заключается в рассмотрении их атомных весов.

Когда элементы располагаются в порядке увеличения атомных весов, обнаруживается явная периодичность их свойств. Таким образом, в рядах увеличивающихся атомных весов получаются колонки химических элементов со сходными свойствами (таблица Менделеева). Интуиция Ридберга привела его к осознанию, что эта периодичность является результатом атомной структуры.

В период между 1882 г. и 1887 г., когда он был ассистентом физического факультета университета Лунда, Ридберг изучал зависимость физических и химических свойств элементов от их атомных весов, рассматривая атомный вес как принципиальный параметр, от которого зависят эти свойства. Он начал с изучения соотношений, имеющих место среди спектральных линий элементов. Проблема, которую он хотел решить, требовала систематического изучения имеющегося спектроскопического материала, для того, чтобы получить полуэмпирическую формулу, которая универсально моделировала бы эти данные.

История науки показывает, что любая область физики проходит фазу, в которой накопленный

эмпирический материал обуславливает активность «предварительной обработки», в результате которой возникают общие законы, даже если изучаемое явление не имеет теоретической основы. Примерами являются законы Кеплера небесной механики и закон Бойля—Мариотта для газов. Такие «предварительные» теоретические модели выполняют двойную функцию. Во-первых, они дают определенную обобщенную основу для систематизации экспериментальных данных, играя роль эмпирических законов. Во-вторых, они играют важную роль в создании более фундаментальных теорий, являясь конструктивным посредником между теоретическими знаниями и эмпиризмом. Так, например, Максвелл в процессе построения теории электромагнетизма не рассматривал непосредственно экспериментальные данные, но использовал теоретические знания предыдущего уровня (закон Био—Савара, который определяет магнитное поле проводника с током, закон индукции Фарадея и др.) в качестве отобранного «эмпирического» материала.

Если мы с этой точки зрения рассмотрим положение, достигнутое в спектроскопии в 1880-х гг. мы увидим, что поиски законов, определяющихся спектральными линиями, были важнейшей проблемой того времени. В таких случаях ситуация приводит к результатам, что часто случается в развитии науки. Различные исследователи пытаются независимо решить одну и ту же проблему и находят одновременно одинаковые решения. Так и было в этом случае. Независимо от Ридберга, в 1890 г. два хорошо известных спектроскописта, Генрих Кайзер (1853—1940) и Карл Рунге (1856—1927), старались установить общие математические уравнения законов спектроскопии и предложили решения, которые горячо обсуждались, пока не стал превалирующим взгляд Ридберга, который и получил всеобщее признание к концу века.

Согласно Ридбергу, аналитическое выражение для спектров должно быть функцией целых чисел. Он стремился узнать, каков должен быть вид этой функции, и нашел одну, в которой обратные волновые числа зависели от обратных квадратов целых чисел. Когда Бальмер опубликовал свою формулу для атома водорода, оказалось, что она соответствует частному случаю выражения Ридберга.

С другой стороны, Кайзер и Рунге искали алгебраическое выражение, которое могло бы предсказать с высокой точностью обратные волновые числа в сериях, и нашли одно, в котором использовались обратные квадраты целых чисел и обратные четвертые степени целого числа. Хотя они и признавали, что Ридберг прав, утверждая, что их выражение просто одно из многих, которые можно выписать, они возражали, что их выражение наиболее точное. Тот факт, что Ридберг утверждал, что его соотношение имеет универсальную значимость для всех атомов, их не интересовал.

Ридберговское представление давало обратную величину длины волны атомного спектра в конкретных сериях в виде разницы между двумя «спектральными термами» (как их позднее стали называть). Каждый из них представляет универсальную константу (позднее названную «константой Ридберга»), деленную на квадрат суммы целого числа и константы, типичной для каждой серии. В этой формулировке был уже представлен «комбинационный принцип», позднее выраженный шведским ученым Вальтером Ритцем (1878-1909).

В то время предполагалось, что световые колебания, представляемые линиями спектра, производятся все вместе в атоме. В конце концов, в 1907 г. Артур Вильям Конвей (1875—1950), профессор математической физики в Дублине, дал правильное объяснение, согласно которому атом производит спектральные линии по одной во времени, так что получение полного спектра происходит от большого числа атомов. Согласно Конвею, испускание спектральной линии атомом должно

происходить в ненормальном или возмущенном состоянии. Ситуация, при которой одиночный электрон в атоме стимулируется для получения колебаний с частотой, соответствующей спектральной линии, не продолжается бесконечно, но лишь то время, которое нужно электрону, чтобы испустить цуг колебаний.

Эти идеи были заново высказаны в 1910 г. П. В. Беваном (1875—1913), который также пришел к заключению, что спектральные явления следует объяснять участием большого числа атомов. Они в определенный момент времени находятся в разных состояниях, и каждый из атомов ответственен не за весь спектр, только за одну линию в нем.

«Комбинационный принцип», сформулированный В. Ритцем в 1908 г., был выведен из большого спектроскопического материала. Согласно ему, частоту каждой спектральной линии можно получить как разность между двумя термами — т.н. «спектральных термов», каждый из которых зависит от некоторого целого числа. С помощью этого принципа все линии в сериях можно было классифицировать систематическим образом.

Регулярности, открытые Бальмером в видимом спектре водорода, были обнаружены и в других областях спектра. Теодор Лайман (1874—1954), исследуя излучение водорода в ультрафиолетовой области, нашел в 1906 г., что серии линий, испускаемых в этой области, могут быть представлены формулой, подобной формуле Бальмера. Фридрих Пашен (1865-1947) получил в 1908 г. подобные результаты в инфракрасной области спектра. Позднее эти результаты были подтверждены и дополнены в 1922 г. американским астрономом Фрэнком П. Брэкеттом (1865—1953) и в 1924 г. Августом Г. Пфундом (1879-1948).

Все частоты  $f$  различных серий можно выразить универсальной формулой:

$$c/\lambda = f = \text{const} (1/m^2 - 1/n^2)$$

где  $c$  — скорость света в вакууме;  $n$  и  $m$  — два целых числа, которые удовлетворяют следующим условиям:

$m = 1, n = 2,3,4, \dots$  серия Лаймана в УФ;

$m = 2, n = 3,4,5, \dots$  серия Бальмера в видимой области;

$m = 3, n = 4,5,6, \dots$  серия Пашена в ИК;

$m = 4, n = 5,6,7, \dots$  серия Брэкетта в ИК;

$m = 5, n = 6,7,8, \dots$  серия Пфунда в ИК.

Влияние магнитного поля на спектральные линии

В то время, когда были объяснены главные черты спектральных линий. В 1896 г. Питер Зеeman (1865—1943) живший в Лейдене (Голландия) открыл, что магнитное поле способно воздействовать на частоты спектральных линий, испускаемых газом, помещенным в это поле.

Зеeman проводил в Лейденском университете в 1893 г. исследования по изучению эффекта Керра, которые были предметом его докторской диссертации. Этот эффект касается действия магнитного поля на поляризацию света. В 1896 г., обсуждая свой первый эксперимент в работе, опубликованной в трудах Королевской академии в Амстердаме, он указывал, что его открытие было отталкивалось от результатов Фарадея, в 1854 г., открывшего влияние магнитного поля на плоскость поляризации линейно поляризованного света (этот эффект Фарадея сходен с эффектом Керра). Уже в то время Фарадей осознал, что свет и магнитное поле тесно связаны. Максвелл говорил, что Фарадей посвящал свои последние эксперименты изучению влияния магнитного поля на свет, испускаемый

источником, помещенным в магнитное поле, но ничего не сообщил о результатах. Позднее другие исследователи пытались повторить этот эксперимент, но безуспешно.

Зеeman был очень дотошным экспериментатором и полагал, что Фарадей не пришел к определенным результатам, потому что эффект был очень слабым. Поэтому он тщательно спланировал эксперимент и в 1896 г. получил положительный результат. Как это уже делалось Фарадеем, Зеeman поместил пламя бунзеновской горелки с хлористым натрием в поле электромагнита и изучал спектр с помощью дифракционной решетки высокого разрешения. Он наблюдал D-линию натрия (которая на самом деле — дублет тесно расположенных линий) и увидел, что когда электромагнит включался, линия уширялась. Первоначально он думал, что это эффект влияния магнитного поля на температуру и плотность паров в пламени. Но последующие эксперименты показали влияние магнитного поля на D-линию натрия.

Используя улучшенное спектральное разрешение, он позднее установил, что эффект заключается в разделении линии испускания цинка или кадмия на две или три линии, в зависимости от направления наблюдения по отношению к ориентации магнитного поля (рис. 12).

Рис. 12. Примеры аномального (для цинка) и аномального (для дублета натрия) эффекта Зеemана  
Как раз перед этим открытием Г.А. Лоренц (1853—1928) начал создавать теорию свойств электронов, которая позднее была опубликована в его знаменитой книге «Теория электронов» (Лейпциг, 1909). Он сразу же объяснил этот эффект, рассматривая электроны, связанные в атомах квазиупругим образом.

Лоренц также работал в Лейденском университете, где он получил докторскую степень в 1875 г. В возрасте двадцати четырех лет, в 1877 г., он был назначен заведующим кафедрой теоретической физики в Голландии.

Лоренц имел обширные интересы в физике и математике, но его наиболее значительным достижением было развитие электромагнитной теории Максвелла до этапа, где стала очевидной необходимость радикального изменения основ физики, что инспирировало теорию относительности Эйнштейна. Он объяснил отрицательный результат 1887 г. опыта Альберта А. Майкельсона (1852—1931) и Эдварда В. Морли (1838—1923). В этом эксперименте пытались «увидеть», не распространяется ли свет с разной скоростью в направлениях по движению Земли в пространстве и перпендикулярном ему. Лоренц предположил, что материальные тела сокращаются в размере по направлению своего движения. В 1904 г. он формализовал эту гипотезу, известную как «лоренцовское сокращение», дав математическую форму этого преобразования. Эти преобразования Лоренца сыграли очень важную роль в теории Эйнштейна, которая теоретически укрепила их основу.

В серии работ, опубликованных в период 1892—1904 гг., Лоренц построил «электронную» теорию, которая позволила ему объяснить ряд явлений. Он использовал свою теорию для объяснения эффекта, открытого Зеemanом, и оба эти исследователя разделили Нобелевскую премию в 1902 г. за открытие и объяснение этого важного эффекта.

Согласно теории Лоренца, свет испускается атомными заряженными частицами (электронами), на движение которых влияет магнитное поле согласно законам классического электромагнетизма. Из изменения частоты, получаемого из-за магнитного поля, Лоренц и Зеeman смогли определить отношение между зарядом и массой частицы, которая испускает свет, а также знак и значение заряда.

Первоначально они допустили ошибку в расчетах и сочли, что знак положителен, но затем исправили расчет и получили отрицательный знак. В это же время в Кембридже Дж. Дж. Томсон в экспериментах 1897 года, измерил отношение между зарядом и массой свободного электрона, а позднее, в 1899 г., измерил знак заряда. Полученные данные были идентичны тем, что были найдены Зеemanом и Лоренцем и доказывали, что электроны независимо от их происхождения являются идентичными.

Не следует недооценивать важность эффекта Лоренца в теории строения атома. Успех, достигнутый теорией Лоренца эффекта Зеemана, показал, что частицы с одним и тем же отношением заряд/масса, что и электрон, присутствуют в атоме и ответственны за испускание спектральных линий. Это было прямым доказательством, что испускание света производится электронами.

После этих первых экспериментов ряд других физиков, Престон, Рунге и Пашен, и Ланде, изучили магнитное расщепление спектральных линий. Принципиальным результатом этих исследований было то, что многие линии, среди которых и D-дублет натрия, расщепляются не на три линии, как предсказывала теория Лоренца, а на большее число компонент (см. рис. 12). Этот эффект был назван «аномальным эффектом Зеemана» и получил объяснение только в 1925 г., когда Уленбек и Гоудсмит ввели «спин электрона».

Первая модель атома

В заключение, мы можем сказать, что в первые годы XX в. был дан первый, может быть не полный, ответ на вопрос как излучается свет, а атомы с их электрическими зарядами были сочтены ответственными за это. Однако, как устроены атомы и, соответственно, каковы процессы испускания света, никто не знал.

Одна из проблем касалась числа электронов в атоме. Первые модели атома предполагали, что это число велико. Эта гипотеза поддерживалась спектроскопическими наблюдениями. Поскольку предполагалось, что спектральные линии производятся колебаниями электронов, а наблюдались тысячи линий, то полагали, что они испускаются тысячами электронов.

Томсон, который благодаря открытию электрона считался признанным авторитетом, выдвинул в 1903—1904 гг. свою модель атома. В соответствие с ней, атом представляет однородно заряженную сферу с положительным зарядом, в которой помещаются электроны, подобно изюминкам в пудинге. Положительный заряд и отрицательная сумма всех электронов равны по абсолютной величине. Электроны притягиваются к центру сферы и отталкиваются друг от друга, согласно закону Кулона электрического взаимодействия. Нормальное состояние атома получается, когда система этих противоположных сил уравновешена. Если атом подвергается возмущению (или, как говорят физики, «возбуждается») при столкновении с другим атомом или при прохождении электрона, его внутренние электроны начинают колебаться вокруг положения равновесия и излучается свет на тех частотах, которые измеряются спектроскопически. По физическим законам можно рассчитать эти частоты. Томсон и его ученики сделали сложные вычисления, чтобы найти такие конфигурации, которые дали бы правильные частоты. Эти вычисления не привели к успеху. Как мы увидим, эта модель совершенно неверная.

## ГЛАВА 3

### ИЗЛУЧЕНИЕ ЧЕРНОГО ТЕЛА

Как мы видели, к концу XIX в. ученые пришли к убеждению, что свет является электромагнитной

волной. Однако в то же самое время, когда волновая теория получала все большую поддержку, были открыты новые явления, которые противоречили ей. Среди этих явлений было изучение того, как физическое тело поглощает или испускает тепло. Ожидалось, что эта проблема получит простое и немедленное решение. Однако этого не получилось, и когда в конце концов решение было найдено, оно нанесло первый удар по волновой теории света.

### Излучение и температура

Если мы трогаем тело рукой, мы ощущаем тепло, если оно имеет высокую температуру. Такое же ощущение мы испытываем, если мы не касаемся тела, но находимся близко от него. Это получается благодаря передаче тепла через воздух. Однако, даже если мы удалим воздух, окружающий тело, передача тепла все равно имеет место.

Сейчас мы знаем, что тело передает свое тепло, т.е. свою энергию, частично в виде электромагнитных волн. Волны, которые переносят наибольшую часть этой энергии и которые ответственны за ощущение тепла, обозначаются как «инфракрасное излучение». Длины этих волн простираются почти по всей области между миллиметром и тысячной долей миллиметра (микрон), и они невидимы глазом. Однако энергия, передаваемая видимым излучением от Солнца через миллионы километров, также может преобразовываться в тепло. Это хорошо известно всем, кто загорает летом.

Фридрих Вильгельм Гершель (1738—1822), родившийся в Ганновере, а затем натурализовавшийся в Англии, на заре XIX в. продемонстрировал эффект нагрева, т.е. увеличение температуры тела, инфракрасным излучением. Экспериментальная регистрация инфракрасного излучения была существенно улучшена в 1881 г., когда С.П. Лангли (1834—1906) изобрел т.н. «болومتر». Этот инструмент, состоящий из платиновой проволоки, покрытой черным слоем сажи, способен измерять температуру благодаря изменению электрического сопротивления проволоки.

Итак, мы можем сказать, что горячее тело испускает энергию в окружающее пространство частично в виде излучения. При увеличении температуры увеличивается испускаемая энергия, а длина волны излучения уменьшается от инфракрасной области до видимой. При температуре около тысячи градусов тело представляется красным; при дальнейшем увеличении температуры интенсивный цвет последовательно изменяется от красного к оранжевому и далее к голубому.

Точное соотношение между цветом тела и его температурой было установлено в XIX в. с помощью серии измерений и вычислений, первоначально основанных на термодинамике. Термодинамика — часть физики, имеющая дело с соотношением между работой и теплом, испускаемым или поглощаемым телами. В ее основе два фундаментальных принципа. Один утверждает, что невозможно построить машину, которая непрерывно (т.е. циклично) совершает только работу, т.е. устанавливается принцип сохранения энергии, и невозможность создания вечного двигателя первого рода.

Другой утверждает, что невозможно иметь машину, которая забирает тепло от источника с постоянной температурой и превращает его в работу (т.е. невозможность создания вечного двигателя второго рода). Отметим, что все тепловые машины забирают тепло от источника с высокой температурой для совершения работы; однако они выделяют часть этого тепла при низкой температуре, например в окружающую среду, и таким образом не все тепло, но только его часть трансформируется в работу. Из этих двух принципов (первое и второе начала термодинамики)

можно получить далеко идущие заключения путем чисто логических рассуждений, строгим и безупречным способом, поскольку они не требуют какой бы то ни было особой модели явления, к которому они применимы.

В начале XIX в. целый ряд причин заставлял исследователей интересоваться вопросом, почему нагретое тело испускает излучение. Исследования двигало в том числе и желание создать эффективные источники света — в то время только начиналось освещение городов с помощью газа и электричества. Более того, изучение света, испускаемого звездами, было на тот момент единственным способом получить информацию об их природе.

Однако никто не мог вообразить, что из этой проблемы возникнет одна из наиболее глубоких и потрясающих революций в физике — революции, которая привела к «квантовой теории».

Окончательное решение было результатом усилий многих ученых в разных областях. Здесь мы ограничимся обсуждениями рассмотрений, нужных для понимания лазеров.

### Черное тело

Мы можем начать с рассмотрения некоторых результатов, полученных немецким физиком Густавом Робертом Кирхгофом.

Кирхгоф родился 12 марта 1824 г. в Кенигсберге, там же он проходил обучение в университете под руководством физика Франца Неймана (1798—1895). В 1847 г. после получения докторской степени он перебрался в Берлин, где годом позже стал приват-доцентом (звание, которое давало ему право преподавать в университете, но без жалования; студенты прямо платили небольшие суммы преподавателю за лекции). В 1850 г. он был назначен профессором в Бреслау, где он встретился с химиком Робертом Вильгельмом Бунзеном (1811 — 1899), который некоторое время спустя выдвинул его на должность профессора физики в Гейдельберге. В 1875 г. он стал заведующим кафедрой физики Университета в Берлине, где и скончался в 17 октября 1887 г. Он был номинирован в члены Итальянской Академии Линчей в 1883 г.

Кирхгоф работал почти во всех областях экспериментальной и теоретической физики, получая результаты фундаментальной важности. Кроме тех, которые мы будем здесь обсуждать, он описал законы, которые позволяют получать распределение токов в электрических цепях; дал замечательную формулировку двух принципов термодинамики, решил строгим и полным способом уравнения электромагнетизма Максвелла и постарался дать математическую формулировку принципа Гюйгенса.

В 1859 г. Кирхгоф обратился к собранию Берлинской Академии со словами:

«Несколько недель тому назад я имел честь представить Академии сообщение о некоторых наблюдениях, которые, как кажется мне, являются весьма интересными, т. к. позволяют нам сделать заключения о химическом составе солнечной атмосферы. Отталкиваясь от этих наблюдений, я теперь вывел на основе довольно простых теоретических соображений общую теорему, которую ввиду ее большой важности я осмеливаюсь представить Академии. Она касается свойств всех тел и относится к испусканию и поглощению тепла и света».

Кирхгоф не скромничал, представляя свои результаты! Он продолжил свою лекцию, показав, что тела, которые испускают излучение на некоторой длине волны, способны поглощать это же излучение, и для лучей одной и той же длины волны при одной и той же температуре отношение способности испускать излучение (технический термин «сила испускания») к способности

поглощать его (поглощаемость) является одним и тем же для всех тел и не зависит от их природы и формы,

Кроме этого общего результата, который казался ему очень важным, он подчеркнул важность проведения точных экспериментальных измерений с целью проверки его предположения и выразил надежду, что при этом не возникнут особые трудности, так как «все функции, не зависящие от природы тел, с которыми до сих пор имели дело, просты по структуре».

Он предложил для этих экспериментов использовать тело, названное им «черным телом», которое способно поглощать все излучение, падающее на него. Для этого тела поглощательная способность равна единице, а сила испускания становится идентичной универсальной функции, которую он ввел. Хотя идеальное черное тело является абстракцией, Кирхгоф дал указания для практической реализации его, если изготовить полость с отверстием, диаметр которого много меньше размеров полости. Это отверстие по существу и является черным телом. Действительно, любое излучение, попадающее в отверстие, будет полностью поглощено стенками полости. Через некоторое время внутреннее излучение достигает равновесия со стенками полости, имеющей температуру  $T$ , и в этот момент излучение (которое мало по сравнению с тем, что содержится внутри) станет выходить из отверстия, представляя собой характеристическое излучение в полости.

Немного позднее, в 1865 г., Дж. Тиндаль (1820—1893) опубликовал результаты некоторых измерений способности тела, нагретого до двух разных температур, испускать излучение. Он нагревал зачерненную платиновую проволоку, которая не была в точности черным телом. Однако, несмотря на это несовершенство, эти измерения были использованы в 1879 г. австрийским физиком Йозефом Стефаном (1835—1893) для установления эмпирического закона, согласно которому энергия, испускаемая с единицы площади поверхности нагретого тела, пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры.

#### Законы черного тела

Закон Стефана привлек внимание его ученика Людвиг Больцмана (1844—1906), который в 1884 г. вывел его, основываясь на принципах термодинамики и электромагнетизма. Он использовал соотношение между давлением излучения и вторым началом термодинамики, которое было открыто несколькими годами ранее итальянским физиком Адольфо Бартоли (1851-1896).

Людвиг Эдвард Больцман родился в Вене в ночь между Исповедальным вторником и Бренной средой. Этим фактом, что он родился как раз в момент смерти в веселом танце Исповедального вторника он, шутя, объяснял внезапные перемены своего настроения от большой радости к глубокой депрессии. Низкого роста с курчавыми волосами, он был типичным человеком, испытывающим маниакально-депрессивный психоз. Его подруга называла его «милый дорогой толстячок». После защиты докторской диссертации в Вене в 1866 г. выполненной под руководством Стефана, в которой была построена кинетическая теория газов, Больцман стал ассистентом Стефана, и по его рекомендации был назначен заведующим кафедрой математической физики в университете Граца в возрасте всего лишь 25 лет.

Во время работы над диссертацией, Стефан дал ему статьи Максвелла по электромагнетизму и английскую грамматику, рекомендуя выучить английский, чтобы прочесть работы Максвелла в оригинале. В результате Больцман написал работу по одной из проблем электромагнетизма. Во время своего пребывания в Граце он написал четыре фундаментальных работы по статистической

теории газов, введя все концепции, которые мы будем использовать в этой книге. Но наиболее важным результатом этого периода было введение уравнения, которое относится к явлениям переноса в газах (например, перенос тепла или массы, т.е. теплопроводность и диффузия и др.), используя статистическую теорию.

Независимо друг от друга, Больцман и американский физик Виллард Гиббс (1839—1903) разработали статистическую механику, науку, которая устанавливает связь между микроскопическим миром атомов и молекул и макроскопическим миром. В то время химики и физики уделяли огромное внимание проблеме «реальности» атомов и молекул. Для Больцмана они были столь же реальны, как материальные объекты, которые можно видеть и ощущать, но многие люди рассматривали их лишь как полезную концепцию, которая позволяет сделать вычисления. Среди видных оппонентов был Вильгельм Оствальд (1853—1932), автор системы, названной «энергетикой» и основанной на термодинамике. Он утверждал, что все проблемы можно решить, путем сведения физики лишь к изучению трансформации энергии. В 1895 г. Больцман, который был бескомпромиссным противником этих воззрений, организовал для Оствальда и его последователя математика Г. Хелма (1851-1923) приглашение на собрание Немецкого Научного сообщества. В своей лекции Хелм утверждал, что механические модели, а лучше и всю механику, следует исключить: законы движений, а также поведение точечных масс следует вывести на основе простых энергетических соображений. Больцман и другие атаковали его столь сильно, что Хелм просил извинений у публики. Даже Оствальда бойкотировали на этом собрании. В конце концов антиатомизм был отвергнут, и даже Оствальд изменил свои взгляды.

В 1873 г. Больцман получил кафедру математики в Вене, но в 1876 г. он вернулся в Грац, где оставался до 1890 г. В эти годы он сконцентрировался на законе излучения. В то время он был очень несчастен в личной жизни: в 1885 г. умерла его мать, а в 1890 г. первый из его пяти сыновей. Как декан университета, он сталкивался с политическими проблемами, которые возникли из-за студенческих протестов против Габсбургов. В 1890 г. он занял кафедру его любимой дисциплины теоретической физики в Мюнхене.

После смерти Стефана, в 1893 г., Больцмана пригласили вернуться в Венский университет, где он оставался до самой смерти. В течение этого времени, как указывалось, его теории газов критиковались, и он энергично боролся, отстаивая их. Тем не менее, этот период был очень продуктивным. Он написал четыре тома по механике, электродинамике и теории газов. Он также путешествовал, включая США, выступая с докладами и участвуя в конференциях. К концу его карьеры, его здоровье ухудшилось, и он все чаще впадал в депрессию. Летом 1906 г., будучи на отдыхе вблизи Триеста, он повесился в то время, когда его жена и дочь купались в море. Закон Стефана—Больцмана, связывающий температуру тела и величину энергии, которую оно способно испустить в виде волн, стал важным шагом в основании современной теории теплового излучения.

В это же время будущий лауреат Нобелевской премии Вильгельм Вин работал в Физико-техническом институте в Берлине. Этот институт был основан в 1857 г. при существенной помощи промышленника и изобретателя Вернера фон Сименса. Директором был Герман Людвиг Фердинанд Гельмгольц (1821—1894), великий немецкий физиолог и физик-теоретик. Он изобрел офтальмоскоп (1851) — прибор для исследования глаза. Как физик-теоретик он внес важный вклад в

термодинамику, введя понятие свободной энергии (энергия, способная совершать работу), и своим участием в открытии принципа сохранения энергии.

Вильгельм Вин родился 13 января 1864 г. в Восточной Пруссии. После изучения математики и физики в Гёттингене, Берлине, Гейдельберге и снова в Берлине защитил докторскую диссертацию под руководством Гельмгольца по теме, относящейся к проблемам дифракции. Затем в течение нескольких лет работал на ферме своего отца, пока в 1890 г. Гельмголец не позвал его в Физико-технический институт. Его яркая академическая карьера продолжалась в университетах Аахена, Гиссена, Вюрцбурга и Мюнхена. Он скончался в Мюнхене 30 августа 1928 г. Он был одним из немногих физиков 20 столетия, которые были специалистами как в экспериментальной, так и в теоретической физике. Его исследования в области черного тела обеспечили ему Нобелевскую премию по физике в 1911 г. «за его открытия, относящиеся к законам, управляющие излучением тепла». Он работал в области термодинамики и выполнил пионерские экспериментальные исследования по электрическому и магнитному отклонению каналовых и катодных лучей (лучи, получающиеся при электрических разрядах в газах), которые способствовали открытию электрона. Экспериментальные исследования распределения частот, излучаемых черным телом при заданной температуре, показали, что имеется максимум интенсивности на длине волны, которая изменяется при изменении температуры и становится все короче и короче по мере увеличения температуры (рис. 13). В 1893 г. Вин представил объяснение этого результата на основе термодинамики.

Рис. 13. Кривые, данные для указанных температур (в К), показывают (в произвольных единицах) интенсивность испускаемого излучения, как функцию длины волны ( $\lambda$ ), выраженной в микрометрах ( $\mu\text{м}$ ). Простой взгляд показывает, что при увеличении температуры увеличивается испускаемая интенсивность, и ее максимальное значение сдвигается в сторону более коротких длин волн. Этот закон, названный «законом смещения Вина», гласит, что произведение длины волны, на которую приходится максимум излучения, и абсолютной температуры тела является константой. Путем введения некоторых, очень общих предположений, относительно того, как тело способно испускать излучение, — гипотез, основанных на идеи русского ученого Владимира А. Михельсона (1860—1927), который в 1887 г. предложил объяснение непрерывности распределения энергии в спектрах твердых тел на основе атомных колебаний — Вин предположил, что излучение черного тела производится осцилляторами атомных размеров. Это и позволило ему сформулировать закон распределения излучения черного тела. Этот закон давал некоторые указания на зависимость интенсивности от длины волны для заданной температуры, и давал адекватное согласие со всеми экспериментальными данными, полученными к этому времени. Однако эти данные не простирались в область длин волн, длиннее нескольких микрон, из-за отсутствия хороших приемников длинноволнового излучения.

Макс Планк и закон черного тела

В то время как Физико-технический институт становился все более вовлеченным в абсолютные измерения излучения черного тела, в июне 1896 г. Вин покинул Берлин, чтобы стать профессором Высшей технической школы в Аахене. К счастью, Макс Планк, который заместил Густава Кирхгофа в качестве профессора теоретической физики в Берлинском университете, стал «теоретиком резидентом» для экспериментаторов Физико-технического института, которые работали с излучением черного тела.

Макс Эрнст Людвиг Планк родился 18 апреля 1858 г. в Киле в семье профессора права, который позднее переехал в Мюнхен, где Макс и поступил в университет. Позднее он так объяснял свой выбор: «Внешний мир является чем-то независимым от человека, чем-то абсолютным, и поиск законов, относящихся к этому абсолюту, представлялся мне как высшая цель моей жизни». Позднее он вспоминал, что когда в школе он узнал принцип сохранения энергии, «мой ум жадно и как откровение воспринял этот первый известный мне закон, который мог иметь универсальную и абсолютную значимость, независимую от действия человека». Термодинамика оставалась его любимой темой исследований, начатых в его диссертации, и его успехи в этой области привели его к назначению в 1889 г. профессором Берлинского университета как приемника Кирхгофа, который скончался незадолго до этого.

После получения значительных результатов, некоторые из которых мы вкратце позже обсудим, Планк вышел в отставку. Он был наиболее значимой личностью в немецкой науке, в нем было заинтересованно новое немецкое руководство. У Планка же было осторожное отношение нацистскому правительству, но он не протестовал публично против преследования еврейских ученых, рассматривая это как временную глупость администрации.

В 1933 г. он обсуждал это с Гитлером, видя, что расистские законы подрывают немецкую науку. Ответ был такой, что наука может подождать несколько лет.

В личной жизни Планк был очень несчастлив. Во время Первой мировой войны он потерял сына, а позднее в 1917 г. и 1919 г. умерли в детском возрасте его дочери. Во время Второй мировой войны он наблюдал крушение своей страны, его дом был разрушен бомбардировкой, а его сын Эрвин был казнен в 1945 г. по обвинению в участии покушения на Гитлера в 1944 г. Планк скончался в Гёттингене в 1947 г.

Как мы говорили, в Физико-техническом институте проводились прецизионные измерения универсальных констант и функций, в частности функции распределения черного тела, и Планк тесно сотрудничал с физиками, производящих эти измерения. Он решил заняться проблемой обоснования закона Вина, используя только соображения термодинамики и электродинамики, и в период 1897—1899 гг. опубликовал пять работ на эту тему. Основа его метода заключалась в предположении, что стенки полости можно представить как ансамбль гармонических осцилляторов, в которых заряды совершают колебательные движения (несколько ранее Герц продемонстрировал, что такие осцилляторы способны испускать электромагнитные волны), и в полости устанавливается равновесие между испускаемым и поглощенным излучением.

После критических обсуждений с Больцманом, который указал на неточности, Планк получил простое соотношение между средней энергией осциллятора Герца и распределением черного тела, основываясь на этих гипотезах. В мае 1899 г. он представил Прусской Академии свои результаты обоснования закона Вина, которые получались на основе особых термодинамических свойств осцилляторов, а именно их энтропии. Планк, как он объяснял позднее, не выводил закон Вина из независимых расчетов энтропии осцилляторов, но использовал закон Вина, чтобы получить ту энтропию, которую должны иметь осцилляторы, проверяя, что это выражение не противоречит законам термодинамики. Он поступил так, поскольку в то время казалось, что закон Вина прекрасно согласуется с имеющимися экспериментальными данными.

Закон Рэлея

К концу 1899 г. были проведены более точные измерения в области более длинных волн, которые показали, что в этой области закон Вина уже несправедлив. В июне того же года лорд Рэлей (который был при рождении Джоном Вильямом Стрэтгом (1842-1919)) опубликовал вывод закона распределения на основе лишь электромагнитных представлений. Из него следовало, что интенсивность излучения пропорциональна температуре.

Род Стрэггов вел свое начало от Джона Стрэтга (умер в 1694 г.), мельника из Эссекса, чьи потомки стали членами Парламента. Джозеф Стрэтт отличился в войне с Наполеоном и был пожалован королем Георгом III в бароны. Он отклонил переложенную ему честь стать пэром, и оставить свое место в Палате Общин. Вместо этого он попросил чтобы его жена, леди Шарлота, дочь первого герцога Лестера, стала баронессой. Название маленького городка Рэлей было выбрано в качестве титула просто из-за красивого звучания. После смерти своей матери Джон Джеймс Стрэтт (1796—1873) стал в 1836 г. вторым бароном, а его старший из шести сыновей Джо Вильям Стрэтт — третьим бароном.

Начальное образование юного Джона Вильяма Стрэтга часто прерывалось из-за болезней. После пребывания в Итоне, Хэрроу и в школе в Торквэя он в октябре 1861 г. поступил в Тринити колледж Кембриджа. В то время Кембридж вообще и Тринити колледж, в частности, были ведущими у физико-математическими учебными центрами и по праву гордились своими выпускниками: Беконом, Ньютоном и Кавендишем. В те дни студент, поступивший в колледж, слушал лекции и занимался, но его отметки и даже его будущая карьера зависели только от экзаменов по физике и математике. Вплоть до 1912 г. первый ученик назывался «Главным отличником», следующий «Вторым», и т.д. Студент, оказавшийся последним, получал прозвище «Деревянная ложка» и носил этот позор всю оставшуюся жизнь. Результаты публиковались в газетах и влияли на будущую карьеру учеников. Однако эту систему критиковали, и Вильям Томсон (1824—1907), который, в свою бытность, был «Вторым отличником», описывал эту систему как «скверную». Также Дж. Дж. Томсон и Джозеф Лармор (1857—1942) критиковали ее. В то время в Великобритании из 37 кафедр 18 занимались «отличниками».

Важность этой системы в поздней викторианской эпохе иллюстрируется историей 1881 г. о поиске кандидатуры на должность заведующего кафедрой математической физики Манчестерского университета. На нее претендовал английский физик и астроном немецкого происхождения Артур Шустер (1851 —1934). Он представил рекомендации от такого авторитета, как Кирхгоф. Но один его друг посоветовал не тратить время даром, поскольку вряд ли у него получится занять это место, если только он не заручится поддержкой от какого-нибудь «отличника», поскольку такая рекомендация в Манчестере стоит больше, чем тысячи таких, как от Кирхгофа. К счастью, Шустер знал одного «отличника» и благодаря этому получил место.

В январе 1865 г. Дж. В. Стрэтт получил ученую степень и стал «Главным отличником» по математике. Он стал известен во всей Британии как самый способный и многообещающий специалист в области математической физики.

Научный мир переживал тогда период расцвета. Когда Стрэтт еще учился в школе, всеобщее признание получили эксперименты Джоуля по сохранению энергии, Вильям Томсон (позднее лорд Кельвин) дал свою формулировку второго начала термодинамики. Максвелл применил законы вероятности к кинетической теории газов примерно в то время, когда Стрэтт поступил в

университет. А когда он его кончал, Максвелл сообщил Королевскому обществу свою работу о «Динамической теории электромагнетизма». Математик Г. Грин (1793—1841) и физик Г. Г. Стокс (1819—1903) ввели волновую теорию света на основе акустических представлений, физик Л. Фуко (1819—1868) показал экспериментально, что свет распространяется в воде медленнее, чем в воздухе. Майкл Фарадей был еще жив. Экспериментально Бунзен и Кирхгоф ввели спектральный анализ. Фотография была в стадии рождения, и были сделаны первые наблюдения электрических разрядов в газах. В то время в лабораторных условиях вакуум достигался только после четырех часов работы вручную специальных насосов, а электричество получалось от батарей или от генераторов, работающих вручную.

Первыми интересами Стрэтта были акустика и физиология слуха. В этих областях он проявил свои научные способности, о чем свидетельствует его книга «Теория звука», опубликованная в 1877 г. и все еще не утратившая своей значимости. В 1871 г. он женился на Эвелин Бальфур, сестре своего приятеля по колледжу, и поселился в семейном поместье в Терлинге (около 70 км к северо-востоку от Лондона), где организовал свою лабораторию. Здесь он начал серию экспериментальных исследований в области акустики и оптики. С детства интересуясь фотографией, он описал технику цветной фотографии (1887 г.), которая позднее в 1891 г. была реализована Г. Липпманом (1845—1921), который в 1908 г. получил Нобелевскую премию по физике за «его метод фотографического воспроизведения цветов, основанного на явлении интерференции». Изучая дифракционные решетки, Стрэтт ввел свой знаменитый критерий разрешающей силы, который сегодня известен как критерий Рэля. Проводя свои ранние эксперименты по цветному зрению, он пришел к изучению голубого цвета неба, и правильно связал это с рассеянием света молекулами воздуха и получил количественное соотношение, описывающее это.

Вплоть до второй половины XIX в. в университетах не было учебных лабораторий для обучения «практической физикой» в пределах университетских курсов. Великие экспериментаторы обучались экспериментальной технике в частных лабораториях или при помощи старших мастеров этого дела. В 1850 г. Вильям Томсон (лорд Кельвин) освободил старый винный подвал в колледже г. Глазго и устроил там студенческую лабораторию для исследований электричества. Были устроены и другие лаборатории, и в 1869 г. комитет Кембриджа рекомендовал установить специальную профессию для обучения и демонстраций экспериментальной физики. В следующем году ректор университета, седьмой герцог Девонширский (Вильям Кавендиш), поддержал организацию исследовательской лаборатории. Ею стала Кавендишская лаборатория, главой которой был Максвелл, вплоть до своей смерти в 1879 г. В декабре 1879 г. лорд Рэлей был приглашен занять эту должность, и когда он ушел в отставку и удалился в Терлинг в 1884 г., это место занял его ученик Дж. Дж. Томсон.

В 1896 г. Рэлей стал секретарем Королевского Общества, а в 1897 г. заменил Джона Тиндаля на посту Профессора Натуральной Философии в Королевском Институте и занимал этот пост до 1905 г. К этому периоду относится открытие вместе с Вильямом Рамзеем (1852—1916) из Лондонского университета газа аргона, за что в 1904 г. Рэлей получил Нобелевскую премию по физике, а Рамзей — Нобелевскую премию по химии. Годы с 1895 до 1919 были годами почета и славы. В 1899 г. Рэлей заинтересовался проблемой черного тела.

Здесь стоит более детально обсудить подходы Рэля, поскольку некоторые концепции будут нам полезны в дальнейшем.

Кинетическая теория тепла, принципиально разработанная Людвигом Больцманом, Джеймсом Клерком Максвеллом и Джошуа Виллардом Гиббсом, рассматривала тепло как результат беспорядочного движения многих атомов и молекул, из которых состоят все тела. Поскольку попытки проследить движение отдельного атома или молекул бесполезны, математическое описание тепловых процессов с необходимостью основано на статистических методах. Чтобы объяснить макроскопические характеристики, например, газа, рассматриваются усредненные величины, определяемые большим числом молекул.

Одним из фундаментальных принципов такого метода является т.н. теорема равновесности, математически выведенная Максвеллом на основе ньютоновых принципов механики. Эта теорема гласит, что «полная энергия, заключенная в системе большого числа частиц, которые обмениваются энергией за счет беспорядочных столкновений, равномерно распределена (в среднем) по всем частицам». Если, например,  $E$  — полная энергия, а  $N$  — число частиц, то усредненная энергия частицы —  $E/N$ .

Хотя принцип равновесности регулирует распределение энергии среди большого числа частиц, скорость и энергия индивидуальной частицы могут отличаться от среднего значения, статистически флуктуируя около этого значения. Это означает, что если средняя энергия имеет определенное значение, то некоторые молекулы могут иметь большие энергии, а некоторые меньшие. Эти различающиеся величины называются флуктуациями. Если мы математически представим эти флуктуации, например скорость молекул в газе, то получим кривые, которые показывают относительное число частиц, имеющих определенную скорость для каждой температуры, скорости большие или меньшие, чем среднее значение. Эти кривые, впервые выведенные Максвеллом и носящие его имя, представлены на рис. 14 для трех различных температур газа.

Рис. 14. Распределение Максвелла: число молекул с данной скоростью дается как функция скорости для трех различных значений температуры: 100, 400 и 1600 К. Так как число молекул в сосуде не изменяется, площади под этими тремя кривыми равны. Средняя скорость молекул (показана стрелками) увеличивается пропорционально квадратному корню из абсолютной температуры. Использование статистического метода для изучения теплового движения молекул очень хорошо объясняет термические свойства материальных тел, особенно в случае газов.

Идея лорда Рэля была распространить статистический метод и на тепловое излучение. При исследовании распределения интенсивности света, испускаемого на разных частотах, как функции температуры, получаются кривые, как показано на рис. 13, на котором представлены распределения для четырех разных температур. Эти кривые при сравнении с теми, которые показаны на рис. 14, обнаруживают заметное сходство: на рис. 14 увеличение температуры сдвигает максимум кривой в сторону больших скоростей, а на рис. 13 максимум сдвигается в сторону больших частот излучения. Этот факт побудил Рэля применить к тепловому излучению тот же принцип равновесности, который столь плодотворен в случае газа, т.е. предположить, что полная энергия излучения равномерно распределена среди всех возможных колебательных частот (т.н. мод). Это представляется вполне корректным с классической точки зрения. Рэлей, однако, совершил небольшую ошибку в подсчете числа мод, которую позднее в 1906 г. поправил физик, астроном и математик Джеймс Джинс (1877—1946), так что сегодня эта формула известна как закон Рэля—Джинса. На больших длинах волн эта формула очень хорошо объясняла экспериментальные

результаты. Однако она оказывалась непригодной на коротких длинах волн, давая странные результаты. Неприятность заключалась в том, что, несмотря на все сходство между газом, состоящим из отдельных молекул, и теплового излучения, состоящим из электромагнитных колебаний, имеется существенное различие. В то время как число молекул газа в замкнутом объеме всегда конечно, даже если оно весьма велико, число возможных электромагнитных колебаний (мод) в таком же замкнутом объеме всегда бесконечно.

Рис. 15. Колебания струны. На верхней части показано основное колебание, а при движении вниз — последовательные его гармоники

Чтобы понять этот факт, мы можем рассмотреть простой случай волнового движения в одном направлении (одномерный случай), представляемого движением струны, закрепленной на концах. Поскольку концы струны не могут двигаться, единственными возможными являются колебания, показанные на рис. 15, которые на музыкальном языке соответствуют основной ноте и различным гармоникам (обертонам): на длине струны могут существовать полволны, две полуволны, три, десять, тысяча и любое целое число полуволн. Соответствующие частоты колебаний в два, три, десять, тысячу раз больше, чем частота основной ноты. В случае стационарных волн в трехмерной коробке (полости), например, в кубе ситуация такая же, хотя и немного сложнее, но результат тот же в том смысле, что имеется неограниченное число разных колебаний, с длинами волн все короче, и с соответствующими частотами все выше. Если мы примем принцип равновесности и будем считать, что  $E$  — полная энергия, заключенная в полости, тогда эта энергия, деленная на полное число мод, будет соответствовать энергии одиночного колебания и, поскольку число мод бесконечно, эта энергия должна быть бесконечно малой величиной! Это заключение совершенно абсурдно, и даже невероятно, если мы приложим его к черному телу Кирхгофа. Если мы позволим некоторому, малой величины, излучению на некоторой длине волны, например красной, попасть в полость, то оно там начнет взаимодействовать со стенками и будет распределено среди бесконечных колебательных мод, содержащихся в полости, т.е. среди бесконечного числа частот, простирающихся ниже, чем красная, и выше, чем красная, т.е. в области ультрафиолетового излучения, рентгеновского,  $\gamma$ -лучей и т.д. Этот парадоксальный результат был назван «ультрафиолетовой катастрофой». Согласно этому анализу, открытая дверца печи на кухне должна была бы быть источником рентгеновских и  $\gamma$ -лучей, подобно атомной бомбе!

Статья Рэлея, опубликованная в июне 1900 г., содержала всего две страницы, но ясно и недвусмысленно показывала неизбежный результат, который получается при применении классической статистической механики к проблеме излучения. Ни Планк, ни его коллеги экспериментаторы Х. Рубенс (1865-1922) и Ф. Курлбаум (1857-1927) не воспринимали работу Рэлея очень серьезно. Закон распределения, предложенный Рэлеем, при сопоставлении с экспериментальными данными показывал расхождение, кроме области длинных волн. Поэтому он сперва был отвергнут, так же как и некоторые другие законы, предложенные на основе разных гипотез.

#### Закон Планка

Теоретическая ситуация, как описывают, была следующей. Когда в воскресенье 7 октября 1900 г. Х. Рубенс со своей женой посетил Планков, он рассказал Планку об измерениях на длинах волн до 50 мкм, которые он произвел вместе с Ф. Курлбаумом в Берлинском институте. Эти измерения показали

определенное отклонение от предположений согласно закону Вина, но были в согласии с новой формулой Рэлея. Публичное представление этих результатов должно было состояться 19 октября на сессии Германского Физического общества. Перед этим заседанием Планк старался модифицировать свое выражение для энтропии осцилляторов так, чтобы оно согласовывалось с новыми результатами, все еще придерживаясь основ термодинамических рассуждений, он вывел закон распределения, который сегодня носит его имя. Той же ночью он послал открытку Рубенсу с новой формулой, которая была получена на следующее утро. Спустя день или два Рубенс пришел к Планку и показал ему экспериментальные результаты, которые прекрасно совпадали с новой формулой. На собрании Германского Физического общества 19 октября Курлбаум представил эксперименты, выполненные с Рубенсом, и в последовавшей оживленной дискуссии, Планк представил свою новую формулу в комментарии, озаглавленном «Об улучшении закона излучения Вина». «В тот же день, в который я сформулировал этот закон, я поставил перед собой задачу придать ему правильный физический смысл», — говорил Планк позднее, и после нескольких недель самой напряженной работы в его жизни, он 14 декабря снова на заседании Германского Физического общества смог объяснить физические гипотезы, которые поддерживали этот закон.

В своей лекции Планк утверждал, что согласно некоторым довольно сложным вычислениям, которые он выполнил, можно найти способ исправить парадоксальные заключения, полученные Рэлеем, и избежать опасности ультрафиолетовой катастрофы, если принять постулат, что энергия  $E$  электромагнитных волн (включая видимый свет) может существовать только в форме некоторого пакета с энергией, содержащейся в каждом пакете, прямо пропорциональной соответствующей частоте  $f$ :

«...мы рассматриваем — и это наиболее важная часть всех вычислений —  $E$  состоит из совершенно определенного числа конечных равных частей, которые получаются путем использования для этой цели естественной константы  $h$ ... Эта константа при умножении ее на частоту  $f$  резонаторов дает элемент энергии  $e$ ... а путем деления  $E$  на элемент энергии  $e$  мы получаем... число элементов энергии, которые распределены среди  $N$  резонаторов».

Эта гипотеза, известная как квантовая теория, предполагает, что энергия может испускаться только дискретными величинами, или пакетами, а не непрерывно изменяемыми величинами. Минимальная энергия, которую осциллятор может испустить на частоте  $f$ , является произведением частоты на универсальную константу, которую Планк обозначил  $h$  и которая ныне известна как константа Планка (постоянная действия).

Планк получил эту интерпретацию закона черного тела до середины ноября 1900 г., но представил свои результаты Германскому Физическому Обществу в Берлине только 14 декабря. Великий математик и физик А. Зоммерфельд (1868—1951) назвал этот день «днем рождения квантовой теории». Он, в частности, ссылаясь на тот факт, что Планк рассматривал «наиболее существенным пунктом» своей теории гипотезу, что энергия распределяется среди резонаторов полости только целыми кратными элементами конечной энергии.

Спустя более чем 30 лет в письме своему другу физику, специалисту в оптике и спектроскопии, Р. В. Буду (1868-1955) от 7 октября 1931 г., Планк оправдывался:

«короче говоря, я могу охарактеризовать всю процедуру как акт отчаяния, т.к. по своей природе я миролюбив и не склонен к сомнительным авантюрам. Однако я уже бился 6 лет (с 1894 г.) над

проблемой равновесия между излучением и веществом без каких бы то ни было успехов. Я сознавал, что эта проблема имела фундаментальную важность для физики, и я узнал формулу, описывающую распределение энергии в нормальном спектре (т.е. спектр черного тела); следовательно, требовалось найти любой ценой теоретическую интерпретацию, однако эта цена могла быть высокой».

Парадоксально, что революционная гипотеза Планка не была немедленно принята, но ученые того времени не понимали, что родилась новая физика. Сам Планк не признавал революции, которую он вызвал, считая, что квантование энергии не более чем простая математическая модификация, полезная для вычислений. Он не думал, что энергия действительно концентрируется в дискретных квантах. Будучи глубоко консервативным человеком, он в течение ряда лет ограничивал свои размышления рассмотрением своей теории квантования энергии просто как удобную гипотезу, которая позволяет применить статистику Больцмана к проблеме излучения.

Точно так же физики первых лет XX в. использовали формулу черного тела как эмпирическую, и сам Планк старался ограничить концепцию квантования и произвел две последовательные модификации своей теории, в которых сумел получить ту же формулу без необходимости предположения, что процессы поглощения включают обмен энергии квантами, т.е. кванты энергии (1914 г.). Научному сообществу потребовалось несколько лет, чтобы осознать его вклад и присудить ему Нобелевскую премию по физике лишь в 1918 г. «в признание заслуг, которые он оказал развитию Физики своим открытием квантов энергии».

Среди тех первых, которые указали, что что-то не вполне правильно, был Рэлей, который в 1905 г. снова обратился к своей формуле 1900 г., отмечая, что формула Планка сводится к ней в пределе низких частот, и заключал:

«Критическое сравнение двух процессов [т.е. его собственного и Планка] представляет интерес, но не следуя за соображениями Планка, я не могу принять их. Как применяемая ко всем длинам волн, его формула могла бы иметь большее значение, если бы была удовлетворительно установлена. С другой стороны, соображения, которыми я руководствовался [мое уравнение] очень просты, и эта формула, как казалось мне, является необходимым следствием закона равновесности, как он был утвержден Больцманом и Максвеллом. Мне трудно понять, как еще один какой-нибудь процесс, также основанный на идеях Больцмана, может привести к другому результату».

Таким образом, Рэлей указал факт появления новой концепции, обычно называемой «кризисом классической физики».

В это самое время гениальные соображения неизвестного служащего Патентного бюро в г. Берне (Швейцария) укрепили теоретические основы понимания явлений испускания и поглощения света. Этим неведомым служащим был Альберт Эйнштейн. Как мы увидим, Эйнштейн полностью принял концепцию квантования и предположил, что излучение ведет себя так, как если бы оно состояло из квантов энергии, что проявляется не только в процессах испускания и поглощения, но что кванты существуют независимо в виде частиц в вакууме. Однако прежде чем обсуждать эти фундаментальные концепции, нам нужно описать еще одну важную революцию, связанную с открытием строения атома и ее роль в излучении света.

## ГЛАВА 4

### АТОМ РЕЗЕРФОРДА—БОРА

Концепция атома как сложной системы, содержащей внутри себя как отрицательные заряды

(электроны), так и положительные (необходимые для нейтрализации электронов и делающие атом электрически нейтральным), была введена, как мы видим, между 19 и 20 столетиями. В 1911 г. благодаря фундаментальным экспериментам, выполненными Резерфордом, была разработана модель, которой мы, с некоторыми модификациями, пользуемся и поныне.

#### Резерфорд и планетарный атом

Эрнст Резерфорд (1871—1937) родился в маленьком городке Южного острова Новой Зеландии в семье выходца из Шотландии. Его мать была школьной учительницей и великолепно играла на рояле, что было необычным в Новой Зеландии того времени. Его отец, энергичный и умелый фермер, организовал выгодный бизнес по производству веревок и канатов. Многочисленная семья молодого Эрнста жила вдали от больших городов на семейной ферме.

В 10 лет Эрнст прочел популярную книгу по физике и, как это случалось с другими физиками в подобных случаях, был увлечен ею. После школы второй ступени и колледжа, где он был первым на экзаменах по английскому языку, латыни, истории, математике, физике и химии, в 1889 г. получил стипендию университета Новой Зеландии. Там он получил ученую степень, представив диссертацию по магнетизму железа, получаемого при высокочастотных электрических разрядах. В 1894 г. он выиграл стипендию, которая позволяла ему продолжить занятия в Англии. История гласит, что он получил эту новость во время выкапывания картошки и воскликнул: «Это последняя картошка, которую я выкапываю в моей жизни»; после чего одолжил деньги на билет и отправился в 1895 г. в Кембридж, куда был принят студентом-исследователем в знаменитую Кавендишскую лабораторию, возглавляемую Дж. Дж. Томсоном, открывателем электрона.

Как раз до этого Кембриджский университет решил больше сосредоточиться на экспериментальных исследованиях, открывая лаборатории и для студентов из других университетах, среди которых первым был Резерфорд. Он быстро стал известен среди других соучеников, один из которых писал: «У нас здесь появился кролик от Антиподов, и он копает очень глубоко».

В Кембридже Резерфорд продолжил свои исследования магнетизма и получил интересные результаты по передаче и детектированию электромагнитных волн. Затем, после открытия (в 1895 г.) В. Рентгеном рентгеновских лучей, Резерфорд, с энтузиазмом и энергией, которые были отличительными чертами его характера, присоединился к Томсону в его исследованиях рентгеновских лучей, а позднее (1896 г.) радиоактивности. В эту область он внес фундаментальные вклады, работая сначала в Кембридже, а после 1898 г. в Монреале (Канада), где он был назначен профессором физики в университете МакГилла. Он выдвинул идею, что радиоактивность заключается в разрушении первоначальных атомов с превращением их в другие элементы. С помощью этой теории дезинтеграции он раскрыл природу явлений радиоактивности. Эта теория получила полное подтверждение экспериментами, которые он выполнил вместе с молодым сотрудником, химиком Фредериком Содди (1877-1956), который получил Нобелевскую премию по химии в 1921 г. «за его вклад в наши знания химии радиоактивных веществ и его исследования происхождения и природы изотопов». Эти эксперименты включали изучение природы излучений, испускаемых радиоактивными веществами, которые открыл Резерфорд и обозначил их как альфа- и бета-лучи (ядра гелия — альфа, электроны — бета). В 1907 г. Резерфорд возвратился в Великобританию в качестве профессора физики в Манчестере (занял эту позицию после Артура Шустера). В следующем году он получил Нобелевскую премию по химии «за его исследования по

дезинтеграции элементов и химию радиоактивных веществ». Наконец, в 1911 г. в результате изучения рассеяния альфа-частиц в твердотельных мишенях он предложил планетарную интерпретацию атома. В 1919 г. он объявил о первом искусственном развале атомного ядра и занял после Дж. Дж. Томсона пост директора Кавендишской лаборатории. В 1914 г. он был возведен в рыцарское звание, в 1932 г. удостоился титула Барона Резерфорда Нельсона. В 1925—1930 гг. он был президентом Королевского общества.

Когда он неожиданно умер от ущемления грыжи, его прах был похоронен в Вестминстерском Аббатстве, к востоку от захоронения Ньютона и рядом с лордом Кельвином, в присутствии короля и представителей правительства.

Резерфорд, который считается выдающейся фигурой в развитии физики, был человеком вулканической энергии, огромного энтузиазма, исключительной работоспособности и твердого здравого смысла. Один из его сотрудников сказал, что он является человеком «не симпатичным, но просто великим». Фальшивая скромность была неведома ему.

Рис. 16. Рисунок атома Резерфорда. Пример в отношении водорода. Электрон (отрицательный заряд) вращается вокруг ядра (положительный заряд) подобно вращению Земли вокруг Солнца

В 1911 г. он постулировал модель атома, в которой было, наконец, дано правильное распределение отрицательных (электронов) и положительных зарядов. С помощью эксперимента, который стал классическим в истории физики, он продемонстрировал, что сильная концентрация положительного заряда помещается в центральной области каждого атома, в которой также сосредоточена большая часть массы атома. Эта центральная часть, которая по размерам, по крайней мере, в 100 000 раз меньше, чем весь атом, и в настоящее время обозначается как атомное ядро. Отрицательный заряд, которым окружается ядро, образуется электронами, которые вращаются вокруг ядра под действием сил электрического взаимодействия. Поскольку атом в целом электрически нейтрален, общий заряд электронов, вращающихся вокруг ядра, должен быть равен положительному заряду ядра (рис. 16). Атомы различных элементов содержат разное число электронов, вращающихся вокруг ядра. К этому заключению пришли последовательно, отталкиваясь от открытия Менделеевым: химические элементы можно расположить в последовательности с прогрессивно увеличивающимися атомными весами в таблице Менделеева так, что элементы со сходными химическими свойствами располагаются в одной определенной колонке. Позднее (1913 г.) английский физик Генри Г. Дж. Мозли (1887-1915), который погиб молодым в Галлиполи во время Первой мировой войны, выполнил серию экспериментов по рассеянию атомами рентгеновских лучей. Эти эксперименты позволили ему определить число электронов, которые содержит атом. Он показал, что перемещение одного элемента до другого соседнего в таблице Менделеева получается путем добавления электрона. Таким образом, было установлено, что число электронов в атоме конечно и много меньше, чем воображали. Водород является простейшим атомом с одним электроном, гелий имеет два, и т.д. вплоть до самого тяжелого элемента — урана, известного в то время, который содержит 92 электрона (сегодня искусственно создают атомы с числом электронов до 118).

Мы можем сказать, что эта модель атома подобна системе планет, вращающихся вокруг Солнца под действием сил всемирного тяготения, с важным отличием, которым нельзя пренебрегать. Электроны, которые вращаются вокруг ядра, несут электрический заряд и поэтому должны, согласно законам электромагнетизма Максвелла, испускать электромагнитные волны подобно антенне

радиовещательной станции. Но поскольку эти «атомные антенны» много меньше, электромагнитные волны, испускаемые атомами, в миллиарды раз меньше тех, что испускаются обычной антенной. Эти волны лежат в видимом диапазоне, и их испускание делает тела светящимися.

Таким образом, согласно модели Резерфорда, электроны, которые вращаются вокруг ядра, должны испускать световые волны, и поскольку эти волны несут энергию, электроны будут терять свою кинетическую энергию из-за испускания ими излучения. Легко рассчитать, что если это так, то все электроны атома полностью потеряют свою кинетическую энергию за пренебрежимо малую долю секунды и должны упасть на поверхность ядра.

Однако наблюдения показывают, что это не так, и атомные электроны бесконечно долго вращаются вокруг ядра на относительно большом расстоянии от них. Вдобавок к этому противоречию с фундаментальной природой атома, имеется ряд других несоответствий между теоретическими предсказаниями и экспериментальными результатами. Например, опыт говорит, что атомы излучают свет только определенных цветов или длин волн (спектральные линии, которые обсуждались в главе 2), в то время как движение электрона в модели Резерфорда должно приводить к излучению всех цветов (т.е. всех длин волн).

Нильс Бор

Команда молодых людей, собравшихся в Манчестере вокруг Резерфорда, были в основном физиками-экспериментаторами. Они были похожи на самого Резерфорда, который, несмотря на свое образование, не придавал большой важности теории и был, по существу, экспериментатором. Он заявил однажды: «Когда молодой человек в моей лаборатории использует слово "вселенная", я говорю, что самое время ему убираться вон». «А почему же вы доверяете Бору?» — спросили его. «Ну, он же футболист!» — ответил Резерфорд.

Кафедра в Манчестере, в одном из провинциальных английских университетов, была занята Резерфордом, когда спектроскопист сэра Артура Шустера решил уйти в отставку. Шустер, немецкого происхождения, унаследовал состояние, которое он частично использовал для обеспечения своего института прекрасной лабораторией, поддерживая таких физиков-теоретиков как Г. Бейтмен (1882—1946), Ч. Г. Дарвин и молодой датский физик Нильс Бор (1885-1962).

Нильс родился в Копенгагене в состоятельной семье. Его отец был хорошо известный профессор физиологии, мать происходила из семьи английских банкиров еврейского происхождения.

В то время Дания была культурным водоразделом между английскими и германскими традициями, что давало удачный синтез английской экспериментальной науки с более формальным теоретическим подходом германских университетов. Во многих отношениях характер Бора сочетал британское влияние, происходящее от эмпиризма здравого смысла Локка с типичными германскими подходами Канта относительно субъективных и объективных аспектов опыта.

У Бора была старшая сестра, Дженни, и старший на полтора года брат, Харальд (1887—1951). Между братьями всегда были замечательные отношения, и это имело важное влияние на метод работы Бора. С детства братья старались выражать свои мысли в форме оживленного диалога, тем самым развивая содержательный и диалектически обмен мнениями. Их непрерывный диалог приучил Бора к необходимости вырабатывать свои идеи путем обсуждения их с собеседником. Такая форма общения с Харальдом, который позднее стал знаменитым математиком и директором Института математики, расположенным, кстати, рядом с Институтом теоретической физики Нильса, дала ему

математические данные необходимые в его работе.

Весной 1911 г. Нильс закончил и защитил свою докторскую диссертацию по электронной теории металлов. На рубеже столетий несколько выдающихся физиков, основываясь на доказательствах существования электронов во всех веществах, данных Дж. Дж. Томсоном, и на теории поведения электронов, данной Х. А. Лоренцем, старались объяснить все физические явления, как следствия взаимодействия электронов друг с другом и с окружающими атомами и молекулами.

Первый успех был достигнут в теории металлов. Томсон, Лоренц, Поль Друде (1863—1906) и другие получили многообещающие данные из экспериментов на основе предположения, что электроны движутся в металлах подобно молекулам в идеальном газе. В 1890 г. Друде заключил, что отношение теплопроводности к электропроводности должно быть одно и то же для всех металлов и прямо пропорционально абсолютной температуре. Его выражение, однако, отличалось в два раза от экспериментально полученного значения. Лоренц в 1905 г. получил результаты, лучше согласующиеся с экспериментом, рассматривая свободные электроны в металле с помощью статистических методов, применимых в случае газов. Даже излучение, испускаемое при нагревании металлов, было в 1903 г. рассчитано Лоренцем, а Поль Ланжевен (1872—1946) представил в 1905 г. теорию магнитного поведения.

Бор в своей диссертации рассмотрел все эти разные проблемы и пришел к заключению, что электронную теорию металлов можно модифицировать так, чтобы дать результаты, согласующиеся с экспериментами, причем внутренняя структура атомов не принимается во внимание. Напротив, проблема излучения и объяснение магнитного поведения требуют новых радикальных гипотез, относительно которых у него нет идей.

В то время докторская степень давала возможность провести постдокторское исследование за границей, и поскольку в диссертации обсуждалось поведение электронов в металлах, то вполне понятно, что Бор выбрал поездку в Кембридж, чтобы работать с Дж. Дж. Томсоном.

Первая встреча с Томсоном не установила хороших отношений между ними. Бор вошел в кабинет Томсона с книгой, открыл ее и вежливо сказал: «Этот пункт неверен». Надо сказать, что в то время Бор не очень хорошо владел английским языком и поэтому выражал свои мысли в виде коротких фраз. Во всяком случае в октябре 1911 г. он писал своему брату Харальду:

«...с Томсоном пока нелегко иметь дело, как я думал в первый день. Он прекрасный человек, исключительно умен и полон воображениями (ты бы послушал одну из его элементарных лекций) и весьма приветлив; но он так сильно занят многими вещами и настолько погружен в свою работу, что очень трудно поговорить с ним. Он до сих пор не нашел времени прочесть мою работу (его диссертацию), и я не знаю примет ли он мой критицизм».

Фактически Томсон прекратил работу по теории металлов, и более того, импульсивно отверг тесное сотрудничество и постоянные разговоры с Бором, нужные ему для развития идей. Тем не менее во время своего пребывания в Кембридже Бор познакомился с работой Томсона о моделях атомов и пришел к пониманию их фундаментальной несостоятельности, но в целом он был неудовлетворен.

#### Атом Бора и Резерфорда

За год до прибытия Бора в Англию Резерфорд сделал открытие атомного ядра, и осенью 1911 г. эти два человека встретились и, несомненно, понравились друг другу. Поэтому в марте 1912 г. Бор отправился из Кембриджа в Манчестер с намерением проводить эксперименты в области

радиоактивности. Здесь он стал изучать замедление альфа-частиц при прохождении их через вещество, затем после нескольких недель он начал концентрироваться на теоретических аспектах, рассматривая взаимодействие альфа-частиц с электронами атома. Так он улучшил теорию одного из сотрудников Резерфорда, Ч.Г. Дарвина (1887—1962) — внука отца теории эволюции Ч.Р. Дарвина. Его Бор называл «внук настоящего Дарвина». Ч.Г. Дарвин предположил, что альфа-частицы, проходящие через вещество, теряют свою энергию в основном за счет столкновений между альфа-частицами и электронами в атомах. В своей модели Дарвин рассматривал электроны как свободные (не подверженные каким-либо силам), и Бор уточнил эту модель, рассматривая электроны, которые окружают ядро как «гармонические осцилляторы», т.е. предполагая, что они связаны с ядром упругими силами и что их энергии квантованы согласно квантовым правилам Планка. Бор окончил эту работу только после отъезда из Манчестера, и результат был опубликован в 1913 г. Это исследование пробудило интерес Бора к проблеме строения атома. Уже в Манчестере он стал набрасывать идеи о стабильности атома; совершенно новые идеи, о которых он предварительно сообщил Резерфорду.

Бор оставил Манчестер 24 июля 1912 г., чтобы возвратиться в Данию, где он 1 августа женился на Маргрете Норлунд. В течение весны и лета он осознал, что открытие Резерфордом атомного ядра было ключевым камнем конструкции модели атома, и никакой атом Резерфорда нельзя представить как механически стабильную систему, согласующуюся с законами классической физики. В то же время он убедился, что выдвигание квантов могло бы сыграть роль в разработке любой атомной теории.

В начале 1913 г. Х.М. Хансен (1886—1956) — молодой человек из Копенгагена, который выполнял экспериментальные исследования по спектрам в Геттингене, — обратил его внимание на открытие, сделанное Бальмером в 1885 г., согласно которому свет, испускаемый водородом, содержит только определенные частоты, которые могут быть выражены простой формулой — как разность между двумя термами (см. главу 2). Этот факт должен был бы быть следствием любой теории, описывающей атом водорода, и это стимулировало Бора найти решение этой проблемы. Немедленно, он с увлечением написал три фундаментальные работы, в которых он построил свою революционную теорию атома, основываясь на постулатах своей модели, для объяснения образования атомных спектров. В первой из этих работ (во второй и в третьей он развивал и уточнял теорию) он объяснил в общем виде строение атомов и молекул, и в значительных деталях атом водорода путем введения некоторых постулатов. Они позднее были подтверждены последующим развитием квантовой теории. Эти постулаты позволили ему объяснить непонятные факты, которые вытекали из модели Резерфорда. Он понял, что требования применять законы классической механики к атому совершенно не приемлемы. Действительно, нет причин полагать, что классические законы, разработанные для объяснения движения небесных тел или для тел, окружающих нас, должны быть справедливыми и для тел с размерами в миллиард раз меньшими.

Когда Бор боролся с этими проблемами, Планк уже установил, что испускание и поглощение света происходит только конечными величинами энергии, которые он назвал квантами. А Эйнштейн, как мы увидим в следующей главе, уже дал свое объяснение фотоэффекта в рамках квантов света. Так, Бор полагал, что принцип квантования энергии справедлив для любой системы. Поэтому механическая энергия системы должна быть квантована, т.е. можно предположить только некоторые

дискретные значения, и энергия системы может изменяться не произвольно, а только дискретными значениями. Системы можно представить себе как маленькую башню из кирпичей (рис. 17), высоту которой можно изменять, только снимая или добавляя толщину кирпича. Подобным же образом энергия системы может увеличиваться или уменьшаться, но не на произвольную величину, а на величину, которая соответствует минимальному кванту (кирпич на предыдущем примере).

Разумеется, мы заметим эту дискретность, если минимальная энергия кванта, на которую может происходить изменение, достаточна для того, чтобы быть измеренной. В большинстве случаев это не имеет места, поскольку минимальная величина, на которую может изменяться энергия, так мала, что изменение может показаться непрерывным. В системах крайне малых размеров это уже несправедливо и квантование энергии становится очень важным.

Электроны модели Резерфорда не падают на ядра по той простой причине, что они обладают минимумом энергии, соответствующей условиям модели, и поскольку это минимум энергии, она, по определению, не может еще уменьшиться, и движение электронов должно вечно продолжаться.

Рис. 17. В квантовой теории энергия системы может изменяться лишь дискретно, точно так же как высота кирпичной кладки может изменяться лишь на толщину кирпича

Если мы попробуем добавить энергии атому, то первый квант этой энергии полностью изменит состояние движения атома и переведет его электрон в так называемое первое возбужденное состояние. Для того, чтобы возвратиться в свое нормальное состояние, наш атом должен испустить количество энергии, которое он прежде получил, и среди разных возможностей (это может быть, например, столкновение с другим атомом) он может испустить ее в форме одиночного кванта света, который согласно одному из постулатов Бора имеет вполне определенную длину волны. В теории Бора разрешенные состояния энергии даются таинственным соотношением, которое устанавливает, что угловой момент электрона в атоме (произведение импульса электрона на радиус его орбиты) может принимать только дискретные значения, которыми являются произведения целых чисел на константу Планка  $h/2\pi$ .

Рис. 18. Процессы поглощения и испускания фотона, (а) Фотон (который поглощается и исчезает) ударяет электрон, который сидит на внутренней орбите и заставляет его перескочить на внешнюю орбиту, (б) Электрон перескакивает с внешней орбиты на внутреннюю и разность энергий испускается в виде фотона

Эта теория дает формулу

$$1/\lambda = 109,678 (1/m^2 - 1/n^2),$$

которая точно соответствует формуле Бальмера, если  $m = 2$ , но предсказывает и другие серии, если  $m = 1, 3, \text{и т.д.}$  Более того, убедительным аргументом в пользу теории Бора было то, что коэффициент 109,678, который получается из экспериментальных спектроскопических наблюдений, в точности предсказывается теорией. Тем самым, излучение света получает очень простое объяснение. Оно испускается всеми атомами, которые возбуждаются тем или иным способом. Последующее девозбуждение дает «квант света» (который позднее был назван «фотоном»). Энергия, испускаемая в виде света, является разностью между энергией возбужденного состояния и состояния наименьшей энергии («основное состояние»), и фотон имеет частоту, которая дается этой энергией, деленной на константу Планка  $h$ . По этой схеме формула Бальмера (разность между двумя термами) получается автоматически. Действительно, так как произведение частоты и длины волны равно скорости волны,

величина  $1/\lambda$ , которая появляется в формуле, пропорциональна частоте и, следовательно, энергии. Поэтому, согласно Бору, электроны в атоме могут существовать лишь в определенных состояниях, которые Бор представлял в виде орбит, по которым электроны движутся вокруг ядра. Вопреки требованию классической теории Бор предсказывал, что электрон, когда он находится на этих орбитах, не излучает энергии. Он испускает или поглощает энергию только, когда он переходит с одной орбиты на другую (рис. 18). Энергетические состояния атома обычно представляют, как показано на рис. 19, горизонтальными линиями на высоте, которая зависит от энергии уровня. Обычно на таких диаграммах наинизший уровень представляет основное состояние, а последующие уровни на увеличивающихся высотах представляют возбужденные состояния. Переход с одного уровня на другой можно представить вертикальной линией, как это показано на рисунке, относящемся к водороду. Такие диаграммы будут использоваться далее при объяснении принципов работы мазеров и лазеров.

Рис. 19. Представление энергетических уровней атома водорода. Стрелки указывают некоторые из переходов. По ординате даются энергии уровней в электрон-вольтах ( $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ). Верхний уровень с нулевой энергией соответствует случаю, когда электрон покидает атом (ионизация)

Модели, разработанные до Бора

Как мы уже видели, когда возникают совершенно новые идеи, их формулировка часто предопределяется некоторыми новыми концепциями, появляющимися как неполные теории, или теории, в которых такие концепции смешиваются с ошибочными представлениями. В некоторых отношениях модель Бора также предопределялась.

В 1910 г. венский физик Ф.Э. Хаас (1884-1941), аспирант Венского университета, обсуждал модель атома водорода, согласно которой электрон движется по положительно заряженной поверхности сферы радиуса  $a$  (поэтому это не модель Резерфорда) и обладает квантованной энергией (это интересная идея).

В ноябре 1911 г. Джон Вильям Николсон (1881 — 1955) в Тринити колледже Кембриджа использовал недавно введенную модель Резерфорда и обнаружил, что спектры атомов являются, существенно, квантовыми явлениями. Он писал: «Фундаментальные физические законы должны быть найдены в квантовой теории излучения, недавно разработанной Планком и другими, согласно которой, изменения энергии в системе периодического вида могут получаться только из некоторых определенных величин, определяемыми частотами системы». Также он установил, что следует предположить применение квантового принципа к атому Резерфорда, т.е. что угловой момент атома может увеличиваться или уменьшаться лишь дискретными квантами. Николсон, однако, не следовал идеи Конвея, что только один электрон может в определенный момент времени испускать излучение, и исследовал колебания большого числа электронов, вращающихся вокруг ядра. Он предполагал, что атом с одним электроном не может существовать и, что простейшие и легчайшие атомы должны быть в ряду корония (гипотетический элемент, который был открыт в солнечной короне) с атомным весом около половины водорода, затем водорода и небулия (гипотетический элемент, который предполагался в некоторых туманностях; сегодня мы знаем, что спектральные линии, приписываемые коронию и небулию, на самом деле принадлежат атомам кислорода и азота в высоких возбужденных состояниях) с 2, 3 и 4 электронами соответственно. Более того, он полагал, что гелий был соединением. Это была нелепость ошибочных идей: гелий — элемент, а короний и

нибулий не существуют (спектральные линии, приписываемые корониуму, на самом деле принадлежат обычным металлам, таким как железо и никель, в крайне высоких условиях возбуждения), и нет никаких элементов легче, чем водород.

На следующий год идея квантования углового момента атома снова была исследована голландским химиком Нильсом Бёррумом (1879—1958) и Полем Эренфестом (1880—1933), которые вывели правильные выражения, в которых появилась константа Планка  $h$ .

Все эти частные результаты, однако, появились с целью попытаться устранить общее видение всей проблемы и смешивались с совершенно ошибочными рассуждениями. Бор построил свою модель, стараясь дать объяснение многих существующих изысканий и последующих, даже если он и не мог обосновать свои гипотезы.

Признание гипотезы Бора

Мы можем спросить, как же появилась теория Бора. Резерфорд, которому Бор послал свою рукопись для публикации, представил ее в престижный английский журнал *Philosophical Magazine*. Это предполагало, что он поддерживает ее, даже несмотря на то, что когда Бор прислал рукопись из Дании, он возражал со своим обычным практицизмом: «откуда электрон знает, на какую орбиту ему перепрыгивать?» Его аргументом был тот факт, что если электрон при переходе испускает фотон, который имеет энергию, равную разности между первоначальным и конечным энергетическим состоянием, он должен знать свое прибытие (конечное состояние), прежде чем фотон будет испущен. На этот вопрос только Эйнштейн смог дать ответ в 1916 г. путем введения законов вероятности. Во всяком случае Резерфорд предложил Бору сократить рукопись, но Бор, хотя он был моложе и менее авторитетнее, чем его учитель, энергично отказался. Другие европейские физики выразили возражения; однако он проявил настойчивость.

Представляя свою модель, Бор не собирался дать окончательное описание атомных систем. Разрыв с классической физикой, который предопределил Бор своей теорией, был так радикален, что для некоторых людей его работа представлялась простым вычислительным фокусом, но ее способность предсказательных соотношений, подтверждаемых экспериментом, делала ее очень привлекательной. Поэтому, хотя она и не вызвала сенсации, она мало-помалу признавалась. Три работы были опубликованы в *Philosophical Magazine* между летом и осенью 1913 г. Бор прочел информационный курс лекций в Копенгагенском университете, что позволяло ему получить профессорский фант. В течение этого года он совершил несколько поездок в Англию и, в сентябре, обсуждал свою теорию на ежегодном собрании Британской Ассоциации развития науки в Бирмингеме. Это сообщество было организовано в 1831 г. в Йорке как некоторый противовес Королевскому обществу. Тем не менее собрания были интересными, как, например, в 1899 г. в Дувре, где Дж. Дж. Томсон сообщил об открытии электрона.

На собрании в Бирмингеме объявление о новых экспериментальных фактах в поддержку теории Бора улучшило ее прием среди первоначально довольно скептической британской аудитории. Однако немецкие математики в Гёттингене холодно встретили его идеи, поскольку они критиковали употребление Бором математики классической физики в модели, которая бросала вызов классическим взглядам. В июле поездка в Германию помогла Бору получить поддержку и с этой стороны, включая беседу с физиком Максом Борном (1882—1970), который позднее дал ключевое звено в развитии этой теории, путем улучшения матричной механики своим вкладом в

интерпретацию квантово механических функций. Борн был награжден Нобелевской премией по физике в 1954 г. (вместе с Вальтером Боте, исследователем космических лучей) «за фундаментальные исследования в квантовой механике, особенно за статистическую интерпретацию волновой функции». На его могиле в Гёттингене выгравировано фундаментальное уравнение матричной механики  $pq - qp = i\hbar/2\pi$ .

Весной 1914 г. Резерфорд предложил Бору должность доцента в Манчестере на 1914—1915 гг., позднее продолженной до 1916 г. В мае 1916 г. он, наконец, был назначен профессором теоретической физики в Копенгагене. Осенью 1916 г. его первый ассистент, голландский физик Х.А. Крамерс (1894—1952), который оставался в Копенгагене до 1926 г., присоединился к нему. В 1918 г. Оскар Кляйн (1894—1977) стал его вторым ассистентом. В 1917 г. Бор занялся постройкой нового Института теоретической физики, но потребовалось четыре года, прежде чем открылись его двери (8 марта 1921 г.). Через эти двери прошел ряд блестящих ученых как студентов, так и профессоров, учителей и гостей.

Работы Бора по строению атома дали старт активности во многих научных центрах, и сам Бор участвовал в дальнейшем процессе. Очень важной концепцией, которую он разработал для понимания квантовых проблем и которую никто лучше, чем он, не знал, как использовать, была «копенгагенская интерпретация», которая связывала предсказания классической теории с квантовой теорией. Так как квантовая формула Планка для длинных длин волн хорошо аппроксимировалась классической формулой Рэлея, то Бор утверждал, что частота обращения электрона по орбите, вычисленная с учетом квантовой механики, будет при очень больших орбитах приближаться к формулам, даваемых классическими законами. Это позволило ему найти правила, названные правилами отбора, которые устанавливали, что происходят не все переходы. Эти правила устанавливают, между какими орбитами разрешены переходы. Тем самым устанавливается первый критерий, позволяющий предсказать, какие частоты могут быть излучены (среди многих, соответствующих различным скачкам энергии). Эти правила также способствовали предсказаниям того, какова интенсивность света, соответствующая каждому возможному переходу.

В июне 1922 г. он дал серию лекций в Гёттингене, где он встретился с Вольфгангом Паули (1900—1958) и Вернером Гейзенбергом (1901—1976). Они были с ним в Копенгагене в течение нескольких лет и участвовали в новой революции в квантовой механике.

В декабре 1922 г. Бор получил Нобелевскую премию по физике «за его заслуги в исследованиях строения атомов и излучения, испускаемого ими».

В течение последующих десяти лет он был очень занят руководством своего Института, который становился все больше и больше центром всего развития атомной физики.

В своих воспоминаниях физики, которые работали в Институте Бора, подчеркивают уникальный «копенгагенский дух» научных исследований. Они вспоминают этот период, во-первых, как неограниченную свободу заниматься какой бы то ни было проблемой в теоретической физике, которую они считали наиболее важной. Вторым аспектом «копенгагенского духа» было то, что это занятие проходило в форме интенсивных дискуссий между Бором, в чем он был признанным мастером, и наиболее обещающими, хотя и молодыми и еще непризнанными в физике студентами, приезжающими в Институт из разных стран. Нуждающийся в обсуждениях для разработки своих идей, Бор поощрял визитеров стать его «помощниками», т.е. принять участие в его собственных

размышлениях. Таким образом, «копенгагенский дух» заключался в полной свободе исследований, достигаемой разделением научного труда между самим Бором и сливоками студентов международной теоретической физики.

Надо сказать, что когда появилась новая квантовая механика, Бор приветствовал замечательный прогресс, связанный с нею, но он также указал на несовместимость между классической и квантовой теориями.

В сотрудничестве с Крамерсом и Дж. Слетером (1900—1976) он опубликовал в 1924 г. то, что было последней попыткой описать атомную систему в духе квазиклассических представлений, которые он развивал ранее. В этой работе авторы предположили, что при индивидуальных атомных взаимодействиях энергия не сохраняется. Хотя это предположение было быстро опровергнуто экспериментом, революционный характер предположения показывает насколько безвыходной представлялась Бору ситуация в то время.

В тот же год Крамерс предложил формулировку математической теории, объясняющую дисперсию света атомами. Работая на этой основе, Гейзенберг разработал чисто абстрактное математическое представление квантово-механических систем.

В продолжение 1925—1926 гг. Гейзенберг уточнил и расширил свою теорию с помощью Макса Борна и Паскуаля Йордана (1902—1980) создав то, что сегодня известно как «матричная механика». Той же весной австрийский физик Эрвин Шрёдингер (1887—1961), работающий совершенно независимо, выдвинул «волновую механику», представляющую квантовые системы, как было позднее показано, математически эквивалентно матричной механике Гейзенберга. Эти два разных подхода убедили Бора, что математически эти теории были на правильном пути, но в то же время еще более увеличили его беспокойство относительно физической интерпретации математического формализма. Бора больше, чем кого бы то ни было, волновал вопрос несовместимостей квантовой теории.

В 1926—1927 гг. Гейзенберг возвратился в Копенгаген, чтобы обсудить проблемы, которые так волновали Бора. Также и Шрёдингер посетил Институт той осенью, и в обсуждениях с Бором убедился принять концепцию дуализма волна-частица для световых явлений, которая, как мы увидим, уже укрепилась Эйнштейном при интерпретации атомных систем. Работая в Копенгагене в феврале 1927 г., Гейзенберг сформулировал «принцип неопределенности», согласно которому невозможно измерить с высокой желаемой точностью одновременно скорость и координату частицы. В то же время Бор, который катался на лыжах в Норвегии, стал продвигать основы «принципа дополненности».

Основа этой концепции очень проста, если даже и очень странная. Она говорит, что мы можем задавать природе вопросы, например, какова позиция электрона, или дополнительный вопрос, какой его импульс (по существу скорость), но природа устроена таким образом, что, задавая один вопрос, автоматически исключается возможность задать одновременно дополняющий вопрос. Квантовая механика основана на разных теориях Гейзенберга и Шрёдингера и устанавливает существование дуализма волна—частица, света и вещества (материи). Бор осознал, что наши модели вещества и света основаны на их поведении в различных экспериментах, проводимых в наших лабораториях. В некоторых экспериментах, таких как фотоэлектрический эффект, который мы коротко обсудим в дальнейшем, свет ведет себя так, как если бы он состоял из частиц. В других экспериментах, таких

как явления интерференции, свет ведет себя так, как, если бы он состоял из волн. Подобным же образом в экспериментах, таких как исследования Дж. Дж. Томсона катодных лучей, электроны ведут себя как частицы; в других экспериментах, таких как исследования дифракции, электроны ведут себя так, как если бы они были волнами. Но ни электроны, ни свет никогда не ведут себя одновременно так, как если бы они были и частицами и волнами. В каждом конкретном эксперименте они ведут себя либо как частицы, либо как волны.

Это убедило Бора, что описания света и вещества в виде частиц и в виде волн оба необходимы, даже хотя они логически несовместимы друг с другом. Их следует рассматривать как дополняющими друг друга. Каждый эксперимент выбирает то или другое описание из соображений удобства.

Дополнительность была практически во всех дискуссиях Бора. Когда он был пожалован кавалером Ордена Слона, ему требовалось выбрать геральдический девиз, и он выбрал *Contraria sunt complementa*.

Вернер Гейзенберг вспоминал, что в то время, когда написал свою работу о принципе неопределенности, он однажды плывал на яхте с Бором и Нильсом Бьёруммом, и он объяснял Бьёрумму содержание своей работы. Выслушав его, Бьёрумм обратился к Бору, говоря: «Но Нильс, это же то, что ты говорил мне, когда мы были мальчишками!».

Принцип дополнительности был впервые представлен в 1927 г. на Международном Физическом Конгрессе в Комо, который был посвящен столетию со дня смерти Алессандро Вольты. Это было очень важное собрание, в котором квантовая механика впервые серьезно обсуждалась в столь широкой аудитории. Присутствовало большинство выдающихся физиков. Только Эйнштейн не пожелал приехать в фашистскую Италию. Хотя Бор все лето работал над своей рукописью, работа была далека от окончательной формы. На большинство присутствующих она не произвела впечатления. Они находили аргументы Бора слишком философствующими и не содержащими ничего нового в физике. Паули осознал значимость новых идей и работал с Бором в Комо после конференции, чтобы усовершенствовать рукопись. После дальнейшей работы окончательная версия была завершена к Пасхе 1928 г. Между тем в октябре 1927 г. появилась возможность представить принцип дополнительности на Сольвеевском конгрессе в Брюсселе. Там присутствовали все великие европейские физики, включая Эйнштейна. Реакция Эйнштейна была сильно отрицательной и вызвала ряд дискуссий, продолжающихся годами.

С открытием нейтрона и разработкой теории ядра Бор перенес свои интересы на применение квантовой теории к ядерным явлениям. В 1935 г. он сформулировал теорию ядерных реакций и, в развитие, первую теорию явлений деления вместе с Дж. А. Уиллером (г.р. 1911).

В 1940 г. Дания в нарушение договора с Германией была оккупирована силами вермахта.

Правительство и король отдали приказ вооруженным силам не оказывать сопротивление агрессору и капитулировали. Вся германская операция по оккупации Дании заняла несколько часов. Знаменитый датский физик-теоретик, один из создателей современной физики, Нильс Хенрик Давид Бор (1885-1962), еще в 1920 г. основавший институт и сделавший его центром развивающихся наук (атомной физики и квантовой физики), к середине Второй мировой войны оказался в опасности. Хотя в первые годы войны Бор продолжал работать в Копенгагене над теоретическими деталями деления ядер в условиях германской оккупации Дании. Где-то в начале 1943 г. к Н. Бору обратился капитан Вольмер Гит, офицер службы информации Датского Генерального Штаба, к тому же и участник

Движения Сопротивления в Дании. Поводом для встречи было письмо из Англии, по предположению Гита должно заинтересовать Бора. Спустя некоторое время пришло необычное письмо: это был микрофильм, спрятанный в капсуле размером с булавочную головку. Бор попросил Гита присутствовать при вскрытии послания. С помощью микроскопа Бор прочитал эпистола английского физика Дж. Чедвика (1891 — 1974), известного за открытие нейтрона, лауреата Нобелевской премии по физике за 1935 год. Дж. Чедвик предлагал Бору перебраться в Англию. Ответ Бора был отрицательным: мотивировка — невозможность оставить своих сотрудников в опасности. Письмо, размером два на три миллиметра, Бор завернул в фольгу и передал курьеру. Тот, в свою очередь, пошел к дантисту, который поместил письмо в дупло зуба и запломбировал его. Однако ситуация оставалась тревожной. Утром 29 сентября 1943 года Бор получает секретное сообщение о том, что фашисты собираются насильственно вывезти его в Германию, поскольку руководство Третьего рейха решило привлечь великого датчанина к реализации гитлеровского атомного проекта.

Благодаря связям с Движением Сопротивления, Бору и его жене удается в последнюю минуту ускользнуть от германских спецслужб. 29 сентября 1943 года Бор и его жена вышли из Копенгагена. К вечеру, пешком, они добрались до деревенского дома, где их ожидали его брат Харальд с сыном. Под покровом ночи тайно они покидают родину на рыбацком судне и переправляются в Швецию. Из шведского порта Лимхамн они доехали до Мальме, откуда на следующий день на поезде приехали в Стокгольм, где их встретил капитан Гит, который немедленно отправил в Англию сообщение о побеге. Бор оставался под надежной защитой в Стокгольме в течение нескольких дней, встречаясь с различными людьми и обсуждая различные проблемы. Наконец, 4 октября, была организована переправа Бора в Англию. После его отъезда, Гит и принимавшие Бора хозяева открыли бутылку шампанского, чтобы отметить успех предприятия. Однако вскоре после полуночи Бор был вынужден возвратиться в Стокгольм. Оказалось, что у самолета, на котором он должен лететь в Англию, проблемы с двигателем. Гит, вооруженный старым револьвером, всю ночь охранял спальню Бора. Наконец, на следующую ночь удача улыбнулась Бору. В Англию он летел в переполненном бомбардировщике. Место для ученого нашлось только в бомбовом отсеке. Кислородный шлем оказался Бору слишком мал, и, пока самолет шел на большой высоте, физик едва не погиб от удушья. Кроме того, как впоследствии выяснилось, летчики имели приказ в «крайнем» случае открыть бомбометательный люк: ученый ни в коем случае не должен был попасть в руки врага. К счастью, все обошлось. И уже из Англии Бор перебирается в США, где принимает участие в работах по созданию атомной бомбы.

6 декабря Бор прибыл в США вместе со своим сыном Оже, который позднее, в 1975 г., был награжден Нобелевской премией по физике вместе с Б. Р. Мотгельсоном и Л. Дж. Рейнвотером «за открытие связи между коллективным движением и движением частиц в атомном ядре и разработку теории строения атомного ядра, основанной на этой связи». Бор принял участие в атомном проекте, правда, периферийным способом, т.е. значительным вкладом на основе своей теории деления ядра. Нильс Хенрик Давид Бор скончался 18 ноября 1962 г. С 1965 г. Институт Теоретической Физики носит его имя.

Он, пожалуй более чем кто другой, имел фундаментальное влияние на развитие современной квантовой теории и был родоначальником того способа, которым сегодня интерпретируются

квантовые результаты и который обозначается как «интерпретация копенгагенской школы». Он первым осознал, что его теория была лишь первым шагом к решению проблемы, не имеющая твердых логических оснований, и, несмотря на ее успех, он добивался поставить ее на солидный фундамент и не скрывал противоречий, которые она содержала. К тому времени, когда он скончался в 1962 г., квантовая теория была полностью разработана следующими учеными: Луи де Бройлем (1892—1987), нобелевским лауреатом по физике 1929 г. «за его открытие волновой природы электрона», Вернером Гейзенбергом, нобелевским лауреатом по физике 1932 г. «за рождение квантовой механики, применение которой было, *inter alia*, приведя к открытию аллотропических форм водорода», Эрвином Шрёдингером и Полем А. М. Дираком (1902—1984), которые оба были награждены Нобелевской премией по физике в 1933 г. «за открытие новых плодотворных форм атомных теорий», и многими другими. Она полностью объяснила природу атома, процесс излучения и поглощения света и обеспечила логическое основание яркой интуиции Бора.

Жизнь и личностные особенности Бора представлены в большом числе биографических описаний. Он прилагал большие усилия в написании своих работ. Это всегда был долгий и трудоемкий период созревания. Более того, он отвергал сам процесс писания. Его первые работы, включая диссертацию, были продиктованы его матери, затем он диктовал жене и, наконец, длинному ряду сотрудников, начиная с Крамерса. В то время, когда он готовил свою теорию атома, уходила неделя за неделей, но Бор не публиковался. Резерфорд давил на него. Бор протестовал: «Никто не поверит мне, пока я не смогу объяснить каждый атом и молекулу». Резерфорд немедленно ответил: «Бор, объясни атом водорода, объясни гелий, и каждый поверит всему остальному». Его привычка диктовать привела к одному забавному эпизоду, сообщенному физиком теоретиком Абрагамом Пайсом (1918—2000), автором успешной и исчерпывающей биографии. Бор переправлял речь, с которой он должен был выступить по случаю трехсотлетия рождения Ньютона:

«Он стоял перед доской (где бы он не был, доска всегда была поблизости) и записывал некоторые общие темы, которые предполагалось обсудить. Одна из них должна была быть о гармонии чего-то с чем-то. И Бор написал слово "гармония". Оно выглядело более или менее как это:

Однако, по мере того, как обсуждение продолжалось, Бор становился все более неудовлетворенным использованием гармонии. Он беспокойно кружил у доски. Затем остановился, и его лицо просветлело. "Я нашел. Мы должны заменить гармонию на согласованность". Итак, он снова взял мел, постоял немного перед тем, что он написал прежде, и затем сделал единственное изменение: "С одним триумфальным ударом мела по доске"»

С Эйнштейном Бор был в самых дружеских отношениях, но с тех пор как он объявил Принцип Дополнительности, оба непрерывно спорили о смысле квантовой механики. Однажды, во время посещения Бором Института прогрессивных исследований в Принстоне, постоянным членом которого он был, Бор захотел записать что-то из аргументов, и, как обычно, ему нужен был секретарь. Он позвал Пайса, который был в институте, и попросил его присесть:

«И тут же, как вспоминал Пайс, он стал возбужденно ходить взад и вперед вокруг продолговатого стола в центре комнаты. Затем он спросил меня, не смогу ли я записать несколько предложений, которые придут ему в голову во время его хождения. Следует сказать, что во время таких ситуаций Бор никогда не имел полностью законченных предложений. Он часто задерживал одно слово, растягивал его, стараясь найти нужное продолжение. Это могло продолжаться несколько минут. В

тот момент этим словом было "Эйнштейн". Итак, Бор почти бегал вокруг стола, повторяя "Эйнштейн ... Эйнштейн". Спустя некоторое время он подошел к окну, уставился на него, повторяя все время: "Эйнштейн ...Эйнштейн".

В этот момент дверь тихо отворилась, и Эйнштейн вошел на цыпочках. Он сделал мне знак, приложив палец к губам, молчать с мальчишеской улыбкой. На цыпочках он прямо направился к боровской банке с табаком, которая стояла на столе, за которым я сидел. Все это время ничего не подозревающий Бор стоял у окна, бормоча "Эйнштейн ...Эйнштейн...".

Затем Бор с твердым "Эйнштейн" повернулся, и оба оказались лицом к лицу. Бор молчал, а Эйнштейн объяснил, что врач запретил ему покупать табак, и это не кража, а просто то, что ему нужно. Нет необходимости говорить, что все трое разразились смехом».

Теперь самое время поговорить об Эйнштейне и его достижениях в теории света.

## ГЛАВА 5

### ЭЙНШТЕЙН

Альберт Эйнштейн, всемирно известен благодаря теории относительности, которую разрабатывал между 1905 г. (когда была сформулирована специальная теория относительности) и 1915 г. (когда была сформулирована общая теория относительности). Но только специалисты знают о его фундаментальных достижениях в области природы света, которые были получены в это же время. Эти достижения имели исключительную важность для изобретения мазера, а затем и лазера.

Новалис, энтузиаст науки и немецкий поэт романтик XVIII в., сказал: «Теории подобны рыболовной снасти: только тот получит улов, кто ее забрасывает». Расширяя эту метафору, мы можем сказать, что в XX в. веке не было более удачливого рыболова. В 1905 г. его *annus mirabilis* (сравнимый, может быть, с памятным 1666 годом, в котором Исаак Ньютон задумал большинство идей, которые управляли наукой в течение более чем двухсот лет) Альберт Эйнштейн опубликовал в одном и том же томе немецкого научного журнала *Annalen der Physik* три статьи, каждая из которых содержала не только важные научные результаты, но выдвигала основы новых и значительных областей фундаментальной науки, что мы и опишем ниже.

#### Молодой Эйнштейн

Кто же был этот человек, Альберт Эйнштейн, который, будучи техническим экспертом третьего класса в Швейцарском патентном бюро Берна, в возрасте 26 лет, в свое свободное время изобретал новые методы статистической механики, ввел кванты света, дал доказательства существования атомов, и решил проблему точной формулировки электродинамики движущихся тел, проблему, над которой безуспешно бились наиболее влиятельные исследователи того времени, такие как Хендрик Антон Лоренц и Анри Пуанкаре (1854—1912), и в результате которой была построена новая теория пространства и времени?

Немец по национальности, еврей по происхождению и возмутитель по призванию, Эйнштейн двойственно реагировал на эти три природных дарования. Он выбросил за борт свою немецкую национальность в возрасте 16 лет; 20 лет спустя, после того, как он стал швейцарцем, он поселился в Берлине, где оставался все время Первой мировой войны; после поражения, потерпевшего Германией в 1918 г., он продолжал свою борьбу за германские гражданские права и отказался от гражданства второй раз, когда Гитлер пришел к власти. Тот факт, что он признавал сионизм, было подтверждением его еврейства, но верность ему он не оправдывал много раз.

Он родился 14 марта 1879 г. в Ульме, древнем немецком городе, памятном как место разгрома австрийцев Наполеоном в 1805 г. Интересно отметить, что в год рождения Эйнштейна родился Макс фон Лауэ (1879—1960), открыватель дифракции рентгеновских лучей и нобелевский лауреат по физике «за его открытие дифракции рентгеновских лучей в кристаллах». В этот же год родился химик Отто Ганн (1879—1968), лауреат Нобелевской премии по химии 1944 г. «за открытие деления тяжелых ядер». Также Ганн открыл радиоторий и протактиний, а вместе с Лизой Мейтнер (1878—1968) и Фрицем Штрассманом (1902—1980) — деление ядер. В этот же год умер Джеймс Клерк Максвелл, основатель современной теории электромагнетизма.

Семья Эйнштейна происходила из маленького, тихого немецкого городка Бухау на пути к озеру Констанц. Там жили евреи, которые уже не соблюдали религиозных правил и обычаев. В 1880 г. семья переехала в Мюнхен, где отец Эйнштейна инженер по профессии, открыл в партнерстве со своим братом маленькую электрохимическую мастерскую. В следующем году родилась единственная сестра Альберта, к которой он был очень привязан. Молодого Альберта описывают как скрытного, меланхолического и задумчивого мальчика, который поздно стал говорить, не любил физической активности и игр с другими мальчиками. Когда ему было четыре или пять лет, произошло нечто, глубоко потрясшее его: отец показал ему карманный компас, который постоянно указывал одно и то же направление, повинаясь невидимой и таинственной силе, как бы не вертели компас.

Спустя некоторое время, когда ему было пять или шесть лет, он с большим рвением стал учиться играть на скрипке, больше получая удовольствие от самой игры нежели от мастерства исполнения. Он поступил в католическую начальную школу, так как это было наиболее удобно, и оказался евреем среди христиан; а среди евреев он был аутсайдером, подобно членам его семьи. Позднее, в возрасте 10 лет, он перешел в гимназию, но был нетерпим к строгой дисциплине, диктаторскому духу и отсутствию свободы. В гимназии его заставляли учить латинскую и греческую грамматику, что мешало его изучению математики и физики, интерес к которым он получил от своего дяди Якоба инженера. «Алгебра — веселая наука» — любил он говорить. «Мы идем на охоту за маленьким зверем, название которого мы не знаем, так что мы называем его х. Когда мы подстрелим нашу дичь, мы набрасываемся на нее и даем ей ее собственное название».

В то время Эйнштейн прочел книгу по геометрии Эвклида и серию популярных книг по науке и познакомился с принципами дифференциального и интегрального исчисления. Окружающим юный Эйнштейн казался несчастным и подавленным аутсайдером. Учителя обвиняли его в плохом влиянии на соучеников. Но даже если его детство и было ничем непримечательным, его школьная жизнь, вопреки тому, что написано в некоторых биографиях, была достаточно яркой.

Однажды в гимназии учитель попросил его выйти из класса. Эйнштейн ответил, что не будет этого делать. Тогда учитель сказал: «Хорошо. Но сядь на последний ряд. Твои ухмылки оскорбляют учителя, которому нужно чувствовать уважение класса». В это время в нем росло чувство антагонизма к официальной и к имперской Германии, чувство, которое никогда не покидало его. Первоначально процветающая мастерская его отца перестала приносить доходы, и братья Герман и Якоб Эйнштейны приняли приглашение переехать в Италию. Семьи вначале переехали в Милан в 1894 г., а на следующий год в Павию, где открыли новую мастерскую. Альберт оставался в Мюнхене, чтобы продолжить учение, но в начале весны 1895 г., имея на руках свидетельство врача о

нервном расстройстве, он получил разрешение оставить гимназию, которую он ненавидел, и присоединился к родителям в Италии, которые так и не узнали, что врачебное свидетельство было инициативой самого Альберта. Он обещал родителям, что сам подготовится к вступительным экзаменам в Цюрихский Политехникум и сообщил им, что намерен аннулировать свое германское гражданство, что он и сделал позднее, когда поступил в Политехникум. Будучи убежденным антимилитаристом, возможно, таким образом, он хотел избежать военной службы в немецкой армии.

Цюрихский Политехникум  
Университет Цюриха был основан в 1813 г. согласно желанию жителей города получать высшее образование не покидая его пределов. До этого времени единственным университетом в Швейцарии был университет в Базеле. В 1855 г. был основан Федеральный институт технологии и политехники, который должен был удовлетворить нужду в техническом образовании, и Рудольф Клаузиус (1822-1888) был назначен туда профессором физики (1857). Клаузиус был одним из великих физиков 19 столетия. Он сформулировал второе начало термодинамики и определил концепцию энтропии; также он внес существенный вклад в кинетическую теорию газов.

В 1878 г. Альфред Кляйнер (1849-1916) был назначен профессором экспериментальной физики. Его главным достижением, как он часто признавался, было принятие в 1905 г. диссертации Альберта Эйнштейна, и лоббирование дать ему в 1909 г. кафедру теоретической физики, впервые учреждаемой в университете.

В октябре 1895 г. Эйнштейну было отказано в приеме в Политехникум. Поскольку он не имел стандартного школьного аттестата, ему отказали даже в праве сдать вступительные экзамены, несмотря на его превосходные результаты по математике и физике. Чтобы получить нужный аттестат, он поступил в школу немецко-говорящего кантона. Там он чувствовал себя более счастливым, чем в немецкой гимназии. На следующий год он смог поступить на физико-математический факультет Политехникума. В 1901 г. он принял швейцарское гражданство.

В течение года, который он провел в школе, озадачился проблемой: если некто движется за световой волной со скоростью, равной скорости света, то он будет сталкиваться с полем в волне, не зависящим от времени. Однако, это невозможно! Это был первый мысленный эксперимент, который он рассмотрел, и этот парадокс, вставший перед ним, после десятилетий размышлений привел его к специальной теории относительности.

Короткие записи, сделанные им во время обучения в школе, дают нам некоторое представление относительно его планов:

«Мои планы на будущее

Счастлив человек, который живет настоящим, чтобы много думать о своем будущем. Но, с другой стороны, молодые люди любят строить смелые планы. Более того, естественно для серьезного молодого человека добиваться по возможности желаемых целей.

Если мне повезет с моими экзаменами, и я смогу поступить в Политехникум. Я провел бы там четыре года, изучая математику и физику. Я мечтаю стать преподавателем в этих областях естественных наук, выбрав теоретическую часть.

Вот причины, ведущие меня к этому плану. Прежде всего, это моя склонность к абстрактному и математическому мышлению и отсутствие изобретательности и практических способностей. Мои желания живут во мне в согласии с этим. Это вполне естественно; каждый предпочитает делать то, к

чему у него имеются склонности. Кроме того, в профессии ученого есть определенная независимость, которую я так люблю».

Среди студентов в Политехникуме он встретил Милеву Марич (1875—1948), темноволосую сербку, которая была на четыре года старше его и которая в 1903 г. стала его женой и, позднее, матерью его трех детей. Также он познакомился со своим однокашником, швейцарцем Марселем Гроссманном (1878—1936), который, 18 лет спустя, стал его математическим сотрудником в написании общей теории относительности. Среди его учителей был знаменитый математик Герман Минковский (1864—1909), который в 1907 г. ввел концепцию пространства-времени, внося, тем самым, существенный вклад в развитие теории относительности.

В Политехникуме, он стал другом М.А. Бессо (1873—1955), молодого инженера из Триеста, который с 1904 г. был его коллегой по Патентному бюро и оставался его близким другом и корреспондентом всю жизнь. Эйнштейн много времени проводил за работой в физической лаборатории, увлекаясь непосредственным участием в экспериментах. Однако его учитель профессор Г. Ф. Вебер (1843—1912), лекции которого не нравились Эйнштейну, не был в восторге и однажды сказал ему: «Вы симпатичный юноша, Эйнштейн, очень симпатичный. Но у вас есть большой недостаток: вам не нравится, чтобы вам говорили что-нибудь».

В течение последнего семестра, в результате лекций Германа Минковского по капиллярности, Эйнштейн включился в работу по этой проблеме. Капиллярность является специальной формой энергии, связанной с формой и положением поверхности жидкости. Например, она может определять уровень жидкости в тонкой трубке (капилляре). В XIX в. многие ученые, среди которых были Томас Юнг, П.С. Лаплас (1749-1827), К.Ф. Гаусс (1777-1855), Дж. К. Максвелл, Д.Д. ван дер Ваальс (1837-1923) (нобелевский лауреат по физике 1910 г. «за свою работу по уравнению состояния газов и жидкостей») и А. Пуанкаре, занимались этой проблемой. Лаплас считал, что причина капиллярности в существовании сил сцепления молекул жидкости. Как следствие, можно получить из экспериментального изучения капиллярности жидкости информацию об этих внутримолекулярных сил. Эта возможность интересовала Эйнштейна в его первом исследовании в 1901 г. и, как мы увидим, продолжала интересовать его и позднее.

#### Патентное бюро

После окончания Политехникума и получения степени в 1900 г. Эйнштейну не удалось получить место в Политехникуме, где он не собирался заниматься интересующими его темами, и где его не любили его учителя. После безуспешных попыток найти работу он с помощью своего друга Марселя Гроссмана устроился в Патентное бюро в Берне. Там он чувствовал себя вполне удовлетворенным, серьезно относился к работе и даже находил ее интересной. Более того, он располагал временем и возможностью заниматься своей собственной физикой. Итак, он стал писать работы по физике, посылая их в журнал *Annalen der Physik*, редакция которого располагалась в Вене. Среди них, он опубликовал в 1903—1904 гг. работы по основам статистической механике, но он не знал, что Гиббс уже опередил его. Эйнштейн подготовил докторскую диссертацию и в 1905 г. успешно защитил ее и сдал экзамены. Он продолжал свои исследования в теоретической физике и в том же году написал работу по световым квантам, которая принесла ему Нобелевскую премию, первую работу по теории относительности, написал диссертацию, посвященную «моему другу Марселю Гассманну», в которой он описал новый теоретический метод определения радиусов молекул и число молекул,

которые могут занимать данный объем (число Авагадро), и, наконец, представил результаты исследования движения взвешенных частиц в жидкости (броуновское движение). Это последнее исследование можно рассматривать как побочный продукт его диссертации и которое было опубликовано в том же журнале в 1906 г.

В отличие от результатов фундаментального характера, изложенных в его диссертации, она вызвала необычный интерес. Это объяснялось большими практическими выводами, следующими из нее, по сравнению с другими работами Эйнштейна. Из свойств частиц в суспензии следовали выводы, применимые к движению частиц песка в бетонных смесях (важность для строительной индустрии), мицеллы казеина в молоке (важность для пищевой индустрии), аэрозоли в облаках (важность для экологии) и т.д.

Эйнштейн оставался на своей должности в Берне до конца 1909 г., когда он в первый раз получил академическую позицию доцента в университете Цюриха. В то время его научный авторитет уже был достаточно высок. Кроме результатов по квантам света, броуновского движения и теории относительности, Эйнштейн, двумя годами позже, опубликовал первую квантовую теорию удельной теплопроводности твердых тел. Теория тепла, основанная на рассмотрении энергии движения, либо сталкивающихся частиц газа, либо внутренних колебаний твердых тел, имела большой успех, к началу XIX в. встретила серьезные трудности. Статистическая механика позволяет рассчитать количество тепла, которое нужно сообщить телу для увеличения его температуры на один градус (т.н. удельная теплоемкость). В случае твердых тел ожидалось теоретически, что эта величина примерно одинаковая для всех тел и не зависит от температуры. Эксперимент противоречил этому заключению, демонстрируя, что теплоемкость растет при увеличении температуры, достигая значения, предсказываемого статистической механикой, лишь при высоких температурах (закон Дюлонга— Пти). В 1907 г. Эйнштейн пришел к заключению, что если серьезно принять идею Планка, ее следует считать справедливой для всех видов колебаний и, применив эту концепцию к колебаниям атомов, он вывел правильную зависимость удельной теплоемкости от температуры. В том же 1907 г. Иоганн Штарк (1874— 1957), главный редактор *Jahrbuch der Radiaktivitat und Elektronik*, попросил Эйнштейна написать обзор по теории относительности. При работе над этой важной статьей, Эйнштейн вспомнил, что когда он сидел в Патентном бюро, он размышлял: «Если человек свободно падает, он не ощущает своего веса». Так, для наблюдателя, падающего с крыши дома, не существует гравитационного поля, по крайней мере, в ближайшем окружении.

Действительно, если этот наблюдатель роняет какое-нибудь тело, оно остается относительно его в состоянии покоя или равномерного движения, независимо от его природы. Поэтому наблюдатель имеет право рассматривать свое состояние как «состояние покоя». Благодаря таким интуитивным соображениям частный экспериментальный закон, что в гравитационном поле все тела падают с одним и тем же ускорением (найденном еще Галилеем), сразу же приобретает глубокий физический смысл. Наблюдатель не имеет никаких средств, которые позволили бы ему установить, что он свободно падает в гравитационном поле. На основе таких размышлений Эйнштейн выдвинул теорию гравитации. Он пришел к заключению, что удовлетворительная теория гравитации должна включать фундаментально и естественным образом эквивалентность между инерционной и гравитационной массами и тот факт, уже установленный Галилеем, что все тела падают с одним и тем же ускорением. Гравитация и инерция по существу одно и то же, решил Эйнштейн, и поэтому удовлетворительная

теория гравитации требует обобщения структуры пространство-время его теории относительности, поскольку, если гравитация принимается во внимание, концепция конечной и строго инерциально покоящейся системы координат уже неадекватна.

Его академическая карьера

Некоторое время спустя после декабря 1907 г. началась академическая карьера Эйнштейна. Первым шагом было требование, обычное в то время, получить разрешение преподавать (быть доцентом) в университете, которое давалось при определенном числе студентов. Это требование было отвергнуто университетом Берна как формалистика. Эйнштейн не включил в представляемые документы (докторская диссертация и 17 опубликованных работ) специальное сочинение *Habilitation thesis*, которое он еще не подготовил. Он представил необходимую работу в начале 1908 г. и получил звание.

Однако он все еще работал в Патентном Бюро и поэтому был вынужден читать лекции в свое нерабочее время. В 1908 г. он читал лекции в субботу и во вторник утром с 7 до 8 часов трем студентам, один из которых был Бессо, работающий с ним в Патентном Бюро. В 1908—1909 гг. он читал второй и последний курс каждую среду вечером с 6 до 7 часов четырем студентам.

Профессор Эйнштейн

Наконец в 1909 г. Эйнштейн стал профессором теоретической физики в университете Цюриха. Это был новый пост: с уходом Клаузиуса в 1867 г. не было профессора теоретической физики.

Эйнштейна представил собранию факультета профессор А. Кляйнер, который очень хорошо говорил о нем. О его выступлении на фоне антисемитских выпадов коллег сохранилось такое свидетельство: «Эти выражения нашего коллеги Кляйнера, основанные на многолетнем знакомстве, более ценны для комитета и факультета, чем то, что г. д-р. Эйнштейн является иудеем, так как иудеям, среди преподавателей присущи (во многих случаях, хотя и не всегда) все неприятные особенности такие, как назойливость, наглость и менталитет лавочника».

6 июля 1909 г. Эйнштейн получил отставку в Патентном Бюро и перешел в университет. Профессор Эйнштейн появился в классе в обычной одежде, часто носил слишком короткие брюки и приносил маленькую бумажку размером с визитную карточку, по которой читал свои лекции. Между 1907 и 1911 гг. Эйнштейн потерял интерес к теории гравитации. Вместо этого он был полностью поглощен квантовой теорией. Он писал в 1908 г. своему сотруднику Лаубу (1882—1962):

«Я целиком занят вопросом сущности излучения ... Эта квантовая проблема имеет настолько исключительно важную значимость и так сложна, что она должна интересовать каждого».

И в следующем году:

«Я еще не нашел решения вопроса о свете и квантах. В то же время я стараюсь понять, смогу ли я разработать эту мою любимую проблему».

Тем не менее, позднее он временно оставил свои усилия в отношении теории света, обратился снова к теории гравитации. В 1910 г. Эйнштейн принял кафедру в Немецком университете в Праге, куда он перебрался в марте 1911 г. Теперь он старался обобщить специальную теорию относительности, включив в нее гравитацию. Теория гравитации была его главным интересом до 1916 г. В то время как большинство физиков уже признали специальную теорию относительности, считая ее прочной частью основ физики, Эйнштейн был занят поиском пределов ее применимости и математическим представлением более глобальным и более применимым ко многим физическим явлениям.

В Праге в 1911 г. он выдвинул предположение, что световые волны искривляются гравитационными полями, но необходимо было ждать до 1914 г. когда экспедиции могли бы проверить это предсказание во время солнечного затмения. Первая мировая война прервала эти наблюдения, и первые измерения могли быть сделаны лишь в 1919 г.

В 1911 г. Эйнштейн был также занят написанием важной лекции по квантовой физике на Первом Сольвеевском Конгрессе (30 октября — 3 ноября 1911 г.). После 18 месяцев, проведенных в Праге, Эйнштейн возвратился в Цюрих в конце 1912 г. на должность полного профессора в Политехникуме, где он учился двенадцать лет назад. В Цюрихе, в соавторстве с Марселем Гроссманном, который стал профессором математики, Эйнштейн опубликовал в 1913 г. предварительную версию новой теории гравитации.

В конце 1913 г., по инициативе немецких физиков Макса Планка и Вальтера Нернста (1864-1941) (нобелевского лауреата по химии за 1920 г. «За признание его работ по термодинамике») Эйнштейну было сделано почетное предложение стать членом Королевской Прусской Академии в Берлине, быть профессором Берлинского университета без обязанности преподавать и стать директором вновь создаваемого Физического института кайзера Вильгельма. Задачей Эйнштейна было организовать исследовательскую работу. Его не обязывали преподавать, но он мог это делать по своему желанию. Эйнштейн не любил формальное преподавание, а живая научная атмосфера в Берлине привлекала его. Так что он принял приглашение.

Во время визита Макса Планка и Вальтера Нернста в Цюрих с целью предложить Эйнштейну новое положение он по просьбе Планка описал состояние своей работы по общей теории относительности, и Планк, который первым распознал в нем гения, сказал: «Как более старший, должен предостеречь вас; сперва вы не добьетесь успеха, и даже если и добьетесь, никто не поверит вам».

Когда Планк и Нернст ушли, Эйнштейн так прокомментировал эту встречу своему ассистенту Отто Штерну: «Эти двое напоминают мне людей, гонящихся за редкой почтовой маркой».

Вскоре после прибытия в Берлин Эйнштейн развелся со своей женой Милевой; ему было 34 года, и он был звездой первой величины на научном небосклоне.

В Берлине, несмотря на многие контакты с коллегами, в частности с Максом Планком, Максом фон Лауэ, Вальтером Нернстом и, позднее, с Эрвином Шрёдингером и многими другими, он чувствовал себя изолированным и чужим. Он не выступал с лекциями, но активно участвовал в обсуждениях, которые следовали за научными семинарами. Как пацифист и противник национализма, он чувствовал себя еще более изолированным во время Первой мировой войны. Он полностью сосредоточился на теории гравитации и, после значительных усилий, добился успеха к концу 1915 г. в формулировке, которая до сих пор рассматривается как замечательнейшая часть классической физики. Эта теория выдержала все экспериментальные проверки, выполненные до сих пор.

В 1915 г. он также заинтересовался экспериментом, проводимым вместе с голландским физиком Вандером Иоганном де Гаазом (1878—1960) (зятком Лоренца). В этом эксперименте использовался цилиндр (например, железа), подвешенный на упругой нити, и исследовалось закручивание при быстром намагничивании; сегодня это известно как эффект Эйнштейна—де Гааза.

Тяготы войны его не слишком затронули, эти годы были наиболее продуктивными и творческими в его карьере. Он опубликовал книгу и около 50 статей. В 1916 г. Эйнштейн написал десять научных работ, среди которых были наиболее важный синтез общей теории относительности, обсуждение

теории излучения света с введением спонтанного и индуцированного излучения, первая работа по гравитационным волнам и другие, которые мы обсудим в дальнейшем. Он также закончил свою популярную книгу по теории относительности.

В этот год он вновь обратился к излучению черного тела и добился значительного прогресса. В ноябре 1916 г. он писал Бессо: «Чудесный свет пролился на меня в виде поглощения и испускания излучения». Его объяснения были изложены в трех статьях, две из которых появились в 1916 г., а третья в начале 1917 г. В этих работах, которые мы можем считать наиболее важным вкладом в квантовую теорию, Эйнштейн предложил статистическую теорию взаимодействия между атомами и фотонами, дал новую демонстрацию теории излучения Планка и ввел концепцию «индуцированного излучения», что обеспечило основу для открытия мазеров и лазеров, о чем мы будем говорить в следующей главе. В тот же год он обосновал современную космологию, науку о крупномасштабной структуре Вселенной, построив первую математически корректную модель Вселенной, содержащей однородно распределенное вещество, испытывающее гравитацию.

#### Частная жизнь Эйнштейна

После напряженной работы в предыдущие годы, в 1917 г. Эйнштейн серьезно заболел. Его кузина Эльза Эйнштейн, брак которой с торговцем по имени Ловенталь закончился разводом, ухаживала за Эйнштейном и в июне 1919 г. Альберт и Эльза поженились. Эльза, которая умерла в 1936 г., была счастлива заботиться об Эйнштейне; она гордилась его славой. Эйнштейн, обычно был неустроенный в бытовом отношении, наконец, обрел дом и заботу. Он хорошо выглядел и получал удовольствие, принимая гостей: ученых, художников, дипломатов и других близких друзей. Однако в других отношениях его жизнь была слишком тяжелой для него. Посетивший его друг писал: «Он, который всегда был несколько богемным, стал вести жизнь среднего класса... содержит дом, типичный для преуспевающей семьи в Берлине... в окружении прекрасной мебели, ковров и картин... Когда кто-нибудь посещает его... он находит Эйнштейна все еще остающимся «посторонним» в таком окружении — богемным гостем в доме среднего класса».

Все, что мы теперь знаем о его частной жизни, было разукрашено в последние годы благодаря доступу к его частным письмам и смертью тех, кто препятствовал их опубликованию. Из этих частных эпизодов, которые никак не ограничивают нашей признательности его научным заслугам, мы узнаем, что когда ученик Эйнштейн влюбился в Мери Винтелер, молодую дочку его учителя греческого языка и истории, владельца квартиры, в которой он жил, он писал ее полные любви письма. Но быстро бросил это, когда она возвратила их. С Милевой вспыхнули бурные отношения, с рождением в 1902 г., до брака, дочери (вероятно, ее отдали на воспитание), и семья Эйнштейна сильно противилась его выбору. Этот брак закончился появлением его кузины Эльзы, которая после брака, наскучила ему, и он обращал внимание на других женщин. В поисках сенсации, один из его знакомых того периода выдвинул гипотезу, что Милева принимала участие в создании специальной теории относительности, но это не подтверждается какими бы то ни было письмами или тем, что мы знаем о научной жизни Милевой, которая не была отмечена событиями. В 1939 г. при разводе он взял под опеку своих двух сыновей и жену, и продолжал поддерживать всех трех. Более того, он решил отдать Милевой деньги из своей Нобелевской премии.

#### Теория относительности

Теория относительности, которая произвела революцию в наших представлениях о времени и

пространстве, и которая приводит к очень важным следствиям, до 1918 г. (до конца Первой мировой войны) оставалась неизвестной широким кругам, за исключением немногих специалистов. Затем ситуация изменилась, и она привлекла всеобщее внимание благодаря новому способу мышления и новой философии.

Это случилось в то время, когда все устали от войны и победители и побежденные. Люди хотели чего-то нового. Теория относительности давала именно то, что было нужно, и она стала центральным аргументом преобразований. Это позволило людям забыть на время ужасы войны и проблемы, которые она вызвала.

Об относительности было написано фантастическое число статей в газетах и журналах. Никогда прежде и затем специфическая идея не вызывала такого огромного интереса. Большинство из того, что писалось и говорилось, относилось к общим философским идеям, а не являлось серьезным научным обсуждением. Было мало точной информации, но многие люди были счастливы изложить свои идеи.

В Великобритании только один человек, астроном и математик, сэр Артур Эддингтон (1882—1944) по-настоящему понял, что такое теория относительности, и стал авторитетнейшим специалистом в этой области в своей стране. Его крайне интересовали астрономические следствия теории и возможность проверки теории с помощью астрономических наблюдений. Три возможных проверки теории, основанные на предсказаниях Эйнштейна, были сделаны в его работе 1915 г. Первая связана с движением планеты Меркурий. Было установлено, что перигелий (точка траектории планеты, ближайшая к Солнцу) Меркурия смещается за оборот приблизительно на 43 угловые секунды. Это не укладывалось в теорию Ньютона и долго озадачивало астрономов.

Новая теория Эйнштейна точно предсказывала этот эффект, и измерения Эддингтона подтвердили эти предсказания. Это было большим успехом теории, но оставило Эйнштейна безучастным, когда он узнал о подтверждении Эддингтона, так как нисколько не сомневался в справедливости своей теории.

Второе подтверждение связано с отклонением света, который проходит вблизи Солнца. Теория гравитации Эйнштейна утверждает, что свет, проходящий вблизи Солнца, должен отклоняться. Согласно теории Ньютона, также должно быть отклонение, но оно в два раза меньше того, что предсказывается Эйнштейном (рис. 20). Поэтому, наблюдая звезды вблизи солнечного диска, чей свет проходит вблизи Солнца, прежде чем достигает Земли, можно проверить теорию. Однако мы можем наблюдать звезды вблизи солнечного диска только в момент полного затмения, когда свет Солнца блокирован Луной. Подходящее затмение происходило в 1919 г., и Эддингтон организовал две экспедиции для его наблюдения: одну в Бразилию под руководством А. С. Кроммелина (1865—1939) из Гринвичской обсерватории, а другую на Принцесвы Острова, около побережья Испанской Гвинеи, руководимую им самим. Обе экспедиции получили результаты, подтверждающие теорию Эйнштейна. В Лондоне, 6 ноября, на объединенном собрании Королевского Общества и Королевского астрономического общества, президент Королевского общества, нобелевский лауреат Дж. Дж. Томсон, услышав результаты Эддингтона, превознес работу Эйнштейна как «одно из высочайших достижений человеческой мысли».

Рис. 20. Во время затмения Солнца можно наблюдать свет, приходящий от двух звезд сбоку от диска Солнца. Из-за того, что гравитационное поле Солнца искривляет свет, звезды, наблюдаемые с Земли

в направлении продолженных лучей, кажутся разнесенными дальше, чем на самом деле. Однако точность этих подтверждений была недостаточно высока из-за трудностей таких наблюдений. Совсем недавно этот эффект смог подвергнуть проверке за счет использования вместо света микроволн. Были открыты объекты звездного типа, сильно излучающие в радиодиапазоне (квазизвездные радиоисточники, или квазары). Когда один из них находится позади Солнца, мы можем наблюдать, отклоняются ли радиоволны, проходящие вблизи Солнца. Для этого нет необходимости ожидать затмения, поскольку Солнце слабо испускает радиоволны. Результат, с необходимыми коррекциями побочных эффектов, показал, что теория Эйнштейна подтверждается с более высокой точностью, чем на световых волнах.

Отклонение света за счет гравитации оказалось даже еще более впечатляющим в недавние годы. Масса галактики может действовать как линза и фокусировать свет, который приходит от удаленного источника, расположенного позади нее (рис. 21). Если этот источник, галактика, действующая как линза, и телескоп расположены (настроены) должным образом, тогда «гравитационная линза» дает совершенное круговое изображение («кольцо Эйнштейна»), наблюдаемое на некоторых фотографиях, полученных различными методами в разных ситуациях. Третье подтверждение относится к предсказанию общей теорией относительности того, что световые волны, испускаемые источником, находящемся в гравитационном поле, подвержены изменению длины в сторону более длинных волн, т.е. к красному концу спектра. Этот эффект известен как красное смещение. Он был проверен путем исследования света, испускаемого звездами типа белых карликов, содержащих вещество в высокосжатом состоянии. Гравитационный потенциал на поверхности белого карлика значительно больше, чем на поверхности нашего Солнца, это дает возможность проверить этот эффект, предсказанный Эйнштейном. Другие следствия теории гравитации Эйнштейна были получены в последующие годы. Одно из самых ярких — открытие черных дыр, коллапсированных звезд, диаметр которых сжимается до бесконечно малой доли их первоначального состояния. Свет, испускаемый черной дырой, не может покинуть ее, так как он затягивается обратно огромным гравитационным полем, получающимся при сжатии. По существу черная дыра — это точка в пространстве с массой обычной звезды. В настоящее время существование черных дыр признается, и получены некоторые наблюдательные доказательства этого.

Рис. 21. Гравитационная линза. Свет, проходящий от далекого объекта (квазар на рисунке), искривляется сильными гравитационными полями вблизи галактики или черной дыры. Наблюдатель на Земле, продолжая лучи, которые приходят к нему, воссоздает два изображения объекта, как показано на рисунке. Если объект, наблюдатель и галактика расположены совершенным образом, то вся система обладает аксиальной симметрией и изображения представляются кругом с объектом в его центре (круг Эйнштейна)

В течение 1921—1923 гг. Эйнштейн совершил путешествия по США, Европе и Азии. Вайтцман убеждал его присоединиться к сионистскому движению. В 1921 г. он получил Нобелевскую премию по физике, но не за теорию относительности, а «за его служение теоретической физике, и особенно за открытие закона фотоэлектрического эффекта». В следующей главе мы опишем фотоэлектрический эффект.

Важной экспериментальной проверкой специальной теории относительности был отрицательный

результат эксперимента, проведенного в 1887 г. Майкельсоном и Морли, поставленного для обнаружения движения Земли относительно эфира. В конце 19 столетия полагали, что колебания электрических и магнитных полей световой волны должны с необходимостью представлять колебания некоторой среды и что эта среда является знаменитым эфиром, уже введенным Декартом и Гюйгенсом. Электрические колебания эфира идентифицировались со светом, и возникла проблема установить свойства этого эфира. Если, например, источник света движется по отношению к эфиру или наблюдатель движется по отношению к нему, то это движение можно обнаружить. Но эксперимент Майкельсона и Морли показал, что никакой эффект такого движения не обнаруживается. Этот эксперимент является одной из экспериментальных опор теории относительности, хотя представляется, что он не повлиял на работу Эйнштейна в 1905 г. Вероятно, что он не был известен ему в то время. В 1921 г. Д.С. Миллер (1886—1941), который тогда был молодым сотрудником Майкельсона, поставил аналогичный эксперимент на горе Маунт Вильсон в Калифорнии, где располагалась астрономическая обсерватория, и объявил, что он смог наблюдать малые влияния движения Земли на скорость света. Он теоретизировал, что на уровне моря эфир увлекается Землей, а на больших высотах малый эффект «эфирного ветра» может сказаться на распространении света. Эти результаты он опубликовал несколькими годами позже. В то время Эйнштейн посещал Принстон, и когда он услышал об этом, сказал знаменитую фразу: «Бог коварен, но Он не злонамерен».

Результат Миллера вызвал огромную радость у врагов теории относительности. Германские реакционные круги никогда не признавали факт поражения военной машины Кайзера в Первой мировой войне и объясняли его как результат «злобного заговора» евреев и социалистов. Эйнштейн был в их поле зрения. Его пацифистские и социалистские идеи были хорошо известны. Он отказался подписать декларацию немецких профессоров в поддержку вторжения в Бельгию и всегда призывал к заключению мира, даже тогда, когда казалась близкой победа Германии. Разумеется, результаты Миллера оказались ошибочными, что немедленно продемонстрировал Георг Йосс, который выполнил серию отличных экспериментов, подтверждающих предсказания Эйнштейна.

#### Эйнштейн и статистика фотонов

В 1924 г. у Эйнштейна снова начал интересоваться фотонами относительно статистических законов, которым они подчиняются. С. Бозе (1894—1974), в то время лектор по физике в университете Дакка в Восточной Бенгалии (Индия), представил в 1923 г. статью для публикации в престижный английский журнал *Philosophical Magazine*. В ней он давал новое доказательство формулы Планка. Через шесть месяцев редактор информировал его, что статья отвергается, и Бозе 4 июня 1924 г. послал рукопись Эйнштейну в Берлин с письмом, которое начиналось так:

«Уважаемый сэр,

Я осмеливаюсь представить вашему рассмотрению и вниманию статью. Я с волнением ожидаю, что вы думаете о ней... Я не знаю достаточно немецкий для перевода этой статьи и был бы признателен, если вы поможете для ее публикации в *Zeitschrift für Physik*. Поскольку я совершенно неизвестен вам, я не настаиваю на просьбе. Но мы все ваши ученики, пользующиеся обучением у вас благодаря вашим научным сочинениям».

Следует сказать, что уже в 1919 г. Бозе вместе со своим соотечественником М. Т. Саха (1893—1956) опубликовал антологию работ Эйнштейна по теории относительности, первое из собраний на

английском языке. Эйнштейн перевел статью и послал ее в июле 1924 г. в этот журнал, где она и была опубликована под именем Бозе. Эйнштейн добавил заметку следующего содержания:

«По моему мнению вывод Бозе формулы Планка имеет очень важное следствие. Использованный метод дает квантовую теорию идеального газа, которую я еще разработаю в деталях».

Затем он отправил открытку Бозе, отметив, что он рассматривает его работу как очень важный вклад. Работа Бозе была четвертым и последним шагом в истории старой теории квантов (тремя другими были: закон Планка в 1900 г., гипотеза световых квантов Эйнштейна в 1905 г. и теория Бора в 1913 г.). Доводы Бозе освобождали закон Планка от излишних элементов электромагнитной теории и давали вывод из общих сущностей. Он исследовал закон теплового равновесия частиц, а именно фотонов, и открыл, что эти частицы подчиняются новому статистическому закону.

В 1924 г. Бозе получил поддержку для проведения в течение двух лет исследований в Европе и в сентябре прибыл в Париж. Он почувствовал силу одобрения Эйнштейна, когда германское консульство в Калькутте выдало ему визу, не требуя формальной оплаты. По прибытии в Париж он встретился с Полем Ланжевром (1872—1946), который предложил ему возможность работы в лаборатории мадам Кюри. Бозе с удовольствием и весело вспоминал встречу с ней. Мадам Кюри (Мария Кюри-Склодовская (1867—1934) все время говорила по-английски и не давала вставить ни одного слова. Она сказала, что один студент из Индии работал с ней и имел серьезные трудности, поскольку не говорил хорошо по-французски. После этого она предложила Бозе заняться языком в течение шести месяцев и только после этого прийти к ней. У Бозе даже не было шанса сообщить ей, что он учил французский в течение 15 лет!

После такого обескураживающего контакта Бозе познакомился братьями де Бройль (Морисом и Луи) и некоторое время был с Морисом (1875—1960). Однако он все еще очень стремился попасть к Эйнштейну, и 26 октября 1924 г. он написал Эйнштейну письмо, которое начиналось словами:

«Дорогой мастер,

Моя самая сердечная благодарность за ваш труд по переводу моей работы и за ее публикацию. Я увидел публикацию как раз накануне отъезда из Индии. Я послал вам в середине июня вторую работу... Я получил грант для исследовательской работы вне моего университета... Я не знаю, возможно ли мне работать под вашим руководством в Германии...»

Эйнштейн перевел и вторую статью и послал ее в *Zeitschrift*, где она и была опубликована. Однако на этот раз Эйнштейн добавил ремарку, в которой сообщал, что он не может согласиться с заключениями автора и собирается дать свои соображения.

Возможность сотрудничества Бозе с Эйнштейном иссякла уже к январю 1925 г. В июле 1924 г., примерно в то время, когда Бозе, наконец, решил вопрос с начальством университета об отъезде из Дакки для научной работы, Эйнштейн выступил с работой перед Прусской академией, в которой он применил статистический метод Бозе к идеальному газу. Сходство в статистическом поведении между фотонами и частицами газа, которое он обнаружил в этой работе, было в дальнейшем исследовано Эйнштейном в сентябре. Это привело к важным результатам поведения частиц при низких температурах, и в январе 1925 г. Эйнштейн опубликовал вторую работу. В ней он полностью разработал основные идеи и получил статистические законы, которым следуют частицы и фотоны (позднее названные статистикой Бозе—Эйнштейна). После этого он переключил внимание на другие вещи. Эйнштейн обобщил теорию Бозе на газ идентичных частиц, атомов или молекул и предсказал,

что при достаточно низких температурах частицы имеют тенденцию соединиться друг с другом в наименьшем квантовом состоянии системы. Это явление сегодня называется конденсацией Бозе—Эйнштейна и обладает многими необычными свойствами. Ее в течение многих лет безуспешно пытались получить экспериментально, вплоть до 1995 г., когда с помощью лазера впервые удалось наблюдать это состояние двумя группами в JILA в Боулдере (штат Колорадо, США) и в MIT (Массачусетский технологический институт, США). В 1997 г. Э. А. Корнелл, К. Е. Виман и В. Кеттерле получили Нобелевскую премию по физике «за получение конденсата Бозе—Эйнштейна в разряженных газах атомов натрия и за ранние фундаментальные исследования свойств этого конденсата».

После своего приезда в Берлин Бозе 8 октября 1925 г. написал Эйнштейну, прося о встрече, но Эйнштейн был в Лейдене и уже потерял интерес к теме. Он возвратился спустя несколько недель. Когда, наконец, они встретились, встреча была не очень удачная. В результате Бозе получил письмо, позволяющее ему пользоваться обычными привилегиями для студентов в Берлине, включая разрешение брать книги из университетской библиотеки.

Вероятно, из-за того, что он не представил формально диссертации и не посетил Англию (которая в то время была Меккой для индийских ученых), после возвращения в университет Дакки Бозе не сделался профессором. Открытка от Эйнштейна проректору университета с одним лишь предложением, в котором говорилось, что многие в Европе получили пользу от присутствия Бозе, позднее обеспечила ему путь к профессорству, и в 1954 г. Бозе возвратился в Калькутту, где он родился, в звании профессора физики. Его неудачная поездка в Европу подавила его творческий талант, и он не внес более вклада в развитие физики.

#### Эйнштейн в Принстоне

Когда Гитлер пришел к власти в 1933 г., Эйнштейн путешествовал в США. Он решил не возвращаться в Германию. После короткой остановки в Бельгии, в течение которой он аннулировал свое членство в Прусской Академии и в Баварской академии наук в знак протеста против пассивной позиции этих академий в ситуации, когда в Германии подавляются академические свободы и многие ученые и интеллектуалы лишились своих мест по идеологическим причинам. Эйнштейн получил место в новом Институте прогрессивных исследований в Принстоне (США).

Этот институт возник благодаря значительному пожертвованию от Луи Бамберга и его сестры Каролины Бамберг Фулд. Сначала они просили выдающегося американского эксперта по университетам Абрахама Флекснера (1866—1959), организовать медицинский институт. Но он отговорил их, предложив идею организовать институт нового типа, где преподавание, экзамены и присуждение степеней было бы не формальной обязанностью, но где выдающиеся умы, могли бы посвящать себя чистой науке в мирной и свободной атмосфере, с хорошей оплатой и заботой.

Институт открылся 20 мая 1930 г., хотя официальная церемония открытия прошла тремя годами позже. Вместе с Эйнштейном там были еще три профессора: Джеймс Александер (1888—1971), математик в области топологии, Джо фон Нейман (1903—1957), гений в области теоретической и экспериментальной физики, который построил в Принстоне первый компьютер, и Освальд Веблер (1880—1960), специалист в области топологии и дифференциальной геометрии.

Назначение Эйнштейна последовало после ряда встреч с Флекснером. Зимой он был в Калифорнии, где искал кандидатов на академические должности нового института. Ему посоветовали встретиться

с Эйнштейном, который в это время посещал Калифорнийский технологический институт. Эйнштейну сразу же понравилась идея. Ситуация в Германии быстро менялась к худшему. С 1920 г. анти-эйнштейновская ассоциация, группа ученых из так называемых германских натурфилософов, предлагала деньги каждому, кто выступал против физиков евреев, особенно против теории относительности.

Поэтому оба встретились сначала в Оксфорде, в течение второго семестра 1932 г., затем вблизи Берлина, где у Эйнштейна был маленький летний дом (его можно посетить и сегодня). В конце концов, 4 июня 1932 г. Эйнштейн принял приглашения быть первым членом академического штата института.

Во время встречи с Флексером Эйнштейн попросил годовое жалование в три тысячи долларов. «Смогу ли я жить на меньшее?» — спросил он. Соглашение, подписанное в октябре 1932 г., определяло ему содержание в пятнадцать тысяч долларов.

Потом встала проблема помощника. Эйнштейн хотел, чтобы им был В. Майер (1887—1948), австрийский математик, с которым он написал ряд работ. Эйнштейн хотел, чтобы он был назначен профессором. Флексер полагал, что Майер не отвечает нужным требованиям, но Эйнштейн был неумолим. Итак, 17 октября 1933 г. Альберт, его жена Эльза, их секретарь Элен Дюкас (1896—1982) и Вальтер Майер высадились в Нью-Йорке на пути в Принстон.

Здесь он продолжал свои исследования, в основном концентрируясь над созданием того, что он назвал «единая теория» поля, которая, как он надеялся, смогла бы дать глубокое объяснение и гравитации и электромагнетизма, и описать дискретные частицы как стабильные области высокой концентрации полей.

Эйнштейн не преуспел в этих попытках. Кроме этих исследований он иногда снова обращался к теории гравитации 1915 г. и обогатил ее новыми результатами. В 1932 г. он сотрудничал с голландским астрономом В. де Ситтером (1872—1934), занимаясь построением модели расширяющейся Вселенной, которая все еще является возможным кандидатом представления крупномасштабной структуры материального мира.

Эйнштейн, который своими гипотезами световых квантов и удельной теплоемкости внес определяющий вклад в разработку квантовой механики, никогда не принимал ее вероятностную интерпретацию природы. В конце 1927 г. на пятом Сольвеевском Конгрессе разразилась битва с Бором, Борном и Гейзенбергом. Они настаивали, что неопределенность является неизбежной, но Эйнштейн не желал принять это положение и представил серию примеров в поддержку своей точки зрения. Однако Бор и его единомышленники отвечали на все эти возражения. В 1930 г. на шестом Сольвеевском конгрессе, последнем, в котором Эйнштейн принимал участие, вспыхнула полемика и вслед за этим в 1935 г. Эйнштейн со своими двумя коллегами по Институту, Борисом Подольским (1896—1966) и Натаном Розеном (1909—1995) написал работу на четырех страницах, в которой провозглашалась ложность квантовой теории. Эти принципиальные аргументы, известные сегодня, как парадокс Эйнштейна—Подольского—Розена (ЭПР-парадокс), были маленькой бомбой. Бор, глубоко взволнованный, немедленно стал диктовать ответ. Он, однако, понимал, что дело не столь просто. Он начинал с логической линии, затем изменял свой подход и начинал снова. Он не мог точно определить, в чем же была проблема. «Вы понимаете, что мы хотим сказать?» — спрашивал он Леона Розенфельда (1904-1974), американского физика-теоретика, который в то время был его

ассистентом. Ричард Фейнман (1918—1988), лауреат Нобелевской премии по физике 1965 г. вместе с Джулианом Швингером (1918—1994) за метод особых расчетов, известный, как диаграммы Фейнмана, сказал в 1982 г. по поводу ЭПР-парадокса: «Когда я не могу охарактеризовать истинную проблему, тогда я считаю, что никакой истинной проблемы не существует». В настоящее время обсуждения этого парадокса проливает свет на определенные особенности квантово-механической интерпретации природы, которые не были достаточно оценены в прошлом и которые были изучены благодаря использованию лазерного света, получив несомненные подтверждения результатов, следующих из квантовой механики.

В 1936 г. Эйнштейн вынужден был заменить своего любимца В. Майера. Оказалось, что он, как только прибыл в Институт, не постеснялся дистанцироваться от своего шефа. Их сотрудничество выразалось лишь в одной работе, опубликованной в 1934 г., после которой интересы Майера обратились к чистой математике. Таким образом, Эйнштейн в 1936—1937 гг. взял двух новых ассистентов: Петера Бергмана (1915-2002) и Леопольда Инфельда (1893-1968). Он хотел, чтобы они продолжали работать с ним и далее, но возникли административные трудности. В конце концов должность Бергмана была утверждена, а Инфельда — нет. Эйнштейн смирился с этим, а Инфельд в течение лета 1937 г писал книгу. Когда эта книга, «Эволюция физики», вышла в 1938 г., она принесла авторам больше чем те шестьсот долларов, которые Эйнштейн просил для Инфельда от Института.

Совместная работа с Натаном Розеном 1937 г. содержала решение его уравнений поля, которые описывали гравитационные волны. Знаменитая работа в соавторстве с Б. Хофманом (1906—1986) и Л. Инфельдом была посвящена выводу уравнения движения частиц из уравнений гравитационного поля. Даже после своей отставки в 1945 г. Эйнштейн продолжал работать вплоть до самой смерти. Он умер в возрасте 76 лет 18 апреля 1955 г.

Важной характеристикой отношения Эйнштейна к фундаментальным проблемам физики было то, что он задавался вопросами лишь в отношении обоснованности тех концепций и соотношений, которые рассматривались как истинные. В этом отношении он был философом. Согласно его воззрениям, концепции являются свободными изобретениями и аксиомами и фундаментальные законы теории предположительны. Их нельзя вывести индуктивно из эксперимента или наблюдений. С другой стороны, теория должна делать возможным выводы и предсказания, которые можно проверить экспериментом, и это определяет ее ценность. Итак, наука требует трех видов человеческой активности: человеческой изобретательности, логико-математической дедукции, а также наблюдений и эксперимента. Согласно Эйнштейну, процесс создания развивается не только опытом и предварительно существующими теориями, но также чувством структурной простоты и математической красоты.

## ГЛАВА 6

### ЭЙНШТЕЙН И СВЕТ, ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ И ВЫНУЖДЕННОЕ ИСПУСКАНИЕ

В июне 1905 г., когда Эйнштейн опубликовал в т. 17 *Annalen der Physik* свою революционную работу *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt* (об эвристической точке зрения, касающейся возникновения и преобразования света), все были убеждены, что свет состоит из электромагнитных волн. Эйнштейн, однако, в этом усомнился, и выявил двойственную природу света: одновременно подобную и частице, и подобную волне. Хотя

он был довольно критичен к теории Планка, он показал, какие фундаментальные следствия можно извлечь из нее, и тем самым вызвал кризис классической физики. В то время Эйнштейну было 26 лет. Его работа появилась в том же томе журнала, в котором он уже опубликовал две другие фундаментальные работы: одну работу по статистике, относящуюся к броуновскому движению, которая позволяла прояснить старый спор о «физическом» существовании молекул, и другую работу, в которой он представил специальную теорию относительности. Все три статьи сделали этот том журнала *Annalen der Physik* одним из самых выдающихся во всей научной литературе.

### Фотоэлектрический эффект

Эту работу в настоящее время рассматривают как работу Эйнштейна по фотоэлектрическому эффекту. Однако она имеет гораздо большую значимость. В ней Эйнштейн установил из общих принципов статистической термодинамики, что энтропия излучения, описываемая законом распределения Вина, имеет такую же форму, как и энтропия газа элементарных частиц. Эйнштейн использовал этот аргумент для заключения, с эвристической точки зрения, что свет состоит из квантов, каждый из которых содержит энергию, которая дается произведением постоянной Планка на частоту света. Он применил это заключение для объяснения некоторых явлений, среди которых был и фотоэлектрический эффект. Он писал:

«Волновая теория, работая с непрерывными функциями, оказывается корректной для представления чисто оптических явлений и вряд ли будет заменена какой-либо другой теорией. Однако, следует иметь в виду, что оптические наблюдения относятся к усредненным по времени значениям, а не к мгновенным значениям. Возможно, что, несмотря на полное экспериментальное подтверждение теории дифракции, отражения, дисперсии и др., теория света, основанная на непрерывных функциях, может привести к противоречиям, если мы применим ее к явлениям получения и преобразования света. В самом деле, мне кажется, что наблюдения в области «черного тела», фотолюминесценции, генерации катодных лучей ультрафиолетовым излучением и другие группы явлений, связанных с генерацией и преобразованием света, могут быть лучше поняты на основе предположения, что энергия в свете распределена в пространстве не непрерывно. Согласно представляемому теперь же предположению, энергия в пучке света, испускаемого точечным источником, не распределяется непрерывно на все больший и больший объем в пространстве, но заключена в конечном числе квантов энергии, локализованных в точках пространства, которые распространяются, без какого-то бы ни было дробления, и испускаются и поглощаются лишь как целое».

Эйнштейн использовал слова «кванты энергии». Термин «фотон» был введен значительно позже, в 1926 г., американским химиком Г. Н. Льюисом (1875—1946), одним из отцов современной теории химической валентности.

Получение катодных лучей (т.е. отрицательно заряженных частиц, определенных как электроны) с помощью ультрафиолетового света было фотоэлектрическим эффектом, который был открыт в то время. Ирония заключалась в том, что это явление было описано в 1887 г. Генрихом Герцем во время его блестящего подтверждения электромагнитной (волновой) теории света, полученного с помощью его открытия электромагнитных волн. В следующем году это явление было исследовано Вильгельмом Гальваксом (1862—1947), который, в частности, показал, что определенные металлические поверхности теряют некоторый электрический заряд, становясь положительно заряженными, при облучении этих поверхностей ультрафиолетовым светом. Позднее независимо

друг от друга Дж. Дж. Томсон и Филипп Ленард (1862— 1947) показали, что этот эффект получается в результате испускания отрицательно заряженных частиц, электронов, металлической поверхностью. Поскольку первоначально металл не имеет избыток какого-нибудь заряда, то если испускаются отрицательные заряды, на металле должен оставаться положительный заряд, который компенсировался отрицательным зарядом. Ленард продолжил исследования этого явления и в 1902 г. представил детальные результаты в пространной статье, опубликованной в *Annalen der Physik*. В этой статье он сообщил о двух важных фактах. Первый факт заключался в том, что электроны с поверхности определенного металла эффективно получаются лишь при использовании света определенной частоты. Второй факт был связан со скоростью (кинетической энергией) испускаемых электронов, которая не зависела от интенсивности облучаемого излучения.

Эйнштейн в своей работе дал объяснение фотоэлектрического эффекта, как пример применения его теории световых квантов. Согласно ему, энергия световых волн распространяется не как волна, но скорее как частица (Эйнштейн назвал ее «квантом энергии»), которая имеет энергию обратно пропорциональную длине волны света. Число квантов пропорционально интенсивности света. Чем интенсивней волна, тем больше квантов она содержит. Когда квант света сталкивается с электроном в металле, он сообщает этому электрону всю свою энергию и исчезает. Электрон тратит часть этой энергии на то, чтобы покинуть металл, а остаток идет на кинетическую энергию. Интенсивность светового пучка, будучи пропорциональной числу квантов, не влияет на энергию электронов, но определяет их полное число.

В письме своему другу Конраду Хабихту (1876—1958) Эйнштейн писал о своей работе:

«Она относится к излучению и к энергетическим характеристикам света и, как вы увидите, является очень революционной».

Несмотря на такую декларацию, в обсуждениях физической интерпретации закона Вина и при изложении концепции квантов света, Эйнштейн не считал, что он порывает с традициями. Вводя квант света, он применял когерентный подход к статистическим методам, относящимся к теории теплового излучения. Однако он назвал свое введение гипотезы световых квантов «революционным» шагом, поскольку он полагал, что это противоречит электродинамике Максвелла, требующей, чтобы излучение было непрерывным потоком энергии в пространстве.

Чтобы понять, как Эйнштейн смог построить такую теорию как раз в то время, когда Планк старался продемонстрировать, что его теория квантования осцилляторов была не более чем уловкой для вычислений, нужно рассмотреть личностные особенности этих двух ученых. Они придерживаясь разных точек зрения. Планк был знаменитым и зрелым ученым, который стремился поддержать свой престиж в академических кругах, и избегал выходить за пределы тех научных теорий, которые были хорошо известны в то время. Все его усилия были сконцентрированы на том, чтобы сделать свое открытие частью объяснения, согласующегося с теориями Максвелла и Больцмана.

Молодой, без предубеждений и академических обязательств, Эйнштейн в то время работал в Швейцарском Патентном бюро. Он мог идти на риск. Как было описано М. Кляйном[1], он «не был подвержен сильному влиянию физики девятнадцатого века и осмелился бросить вызов успешной теории света, которая была ее наиболее характерной особенностью». Вместо этого он утверждал, что свет может, и для многих целей должен, рассматриваться как состоящий из собрания независимых частиц (квантов) энергии, которые ведут себя как частицы газа. Эта гипотеза световых квантов

означала возвращение и модернизацию корпускулярной теории света, которая была предана забвению под тяжестью всех доказательств в пользу волновой теории, накопленных в течение почти ста лет.

Вопреки тому, что можно было бы предположить, гипотеза Эйнштейна не была «развитием» теории черного тела Планка. Эйнштейн знал работу Планка, но не разделял полностью аргументацию. В 1905 г. он не использовал теорию Планка, не использовал его формулу и не ссылался на его гипотезу. Он следовал другим путем и даже не использовал букву  $h$  в выражении для энергии кванта света — т.е. произведение постоянной Планка на частоту, но использовал комбинацию констант, в которых появлялись константа закона идеальных газов, число Авагадро и константа, которая уже имеется в законе распределения излучения черного тела, даваемого формулой Вина.

Все это, однако, не означает то, что идеи Планка отвергались, и то, что кванты света были изобретены без предшествующих дискуссий об «элементах энергии», а просто то, что световые кванты не являются прямым выводом или обобщением элементов энергии. Точно также гипотеза световых квантов отнюдь не мотивировалась необходимостью объяснить фотоэффект, который в 1905 г. не рассматривался как проблема. Вместо этого Эйнштейн искал ответ на общую проблему, которая, как мы видели, так же была выдвинута Рэлеем, и найти причину очевидной невозможности совместить излучение черного тела с теорией Максвелла. Чтобы подтвердить соображения, к которым пришел, он и использовал определенные экспериментальные факты, включая результаты экспериментов по фотоэлектрическому эффекту.

Объяснение фотоэлектрического эффекта на основе понятия фотонов потребовало много лет до полного принятия. Наилучшее подтверждение теории Эйнштейна пришло из измерений, которые произвел американский физик Роберт Эндрю Милликен (1868—1953) в период 1916—1926 гг. Милликен родился в Моррисоне (Иллинойс, США) и получил докторскую степень по физике в Колумбийском университете. Затем в 1896 г. он отправился в Европу, где посетил университеты Берлина, Гёттингена и Парижа. Он встретился с Максом Планком, Вальтером Нернстом и Анри Пуанкаре. В 1896 г. он был ассистентом Альберта А. Майкельсона в университете Чикаго, где и стал профессором в 1910 г. В 1921 г. он перешел в Калифорнийский технологический институт. В 1923 г. он получил Нобелевскую премию по физике «за его прецизионные измерения заряда электрона и постоянной Планка».

Милликен, который первоначально не верил в теорию Эйнштейна, дал лучшие проверки ее достоверности и получил Нобелевскую премию по физике также за эти результаты. Окончательное доказательство пришло позднее, когда американский физик Артур Комптон (1892—1962) обнаружил в 1922 г., что рентгеновские лучи рассеиваются свободными электронами так, как если бы они были частицами с энергией  $hf$  ( $f$  — частота излучения) и с импульсом  $hf/c$ , как и предсказывал Эйнштейн. В частности, рассеянный квант имеет частоту, отличную от частоты падающего излучения, и эта частота изменяется с углом, под которым он рассеивается (эффект Комптона, за который он получил Нобелевскую премию в 1927 г.). Это факты, которые невозможно объяснить в рамках волновой теории. Но в то время гипотеза Эйнштейна световых квантов уже была полностью признана. Но в самом начале научный мир того времени не верил в теорию фотоэлектрического эффекта Эйнштейна. В 1913 г. в письме, в котором предлагалось избрать Эйнштейна членом Прусской академии и присудить профессорскую степень и в котором превозносились его работы и его

способности, Макс Планк писал: «То, что он иногда не достигает цели в своих спекуляциях, как, например, в своей гипотезе световых квантов, не может использоваться против него».

Несколькими годами позднее, в 1916 г., Милликен, описывая свои экспериментальные подтверждения уравнения Эйнштейна для фотоэлектрического эффекта, писал о той же гипотезе: «Я не пытался представить основу для предположения, которое в то время было почти ничто».

Наконец, Эйнштейн получил Нобелевскую премию в 1921 г. не за свою теорию относительности, а как раз за свою теорию фотоэлектрического эффекта.

В 1906 г. Эйнштейн в своей работе, озаглавленной *Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption* (о теории испускания и поглощения света), глубоко вникнул в способ, каким Планк вывел закон черного тела, и пришел к выводу:

«Поэтому мы должны рассмотреть следующий закон на основе квантовой теории Планка. Энергия элементарного резонатора (осциллятора) может принимать только величины, которые кратны целым числам (от энергии кванта света); энергия резонатора изменяется скачками путем поглощения или испускания в целых числах [от той же самой величины]».

Этими словами Эйнштейн обострил внимание на том, что он рассматривал главным в теории излучения Планка, а именно, факт, что резонаторы в полости изменяют свою энергию только конечными величинами, т.е. не непрерывно, а скачками. Двумя годами позднее Лоренц пришел к такому же заключению, что Планк ввел совершенно новую гипотезу, которая противоречит обычным законам электродинамики.

В 1909 г., четыре года после его работы по фотоэлектрическому эффекту, Эйнштейн опубликовал работу, в которой он продемонстрировал, что закон излучения Планка означает, что излучение проявляет комбинированную волновую и корпускулярную природу. Этот результат был первым ясным указанием на т.н. волново-частичный [2] дуализм, который позднее будет широко обсуждаться в квантовой механике.

В ретроспективе интересно отметить, что в споре XVII в., о волновой или корпускулярной природе света между двумя гигантами (Ньютон и Гюйгенс) оба оппонента подходили каждый своим путем к двусторонней проблеме.

Индукцированное излучение

Квантовая теория получила полное признание на первом Сольвеевском конгрессе, состоявшемся в 1911 г. при финансовой поддержке бельгийского ученого Эрнеста Сольве (1883—1922), который разработал промышленный способ производства соды. Этот конгресс был организован Вальтером Нернстом в 1911 г. с целью спровоцировать открытую дискуссию о «кризисе», вызванном введением в физику квантовых идей. Оставляя развитие квантовой теории, мы теперь вернемся к исследованиям света Эйнштейном.

Эйнштейн был сильно увлечен проблемой природы света, и в 1915—1916 гг. опубликовал работу *Strahlung-Emission und Absorption nach der Quantentheorie*, которая является фундаментальной и кардинальной в нашей истории. Он продолжал размышлять над теорией черного тела Планка и искусственным в некотором смысле способом, каким он решил проблему, введя концепцию квантования энергии. Затем, в 1916 г., он опубликовал новое, крайне простое и изящное доказательство закона Планка и в то же самое время получил важные результаты, касающиеся испускания и поглощения света атомами и молекулами. В этой работе впервые была введена

концепция индуцированного излучения, которая является фундаментальной для лазерного эффекта. Он мастерски объединил «классические законы» с новыми концепциями квантовой механики, которая в то время развивалась под руководством Бора.

Эйнштейн рассматривал молекулы, заключенные в сосуде. Согласно постулатам Бора, разработанным к тому времени, каждая молекула может иметь лишь дискретный набор состояний с определенными энергиями. Если большое число таких молекул составляют газ при некоторой температуре, то вероятность одной молекулы находиться в определенном состоянии можно установить, применяя законы статистической механики, установленные Гиббсом, Максвеллом и Больцманом. Эйнштейн предположил, что молекулы обмениваются энергией с излучением, которое присутствует в объеме за счет трех процессов.

Первый процесс, который мы сегодня называем «спонтанным излучением», происходит, если молекула находится не в низшем состоянии энергии, а в некотором высшем состоянии. Тогда она будет переходить в состояние с низкой энергией, испуская фотон с энергией, которая точно равна разности энергий этих двух состояний (рис. 22, а). Этот процесс девозбуждения является процессом, описываемым Бором для молекулы или возбужденного атома скачком переходить в состояние с низшей энергией. Эйнштейн предположил, что этот процесс происходит случайным образом, подобным тому, как радиоактивный атом распадается во времени.

Второй процесс может рассматриваться как обратный первому и является процессом поглощения. Молекула, находящаяся в определенном состоянии энергии, может перейти в более высокое состояние, если ударится с фотоном, имеющим энергию, как раз равную разности между двумя состояниями (рис. 22, б). Этот процесс также рассмотрен Бором. В этом случае фотон исчезает (поглощается) и молекула получает всю его энергию, чтобы перейти на высшее энергетическое состояние.

Третий процесс был впервые введен Эйнштейном и сегодня называется «вынужденным (индуцированным) излучением». Согласно этому процессу, если молекула находится в высшем энергетическом состоянии и с ней сталкивается фотон с энергией, в точности равной разности между состояниями, то она может перейти в низшее состояние. При этом молекула испускает фотон с той же самой энергией, а первый фотон продолжает свое движение свободно, просто «стимулируя» молекулу девозбудиться (рис. 22, в).

Рис. 22. Верхняя часть (а). Электрон, сидящий на верхнем уровне, спонтанно сваливается на нижний уровень (спонтанное излучение), испуская разность между их энергиями в виде фотона, который испускается случайным образом. На средней части (б) электрон подбрасывается с нижнего уровня на верхний уровень фотоном, который имеет энергию, равную разности энергий этих уровней и которая поглощается (процесс поглощения). Нижняя часть (в). Вынужденное излучение, в результате чего фотон с надлежащей энергией (которая равна разности энергий уровней) ударяет электрон, который сидит на верхнем уровне, вынуждая его спрыгнуть на нижний уровень, испуская при этом другой фотон, идентичный тому, что вызвал этот вынужденный процесс

Если мы теперь предположим, что молекулы могут взаимодействовать с излучением этими тремя процессами и что это взаимодействие не изменяет распределения энергии, которое зависит только от температуры и определяется законом Максвелла—Больцмана, то мы немедленно получаем закон Планка вместе со связанными коэффициентами, которые описывают эти три процесса. Эти

коэффициенты сейчас называются коэффициентами Эйнштейна и определяют вероятности переходов. Квантовая теория Бора не дает указаний на законы, управляющие такими переходами, и концепция вероятностей переходов происходит из работы Эйнштейна.

Вывод Эйнштейном закона распределения Планка из введенных коэффициентов вероятности поглощения, спонтанного и вынужденного излучений, позволяет связать эти процессы через эти коэффициенты. Эйнштейну не удалось выразить их через характеристические параметры атома. Такое выражение было получено более чем десятью годами спустя П.А.М. Дираком, который использовал в то время уже полностью разработанную квантовую механику. Однако и выражения, найденные Эйнштейном, устанавливали, что коэффициенты поглощения и вынужденного излучения были равны и что отношение между спонтанным излучением и поглощением обратно пропорционально кубу длины волны. Поскольку вероятность спонтанного излучения можно экспериментально измерить, формулы Эйнштейна могут быть проверены путем сравнения интенсивностей поглощения и спонтанного излучения спектральных линий.

Еще один важный результат, установленный в работе Эйнштейна, заключался в том факте, что когда атом или молекула изменяют свою энергию с помощью излучения, поглощая или испуская квант света, получается также изменение импульса, точно как при ударах бильярдных шаров. Атом, который испустил фотон в некотором направлении, получает отдачу в противоположном направлении, точно также как отдача ружья при выстреле.

Некоторое время спустя, в 1923 г., немецкий физик Вальтер Боте (1891— 1957) использовал теорию Эйнштейна испускания и поглощения света, чтобы показать (среди других вещей), что квант света, испущенный в процессе вынужденного излучения, кроме того, что он имеет такую же энергию, как и квант, который его индуцировал, распространяется в том же направлении, т.е. обладает тем же импульсом, что и индуцирующий квант. Эта особенность является именно той, которая в точности необходима для процесса усиления. Действительно, используя классический язык, это означает, что волна, распространяющаяся в среде, содержащей возбужденные атомы или молекулы, будет дополняться волной, испускаемой в индуцированном процессе, т.е. будет усиливаться.

Однако в течение почти 30 лет концепция вынужденного излучения использовалась лишь теоретически и не получала внимания с экспериментальной точки зрения. Даже в 1954 г. В. Гайтлер (1904—1981) в своей классической монографии по квантовой теории излучения отвел очень малое место этому явлению.

Роль вынужденного излучения в теории дисперсии света

Используя результаты Эйнштейна, физики-теоретики смогли построить квантовые теории рассеяния света и дисперсии.

Как мы уже говорили о преломлении света призмой, лучи света, которые относятся к различному цвету, отклоняются на разные углы, что связано с разной скоростью их распространения. Для описания этого явления, удобно ввести величину, которая называется показателем преломления и представляет отношение между скоростью света в вакууме к скорости света в среде. Используя эту величину, закон преломления можно выразить, говоря, что синус угла падения, деленный на синус угла преломления, равен отношению показателя преломления второй среды к показателю преломления входной среды.

Рис. 23. Явление дисперсии. На рисунке показано изменение показателя преломления прозрачного

стекла в зависимости от длины волны, выраженной в нанометрах ( $1\text{ нм} = 10^{-9}\text{ м}$ )

Явление зависимости скорости распространения света (т.е. показатель преломления) от длины волны называется дисперсией света (рис. 23). Причина, почему свет разного цвета распространяется в одной и той же среде с разными скоростями, была открыта благодаря исследованию того, как электроны в атомах испускают свет. Простейшей моделью может быть система, в которой электрон в атоме совершает регулярные движения вперед и назад, подобно маятнику часов. Такое движение называется в физике периодическим. Во время своего движения электрон испытывает ускорение и, поэтому, согласно уравнениям Максвелла, должен испускать излучение. Все это можно представить простой моделью, в которой электрон упруго связан с атомом, как если бы он был связан пружиной (гармонический осциллятор). Эта модель уже использовалась для описания испускания излучения черным телом. Теперь она используется для объяснения испускания и поглощения электромагнитного излучения веществом.

Чтобы объяснить, почему атом может испускать многие частоты, можно предположить, что он состоит из многих осцилляторов, способных испускать или поглощать определенные частоты, и что именно они и обнаруживаются на эксперименте. На основе такого подхода П. Друде, В. Фойхт (1850—1919) и позднее Х. А. Лоренц разработали теорию дисперсии, которая была в хорошем согласии с экспериментом и давала удовлетворительное объяснение дисперсии и поглощения света. Изучая математически отклик осцилляторов на электрическое поле волны, можно вывести показатель преломления и его зависимость от длины волны. Получается интересный результат, показывающий, что на тех длинах волн, которые далеки от тех, на которых атом поглощает, показатель преломления равен единице, т.е. свет распространяется с той же скоростью, что и в вакууме, и среда не оказывает на него влияния. Однако когда длина волны приближается к той, на которой атом может поглощать, показатель преломления уменьшается (когда поглощение увеличивается) и после достижения минимума снова начинает увеличиваться до единицы на длине волны, на которой атом поглощает (но мы не можем выявить это, поскольку весь свет поглощается). Далее, когда длина волны продолжает увеличиваться, показатель преломления растет, достигает максимума, а затем возвращается к единице в области далекой от поглощения. Это именно то, что и наблюдается на эксперименте. Поведение показателя преломления между минимумом и максимумом очень трудно для измерений, так как это область сильного поглощения. Она указывается как аномальная дисперсия, поскольку в этой области показатель преломления увеличивается при увеличении длины волны, вместо того, чтобы уменьшаться (нормальная дисперсия).

Классические уравнения, получаемые при расчетах, были в очень хорошем согласии с экспериментом и давали удовлетворительную интерпретацию дисперсии и поглощения. Однако когда теория Бора стационарных состояний отвергла классическую теорию упруго связанных электронов, эти формулы, несмотря на их *de facto* правильность, полностью потеряли свое теоретическое оправдание. Первые попытки сформулировать теорию дисперсии в терминах квантово-механических концепций, предпринятые П. Дебаем (1881—1958), А. Зоммерфельдом (1868—1951) и Ч. Дэвиссоном (1881—1958), оказались неудовлетворительными главным образом из-за того, что теперь в рамках новой модели атома, при приложении электрического поля световой волны, колебания совершались только, когда электрон возмущался со своей стационарной орбиты. В этом случае он начинал колебаться вокруг положения равновесия с частотой, которая, очевидно,

очень отличается от той, что соответствует переходу с одной орбиты на другую.

Первый корректный шаг к квантово-механической интерпретации дисперсии был сделан Ладенбургом. Рудольф Вальтер Ладенбург играет важную роль в нашей истории. Как мы увидим, он очень близко подошел к открытию усиления за счет вынужденного излучения, которое является основой работы лазеров.

Ладенбург родился в Киле (Германия) 6 июня 1882 г. и скончался в Принстоне (Нью Джерси, США) 3 апреля 1952 г. Он был младшим из трех сыновей известного химика Альберта Ладенбурга. Учился в школе г. Бреслау, где его отец, автор ряда важных работ по органической химии, был профессором химии в местном университете. В 1902 г. Ладенбург отправился в Мюнхен, и в 1906 г. защитил диссертацию по вязкости под руководством Рентгена. С 1906 по 1924 г. в университете Бреслау он был сначала доцентом, а потом профессором. За это время он проводил исследования фотоэлектрического эффекта и подтвердил, что энергия фотоэлектрона не зависит от интенсивности света, но пропорциональна его частоте.

В 1911 г. он женился и тремя годами позже поступил на службу в армию, в 1914—1918 гг. выполнял исследования по использованию звуковых сигналов для обнаружения целей (сонар). В 1924 г. он поступил в Институт Кайзера Вильгельма в Берлине по приглашению директора Ф. Габера (1868—1934), нобелевского лауреата по химии (1918 г.). В этом престижном институте, где также работал Эйнштейн, он оставался до 1931 г. в должности руководителя физического отдела, после чего перешел в Принстон на кафедру физики приемником Карла Комптона (1887—1954) брата Артура.

После Первой мировой войны Ладенбург искал способ связать постулаты Бора об излучении и поглощении света атомами с моделью гармонических осцилляторов. Хотя он не сделал ясных упоминаний этого, он предположил, что когда атом возмущается, электрон не колеблется вокруг своей орбиты, как следовало бы ожидать из классических концепций, но падает на нижний уровень в согласии с моделью Бора, и этот процесс можно описать классически, как если бы электрон был бы маленьким гармоническим осциллятором, который колеблется как раз с частотой перехода.

Введение коэффициентов Эйнштейна поглощения, спонтанного и вынужденного излучения позволило ему предложить теорию, способную объяснить оптические свойства вещества. Он начал в 1921 г. с вывода выражения, которое позволило ему найти для каждого атома, сколько электронов участвует в оптическом явлении (это число он назвал числом дисперсных электронов), используя коэффициент Эйнштейна для спонтанного излучения. Он получил это число, вычисляя энергию, которая излучается и поглощается набором атомов, находящихся в тепловом равновесии с излучением. При этом использовалась модель осциллятора, с одной стороны, и квантовая теория Бора — с другой. Согласно принципу соответствия Бора, результат этих двух расчетов, хотя и совершенно различных, должен был быть тем же самым. Итак, путем уравнивания этих результатов, было найдено соотношение между числом электронов, которые участвуют в поглощении и излучении, и коэффициентом Эйнштейна, который описывает спонтанное излучение атомов. Число электронов, участвующих в этих процессах, можно определить из экспериментальных измерений излучения, поглощения, аномальной дисперсии и др. Тем самым можно определить вероятность, с какой происходят эти переходы. Ладенбург использовал этот результат для измерений, которые он выполнил с водородом и натрием в 1921-1923 гг.

В 1923 г. он вместе с Ф. Райхе (1883—1963) вывел соотношение, которое связывает показатель преломления на данной длине волны с коэффициентом Эйнштейна для спонтанного излучения. Однако эта формула оказалась неполной, так как она не включала эффект вынужденного излучения. Он был учтен введением соответствующего члена Крамерсом и Гейзенбергом. Фундаментальный шаг был сделан в 1924 г. Крамерсом, который модифицировал формулу, полученную Ладенбургом, и показал, что необходимо ввести некоторый член для точного учета спонтанного излучения.

Хендрик Антон Крамере родился 17 декабря 1894 г. в Роттердаме в семье врача. Он обучался в Лейденском университете под руководством П. Эренфеста (1880—1933), который с 1912 г. занял место Лоренца. В 1916 г. Крамере отправился в Копенгаген, для работы с Нильсом Бором. Когда в 1920 г. открылся Институт Теоретической Физики Бора, Крамере был сперва ассистентом, а затем в 1924 г. лектором. В 1926 г. он принял должность заведующего кафедрой теоретической физики в Утрехте, а в 1934 г. вернулся в Лейден как приемник Эренфеста, который в сентябре 1933 г. покончил жизнь самоубийством. С 1936 г. вплоть до своей смерти 24 апреля 1952 г. Крамере преподавал в Лейдене, и посетил ряд стран, включая США.

В Копенгагене Крамере работал над проблемой дисперсии. В 1924 г. он написал выражение, которое вынужденное излучение было принято во внимание. Основной идеей его работы было то, что дисперсию не следует вычислять, рассматривая реальную орбиту электрона, классически взаимодействующего с электромагнитной волной. Вместо этого атом заменяется набором гипотетических осцилляторов, чьи частоты соответствуют скачкам между стационарными состояниями модели Бора. Таким образом, каждый осциллятор соответствует одному из возможных атомных переходов. Набор этих фиктивных (виртуальных) осцилляторов был назван Альфредом Ланде (1888—1975) «виртуальным оркестром». Таким образом, этот виртуальный оркестр является формальной заменой для излучения и, тем самым, неявно становится представлением самого квантового излучателя.

Разумеется, при этом возможно иметь положительные члены, которые соответствуют переходу из состояния с низшей энергии в состояние с высшей энергией, который характеризуется поглощением фотона, и отрицательные члены, которые соответствуют обратному переходу с высшего на низшее состояние, с испусканием фотона. Отрицательный вклад добавляет к дисперсии то, что мы укажем как «отрицательная дисперсия», из-за излучающих осцилляторов, и аналогичен отрицательному поглощению, представляемому коэффициентом Эйнштейна для вынужденного излучения. Т.е., как писал Крамере в своей работе в 1925 г.: «Световые волны на этой частоте, проходя через большое число атомов в рассматриваемом состоянии, будут увеличиваться в интенсивности».

Используя весьма изощренную спектроскопическую технику, Ладенбург и его сотрудники изучили эффект отрицательной дисперсии в 1926 и 1930 гг. В одном из этих исследований, выполненных в сотрудничестве с Г. Копферманом (1895—1963), Ладенбург исследовал дисперсию газа неона вблизи его красных линий испускания. Неон возбуждался в стеклянной трубке электрическим разрядом, примерно так, как это делается сейчас в рекламных устройствах. Была измерена дисперсия как функция интенсивности от величины тока разряда. Они обнаружили, что при увеличении тока выше некоторого значения, дисперсия уменьшается (т.е. падает разница от показателя преломления, равного единице). Убедительно наблюдалось, что эффект отрицательной дисперсии можно объяснить уменьшением дисперсии, поскольку увеличивалось число атомов в высшем состоянии.

Эти эксперименты явились первым экспериментальным доказательством существования отрицательных членов в уравнении дисперсии. Если бы эти измерения были бы продолжены систематически, усиление за счет вынужденного излучения, вероятно, могло бы быть получено в то время.

Другие исследователи изучали эффекты вынужденного излучения. Одним из них был Дж. ван Флек (1899—1980), один из наиболее выдающихся американских физиков-теоретиков среди основателей современной теории твердого тела и, в частности, магнетизма. Он получил свою докторскую степень в Гарварде в 1922 г. за первую в Америке диссертацию по квантовой механике, и в 1977 г. получил вместе с Н. Ф. Мотом и П. В. Андерсоном Нобелевскую премию за «квантово-механическое описание магнитных свойств вещества». Другим был американец Р. Толмен (1881—1948) — специалист по теории относительности и статистической механики, который открыл эффект, демонстрирующий существование свободных электронов в металлах. Они наблюдали, что вынужденное излучение, названное ван Флеком «индуцированным излучением» может привести к отрицательному поглощению, и Толмен писал, что «...молекулы, находящиеся в верхнем состоянии, могут возвратиться в нижнее квантовое состояние таким образом, что первоначальный пучок усиливается за счет «отрицательного поглощения». После столь ясной основы для изобретения лазера Толмен сказал, что в экспериментах по поглощению, которые обычно выполняются, величиной отрицательного поглощения можно пренебречь.

Причина, почему ученые считали, что явления, связанные с вынужденным излучением, не дают существенных экспериментальных эффектов, заключается в тех следствиях, которые получаются при использовании закона Максвелла-Больцмана (выведенного в конце 19 столетия), который устанавливает вероятность нахождения при равновесии системы, обладающей определенной энергией. Этот закон, используемый в нашем случае для набора атомов, находящихся в термическом равновесии, в основном или в возбужденном состоянии, утверждает, что число атомов в возбужденном состоянии всегда много меньше числа атомов, находящихся в основном состоянии. В природе все физические системы находятся в тепловом равновесии или очень мало отличаются от него и быстро в него возвращаются. Поэтому в случае атомов, следует ожидать, что число возбужденных атомов всегда будет малым по сравнению с атомами, находящимися в основном состоянии. Тем самым разумно полагать, что эффект вынужденного излучения, который требует наличия возбужденных атомов, будет очень мал.

Позднее, в 1940 г., российский ученый В. А. Фабрикант в своей докторской диссертации показал, что если число молекул в возбужденном состоянии могло бы быть больше, чем число молекул в основном состоянии, то могло бы быть усиление излучения. Однако эта диссертация не была опубликована и, кажется, не имела последствий даже в России. Его предположение стало известным только тогда, когда после изобретения лазера Фабрикант получил российский патент.

В конце концов в 1947 г. У. Лэмб (г. р. 1913) и Р. Ризерфорд (г. р. 1912) захотели проверить точность предсказания Поля Дирака об энергетических уровнях и спектральных линиях водорода.

Предсказание Дирака утверждало, что атом водорода имеет два возможных состояния с равными энергиями. В знаменитом эксперименте, сделанном при изучении разряда в водороде, эти исследователи обнаружили, что имеется маленькое различие между этими энергетическими уровнями. Этот «лэмбовский сдвиг» показал, что нужна ревизия теории взаимодействия электрона с

электромагнитным излучением. За этот результат Лэмб в 1955 г. получил Нобелевскую премию по физике, которую он разделил с Поликарпом Куршем. В приложении к своей работе, опубликованной в 1950 г., Лэмб и Ризерфорд, обсуждая результаты, указали, что в их эксперименте могли быть осуществлены условия достижения инверсной населенности (т.е. больше возбужденных атомов, чем атомов, находящихся в основном состоянии). Однако они заключили, что их расчеты были слишком оптимистичны, и они не предприняли усилий для дальнейших проверок. Позднее Лэмб писал, что в то время концепция отрицательного поглощения и ранние исследования были новыми для них и что в любом случае их интересы были принципиально устремлены на изучение тех вещей, которые принесли ему Нобелевскую премию. По этой причине они не исследовали тщательно аспекты проблемы, связанной с вынужденным излучением.

## ГЛАВА 7

### МИКРОВОЛНЫ

Мы теперь возвращаемся к концу 19 столетия, во времена сразу же после публикации (1873 г.) знаменитой работы *Treatise on Electricity and Magnetism* Максвелла.

Несмотря на прогресс, сделанный Максвеллом и его первыми последователями в теории электромагнитных колебаний, связь между классической электродинамикой и теорией света не была найдена, кроме интуитивной идеи Максвелла, что электромагнитные волны и световые волны имеют одну природу. Ирландский физик Джордж Френсис Фитцджеральд (1851 — 1901) заложил первый камень в 1882 г., указав, что если унификация, указанная Максвеллом, правильна, то должна быть возможность генерировать излучаемую энергию чисто электрическими способами. Он утверждал: «Представляется высоко вероятным, что энергия переменных токов частично излучается в пространство и, тем самым, теряется для нас», обращая внимание только на отрицательную сторону явления, и описывал методы, с помощью которых можно было бы получить излучаемую энергию. Однако он замечал, что трудность лежит в обнаружении таких волн, когда они будут получены, поскольку подходящих детекторов еще не существовало.

Экспериментальное открытие электромагнитных волн

Параллельно с теоретическими изучениями уравнений Максвелла проводились экспериментальные исследования по генерации электрических колебаний, получаемых при разряде обычного конденсатора в электрической цепи, и выявляемые как осциллирующий ток в этой цепи. С 1847 г. Герман фон Гельмгольц доказал, что в некоторых случаях разряд конденсатора должен носить колебательный характер. Вильям Томсон в 1853 г. дал математическую формулу, устанавливающую, при каких параметрах компонентов цепи в ней получают колебания.

Работая с колебательными цепями такого вида, Генрих Герц, молодой и тогда неизвестный немец, добился успеха в генерировании и обнаружении электромагнитных волн.

Генрих Герц (1857—1894) родился в Гамбурге. Он был сыном прокурора, ставшего позднее сенатором. Будучи блестящим студентом, он в равной степени преуспевал и в гуманитарных дисциплинах, и в науках. Также он показал большие способности в проектировании и создании научной аппаратуры. Предполагалось, что молодой Герц последует традициям семьи в области права, но с десяти лет он стал интересоваться естественными науками и после обучения в ряде школ решил изучать инженерное дело в Дрезденском политехникуме в 1876 г. Когда ему исполнилось 20, он был призван в армию. После службы он решил закончить свое инженерное обучение в Мюнхене,

но вскоре оставил инженерное поприще ради физики. В 1878 г. он поступил в Берлинский университет для работы под руководством Гельмгольца и Кирхгофа и в 1880 г. получил докторскую степень.

Герман фон Гельмгольц переехал в Берлин в 1870 г. из Гейдельберга, сменив кафедру физиологии на кафедру физики. В течение многих лет Гельмгольц интересовался физическими свойствами организмов и биологическими процессами, в частности процессами ощущений. Эти изучения убедили его в том, что полное описание процессов, касающихся нервной системы, требует понимания обмена энергией в живых телах, и важную роль играет термодинамика и электричество. Здесь уже были важные достижения, включающие закон сохранения энергии. Когда он приехал в Берлин, то начал серию исследований в области электричества, и Герц, который появился в 1878 г., принял участия в этом деле. Ему посчастливилось обратить на себя внимание Гельмгольца, который, после получения Герцем ученой степени, назначил его своим ассистентом. В 1883 г. Герц стал по рекомендации Кирхгофа приват-доцентом Киле, а в 1885 г. стал профессором физики в Карлсруе. Для этого университета требовался кто-нибудь, кто мог бы преподавать электрические технологии. В то время последние успехи в передаче энергии, электрический свет и другие применения электричества сделали электричество принципиальной технологией. Работы Герца, уже сделанные в этой области, а также поддержка Гельмгольцем помогли ему получить это место. Герц скончался очень молодым от хронического заражения крови в тот же год, в который скончался его покровитель Гельмгольц.

Как часто случается, Герц пришел к открытию электромагнитных волн, первоначально не стремясь их обнаружить.

В 1879 г. Берлинская Академия наук установила награду за исследование проблемы экспериментально установить соотношение между изменяющимися электрическими полями и откликами материалов на эти поля (поляризуемость). В это время Герц занимался электромагнитными исследованиями в Берлинском Физико-техническом институте и его наставник Гельмгольц привлек его внимание к этой проблеме. Первоначально Герц подошел к изучению электрических колебаний, используя для их получения лейденскую банку (вид электрического конденсатора), но вскоре пришел к заключению, что только эффекты, «лежащие за пределами наблюдений», могут быть интересны. Поэтому он подошел к проблеме с другой стороны, вернувшись к ней девятью годами спустя, в 1888 г., и успешно решив ее, как часть его классических экспериментальных работ по электромагнитным волнам. В 1886—1887 гг. он при выполнении некоторых экспериментов обнаружил что если кусок медной проволоки согнуть в виде прямоугольника так, чтобы между концами проволоки был маленький воздушный промежуток, и поместить этот прямоугольник рядом с искровым разрядом индукционной катушки (мы будем называть ее первичной цепью), то в промежутке открытой цепи прямоугольника проскакивает искра. Он правильно интерпретировал это явление, показав, что согнутая проволока (мы будем называть ее вторичной цепью) имеет такие размеры, которые делают свободный период колебаний в ней, почти равный периоду колебаний в первичной цепи.

Открытие, что в воздушном промежутке вторичной цепи могут возникать искры (при подходящих размерах для резонанса), давало метод наблюдения электрических эффектов в воздухе на расстоянии от первоначального возбудителя: детектор, требуемый Фитцджеральдом для наблюдения

распространения электрических волн, теперь был в руках.

Неизвестный Герцу Давид Эдвард Хьюз (1830—1900) несколькими годами ранее опередил его. Он показал, что электрические искры можно обнаружить на расстоянии до около 500 м микрофоном (позднее он был назван «когером»), включенным в телефонную трубку. Он правильно утверждал, что эти сигналы были от электрических волн в воздухе. В 1879—1980 гг. он продемонстрировал эти эксперименты президенту Королевского Общества сэру Джорджу Стоксу и В. Прису — Главному электрику Почтовой службы. К сожалению, они пришли к другому объяснению этого явления, и Хьюз, разочаровавшись, не опубликовал своих результатов, которые стали известными много позже. После короткого перерыва, в течение которого Герц был занят изучением влияния облучения ультрафиолетовыми лучами на электрический разряд, проведя, тем самым, первые наблюдения фотоэлектрического эффекта, он в 1888 г. улучшил схему получения искр. Регистрируя эффект с помощью вторичной цепи, удалось продемонстрировать, что испускаются электромагнитные волны. Оливер Лодж (1851-1940) также в начале 1888 г. открыл электромагнитные волны. Он продемонстрировал их распространение и отражение вдоль проволок и выполнил точные измерения их длин волн. Однако, вместо того, чтобы немедленно опубликовать свои результаты, он отправился на отдых в Альпы, полагая, что его эксперименты произведут впечатление на очередном конгрессе Британской Ассоциации развития науки, который должен был быть в сентябре. На этом конгрессе, Фитцджеральд, который ничего не знал о работе Лоджа, громогласно объявил, что неизвестный немец Генрих Герц сумел генерировать и детектировать электромагнитные волны в воздухе.

Рис. 24. На верхней части показан вибратор (осциллятор) Герца, а на нижней — резонатор. А — катушка Румкфорда, В — два шарика, между которыми проскакивает искра; С и С' — два больших проводника, которые заряжаются от катушки. Цепь  $abcd$  — резонатор Герца, а М — два шарика, между которыми можно видеть искорку

Для получения своих искр Герц использовал различные экспериментальные конфигурации. Одна из них показана на рис. 24. Две металлические сферы диаметром около 30 см были каждая на конце прямой медной проволоки. Центры сфер были на расстоянии 1 м. В середине проволока разрывалась с двумя шариками на концах разрыва. Расстояние между этими шариками (несколько см в диаметре) можно было регулировать до типичного значения порядка 1 мм. Размеры были выбраны так, чтобы возникающие волны можно было обнаружить вторичной цепью соответствующего размера. Для возбуждения цепи была использована катушка Румкорфа, с помощью которой две сферы заряжались противоположным знаком. При достижении нужного напряжения происходил искровой пробой, и искра проскакивала между шариками. При этом система разряжалась через ряд колебаний с частотой, определяемой размерами сфер и их взаимным расположением. Эти колебания затухали, когда энергия, связанная с первоначальным зарядом, испускалась в пространство в виде электромагнитных волн. К концу года Герц продемонстрировал сходство электромагнитных волн со светом, показав, что они могут отражаться» распространяться прямолинейно после прохождения отверстия в экране, испытывают дифракцию, и другие свойства, подобные свету, В первых экспериментах длина волны составляла несколько метров, но, в тот же год, Герц смог сгенерировать волны порядка 10 см. Парадоксально, но Герц не оценил возможное практическое применение своего открытия. Когда один немецкий техник высказал ему предположение, что открытые им волны можно использовать для беспроводного телеграфа, Герц отверг эту идею,

утверждая, что токи в его резонаторе совершают колебания в миллионы раз в секунду и не могут быть воспроизводимы в телефонном устройстве, которое работает с токами с частотой в несколько тысяч раз в секунду.

Рис. 25. Резонатор Риги был сделан из стеклянной посеребренной пластинки (как обычное зеркало). Слой серебра на стекле имеет тонкую щель  $\gamma$ , в результате которой получаются две металлические, проводящие части  $a$  и  $b$  изолированные друг от друга. Когда на такой резонатор падают электромагнитные волны, в щели  $T$  проскакивает искорка, которую можно увидеть в темноте. Эксперименты Герца были продолжены итальянцем Аугусто Риги (1850-1921), профессором физики в университете Болоньи. Он сумел генерировать волны длиной в несколько см и регистрировать их с помощью резонатора, который он сделал из прямоугольной полости станиоловой фольги, закрепленной на стеклянной пластине. В середине фольги делался очень тонкий разрез, в котором могла появляться искра (рис. 25).

Риги родился в Болонье и после окончания технической школы поступил в 1867 г. на математический факультет Университета Болоньи. Получил степень в 1872 г. в области инженерной специальности. В рамках своей диссертации по гражданской инженерии (единственной в то время) он построил электростатическую машину для измерения очень малых электрических зарядов. Ее можно рассматривать как уменьшенный аналог знаменитого ускорителя частиц, построенного в 1930-х гг. Робертом ван дер Графом (1900—1967). Еще в школе Риги проявил большие способности в физике. Используя школьную лабораторию, он сумел улучшить телефон, разработанный в то время А. Г. Беллом (1847—1922), создал и запатентовал первый микрофон с проводящим порошком, а также громкоговоритель, который он представил на Всемирной выставке в Париже в 1878 г. Он начал свою университетскую карьеру в Палермо (1880—1885), а затем в Падуе. В 1889 г. он вернулся в Болонью, где был профессором физики вплоть до своей кончины. Здесь он проводил свои исследования по оптическим свойствам электромагнитных волн. В Болонье он организовал Институт современной физики. Риги первым наблюдал гистерезисный цикл в магнитных материалах. Он изучал электрические разряды в газах, магнитные эффекты света и был одним из первых, кто исследовал фотоэлектрический эффект, построив фотоэлектрическое устройство.

С помощью построенного им осциллятора, который он назвал «трех искровой осциллятор», Риги выполнил серию знаменитых экспериментов, собранных в его книге *Ottica delle Oscillazioni Elettriche* («Оптика электрических колебаний», 1897 г.). В них он продемонстрировал точность электромагнитной теории.

### Маркони и радио

Итальянец Джулиельмо Маркони (1874—1937) сумел превзойти многих великих ученых своего времени в создании системы беспроводного телеграфа. «Дело Маркони» можно рассматривать как хороший пример определенного типа изобретений. Фактически, все технические устройства — генераторы и резонаторы, использованные Маркони, — не были оригинальными, но он систематизировал и улучшал их. Он сумел использовать все преимущества экстраординарной и сулящей прибыли ситуации, когда почти все элементы, необходимые для создания системы беспроводного телеграфа, уже существовали. Он осознал потенциальные возможности техники, которые никто не рассматривал, и с огромным упорством устремился к своей цели. Факт того, что все существенные элементы для создания беспроводного телеграфа уже были известны, а также и

то, что многие исследователи провели успешные эксперименты с электромагнитными волнами, после первых успехов Маркони, вызвал среди ведущих держав соперничество за право на законное обладание этим «изобретением». В действительности «изобретение» заключается не в открытии нового эффекта или изобретении какого-нибудь нового устройства, а в умелом использовании того, что уже существует, собирая вместе все нужное правильным способом, и в достижении с непоколебимой решительностью технологии, которая многим людям казалась недостижимой. В то время люди, безусловно, верили, что электромагнитные волны, несмотря на различия в длинах волн, ведут себя как свет и распространяются прямолинейно. Поэтому передатчик и приемник должны располагаться в пределах прямой видимости, что невозможно на расстояниях, превышающих несколько километров. Маркони не считался с этими соображениями, в частности, из-за того, что он был в основном самоучкой, не имел теоретических основ и над ним не довлел научный авторитет признанных научных талантов. Он шел своим путем в духе пионера, искателя приключений. Джулиельмо Маркони был вторым сыном преуспевающего землевладельца и богатой ирландки. Хотя их дом был в 15 км от Болоньи, мать с сыновьями проводили долгий зимний период в Ливорно и во Флоренции. С раннего обучения молодой Маркони стал проявлять большой интерес к экспериментальным наукам, в особенности в сфере электричества. В 1892 г. он построил устройство для обнаружения атмосферного электричества, которое установил на крыше дома в Ливорно. Он также старался сделать аккумулятор для питания системы освещения загородного дома. Из его записей в записной книжке, очевидно, что для молодого человека большее значение имела финансовая сторона, а не слава изобретателя. Он четко понимал коммерческую значимость изобретений. Его мать организовала дружеский визит к Аугусто Риги и, конечно, это было очень полезно для него, даже, если Риги не принимал серьезно молодого ученого-любителя, полагая, что если он действительно хочет посвятить себя науке, то должен сперва закончить свои исследования. Разумеется, он дал ему советы и предложения и позволил помогать в некоторых экспериментах, пользоваться библиотекой со всей научной литературой по интересующему вопросу. В 1894—1995 гг., в своем доме вблизи Болоньи, Маркони начал серию экспериментов, направленных на использование электромагнитных волн для связи на расстоянии в системе беспроводного телеграфа. Он использовал в качестве передатчика осциллятор Риги, в качестве приемника когерер с металлическими опилками.

Когерер представляет собой устройство, сделанное из отпаянной стеклянной трубочки диаметром несколько миллиметров, в концах которой располагаются два серебряных цилиндра, разделенных коротким промежутком. Каждый из цилиндров соединен с платиновой проволокой, проходящей через расплавленное стекло наружу. Между цилиндрами засыпаются металлические опилки (никель или серебро). Эти опилки (зерна) обладают значительным электрическим сопротивлением, но когда они подвержены действию электромагнитной волны, то сцепляются (отсюда и название: *cohere* — быть сцепляемым, склеенным), т.е. выстраиваются в направлении электрического тока, и их сопротивление резко уменьшается. Это явление уже было открыто в 1884 г. Т.К. Онести (1853—1922) и было использовано Маркони, который усовершенствовал устройство лучшим подбором материалов и, добавив молоточек, который после каждого импульса электромагнитной волны автоматически восстанавливал первоначальное сопротивление (встряхивал опилки), что делало устройство готовым для регистрации следующего импульса. Также французский физик Э.

Брэнли (1844—1940) в 1890 г. наблюдал, что металлические опилки в стеклянной трубке изменяются от непроводящего состояния к проводящему, когда на некотором расстоянии происходит электрическая искра. Вероятно, это свойство так никого и не заинтересовало, если бы эта трубка, содержащая опилки, позднее названная английским физиком Оливером Лоджем когерером, не стала существенным элементом первых радиотелеграфных приемников, благодаря его использованию Маркони. Это вызвало волну претензий на авторство среди К. Онести, Брэнли, Лоджа и Попова, российского физика, который использовал его с той же самой целью.

После более или менее удачных экспериментов, известных к тому времени, и позволяющих сигналам передаваться на расстоянии в несколько метров, в августе 1895 г. Маркони выяснил, что для наблюдения заметных эффектов на расстоянии нужно соединить конец осциллятора, а также схему приемника с одной стороны закопанным проводником (земля), а с другой стороны изолированным проводником (антенна), который следует поднять как можно выше над землей. Это блестящее изобретение системы антенна—земля позволило уверенно принимать телеграфные сигналы на расстояниях до 2400 м. Удивительно, что сигналы регистрировались на другой стороне холма, расположенного между системами передачи и приема. В одном из этих экспериментов брат Маркони подтвердил прием на другой стороне холма выстрелом из ружья, что вошло в легенду об изобретении Маркони.

Этот успех убедил молодого человека, что идея заслуживает патента. Итак, с помощью своей матери, которая всегда поддерживала его, и, преодолев скептицизм отца, Маркони отправился в Англию. Там с помощью двоюродного брата со стороны своей матери, Дж. Дэвиса, который держал консалтинговую фирму в Лондоне и был хорошо известен среди лондонских инженеров, он сумел привлечь интерес к своему изобретению со стороны технического генерального директора Британского почтового ведомства, В. Пирса, который к тому времени стал бароном. В результате Маркони 2 июня 1896 г. получил первый патент на систему нового беспроводного телеграфа. В то время Великобритания занимала ведущее положение в области проводной телеграфии. Это касалось и доминирующей роли британских компаний, осуществлявших прокладку и эксплуатацию трансконтинентальных линий. Так что выбор Маркони был, несомненно, удачен во всех отношениях. Между июнем 1896 г. и мартом 1897 г. Маркони выполнил ряд экспериментов от имени Почтового ведомства, что было разрекламировано тем же самым Пирсом. В 1897 г. Маркони организовал Wireless Telegraphic and Signal Co Ltd, в которой его кузен Дэвис стал первым административным директором. 2 июля 1897 г. был получен полный патент, который в наиболее подробной форме описывал его изобретение. Его получению способствовали два юриста, один из которых хорошо разбирался в области электрических технологий, а другой изучал физику и математику в Кембридже. Маркони осуществил первую беспроводную связь (радио) между Англией и Францией в марте 1899 г., что вызвало интерес во всем мире к его экспериментам, а 12 декабря 1901 г. установил связь между США и Великобританией на расстоянии 3200 км, осуществив, тем самым, первую трансатлантическую радиосвязь. Этот результат вызвал удивление и изумление. Дело в том, что для реализации связи на английском побережье была сооружена огромная антенна из проводов высотой 61 м и диаметром 61 м, а на американском побережье также была построена антенная система, что потребовало годы напряженной работы. Так вот, обе эти антенны были уничтожены во время шторма, и Маркони начал использовать для передачи антенну значительно меньших размеров, а

антенна приемника поднималась на воздушном змее.

Сразу же после этой сенсационной радиосвязи О. Хэвисайд (1850—1925) в Англии, А.Е. Кеннеди (1861-1939) в США и Х. Нагаока (1865-1950) в Японии, независимо друг от друга выдвинули в 1902 г. гипотезу, что высоко в атмосфере существуют области, отражающие радиоволны. Только эта гипотеза могла объяснить, почему прямолинейно распространяющиеся электромагнитные волны способны обогнуть Землю. Ее достоверность была экспериментально подтверждена Е. В. Эплтоном (1892—1965), который в 1925 г. нашел, что на высоте между 100 и 200 км слои обладают электрической проводимостью из-за того, что молекулы газа ионизируются различными агентами. Радиоволны, отражаясь от этих слоев, осуществляют связь вне пределов прямой видимости. Эплтон был награжден в 1947 г. Нобелевской премией по физике «за его исследования верхней атмосферы и, особенно, за открытие т.н. слоя Эплтона».

Хотя в своих экспериментах в 1896 г. Маркони использовал микроволны (т.е. волны длиной порядка нескольких сантиметров), впоследствии он использовал более длинные волны и с ними сделал первые главные географические связи. Так он вначале полагал, что электромагнитные волны могут достигать приемной антенны только благодаря дифракции, распространяясь вокруг поверхности земли и очень близко к ней. Поэтому он считал нужным стремиться к более длинным волнам. Он был убежден, что для увеличения расстояния связи требуются длинные волны и, чтобы получить их, требуется более мощные машины. Только в 1916 г. он возобновил эксперименты с короткими волнами, которые в 1920-х гг. были отданы радиолюбителям, поскольку считалось, что они не имеют коммерческой ценности.

Маркони также проделал много экспериментов в Италии. Он предоставил правительству Италии безвозмездно пользоваться его патентами и получил разрешение установить его аппаратуру на крейсере Carlo Alberto, на котором король Витторио Эммануил путешествовал с июля по сентябрь 1902 г., из Неаполя в Кронштадт, чтобы нанести визит царю Николаю II. Во время плавания Маркони обнаружил, что дистанция связи увеличивается ночью и уменьшается днем: еще одно явление, связанное с наличием слоя ионизированной атмосферы вокруг Земли. Позднее, осенью, он на борту того же крейсера выполнил новые эксперименты во время плавания из Англии в Канаду. Когда в 1916 г., во время Первой мировой войны Итальянский флот обратился к Маркони с просьбой изучить возможности нового устройства для радиосвязи во флоте, причем ставились условия защиты от перехвата сообщений противником даже на ограниченных расстояниях, Маркони вернулся к коротким волнам, принимая во внимание определенную роль, играемую ионизированными слоями. Между тем были изобретены электронные лампы, что привело к замене искровой техники.

Джон Амброуз Флеминг (1849—1945), который работал с Максвеллом, был научным консультантом «Маркони Компании», научным консультантом «Эдисон Электрик Лайт Компании», а также был профессором Лондонского университетского колледжа, в 1890 г. изобрел термоионную лампу. Она являлась устройством выпрямления переменного тока, основанного на эффекте, открытом Томасом Эдисоном (1847—1931). Дiod Флеминга представлял обычную электрическую лампу накаливания, в которой вблизи от нити, но не касаясь ее, помещалась маленькая пластинка, проволочка от которой выводилась через баллон к цоколю. При соединении этой пластинки с положительным полюсом батареи, а нити с отрицательным полюсом, между двумя электродами мог протекать ток. Если же полярность переворачивалась, то никакого тока не было. В первом случае электроны, испускаемые

горячей нитью, притягиваются положительно заряженной пластинкой в то время, как во втором случае отрицательно заряженная пластинка отталкивает электроны. В 1904 г. Флеминг понял, что это устройство может найти применение, запатентовал его в Великобритании, а затем и в США. Американский изобретатель Ли де Форест (1873—1961), который получил ученую степень в Йельском университете в 1899 г., причем его диссертация была первой в Америке по радиокоммуникациям, поместил в диоде Флеминга тонкую сетку между нитью и пластинкой. Тем самым был создан триод, который он запатентовал в 1907 г. под названием «аудион». Сетка, соединенная нужным образом, позволяет усиливать ток и амплитуду сигнала, подаваемого на нее, необычайным образом. Это изобретение стало ключевым в развитии беспроводных систем связи. Аудион был прототипом термоионной лампы, разработанной в 1912 г. Ирвингом Ленгмюром (1881—1957).

Для проведения экспериментов с целью проверки эффективности коротких волн Маркони с 1923 г. использовал яхту, которую купил в 1919 г. и превратил ее в плавучую лабораторию. В 1924 г. «Маркони Компании» подписала контракт с Британским правительством на постройку серии радиостанций, которые устанавливали связь со всеми колониями Британской Империи (с Австралией, Индией, Южной Африкой и Канадой). Компания решила использовать короткие волны. Первый «мост» этой сети был торжественно открыт в 1926 г. Решение Маркони использовать для этих радиостанций короткие волны радикально изменило технологию. В 1928 г. Маркони был назначен президентом Итальянского Национального исследовательского совета (CNR). В 1932 г. он установил коротковолновую радиотелефонную связь между Ватиканом и летней резиденцией папы Кастель Гандольфо вблизи Рима. За свою активную деятельность Маркони в 1909 г. был награжден Нобелевской премией по физике вместе с немецким физиком К. Ф. Брауном (1850-1918), который кроме изобретения кристаллического диода и осциллографа, улучшил беспроводные системы связи с помощью создания соответствующих схем. Маркони был президентом Итальянской академии, личным другом Муссолини и получил титул маркиза. Когда он умер, были устроены государственные похороны, и все радиостанции на Британских Островах объявили две минуты молчания.

#### Попов

В России использование радиоволн для связи было связано, независимо от Маркони, с профессором А. С. Поповым (1859—1906), который разработал один из первых приемников электромагнитных волн. Аугусто Риги писал: «Новые характеристики аппаратуры Попова для регистрации волн заключаются в использовании молоточка и звонка, управляемого электрическим током, для восстановления первоначального сопротивления когерера, а также использование вертикального проводника, позднее названного антенной».

Александр Попов родился (1859) в рабочем поселке на Урале в семье священника, и предполагалось, что он пойдет по стопам отца согласно семейной традиции. Вместо этого он поступил на физико-математический факультет Санкт-Петербургского университета, где блестяще защитил диссертацию по электрическим машинам. В 1883 г. он был приглашен в Кронштадт для преподавания в Минных классах Российского Флота. Эти классы организованы в 1874 г. и были наиболее прогрессивным российским институтом в области электротехники. Попов провел там 18 лет, удовлетворяя свои интересы в физической лаборатории и выполняя исследования в рамках курса обучения. Он стал

признанным авторитетом в области электричества, и Российский флот много раз обращался к нему для решения практических проблем.

После его успехов он в 1901 г. был назначен профессором Электротехнического института в Санкт-Петербурге, а в 1905 г. был выбран его ректором. В начале XX в. ухудшились отношения России с Японией, и в 1904 г. разразилась Русско-японская война. 1905 г. был годом бурных политических событий. Забастовки, стачки и собрания проходили по всей стране. В декабре Правительство постановило среди других распоряжений запретить публичные собрания в помещениях института. Попов отказался исполнять этот приказ, направленный властями против студентов. В результате сильных волнений он тяжело заболел и скоропостижно скончался от инсульта в январе 1906 г.

После публикаций Герца в 1888—1889 гг. Попов заинтересовался волнами Герца и, зная о когерере, в начале 1895 г. выполнил серию исследований, надежность результатов которых обеспечивалась использованием маленького молоточка, который срабатывал, когда ток протекал через устройство, и маленьким ударом восстанавливал первоначальные условия (рис. 26).

Рис. 26. Система Попова для детектирования электрических колебаний. Рисунок показывает расположение частей и электрические соединения между ними. (Из работы А.С. Попова «Аппаратура для обнаружения и регистрации электрических колебаний», Журнал Русского физико-химического общества, 1, 1-14(1896).)

Первая демонстрация этого приемника состоялась перед Физическим обществом Санкт-Петербурга 7 мая 1895 г. В то время Попов был преподавателем Минных классов, и его результаты не могли быть опубликованы по соображениям секретности.

Проводя свои эксперименты на открытом воздухе, Попов обнаружил, так же как Лодж и другие, что когерер реагирует на атмосферные электрические явления, и его чувствительность можно увеличить, если один из его концов соединить с вертикальной проволокой, связанной с воздушным шаром, или с громоотводом, а другой соединить с землей. Попов использовал это, чтобы построить специальный прибор («грозоотметчик») и установил его в Лесном институте Санкт-Петербурга, Он также публично продемонстрировал в 1896 г., эксперименты по связи, и установил свой грозоотметчик на знаменитой Нижегородской ярмарке. Там был в 1885 г. построен павильон достижений в области электричества и демонстрировалась электростанция с производительностью до 400 кВт. Грозоотметчик предупреждал о приближении грозы и позволял принять меры для защиты. Во время этой ярмарки Попов прочел об экспериментах Маркони и при поддержке Российского Флота возобновил свои эксперименты по связи. Однако его обязали опираться на зарубежных производителей, так как Россия не имела нужной промышленности. Парижский инженер и бизнесмен Евгений Дюкре (1844—1915), который первым во Франции построил устройства беспроволочного телеграфа, очень заинтересовался Поповым и в 1898 г. стал строить радиотелеграфные станции на основе его систем. Сотрудничество Дюкре—Попов поддерживалось политическим сближением России с Францией, начавшимся в конце XIX в. В период 1899—1904 гг. Компания Дюкре получила несколько заказов от Российского Флота. Однако эта компания была слишком мала и слаба, и Русский Флот во время русско-японской войны использовал системы связи, сделанные в Германии фирмой «Телефункен».

### Микроволны

Как уже говорилось, потребовалось время, чтобы использовать короткие волны, хотя именно они и получались в первых экспериментах. Для того, чтобы получать микроволны, необходимо было

уменьшать размеры ламп, которые тогда использовались в схемах генерации, а также размеры самих схем. Вскоре обозначилась проблема, вызванная временем, требуемым электронам для пролета от сетки к аноду лампы.

Напоминаем, что в вакуумной лампе, такой, какая использовалась в то время, электроны испускаются нитью, нагреваемой током, помещенной в эвакуированную стеклянную колбу, и окруженную металлической сеткой. Эти электроны собираются электродом, называемым анодом, производя тем самым ток. Величину этого тока можно контролировать путем электрического потенциала на сетке. Очевидно, что, двигаясь от нити к аноду и проходя через сетку (все эти элементы обозначаются как электроды лампы), электронам требуется время, и если в течение этого времени электрический потенциал на сетке заметно изменится, то это исказит сигнал, снимаемый с анода.

Чтобы уменьшить это время пролета, старались делать лампы меньшего размера, более компактными, уменьшая расстояния между нитью, сеткой и анодом до минимума. Эта проблема очень хорошо была описана в работе Ирвинга Ленгмюра и Карла Комптона (1931 г., США). В ней они указали, как можно продвинуться в область высоких частот, просто уменьшая размеры и расстояния между электродами.

Уже в 1933 г. в США фирма RCA выпустила лампу акрон, а Western Electric — знаменитую «кнопку звонка». Эти миниатюрные лампы позволяли генерировать частоты до 1500 МГц (длина волны около 20 см). Однако мощность была очень мала.

### Магнетрон

На сцене появилось новое устройство, магнетрон, которое стало в середине 1920-х гг. преимущественным генератором. Было показано, что с помощью магнетрона можно получать очень высокие частоты.

В магнетроне используется комбинация электрического и магнитного полей. В первой реализации прямая нить накала (катод) окружалась цилиндрическим анодом. Внешнее магнитное поле было направлено так, чтобы заставить электроны, летящие к аноду, двигаться по спирали между двумя электродами.

Это устройство было изобретено Альбертом В. Халлом (1880—1966), который родился на ферме в штате Коннектикут и после получения степени в Йельском университете в 1913 г. стал работать в исследовательской лаборатории Дженерал Электрик (GE). В 1914 г. он изобрел «динатрон», первый в длинном ряду радиоламп впервые созданных им. Он также проводил исследования по проблемам кристаллографии и использовал рентгеновские лучи.

В течение 1916 г. Халл начал эксперименты по контролю потока электронов в лампах с помощью магнитного поля как альтернативный способ вместо сетки, который использовался в то время.

Контроль с помощью сетки в то время был объектом спора между Дженерал Электрик и Американской Телефонной и Телеграфной Компании, касающимся оплаты автору изобретения Ли де Форесту.

В 1920-х гг. Халл и его сотрудники в Дженерал Электрик продемонстрировали, что устройство, первоначально имевшее несколько названий, но, в конце концов, стало называться магнетроном, может быть использовано на низких частотах в качестве усилителя или генератора в радиосистемах, а также в качестве электронного ключа в преобразователях мощности. Летом 1921 г. права на

изготовление ламп, по-видимому, сделали магнетрон не очень важным для радиотехники. В Дженерал Электрик продолжались работы с магнетроном, но для высоких мощностей. В 1925 г. Халл изготовил магнетрон высокой мощности для получения волн с длиной 15 км и мощностью 15 кВт.

Важное открытие, что магнетрон может генерировать колебания с очень высокой частотой, было независимо сделано в Германии и в Японии в середине 1920-х гг., но оно оставалось неизвестным в Америке вплоть до 1928 г. Чешский физик Август Цачек опубликовал в 1924 г. на чешском языке результаты экспериментов, в которых он сумел генерировать волны длиной 29 см. Однако эти результаты получили распространение только, когда его работа была описана в немецком специализированном журнале в 1928 г. В 1924 г. аналогичные результаты были получены Эриком Хабаном в университете г. Йена.

В Японии электрофизик Хидетсугу Яги (1886—1976) и его студент Кинийро Окабе (1896—1984) внесли важный вклад в разработку магнетрона высоких частот. Яги родился в Осаке и получил степень по техническим наукам в Токийском университете в 1909 г. Перед Первой мировой войной он учился в Англии вместе с Джоном Флемингом, изобретатель лампового диода для детектирования радиоволн. Яги заинтересовался возможностью связи на коротких волнах, когда провел некоторое время в Дрездене (Германия) с Генрихом Георгом Баркгаузенем (1881 — 1856), изобретатель особой ламповой схемы для генерации высоких частот. С началом войны Яги возвратился в Японию для преподавания в Тохоку Имперском университете, где он в 1919 г. получил докторскую степень. В начале 1920-х гг. он узнал о магнетроне Халла от японского морского офицера, который возвратился после посещения США.

Окабе, который стал первоклассным специалистом по магнетронам, окончил университет Тохоку в 1922 г., а в 1928 г. защитил под руководством Яги диссертацию. В 1927 г. Окабе сообщил, что ему удалось получить генерацию с длиной волны около 60 см, используя магнетрон. Он исследовал множество электродов разной геометрии, и обнаружил, что если разрезать цилиндрический анод на два полуцилиндра (конфигурация известная как «разрезной анод»), то можно получить большую мощность. В 1928 г. Яги посетил США, чтобы обсудить эксперименты Окабе, который к тому времени уже генерировал волны в 12 см. Яги также описал разработанную им направленную антенну сверхвысоких частот, которая состояла из активного элемента и нескольких отражающих и пассивных элементов. Эта антенна нашла широчайшее применение в телевизионной технике. После того как в 1931 г. англо-французская группа установила связь через Ла-Манш, используя волны 18 см, во всем мире возник огромный интерес к коммуникациям на микроволнах (релейные радиолинии). Один журнал опубликовал редакционную статью, в которой утверждалось, что эта система открыла нетронутую землю, что обеспечивает диапазон частот для тысяч радиоканалов. Редактор писал, что эксперимент через Ла-Манш означает «новую эпоху в области электрических коммуникаций», он настолько революционен, что требует нового имени. Он отмечал также, что аппаратура настолько компактна, что подобные системы можно устанавливать на кораблях и самолетах.

Также хорошо известный специалистам американский периодический журнал Electronics объявил, что потрясающая линия между Дувром и Кале показала, что ультракороткие волны, рассматриваемые как мало полезные, вдруг приобрели огромную важность.

Магнетрон начал свое триумфальное шествие: число научных публикаций об этом устройстве стремительно росло до 1933 г. и оставалось на высоком уровне вплоть до 1940 г., когда в связи с разразившейся войной публикации прекратились по соображениям секретности. Важные исследования, приведшие к существенным улучшениям, были сделаны в 1930-х гг. во Франции, Англии и Германии.

### Клистрон

В 1930-х гг. магнетрон был единственным хорошим генератором, пригодным для работы на очень высоких частотах. Ч.Э. Клитон (г. р. 1907) и Н.Г. Вильяме (1870—1956) из Мичиганского университета, выполнили первые спектроскопические измерения на микроволновых частотах. Они использовали магнетрон для исследования спектра поглощения аммиака. В исследованиях с целью определить практический предел длин волн, которые можно генерировать с помощью магнетрона, было показано в 1936 г., что можно получить колебания с длиной волны 6,4 мм. Однако эффективность магнетрона была не очень высокой. Поэтому новое устройство, названное «клистрон», было разработано в Стэнфорде, в Калифорнии Расселом Варианом (1898-1959), Сигердом Варианом (1901 —1961) и др.

Клистрон работает на совершенно другом принципе по сравнению с системами, использовавшимися до него для генерации высоких частот. В нем электроны сбиваются в сгустки, которые снабжают энергией объемный резонатор.

Объемный резонатор состоит из полости проводящего материала, в которой образуются стоячие электромагнитные волны. Чтобы эта полость стала резонатором, нужно, чтобы ее размеры соответствовали длине волны. Для полостей простой формы, например куб, это соотношение гласит (как мы уже видели), что сторона полости должна быть кратной целому числу полуволн.

Уменьшение длины волны сказывалось на микроволновой технике. Было установлено, что для передачи микроволн с одного места в цепи до другого нужно направлять их в подходящие металлические структуры. Волноводы, как их стали называть, представляют металлические трубы круглого или прямоугольного сечения, и волна распространяется в них за счет отражений от стенок. Эти волноводы могут быть и антеннами, если они имеют открытый конец.

### Радар

Микроволновые устройства и технологии получили мощный импульс развития между 1930 и 1945 гг. из-за необходимости получения ультракоротких волн, нужных для разработок и создания радаров (аббревиатура, введенная американцами: radio detection and ranging).

Принцип работы радара очень прост: импульс радиоволн посылается на цель, частично отражается обратно к приемнику, где и регистрируется. Посылаемый и отраженный импульсы визуализируются на осциллографе, и, измеряя временной интервал между моментами, когда импульс был послан и когда пришел обратно, можно определить расстояние до цели.

Еще Герц и другие наблюдали, что радиоволны могут отражаться металлическими предметами. В 1904 г. немецкий инженер Хулсмейер получил патент на использование этого свойства для обнаружения препятствий при плавании кораблей. Он построил устройство, с которым получил хорошие результаты в Роттердамском порту. Но никто не заинтересовался разработкой этой системы, которая была слишком передовой для того времени.

Результаты первых экспериментов по ионосферному радиозондированию атмосферы, которые

провел Эплтон (1925 г.) с целью доказать существование ионизированных слоев в атмосфере, способных отражать микроволны, оживил идею использовать методы, основанные на отражении радиоволн, для локализации объектов, расположенных на больших расстояниях. Принцип использования импульсов излучения, что является характерной особенностью современного радара, впервые был реализован в 1925 г. Д. Брейтом (1899—1981) и М.А. Тьювом (1901-1982) из Вашингтонского Института Карнеги для измерения высоты ионосферы. Итак, ряд экспериментов по применению принципа локализации земных объектов и определения расстояний до них начался в Европе и США. При проведении исследований, связанных с использованием микроволн для связи, было найдено, что можно обнаружить присутствие судов и самолетов путем регистрации энергии, которую они отражают.

В США, в Исследовательской лаборатории Военно-морского флота (NRL), уже с 1920-х гг. была известна возможность обнаружения движущихся объектов путем отражения электромагнитных волн. В. Делмар Гершбергер и его сотрудники использовали для этой цели магнетроны, изготовленные фирмами «Вестингауз» и RCA, для проведения экспериментов на сантиметровых волнах. Были получены успешные результаты. Однако в то время было мало квалифицированных специалистов, чтобы довести устройства до практического использования.

Разработки радаров в Великобритании

В Великобритании, в 1934 г., желание защитить страну от воздушного нападения привело Г. Э. Вимперса, директора исследований при Министерстве авиации к обращению за советом к А. В. Хиллу (1886—1977), видному физиологу из Кембриджа, который получил в 1922 г. Нобелевскую премию по физиологии, и который был офицером артиллерии в Первой мировой войне. Конкретно, задавался вопрос о возможности уничтожения вражеских самолетов. Результатом обсуждений было обращение Вимперса 12 ноября 1934 г. к Государственному секретарю по военно-воздушным силам с просьбой организовать комитет для рассмотрения того, насколько последние успехи в науке и технике могут быть использованы для усиления противовоздушной обороны» Вимперс предложил, чтобы председателем этого комитета был профессор Г. Т. Тизард (1885—1959), декан химического факультета Империял Колледжа. А членами предлагалось назначить Хилла и профессора П. М. С. Блэккета (1897—1974), который характеризовался «как морской офицер в войне (1914-18), который с тех пор проявил себя своей работой в Кембридже, как один из лучших молодых научных лидеров». Эта характеристика была вполне оправдана, так как в 1948 г. Блэккет получил Нобелевскую премию по физике «за развитие метода камеры Вильсона и открытие с ее помощью в области ядерной физики и космических лучей». Комитет был немедленно создан и 28 января 1935 г. состоялось первое заседание. Вимперс обратился с запросом к Суперинтенданту радиоисследовательского отдела Национальной Физической лаборатории Роберту Ватсон-Ватту (1892—1973), нельзя ли выводить из строя вражеские самолеты или их экипажи с помощью интенсивных пучков радиоволн. Ватсон-Ватт немедленно ответил, что произвести такие «лучи смерти» нереально, но вместо этого возможно обнаруживать вражеские самолеты. Он представил расчеты, показывающие, что энергию, отражаемую самолетом, облучаемого мощным пучком радиоволн, можно использовать для этой цели. Немедленно была проведена работа по демонстрации, которая дала прекрасные результаты 26 февраля 1935 г. Она была настолько успешной, что было начато сооружение системы радиолокационных станций. Было продемонстрировано обнаружение корабля на расстоянии около

30 км и возможность обнаружения самолета на расстоянии 160 км. Роберт Ватсон-Ватт написал фундаментальное уравнение радара, которое показывает, что максимальное расстояние, на котором можно обнаружить самолет, пропорционально линейным размерам антенны и только лишь корню четвертой степени из мощности. Это означает, что для увеличения дальности действия радара в 2 раза нужно увеличивать мощность в 16 раз.

Расстояние также увеличивается при уменьшении длины волны, но это не представляло интереса для Ватсона-Ватта. В то время не было генераторов высокой мощности, работающих на длине волны меньшей чем 10 м. Поэтому была выбрана длина волны 50 м, руководствуясь тем соображением, что радиоволны будут хорошо отражаться от бомбардировщика, когда размах его крыльев будет приблизительно равен половине длины волны. Но вскоре было установлено, что радиолокационные станции создают взаимные интерференционные помехи, и длина волны была уменьшена до 26 м, а затем и до 13 м.

К сентябрю 1938 г. побережье в районе устья Темзы было покрыто сетью радаров, и радары были также установлены на главных британских линкорах. Благодаря этому Великобритания смогла противостоять врагу и получить преимущества в битве с немецкими военно-воздушными силами во Второй мировой войне (август 1940 г.), а установка радаров на кораблях позволила британскому флоту добиться впечатляющих успехов (сражение у мыса Матапан, март 1941 г.).

В марте 1935 г. корабли британского флота могли обнаруживать самолеты лишь с помощью биноклей с увеличением 7х. А вскоре после Мюнхенского кризиса (1938 г.) они могли обнаружить самолет на расстоянии до 100 км благодаря радару.

Разработки радаров для флота продолжались в течение всей войны, иногда сопровождаясь некоторыми странностями. Один эпизод может показать нам, как в то время плохо понималось использование радиоволн, а некоторые эффекты казались таинственными. В 1943 г. немцы стали атаковать английские военные корабли летающими бомбами, управляемыми по радио. Это вызывало страх среди команды. Однажды флотские специалисты, случайно, во время одной из таких атак в Бискайском заливе включили электрические бритвы и к своему, а также и всей команды, изумлению, увидели, что бомба стала поворачиваться в небе, а затем направилась в сторону самолета, который запустил ее. Немедленно Адмиралтейство разослало приказ включать все имеющиеся на корабле электрические бритвы и размахивать ими против летающих снарядов. Эффективность этой меры не зарегистрирована в официальных бумагах, но она, определенно, повышала моральный дух команды. После разработки цепи радаров, защищающих Темзу, Ватсон-Ватт и его сотрудники обратили свое внимание на радар для установки его на самолете. Радары второго поколения с длиной волны 1,5 м имели размеры, позволяющие установить их на самолетах, предназначенных для обнаружения подводных лодок, всплывающих ночью. Каждый согласится, что длина волны 10 см еще лучше, и поэтому старались освоить этот диапазон длин волн. Одна из причин улучшения — резкое уменьшение размеров аппаратуры и повышение эффективности определения целей. 12 августа 1940 г. впервые был испытан радар для самолета, работающий на длине волны 10 см.

#### Резонаторный магнетрон

В первые месяцы войны был сформирован Британский комитет по координации разработок радиоламп. Он заключил ряд научно-исследовательских и промышленных контрактов на разработку радиоламп для передатчиков и приемников с длиной волны 10 см. Один из контрактов был заключен

с группой профессора М. Олифанта (1901—2000) из Бирмингемского университета, который в 1937 г. перешел из Кавендишской лаборатории для организации в Бирмингеме лаборатории ядерной физики. Эта группа первоначально интересовалась разработкой генератора на основе клистрона, с которым Олифант ознакомился во время своей поездки в США в 1938 г. В результате, к концу 1939 г., его группа создала клистрон, который генерировал около 400 Вт непрерывной мощности на длине волны 10 см, а несколькими месяцами позже был создан и импульсный вариант, пригодный для радара.

Однако это устройство оказалось слишком громоздким для установки на самолет, и хотя клистроны меньшего размера использовались в самолетных радарах, продолжались поиски альтернативного варианта. В группе также работали и другие специалисты, включая Дж. Рэндала (1905—1984). Он получил докторскую степень в Манчестерском университете, выполняя исследования по рассеянию рентгеновских лучей, и провел год в лаборатории Британской Компании Дженерал Электрик, где приобрел опыт в области устройств высокого вакуума. Г. Бут (1917—1983) получил высшее образование в области физики в 1938 г. и в 1941 г. стал доктором в Бирмингеме. Олифант попросил их исследовать схемы, которые требовались для мощного генератора. Поэтому в 1940 г. они начали исследование с целью улучшить магнетрон, на основе идеи использовать цилиндрический резонатор, выполняющий двойную функцию: определять частоту и служить анодом магнетрона. Они испробовали новое устройство, которое было названо «резонаторным магнетроном», 21 февраля 1940 г. и получили около 400 Вт на 9,8 см.

Немедленно это устройство было внедрено Компанией Дженерал Электрик в улучшенной модификации с увеличенной до 10 кВт мощностью. И в мае уже работал радар, использующий этот новый магнетрон. Он способен был обнаружить перископ подводной лодки на расстоянии 10 км. Осенью 1940 г. британская научная и техническая миссия, возглавляемая сэром Генри Тизардом, привезла этот резонаторный магнетрон в США.

После триумфа по обороне Темзы ожидалось, что Тизард будет назначен Главным Научным Военным Консультантом. Так и было некоторое время, но когда Уинстон Черчилль стал премьер-министром, он выбрал на эту должность другого специалиста. Тизард стал менее влиятельным, но был назначен главой деликатной миссии в США. Эта миссия должна была убедить США, в то время нейтральных, разрабатывать и производить технику, нужную для войны. Англичане сначала не решались разглашать перед американцами устройство магнетрона, опасаясь, что это попадет в руки немецкой разведки, но последующее полностью оправдало усилия миссии Тизарда. Впервые резонаторный магнетрон был 6 октября 1940 г. продемонстрирован американцам в Bell Telephone Laboratories, Раскрытие этого устройства привело к созданию Лаборатории излучений в Массачусетском технологическом институте, знаменитом MIT в Бостоне. Была сколочена элитная группа ученых и инженеров, набранных из университетов и промышленности. В результате, в годы войны было создано множество магнетронов и более 100 радарных систем, которые обеспечили союзникам техническое преимущество. Более двух миллиардов долларов было вложено в эти разработки в течение войны, и это дало импульс развития микроволновой технологии и в послевоенный период.

По предложению Тизарда многие из приглашенных специалистов были ядерными физиками, потому что, как сказали британские визитеры на основе своего опыта, они более легко адаптируются в новые

исследования, чем радиоинженеры. Ли Ду Бридж (1904—1996) из Рочестерского университета был назначен главой новой лаборатории. Среди других в ней были И. Раби, Кен Бэйнбридж (1904—1996), Норман Рамси, Эд Парсел, Эрни Полард и Луис Альварец, многие из которых еще сыграют роль в нашей истории.

#### Радар в других странах

Во время войны радар также разрабатывался в Германии для противовоздушной обороны и в Италии для целей навигации. Немцы уже начали исследования по магнетронам и микроволновым системам в 1930-х гг. Фирма Телефункен в Берлине экспериментировала с системой овладения «таинственными лучами» для обнаружения самолетов, которая была в 1935 г. описана в статье американского журнала Electronics. Эта фирма разработала Würzburg, систему противовоздушного радара, используемого Люфтваффе в течение всей войны.

Однако оказалось, что предложение оборудовать истребители радаром встречает сопротивление Геринга, который утверждал, что немецкие пилоты настолько умелые, что им не нужны «кинематографические инструменты».

Первый работающий радар был построен в 1935 г. и был продемонстрирован Гитлеру, Герингу и сопровождающим их лицам. Соперничество между немецкими министерствами, недостаточное привлечение университетов и стремление к секретности были причиной неполного использования радара в Германии.

В Италии в 1924 г. профессор Н. Каррара (1900—1993) был назначен заведующим кафедрой физики в Военно-морской академии. Здесь проводились исследования по генерации и приему сантиметровых волн. Вначале 1930-х гг. разные авторы писали о возможности использовать микроволны, чтобы получать эхо от неподвижных или движущихся объектов, и в 1933 г. Маркони выполнил успешный эксперимент, используя моторный экипаж, движущийся рядом с микроволновым пучком. Новость была подхвачена СМИ, которые заговорили о «лучах смерти», с помощью которых Маркони выключал двигатели автомобилей и самолетов.

В 1935 г. профессор Тиберио (1904—1980), офицер флота, представил комиссии Министерства лекцию, в которой продемонстрировал возможность использовать микроволн для ночного обнаружения (так тогда писали), и на следующий год Флот начал секретные исследования. Тиберио проводил эти исследования с целью разработки радиодальномера. С 1936 по 1941 г. несколько прототипов было реализовано, а в 1942 г. были созданы 50 систем для Флота и для обнаружения самолетов. Одной из этих систем было обнаружено соединение американских самолетов, которые в мае 1943 г. провели сильную бомбардировку Ливорно. На стадии изготовления аппаратуры возникли значительные трудности, поскольку нельзя было получать нужные материалы из США, а Германия требовала невыполнимых условий. Были попытки организовать нужное производство в Италии, но они оказались неудачными. Хорошо известным результатом было сражение у мыса Матапан, в котором итальянские корабли были лишены радаров.

В Японии, несмотря на интенсивные исследования в области магнетронов и микроволн, разработка радаров тормозилась из-за разногласий между Армией и Флотом и отсутствием централизованных усилий, подобных тем, что были в США.

В Советском Союзе были активные исследования в области магнетронов, но, по-видимому, решающий шаг в сторону использования импульсов, а не непрерывного режима, не был сделан.

В течение войны лучшие английские и американские ученые были вовлечены в исследования по микроволнам и радарам, и в конце войны микроволновые системы легко перешли в исследовательские институты с целью продолжения фундаментальных исследований в этой области. Поэтому в конце войны эти исследования естественным образом оказались связанными с микроволнами.

Взаимодействие микроволн с веществом может привести к переходам между энергетическими уровнями молекул, лежащими близко друг от друга. Малая энергия соответствует энергии микроволновых фотонов. Также микроволны могут взаимодействовать с магнитным моментом электрона (спин) или атомных ядер. В этих случаях магнитное поле волн воздействует на магнитный момент частицы (электрона или ядра) и ориентируют его путем соответствующего изменения энергии. Эти явления взаимодействий между микроволнами и веществом составляют предмет радиоспектроскопии. Радиоспектроскопия естественным образом возникла из разработок радаров и генераторов микроволн во время Второй мировой войны. После войны эти генераторы стали использовать в спектроскопических исследованиях, которые позволяли выявить малые детали молекулярных структур и атомных ядер. Единственным измерением, выполненным до войны с помощью микроволн, было измерение частоты инвертированного перехода в молекуле аммиака, лежащей в сантиметровом диапазоне. Как мы уже говорили, это измерение было выполнено Клитоном и Вильямсом в 1934 г.

Из-за научного интереса эти работы быстро перешли из промышленных лабораторий, где проводились исследования, в университеты, где добывалась информация, относящаяся к фундаментальным проблемам физики и химии. Для этих исследований частотная чистота или когерентность излучения была очень важным свойством. Было необходимым иметь источники, которые испускают одиночную частоту, или, если это невозможно, то, по крайней мере, иметь частоты в очень ограниченном диапазоне, которые не подвержены сильным флуктуациям. Для лучшего понимания взаимодействий микроволн с веществом нам следует обратиться к дальнейшему развитию спектроскопии.

## ГЛАВА 8

### СПЕКТРОСКОПИЯ: АКТ II

После основополагающей работы Бора в 1913 г. атомы и молекулы были в центре внимания физиков, как теоретиков, так и экспериментаторов. В то же время возросли знания об атомных ядрах благодаря изучению радиоактивности и ядерных реакций, осуществляемых бомбардировкой ядрами водорода (протоны) и гелия (альфа-частицы) более тяжелых ядер.

Если до Бора спектроскопия была, по существу, эмпирической наукой, которая мало продвигалась от составления каталогов длин волн, то новая теория атома стала руководящим принципом интерпретации экспериментальных результатов и, как часто случается, сочетание теории и эксперимента привело к объяснению самых различных наблюдаемых явлений.

Первое доказательство существования дискретных энергетических состояний атомов

Центр тяжести исследований теперь переместился в Германию. Один из наиболее значительных результатов был получен Джеймсом Франком (1882-1964) и Густавом Герцем (1887-1975) в 1913-1914 гг., как раз накануне войны.

Франк был сыном гамбургского банкира. Он получил образование в Гейдельберге и в Берлине и стал

заведующим кафедрой экспериментальной физики в Геттингене, которую он оставил в 1933 г. после прихода Гитлера к власти и эмигрировал в США, где стал работать в Чикагском университете. Во время Второй мировой войны принимал участие в атомном проекте, выступая позднее против военного применения.

Густав Герц, также из Гамбурга, был племянником Генриха Герца. Он был тяжело ранен во время войны, и когда возвратился в 1917 г. в Берлин, единственной возможностью для него было бесплатное чтение лекций в университете. В начале 1920-х гг. он поступил во вновь созданную исследовательскую лабораторию Компании Филипс в Голландии. Это была одна из первых промышленных лабораторий, проводивших фундаментальные исследования. В 1925 г. ему было предложено партнерство с университетом г. Галле, а затем стал профессором экспериментальной физики в Берлине с 1928 по 1935 г. Будучи евреем, но был вынужден уйти из университета. С 1928 по 1945 г. он работал в компании Сименс, пережил войну и был интернирован русскими. В 1955 г. он стал директором Института Физики в Лейпциге в ГДР.

Эти два физика задумали остроумный эксперимент, в котором, по их замыслу, можно было определить энергию ионизации атома, т.е. величину той энергии, которую нужно сообщить атому, чтобы освободить его внешние электроны. Сущность эксперимента заключалась в том, чтобы возбуждать атомы ударами электронов, а затем, измеряя энергию, которую электроны теряют при столкновениях, вычислять измененную энергию. Они обнаружили, что получаются последовательные изменения энергии, как показано на рис. 27, где минимумы тока, зарегистрированные при увеличении энергии электрона, соответствуют энергии, которая передается от электронов атомам. Бор дал правильную интерпретацию этим значениям. Они определяют «энергии ионизации», которые в его интерпретации соответствуют энергиям разных возможных орбит электронов в атоме. Таким образом, энергия атома не изменяется электроном, чья энергия недостаточна, чтобы «ионизовать» его, и орбиты электронов в атоме могут иметь вполне определенные значения энергии. Эксперименты Франка и Герца и их интерпретация Бором убедительно продемонстрировали не только существование стационарных состояний, которые постулировались Бором, но также возможность возбуждать их ударами электронов, причем скачки между ними подчиняются фундаментальным законам, выдвинутым Бором.

За эту работу Франк и Герц получили Нобелевскую премию по физике в 1925 г.

Рис. 27. Результат эксперимента Франка и Герца с парами ртути. На графике показана зависимость тока от приложенного напряжения. Из значений напряжений, при которых ток имеет минимумы, можно определить энергии возбуждения электронов в атоме

Дальнейшее развитие теории Бора

Несмотря на эти результаты и заявленную цель работы Бора 1913 г. — разработать общую теорию строения атома, эта теория давала строгое и адекватное объяснение только для атомов водорода и водородно-подобных атомов. Все попытки распространить ее на системы с более чем одним электроном были безуспешными. Даже спектр нейтрального гелия, который, как мы говорили, состоит из ядра, вокруг которого вращаются два электрона, не удавалось объяснить.

Одним из достижений теории Бора было объяснение серии линий, которые американский астроном В. Пикеринг (1858—1938) наблюдал в спектрах звезд. Предполагалось, что эти линии принадлежат водороду, поскольку их расположение очень напоминало серию Бальмера, но Бор показал, что на

самом деле эти линии принадлежат ионизованному гелию, в котором одиночный электрон связан с ядром, имеющим заряд  $+2$ . Эйнштейн был на конференции в Вене в сентябре 1913 г., и когда ему сообщили об этом результате, воскликнул: «Тогда частота света вовсе не зависит от частоты электрона (т.е. от частоты его обращений вокруг ядра). Это огромное достижение. Теория Бора должна быть верной».

В своих исследованиях в 1913 г., немедленно после обсуждений теории атома водорода, Бор занялся атомами, содержащими несколько электронов. Он представлял эти атомы в виде системы, состоящей из положительно заряженного ядра, окруженного электронами, движущимися по круговым орбитам, и писал: «Мы будем предполагать, что электроны располагаются... в коаксиальных кольцах, вращающихся вокруг ядра». Проблема была в том, чтобы знать, сколько электронов могло находиться в каждом кольце, так, чтобы конфигурация оставалась стабильной, несмотря на расталкивающие электрические силы между электронами. Бор старался решить эту проблему с помощью классической динамики и начал с выяснения конфигураций простейших атомов. Для гелия, который имеет два электрона, он, справедливо, предположил, что они находятся на одной и той же орбите. Для лития (три электрона) он предположил, все еще справедливо, что два электрона располагаются на внутренней орбите (кольце), а третий располагается на большей орбите (новое кольцо). Для бериллия, который имеет четыре электрона, он предположил, что два электрона располагаются на одном кольце, а два на другом (эта гипотеза также впоследствии оказалась верной). Для атомов с большим числом электронов эти рассуждения становились очень громоздкими. Наконец, он произвольно установил, что число электронов, располагающихся на внешних кольцах, должно быть равным числу, которым химики определяют валентность элемента. Атом предполагался плоским, т.е. предполагалось, что ядро и все электроны лежат в одной плоскости. Гипотеза Бора была правдоподобна, но неэффективна, чтобы недвусмысленно определить распределение электронов по разным кольцам вокруг ядра. Эта неопределенность затрудняла подход к пониманию химических и физических свойств элементов, в стремлении получить периодичность, демонстрируемую таблицей Менделеева. Результат, к которому пришел Бор, состоял в том, что число электронов на внутренних кольцах должно увеличиваться с увеличением атомного номера. Это был ошибочный результат, который, однако, в 1913 г. не мог считаться таковым.

Затем Бор направил свое внимание на молекулы и получил правильных результаты для молекулы водорода, но, к удивлению, не такие, как для атома гелия, который также имеет два электрона. Даже если в начале своей работы Бор и ссылаясь на эллиптические орбиты, он затем сконцентрировался исключительно на круговых орбитах. Он также ограничил свои обсуждения нерелятивистским случаем, полагая, что скорость электрона мала по сравнению со скоростью света. Когда в 1914 г. американский астроном Г. Куртис (1872—1942) обнаружил малые систематические расхождения между теоретическими значениями длин волн линий водорода, рассчитанными по теории Бора, и экспериментальными значениями, Бор переделал расчеты, введя релятивистское изменение массы электрона. Исправление было в правильном направлении, но поправки были слишком малы, чтобы объяснить наблюдаемые отклонения.

Рис. 28. Некоторые примеры орбит электронов вокруг ядра. Наряду с круговой показаны эллиптические орбиты с разными эксцентриситетами

Получилось так, что прусский физик Арнольд Зоммерфельд (1868-1951), который работал в Гёттингене вместе с знаменитым математиком Давидом Гильбертом (1862—1943) и блестяще владел математикой, попробовал в 1915 г. улучшить модель, распространив вычисления на более общий случай, в котором электроны вращаются орбитой вокруг ядер по эллиптическим, а не по круговым орбитам, совсем как планеты вокруг Солнца (рис. 28). При этом состояние каждого электрона в атоме дается тремя числами, называемыми атомными числами. Эти числа были взаимно связанными простыми правилами, характеризовали энергию электрона на орбите и определяли параметры орбиты, из которых получались их формы и ориентации. Устанавливались критерии квантования, которыми могли быть только целые числа. С помощью математического приема решения проблемы получалось, что даже если орбиты электронов были с огромным увеличением числа, их возможные энергетические состояния оставались теми же самыми. По многим орбитам с разными параметрами двигались электроны с одной и той же энергией, и это свойство, названное вырождением, обуславливало возможность, что энергетические уровни электрона были все тем же одним уровнем, который Бор вычислял, рассматривая только круговые орбиты.

Зоммерфельд рассматривал проблему релятивистски и нашел, что энергия электрона зависит в этом случае также и от формы орбиты. Таким образом, вырождение снималось, и результат оказывался в согласии с экспериментальными наблюдениями, которые уже были проведены А. А. Майкельсоном, который обнаружил, что каждая линия водорода в серии Бальмера на самом деле представляет несколько очень тесно расположенных линий (тонкая структура). Этот факт не согласовывался с теорией Бора, но первоначально им пренебрегали из-за его исключительной малости.

Кроме того, был еще ряд эффектов, которые нужно было объяснить. Кроме эффекта Зеемана, который уже был нами обсужден, в 1913 г. Иоганн Штарк открыл в своей лаборатории в Технической Высшей Школе г. Аахена, что электрическое поле может расщеплять спектральные линии серии Бальмера на несколько компонент (линий), и это явление не ограничивается только водородом.

Иоганн Штарк (1874—1957) между 1906 г. и 1922 г. преподавал в университетах Гёттингена, Ганновера, Аахена, Грифсвальда и Вюрцбурга. На этом этапе его академическая карьера была прервана и он, несмотря на то, что получил Нобелевскую премию по физике в 1919 г. за его открытие, был отвергнут шестью германскими университетами. Он был непопулярен из-за своего антисемитизма, который привел его к отрицанию квантовых теорий и теории относительности Эйнштейна как порочный продукт «еврейской науки». Вступив в нацистскую партию в 1930 г. и будучи, отвергнут Прусской Академией наук, он в 1933 г. преуспел, став президентом Имперского Института Физики и Технологии. Здесь он старался использовать свою власть для того, чтобы усилить контроль над германской физикой, но вступил в конфликт с политиками и администраторами министерства образования Рейха. Они, решив, что он слишком деструктивен и ненадежен, вынудили его уйти в отставку в 1937 г. Окончательное унижение пришло в 1947 г., когда он был осужден к четырем годам принудительных работ Германским судом в процессе денацификации.

Воздействие электрического поля на спектральные линии было также независимо открыто во Флоренции Антонио Ло Сурдо (1880—1949). Из-за того, что его экспериментальная установка была намного проще, чем та, что использовалась Штарком, он получил лишь качественные результаты, не

имея возможности провести точные измерения. Штарк сильно возражал против того, чтобы назвать открытие эффектом Штарка—Ло Сурдо, и не хотел оказывать Ло Сурдо какое-либо доверие. Немедленно после этого открытия немецкий физик Эмиль Варбург (1846—1931) и Бор представили в 1914 г. объяснение этого эффекта на основе модели атома Бора. Однако оно давало лишь качественное согласие с экспериментальными результатами, т.е. давало понимание, почему электрическое поле расщепляет энергетические уровни на несколько подуровней, но не давало точных значений этого расщепления.

В 1916 г., используя более тонкую модель эллиптических орбит, П. Дебай (1884—1966), нобелевский лауреат по химии 1936 г., и Зоммерфельд сумели дать объяснение нормальному эффекту Зеемана, однако аномальный эффект Зеемана все еще оставался загадкой. Эта проблема не была решенной, когда, примерно в 1920 г., Зоммерфельд предложил использовать эмпирическое объяснение, принимая во внимание экспериментальные данные. Он получал уровни энергий из частот наблюдаемых спектральных линий, находя затем квантовые числа, идентичные им. Это позволяло предсказать переходы с помощью подходящих правил отбора.

Следуя такой методологии, Зоммерфельд ввел новое квантовое число, которое он назвал внутренним квантовым числом. Позднее по предложению Бора его стали обозначать буквой  $j$ . Затем была разработана модель, названная векторной моделью, в которой число  $j$  представлялось суммой вектора углового момента электрона и углового момента остального атома, который создается ядром и остающимися электронами. Эти два момента складываются согласно сложным квантовым правилам.

Тем временем А. Ланде (1888—1975) стремился получить решение для аномального эффекта Зеемана, но привел ситуацию в непонятное состояние, когда он показал, что в некоторых случаях квантовые числа, связанные с магнитным поведением, могут иметь полуцелые значения. Во всех этих, все еще непостижимых, исследованиях появилась идея, что орбита электрона обладает квантованным положением в пространстве. Таким образом, получила развитие идея пространственного квантования. Прямое подтверждение этому было дано в 1921 г. Отто Штерном (1888-1969) и Вальтером Герлахом (1889-1979).

#### Пространственное квантование

Отто Штерн после получения докторской степени в университете Бреслау в 1912 г. последовал за Эйнштейном в Прагу (1912) и в Цюрих (1912—1914). В 1914 г. он стал приват-доцентом университета Франкфурт-на-Майне. Во время Первой мировой войны он был солдатом. Его назначали профессором разных немецких университетов, в конце концов, в Гамбурге.

Возвратившись с войны во Франкфурт, он посвятил себя разработке метода молекулярных пучков. В этом методе, который требует получения очень высокого вакуума, получается пучок свободно летящих молекул или атомов. Наиболее важным требованием является проведение эксперимента в исключительно чистых условиях, подобных тем идеальным условиям, которые предполагаются в теории. Штерн и его сотрудники изучили основные положения, относящиеся к кинетической теории газов, доказали пространственное квантование, измерили магнитный момент протона, проверили соотношение де Бройля для волн атомов гелия и др.

Он покинул Германию в оппозиции к Гитлеру в 1933 г. и эмигрировал в США, где стал работать в Институте Технологии Карнеги в Питсбурге. Он получил Нобелевскую премию по физике за свои

исследования молекулярных пучков.

Первой работой Штерна с молекулярными пучками было прямое подтверждение закона распределения по скоростям Максвелла и измерение средней скорости молекул.

Макс Борн (1882—1970), который был в университете Франкфурта в 1919 г. профессором теоретической физики, вспоминал, что он был так восхищен идеей такого измерения, что предоставил в распоряжение Штерна все возможности своей лаборатории, мастерских и механиков. Штерн был не очень умелым в работе руками, но он очень хорошо знал, как руководить техником, который мог сделать все. Позднее, в 1920 г., Вальтер Герлах, прекрасный экспериментатор, прибыл во Франкфурт, и Борн чрезвычайно обрадовался этой новости. Он воскликнул: «Слава Богу, теперь у нас есть, кто знает, как проводить эксперимент, давай, парень, помоги нам!» Вальтер Герлах получил докторскую степень по физике в университете Тюбингена в 1912 г. Во время службы в армии в Первой мировой войне он работал с Вильгельмом Вином над разработкой беспроводной телеграфии. После короткого периода работы в промышленности он пришел во Франкфурт. Он уже имел дело с атомными пучками, когда работал в Тюбингене у Фридриха Пашена, и спроектировал эксперимент по изучению отклонения пучка атомов висмута в неоднородном магнитном поле с целью определения магнитных свойств.

Однажды Штерн пришел к нему и сказал: «С помощью магнитных экспериментов мы можем сделать еще кое-что. Знаешь ли ты, что существует направленное (пространственное) квантование?» «Нет, ничего не знаю» — ответил Герлах. В то время многие физики не верили, что пространственное квантование действительно существует, и полагали, что это лишь способ выполнения расчетов. Герлах позднее вспоминал, что Петер Дебай заметил ему: «Неужели вы верите, что пространственная ориентация имеет какой-либо физический смысл; это просто указание, как проводить вычисления». Даже Борн придерживался такого же мнения. Штерн, напротив, верил, что это реальный факт и после объяснения этого эффекта сказал Герлаху: «Это стоит попробовать» и предложил: «Почему бы нам не попробовать? Давай проверим это».

Оригинальное предложение Штерна было детально изложено в статье «Метод экспериментальной проверки квантования по направлению в магнитном поле».

«в квантовой теории магнетизма и эффекта Зеемана предполагается, что вектор углового момента атома может принимать по отношению к направлению магнитного поля  $H$  только дискретные и хорошо определенные углы, такие, что угловой момент в направлении  $Y$  будет целым числом  $H/2\pi$ ». Чтобы понять это утверждение, необходимо помнить, что уже А. М. Ампер (1775-1836), французский физик, который заложил математические основы электромагнетизма, установив связь между электричеством и магнетизмом, и который за свои таланты был назначен Наполеоном (1808 г.) генеральным инспектором новой системы университетов во Франции, продемонстрировал, что электрический ток в цепи генерирует небольшой магнитный момент, такой, как если бы эта цепь была элементарным магнитом. В атомах орбиты электронов, вращающихся вокруг ядер, могут уподобляться маленьким катушкам, через которые проходит ток. Квантовая механика Бора, улучшенная Зоммерфельдом, позволяет рассчитать магнитные моменты, связанные с каждой орбитой. Эти величины получаются по сложным правилам, найденным Зоммерфельдом. Таким образом, атомы обладают магнитным моментом и ведут себя подобно стрелке компаса, которая ориентируется во внешнем магнитном поле. Если атом помещен во внешнем магнитном поле, его

момент, обозначаемый буквой  $l$ , будет выстраиваться параллельно внешнему полю согласно правилам электромагнетизма и классической механики. Чтобы сделать это, он будет описывать конус с осью вдоль направления поля (прецессионное движение). Его проекцию на направление поля (будем обозначать ее  $m$ ) называют моментом вдоль поля (рис. 29).

Рис. 29. Прецессия углового момента  $l$  в магнитном поле  $H$ . Показана проекция  $m$  вектора  $l$  на  $H$ . Теперь получается следующее. Согласно классической механике  $m$  компонента вдоль поля может иметь любое возможное значение между  $+l$  и  $-l$  (т.е. возможен любой угол между  $l$  и полем). Но согласно квантовой теории возможны лишь дискретные значения  $m$ , соответствующие  $m = l, (l - 1), (l - 2), \dots, -l$  (т.е. разрешены лишь некоторые углы  $l$  по отношению к полю) (рис. 30). Согласно квантовой механике величина вектора  $l$  равна  $\sqrt{l(l+1)}$ , которая больше, чем максимальное значение  $m$ . Поэтому ясно, что  $l$  никогда не может точно направлено по полю (заключение, которое глубоко связано с принципом неопределенности Гейзенберга). Чтобы прояснить это для простейшего случая, когда магнитный момент атома (в соответствующих единицах измерения)  $l = 1/2$ , вообразим, что магнитное поле направлено снизу вверх, как показано на рис. 31, а атом является человеком, держащим стрелу (которая и есть на нашем рисунке магнитным моментом). В то время, как согласно классическим законам, человек может ориентировать стрелу в любом направлении, согласно квантовой механике позволены только две позиции, показанные на рисунке (мы будем называть их параллельной и антипараллельной ориентацией по отношению к полю), в которых проекция стрелы на направление поля есть либо  $+1/2$ , либо  $-1/2$  (рис. 31, а). Поэтому длина стрелы  $\sqrt{3/2}$ .

Рис. 30. Показаны возможные ориентации углового момента  $l$  на направление внешнего магнитного поля  $H$ . На рисунке  $l = 2$  (в соответствующих ед.), а соответствующие ему значения  $m$  составляют  $+2, \pm 1$  и  $0$ . Эти возможные ориентации  $l$  показаны стрелками

Рис.31. Атом с моментом  $l = 1/2$  (в соответствующих ед.) может ориентировать свой момент лишь двумя способами, что показано указкой в руке человека

Чтобы проверить то, что атомы могут ориентироваться только дискретным образом, Отто Штерн задумал эксперимент, основанный на отклонении молекулярного пучка в неоднородном магнитном поле. Мы уже говорили, что атом со своим магнитным моментом подобен маленькому магниту. Если мы заставим его двигаться в области однородного магнитного поля, то магнитная сила будет действовать на его северный полюс с такой же силой, как и на южный полюс, но в противоположном направлении. Таким образом, его магнитный момент ориентируется в направлении внешнего поля (прецессионное движение, описанное выше), но никакие силы не отклоняют его движение.

Рис. 32. (а) Схема эксперимента Штерна и Герлаха. Молекулярный пучок из печки  $O$  проходит между полюсами магнита  $MM'$  (один из которых в форме ножа) и попадает на экран  $S$ . (б)

Магнитное расщепление пучка атомов лития

Если поле неоднородно, то сила, действующая на северный полюс уже не равна силе, действующей на южный полюс. Получается результирующая сила, действующая на магнит как целое. Она отклоняет атом от его первоначальной траектории. Величина отклонения определяется степенью неоднородности поля, Разумеется, чтобы получить заметное отклонение неоднородность поля должна быть такова, чтобы изменения поля могли бы проявиться на малой длине элементарного магнита (в нашем случае это линейные размеры атома около одной сотой миллионной части сантиметра). Штерн добился этого специальной конструкцией полюсов магнита. Один полюс был в

форме ножа, а другой был плоским (рис. 32, а). При такой конфигурации магнитное поле вблизи острия значительно сильнее, чем на удалении от него. Тонкий пучок атомов получался испарением в печи вещества, содержащего нужные атомы, и пропусканием паров через два круглых отверстия, которые формировали пучок, проходящий между полюсами магнита. Каждый индивидуальный атом отклоняется в неоднородном поле в согласии с величиной и направлением его магнитного момента. Следы индивидуальных атомов можно сделать видимыми на подходящем экране. Эксперимент был очень трудным, так как вся система должна работать при очень высоком вакууме, чтобы избежать случайных отклонений из-за столкновений атомов между собой. В то время соответствующие вакуумные насосы были сложны и часто выходили из строя. Потребовалось почти два года между 1921 г. и 1922 г., чтобы выполнить весь эксперимент.

Согласно классической теории, атомы должны отклоняться во всех возможных направлениях, поскольку их моменты могут иметь любую ориентацию по отношению к полю. Поэтому на экране должно было бы наблюдаться большое пятно от падающего на него пучка. Квантовая теория, напротив, предсказывает, что направления квантованы и возможны только ориентации с дискретным номером ориентации. Поэтому след на экране расщепляется на конечное число дискретных пучков. Эксперимент, сделанный с атомами серебра, показали, что первая картина исключается. Штерн описал это в интервью:

«После окончания эксперимента и напуска воздуха Герлах вынул детекторный фланец. Но он не увидел никаких следов атомов серебра на стеклянной пластинке и протянул фланец мне. С Герлахом, смотрящим через мое плечо в то время, когда я старался вблизи разглядеть пластинку, мы были удивлены, увидев как постепенно появляются следы пучка... Наконец, мы поняли, в чем дело. Мое жалование доцента было слишком мало, чтобы позволить себе курить хорошие сигары, так что я курил дешевые. В них было много серы и мое дыхание с дымом превратило серебро в сульфат серебра черного цвета. Благодаря этому его можно видеть. Это было похоже на проявление фотографической пластинки».

И, наконец, пластинка показала, что пучок расщепляется на два разделенных пучка!

Но результат был не вполне ясен, и эксперименты продолжались, несмотря на большие финансовые трудности, которые в то время испытывала Германия.

Борн начал выступать с серией публичных лекций по теории относительности с целью заработать деньги для продолжения эксперимента.

Позднее Штерн стал профессором в Ростокке, и Герлах остался один. Он повторял эксперимент и вместо круглых диафрагм стал использовать прямоугольные диафрагмы для формирования пучка. Это позволило увеличить число атомов в пучке и получать более ясные изображения. На рис. 32, б показан результат эксперимента с использованием атомов лития. Результат весьма ясен. Вместо одного широкого пятна получают два хорошо разделенных пятна. Это не только демонстрирует, что атомы имеют магнитный момент, который соответствует угловому моменту с проекциями  $+1/2$  и  $-1/2$ , но и позволяет измерить их значения в абсолютных единицах. Разумеется, интерпретация, которую Штерн дал в то время, была не вполне корректна, поскольку во внимание не принимался спин электрона (мы будем говорить об этом ниже), который должен добавляться к моменту электрона на орбите по правилам квантовой механики. Однако основные принципы квантования направления намагничивания остаются в силе во всяком случае. Многие проблемы, которые

возникли в результате этого эксперимента, были решены, когда был открыт спин электрона. За свои эксперименты Штерн получил Нобелевскую премию по физике в 1943 г. Позднее Штерн переехал в США и в 1945 г. ушел в отставку и поселился в Беркли (Калифорния).

Герлах в 1925 г. возвратился в Тюбинген на должность профессора, затем переехал в Мюнхен. Во время войны, в 1944 г., он стал во главе Немецкой Программы Ядерных Исследований и в конце войны был интернирован союзниками среди десяти других ведущих ученых в Фарм Холл (Англия). Позднее он много сделал для возрождения немецкой науки и принимал участие в кампании за запрет ядерного оружия.

Принцип исключения[3]

Несмотря на свои очевидные успехи, в 1924 г. «старая» квантовая теория, которая в течение нескольких предшествующих лет, казалось, дает методы и принципы, способные помочь, по крайней мере, представить основы атомной феноменологии, столкнулась с трудностями. В этот момент Вольфанг Паули (1900—1958), отвечая на трудности теории, нашел отправную точку для введения нового и таинственного принципа.

Паули родился в Вене в семье врача, который стал профессором биохимии в Венском университете. Паули получил докторскую степень в университете Мюнхена под руководством Зоммерфельда, и после этого был ассистентом Борна в Гёттингене в 1921—1922 гг. Желая встретиться с Бором, он по своей инициативе отправился в Копенгаген, где был с октября 1922 г. по сентябрь 1923 г., а затем переехал в Гамбург, где оставался до 1928 г., когда принял кафедру в Политехникуме Цюриха. За исключением военных лет, которые он провел в США, в Институте перспективных исследований в Принстоне, он до своей смерти в 1958 г. оставался в Цюрихе.

Паули был крупной, интересной и жизнерадостной личностью. Когда он появлялся на людях его звонкий и иногда сардонический смех оживлял любое собрание. Он всегда появлялся с новыми идеями. Паули начал свою научную карьеру в 21 год, написав книгу о теории относительности Эйнштейна, которая до сих пор остается лучшей по этому предмету. Его вклад в квантовую теорию неоспорим. Подобно другим теоретикам он не имел дела с экспериментальными приборами. Говорили, что он обладает мистической силой. Однажды в лаборатории профессора Франка в Гёттингене вышла из строя, без какой бы то ни было причины, сложная установка для изучения атомных явлений. Изумленный Франк написал об этом факте Паули в Цюрих. Через некоторое время он получил ответ в конверте с датской маркой. Паули писал, что он на поезде ехал к Бору, и в тот момент, когда в лаборатории Франка случилась эта неприятность, его поезд останавливался на несколько минут на вокзале Гёттингена.

Как говорили многие люди, Паули был совестью физики. Он хотел, чтобы люди понимали вещи до конца, и высказывали их правильным образом. Он никогда не уставал отвечать на вопросы и объяснять проблему любому, кто приходил к нему с вопросами. Но ему не составляло труда выразить свое неудовольствие, когда он полагал, что слышит что-то неправильное. Он не был хорошим лектором, поскольку не был способен оценить, насколько восприимчива аудитория. Однажды студент осмелился прервать его и сказать: «Вы говорите нам, что заключение тривиально, но я не могу понять этого». Тогда Паули сделал то, что он часто делал, когда он обдумывал что-нибудь во время лекции: ушел из комнаты. Через несколько минут он вернулся и сказал: «Это тривиально» и продолжал лекцию. Однажды его ассистент, специалист в области ядерной физики,

Виктор Вайскопф (1908—2002) опубликовал статью, в которой содержалась ошибка, и Паули, утешая его, сказал: «Не принимайте это слишком близко к сердцу, многие люди публикуют работы с ошибками; я — никогда!» Как-то Вайскопф показал Паули только что опубликованную статью по интересующему Паули вопросу. Он сказал: «Да, я тоже думал об этом, но я рад, что он это сделал, так что мне теперь не нужно делать это самому.

В период времени, относящегося к нашей истории, когда Паули был у Бора и стал интересоваться эффектом Зеемана, один из коллег Паули сопровождал его в прогулке по улицам Копенгагена. Он сказал Паули: «Вы выглядите очень несчастным», и Паули ответил: «Как же можно быть счастливым, когда думаешь об аномальном эффекте Зеемана?» Однако его размышления дали в 1924 г. важные плоды. Паули отказался от механического взгляда на атом и сосредоточил свое внимание на квантовых числах, которые представляют состояния электронов. Он провозгласил, основываясь на долгом изучении эффекта Зеемана, что каждый электрон характеризуется набором квантовых чисел, и что в атоме позволено быть не более чем двум электронам с одним и тем же числом. Попросту говоря, это означает, что не более двух электронов могут находиться на определенной орбите атома. Этот принцип был назван Паули «принципом исключения». Сразу же это правило позволило приписать электроны к различным энергетическим уровням и обосновать построение таблицы Менделеева. Этот принцип позднее был продемонстрирован, используя квантовую механику, и Паули был награжден Нобелевской премией по физике в 1945 г.

#### Спин электрона

Окончательная модификация старой квантовой теории с последующими объяснениями экспериментальных наблюдений была обеспечена в ноябре 1925 г. Г. Уленбеком (1900-1988) и С. А. Гоудсмитом (1902-1978), которые открыли, что электрон вращается вокруг своего центра подобно Земле и подобен маленькому элементарному магниту. Величину, характеризующую это вращение электрона, называют его спином, а характеризующую его магнитные свойства — его магнитным моментом. Уленбек и Гоудсмит нашли, что спин электрона в соответствующих единицах имеет значение  $h/4\pi$ . В то время им было по 20 лет, и их открытие было следствием скрупулезных исследований атомных спектров.

Георг Уленбек родился в Батавии (теперь Джакарта) в семье голландского военного и некоторое время оставался в Голландской Индии (теперь Индонезия). Поэтому молодой Георг поступил в начальную школу на Суматре. В 1907 г. его семья переехала в Нидерланды и поселилась в Гааге. В 1919 г. Уленбек поступил в Лейденский университет для изучения физики и математики у Пауля Эренфеста, у голландского физика Хайке Камерлинг Оннеса (1853—1926) (первооткрывателя в области низких температур, впервые получившего жидкий гелий и открывшего явление сверхпроводимости, за что был в 1913 г. награжден Нобелевской премией), и у Х. Лоренца. Между 1922 и 1925 гг. он посещал Рим, где был частным учителем молодого сына голландского посла. Во время этих посещений он выучил итальянский язык, стал другом Э. Ферми (1901-1954) и глубоко изучал историю. Когда он оставлял Рим для возвращения в Нидерланды, серьезно раздумывал не оставить ли физику ради истории. Он обсуждал эту проблему со своим дядей, который был известным лингвистом, экспертом в области языков американских индейцев, и профессором Лейденского университета. Его дяде эта идея показалась привлекательной, но он полагал, что лучше сначала получить докторскую степень по физике, поскольку Уленбек уже достаточно далеко

продвинулся в этой области. Эренфест также согласился с этим, но считал, что он должен познакомиться с тем, что в это время происходило в физике. Поэтому он взял Уленбека к себе на работу, с тем, чтобы он научился от Гоудсмита тому, что Паули называл «спектрозоологией», т.е. изучением спектров.

Самуэль Абрагам Гоудсмит родился в Гааге в семье преуспевающего купца и с 11 лет проявил интерес к физике, читая книги. Его особенно потрясло то, как спектроскопия показывает, что звезды состоят из тех же элементов, какие имеются на Земле. В университете он учился у Эренфеста, проявляя скорее интуитивный, чем аналитический способ мышления.

Уленбек позднее говорил: «Сэм никогда не был ясно мыслящим человеком, но обладал замечательным талантом — взять беспорядочные данные и дать им правильное направление. Он был волшебником в области криптограмм». И. Раби добавлял: «Он размышлял как детектив. Он и есть детектив». Гоудсмит действительно когда-то проработал девять месяцев детективом.

В 1920 г. Эренфест рекомендовал Гоудсмиту посетить Пашена в Тюбингене, который проводил свои исследования по спектроскопии. На следующий год, летом, он снова был в Тюбингене, и Пашен ввел его в спектроскопические методики. Вскоре он стал очень способным в обращении с квантовыми числами и объяснениями наблюдаемых спектров. В начале 1925 г. он опубликовал работу, в которой показал, что можно упростить применение принципа Паули, используя получисленные квантовые числа Ланде, и что одно из этих чисел всегда имело значение  $+1/2$  или  $-1/2$ . В это время Эренфест попросил Уленбека и Гоудсмита работать вместе; Гоудсмиту, чтобы он объяснил Уленбеку магические вычисления с квантовыми числами, а Уленбеку, чтобы он обучил Гоудсмита некоторой физике и показал ему, что она состоит не только из манипуляций с квантовыми числами.

В августе 1925 г. эти два человека стали близкими друзьями, сохранив эту близость на всю жизнь. Они стали регулярно встречаться в Гааге и в одной из встреч в конце лета Гоудсмит рассказывал Уленбеку о принципе Паули, используя получисленные квантовые числа Ланде. Уленбек сразу же понял, что все электроны ведут себя так, как если бы они кроме вращения вокруг атомного ядра также вращались сами по себе (спин). В сентябре теория была завершена, и эти два исследователя показали, что эта концепция также объясняет нормальный и аномальный эффект Зеемана.

Американский физик венгерского происхождения Р. Крониг (1904—1995), который путешествовал по Италии и также был другом Ферми, уже сформировал такую же идею относительно спина.

Крониг имел несчастье спросить мнение Паули, и Паули убедил его, что его гипотеза лишена любых оснований и высмеял идею, говоря, что она «конечно, очень умна, но, разумеется, не имеет ничего, что делало бы ее достоверной». В результате Крониг отказался от нее. Когда Уленбек и Гоудсмит узнали о критике Паули, которая представлялась справедливой, они хотели забрать свою статью, уже посланную для публикации, но Эренфест сказал им, что поскольку они молоды, то могут позволить себе совершить ошибку. Одно из возражений, например, заключалось в том, что если для размера электрона использовать формулу Х. Лоренца, то для получения вращательного углового момента нужно приписать столь быстрое вращение, при котором скорость внешней поверхности электрона превышает скорость света. Работа не была отозвана и опубликована, а критика Паули осталась безосновательной.

После великого открытия спина Уленбек в 1927 г. эмигрировал в США, в университет Мичигана. В середине 1930-х гг. вернулся в Нидерланды, где стал приемником Крамерса в университете Утрехта.

В 1939 г. он возвратился в Мичиганский университет. С 1960 г. работал в Рокфеллеровском институте в Нью-Йорке, был иностранным членом Итальянской Академии.

Гоудсмит также эмигрировал в 1932 г. в США в Мичиганский университет. В течение Второй мировой войны он работал с радарными, а позднее возглавил очень секретную миссию под кодовым именем «Алкос». Эта миссия следовала за наступающими войсками союзников в Европе, а в некоторых случаях и опережала их, чтобы узнать уровень работ по созданию немцами атомной бомбы. Было установлено, что немецкие ученые не достигли больших успехов в этой области, и Гитлер не мог иметь этого оружия до конца войны. Гоудсмит написал об этой миссии книгу «Миссия Алкос».

В заключение мы можем видеть, что полное развитие квантовой механики в течение ряда лет дало адекватную трактовку поведения атомов и молекул. Для нас, однако, то, что было описано, достаточно, чтобы понять главные факты. Мы можем представить себе атомы и молекулы в виде сложных систем, которые могут находиться в нескольких энергетических состояниях. В простейшей системе, атоме, эти энергетические состояния образуются его электронами. Разность энергии между орбитами электронов соответствует фотонам, испускаемым в видимом и ультрафиолетовом диапазонах спектра. Однако энергия, соответствующая данной орбите, может изменяться за счет возмущения, вызываемого разными причинами. Ими могут быть взаимодействия магнитного момента электрона (из-за спина) с магнитными моментами, получающимися при их вращении вокруг ядер, или с магнитным моментом самого ядра, или под действием внешних магнитных полей (эффект Зеемана), или электрических полей (эффект Штарка). В результате этих взаимодействий энергетический уровень невозмущенной орбиты расщепляется на несколько подуровней, которые слегка различаются по энергии. Переходы, которые могут быть между этими подуровнями, соответствуют т.н. тонкой или сверхтонкой структуре, и длины волн, соответствующие этим переходам, лежат в инфракрасном или радиочастотном диапазоне спектра.

Молекулы — более сложные системы, состоящие из атомов. Кроме электронных уровней, они могут иметь и другие энергетические уровни в результате вращательных движений, а также из-за того, что атомы, входящие в их состав, могут колебаться относительно своего положения равновесия.

Согласно квантовой механике, энергии, соответствующие этим вращательным и колебательным движениям, также квантованы. Таким образом, получается, что любая электронная конфигурация обладает набором энергетических уровней, которые можно назвать вращательно-колебательными. Энергии, которые соответствуют скачкам между этими уровнями в определенной электронной конфигурации, очень малы, и им соответствуют длины волн инфракрасного и микроволнового диапазонов.

Итак, в спектре любой субстанции все линии в видимом и ультрафиолетовом диапазоне, в основном, получаются из-за электронных переходов, в то время как линии в инфракрасном и микроволновом диапазонах получаются из-за вращательно-колебательных уровней, или между подуровнями тонкой и сверхтонкой структуры, или между подуровнями, которые получаются в результате эффектов Зеемана и Штарка. Это правило не совсем строгое, поскольку энергии, соответствующие высоко возбужденным электронным уровням (уровни электронов, лежащим далеко от ядра, которые часто называют «ридберговскими»), мало отличаются, и переходам между ними соответствуют волны инфракрасного и микроволнового диапазонов. Мы не будем рассматривать этот случай.

## ГЛАВА 9

### МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС

Мы видели, что вращательные движения любой частицы, атома или молекулы приводят к возникновению магнитного момента, на который влияет внешнее магнитное поле. Ради простого представления мы можем рассматривать магнитный момент нашей частицы в виде стрелки, которая указывает некоторое направление. Внешнее магнитное поле воздействует на магнитный момент частицы, т.е. на стрелку, вызывая пару сил, которые стараются повернуть и выстроить ее в направлении поля. Однако если частица вращается вокруг своей оси, подобно вращению Земли или спину электрона, наличие вращения кардинально меняет действия этих сил, и магнитный момент частицы начинает вращаться вокруг направления внешнего поля с угловой скоростью (пропорциональной магнитному полю), которая известна, как ларморовская частота (по имени ирландского ученого, открывшего это явление). Этот вид движения называется ларморовской прецессией. Это движение подобно движению волчка, вращающегося вокруг своей оси, наклоненной по отношению к вертикали: ось вращения медленно поворачивается вокруг вертикали (рис.33), совершая прецессионное движение.

Рис. 33. Волчок, вращающийся вокруг оси, наклоненной по отношению к вертикали, описывает прецизионное движение вокруг вертикального направления

В случае атома или молекулы их магнитный момент не может иметь любой наклон по отношению к внешнему полю, поскольку из-за квантования, возможны лишь вполне определенные наклоны (см. рис 30). Магнитный момент частицы может совершать вращения вокруг внешнего поля, на своей ларморовской частоте, которая соответствует значениям разрешенных наклонов. Каждому из этих движений и, следовательно, наклонам (углам) соответствует хорошо определенная энергия. Поэтому для того, чтобы изменить один наклон на другой, необходимо увеличить или уменьшить энергию частицы на разницу между двумя наклонами, или, как мы будем говорить, между двумя энергетическими уровнями.

Если полный угловой момент частицы равен  $1/2$  в соответствующих единицах, частица может выстроиться по полю либо почти параллельно, либо почти антипараллельно ему. Если же угловой момент отличается от  $1/2$ , тогда число возможных направлений увеличивается, как показано на рис. 34.

Рис. 34. На (а) показаны две возможные ориентации углового момента  $l = 1/2$  (в соответствующих ед.) по отношению к внешнему магнитному полю. На (б) показаны три ориентации для момента  $l = 1$  Используя это обстоятельство, Штерн и Герлах дали первое экспериментальное доказательство пространственного квантования и смогли измерить угловые моменты некоторых атомов. Улучшив методику, Штерн с сотрудниками провел серию экспериментов в период между 1933 и 1937 гг., в которых были измерены магнитные моменты протона и дейтерона (ядро тяжелого атома водорода, состоящее из одного протона и одного нейтрона).

Резонансный метод с молекулярными пучками

Если подходящее излучение с частотой, которая точно соответствует разности между двумя энергетическими уровнями (т.е. с резонансной частотой) падает на частицу так, что заставляет ее перескочить с одного магнитного уровня на другой, с большей энергией, то это излучение будет поглощаться. Около 1932 г. итальянский физик Этторе Майорана (1906—1938), который

таинственно пропал на море между Палермо и Неаполем, и Исидор Раби (1898—1988) теоретически обсудили поглощение, которое может возникать при магнитном резонансе. В 1931 г. Г. Брейт (1899—1981) и Раби уже теоретически предсказали использовать соответствующую методику для измерений магнитного спина и магнитных моментов.

Раби родился в Польше, но его родители эмигрировали в США, когда он был ребенком, и он вырос в еврейском квартале Нью-Йорка, где его отец держал аптеку. В 1927 г. он получил докторскую степень в Колумбийском университете и после двух лет, проведенных в Европе, в нем же работал до своей отставки в 1967 г. В 1927 г. он работал с Отто Штерном, и его внимание было сосредоточено на эксперименте, который проводили Штерн и Герлах. Поэтому после возвращения в Колумбийский университет он продолжил работу с атомными и молекулярными пучками и изобрел метод магнитного резонанса, который мы кратко опишем. Используя этот метод, после Второй мировой войны он сумел измерить магнитный момент электрона с исключительной точностью, что позволило проверить справедливость квантовой электродинамики. Этот метод получил огромное применение для атомных часов, для ядерного магнитного резонанса и, в последующем, для мазеров и лазеров. Во время Второй мировой войны Раби участвовал в разработке микроволновых радаров.

В знаменитой работе, написанной в 1937 г., Раби дал фундаментальную теорию для экспериментов по магнитному резонансу. В это время в его лаборатории проводились измерения магнитных моментов многих атомных ядер, основанные на методе неоднородного магнитного поля, использованного Штерном. Эти измерения начались в 1934 г. и продолжались до 1938 г. Раби, однако, хотел улучшить точность измерений и поэтому изучал эффект прецессионного движения спина вокруг магнитного поля. Но он не придавал значения явлению резонанса, который может появиться, если излучение с частотой, точно соответствующей разности энергий между уровнями, подается на спин. В сентябре 1937 г. его посетил С.Дж. Гортер, который тогда работал в университете Грёнингена в Нидерландах. Гортер рассказал Раби о своих неудачных попытках наблюдать эффекты ядерного магнитного резонанса в твердых телах. Во время этих обсуждений Раби стал осознавать резонансную природу явления и сразу же вместе со своими сотрудниками модифицировал свою аппаратуру. Таким образом, в 1939 г. метод был существенно улучшен, что позволяло переориентировать моменты атомов, молекул или ядер по отношению к постоянному магнитному полю, на которое накладывалось осциллирующее магнитное поле.

Рис. 35. Схема эксперимента с магнитным резонансом молекулярного пучка. Пучок из источника S пересекает две области А и В с однородными магнитными полями, которые отклоняют пучок в противоположные направления. Если молекула не изменяет своего состояния спина, когда она проходит область С, она не изменяет своего отклонения. В область С вводится осциллирующее поле. Когда в области С частота равна частоте ларморовской прецессии, ориентация спина молекулы изменяется, что проявляется резким падением интенсивности пучка на детекторе D. Когда частота этого осциллирующего поля равна разности энергий между уровнями в магнитном поле, деленной на постоянную Планка, может происходить переориентация, которая в этом случае резонансна, и может приводить к поглощению с нижнего на верхний уровень, или, как конкуренция, к процессу вынужденного излучения с верхнего уровня на нижний уровень. Чтобы обнаружить эту переориентацию, Раби и его сотрудники Дж. Келлог, Н. Рамси и Дж. Захариас использовали искусную систему, состоящую из двух секций, в которой неоднородное магнитное поле действовало

на пучок (рис. 35). В первой секции (А) поле отклоняло молекулярный пучок в одном направлении, в то время как во второй секции (В) неоднородное поле было приложено в обратном направлении, отклоняя пучок в противоположном направлении и тем самым, перефокусируя пучок на приемнике. Поскольку эффекты фокусировки и перефокусировки пучка зависят одинаковым образом от скоростей молекул, молекулы, независимо от их скоростей собирались в одном месте на приемнике. В центре установки (С) было приложено сильное магнитное поле, которое вызывало ларморовскую прецессию магнитных моментов молекул. В той же области накладывалось более слабое, но осциллирующее магнитное поле. Если частота этого осциллирующего поля равна ларморовской частоте, тогда оно способно переориентировать магнитный момент молекулы. В результате частица во второй секции будет отклоняться разным образом и уже не попадет в положение фокуса. Таким образом, если с помощью приемника наблюдается интенсивность пучка, то, поддерживая сильное магнитное поле постоянным и слегка изменяя частоту слабого осциллирующего поля, можно получить кривую, как показано на рис. 36, которая показывает минимум сигнала на приемнике, когда частота изменений поля равна частоте, соответствующей переходу между двумя уровнями.

Рис. 36. Типичная резонансная кривая измерений магнитного момента в молекулярном пучке. За эти эксперименты Раби был удостоен Нобелевской премии в 1944 г. Он пользовался высоким авторитетом в научном мире и многие ученые советовались с ним о направлении своих исследований. В 1937 г. он отговаривал Рамси, который в то время был аспирантом в Колумбийском университете, от продолжения исследований с молекулярными пучками, считая, что у них малое будущее. Рамси дерзко игнорировал этот совет своего наставника и, как мы увидим, сумел добиться важных успехов в этой области, некоторые из которых были использованы при создании атомных часов. Сам Раби, несколькими годами позже, получил Нобелевскую премию за разработку пучково-резонансного метода.

Норманн Ф. Рамси родился в Вашингтоне в 1915 г. Его отец был офицером артиллерии, а мать, дочь немецких иммигрантов, была преподавателем математики в университете Канзаса. В 1931 г. он поступил в Колумбийский колледж Нью-Йорка, который окончил в 1935 г. и отправился в Англию в Кембридж в качестве стажера по физике. Летом 1937 г., после двух лет в Кембридже, он возвратился в США, чтобы работать в Колумбийском университете под руководством Раби. Раби как раз изобрел свой метод и Рамси работал вместе с другими коллегами, проводя первые эксперименты.

В 1949 г., уже в Гарварде, Рамси, работая над тем, как улучшить и повысить точность метода Раби, изобрел метод разделенных осциллирующих полей, в котором одиночное магнитное осциллирующее поле в центре устройства Раби заменяется двумя осциллирующими полями на входе и выходе, причем они располагаются на расстоянии друг от друга. Этот метод дал ряд преимуществ в изучении магнитных моментов атомных ядер и нашел многие применения.

Метод, очень похожий на метод Раби, в 1940 г. использовали Л.В. Альварец (1911 — 1988) и Ф. Блох для измерения магнитного момента нейтрона. Они определили его значение с точностью до 1%. Поскольку их работы с описанием экспериментов были опубликованы тремя годами позже первых работ Раби по магнитному резонансу, их методика обычно рассматривается как адаптация метода Раби. Однако идея Блоха, использовать магнитный резонанс в осциллирующем магнитном поле, вполне оригинальна. Альварец получил в 1968 г. Нобелевскую премию за разработку и использование устройства регистрации элементарных частиц в ядерной физике (пузырьковая

камера). В конце 1970-х гг. он стал автором смелой гипотезы о связи развития доисторических животных 65 млн. лет назад с катаклизмом, который получился из-за падения на Землю гигантского метеорита. Гигантская воронка диаметром 180 км была позднее обнаружена на полуострове Юкатан (Мексика), которую связывают с ударом космического объекта приблизительно в тот же период. Другие свидетельства в пользу гипотезы Альвареца были получены в последующие годы.

#### Явления магнитного резонанса в твердых телах

Если мы теперь рассмотрим твердотельный материал, то в нем разные магнитные моменты ядер или электронов могут в присутствии внешнего магнитного поля сложиться, давая полный магнитный момент (это получается в веществах, называемых парамагнитными материалами), что приводит к сильному намагничиванию материала.

Вопрос о том, как быстро средний магнитный момент парамагнитного вещества откликается на быстрое изменение магнитного поля, действующего на это вещество, уже рассматривался в 1920-х гг. В. Ленцом (1888—1957), П. Эренфестом, Г. Брейтом и Камерлинг-Оннесом, а в 1930-х гг. большое внимание было уделено тому, как магнитная система достигает теплового равновесия.

Шведский физик И. Вэллер (1898—1991) в своей знаменитой работе, которая была опубликована в 1932 г., уже различал два главных механизма, благодаря которым система достигает равновесия после ее возмущения (явления релаксации). Это взаимодействие спинов или ядер друг с другом, которое мы будем называть спин-спиновое взаимодействие, и механизм взаимодействия спинов с атомами, которые образуют твердое тело (кристаллическая решетка), который мы будем называть спин-решеточным взаимодействием. Если взаимодействия спинов друг с другом или с решеткой не существует, тогда приложение внешнего поля производит только прецессионное движение индивидуальных спинов, не зависящее друг от друга, и без коллективного движения. Наоборот, эффект взаимодействия спинов друг с другом и с решеткой и наличие внешнего магнитного поля производит энергию обмена между спинами и между спинами и решеткой, и поскольку атомы с разной ориентацией их спинов могут относиться к разным энергетическим уровням, получается возмущение уровней. Мы можем применить формулу Больцмана, используя статистическую механику, согласно которой состояния с меньшей энергией являются более вероятными. После времени релаксации (которое тем больше, чем слабее взаимодействия), наступает термическое равновесие, при котором вероятность найти ядро или атом со спинами, параллельными полю (состояние с наименьшей энергией), больше, чем вероятность найти его с антипараллельными спинами.

Важность концепции спин-решеточной релаксации была снова поднята в 1937 г. Г. Казимиром (1909-2000) и Ф. Дюпре. Они указали, что, рассматривая взаимодействие между спинами и решеткой, следует иметь в виду, что электроны, будучи легкими и быстрыми, взаимодействуют друг с другом быстрее и сильнее. В результате спиновое равновесие при некоторой температуре достигается за очень короткое время около десятой доли миллисекунды (время спин-спиновой релаксации). Затем система спинов начинает взаимодействовать с более массивной решеткой, которая вообще имеет отличную от системы электронных спинов температуру, и равновесие достигается за более продолжительное время, типичное в миллисекунду или даже большее (время спин-решеточной релаксации). Различие времен спин-спиновой и спин-решеточной релаксаций позволяет рассматривать кристалл в магнитном поле, как бы разделенным, на две подсистемы: одна,

образованная спинами, другая — решеткой, причем каждая со своей собственной температурой. В то время возбуждение магнитных уровней производилось с целью изучить уровни атомов и спины ядер. Голландский физик С. Дж. Гorter рассмотрел в конце 1930-х — начале 1940-х гг. возможность того, что прецессия ядерных магнитных моментов во внешнем поле может проявиться в макроскопических эффектах. В 1936 г. он попытался обнаружить ядерный резонанс в твердых телах путем поиска увеличения температуры и показал свою интуицию, связав отрицательные результаты своего эксперимента с продолжительным временем спин-решеточной релаксации (в его случае большей, чем сотая секунды). Он обсуждал свои эксперименты с Раби в 1937 г.

### Магнитный резонанс

Первые успешные эксперименты по обнаружению магнитного резонанса в веществе за счет электромагнитных эффектов были выполнены независимо Ф. Блохом в Стэнфорде, Е. М. Парселлом в Гарварде (США) и Е. К. Завойским в СССР. В этих экспериментах наблюдалась переориентация магнитных моментов ядер или электронов в твердых телах при взаимодействии с электромагнитной волной. Эта методика получила название магнитного резонанса.

Чтобы наблюдать этот эффект нужны два магнитных поля: одно постоянное поле для получения энергетических состояний, а другое осциллирующее поле, которое наводит переходы между этими состояниями. Таким образом, происходит поглощение или испускание излучения, которое производит изменение распределения энергии по уровням. Это явление, в некотором смысле, аналогично переходам электронов между их орбитами, в результате которых получаются спектры в видимой, инфракрасной и ультрафиолетовой областях спектра, наблюдаемых в атомах. Но оно значительно сложнее. В случае спектров атомов уровни, между которыми происходят переходы, уже существуют, поскольку это энергетические уровни электронов в атоме. В магнитном случае нужно сначала образовать энергетические уровни с помощью некоторого внешнего поля, а уж затем можно изучать переходы.

Блох и Парселл получили за свои исследования Нобелевскую премию в 1952 г. Они пришли к магнитному резонансу двумя разными путями, которые, однако, были, по существу, сходными. Завойский был первым, кто наблюдал переходы между уровнями тонкой структуры основного состояния в парамагнитных солях (парамагнитный электронный резонанс).

Феликс Блох родился в Цюрихе, 3 октября 1905 г. Он поступил в Федеральный институт технологии (учебное заведение, в котором учился Эйнштейн) в 1924 г. После одного года обучения на инженера он решил вместо этого изучать физику и перевелся на отделение физики и математики того же института. В течение последующих лет он занимался под руководством профессоров: П. Дебая (1884—1966), Г. Вейля (1885—1955) и Э. Шрёдингера. Первоначально интересовался теоретической физикой. После того, как Шрёдингер оставил Цюрих осенью 1927 г., он продолжил свои занятия с В. Гейзенбергом в университете Лейпцига, где летом 1928 г. получил докторскую степень. Его диссертация была посвящена квантовой механике электронов в кристаллах и теории проводимости в металлах, в которой он установил теоретическую основу для современного рассмотрения электронов в твердых телах на основе зонной теории. Впоследствии он работал с Паули, Крамерсом, Гейзенбергом, Бором и Ферми.

Блох покинул Германию в 1933 г. после прихода Гитлера к власти. Годом позже он получил позицию в Стэнфордском университете (Калифорния, США). Там он начал экспериментальные исследования,

которые проводил вплоть до своей отставки в 1971 г. В 1936 г. он опубликовал работу, в которой показал, что магнитный момент свободных нейтронов можно измерить путем наблюдения рассеяния их на железе. В течение войны он был привлечен на ранних стадиях работы в атомном проекте в Стэнфордском университете и в Лос-Аламосе, а позднее участвовал в работах по противодействию радарам в Гарвардском университете. Благодаря этой последней работе он познакомился с самыми современными достижениями в электронике. Это, в сочетании с его ранней работой по магнитному моменту нейтрона, позволило ему предложить новый подход к исследованию ядерных моментов в твердых телах. Немедленно после возвращения в Стэнфорд он начал изучать ядерную индукцию, как позднее назвал ее.

Блох также занимал важные научные посты. В 1954 г. он стал первым директором ЦЕРНа в Женеве. Он скончался в Цюрихе 10 сентября 1983 г.

Эдвард Миле Парселл родился в штате Иллинойс (США) 30 августа 1912 г. В 1929 г. он поступил в университет Пурду штата Индиана, который закончил в 1933 г. по специальности радиоинженера. Его интересы уже обратились к физике и выдающийся профессор Ларк-Горовиц, которому во многом обязана физика твердого тела в США, позволил ему принимать участия в экспериментальных исследованиях по дифракции электронов. После года, проведенного в Германии в Высшей технической школе в Карлсруе, где он занимался под руководством профессора В. Вейзеля, поступил в Гарвардский университет, где и получил докторскую степень. После работы в течение двух лет преподавателем физики в Гарварде поступил в Лабораторию излучения в МИТ, которая была организована для проведения военных исследований и разработок микроволновых радаров. В этой лаборатории он стал руководителем Группы фундаментальных исследований, которая занималась освоением новых диапазонов частот и разработкой новых микроволновых устройств. Открытие ядерного резонансного поглощения, как он его назвал, было сделано сразу же после окончания войны и примерно в то время, когда Парселл возвратился в Гарвард на должность доцента физики. Он стал профессором физики в 1949 г. и скончался в 1997 г.

Евгений Константинович Завойский родился в Казани в семье врача. Учился и работал в Казанском университете. Почти со своих студенческих лет он интересовался возможностью использовать радиочастотные электромагнитные поля для изучения строения и свойств вещества. С начала 1933 г. выполнял исследовательские эксперименты по резонансному поглощению радиочастотного излучения в жидкостях и газах. В 1941 г. он стал первым, кто использовал модуляцию постоянного магнитного поля на звуковых частотах в таких экспериментах. В 1944 г. им открыт электронный парамагнитный резонанс, что и стало предметом его докторской диссертации.

В течение 1945—1947 гг. он выполнил серию важных экспериментов, зарегистрировав кривые дисперсии в диапазоне резонанса и получив электронный парамагнитный резонанс в солях марганца. В дальнейшем более 20 лет работал в Курчатовском Институте Атомной Энергии.

Завойский внес вклад в различные области ядерной физики, разработав, в частности, в 1952 г. сцинтилляторную трековую камеру[4]. В области физики плазмы он открыл в 1958 г. магнито-акустический резонанс. Награжден Ленинской и Государственной премиями. Его достижения стали известными на Западе лишь после окончания Второй мировой войны. Е. К. Завойский скончался в 1976 г.

Сообщения о первых экспериментах по магнитному резонансу были сделаны Блохом и Парселлом в

течение одного месяца и независимо друг от друга. В январском выпуске 1946 г. престижного американского журнала *Physical Review*, Парселл, Торрей и Паунд (г. р. 1919) сообщили в коротком письме редактору (полученному 24 декабря 1945 г.), что они наблюдали поглощение радиочастотной энергии в твердом материале (парафин) в результате переходов, индуцированных между энергетическими уровнями, которые соответствуют различным ориентациям спина протона в постоянном магнитном поле.

В эксперименте образец парафина помещался в резонатор, который, в свою очередь, располагался между полюсами постоянного магнита. Радиочастотная волна с крайне низким уровнем ее магнитного поля, направленного перпендикулярно постоянному полю, посылалась в этот резонатор, и измерялась ее интенсивность на выходе из резонатора. Когда сильное магнитное поле медленно изменялось, наблюдался резкий резонанс поглощения (рис. 37). Поскольку протон имеет спин  $1/2$ , можно предполагать, что при помещении его в постоянное магнитное поле, он может занять только два положения: либо его спин параллелен полю, либо его спин антипараллелен полю. Разность энергий между этими двумя энергетическими уровнями, которые соответствуют этим двум позициям, при той напряженности магнитного поля, которая была в эксперименте, соответствовала частоте 29,8 МГц. На этой частоте и поглощалась микроволновое излучение (см. рис. 37). При комнатной температуре (при которой и выполнялся эксперимент) разность между числом протонов, выстроенных вдоль магнитного поля и выстроенных против него, крайне мала. Однако полное число протонов было столь велико, что заметный эффект получался как только достигалось термическое равновесие. Ключевым вопросом было время, требуемое для установления термического равновесия между спинами и решеткой. Разность в населенностях этих двух уровней является неизменным условием для наблюдения поглощения.

Рис. 37. Кривая поглощения протонного резонанса в растворе нитрата железа, полученная методом Парселла

Авторы это очень хорошо понимали и принимали во внимание конкуренцию между процессами поглощения и вынужденного излучения. Действительно, процессы поглощения включают поглощение фотона микроволнового излучения, что заставляет частицу перейти с низшего на высший уровень. Наоборот, процессу вынужденного излучения соответствует испускание фотона, который подобен фотону, индуцирующему этот процесс, и который заставляет частицу перейти с верхнего на нижний уровень. Поэтому, если эти два процесса поглощения излучения и вынужденного излучения происходят в равной степени, то никакого сигнала изменения излучения, проходящего через образец, не получится. По этой причине важно установление термического равновесия, так как при этом нижний энергетический уровень более населен, чем верхний, и, следовательно, процесс поглощения превалирует.

Здесь может помочь статистическая механика. Согласно Больцману, отношение между числом молекул, находящихся на верхнем энергетическом уровне, к числу молекул, находящихся на нижнем, дается экспоненциальной зависимостью. В показателе с отрицательным знаком стоит разность энергий двух состояний, деленная на фактор  $kT$ , где  $k$  — постоянная, введенная Больцманом, а  $T$  — абсолютная температура. В нашем случае, разность энергий двух магнитных уровней пропорциональна напряженности приложенного магнитного поля, и, увеличивая поле, можно увеличить эту разность. Однако значения магнитных полей, достигаемых доступной техникой,

ограничены. Поэтому разность энергий при комнатной температуре мала и сравнима со значением  $kT$ .

Этот факт означает, что, например, в случае водорода и разумного значения магнитного поля (7000 Гаусс) отношение населенностей верхнего и нижнего уровней составит весьма малую величину. Этого, тем не менее, достаточно, чтобы зарегистрировать сигнал поглощения.

Открытие Парселла можно рассматривать, как естественное следствие попыток, предпринятых в Лаборатории Радиации MIT для уменьшения длины волны радара до 1,25 см. Получилось так, что эта длина волны попадает в полосу сильного поглощения водяных паров атмосферы, и это препятствовало работе радара. Парселл уделял большое внимание точным методам измерения полос поглощения и в соответствии с этим назвал свою методику резонансным поглощением ядерного магнитного резонанса.

В следующем выпуске *Physical Review*, снова в виде письма в редакцию, появилось короткое сообщение Ф. Блоха, В. Хансена и М. Паккарда, полученное 29 января 1946 г. Авторы описывали эксперимент в определенном отношении подобный эксперименту Парселла, в котором они использовали воду. В их эксперименте на постоянное магнитное поле, которое прикладывалось в одном направлении (например, вертикальное), накладывалось малое осциллирующее магнитное поле вдоль горизонтального направления. Магнитные моменты ядер образца, первоначально параллельные постоянному полю, возмущались в такой конфигурации малым осциллирующим полем, которое заставляло их прецессировать вокруг этого поля. При резонансной частоте это малое поле может инвертировать направление магнитных моментов. Это, в свою очередь, могло проявиться в эффекте электромагнитной индукции в катушке, помещенной в соответствующее место. Это явление, открытое Фарадеем в 1822 г., заключается в том, что изменяемое магнитное поле индуцирует ток в электрической цепи.

Это исследование Блоха мотивировалось стремлением найти методики для точных измерений магнитного поля. В 1946 г. Блох также дал теоретическое объяснение эксперимента, введя два времени релаксации спиновой населенности. Одно время описывалось, как достижение быстрого термического равновесия спинов ядер с упругими колебаниями материала (спин-решеточная релаксация). Второе время является характеристическим временем, в течение которого поперечные компоненты намагничивания релаксируют к своему равновесию, т.е. к нулю.

Парселл и Блох впервые встретились на собрании Американского физического общества в Кембридже (Массачусетс) в 1946 г. У них всегда были самые дружеские отношения. Когда оба были награждены Нобелевской премией, Блох послал Парселлу телеграмму: «Я думаю, что для Эдда Парселла прекрасно разделить потрясение с Феликсом Блохом».

Ядерный магнитный резонанс, первоначально используемый для изучения магнитных свойств вещества, со временем стал важнейшей медицинской техникой. Поскольку он позволяет измерять сдвиг резонансной частоты, получающийся за счет локального окружения ядра, получается мощный метод химического анализа, позволяющий идентифицировать химические соединения и изучать их строение. При этом важным применением является медицинская диагностика. Ядерный магнитный резонанс позволяет идентифицировать положение магнитных моментов ядер с помощью характерного спектра поглощения. Ядра, дающие сильные сигналы, имеются, например, в водороде, дейтерии, углероде и фосфоре. Эти ядра проявляются по их спектрам ядерного магнитного

резонанса, и с помощью специальной техники можно установить их положение и таким образом получать трехмерное изображение.

Первые спектры в живых тканях были получены лишь около 20 лет назад. Причина, почему потребовалось так много времени для разработки этой техники, может быть в том, что в ядерном магнитном резонансе (ЯМР) с переходами связаны очень малые энергии, и поэтому, чтобы получить достаточно сильные сигналы, требуются сильные постоянные поля. Эти поля должны быть крайне однородными во всей области исследуемого образца, который может иметь большие размеры, например человеческое тело. Использование сверхпроводящих магнитов преодолевает эту трудность. Медицинское применение ЯМР сегодня позволяет получать изображения анатомических частей человеческого тела и идентифицировать химические составляющие в организме. Эта диагностика уже получила широкое распространение во многих больницах. Она во многих случаях заменяет и дополняет наряду с ультразвуковой диагностикой (УЗИ) традиционную рентгенографию. Ее преимущества заключаются в высокой чувствительности и исключении вредности рентгеновских лучей. В 2003 г. Нобелевская премия по физиологии и медицине была присуждена американскому химику Поллю Латербуру и британскому медику Петеру Мансфилду «за их вклад в визуализацию магнитного резонанса». В 1970-х гг. эти два исследователя, независимо друг от друга, продвинули преобразование технологии ЯМР из спектроскопических лабораторий в клиническую диагностику. Идея была в том, чтобы пространственные изменения сигналов в однородном магнитном поле ЯМР спектрометра связать с теми областями, откуда эти сигналы получаются. Действительно, поскольку резонансная частота спина зависит от силы однородного магнитного поля, то если эта сила различна в разных точках, то и резонансные частоты в разных точках будут различны. Поэтому знание значения магнитного поля в каждой точке позволяет локализовать те ядра, которые производят сигнал ЯМР. В 1973 г. Латербур опубликовал первое пространственно разрешенное изображение. В 1974-1975 гг. Мансфилд со своими коллегами разработал методики быстрого сканирования в образцах и в 1976 г. получил первое изображение живого человеческого тела. Нобелевская премия явилась оценкой их вклада в разработку полезной клинической методики.

ЯМР-изображения всего человеческого тела появились около 1980 г. По сравнению с первыми расплывчатыми изображениями в настоящее время получают четкие изображения. Детали можно различать с разрешением в несколько кубических миллиметров, что позволяет исследовать отдельные органы.

Рис. 38. (а) Ориентация оси симметрии кристалла рубина по отношению к направлению магнитного поля (угол  $\theta$ ). Энергетические уровни рубина для  $\theta = 0^\circ$  (б) и для  $\theta = 90^\circ$  (в)

Электронный парамагнитный резонанс

Электронный парамагнитный резонанс существенно не отличается от ядерного резонанса, за исключением того, что энергетические уровни получаются во внешнем магнитном поле не от ядерных спинов, а зеемановскими уровнями, которые получаются в результате воздействия магнитного поля на движение электронов в атоме. Как мы уже видели, при приложении внешнего магнитного поля к атому снимается вырождение атомных орбит, и каждый уровень энергии электрона расщепляется на несколько подуровней, разделенных малой величиной энергии, которой типично соответствует микроволновая частота, причем это деление подуровней зависит от величины внешнего магнитного поля.

Принцип метода очень прост. Постоянное магнитное поле прикладывается к веществу так, чтобы электронные уровни испытывали зеемановское расщепление. Одновременно на образец посылается малое радиочастотное поле и его частота варьируется. Пики поглощения наблюдаются, когда частота этого поля точно соответствует разности энергий между двумя зеемановскими уровнями. В качестве примера сошлемся на ионы хрома, содержащиеся в кристалле рубина (позднее мы детально обсудим рубин). Эти ионы содержат неспаренные электроны, которые дают полный спин, равный  $3/2$ .

Электрическое поле, образуемое всеми атомами кристалла, блокирует все другие угловые моменты, и поэтому при наличии внешнего магнитного поля поведение рубина определяется лишь неспаренными электронами. Диаграмма образующихся уровней зависит от ориентации внешнего магнитного поля по отношению к главной оси симметрии кристалла (рис. 38, а). Этот эффект существенно зависит от силы магнитного поля для разных ориентации, как видно из рис. 38, б и 38, в. Стоит отметить, что подбором подходящего значения внешнего поля можно получить нужное разделение уровней. Это является фундаментальным принципом работы трехуровневого лазера.

#### Атомные часы

Как мы уже говорили, в 1949 г. Н. Рамси изобрел резонансную методику с разнесенными осциллирующими полями, которая в 1955 г. была использована Дж. Захариасом, Дж. Пари, Луисом Эссеном и др. для создания атомных часов и стандартов частоты. За этот метод Рамси в 1989 г. получил Нобелевскую премию по физике вместе с Г. Демельтом и В. Полем, которые разработали изощренную методику для изучения одиночных атомов и молекул.

Проблема измерения времени всегда была важной и трудной. Вначале она была связана с вращением Земли вокруг своей оси, которое, как полагали, происходит с высокой регулярностью. Увеличение точности маятника, введенное Гюйгенсом и астрономическими наблюдениями, побудило во времена Ньютона, Джона Фламстида, первого Королевского Астронома в Гринвиче, проверить регулярность вращения Земли, используя маятниковые часы. Он не нашел каких-либо доказательств несовершенства в этой регулярности, но последующие поколения астрономов собрали все увеличивающийся список нерегулярности продолжительности суток.

В начале 20 столетия, например, благодаря астрономическим наблюдениям было определенно установлено, что вращение Земли замедляется из-за приливного трения. К середине 1930-х гг. часы были улучшены благодаря появлению кварцевых часов. Это позволило измерить нерегулярности вращения (рис. 39). В кварцевых часах колебания кристалла кварца создают электрические колебания с постоянной частотой, с помощью которой и измеряют время. Кварцевые часы можно откалибровать по астрономическим наблюдениям, а затем использовать их в лаборатории. Лучшие из них могут работать в течение года, накапливая ошибку в 5 миллисекунд. Эта точность, тем не менее, недостаточна для современных научных и технологических целей.

Рис. 39. Изменение продолжительности дня за период четыре года. Отметьте, что шкала по ординате только  $3 \text{ мс} = 0,003 \text{ с}$

Как только были обнаружены нерегулярности вращения Земли, стало необходимым найти другой способ определить стандарт единицы времени.

Эта единица, секунда, определялась как  $86400$ -я часть средних солнечных суток, получаемых астрономами, рассматривающих замкнутое движение Земли по орбите вокруг Солнца (эфемиридное время). За образец принималась средняя продолжительность 1900 г. Эта единица измерений времени

была принята Генеральной Ассамблеей Мер и Весов в 1960 г. (одна секунда определялась как  $1/31\,556\,925,9747$  часть 1900-го года).

Однако требования на стабильность маятниковых и кварцевых часов не могли быть удовлетворены в отношении наиболее важного критерия, а именно, — независимая воспроизводимость.

Развитие атомной теории и, в частности, заключение, что атомы данного химического элемента все одинаковы, позволяло принять за основу единицу измерения, связанную не с Землей, но с самим атомом. Уже Максвелл и лорд Кельвин предложили использовать в качестве единицы измерения длины и времени длину волны и соответственно частоту излучения, испускаемого подходящим атомом. Например, водорода, в простейшем случае, или D-линию натрия, которая очень интенсивна. Однако потребовалось много лет, прежде чем эта идея нашла практическое воплощение. Сразу же после Второй мировой войны Ч. Таунс из Bell Labs и Р. Паунд из MIT предложили использовать микроволновое поглощение для стабилизации генератора.

Рассматривая генератор микроволн, мы видим, что по многим причинам его частота не остается строго стабильной во времени, но испытывает малые случайные изменения. Поэтому имеется проблема найти пути поддерживать ее стабильной. Решение, предложенное Таунсом и Паундом, заключалось в том, чтобы использовать молекулу аммиака, которая имеет максимум в зависимости поглощения от частоты точно на частоте 23,8 ГГц, причем эта частота не изменяется во времени. Принцип очень прост. Рассмотрим его для специфического случая аммиака. Предположим, что мы направляем микроволновое излучение, частоту которого мы можем изменять вблизи частоты 24 ГГц, в кювету, наполненную аммиаком, и измеряем мощность на выходе. Изменяя частоту, мы обнаруживаем максимум поглощения как раз на центральной частоте линии аммиака (23,8 ГГц). Когда поглощение максимально, мы знаем, что частота микроволн, которые мы посылаем в кювету, как раз и равна этому значению. Таким образом, достигается стабильность. Мы можем зафиксировать параметры генератора так, чтобы он генерировал точно на этой частоте. Если по какой-либо причине частота генератора изменится, то уменьшится и поглощение (т.е. увеличится мощность на выходе), и с помощью подходящей системы обратной связи мы можем подстроить частоту генератора так, чтобы получить снова частоту максимума поглощения. Этот метод позволяет контролировать и фиксировать микроволновую частоту в течение продолжительного времени, используя линии поглощения молекул.

В период 1947-1948 гг. Таунс и его коллеги построили и запатентовали устройства стабилизации генератора на клистроне, используя аммиак. Но для того, чтобы построить часы, нужно было поделить высокую частоту на фактор порядка тысячи, чтобы перенести стабильную частоту в область мегагерц, где новые часы можно было бы сравнить с уже существующими часами.

По настоянию Таунса, Гарольд Лионе (1913—1991), ответственный за подразделение по микроволновым стандартам в Американском Бюро Стандартов, в августе 1948 г. построил стандарт частоты с использованием аммиака. В 1952 г. его группа добилась стабильности одной или двух частей на сто миллионов. Это, однако, не на много превышало стабильность вращения Земли. Значительные усилия К. Шимода из Токийского университета привели к улучшению стабильности до одной части на 10<sup>9</sup>.

Уже в 1948 г., когда Лионе уже построил свой первый стандарт с использованием аммиака, он начал программу создания настоящих атомных часов, основанных на атомных переходах, которые

получили название «атомных часов». Поскольку он не был экспертом в спектроскопии, то попросил содействия у Исидора Раби и «правая рука» Раби, Поликарп Куш, разработал концептуальную конструкцию, в которой использовался пучок атомов цезия. Цезий уже был всесторонне изучен группой Раби, и по ряду причин ожидалась высокая стабильность.

Поликарп Куш (1911 — 1993) был очень способным экспериментатором. После получения докторской степени по молекулярной оптической спектроскопии в 1936 г. поступил в Колумбийский университет, где вместе с Раби участвовал в пионерских исследованиях метода магнитного резонанса в молекулярных пучках. С помощью этой методики он провел ряд исследований, которые привели к открытию в 1947 г. аномального магнитного момента электрона. За это он был награжден в 1955 г. вместе с Виллисом Е. Лэмбом Нобелевской премией по физике. Во время Второй мировой войны разрабатывал высокочастотные генераторы для радаров. Его лекции, которые он читал звучным голосом (известным как «шепот Куша»), носили характер проповеди, черта, которую он, вероятно, унаследовал от отца — лютеранского миссионера.

Летом 1951 г. аппаратура заработала, хотя и не в окончательном виде. Куш фактически пытался использовать методику Рамси двух полей для точной настройки микроволнового поля. Это был первый эксперимент, в котором использовалась эта методика. Весной 1952 г. заработала вся установка, и концу года была измерена частота перехода изотопа цезия с массой 133 (было найдено, что именно он самый стабильный по своей природе), для которой было установлено значение  $9,192\,631\,800$  ГГц.

Эти положительные результаты также стимулировали Британскую Национальную Физическую Лабораторию построить свою версию этого устройства, основанного на той же методике Рамси. Путем сравнения их измерений с точными астрономическими измерениями в Гринвиче, Луис Эссен и Дж. Пэрри установили более точно частоту излучения, как  $9,192\,631\,770$  ГГц. Эта частота была принята в 1964 г. Генеральной Ассамблеей Мер и Весов для официального определения секунды (т.е. секунда определяется как  $9\,192\,631\,770$  периодов колебаний перехода в атоме цезия). Это определение делает атомное время согласованным с секундой на основе эфемеридного времени. Все эти устройства еще не были настоящими часами, в том смысле, что они не давали прямого соответствия с более низкими частотами, которые нужно использовать, чтобы подсчитать секунды. Окончательный шаг был сделан в Лаборатории радиации MIT Дж. Р. Захариасом (1905—1986), который в 1955 г. успешно построил коммерческую версию атомных часов с использованием цезия, которая получила название «атомохрон».

В 1967 г. международный стандарт секунды был определен на основе перехода между уровнями сверхтонкой структуры атома цезия.

В 1990-х гг. были достигнуты несомненные успехи в стабильности и точности атомных часов, благодаря разработке методов захвата и охлаждения атомов с помощью лазеров. Сложные геометрии позволили построить то, что стали называть фонтанными часами. Продолжительность взаимодействия атом—волна в атомных часах конечно, и это уширяет пик резонанса в результате принципа неопределенности Гейзенберга по отношению к время—энергия. Другие эффекты также ограничивают точность этих часов. С помощью лазеров атомы можно теперь относительно легко охлаждать до  $1$  мК. При таких температурах тепловая скорость атомов составляет только несколько миллиметров в секунду вместо  $100$  м/с, которую они имеют при комнатной температуре.

В т.н. фонтане атомы подбрасываются вертикально вверх под действием лазеров, а затем под действием тяжести падают вниз, подобно воде в фонтане. Система устроена так, что атомы взаимодействуют с электромагнитным полем и когда они летят вверх, и когда они опускаются вниз. Тем самым увеличивается время взаимодействия. При высоте в 1 м время взаимодействия струе атомов фонтана достигает 1 с.

В 1989 г. Стивен Чу и Курт Гибл в Стэнфордском университете (США) продемонстрировали первый фонтан с использованием охлажденных атомов натрия. Затем, в 1991 г. Клод Коен-Тануджи и Кристоф Саломон из Ecole Normale Supérieure (Париж) вместе с Андре Клероном из Парижской Обсерватории использовали цезий. В результате в 1993 г. Клерон построил первый фонтан охлажденных атомов, с помощью которого в 1995 г. была достигнута точность менее 1 с за 30 миллионов лет (огромное достижение).

Необходимость в столь точных часах возникает, например, в радиоастрономии, или для проверки теории относительности Эйнштейна. Пожалуй, наиболее значительным применением атомных часов является система глобального определения координат (GPS) с помощью спутников. Она нужна для навигации и различных систем мониторинга. Используется набор 24 спутников на геостационарных орбитах. Для точного определения их положения используются сигналы с точной привязкой во времени. Тогда положение человека, имеющего приемник, определяется по разности времени, которое требуется для прохождения сигналов от спутников до приемника. В настоящее время эта система обеспечивает точность определения координат до долей метра, что требует определения временных интервалов до долей наносекунд ( $1 \text{ нс} = 10^{-9} \text{ с}$ ).

Экспериментальное доказательство инверсии населенности

Вернемся к экспериментам по ядерному резонансу. Некоторые эксперименты, выполненные Блохом и его коллегами, имеют большое значение для нашей истории. В некоторых экспериментах они нашли, что время релаксации воды было между половиной секунды и одной минуты. Чтобы определить это значение более точно, был задуман замечательный эксперимент. Образец воды помещался в постоянное магнитное поле, достаточно высокой напряженности. При приложении осциллирующего поля с изменяемой частотой наблюдался типичный резонансный пик. Затем, за очень короткое время, направление постоянного поля, вдоль которого прецессируют магнитные моменты, изменяло знак (поле инвертировалось). Вначале наблюдался резонансный пик, затем в течение нескольких секунд этот пик исчезал и снова начинал расти, но с отрицательным значением. Это поведение можно объяснить следующим образом. Первоначально магнитные моменты выстраиваются вдоль направления поля, а слабое переменное поле, поглощаясь, индуцирует переходы в направление уровней с большей энергией (это приводит к пику поглощения). Когда постоянное поле изменяет свое направление, спины первоначально оказываются ориентируемыми почти антипараллельно, и теперь переменное поле индуцирует вынужденные переходы с верхнего уровня на нижний уровень. Это происходит до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие в этом новом направлении поля.

В эксперименте Блоха время, необходимое для достижения этого нового равновесия, было около нескольких секунд, и это было как раз то значение релаксации воды, которое и интересовало исследователей. В течение нескольких секунд, необходимых для достижения нового равновесия, населенность спинов была в состоянии инверсной населенности, т.е. с большим числом частиц на

более высоком магнитном уровне, чем число частиц на уровне с меньшей энергией.

Блох не обратил внимания на эту особенность, сосредоточившись на проблеме определения времени релаксации и измерения его точного значения. Инверсная населенность, получаемая таким способом, получившим название быстрого адиабатического прохождения, была позднее, в 1958 г., использована, чтобы создать инверсную населенность в двухуровневом твердотельном лазере. В следующем году Н. Бломберген, молодой голландский физик, о котором мы более подробно поговорим позднее, вместе с Парселлом и Паундом продолжал изучать времена релаксации. Он ввел в теоретическое рассмотрение уравнения, которые описывают поведение числа атомов, находящихся на разных энергетических уровнях. Эти уравнения сыграли фундаментальную роль в описании действия мазеров и лазеров.

Отрицательная температура

В 1951 г. Парселл и Паунд в короткой заметке в *Physical Review* ввели понятие отрицательной температуры и показали существование отрицательного поглощения. Они рассматривали эксперимент по ядерному поглощению и рассуждали следующим образом. При напряженностях поля, позволяющих системе быть описанной через ее полный магнитный момент (намагничивание), существенно быстрое обращение (перемена знака, инверсия) магнитного поля должно привести к намагничиванию, которое противоположно новому направлению поля. Это обращение должно осуществляться за такое короткое время, чтобы намагничивание не могло мгновенно следовать за полем. Они выполнили эксперимент с образцом флюорида лития, помещаемого в магнитное поле, направление которого, после достижения теплового равновесия, быстро обращалось. Это время инверсии делалось короче, чем спин-решеточная релаксация, и, таким образом, конфигурация ядерных спинов имела достаточно времени, чтобы измениться в течение инверсии поля. В пределах короткого интервала времени, в течение которого спины остаются инвертированными, получается отрицательное поглощение, т.е. испускание.

Этот эффект показан на рис. 40, причем частота периодически варьировалась взад и вперед через значение резонансной частоты. Пик, крайне слева, представляет нормальную резонансную кривую, перед тем как поле инвертируется. Как раз справа от этого положения поле было инвертировано, и следующий пик направлен вниз, что соответствует отрицательному поглощению. Эти отрицательные пики становятся слабее, вплоть до состояния, где исчезают и положительное и отрицательное поглощения (ноль пика). В этом состоянии населенности верхнего и нижнего уровней равны. Последующее увеличение положительных пиков показывает новое установление термодинамического равновесия населенностей.

Если мы теперь вспомним, что в случае молекул, которые могут находиться на двух энергетических уровнях, число молекул, находящихся в верхнем состоянии, равно числу молекул, находящихся в нижнем состоянии, умноженному на экспоненциальный фактор, который является отрицательным отношением разности энергий двух уровней к  $kT$ , то мы увидим, что для положительного значения температуры экспоненциальная функция всегда отрицательна, и поэтому экспоненциальный член всегда меньше единицы. Это означает, что населенность частиц в верхнем состоянии всегда меньше, чем населенность в нижнем состоянии. Ситуация, при которой населенность верхнего уровня больше, чем нижнего, соответствует случаю, при котором экспоненциальный множитель больше единицы. Это получается, если  $kT$  является отрицательным, т.е. температура отрицательна.

Отрицательная температура просто означает, что занятие состояний с большей энергией более вероятно, чем состояния с меньшей энергией. Это получается в одних и тех же уравнениях. Но дело не только в формулах, отрицательная температура имеет глубокий физический смысл. Через семь лет после введения этого понятия, полное объяснение его значения было дано двумя исследователями, Абрагамом и Проктором. Парселл прокомментировал их работу, говоря: «Это как получение свидетельства о браке через семь лет после рождения ребенка».

Н. Рамси, который в нескольких работах (даже философских) обсуждал смысл отрицательной температуры, писал:

«Паунд, Парселл и Рамси выполнили серию экспериментов с кристаллами LiF, которые имеют очень большое время релаксации. Они обнаружили, что спиновая система существенно изолирована в течение времени, которое изменяется от 15 с до 15 мин, и что за времена, короткие по сравнению с этим временем, спиновая система может находиться в состоянии с отрицательной температурой. В этом состоянии уровни с более высокой энергией заселены более полно по сравнению с уровнями с низкой энергией. Такая система характеризуется тем, что когда на нее падает внешнее излучение, то вынужденное излучение превосходит поглощение».

В эксперименте Парселла и Паунда они наблюдали сигнал, который получался из-за распада инверсной населенности зеэмановских уровней. Никто не придумал значения тому, что это — метод, который позволяет получить инверсию, или тому факту, что система с отрицательной температурой, связанная с микроволновым резонатором или волноводом, может дать когерентное усиление благодаря процессу вынужденного излучения. Вероятно, это было из-за того факта, что этот метод получения инверсии давал только краткосрочное существование инверсной населенности. Лишь позднее методы получения инверсии были использованы для создания мазеров.

## Глава 10

### МАЗЕР

Теперь мы готовы рассказать, как был изобретен мазер или, лучше сказать, как он был открыт, имея в виду, что во Вселенной существуют звездные мазерные источники, и поэтому человек эффективно воспроизвел в лаборатории то, что уже существовало в природе.

Чтобы сделать ярче картину, окружающую создание сперва мазера, а потом и лазера, полезно рассмотреть состояние исследований по физике и дух, с которым эти исследования выполнялись в годы после Второй мировой войны. Перед Первой мировой войной исследования проводились персонально или малыми группами, не имеющими связей с промышленностью и не предвидящих каких-либо применений. Ученые старались удовлетворить свое любопытство путем открытия и объяснения новых явлений. Открытие радия Марией Кюри (1867—1934) — яркий пример. Она начала с наблюдения, что некоторые минералы, из которых извлечен уран, элемент, радиоактивность которого была открыта Анри Беккерелем (1852—1908), показывают радиоактивность большую, чем можно было приписать содержанию урана. Поэтому внутри этих минералов должны быть одна или более субстанций с радиоактивностью большей, чем у урана. Это заставило ее изучить эти субстанции. Эти исследования были проведены в сарае с огромными трудностями, без какой-либо помощи, кроме ее мужа Пьера (1859—1906). Финальным результатом было открытие полония и радия (1898). Вскоре было обнаружено, что излучение, испускаемое радиоактивными веществами, обладает биологическими эффектами, и их стали использовать в борьбе с раком. Таким образом,

открытие радия привело к важному практическому применению, хотя этого никто не предполагал вначале исследования

Во время Второй мировой войны ситуация изменилась радикально, особенно в США, где были получены самые важные результаты, относящиеся к нашей истории. Разработка радара, который существенно повлиял на исход войны, ядерные исследования, кульминацией которых явилось создание атомной бомбы — всё это показало огромные возможности, заключенные в физических исследованиях, и сколь экстраординарные применения могут быть получены. К концу войны физика предстала как важнейшая наука для будущего.

В 1948 г. изобретение транзистора и последующая революция в электронике предстали еще одним революционным шагом. Теперь исследования не кончались сами по себе с единственной целью получить чистые знания, но они стали способом получить новые знания, ведущие к конкретным применениям со значительным социальным последствием.

Оказалось, что физика не является абстрактной наукой для немногих избранных, но представляет инструмент, способный дать существенные элементы для развития общества или, в зависимости от того, что желают иметь, для его уничтожения. Ядерные исследования и разработка ядерных реакторов для получения энергии (сегодня рассматриваемое с некоторым скепсисом) после Второй мировой войны рассматривались с огромной благосклонностью как средство решения энергетической проблемы для человечества.

В это же время началась связь с промышленностью, научно-исследовательских отраслевых лабораторий и развитие самой промышленности, основанное на результатах физических исследований. Внезапно физики стали значительными и популярными, и большие деньги стали предоставляться им из правительственных источников. В этой атмосфере всякий, кто имел хорошую идею с потенциальными применениями, мог, почти наверняка, рассчитывать на поддержку. Эти идеальные условия в период войны продолжались и в течение холодной войны между США и СССР, вплоть до ее окончания. В этот период разработка мазеров и лазеров получила невиданную финансовую поддержку в Америке, благодаря интересу со стороны военных агентств и промышленности. В других странах не было такого счастливого состояния, хотя кое-что и получалось.

В бывшем Советском Союзе Академия наук рассматривалась как важная часть государства и была богатой и сильной. В институтах, разбросанных по всей стране, работали тысячи исследователей, положение которых было значительно лучше, чем у тех, кто работал в других областях. Также существовали секретные лаборатории для военных целей, которые работали вместе с прекрасными академическими лабораториями, так как только с их помощью можно было получить необходимые приборы и методики.

В Европе были организованы большие международные исследовательские центры, такие как ЦЕРН в Женеве. Эта огромная лаборатория была организована при финансовой поддержке Италии, Франции, Германии, Великобритании, Нидерландов и Бельгии. Были построены огромные ускорители и установки для исследований в области физики высоких энергий. Ни одна из стран в одиночку не смогла бы профинансировать это. Ускорители ЦЕРН дают в руки исследователям хорошо организованных международных групп большое количество частиц с высокой энергией. В довоенные годы исследования с такими частицами проводились в лабораториях, которые ожидали

случайного появления малого числа таких частиц в виде космических лучей, их естественного источника. Разработка ускорителей означала, что такие частицы можно получать в большом количестве и работать с ними приемлемым лабораторным образом.

Большая финансовая поддержка со стороны Европы, и особенно Италией, исследований в области частиц высоких энергий имеет свои корни, заложенные престижем Ферми, Амальди и др. Такая финансовая поддержка направлена в хорошо определенном направлении.

Тот факт, что разработка новых устройств, мазеров и лазеров произошла в США и в прежнем Советском Союзе, единственных странах, где исследования проводились в широких областях, можно рассматривать, как основную стратегию не концентрировать исследования лишь на определенных направлениях.

Огромные изменения роли физики и физиков в исследованиях, которые проводились во время войны, можно рассматривать для того, чтобы понять, как дорогостоящие исследования, без гарантии успеха и часто с сомнительными перспективами, могли быть поддержаны без особых проблем.

Мазер означал появление техники усиления, столь радикально отличающейся от тех, что обычно используются; она не могла появиться как простое улучшение уже известной электронной техники.

Потребовались разработки в новых областях, таких как магнитный резонанс, микроволновая спектроскопия, которые принципиально проводились в США и были описаны нами в предыдущих главах. Более того, в то время электромагнитные волны генерировались и принимались, используя лампы (диоды, триоды и др. которые ныне совсем оставлены), в которых использовались электроны, испускаемые нитями, нагреваемыми электрическим током. Действие этих устройств, а также магнетронов, клистронов и др., было совершенно понятно на основе законов классической электродинамики Максвелла. Инженерам не нужно было изучать квантовую механику, которая совершенно необходима для понимания работы мазера, вплоть до 1948 г., когда был открыт транзистор. Для понимания принципа работы этого устройства необходимо рассматривать электронные состояния в твердых телах, которые описываются законами квантовой механики. С этого времени инженеры открыли для себя квантовую механику и стали изучать ее.

Сразу же после войны работы по микроволновой спектроскопии стали, в основном развиваться в Америке в лабораториях прикладных исследований. Четыре независимые группы стали изучать газы с помощью этой методики: Bell Labs, лаборатории «Вестингауз», лаборатории RCA и Колумбийский университет, единственный из университетов. После нескольких лет активности, которая была признанной экономически мало эффективной и прекращенной в промышленных лабораториях, исследования переместились в университеты, где физики и химики заинтересовались использованием микроволн для изучения молекул. Однако большинство молекул имеют наиболее интенсивные спектральные линии на длинах волн в миллиметровой области и слабо взаимодействуют с излучением с длинами волн около сантиметра, которое производилось генераторами радаров. Это вызвало сильное желание спектроскопистов, занимающихся молекулярной спектроскопией, разрабатывать источники в миллиметровой и субмиллиметровой области. Военные были также заинтересованы в миллиметровых системах, поскольку они были более компактны и более легкими для военных применений.

Во время войны самые знаменитые американские ученые сотрудничали с военными, и теперь, когда война окончилась, это сотрудничество естественно продолжалось и желательным были взаимные

контакты. В этой атмосфере, в 1946 г., Военно-морское министерство, Сигнальный корпус армии и Военно-воздушные силы образовали Объединенные службы программ по электронике (JSEP), чтобы поддержать две лаборатории, которые проводили исследования по электронике во время войны и которые продолжались. Это Лаборатория радиации МИТ, которая была реорганизована в Исследовательскую лабораторию электроники, и Колумбийская лаборатория радиации физического факультета Колумбийского университета. К концу 1946 г. к этой программе присоединился Гарвардский университет, а в 1947 г. и Стэнфордская лаборатория электроники в Калифорнии. Министерство обороны США одобрительно относилось к этим лабораториям, которые продвигали науку и технологию, которые могли бы оказаться полезными в военном деле. Более того, они поддерживали высококвалифицированных ученых, стремясь привлечь их к военным задачам и заботясь о появлении нового поколения исследователей. Таким образом, и ученые, и военные работали в области генерации миллиметровых волн с большой взаимной заинтересованностью. В 1950-х гг. назрело время для изобретения нового устройства, и, как это часто бывает, фундаментальные принципы его работы были установлены одновременно и независимо несколькими разными людьми. Читатель, которого не сбивают с толку многочисленные отступления, совершенно необходимые для понимания нашей истории, может увидеть точный путь, который приводит нас к окончательной цели. После извилистого начала наше путешествие проходит с введением Эйнштейном в 1916 г. концепции вынужденного излучения, которая сначала, в 1920-х гг., была использована теоретиками для объяснения различных явлений, и которая позднее была экспериментально подтверждена. В то время, пока эта концепция была в умах исследователей, в 1930-х гг. развивались микроволны и соответствующая техника, и немедленно после интенсивных исследований радаров во время войны, был открыт ядерный резонанс. В экспериментах по ядерному резонансу была получена инверсия населенности. Она возникала на короткое время, как переходное явление, но была достоверно и правильно установлена. Точно так же была установлена роль вынужденного излучения и его противоположность по отношению к явлению поглощения. Теперь давайте посмотрим, как вынужденное излучение было использовано для создания лазера.

#### Предложение Вебера

Первое изложение в публичной аудитории основного принципа, на котором может работать лазер (однако без самого работающего устройства), было сделано Джозефом Вебером (1919—2000) в Оттаве (Канада) в 1952 г. на конференции по электронным лампам (Electron Tube Research Conference). Это была престижная конференция, в которой участвовали лишь по приглашениям и на которой часто представлялись идеи для прогрессивных устройств.

Вебер был тогда молодым профессором электротехники университета Мэриленда и консультантом Военно-морской лаборатории США. Он получил диплом в Аннаполисе и был первым морским офицером, который был, как квалифицированный инженер в области микроволн, в секции электронного противодействия во флоте. Здесь он имел возможность ознакомиться с технологической важностью усилителей с высокой чувствительностью к микроволновым и миллиметровым волнам, поскольку для целей противодействия вражеским радарам требовались такие усилители для обнаружения слабых волн от радаров. Информация о длинах волн, на которых работает радар, и их источнике позволяла затем посылать сигналы, ослепляющие вражеские приемники и, тем самым, не позволяя врагу определять цели.

После демобилизации из флота он поступил в Католический университет Вашингтона. Квантовая механика была частью его занятий, и идея мазера появилась у него после лекции о вынужденном излучении Карла Герцфельда (1892—1978). Он получил докторскую степень по физике в 1951 г., работая в области микроволновой спектроскопии, и стал профессором в университете Мэриленда. Здесь он продолжал работы по микроволновой спектроскопии. Механизм поглощения и испускания, который имеет место, когда излучение взаимодействует с газом, всегда интересовал его. В типичном эксперименте микроволновой спектроскопии микроволны от некоторого источника попадают на приемник. Если между источником и приемником располагается газ, то можно наблюдать поглощение некоторой части падающего излучения. Какова природа этого поглощения? Оно происходит, если молекулы газа обладают парой уровней и разность энергий между ними, деленная на постоянную Планка, приблизительно равна частоте микроволн.

Чтобы лучше понять, как это происходит, Вебер рассматривал систему только с двумя энергетическими уровнями,  $E_1$  и  $E_2$  (причем  $E_2 > E_1$ ), на каждом из которых имеется число атомов или молекул соответственно  $n_1$  и  $n_2$  (мы будем называть  $n_1$  и  $n_2$  населенностями энергетических уровней  $E_1$  и  $E_2$  соответственно). Когда микроволновая частота имеет правильное значение, поглощенная мощность пропорциональна населенности первого уровня, т.е.  $n_1$ . Частицы, которые находятся на верхнем уровне 2, в свою очередь, испускают вынужденное излучение на той же частоте, мощность которого пропорциональна  $n_2$ . Итоговая мощность равна разности между поглощенной и испущенной мощностью, т.е. пропорциональна  $n_1 - n_2$ . Поскольку при термическом равновесии  $n_1$  всегда больше, чем  $n_2$ , Вебер заключал, что «эта итоговая мощность всегда положительная величина. Поэтому при обычных условиях мы получаем поглощение излучения». Однако, добавлял он, «мы можем получить усиление, если каким-нибудь способом можно сделать число осцилляторов в верхнем состоянии большим, чем число их в нижнем состоянии» и заключал «метод осуществить это, предложен в эксперименте Парселла по отрицательной температуре». Эти рассуждения были сделаны Вебером в 1951 г. и представлены на конференции в 1952 г. Вебер позднее объяснял, что он намеревался опубликовать свои результаты в широко читаемом журнале. Вместо этого, профессор Г. Рейх из Йельского университета написал ему, что он, будучи председателем конференции в 1952 г., является также редактором журнала (не широко читаемого, по мнению Вебера) и предполагает опубликовать в нем материалы конференции. В результате краткое сообщение в виде абстракта доклада было опубликовано в июньском номере 1953 г. *Transaction of the Institute of Radio Engineers Professional Group on Electron Devices*.

В своей работе Вебер подчеркивал факт, что усиление является когерентным. Метод, который он предлагал для получения инверсной населенности, фактически никогда не был осуществлен на практике и даже казался маловероятным быть реализованным. Более того, Вебера интересовал только усилитель. Идея обратной связи, столь существенная в мазере Таунса, как мы увидим, не представляла важности для Вебера, и он не обсуждал ее. Вебер также оценил количественно возможности своего устройства, но расчеты, которые он получил при вычислениях, показали столь малые характеристики, что он решил оставить это и не старался построить что-либо. Однако идея вызвала определенный интерес, и после представления своей работы на конференции, Вебер был приглашен RCA провести семинар по его идее. За это он получил гонорар 50\$. После этого семинара Таунс написал ему, с просьбой прислать копию статьи. Однако Таунс не ссылался на работу Вебера в

своих первых работах, но ссылался на нее позже.

Попытки Вебера были отмечены IRE, когда он был удостоен членством в 1958 г. за «его раннее установление концепции, приводящей к мазеру». Он провел 1955/56 академический год, как член Института передовых исследований в Принстоне и включился в изучение общей теории относительности. В течение начала 1960-х гг. он заинтересовался гравитационными волнами, и построил детекторы, которые, однако, не дали определенных доказательств существования гравитационных волн.

Таунс и первый мазер

Между тем была выполнена наиболее известная работа, в которой было создано работающее устройство. Эта работа была проведена в Колумбийском университете, в котором проводились значительные исследования в области радиоспектроскопии, поддержанные дальновидным сотрудничеством с военными организациями. Результатом группы исследователей, возглавляемой Ч. Таунсом, стало создание и запуск первого мазера. Чарльз Таунс родился в 1915 г. в Гринвилле, Южная Каролина (США). В возрасте всего лишь 16 лет он поступил в университет. Хотя он вскоре обнаружил свое пристрастие к физике, также изучал греческий, латинский, англо-саксонский, французский и немецкий языки и получил степень бакалавра по современным языкам после 3-летнего обучения в университете. В 4-й год он получил и степень по физике. Затем он преподавал и в возрасте 21 года закончил работу над диссертацией, продолжая изучать французский, русский и итальянский языки. Затем он поступил в Калифорнийский технологический институт, где в 1939 г. получил докторскую степень и получил назначение в Bell Telephone Laboratories. Во время войны работал над проектом радара для бомбардировщиков. Хотя Таунс предпочитал теоретическую физику, он тем не менее работал над этим практическим проектом

В то время старались увеличить рабочую частоту радаров. Военно-воздушные силы просили спроектировать радар с частотой 2400 МГц. Такой радар работал бы в неосвоенном диапазоне и обещал более точное бомбометание.

Однако Таунс, прочитав неопубликованный меморандум ван Флека по теории поглощения в водяных парах, отметил, что излучение на такой частоте сильно поглощается водяными парами. Тем не менее военные заказчики настаивали попробовать это. Итак, Таунс построил такой радар и убедился, что он не работает. В результате этой работы Таунс стал интересоваться микроволновой спектроскопией (радиоспектроскопия).

В 1947 г. Исидор Раби предложил Таунсу перейти из Bell Labs в Колумбийский университет для работы в его группе. Эта группа продолжала исследования программы военных лет по магнетронам для генерации миллиметровых волн, и эти исследования поддерживались военными. Таунс быстро стал авторитетом в области радиоспектроскопии и в использовании микроволн для изучения свойств веществ. В эти годы Таунс интересовался созданием атомных часов с использованием поглощения микроволн в аммиаке для стабилизации частоты.

В 1950 г. он стал профессором физики. В это же время военные организовали специальный исследовательский комитет по изучению миллиметровых волн и предложили Таунсу быть председателем. Таунс проработал на этом посту почти два года и не был удовлетворен его деятельностью. В один из дней, когда он был по делам комитета в Вашингтоне, как он вспоминал: «По совпадению, я был в номере отеля с моим другом и коллегой Артуром Шавловым, который

позднее занялся лазером. Я проснулся рано и, чтобы не беспокоить его, вышел, сел на скамейку в парке и стал ломать голову над тем, почему мы терпим неудачи (в создании генератора миллиметровых волн). Было ясно, что требуется найти способ сделать очень маленький, прецизионный резонатор с возможностью связать энергию, заключенную в нем, с электромагнитным полем. Но это наводило на мысль о молекуле, а техническая трудность создания такого маленького резонатора и обеспечения его энергией означала, что надо найти способ использовать молекулы! Пожалуй, свежий утренний воздух побудил меня внезапно увидеть, как это можно сделать. За несколько минут я набросал схему и рассчитал требования к молекулярно-пучковой системе, с помощью которой можно отделить молекулы с высокой энергией от молекул с низкой энергией, и затем пропустить их через резонатор, в котором заключено электромагнитное излучение, стимулирующее дальнейшее излучение от молекул. Тем самым обеспечивалась обратная связь и непрерывная генерация»[5].

Он думал, что был малый шанс на успех, и не говорил об этом никому на собрании комитета. Осенью 1951 г., в Колумбии, к нему обратился Джеймс Гордон за темой для своей диссертации. К проекту, связанному с темой диссертации Гордона, Таунс попросил присоединиться Херба Цайгера, поскольку Таунс понимал, что будет полезным участие эксперта по молекулярным пучкам, который уже закончил диссертацию. Обучение и работа Цайгера в Колумбийском университете финансировалось корпорацией Юнион Карбайд. Двумя годами до начала работы над мазером, один сотрудник компании, обладающий пророческим даром, уговорил руководство дать 10 000 \$ тому, кто сможет установить, как получить интенсивное ИК-излучение, с целью выяснить возможности использования этого излучения для инициирования специфических химических реакций. Несмотря на то, что Таунс настаивал, что он не знает, как это сделать, хотя это и очень интересно, корпорация предоставила ему деньги для оплаты ассистентов (пост-доков). Это дало возможность для работы Шавлова и Цайгера в годы перед запуском мазера. Таким образом, Цайгер присоединился к проекту, предложенному Таунсом.

В конструкции Таунса резонатор был очень важен. Действительно, требовалось удерживать в нем электромагнитную энергию как можно большее время для взаимодействия с молекулами (т.е. потери в нем должны быть минимальными). Детальные расчеты, сделанные осенью 1951 г., показали, что очень трудно сделать резонатор для длин волн в половину миллиметра, как первоначально полагал Таунс, надеясь использовать дейтерированный аммиак. Поэтому он решил сосредоточить свое внимание на излучении с длиной волны 1,25 см обычного аммиака, поскольку для такой длины волны уже существовали компоненты (резонатор), требуемые для успеха. Это решение означало, переключить проект с цели добиться успеха в области миллиметровых волн на демонстрацию нового принципа генерации в уже известной спектральной области.

Основная идея представляется очень простой, теперь, когда мы подготовлены к ней и можно только удивляться, почему никто не додумался до этого прежде. Если мы рассматриваем системы с двумя энергетическими уровнями, как это делал Вебер, то мы знаем, что мощность, излучаемая за счет вынужденного излучения, пропорциональна числу частиц  $n_2$  в верхнем состоянии, а поглощенная мощность пропорциональна числу частиц  $n_2$  в нижнем состоянии. Итоговая мощность, которая является разностью поглощенной и испущенной мощности, как мы видели, пропорциональна разности  $n_1 - n_2$ . При термическом равновесии,  $n_1$  всегда больше, чем  $n_2$  и, поэтому поглощенная

мощность всегда больше, чем испущенная мощность. Но давайте рассмотрим, что случится, если мы каким-нибудь способом отберем частицы так, что отправим в одну сторону только те, которые находятся в верхнем состоянии. Теперь число  $n_2$  будет больше, чем  $n_1$  и поэтому испускаемая мощность станет больше, чем поглощенная мощность. Таким образом, мы получаем устройство, способное испускать излучение с частотой, соответствующей разности энергий между двумя уровнями. Это устройство является генератором, и над ним-то и размышлял Таунс.

Активным веществом, которое предусматривал Таунс, был газ аммиак. Согласно классической картине, молекула аммиака (состоящая из одного атома азота и трех атомов водорода,  $\text{NH}_3$ ) представляет треугольную пирамиду (рис. 41, а) с тремя атомами водорода в углах основания и атомом азота на вершине. Эти три атома водорода можно рассматривать лежащими в одной плоскости, а атом азота лежащим в другой плоскости, которая выше или ниже, чем плоскость атомов водорода. Потенциальная энергия атома азота в зависимости от его расстояния от плоскости атомов водорода показана на рис 41, б. Квантовая механика показывает, что соответствующая кривая имеет минимум по обе стороны от этой плоскости с потенциальным барьером, имеющим максимум в плоскости водородных атомов. Атом азота может колебаться вдоль оси, перпендикулярной этой плоскости, и может переходить из положения сверху плоскости в положение ниже ее, и обратно. Такой переход обозначается как инверсия. Кроме того, молекула вращается вокруг взаимно перпендикулярных осей. Согласно квантовой механике, все колебательные и вращательные движения квантованы, и поэтому их энергии представляются дискретными энергетическими уровнями, как показано на рис. 41, б.

Гордон, Цайгер и Таунс, после некоторой модификации их идеи, решили наблюдать переход между нижней колебательной парой во вращательном состоянии с тремя числами углового момента около каждой из осей, который обозначается 3-3 состояние. Этому переходу соответствует частота 23 830 МГц.

Идея Таунса заключалась в том, чтобы получить некоторым способом пучок молекул, например нагревом, а затем отделить тех, которые в возбужденном состоянии, от тех, которые на нижнем состоянии. Это можно было сделать, учитывая интересное свойство молекулы: при приложении электрического поля молекула деформируется и возникает малый дипольный момент для обоих чисел вращательной пары, но противоположного знака. Если электрическое поле неоднородно, получается тот же эффект, который наблюдался Штерном и Герлахом, и на молекулу будет действовать сила с противоположным направлением для каждого числа пары. Проект предусматривал использовать сильное электростатическое неоднородное поле, действующее на пучок молекул аммиака, и сфокусировать возбужденные молекулы этого пучка в малое отверстие полости резонатора, настроенного точно на 23 830 МГц.

В 1950-е гг. Вольфганг Поль (1913-1993) вместе с Хельмутом Фридбургом и Гансом Беневитцем спроектировали специальные электрические и магнитные линзы (квадрупольные) для фокусирования атомных и молекулярных пучков. Таунс думал об использовании таких линз для разделения молекул. Поля таких линз и были использованы в аммиачном мазере и в водородном мазере. Позднее Поль разработал трехмерную версию, способную удерживать ионы в малой области (ловушка Поля). С помощью этого устройства можно исследовать одиночные атомы, что было невозможно раньше. За это Поль был награжден в 1989 г. Нобелевской премией по физике вместе с

Н. Рамси и Гансом Демельтом, которые также построили подобную ловушку, но другой конструкции.

Таунс надеялся отселектировать в пучке больше молекул, находящихся в верхнем состоянии, от молекул в основном состоянии. Этим способом он мог бы реализовать то, что мы называем инверсией населенности, и каждая молекула, переходя в нижнее состояние с испусканием кванта, могла бы заставить другие молекулы делать то же самое. В результате резонатор мог бы испускать излучение на частоте около 24 000 МГц. Таунс четко понимал необходимость резонатора, который связывает излучение с возбужденной средой.

Таунс осознавал свою ответственность, в частности, перед Гордоном, который выполнял работу своей докторской диссертации в рамках проекта, результат которого не гарантировался. «Я не уверен, что работа получится, но даже в этом случае мы сможем сделать другие вещи», — в результате Таунс пообещал Гордону, что даже если метод не сработает, он сможет использовать установку для исследований спектров микроволнового поглощения аммиака. Таким образом, Гордон работал в двух направлениях. Он мог изучить сверхтонкую структуру аммиака (разделение энергетических состояний на многие подуровни из-за взаимодействия между электроном и ядром) с большей точностью, чем это удавалось прежде.

Достижения в работе были описаны в квартальных отчетах Факультета и содержали некоторые данные, интересные для тех, кто занимался физикой микроволн. Первая публикация с упоминанием этого мазерного проекта появилась в сообщении Цайгера и Гордона 31 декабря 1951 г., которое было озаглавлено «Молекулярный Пучковый Генератор». В нем сообщались предварительные расчеты основных элементов этого генератора.

В течение двух лет группа Таунса продолжала работать. За это время, два друга Таунса приходили в лабораторию и старались уговорить его бросить эту чепуху и прекратить тратить казенные деньги (Таунс уже потратил 30 000 \$, предоставленных военными).

Наконец, в один из дней апреля 1953 г., Джеймс Гордон вбежал на спектроскопический семинар, который проводил Таунс, с криком: он работает! История говорит, что Таунс, Гордон и другие студенты (Цайгер к этому времени оставил Колумбию и перешел в Линкольновскую лабораторию и его заменил Т. Ванг) отправились в ресторан, чтобы отметить событие и придумать для нового устройства латинское или греческое название (последнее без успеха). Только несколько дней спустя они с помощью некоторых студентов придумали аббревиатуру МАЗЕР — усиление микроволн с помощью стимулированного излучения (MASER — Microwave Amplification by the Stimulated Emission of Radiation). Это название появилось в заголовке работы, опубликованной в *Physical Review*, но недоброжелатели расшифровывали это, как «способы получения поддержки для дорогостоящих исследований» {Means of Acquiring Support for Expensive Research}

Блок-схема аппаратуры показана на рис. 42. Через отверстие в маленькой печи с точно поддерживаемой температурой вылетает пучок молекул аммиака. В этом пучке содержатся молекулы, находящиеся как в нижнем, так и в верхнем энергетическом состоянии, причем, что вполне естественно, в нижнем состоянии находится несколько больше молекул. Пучок проходит через систему электродов фокусирующей системы. Эти электроды создают сильное неоднородное электрическое поле, которое разделяет молекулы. Их действие заключается в том, что молекулы в верхнем состоянии продолжают двигаться, прижимаясь к оси системы, а молекулы в нижнем

состоянии выталкиваются от этой оси. Такая конструкция позволяет не только разделить молекулы по состояниям, но и несколько сфокусировать молекулы в верхнем состоянии в хорошо коллимированный пучок. Этот пучок входит в объемный резонатор, точно настроенный на частоту перехода аммиака, т.е. на 23 830 МГц. Если в резонатор входит достаточное число молекул в верхнем состоянии, возникает непрерывная генерация, которую можно вывести из резонатора обычной радиочастотной техникой. С другой стороны, система может быть в условиях, когда число молекул недостаточно, чтобы поддержать генерацию, но достаточно, чтобы усиливать внешний сигнал. В этом случае устройство работает как усилитель, разумеется, на той же частоте. Вся система помещается в кожух (не показан на рис.), в котором поддерживается высокий вакуум, нужный для того, чтобы предотвратить столкновения молекул аммиака с молекулами воздуха, что могло бы привести к потере энергии возбуждения в результате обмена энергией. Разумеется, реальная система не столь проста, как показано на рис. 42.

Принципиальной характеристикой мазера является крайне низкий уровень шумов как в режиме генерации, так и в режиме усиления. Это означает, что сигнал очень чистый и ясный, и все фотоны испускаются когерентно. Лишь очень малое число фотонов испускается хаотически в результате спонтанного, а не вынужденного излучения. Во многих электронных устройствах шумы возникают из-за флуктуации числа электронов, которые создают электрический ток. Эти флуктуации пропорциональны температуре и не зависят от конкретного устройства. Поэтому у инженеров принято характеризовать шумы устройств, относя их к шумам эквивалентной температуры, т.е. температуре, при которой через электрическое сопротивление протекает столько электронов, сколько нужно, чтобы получить наблюдаемые флуктуации. В то время, как для сопротивления обычной цепи температура шума практически является комнатной (т.е. 300 К), для мазера эквивалентная температура шумов очень низкая, порядка нескольких К.

Таунс сразу же понял, что одним из важных применений мазеров на молекулярных пучках должна быть молекулярная спектроскопия. Молекулярные пучки уже в начале 1950-х гг. рассматривались спектроскопистами, изучающими газы. Однако была проблема. Специфика получения молекулярного пучка приводит к малой плотности молекул в ячейке спектрометра. Кроме того, молекулы в пучке находятся в термическом равновесии или близко к нему, а это значит, что процессы поглощения и излучения по отношению внешнего излучения почти равные.

Следовательно, сигнал поглощения будет слабым, поскольку число молекул в нижнем состоянии лишь слегка превосходит число молекул в верхнем состоянии. В пучке, который получал Таунс, все молекулы селективировались по их энергетическим состояниям. Это приводит к тому, что сигнал увеличивается в сто раз. Это позволяло Гордону использовать принцип мазера для спектроскопических исследований.

Мощность первого мазера составляла только 0,01 мВт. Это очень мало, но испускалась очень узкая линия. Чтобы определить, насколько чиста испускаемая частота, Таунс и его группа построили второй мазер, чтобы сравнить частоты, испускаемые двумя независимыми мазерами. В начале 1955 г. они установили, что в течение одной секунды частоты различались только на 4 части от 10—12, за больший интервал около 1 часа частоты различались лишь в пределах нескольких частей на 10—10. Эти результаты заставляли предполагать, что мазер является оптимальным кандидатом на роль прецизионного стандарта частоты и для создания атомных часов. Исследования мазеров стали

распространяться среди других лабораторий в университетах, государственных учреждениях и промышленности. Последние были под влиянием военных целей. Однако было только около десятка групп с малым числом исследователей и со скромной поддержкой.

#### Русский подход к мазеру

В то время, когда эти впечатляющие результаты были получены в США, что же происходило на другой стороне земного шара, в Советском Союзе, полным военных секретов и отгороженным непроницаемым железным занавесом? В Москве, недалеко от центра, располагался один из самых больших институтов в стране — Физический институт (существующий и поныне), названный именем одного из известнейших русских ученых, знаменитого Лебедева. В этом знаменитом Физическом институте им. П.Н. Лебедева (ФИАН) работали тысячи исследователей. Институт находится в управлении могущественной Российской Академии наук. Он был организован в начале 1930-х гг. физиком Сергеем Ивановичем Вавиловым (1891 — 1951). Вавилов известен своими достижениями в оптике в области исследований люминесценции, т.е. испускания света некоторыми определенными веществами при их освещении. Вавилов сформулировал законы этого явления. В 1934 г., когда Павел Алексеевич Черенков (1904—1990), аспирант, работающий над своей диссертацией, открыл, что электроны, распространяющиеся в воде, испускают слабое голубое излучение, Вавилов, который был его научным руководителем и помогал проводить исследования, пришел к заключению, что это не люминесценция и приписал его к действию электронов. По его инициативе, два исследователя Института, Игорь Тамм (1895— 1971) и Илья Франк (1908—1990) — дали полное теоретическое объяснение этого явления, показав, что заряженные частицы, которые движутся в среде со скоростью, превышающую скорость света в этой среде, испускают излучение. Этот результат привел их к получению Нобелевской премии по физике вместе с Черенковым. Институт им. П.Н. Лебедева дал шесть Нобелевских лауреатов по физике, хорошо известных во всем мире. Вавилов был директором до самой своей смерти. Как организатор науки и президент Академии наук он внес огромный вклад в развитие науки в Советском Союзе в трудный период сразу же после окончания Второй мировой войны. Во время, относящегося к нашей истории, два сотрудника Института, А.М. Прохоров и Н.Г. Басов, интересовались решением спектроскопических проблем, используя молекулярные пучки.

Александр Михайлович Прохоров родился 11 июля 1916 г. в Атертоне (маленький город в Австралии) в семье революционного деятеля, который эмигрировал туда из ссылки в Сибирь в 1911 г. Семья Прохоровых возвратилась в Советский Союз в 1923 г. В 1939 г. А. М. Прохоров окончил Ленинградский университет и поступил в Физический институт им. П. Н. Лебедева АН СССР. Он начал свою научную карьеру с изучения распространения радиоволн над поверхностью Земли. Во время Второй мировой войны воевал, дважды был ранен и возвратился в Институт в 1944 г. После войны, работая под руководством В.И. Векслера (1907—1966), он продемонстрировал в своей докторской диссертации, что синхротрон (ускоритель элементарных частиц) можно использовать в качестве источника когерентных электромагнитных колебаний в сантиметровом диапазоне. После получения докторской степени он возглавил коллектив молодых исследователей (среди которых был и Басов), работающих в области радиоспектроскопии.

После своей работы в области мазеров и лазеров (которую мы сразу же рассмотрим) он был в 1960 г. избран член-корреспондентом АН СССР, а в 1966 г. стал академиком. За свои научные заслуги он

стал Героем Социалистического Труда, получил Ленинскую премию, а в 1964 г. стал лауреатом Нобелевской премии по физике вместе с Басовым и Таунсом. Он скончался 8 января 2002 г. Николай Геннадиевич Басов родился 14 декабря 1922 г. в Усмани (городок вблизи Воронежа), в 480 км от Москвы на берегу реки того же названия. К началу Второй мировой войны он окончил среднюю школу в Воронеже и был призван на военную службу. Его сначала направили в Куйбышев, а затем в Киев, в училище военных медиков, которое он окончил в 1943 г. в звании лейтенанта медицинской службы. Он служил в войсках химической защиты и был на фронте. Сразу же после войны, после возвращения из Германии, он осуществил свою мечту заниматься физикой, которую стал изучать еще будучи в армии. Он поступил в Московский инженерно-физический институт. Ровно через 20 лет после этого он стал академиком.

В 1948 г. Басов начал работать в лаборатории колебаний Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР. Лабораторией в то время руководил М. А. Леонтович. В начале 1950-х гг. Басов вошел в группу Прохорова. После работы над мазером он внес важный вклад в развитие целого ряда лазеров. В 1973 г. он стал директором ФИАН. Он также был членом Президиума Верховного Совета СССР. Н. Г. Басов скончался 1 июля 2001 г.

В это время Прохоров руководил исследованиями синхротронного излучения, т.е. света, который испускается электронами при их ускорении по круговой орбите в этом ускорителе. Басов стал работать над проектом по изучению этого явления. Затем Вавилов, который был директором института, предложил им включиться в радиоспектроскопию. В результате они построили радиоспектроскоп и стали проводить эксперименты, среди которых было изучение некоторых радиоактивных ядер.

Группу интересовала молекулярная спектроскопия колебательных и вращательных состояний. Всех беспокоила малая чувствительность спектрографа. Дело в том, что населенности верхнего и нижнего уровней почти одинаковы и отличаются всего лишь на одну тысячную, и это дает малый коэффициент поглощения. Группа надеялась изменить такую разность населенностей, что позволило бы увеличить чувствительность в тысячу раз. Они также изучали возможность использовать микроволновые спектры поглощения для создания стандартов частоты и времени. Точность микроволнового стандарта частоты определялась разрешающей способностью радиоспектрографа. Она, в свою очередь, исключительно зависит от ширины самой линии поглощения. Было найдено, что эффективным способом сужения линии поглощения является использование спектрографов в сочетании с молекулярными пучками. Однако, как говорилось, чувствительность спектрографов ограничивалась малой разностью населенностей уровней в микроволновой области. Поэтому на этой стадии работы возникла идея: нельзя ли искусственно существенно изменить населенности уровней. Рассматривалось использование эффектов разделения из-за различного отклонения в неоднородных электрических или магнитных полях. Для этого требуются молекулы с большим дипольным моментом, и они выбрали флюорит цезия (CsF). В то же время они понимали, что для изучения энергетических уровней молекул они могут использовать не только процессы поглощения, которые традиционно используются в спектроскопии, но и излучения возбужденных молекул. Пропускание пучка молекул, находящихся в верхнем состоянии, через резонатор, так, чтобы поле в нем взаимодействовало с молекулами пучка и вызывало генерацию волн, было теоретически описано ими в работе, представленной на Всесоюзной конференции по радиоспектроскопии в мае 1952 г. На

эту работу Прохоров и Басов ссылались в своей обзорной статье, написанной в 1955 г. На этой конференции они обсуждали возможность возбуждения таким способом молекул CsF. Во время обсуждения также было предложено использовать аммиак, который был хорошо известен спектроскопистам во всем мире.

Первая опубликованная работа Прохорова и Басова была послана в «Журнал экспериментальной и теоретической физики» в декабре 1953 г. и напечатана в октябре 1954 г., т.е. после публикации статьи Таунса о лазере. Задержка в публикации получилась из-за желания авторов исправить некоторые ошибки в формулах. Эта работа Прохорова и Басова содержала детальное теоретическое исследование использования молекулярных пучков в радиоспектроскопии. Авторы показали, что молекулы одного и того же вещества, находящиеся в пучке в разных энергетических состояниях, могут быть разделены путем пропускания пучка через неоднородное электрическое поле. Молекулы, разделенные по энергетическим состояниям, затем пропускаются через микроволновый резонатор, где получается поглощение или усиление (согласно тому, какое энергетическое состояние выбрано). Прохоров и Басов также представили количественные условия для работы микроволнового усилителя или генератора, который они назвали «молекулярным генератором».

Несмотря на изоляцию — очень малому числу физиков разрешалось выезжать за границу, — российские ученые получали информацию об исследованиях в мире благодаря научным журналам. Басов, который для своей докторской диссертации активно работал в новой области квантовой радиофизики, как ее назвали в СССР (в США ее называли квантовой электроникой), как только прочел письмо Таунса, сообщающее о создании лазера, сразу же, спустя несколько месяцев, построил первый советский лазер.

Персональные контакты были позднее. Прохоров впервые встретился с Таунсом в Великобритании в 1955 г. на конференции Фарадеевского общества, где представил работу, о которой мы упоминали, а Басов познакомился с Таунсом, [Павловым, Бломбергенем и многими другими на первой Международной конференции по квантовой электронике в Шаванга Лодж (штат Нью-Йорк, США) в сентябре 1959 г.

Как мы можем видеть, в отличие от того, что происходило в США, ни Басов, ни Прохоров не были знакомы с радаром и не занимались его исследованиями. Они пришли к концепции лазера из спектроскопии, и с общим желанием создать новые источники в диапазоне сантиметровых волн, что, кстати говоря, было их главной целью, когда они изучали синхротронное излучение. В этом отношении для них очень полезной была традиция российской научной школы, согласно которой поддерживались новые идеи, не заботясь об их немедленной практической реализации.

Когда первый лазер был запущен в Москве, посетители со всего Советского Союза приходили посмотреть на него, и группа построила три лазера для исследования их частотной стабильности. Также был построен лазер с двумя встречными пучками, что позволило получить стабильность на уровне  $10^{-9}$ . Это было использовано для создания стандарта частоты, который с некоторыми улучшениями использовался для долговременного измерения времени во Всесоюзном научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ).

#### Трехуровневый лазер

Как мы увидим, лазер на молекулярном пучке, несмотря на его исключительные характеристики, не очень полезен для практических применений и, вероятно, если бы не разработки, которые мы

опишем далее, изобретение Таунса, его сотрудников и других не вызвало бы большого внимания, за исключением научной области спектроскопии. Принципиальным недостатком аммиачного мазера, который ограничивает его применение, за исключением стандартов частоты, является то, что он испускает чрезвычайно узкую линию (на хорошо определенной частоте) и частоту этой линии нельзя изменять, т.е. настроить на другие частоты.

Простым способом увеличить как полосу частот, которые могут усиливаться в устройстве, так и способность изменять центральную частоту в этой полосе (т.е. производить настройку) является использование другого материала. Интересным классом переходов представлялись переходы между магнитными уровнями ферромагнитных и парамагнитных материалов. Мы уже говорили, что энергетический уровень электрона в атоме расщепляется на много подуровней, когда атом помещается в магнитное поле (эффект Зеемана). Путем изменения напряженности внешнего магнитного поля, можно изменять интервал между ними и, тем самым, осуществлять настройку. При использовании твердых тел вместо газов также может сильно увеличиться мощность, поскольку концентрация парамагнитных ионов в твердом теле легко может быть в сотни тысяч раз большей, чем число молекул аммиака в пучке.

Таунс провел свой академический отпуск за 1955/56 г. наполовину в Париже, наполовину в Токио. Когда он был в Парижской высшей нормальной школе (Ecole Normal Supérieure) осенью 1955г., один из его бывших аспирантов, Арнольд Хониг, который теперь работал в области парамагнитного резонанса, сообщил ему, что ионы мышьяка в кристаллах кремния имеют при температуре жидкого гелия огромное время релаксации, достигающее 16 с. Таунс сразу же понял, что это обстоятельство позволяет этим ионам оставаться достаточно долго на верхнем уровне, что позволит извлечь энергию с помощью вынужденного излучения. Он предложил сделать эксперимент. Когда Таунс покидал Японию весной 1956 г., этот эксперимент еще не закончился, и соответствующее устройство еще не работало. Однако Таунс был уверен в правильности выбранного пути и вместе со своими парижскими коллегами опубликовал статью, в которой обсуждались возможности предлагаемой системы.

Примерно в это же время, но независимо от Таунса, физик из MIT, М. В. Стрэндберг (г. р. 1919) рассмотрел возможность создания мазера, используя твердотельные материалы вместо газа. Во время войны он работал с радаром, а позднее стал интересоваться радиоспектроскопией, включившись в начале 1950-х гг. в работу по парамагнитному резонансу. 17 мая 1956 г. он выступил на семинаре MIT по парамагнитному резонансу с некоторыми соображениями о преимуществах твердотельного мазера. Среди слушателей был молодой голландец Николаас Бломберген, профессор факультета Прикладной физики Гарвардского университета.

Бломберген родился в Дордрехте, Нидерланды, 11 марта 1920 г. Он учился в университете Утрехта и получил степень кандидата и доктора соответственно в 1941 г. и в 1943 г., во время немецкой оккупации Нидерландов. Затем он сбежал в США и поступил в Гарвардский университет буквально через шесть недель после того, как Парселл, Торрун и Паунд обнаружили ядерный магнитный резонанс. Они были заняты написанием нового тома для серии книг, посвященных микроволновой технике (массачуссетская серия), и молодой Бломберген был принят, как помощник, и его попросили заняться дальнейшей разработкой аппаратуры ЯМР. Таким образом, он стал изучать ядерный магнитный резонанс, одновременно посещая лекции Швингера (1918-1994), Ван Флека и других.

На короткое время он возвратился в Нидерланды после войны и провел исследования в 1947-1948 годах в лаборатории Камерлинг-Онеса. В 1948 г. получил докторскую степень от Лейденского университета за диссертацию по ядерному магнитному резонансу, которая впоследствии была опубликована в виде книги. Затем возвратился в Гарвард и присоединился к Парселлу и Паунду, вместе с которыми выполнил важные работы по магнитному резонансу, о которых речь шла выше. Его огромные достижения в области ядерного магнитного резонанса, мазеров и нелинейной оптики были отмечены присуждением в 1981 г. Нобелевской премии по физике (он разделил ее с Шавловым и Сигманом).

После доклада Стрэнберга на семинаре Бломберген спросил его, почему он рассматривает твердотельную систему для мазера, ведь она не обладает спектральной чистотой, характерной для аммиачного мазера. Стрэнберг объяснил, что он рассматривает совершенно другое применение, а именно усилитель с очень малыми шумами. Бломберген воодушевился этой идеей и обсудил ее с Бенжаменом Лэксом, главой группы Физики твердого тела, который познакомил его с работой Таунса и его французских коллег. И в этой работе, и в идее Стрэнберга рассматривался двухуровневый мазер. Такое устройство предусматривало импульсный режим работы, и поэтому требовалось ненормально длительные времена релаксации. Очевидно, что устройство, лишенное этих недостатков, было бы более полезным, и Бломберген потратил несколько недель, размышляя, как бы реализовать это.

Знания Бломбергеном поведения вещества в магнитных полях позволило ему осознать, что для использования такого устройства нужно большее число уровней, которые можно получить, когда вещество подвержено магнитному полю (т.е. зеемановские уровни), чем два естественно существующих уровня молекулы. Поэтому Бломберген рассматривал эффект магнитного поля, чтобы выбрать по желанию два уровня, между которыми можно осуществить переход, настраивая частоту излучения, соответствующую разности энергий этих уровней. В результате он понял, что если вместо того, чтобы использовать два уровня, используется три уровня, тогда не нужно физически отделять молекулы в верхнем состоянии, но можно выбирать населенности уровней, путем искусного использования взаимодействий. Чтобы получить этот результат, он рассмотрел атомы, включенные в твердое тело в виде примесей. Атомы примеси замещают некоторые из атомов в твердом теле и находятся в изоляции друг от друга, окруженные соседними атомами твердого тела. В результате орбиты электронов атомов примеси очень мало возмущаются и остаются почти такими же, как в газовой фазе. Поэтому их уровни вполне отличны от уровней атомов твердого тела.

Чтобы понять предположение Бломбергена, вспомним, что атомы или ионы с  $n$  неспаренными электронами (т.е. с противоположными спинами) образуют во внешнем магнитном поле  $n + 1$  магнитных уровней, интервал между которыми пропорционален напряженности магнитного поля (аномальный эффект Зеемана, который рассматривался в гл. 4). Теперь давайте рассмотрим вещество, обладающее тремя уровнями с неравными интервалами между ними (рис. 43). Некоторые парамагнитные ионы имеют такие уровни в подходящих кристаллах. Населенности уровней с энергиями  $E_1$ ,  $E_2$  и  $E_3$  имеют населенности  $n_1$ ,  $n_2$  и  $n_3$  соответственно, и в условии термического равновесия мы имеем

$$n_1 > n_2 > n_3$$

При обычных магнитных полях разности энергий между уровнями довольно малы и соответствуют

микроволновым частотам. Они также малы по отношению к тепловой энергии атомов, и поэтому эти три населенности мало отличаются друг от друга.

Пусть теперь система подвергается сильному излучению накачки на частоте  $f_{13}$ , которая соответствует разности энергий между уровнем 3 и уровнем 1. Такое поле, которое мы будем называть полем накачки, очевидно, поглощается и вызывает переходы между уровнями 1 и 3. Поскольку первоначально больше атомов находятся на основном уровне 1, система будет поглощать энергию, вызывая увеличение населенности уровня 3 за счет уровня 1. Итоговый эффект заключается в том, что населенности  $n_1$ , и  $n_3$  стремятся стать равными с увеличением  $n_3$  и уменьшением  $n_1$ . С другой стороны, населенность  $n_2$  не подвержена влиянию этого поля и поэтому остается той же самой. Первоначально она была слегка больше, чем  $n_3$ , но затем, в результате действия поля накачки,  $n_3$  увеличивается за счет  $n_1$  и может получиться ситуация, когда  $n_3$  больше, чем  $n_2$  и больше, чем  $n_1$ . Таким образом, между этими уровнями возникает инверсная населенность и может происходить вынужденный переход на частоте  $f_{32}$  или  $f_{21}$ , соответствующей разностям энергий между уровнями 3 и 2, или между 2 и 1 соответственно. Разумеется, чтобы получить достаточно сильное вынужденное излучение, нужна как можно большая инверсная населенность, а так как энергии между уровнями очень малы, нужно работать при очень низких температурах. Бломберген математически проанализировал разные процессы, которые происходят, и пришел к заключению, что инверсную населенность можно получить, например, между уровнями 3 и 2, если время, требуемое атомам, чтобы вернуться обратно в основное состояние (так называемое время релаксации), удовлетворяет определенным условиям.

В этом месте мы должны сказать, что идея использовать трехуровневую систему, пришла также Басову и Прохорову. В 1955 г. они опубликовали предложение, в котором рассматривались молекулы газа, с тремя уровнями. Они показали, что возможно получить инверсную населенность, используя подходящие поля излучения. В отличие от Бломбергена, система, предлагаемая двумя российскими исследователями, не допускала перестройки по частоте. Кроме того, не обсуждалась важность релаксации, и ни один из предложенных методов не заработал.

Возвратимся в США. В Bell Labs группа, в которой работал Гордон, поступивший в исследовательский центр после выполнения диссертации под руководством Таунса и Г. Феером, сумела получить мазерный эффект в образце кремния с примесями в согласии со схемой, предложенной Таунсом и его французскими коллегами. Немного спустя, Рудольф Компфнер (1909—1977), руководитель исследований по электронике, изобретатель лампы бегущей волны, привлек Г. Сквилла, сотрудника технического отдела, работающего над разработкой твердотельных устройств. Эти два человека познакомились в Оксфордском университете, где работал Компфнер, а Сквилл занимался изучением, как сделать твердотельный мазер, работающий в непрерывном режиме. 7 августа 1956 г. Сквилл представил меморандум с предложением использовать кристалл этилсульфата гадолиния, свойства которого он детально изучил во время работы над своей диссертацией. Предполагалось использовать парамагнитные уровни в подходе, идентичном предложению Бломбергена. Сквилл подготовил статью для посылки в *Physical Review*.

Сообщения о работах Бломбергена доходили до научного центра Bell Labs, а Бломберген узнал, что что-то происходит в этих лабораториях. Бломберген хотел запатентовать свой мазер и стал беспокоиться, что он выдал слишком много информации коллегам. С другой стороны, в Bell Labs

боялись, что может возникнуть неприятная ситуация с приоритетами оригинальных идей и будущими судебными процессами о патенте. И так, Бломбергена пригласили представить свои результаты в Bell Labs, и 7 сентября 1956 г. он провел семинар в Нью Джерси (отделения Bell Labs расположены в двух местах). Сковил, не знавший о работе Бломбергена, понял на семинаре, по его собственным словам, что «Бломберген имел ту же идею и пришел к ней раньше меня. Так что я не послал мою работу в печать».

Bell Labs приняла соглашение об использовании патента Бломбергена, тем самым, оставляя обеим группам возможность полюбовно договориться, как реализовать экспериментально первый мазер этого типа.

Между тем Бломберген опубликовал свое предложение в Physical Review, в статье, полученной 6 июля 1956 г. и опубликованной в номере от 15 октября того же года. В ней он дополнительно рассматривал некоторые возможные материалы, что могло помочь создать мазер.

К сожалению, он и его группа в Гарварде интересовались устройством для астрономических целей, работающим на частоте линии межзвездного водорода 1420 МГц. Поэтому они выбирали материал, который мог бы работать на этой частоте, и упустили возможность первой успешной работы трехуровневого лазера. На следующий год, после публикации теоретической работы Бломбергена, первый трехуровневый мазер был создан (1957г.) в Bell Labs Сковилом, Феером и Зайделем, которые использовали ионы гадолиния в кристалле этилсульфата лантана. Вскоре после этого (1958 г.) А. Маквортер и Дж. Мейер из MIT использовали ионы хрома в цианидах кобальта и натрия, для создания первого усилителя. Бломберген и его сотрудники также старались сделать свой мазер, но оказались третьими в 1958 г.

При создании своего лазера, Сковил и его коллеги искусно использовали принцип его работы. Количество усиливающих ионов гадолиния зависит от того, какая инверсная населенность получается между мазерными уровнями. В случае гадолиния ими были уровни 2 и 1. Разность населенностей между этими двумя уровнями зависит, кроме других вещей, от того, как быстро ионы, накаченные с уровня 1 на уровень 3, распадаются на уровень 2. Группа наблюдала, что в их кристалле в качестве примеси присутствует цезий, который, взаимодействуя с гадолинием, увеличивает скорость, с которой ион распадается с уровня 3 на уровень 2. В согласии с этим, они выбрали концентрацию атомов цезия так, чтобы оптимизировать перенос энергии между этими двумя уровнями.

В то время как первоначальный аммиачный мазер был принципиально использован в качестве стандарта частоты, из-за стабильности частоты его излучения, или еще в качестве очень чувствительного детектора, твердотельный мазер, будучи перестраиваемый по частоте, мог бы быть использован для связи и для радаров. Его можно было непрерывно перестраивать в пределах допустимой полосы частот, оставаясь с принципиально малыми шумовыми характеристиками, присущими мазеру. Перестройку можно было получить, изменяя напряженность магнитного поля. Немного времени спустя Ч. Кикучи и его коллеги показали, что рубин является хорошим материалом для лазера. В 1955 г. инженер Вестон Вивиан начал специальные исследования в Willow Run Lab. в Мичиганском университете, поддержанные военными, с целью разработать пассивную систему с очень чувствительным приемником, с помощью которой можно было бы регистрировать микроволны, естественно испускаемые объектами (вспомним закон черного тела, гл. 3). Вивиан

рассчитал, что требуется исключительная чувствительность микроволнового приемника. Кикучи вначале занимался изучением поглощений микроволн в кристаллах. И его попросили попробовать построить хороший мазер, пригодный для этих целей. После рассмотрения трицелата хрома, который технологи с трудом вырастили, Кикучи решил использовать розовый рубин.

Рубин является кристаллом окиси алюминия ( $Al_2O_3$ ), в котором в качестве примеси имеются атомы хрома. Эти атомы замещают некоторые из атомов алюминия и теряют три своих валентных электрона, превращаясь, тем самым, в ион с тремя зарядами. Эти ионы, как мы увидим позднее, ответственны за оптические свойства, и именно они придают замечательный красный цвет рубину. Разумеется, рубины, используемые в мазере, получают синтетически. Интенсивность окраски зависит от концентрации ионов хрома.

В январе 1957 г. Кикучи получил образец розового рубина и приступил к созданию мазера. Важным параметром конструкции мазера является угол, под которым магнитное поле направлено к оси кристалла. В то время предпочтительным углом был  $15^\circ$ . Но при этом угле, чтобы рассчитать положение требовался компьютер, который в те дни был недоступен. Кикучи выбрал угол  $54^\circ 44'$  (рис. 44). При этом угле вычисления упрощаются так, что можно получить аналитические выражения. Они показывают, что можно построить мазер на длину волны 3,2 см, которая была хорошо знакома техникам, имеющими дело с радаром.

Однако работа продвигалась медленно, и только 20 декабря 1957 г. мазер заработал. После этого Маквортер и Мейер из МПТ, весной, смогли сделать мазер, используя калий-кобальт цианид с добавкой хрома. Таунс со своими сотрудниками запустили мазер на 3 см, а Бломберген с сотрудниками с помощью этого же материала сделали свой собственный мазер на 21 см.

Калий-кобальтовый цианид — очень ядовитый материал. В 1958 г. Бломберген и Таунс с женами обедали в ресторане Нью-Йорка. Миссис Таунс похвасталась перед мисс Бломберген золотой цепочкой с кулоном из великолепного рубина. Она сказала, что ее муж сделал этот подарок в ознаменование мазера. Той же ночью, в отеле миссис Бломберген спросила мужа: «Когда ты собираешься сделать мне подарок в ознаменование твоего мазера?» На это Бломберген ответил: «Видишь ли, дорогая, мой мазер работает на цианиде». Таким образом, он избавился от необходимости покупать дорогой подарок!

Рубиновый мазер сделал использование других кристаллов ненужными. Искусственный рубин был доступен, он прочен, удобен в эксплуатации, и с ним легко получалась перестройка частоты. В совершенствовании конструкции рубинового мазера активное участие в работе научного центра Bell Labs принял Жозеф Гёзик.

В течение 1957 г. и 1958 г. много мазеров было построено в нескольких лабораториях, включая Гарвард. В них использовались ионы хрома в кристаллах рубина. Рубины были использованы в большом числе типов мазеров с разными характеристиками. С 1958 г. многие мазеры были построены для использования в радиоастрономии или в качестве компонент приемников радаров. Почти все они были основаны на рубинах.

Мазеры, как только они появились, вызвали большой интерес военных, которые думали использовать их в качестве очень чувствительных приемников с малым уровнем шумов. Растущей областью применений также стала радиоастрономия. Рассматривалось использование их для обнаружения очень слабых сигналов, поскольку мазеры обладают весьма малыми шумами. Однако

существовали и большие неудобства. Мазер, трехуровневая версия которого обладала наиболее подходящими характеристиками для этих применений, был достаточно мал и надежен в эксплуатации, но требовал охлаждения до температуры жидкого гелия и помещался в сильное магнитное поле. Эта система охлаждения и магнит были громоздкими и тяжелыми (рис. 45). Представлялось, что такое устройство не годится на поле боя и для установки на самолет. Также и для радиоастрономических применений его вес и габариты были нежелательны, имея в виду, что для полного использования его низких шумовых характеристик приемник должен был быть смонтирован в центре гигантской антенны (рис. 46). В противном случае пришлось бы использовать систему передачи сигнала от антенны к мазеру, а ее собственные шумы свели бы на нет его преимущества. Также и для спутниковой связи, где спутники используются для передачи или ретрансляции сигналов от них к Земле, мазеры не оправдали надежд. Были разработаны новые полупроводниковые устройства, параметрические генераторы, которые хотя и не обладали столь малыми шумами, как мазеры, но были легки и компактны и не требовали охлаждения и сильных магнитных полей. В конце концов применения мазеров ограничилось очень малым числом. Однако бурная активность вокруг них, полученные новые знания, и первые демонстрации практического применения вынужденного излучения содействовали появлению и развитию лазеров со всеми последующими применениями.

Тем не менее для мазеров был момент славы. Мазер на рубине был использован А. Пензиасом и Р. Вильсоном в их открытии в 1965 г. излучения черного тела с температурой 3 К, которое является следствием Большого Взрыва Вселенной (реликтовое излучение). Оба были удостоены за свое открытие Нобелевской премии по физике в 1978 г. вместе с П.Л. Капицей (российский физик, который получил эту премию за свои исследования при низких температурах, которые привели его к обнаружению необычных свойств жидкого гелия, а именно его сверхтекучести). Эта история интересна тем, что показывает, что Нобелевскую премию можно получить почти случайно. Арно Элан Пензиас родился в Мюнхене в 1933 г. и в возрасте шести лет был вместе со всей семьей депортирован в Польшу, откуда они эмигрировали сначала в Англию, а затем прибыли в 1940 г. в США. Здесь он стал инженером-химиком, и после женитьбы и службы в американской армии поступил в 1956 г. в Колумбийский университет, где он занимался физикой с Раби, Кушом и Таунсом. В качестве темы диссертации Таунс дал ему задание построить мазерный усилитель для эксперимента по его собственному выбору в радиоастрономии.

В 1961 г. Пензиас после завершения диссертации пытался получить работу в Bell Labs, предполагая использовать ее уникальное оборудование для завершения своих наблюдений, которые он получил в своей диссертации. Директор радиолоборатории предложил ему постоянное место с условием, что он может уйти, когда пожелает. Таким образом, он стал сотрудником Bell Labs, и оставался там до своей отставки в 1998 г.

Был проект зафиксировать все еще не обнаруженное излучение межзвездных молекул ОН, и ученые из MIT добились успехов в этом. Пензиас отправился со своей аппаратурой в Гарвард, чтобы провести наблюдения. В середине 1962 г. Bell System запустила спутник TELSTAR. Опасаясь, что Европейские специалисты не смогут вовремя закончить оборудование своих приемных станций, они сами создали в Холмделе (в одном из отделений Bell Labs) такую станцию. Она была оборудована новым мазером с ультранизким уровнем шумов, работающем на длине волны 7,35 см. В конце

концов это оборудование не потребовалось, поскольку европейцы сдали свои станции вовремя. Поэтому Пензиас и Р. Вилсон, радиоастроном из Калтеха, могли использовать систему, разработанную в Bell Labs.

Роберт Вилсон родился в 1936 г. в Хьстоне (Техас, США), где его отец работал на нефтяных скважинах. С ранних лет он интересовался электроникой. Он окончил университет Раиса и поступил в Калтех для получения ученой степени по физике. Там он заинтересовался радиоастрономией и после написания и защиты диссертации, поступил в 1963 г. в Bell Labs, где он начал долгую и плодотворную работу с Пензиасом.

Монтаж приемной системы для радиоастрономии Пензиас и Вилсон начали с серии астрономических наблюдений, имеющих целью оптимизировать антенну и мазер, при этом они измеряли интенсивность излучения, испускаемого нашей галактикой. Были проведены очень точные калибровочные измерения. В 1963 г. был установлен мазер на длину волны 7,35 см и они выполнили серию операций по калибровке всей системы, все было под контролем, за исключением того факта, что входной шум всей системы был на 3,5 К больше значения, который они рассчитали. Пензиас и Вилсон начали аккуратное исследование возможных причин этого противоречия, и после рассмотрения и отбрасывания альтернативных гипотез, пришли к заключению, что на антенну поступает шумовое излучение, превышающее на 3,5 К рассчитанного значения шума всей приемной системы, причем это излучение приходит на антенну равномерно из всех направлений в пространстве.

Однажды Пензиас обсуждал эту проблемы шумового излучения с Бернардом Бурке из МПТ, который вспомнил о теоретических исследованиях излучения во Вселенной, проводимых П. Пиблесом из группы профессора Р. Дике в Принстоне. Пензиас позвонил Дике, и он прислал ему работу Пиблеса. В ней, Пиблес, следуя предположениям Дике, рассчитал, что Вселенная должна быть наполнена реликтовым излучением черного тела с минимальной температурой около 10 К, остатком первобытного взрыва Вселенной (Большой Взрыв). В 1948 г. Джордж Гамов уже выполнил расчеты первоначальных условий во Вселенной. Модель Большого Взрыва предполагает, что Вселенная родилась в результате гигантского взрыва. Сразу же после него температура должна была быть исключительно высокой, порядка 10 тысяч миллионов градусов, а может быть и выше. При таких температурах, разумеется, никакие вещества не существуют, но имеется некий бульон протонов, нейтронов, электронов, фотонов и других элементарных частиц. Эти частицы, взаимодействуя друг с другом, начинают образовывать легкие элементы, и в то же время испускается огромное количество излучения с очень большой энергией, а расширяющаяся Вселенная начинает охлаждаться. За период, меньший чем несколько сотен тысяч лет, материя во Вселенной все еще остается ионизованной и сильно взаимодействует со светом. В это время общая температура опускается до 3000 К и электрические заряды материи начинают рекомбинировать, образуя нейтральное вещество. На этом этапе взаимодействие фотонов с элементарными частицами прекращается, и электромагнитное излучение, заполняющее Вселенную, начинает охлаждаться из-за расширения Вселенной, причем длина волны сдвигается в сторону увеличения, и число фотонов в единице объема (т.е. их плотность) уменьшается. Одним из следствий этого расширения, является уменьшение температуры пропорционально размерам Вселенной. А температура, согласно распределению Планка, определяет спектральный состав излучения. Малые изменения в интенсивности приводят к малым пертурбациям

плотности первоначальной материи, которые, усиливаясь гравитационными силами, образуют галактики.

Во времена нашей истории проблема этого излучения, забытая на некоторое время, снова обсуждалась астрофизиками, и группа Дике очень заинтересовалась. После первого контакта Дике и его сотрудники посетили Пензиаса и Вилсона и убедились в реальности их измерений. После этого в *Astrophysical Journal* были направлены два письма: одно за подписью Пензиаса и Вилсона объявляло об открытии, а второе, подписанное Дике, Пиблесом, Роллом и Вилкинсоном, давало теоретическое объяснение.

Рис. 47. Спектр космического фонового радиоизлучения, измеренного спутником COBE в 1989 г.

Точками показаны экспериментальные значения, а сплошная кривая относится к спектру при 2,735 К, рассчитанному по формуле Планка для черного излучения

За это открытие Пензиас и Вилсон получили Нобелевскую премию по физике в 1978 г. Совсем нет необходимости говорить, что это открытие стало возможным благодаря использованию мазера, обладающего крайне малыми собственными шумами. Именно это обстоятельство позволило измерить температуру реликтового излучения. Более точные современные измерения дают 2,735 К, и это является частью экспериментальных доказательств модели Большого Взрыва (рис. 47). Но почему именно 2,735 К, а не другое значение, является одной из наиболее важных проблем современной космологии, относящейся к фундаментальным аспектам строения и эволюции Вселенной. Все это ждет своего ответа.

#### Атомные часы

Было установлено, что наиболее интересным применением мазеров на атомных пучках является создание атомных часов. Очень точные часы можно использовать, чтобы установить, являются ли астрономические «константы» действительно постоянными или они изменяются со временем. Также можно проверить справедливость общей теории относительности. Кроме своей научной значимости, атомные часы имеют важное военное и экономическое значение. В 1950-х — 1960-х гг.

прецизионные стандарты частоты потребовались для навигационных систем. Высокостабильные стандарты частоты, не подверженные вибрациям, стали частью систем управляемых снарядов. Естественно, что военные финансировали эти исследования.

Мазер является оптимальным стандартом частоты, который обеспечивает лучшую точность по сравнению с уже существовавшими атомными часами. Для этой цели водородный мазер стал особенно полезен. Он был создан Рамси и его сотрудниками в 1961 г. и был первым атомным мазером. Его очень точная испускаемая частота была использована для стабилизации микроволнового генератора в системе двух полей Рамси.

Водородный мазер (работает на частоте 1420 МГц) был использован в 1976 г. для проверки положений общей теории относительности. Его также использовали для управления полетом «Вояджера-2» в его исторической миссии к Нептуну.

#### Генерация от ускоренных электронов

В начале 1951 г. физик Ганс Мотц (1909—1987) предложил новый способ получения излучения на миллиметровых и субмиллиметровых длинах волн, который не включал явного упоминания процессов инверсии населенности или вынужденного излучения, даже если эти концепции неявно использовались в принципе работы. Позднее это устройство превратилось в один из многих путей

получения лазерного излучения, получившего название лазер на свободных электронах. Сегодня это один из немногих лазеров, генерирующих очень короткие длины волн.

Мотц сделал свое предложение в 1951 г., когда он был в Стенфордском Университете (Калифорния, США). Его идея заключалась в том, чтобы пропустить пучок электронов через набор магнитов с переменной полярностью.

Под действием магнитного поля электрон движется уже не по прямой, а по дуге окружности. Когда электрон попадает в поле противоположного знака, дуга изгибается в противоположном направлении, и траектория становится последовательностью полуокружностей, как показано на рис. 48. Электроны, движущиеся по таким искривленным траекториям, должны испускать излучение согласно законам электромагнетизма. При определенных условиях излучение от отдельных сегментов может стать непрерывным цугом волн. Поскольку электроны в пучке движутся с очень высокой скоростью, необходимо учитывать теорию относительности. Она показывает, что благодаря ограничениям, следующим из этой теории, длины волн испускаемого излучения связаны с радиусами полуокружностей, но много короче, попадая в область миллиметров или субмиллиметров, а при особых конструкциях даже в видимый спектр и еще короче длин волн. Интересной особенностью такого устройства является то, что при изменении энергии электронов или при изменении расстояния между полюсами магнитов, можно изменять длину волны, т.е. получать источник с непрерывной перестройкой длины волны.

Мотц дал экспериментальную демонстрацию в 1953 г. в Стенфорде, используя линейный ускоритель, и получил излучение мощностью в несколько ватт на длине волны 1,9 мм.

Рис. 48. Мазер или лазер на свободных электронах. Пучок электронов проходит через ряд магнитов с противоположной ориентацией поля (N и S обозначают северный и южный полюса). В результате электрон совершает движение по полуокружностям в плоскости, ортогональной полям, и излучает электромагнитные волны (на рисунке не показаны)

#### Космические мазеры

Здесь читатель может подумать, что мазер это человеческое изобретение. Однако Природа, как часто бывает, показала, что ничто не ново под Луной! Несколько лет назад в радиоастрономии ученые стали проводить наблюдения на частоте 1420 МГц, которая соответствует испусканию газообразного водорода в межзвездных облаках. Это конкретное радиоизлучение представляет спонтанное испускание определенного перехода в атоме водорода при термическом равновесии с довольно низкой температурой (менее, чем 100 К). При этом нет никаких особенностей мазерного усиления. Эти исследования были распространены на другие частоты и привели к обнаружению присутствия различных межзвездных газов.

В 1965 г. радиоастрономическая группа, руководимая профессором Г. Вивером из Беркли (Калифорния, США), наблюдала радиоизлучение около 1670 МГц, приходящее от молекул OH, расположенных вблизи некоторых звезд. Это излучение состоит на самом деле из четырех известных переходов OH на 1612, 1665, 1667 и 1720 МГц. Если излучение на этих линиях происходит на спонтанных переходах, они должны иметь интенсивности в отношениях 1:5:9:1, как следует из известных вероятностей для этих четырех переходов. Однако наблюдаемые отношения интенсивностей были совершенно другими и изменялись довольно быстро во времени (пределах временной шкалы месяцев). Распределение испускаемых частот этих линий было не гладким, но

иногда содержало очень узкие компоненты. Эти ширины линий были такими, что температуры, соответствующие им, должны были бы быть менее 50 К. В то же время, интенсивность была столь высока, что температура источника должна была бы быть 1012 К. Было очевидно, что испускание происходит либо от крайне узких точечных источников, либо получается в виде хорошо направленных пучков.

Единственным разумным объяснением этих результатов было, что такое излучение возникает из-за спонтанного излучения в некоторой части облака, содержащего ОН, а затем сильно и направленно усиливается мазерным усилителем, проходя остальные части облака. Такое усиление могло бы объяснить аномальное отношение интенсивностей, высокую интенсивность и направленность излучения.

Также представлялось разумным, что свойства мазерного усиления могут быстро изменяться во времени, причем за такие времена, что не могут измениться как общее количество ОН, так и связанное с ними спонтанное излучение. Механизм накачки, ответственный за инверсную населенность, теперь понятен. Молекулы возбуждаются инфракрасным излучением, испускаемым космической пылью, и при соответствующих условиях создается инверсная населенность.

В 1968 г. были найдены другие субстанции, излучающие подобным образом, и сегодня в нашей галактике открыто более тысячи мазеров, в которых задействованы более чем 36 молекул и почти 200 переходов. Среди этих молекул, кроме ОН, — вода, метанол, аммиак и SiO.

Сегодня полагают, что эти космические мазеры существуют в областях, где формируются звезды или где звезды близки к концу своего жизненного цикла. Оба типа звезд обычно сопровождаются сильными потоками вещества в окружающее пространство. Типичные струи имеют скорости около 30 км/с, а наиболее энергичные достигают 300 км/с. Вещество, испущенное в пространство, быстро конденсируется и может быть накачено инфракрасным излучением, испускаемым самой звездой. Механизм излучения различных молекул может быть в некоторых случаях обусловлен накачкой струй инфракрасным излучением, как утверждалось, но в других случаях это может быть возбуждением за счет столкновений. Например, в случае SiO были получены результаты, подтверждающие эту идею. Большинство SiO мазеров находятся во внешней атмосфере звезд-гигантов и супергигантов, сильно эволюционирующих звезд. Звезды этого типа теряют большую часть своей атмосферы в виде ветра, который обогащает межзвездное вещество галактики. Во время этого сильного ветра молекулы SiO могут быть возбуждены за счет столкновений с другими молекулами, которые обладают высокими скоростями, будучи веществом ветра.

Более недавно, в ядрах более чем 50 галактик, были открыты мазеры, которые в миллион раз ярче, чем те, что находятся в самих галактиках. Эти мега мазеры, как их называют, в некоторых случаях, вероятно, накачиваются через механизм инфракрасного излучения, но в других случаях механизм накачки неясен.

Изучение этих мазеров, интересное само по себе, обещает быть полезным для понимания астрофизических процессов эволюции звезд.

## ГЛАВА 11

### ПРЕДЛОЖЕНИЕ «ОПТИЧЕСКОГО МАЗЕРА»

Таунс в своих исследованиях собирался построить аммиачный мазер на длине волны около 0,5 мм, а затем обратился к много большей длине волны 1,25 см, ради упрощения конструкции. Все другие

мазеры, построенные после этого, работали в сантиметровом диапазоне. Не было генератора, основанного на вынужденном излучении, способного испускать излучение в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне. Хотя другие типы традиционных генераторов, таких, как клистроны, магнетроны и лампы бегущей волны, улучшались и позволяли достичь чуть более, чем 1 мм, эта длина волны была самой короткой для этих устройств, а их мощности были очень низки. Фактически не было реальных запросов на когерентные излучатели в миллиметровом и инфракрасном диапазоне. Одно из важных применений — ночное видение — использовало инфракрасные лучи, испускаемые самими нагретыми предметами, и требовало лишь хороший приемник, но не нуждалось, в каком бы то ни было излучателе. Для другого важного применения, спектроскопии, обычные инфракрасные лампы уже обладали достаточной мощностью. Поэтому не было никакого смысла разрабатывать новые источники. Однако, исследователи любопытны и любят расширять границы знания. Так что, даже без какой-либо поспешности, как только был запущен мазер, стали думать, а нельзя ли принцип его действия использовать для создания генератора света, который стали называть оптическим мазером. Этой задачей занялись независимо в США и в бывшем Советском Союзе.

Чтобы сделать оптическое устройство этого типа, следует рассмотреть другие энергетические уровни по сравнению с микроволновым мазером. Микроволновые частоты настолько низкие, что зазор энергии между уровнями, нужный для генерации, можно найти во вращательно-колебательных состояниях молекул или в тонкой структуре атомов в магнитном поле, как мы уже об этом говорили. В оптическом случае испускаемые фотоны должны иметь энергию, по крайней мере, в сто раз большую, и поэтому требуются переходы между электронными уровнями атомов.

Другим существенным элементом является резонатор, который необходим для работы генератора и в микроволновой области, и в области существенно более коротких длин волн. Микроволновые резонаторы имеют размеры, сравнимые с длиной волны, т.е. порядка сантиметра. С помощью существующей технологии изготовления таких резонаторов не представляет труда. В случае света, длина волны порядка 1 мкм или даже меньше. Поэтому изготовление резонатора таких размеров представлялось невозможным. Без резонатора невозможно получить существенное взаимодействие между частицами и излучением, вынужденное излучение слабо, и теряются принципиальные особенности устройства. Однако были рассмотрены альтернативные методы, способствующие эффективному взаимодействию между возбужденными частицами и излучением. Это была система, состоящая из двух полупрозрачных плоских зеркал, параллельных друг другу. Такая система уже использовалась в спектроскопии для измерений длин волн с высокой точностью. Как мы увидим далее, эта система является настоящим резонатором, хотя другой вид ее использовался для микроволновой области частот [6]. Она была придумана в 1899 г. двумя французскими учеными С. Фабри (1867—1945) и А. Перо (1863-1925). Сегодня эту систему двух зеркал называют интерферометром Фабри—Перо, или просто Фабри-Перо. Если излучение распространяется взад и вперед между зеркалами, то из-за интерференции внутри резонатора имеются лишь определенные длины волн. При пропускании излучения через такую систему зеркал получается система концентрических колец, радиусы которых зависят от длины волны. Этот интерферометр со времен Фабри и Перо используется для прецизионного исследования спектров (например, тонкой и сверхтонкой структуры).

С другой стороны, если внутри резонатора Фабри—Перо поместить инвертированную среду, то на

этих резонансных частотах получается увеличенное взаимодействие между излучением и возбужденными атомами. В результате испускается излучение на определенных оптических длинах волн. Хотя размеры этого резонатора теперь много большие, чем длина волны, в нем происходит хорошая селекция возможных типов колебаний (мод), так как только излучение, которое распространяется взад и вперед между зеркалами, может генерироваться. Другое излучение, распространяющееся даже под малым углом к поверхности зеркал, покидает резонатор после нескольких отражений.

Предложение Фабриканта

Как мы уже видели, первым среди претендентов на идею создать лазер, был Валентин Александрович Фабрикант (1907—1991), который сделал свое предложение в Советском Союзе в 1940-х гг.

Фабрикант начал свою научную карьеру студентом физико-математического факультета Московского университета у Г.С. Ландсберга. После окончания его он поступил на работу во Всесоюзный электротехнический институт (ВЭИ). В 1932 г. его внимание было сконцентрировано на проблемах оптики и свойств электрического разряда в газах. Он опубликовал ряд работ, в которых он изучал спектральный состав и интенсивность излучения, испускаемого при электрических разрядах в газах, в частности, исследуя процессы столкновений между возбужденными атомами и электронами и передачи энергии, происходящие в этих процессах.

Атом или очень быстрый электрон может столкнуться с другим атомом и передать часть своей энергии, которая, если она достаточная, может возбудить ударяемый атом и перевести его на возбужденный уровень. Это называется столкновением первого рода. Также существует другой вид столкновения, который называется столкновением второго рода. В нем атом, который уже находится в возбужденном состоянии сталкивается с другим атомом, который находится в основном состоянии, и передает ему свою энергию. В результате первый атом возвращается в основное состояние, а второй атом перепрыгивает на возбужденный уровень. Оба эти атома необязательно должны быть одного и того же вида; существенно, что оба возбужденных уровня имеют одну и ту же энергию. Если два атома разного вида, то тогда возможно с помощью этого механизма, что атомы одного вида, скажем А, возбуждают атомы другого вида, скажем В, при этом возбужденный уровень может иметь больший номер, чем тот, что получился бы в результате термических столкновений первого рода. В результате, для атомов В может получиться распределение на некоторых уровнях, которое будет отличаться от распределения Максвелла—Больцмана. Эта возможность и интересовала Фабриканта.

В 1939 г. он стал изучать возможность получения населенностей возбужденных атомов, больших, чем следует из распределения Больцмана, и старался показать, что когда излучение проходит через среду, в которой реализована такая инверсия, населенностей, то возможно наблюдать усиление излучения, а не поглощение. После он предложил способ экспериментально реализовать инверсную населенность при разряде в смеси газов, при котором используются столкновения атомов. Эти результаты были включены в его докторскую диссертацию, которую он защитил в 1939 г. В это время интересы Фабриканта были связаны с получением экспериментальных доказательств существования вынужденного излучения. Позднее он рассматривал эту проблему более интенсивно, и 18 июня 1951 г., он подал вместе со своими сотрудниками заявку на патент относительно нового

метода усиления света, озаглавленную: «Метод усиления электромагнитного излучения (ультрафиолетового, видимого, инфракрасного и радиоволн), отличающийся тем, что усиливаемое излучение пропускается через среду, в которой с помощью дополнительного излучения, или другими способами, создается избыток концентрации на верхних уровнях по отношению к равновесной концентрации атомов, других частиц, или систем». В патенте идеи использования вынужденного излучения для усиления излучения были развиты более конкретным образом.

Однако патент был опубликован лишь в 1959 г. и нет возможности знать, какая формулировка и описание были в первоначальной заявке. Формулировка 1959 г. очень общая и, практически, покрывает все, что относится к мазерам и лазерам. После подачи заявки Фабрикант и его сотрудники проводили экспериментальные работы в разных условиях, но без успехов. Хотя они и опубликовали экспериментальные подтверждения своих идей, но они были опровергнуты.

Работа Фабриканта имеет исторический интерес, поскольку он к своей концепции шел со стороны оптики, без прохождения фазы мазера. Работа не оказала никакого влияния на развитие и мазера и лазера, поскольку она стала известной, после того как оба устройства были реализованы. Даже в России отношение его коллег к его идее было, вероятно, не слишком серьезным, он сам не опубликовал свои результаты. Только после того, как были построены первые мазеры и лазеры, Правительство вспомнило о нем. В 1965 г. Академия наук СССР наградила его Золотой медалью С.И. Вавилова «за важные работы по оптике и газовому разряду». Он получил Государственную премию СССР за разработку люминесцентных ламп.

#### Оптическая бомба

В Америке Роберт Дике (1916—1997) опубликовал в 1953 г. работу, в которой он ввел новую концепцию, которую назвал «сверхизлучением». Это было стержнем обсуждения метода получения излучения с характерной когерентностью. Поскольку в 1953 г. названий мазер и лазер еще не существовало, Дике назвал свое устройство «оптической бомбой», предсказывая, что оно способно испустить крайне короткий и интенсивный импульс света.

Дике был профессором физики в Принстонском университете и консультантом RCA. Он интересовался основными проблемами физики и сделал важный вклад в изучение гравитации, но также не был чужд изобретательства. Должность консультанта помогала ему облекать некоторые из своих идей в патенты или в проекты для лабораторий фирмы. Он интересовался методами сужения линии излучения атома водорода, чтобы изучить взаимодействие электрона с ядром, и это привело его к исследованию общих свойств когерентного излучения и к концепции сверхизлучения. Узкие линии были важны для создания стандартов частоты, и RCA имела контракт с военными, основанный на идее Дике получения когерентного излучения. Позднее, в 1960 г. он стал интересоваться гравитацией, а в 1964 г. теорией Большого Взрыва и побудил своего коллегу Пиблса рассчитать температуру излучения черного тела, оставшегося как память об этом великом взрыве. В начале февраля 1956 г. Дике описал в своей записной книжке три изобретения. Одно касалось исследований переходов в аммиаке для получения излучения в миллиметровой области. Второе было методом получения большей мощности за счет формирования источника молекул аммиака в виде кольца вокруг микроволнового резонатора. Третье предлагало использовать такой «кольцевой мазер», чтобы генерировать волны в диапазоне от 0,25 до 0,03 мм, т.е. вплоть до инфракрасной области. Чтобы сделать свой мазер работающим в этой части спектра, Дике заменил микроволновый

резонатор парой параллельных зеркал, т.е. эталоном Фабри—Перо. На основе этой идеи в 1958 г. был выдан патент под названием: «Молекулярные системы и методы усиления и генерации». Однако эта идея не получила развития.

#### Предложение Таунса и Шавлова

Тем временем в Советском Союзе Басов и Прохоров в Физическом институте им. П.Н. Лебедева исследовали, как продвинуть свойства лазера в видимый диапазон, а Гордон Голд (г. р. 1920), работавший в США над своим собственным проектом, о котором мы расскажем позже.

Но Чарльз Таунс и Артур Шавлов были первыми, кто опубликовали детальное и исчерпывающее предложение, которое и привело впоследствии к конструкциям лазеров разного типа.

В 1957 г. Чарльз Таунс приступил к рассмотрению проблем, связанных с созданием устройств, подобных лазеру, работающих на оптических длинах волн. Таунс проводил эту работу в тесном сотрудничестве с Артуром Шавловым, физиком, работающим в то время в Bell Labs.

Артур Шавлов родился в Маунт Верной (Нью-Йорк, США) 5 мая 1921 г. Сначала он хотел стать радиоинженером, но после окончания школы ему было всего лишь 16 лет, а в Канаде, где он жил в то время, в университет принимали с 17 лет. Кроме того, его семья не могла поддержать его. В конце концов он сумел получить стипендию для занятий по физике и математике и смог учиться в университете Торонто, окончив его в 1941 г. Его увлекала исследовательская работа и в 1949 г. он получил в этом университете степень доктора. За несколько месяцев до этого в Оттаве проходил Конгресс Канадской Ассоциации Физиков, в котором принял участие И. Раби, рассказав об удивительных открытиях Виллиса Лэмба и Поликарпа Куша, за которые они получили Нобелевскую премию. Молодой Шавлов загорелся и старался сделать всё, чтобы попасть в Колумбийский университет. Итак, он написал Раби в Колумбийский университет, который предложил ему стипендию для работы под руководством Таунса. Эта стипендия, как мы уже говорили, была назначена корпорацией Юнион Карбайд для поддержки прикладных исследований в области микроволновой спектроскопии для органической химии. Шавлов совсем не интересовался органической химией, но очень интересовался микроволнами и работал с клистроном. По условиям стипендии он должен был работать с человеком по имени Чарльз Таунс, о котором он ничего не слышал, но поскольку он хотел попасть в этот университет, он согласился.

В то время там работали не менее восьми будущих лауреатов Нобелевской премии: ядерный физик Хидеки Юкава (1907-1981), который получил Нобелевскую премию, спустя несколько месяцев после появления Шавлова, за предсказание существования мезона, элементарной частицы, необходимой для объяснения взаимодействия протонов и нейтронов в атомных ядрах; сын Бора Ог (г. р. 1922) который стал лауреатом в 1975 г. вместе с Моттelsonом и Рейнвотером за изучение атомных ядер; Раби, Таунс, Куш, Лэмб, о которых уже говорилось.

Шавлов был очень взволнован и постарался получить финансирование на 1949—1950 гг. В следующем году он остался в Колумбийском университете как научный сотрудник. Шавлов и Таунс стали друзьями и часто вместе обедали в профессорском клубе факультета. В течение этого периода Шавлов познакомился с младшей сестрой Таунса и женился на ней. После женитьбы он не мог работать с Таунсом (правила университета запрещали семейственность) и должен был найти работу. Его жена хотела оставаться вблизи Нью-Йорка, где она обучалась пению. Поэтому Шавлов поступил в 1951 г. в Bell Labs. Там работал Джон Бардин (1908-1991), один из изобретателей транзистора и

дважды лауреат Нобелевской премии по физике. Одну он получил в 1956 г. с У. Шокли и У. Браттейном «за их исследования полупроводников и открытие эффекта транзистора». Вторую он получил в 1972 г. с Л. Купером и Дж. Шриффером «за их совместную разработку теории сверхпроводимости». Бардин проводил исследования по сверхпроводимости и ему нужен был помощник. У Шавлова не было опыта работы с низкими температурами и с полупроводниками, тем не менее, он согласился. Но, когда он появился в Bell Labs, Бардин решил перейти в университет Иллинойса, и Шавлов остался один на один с тематикой, о которой он знал немного. В это время он также писал с Таунсом книгу по микроволновой спектроскопии и проводил почти каждую субботу в Колумбийском университете.

После изобретения лазера Шавлов переехал в Стэнфордский университет (Калифорния, США) профессором физики. Одна из причин была в том, что старший из его трех детей был аутистическим, а лучшие институты по аутизму были в Калифорнии. В Стэнфорде он разработал много новых спектроскопических методик, основанных на использовании лазеров, в частности для высокого спектрального разрешения и прецизионной точности. Вместе с Теодором Хэншем, который в 1970 г. поступил в его лабораторию, он разработал новые методики для лазерной спектроскопии и предложил охлаждать атомарный газ с помощью лазерного излучения. За свои заслуги в области лазерной спектроскопии он был награжден в 1981 г. Нобелевской премией по физике вместе с Н. Бломбергенем и К. Сигбаном.

Шавлов обладал хорошим чувством юмора и комедийным талантом. Одна из его шуток заключалась в следующем. Он вытаскивал свой знаменитый красный игрушечный пистолет, в котором был установлен маленький рубиновый лазер. Затем он шумно начинал надувать большой прозрачный шар, внутри которого также надувался голубой шарик с большими ушами Микки Мауса. «Там мышь, внутри шарика» — говорил Шавлов. «Вы знаете, это ужасно, что мыши проникают всюду, Нам нужно использовать наш лазер». Он стрелял лучом пистолета, который прожигал внутренний шарик, оставляя внешний шар без повреждений. «Это очень важный эксперимент», — объяснял Шавлов — «он показывает, что с помощью лазера мы имеем свет, который не только можем видеть, но которым можем воздействовать на вещи, которые мы видим, но к которым не имеем прямого доступа». Артур Шавлов умер 28 апреля 1999 г.

В сентябре 1957 г. Таунс написал проект с общей идеей, согласно которой, впервые могла бы быть работа лазера на оптических частотах, т.е. так называемого оптического лазера. Он мог бы состоять из системы, в которой активная среда облучалась излучением подходящей длины волны (этот метод называется оптической накачкой). Она помещалась в полость, имеющей форму коробки с размерами около 1 см, т.е. много большими, чем длина волны света ( $\sim 0,5$  мкм). Часть стенок удалялась, так, чтобы свет накачки мог попадать на активную среду, а другие серебрились, чтобы иметь высокий коэффициент отражения. Таунс уже видел недостатки своего устройства, но полагал, что оно способно работать. Активным веществом предполагался газ, и он первоначально думал о парах таллия, которые предполагалось освещать подходящим источником света.

14 сентября Таунс попросил аспиранта из Колумбии, Дж. Джормейна, расписаться в записной книжке, в которой описывался световой резонатор. Он состоял из стеклянного ящика с четырьмя отражающими стенками. Для возбуждения газа таллия внутри полости использовалась таллиевая спектральная лампа. Подпись требовалась для подтверждения приоритета изобретения.

В октябре того же года Таунс посетил Bell Labs, где он помогал в работе над мазерами, и встретился с Шавловым, которому изложил свои попытки сконструировать инфракрасный или оптический мазер. Шавлов заинтересовался, и Таунс пообещал дать ему копию своих записей. Они договорились сотрудничать. Шавлов предложил убрать все стенки резонатора, оставив только две, которые образуют интерферометр Фабри—Перо. Будучи студентом в Торонто он использовал этот интерферометр для изучения сверхтонкой структуры атомных спектров. Позднее Шавлов писал: «Я сразу вспомнил о интерферометре Фабри—Перо, с которым имел дело. Я понимал, даже не рассматривая подробно теорию его действия, что он является, в некотором роде, резонатором, поскольку пропускает одни длины волн и не пропускает другие».

В заметках, которые Таунс дал Шавлову, он выполнил расчеты возбуждения атомов таллия ультрафиолетовым светом таллиевой лампой. Такие лампы использовались в лаборатории Курша в Колумбийском университете, для оптического возбуждения атомов таллия в экспериментах по резонансным явлениям в атомных пучках. Между 25 и 28 октября Таунс обсуждал с Гордоном Голдом, студентом Куша, который работал с атомными пучками и использовал таллиевые лампы, какую мощность можно получить с их помощью.

Шавлов быстро показал, что таллий не годится в схеме Таунса, и начал поиск других материалов. В итоге они выбрали калий по простой причине — его линии лежат в видимой области, которые Шавлов мог измерять своим спектрометром. Он получил его для своей работы по полупроводникам, и это был единственный спектральный прибор, которым он располагал. Между тем Таунс рассчитал необходимое число возбужденных атомов и провел некоторые эксперименты. Затем они снова обратили внимание на резонатор. В конце концов, Шавлов понял, что выбор по длинам волн, мог бы быть сделан, если рассмотреть направления распространения различных длин волн в полости. Вместе с Таунсом они сообразили, что свет должен распространяться вдоль оси, перпендикулярной плоскости двух взаимно параллельных зеркал, а свет, распространяющийся под углами к этой оси, быстро теряется. На основе этих соображений они решили использовать в качестве резонатора систему Фабри—Перо, и 29 января 1958 г. Таунс попросил другого аспиранта, С. Миллера, расписаться в книжке, где описывались эти соображения.

В течение весны Шавлов и Таунс решили опубликовать свою работу. По правилам Bell Labs, с которой у них были договоры о найме, следовало до публикации распространить рукопись среди коллег, для того, чтобы получить технические замечания и улучшения. Копия также представлялась в патентный отдел компании, чтобы определить, не содержит ли она материала, стоящего патентования. В результате этой процедуры коллеги попросили их подробнее описать соображения о модах резонатора, поскольку они не верили, что Фабри—Перо может выбирать нужные длины волн, они также хотели видеть расчеты, которые в то время Шавлов не мог сделать. Патентный отдел сначала отказался патентовать и их усилитель, и генератор оптических частот, так как «оптические волны никогда не будут важны для связи, и, следовательно, изобретение имеет малое отношение для Bell System». Однако, по настоянию Таунса, запрос на патент был зарегистрирован в марте 1960 г., а сама статья 26 августа 1958 г. была послана в Physical Review, где была напечатана в декабре того же года. Ее авторы позднее получили Нобелевскую премию; Ч. Таунс в 1964 г., как мы увидим, за изобретение мазера и предложение лазера, а А. Шавлов в 1981 г. — за сходную заслугу: лазерную спектроскопию.

В своей работе, озаглавленной «Инфракрасные и оптические мазеры», Шавлов и Таунс утверждали, что хотя, в принципе, и возможно распространить технику мазеров в инфракрасный и оптический диапазоны и генерировать высокомонохроматическое и когерентное излучения, но возникает ряд новых аспектов и проблем, которые требуют количественного анализа и теоретических обсуждений, а также существенной модификации экспериментальных методик.

Декларированная цель работы состояла в том, чтобы обсудить теоретические аспекты устройства, подобного мазеру, для видимых или инфракрасных длин волн и соответственно, дать наброски конструкций, т.е. содействовать реализации мазера нового типа, названного ими оптическим мазером (позднее названный лазером, с заменой на «l», обозначающей свет). Принципиальными моментами были: выбор резонатора и его свойства выделения мод, выражение для усиления устройства и некоторые предложения активных материалов.

Хотя можно было предположить, что многие материалы могут усиливать, Таунс отмечал, что возбуждение атомов и молекул с помощью пучков света, электрическими разрядами и другими способами изучалось годами, но никто не наблюдал усиления в оптической области. Поэтому он предполагал, что получение усиления может оказаться очень трудным и все эксперименты следует спланировать с большой тщательностью. По этим соображениям они сосредоточились на газах простых атомов, несмотря на то, что твердотельные материалы и молекулы могут иметь преимущества.

Самой насущной проблемой была реализация резонатора. В случае мазера использовался обычный объемный резонатор с металлическими стенками. При соответствующей конструкции такого резонатора получалась одна резонансная мода, осциллирующая вблизи частоты, соответствующей излучатель-ному переходу активной системы. Для того чтобы получить такую одиночную, изолированную моду, линейные размеры резонатора должны быть порядка длины волны. В случае инфракрасного излучения эти размеры оказываются слишком малыми, чтобы быть практически реализованными. Следовательно, необходимо рассматривать резонаторы, размеры которых большие по сравнению с длиной волны и которые могут, поэтому, поддерживать большое число мод в нужной области частот.

Таунс и Шавлов понимали, что нужно найти способ выделения только некоторых из этих мод, в противном случае испускаемая энергия была бы очень мала и недостаточна, чтобы превзойти все потери. Это так же, как водяной поток: если он делится на тысячи ручейков, то вода разбрасывается по земле и не достигает определенного места. После некоторых общих рассмотрений, выбором стал интерферометр Фабри—Перо, состоящий из двух высокоотражающих плоскопараллельных стенок. Они показали, что благодаря этому получается открытый резонатор, лишенный боковых стенок и состоящий только из двух параллельных зеркал. В нем захватываются только те волны, которые распространяются параллельно оси и длины которых кратны длине резонатора (т.е. расстоянию между зеркалами). Чтобы извлечь свет из такого резонатора, они предположили, что одно из зеркал будет частично прозрачным, так чтобы позволить пучку, падающему на это зеркало, частично выходить из резонатора. Идея иметь резонатор с размерами много большими, чем длина волны, предполагалась не только из-за практической невозможности сделать резонатор с размерами порядка длины волны, но также из-за того факта, что резонатор должен содержать достаточное количество активного материала.

Другой проблемой, рассматриваемой в статье, было определение минимального числа молекул или атомов активного материала, которые должны быть на верхнем энергетическом уровне, чтобы обеспечить генерацию света за счет вынужденного излучения.

Монохроматичность такого мазерного генератора также рассматривалась, и Шавлов и Таунс понимали, что это свойство очень тесно связано со свойствами шумов такого устройства, как усилитель. В лазере шум возникает из-за спонтанного излучения активного материала. Они модифицировали вычисления, которые предварительно были проведены для мазеров, и нашли, что ширина линии была порядка одной миллионной от ширины линии, соответствующей спонтанному излучению.

В работе был также раздел, посвященный обсуждению некоторых специфических примеров. В числе газовых систем они рассмотрели атомные пары калия, накачиваемые на  $4047 \text{ \AA}$ , и пары цезия.

Шавлов даже предварительно провел некоторые эксперименты с коммерческими калиевыми лампами и попросил Роберта Коллинса, спектроскописта Bell Labs, измерить выходную мощность этих ламп. Они рассчитали, что в случае использования паров калия будет вполне достаточно использовать излучение калиевой лампы, испускающей мощность около 1 мВт на длине волны  $4047 \text{ \AA}$ . Они сочли эту оценку приемлемой, так как уже получали половину милливатта от маленькой коммерческой лампы. По ее техническим характеристикам, она должна была бы излучать только десятую долю милливатта на этой длине волны. Они также рассмотрели твердотельные устройства, хотя не были оптимистичны в отношении их.

Работа Шавлова и Таунса вызвала значительный интерес, и многие лаборатории начали поиск возможных материалов и методов для оптических мазеров. Таунс и его группа в Колумбии начали попытки создать оптический мазер на парах калия. Он работал с двумя аспирантами Х. Камминсом и И. Абелла. В то же время к их группе присоединился О. Хивинс, профессор физики университета Йорка (Англия), мировой эксперт в области высоко-отражающих зеркал. Таунс понимал, что зеркала резонатора были наиболее деликатной частью разрабатываемого устройства, и пригласил его провести с ним свой академический отпуск. В их установке использовалась длинная трубка, в которой пары калия возбуждались электрическим разрядом (также как это делается в неоновых трубках рекламы). Резонатор был образован двумя зеркалами внутри трубки, на ее концах. Эти два зеркала должны были иметь высокое отражение. Оно получалось путем нанесения на стеклянную пластинку серии слоев подходящих материалов с помощью методики, в которой Хивинс был мастер. Сегодня мы можем объяснить неудачу того эксперимента тем, что эти покрытия разрушались бомбардировкой ионов газового разряда.

Шавлов в Bell Labs начал рассматривать рубин как возможный твердотельный материал, но в 1959 г. пришел к заключению, что энергетические уровни, позднее использованные Мейманом, не подходят, и таким образом упустил шанс построить один из самых популярных существующих лазеров, несмотря на то, что он правильно предсказал, что устройство твердотельного лазера может быть особенно простым. По существу, это мог быть просто стержень, один конец которого полностью отражает, а другой отражает почти полностью. Поверхность стержня остается без покрытий, чтобы пропускать излучение накачки.

## ГЛАВА 12

### УДАЧА (ИЛИ НЕУДАЧА?) ГОРДОНА ГОУЛДА

По мнению историков науки и техники, ошибочно связывать изобретение или научное открытие с отдельной личностью или точным моментом времени. Изобретение является процессом, который проходит отрезок времени и в котором, обычно, многие люди принимают существенное участие. Мы видели это на примере изобретения мазера и увидим еще больше в случае изобретения лазера. Действительно, Шавлов и Таунс не были одиноки в выяснении возможности распространить концепцию мазера в видимый и инфракрасный диапазоны, и в предсказаниях потенциальных применений оптического мазера.

Гордон Гоулд был студентом Колумбийского университета и обладал практичным и интуитивным менталитетом изобретателя. Он сосредоточивался исключительно на получении патента и не стремился распространить свои идеи в научной литературе и публиковать свои результаты традиционным образом в научных журналах. Вместо этого он сделал официальный запрос на серию патентов, что породило ряд судебных процессов, касающихся изобретения лазера и продолжавшихся несколько лет.

В возрасте 21 года Гоулд в 1941 г. получил степень бакалавра физики в Юнион Колледже, а в 1943 г. и степень магистра по оптической спектроскопии в Йельском университете. Там он научился использовать интерферометр Фабри—Перо. После военной службы он решил посвятить себя изобретательству и найти работу с неполным рабочим днем. Он начал с проектирования контактных линз и других вещей, включая попытки получить искусственный алмаз. Однако он решил, что для продолжения работ ему нужна более солидная научная основа. В 1949 г. он поступил в Колумбийский университет, где с 1951 г. стал работать над диссертацией под руководством профессора Поликарпа Куша. Диссертация была посвящена использованию атомного пучка таллия с целью изучения возбужденных энергетических уровней. Освещая атомы таллия светом подходящей лампы, он сперва возбуждал их на желаемый уровень, а затем исследовал, как они распадаются с этого состояния, т.е. какова эффективность заселения этого состояния и т.д. Но работа продвигалась очень медленно, даже к ноябрю 1957 г. Гоулд не написал диссертацию.

На самом деле он заинтересовался проектом построить оптический мазер, который он переименовал в лазер, заменив «т» в слове мазер, обозначающее микроволны, на «л», обозначающее свет. Когда первые лазеры были созданы, компании Bell Telephone не понравилось это название, и они отказались его использовать, предпочитая оптический мазер. Это не имело успеха, и устройство стало известным как лазер.

Эту историю можно восстановить на основе показаний, в ряде судебных процессов о приоритетах изобретения этого устройства, начиная с октября 1957 г., когда Гордон Гоулд, согласно его собственным заявлениям, рассматривал возможность использования устройства типа Фабри—Перо в качестве резонатора лазера. В один из дней ему домой позвонил Таунс. Его кабинет был рядом с кабинетом Гоулда, на десятом этаже здания физического факультета Колумбийского университета. Таунс хотел получить информацию об очень ярких таллиевых лампах, которые Гоулд использовал в своей диссертационной работе. Таунс зарегистрировал этот телефонный разговор в своей записной книжке. После этого разговора Гоулд пришел в возбуждение, и бросился заканчивать свои исследования как можно быстрее. В пятницу 16 ноября 1957 г. Гоулд и его жена, которая также работала в Колумбийском университете, пошли к владельцу кондитерской лавки (он был публичным нотариусом, приятелем жены Гоулда и его семьи). Там тот заверил своей печатью первые девять

страниц лабораторного журнала Гоулда, которые содержали работу «Некоторые грубые расчеты возможности лазерного усиления света с помощью вынужденного испускания излучения».

В заметках на более чем сотни страниц Гоулд предполагал заключить активную среду в трубку, длиной 1 м с двумя отражающими зеркалами (т.е. типичный резонатор Фабри—Перо). Он также рассматривал возможность помещения стеклянных окошек с точно обработанными, до долей длины волны, поверхностями, ориентированными под определенным углом, известным, как угол Брюстера. Стеклопластина, наклоненная по отношению к оси трубки под углом Брюстера, позволяет свету с определенной поляризацией проходить внутри трубки с отражениями от зеркал, но без ослабления. Это очень важно для лазера, поскольку стараются минимизировать потери внутри резонатора. Гоулд вывел условия генерации и получил правильный результат. Он упомянул об оптической накачке как о возможном методе возбуждения, который он обсуждал с Таунсом. Как возможную среду, он упоминал пары щелочных металлов, приводя в качестве примера пары калия, а затем рубин и некоторые редкие земли. Он ссылаясь также на накачку за счет столкновений в газовом разряде, упоминая смесь гелия и неона как одну из возможных газовых сред, которую можно возбудить. Затем он стал обсуждать большую серию применений в спектрометрии, интерферометрии и фотохимии, а также для усиления света в радарах, в системах связи и для термоядерного синтеза. На этой же странице он говорил о стандартах частоты и длины, которые можно будет сделать с помощью лазеров, о системах измерения профиля, об обработке материалов, технологиях сверления и резки, об активации химических реакций. Все это можно сделать с помощью лазерного света.

По иронии судьбы, именно Таунс надоумил Гоулда использовать подписанную записную книжку в качестве способа отстаивания приоритета изобретения! Одержимость Гоулда идеей лазера уже стоила ему многого. Его руководитель профессор П. Куш, по словам Гоулда, никогда не позволял ему отвлекаться от темы и заменять ее другой работой. Так что в марте 1958 г. Гоулд покинул Колумбию, не закончив диссертацию. Он поступил в Technical Research Group (TRG) Inc.

TRG была одной из тех американских компаний, которые возникли в период холодной войны и чьи интересы были сосредоточены на контрактах с военными ведомствами. Эту компанию организовали в 1953 г. три человека, имеющих докторские степени: один в области электроники, другой по физике и третий в прикладной математике. Сначала эта компания действовала как консультирующее агентство. В 1955 г. добавились лаборатории и мастерские. Главная работа касалась антенн и радаров, физики ядерных реакторов и управляемых снарядов. Но был также маленький контракт по лазерам и программе атомных стандартов частоты. Гоулд был принят для работы по этому последнему проекту. Поскольку он не закончил диссертации, компания предоставила ему некоторое свободное время до июля 1958 г. для завершения работы. Однако Гоулд использовал это время не для работы над диссертацией, а для работы над своим лазерным проектом.

Он исследовал большое число лазерных сред и методов возбуждения: оптическую накачку, возбуждение столкновениями с быстрыми электронами в газовом разряде, передачу возбуждения от одних атомов к другим (столкновение второго рода). В качестве среды он рассматривал пары калия, смесь калия с ртутью и гелием, цинк и таллий, возбуждаемых передачей энергии от криптона и ксенона, молекулы йода, накачиваемые светом от калиевой лампы, и сульфат европия в водном растворе, возбуждаемый оптически. Многие из его подходов были простыми предположениями, и он не работал глубоко над физикой процесса. Он также совершал много ошибок.

На судебном процессе 8 декабря 1965 г. в Вашингтоне д-р Алан Берман, физик, друг и партнер Гоулда по бриджу, свидетельствовал о разговоре, который он имел с Гоулдом в августе 1958 г., когда он был вместе с ним на пляже. Гоулд в то время работал в TRG. Берман обратил внимание, что Гоулд работает над лазером в ущерб диссертации. Он беспокоился о нем, видя, что он не делает никакой попытки опубликовать свои результаты нормальным образом, как это делают все физики, и добавил, что, по его мнению, это ненаучный путь. Стоит отметить, что если бы Гоулд последовал совету Бермана, он мог бы послать статью в *Physical Review*, которая была бы опубликована одновременно со статьей Шавлова и Таунса!

В сентябре 1958 г. Лоуренс Голмунц, президент TRG, узнал, что Гоулд тратит время, работая над частным проектом. Гоулд и Голмунц обсудили исследования по лазеру, и TRG забрала проект Гоулда в свою собственность. 16 декабря 1958 г. Голмунц запросил \$ 200 000 от компании, которая владела 18% TRG. Еще \$ 300 000 были запрошены от Агентства прогрессивных исследовательских проектов Пентагона, чтобы обеспечить работу Гоулда над лазером, который обещали использовать для оптического радара, определителя расстояний и систем связи.

По стечению обстоятельств, и Гоулд и Таунс, каждый держал в своих руках, в одно и то же время, работу другого. Гоулд получил копию работы Шавлова и Таунса от одного из сотрудников компании, а Таунс как правительственный консультант прочел 200-страничное предложение Агентства Пентагона. Другие эксперты также видели это предложение и дали положительный отзыв. В результате TRG получила \$ 998 000 для проекта. Увеличение запрашиваемого финансирования было (и все еще есть) очень редким, если не сказать уникальным. Но Агентство было очень заинтересовано проблемой обороны с помощью противоракет, и лазер, хотя он еще и не существовал, был одним из тех средств, с помощью которых думали решить проблему. В результате было выделено повышенное финансирование с указанием ускоренной разработки всех видов предлагаемых лазеров, но работа была засекречена. Это было большой неудачей для Гоулда, поскольку он не обладал допуском и не мог работать над проектом. Дело в том, что в период Второй мировой войны он был членом марксистской группы, и на основании этого ему было отказано в допуске к закрытым работам. В результате он не мог вести проект, не мог читать отчеты и непосредственно участвовать в экспериментах. Он был лишь внешним консультантом исследовательской команды.

6 апреля 1959 г. Гоулд и TRG подали заявку на изобретение лазера в США. За этим последовала серия запросов британских патентов, которые были подтверждены. Шавлов и Таунс уже подали свою заявку в июле 1958 г., и патент был выдан в марте 1960 г. Гоулд и TRG обратились с жалобой в Апелляционный Суд США, аргументируя, что, хотя их заявка была подана после Шавлова и Таунса, идея Гоулда была первой. Принципиальным доказательством являлась записная книжка Гоулда, которая была заверена в пятницу, 16 ноября 1957 г., после разговора с Таунсом. Слушание дела было отложено на 8 декабря 1965 г.

На этом история Гоулда не окончилась. 11 октября 1977 г., после попыток в течение нескольких лет, он, наконец, получил свой патент на лазерный усилитель с оптической накачкой. Этот патент был получен после 18 лет ожидания. Это, пожалуй, рекорд, поскольку три или четыре года — обычное время ожидания! Когда патент Гоулда стал действовать, патент Шавлова и Таунса, выданный в 1960 г., прекратил свое действие (в США патент действует в течение 17 лет). Второй патент на три

широких применения лазера был 17 июля 1979 г. выдан Гоулду Патентным Бюро США. Гоулд к тому времени оставил TRG и передал управление своим долгожданным патентом одной корпорации в Нью-Йорке, которая начала компанию по получению вознаграждений. Но производители лазеров, после уплаты вознаграждений Bell Labs в течение почти 20 лет, не желали платить Гоулду, и начались новые судебные тяжбы.

#### Война патентов

Война лазерных патентов свирепствовала 30 лет. Если бы Гоулду в свое время дали бы хороший, квалифицированный совет, то он мог бы подать заявку на патент раньше Таунса и Шавлова, в период своих записей в ноябре 1957 г., и, определенно, получил бы его. Однако он думал, что сначала должен реализовать свою идею практически. Таким образом, он упустил время и представил свою просьбу спустя только два года после Таунса и Шавлова. Но, как мы видели, Гоулд не сдался и вместе с TRG получил британские патенты на некоторые различные решения лазерной технологии. Эти патенты не сделали Гоулда богатым, но они содействовали его стремлению поддержать его американские заявки. Когда в начале 1960-х гг. компания TRG была продана и проходила процедура переоформления активов, Гоулд сказал, что ему должны быть возвращены права на патент. В это время он активно работал в лазерной области в качестве профессора Бруклинского политехнического института, вплоть до 1973 г., когда он оставил эту должность и основал Optelecom, одну из первых организаций по разработке оптоволоконной связи.

В тот же год Апелляционный Патентный Суд США решил по делу о модуляции добротности (методика, позволяющая генерировать одиночные и мощные лазерные импульсы), что патент Шавлова—Таунса не описывает адекватно оптическую накачку лазерной среды. В это же время Гоулд решил продать половину своих прав одной нью-йоркской фирме, занимающейся патентным лицензированием (Refac Technology Development Corp.), в обмен на получение своих легальных вознаграждений.

Итак, в 1977 г., Патентное Бюро, через 18 лет после подачи заявки, выдало Гоулду патент на оптическую накачку лазеров (рис. 49), и Refac немедленно уведомила производителей, что они должны платить вознаграждение за лазеры с оптической накачкой. Это составляло от 3,5 до 5% от прибыли, что давало более 1 миллиона долларов в год, за счет продажи только твердотельных лазеров. О других типах лазеров, попадающих под действие патента, речь не шла. В течение действия патента (17 лет) на оптический мазер Таунса (17 лет), он принес ему только 1 миллион долларов, поскольку Bell Labs, по согласованию с правительством, соглашалась запрашивать только минимальные вознаграждения за свои патенты.

Поэтому производители лазеров сопротивлялись требованиям платить, и Refac через неделю после получения патента начала процесс против Control Laser Corp, которая была лидером среди семи других лазерных компаний, отказывающихся платить по патенту Гоулда.

В следующем году Гоулд получил второй патент на обширную область применений, включая лазерную технологию. Сообщение об этом повысило стоимость акции Refac на бирже с 10 долларов до 34. Гоулд продал часть своих прав настырным адвокатам и компаниям, которые умели получить прибыль.

Один из аргументов, которые компании, отказывающиеся платить, выдвигали в судах, заключался в том, что информация в патенте Гоулда была недостаточной, чтобы построить лазер. Поэтому Гоулд

вместе с некоторыми другими исследователями в Optelecom Inc. и при финансовой поддержке фирм, которые купили часть его прав, использовал коммерчески доступные натриевые лампы для накачки органических красителей. Используя краситель родамин В, он построил лазер, опираясь лишь на ту информацию о конструкции, которая содержалась в его патенте от 1958 г., и на информацию, которая была доступна в то время. Этот результат нанес удар по компаниям, противившимся его патенту.

Первое дело в суде было против маленькой компании General Photonics. Она не предпринимала сильной защиты, и 1 марта 1982 г. федеральный судья постановил выплачивать вознаграждение за патент на оптическую накачку. Однако, вскоре после этого, противники патента добились пересмотра патентов, которые уже были выданы. В начале 1983 г. Патентное Бюро отвергло притязания Гоулда. Но он был упорным и снова обратился в суд. Это привело его к окончательной победе в мае 1987 г. В октябре 1987 г. Гоулд получил свой третий патент на газоразрядный лазер и четвертый патент на брюстеровские окна для лазеров.

Победы в судах сделали Гоулда мультимиллионером. Кстати, если бы он получил свои патенты без задержки, они принесли бы ему существенно меньше денег, поскольку объем рынка лазеров был сначала невелик. Именно так и случилось с патентом Таунса, срок которого истек до того, как объем лазерной продукции стремительно вырос.

Для людей, которые желают спросить, насколько идеи Таунса и Гоулда развились из общедоступной информации, учитывая, что оба были в Колумбии и хорошо знали друг друга, можно дать ответ, принимая во внимание два соображения.

Первое: идея нуждается в питательной среде для своего развития, т.е. все общие соображения должны быть развиты, прежде чем идея другого человека будет оставлена, но и благоприятно сработает на новую идею. Другими словами, идея пускает корни только в подготовленных умах.

Даже если разговоры с Таунсом и дали Гоулду идею, что можно возбуждать атомы путем оптической накачки, Гоулд должен был бы уже разработать концепцию использования инверсной населенности, оптического резонатора и т.д., чтобы объединить их в своем лазерном проекте.

Второе если мы посмотрим, как два человека разрабатывают идею лазера и, конкретно, как они приходят к решению одной из принципиальных проблем, а именно резонатора, мы увидим, что два предложенных решения типичны для их разных индивидуальностей. Таунс — изобретатель лазера и эксперт по микроволнам, начинал рассмотрение с куба, с отражающими стенками, т.е. типичной формы микроволнового резонатора. И лишь позднее, по предложению Шавлова, убрал все стенки, кроме двух. Гоулд, с оптической подготовкой, с самого начала рассматривал резонатор, образованный длинной трубкой (~ 1 м) с двумя плоскопараллельными зеркалами на концах, а затем разработал все возможные конфигурации с плоскими внешними зеркалами, сферическими зеркалами, призмами полного внутреннего отражения и т.д.

Гоулд был, прежде всего, изобретателем (по свидетельству жены, его идолом с детства был Томас Эдисон). Набросав в своей записной книжке эскиз своей идеи и ряд особо разработанных предложений, он оформил их в предложении для контракта по монтажу всего устройства. Таунс и Шавлов, с их мировоззрением профессиональных физиков, сперва подумали о написании статьи для сообщения их идеи научному миру, не без того, чтобы первыми получить патент (не будем забывать, что их поддерживала коммерческая фирма), и уж затем они работали над деталями теоретически,

прежде чем включиться в экспериментальную работу. Поэтому, как следует из этой истории, мало сомнений в том, что идея лазера родилась независимо и одновременно у этих трех исследователей[7].

## ГЛАВА 13

### И НАКОНЕЦ-ТО, ЛАЗЕР!

Сразу же после опубликования работы Шавлова и Таунса и даже до того целый ряд людей стали размышлять о разных способах создания инверсной населенности в инфракрасной и видимой областях. Творческая ментальность исследователя, который стремится улучшить существующие знания и прорваться в новом направлении без предубеждений, приводит почти одновременно и независимо к рассмотрению нескольких различных систем. В ряде случаев, например, как тот, в котором используется излучение, испускаемое за счет стимулированной рекомбинации электрон-дырочных пар в полупроводнике, исследования проводились до обсуждения Шавловым и Таунсом. Конечно, главные темы исследований были под воздействием идей этих двух ученых, и большинство людей ожидало, что первая работа лазера осуществится в возбужденном газе. Но получилось так, что первый работающий лазер был создан в июле 1960 г.[8] в Исследовательских лабораториях фирмы Hughes (Малибу, Южная Калифорния, США) Теодором Мейманом, который использовал рубин в качестве активного материала. Затем последовало огромное число других лазеров на твердотельных материалах, газах и жидкостях. Это продемонстрировало, что многие люди в различных частях мира устремились к проблеме с разных направлений, работая, более или менее, независимо друг от друга. Более того, они показали, как, сравнительно легко сделать лазер, после того как поняты основные принципы его работы.

Мейман начинает создавать рубиновый мазер

Теодор Мейман родился в 1927 г. После учебы в университете Колорадо и после получения докторской степени по физике в 1955 г. в Стэнфордском университете по диссертации, посвященной микроволновой спектроскопии, он стал работать в промышленности. Вначале он был исследователем в Lockheed Aircraft, где занимался изучением проблем коммуникаций для управляемых снарядов. Затем он перешел в Hughes для работы над мазером.

Во время своей работы над диссертацией в Стэнфорде Мейман изучал тонкую структуру возбужденных состояний гелия. В своей работе он использовал разработанные им измерительные методики, которые представляли комбинацию электроники, техники микроволн и оптических приборов. В Hughes он стал работать во вновь созданном Отделе атомной физики. Главной целью была генерация когерентных частот, более высоких, чем удавалось получать в то время. Это было время, когда появился аммиачный мазер. В Hughes возник большой интерес к исследованиям мазеров. Однако Мейман сперва работал по другому контракту. Когда он окончил эту работу, то пожелал работать в области фундаментальных исследований, но ведомство Армии, которое финансировало эту работу, требовало в то время практический мазер, работающий на длине волны 3 см. Их не интересовали какие-либо научные достижения, они просто хотели иметь такой мазер, и Меймана попросили возглавить проект. У него это не вызвало энтузиазма, поскольку проект был чисто техническим, а он стремился к исследовательской деятельности. Но затем он заинтересовался и, хотя заказчики не требовали, чтобы он сделал выдающееся изделие, решил, что может сделать мазер более практичным.

Мазеры в то время имели два серьезных практических недостатка. Главная трудность была в том, что твердотельный мазер (наиболее полезный тип) требовал для своей работы очень низких температур. В самом деле температура жидкого гелия, которая требовалась, всего лишь на 4 К выше абсолютного нуля. Другая проблема была в том, что в обычном мазере использовался огромный магнит весом около двух тонн. Он был нужен, чтобы получить зеэмановские уровни, требуемые для работы мазера. Внутри магнита помещался дьюар (специальный сосуд, в котором может продолжительное время сохраняться сжиженный газ). В него приходилось подливать жидкий азот с температурой — 166° С, которая была первой стадией охлаждения гелия. В дьюар с жидким азотом помещался второй дьюар с жидким гелием. Сам мазер представлял маленький резонатор с кристаллом внутри него. Все это помещалось в дьюар с жидким гелием, который, в свою очередь, помещался между полюсами магнита. Магнит должен был обеспечить сильное поле во всей области, занимаемой дьюарами, резонатором и кристаллом. Поэтому он имел большие размеры и вес.

Предпочтительным материалом для мазера в то время был рубин. Мейман решил, что он может кое-что сделать, также используя рубин. Он сделал миниатюрный резонатор, используя сам кристалл рубина. С этой целью рубин вырезался в виде маленького параллелепипеда. Его грани покрывались слоем серебра, имеющего высокую проводимость. В одной из стенок, делалось маленькое отверстие. Таким образом получался резонатор и, одновременно, активный материал. Затем он решил, вместо того, чтобы помещать двойной дьюар в громадный магнит, взять маленький постоянный магнит и поместить его в дьюар. Были опасения, что магнит лопнет, но все сработало прекрасно. В результате все устройство стало весить не более 15 кг вместо двух тонн и работало много лучше и много более стабильно, чем прежде.

Позднее он сделал еще меньшие мазеры весом не более 2 кг и разработал «горячий» мазер, который работал при температуре жидкого азота и даже сухого льда.

#### Рубиновый лазер

В первой половине 1960 г. предположения о лазерных материалах сосредоточивались на газах, и более конкретно на парах щелочных металлов, возбуждаемых оптическим излучением, а также на инертных газах, возбуждаемых электрическим разрядом. Успех, полученный Мейманом с рубиновым лазером, был поистине сюрпризом. Однако это не было случайным открытием. Уже работая с рубином как с материалом для мазера, Мейман решил использовать его в качестве отправного материала для лазера. Вначале он выполнил некоторые расчеты, но без успеха, поскольку Ирвин Видер опубликовал работу, в которой указал, что квантовая эффективность рубина (т.е. число фотонов люминесцентного излучения на каждый поглощенный фотон) была всего лишь около 1%. Рубин является кристаллом окиси алюминия ( $Al_2O_3$ ), в которую добавлено небольшое число атомов хрома в качестве примеси (мы говорим допирование хромом[9]). Атом хрома теряет три своих электрона и становится ионом хрома, который замещает один из ионов алюминия в кристаллической решетке. Эти ионы хрома имеют серию энергетических уровней в видимой области (рис. 50), которые делают прозрачный и бесцветный материал окрашенным от розового до темно-красного, в зависимости от концентрации примеси. На рис. 50 показаны две серии уровней, которые настолько близки друг к другу, что практически сливаются в две непрерывные полосы. Эти две полосы имеют центры на длине волны 0,55 мкм (зеленая; эту полосу в спектроскопии обозначают 4F2) и на длине волны 0,42 мкм (фиолетовая; обозначенная 4F1) соответственно. Если кристалл облучается зеленым

или фиолетовым светом, возбужденные ионы релаксируют на два промежуточных уровня, обозначаемых  $2E$ , за очень короткое время, вместо того, чтобы непосредственно спадать в основное состояние. Переход из зеленой и из фиолетовой полос на эти уровни происходит без испускания света, но дает избыток энергии решетке через колебания ее атомов. С этих очень близко расположенных уровней (обозначаемых  $2A$  и  $\bar{E}$ ) ионы медленно спадают (за время порядка миллисекунды) на основной уровень, причем в это время испускается красный свет, который имеет очень узкое спектральное распределение (узкие линии) около  $6928 \text{ \AA}$  (спектрописты называют ее R2 линией) или  $6943 \text{ \AA}$  (R1). Этот свет, испускаемый после освещения кристалла, называется люминесценцией. Наименование этих уровней и полос было предложено теоретиками согласно рассмотрению на основе теории групп, которое отражает определенные свойства симметрии соответствующих состояний. Это не представляет интереса в нашем случае.

Ирвин Видер из Исследовательских лабораторий Вестингауза занимался исследованием излучения, соответствующего узким линиям рубина, т.е. R линий. Он использовал лампу накаливания, свет которой поглощался и возбуждал обе зеленую и фиолетовую полосы рубина. Затем энергия передавалась на  $2\bar{E}$  уровень. Видер рассчитал, что эффективность этого преобразования энергии была около 1% (т.е. около одной сотой энергии, поглощенной в этих двух полосах, оказывается в виде красного света, испускаемого в R линиях). Если это так, то лишь один красный фотон получается на каждые 100 поглощенных фотонов, что, практически, закрывает возможность использования оптической накачки для получения лазера. Однако после исследования других материалов, Мейман решил выполнить более точные измерения для рубина, путем изучения спектроскопии ионов хрома в розовом рубине. Он обнаружил, что на самом деле, квантовая эффективность была очень высока. Эти и другие результаты точных исследований люминесценции составили предмет статьи, которая была направлена 22 апреля 1960 г. в журнал *Physical Review Letters* и была опубликована в июне того же года.

В этом исследовании Мейману помогал И. Д'Хейнес, который только частично был связан с фирмой и придерживался мнения своих руководителей Дж. Бирнбаума и Г. Лайона, высказывавших скептицизм относительно успеха.

В результате исследований было обнаружено распределение энергии в ионах хрома, которое мы описали и которое изображено на рис. 50, причем время жизни  $2\bar{E}$  уровней, оказалось около 5 мс. Это, относительно длинное, время жизни, в течение которого атомы остаются в метастабильном состоянии, и их последующий распад с испусканием излучения (радиационный распад) является ответственным за явление люминесценции рубина, т.е. явления, которое и дает материалу его красный цвет. Рубины, которые исследовал Мейман, относились к так называемым розовым рубинам, в которых концентрация ионов хрома составляет только около 0,05% по весу. Поэтому, хотя обе линии  $6943 \text{ \AA}$  и  $6928 \text{ \AA}$  красные, полная окраска получается розовой (отсюда и название). Измерения квантовой эффективности люминесценции, т.е. числа фотонов, испускаемых при люминесценции, по сравнению с числом поглощенных фотонов зеленого возбуждающего света, показали, что это отношение близко к единице. Это означает, что практически каждый поглощенный зеленый фотон приводит к испусканию одного красного фотона. Это результат опровергал данные Видера и делал возможным осуществление лазера.

Мейман рассчитал, что достаточно интенсивный зеленый свет может желательным образом заселить

промежуточное состояние  $2\bar{E}$ . Это, в свою очередь, должно было изменить населенность основного состояния (уменьшить его населенность). Все эти результаты побудили его использовать рубин для первого лазера и продолжить расчеты.

На этом этапе принципиальной проблемой было найти источник зеленого света, достаточно мощного, чтобы накачать атомы на верхний уровень. Грубо говоря, лампа излучает свет, как если бы она была черным телом с высокой температурой.

Предварительные расчеты показали, что требуется лампа с эквивалентной температурой черного тела 5000 К. Мейман начал свои расчеты с коммерчески доступными ртутными лампами, но убедился, что их характеристики на пределе. Тогда он вспомнил, что импульсные ксеноновые лампы имеют эквивалентную температуру 8000 К. Не было причин исключать работу лазера в импульсном режиме, так как во многих случаях импульсный источник был привлекательным.

Теперь мы можем легко понять динамику процесса, снова обращаясь к рис. 50. Освещение зеленым светом возбуждает некоторые ионы хрома с основного уровня (на рисунке он имеет спектроскопическое обозначение  $4A_2$  и обозначен числом 1) в полосу уровней, обозначенную как  $4F_2$  и числом 3. Отсюда ионы быстро, за доли микросекунды (путем передачи энергии при столкновениях с атомами решетки), переходят на уровень  $2\bar{E}$ , обозначенный числом 2. С него они возвращаются на основной уровень в течение  $\sim 5$  мс, испуская красный свет.

Мейман измерил уменьшение числа ионов, остающихся на основном уровне после поглощения зеленого света на  $5600 \text{ \AA}$ , путем наблюдения фиолетового света на  $4100 \text{ \AA}$ , который поглощается на переходе от  $4A_2$  на  $4F_1$ . За счет этого перехода энергия ионов хрома возрастает с основного уровня 1 в полосу, обозначенную  $4F_1$ . На образец рубина посылался интенсивный короткий импульс излучения зеленого света на  $5600 \text{ \AA}$  и одновременно образец просвечивался фиолетовым светом на  $4100 \text{ \AA}$ . Когда интенсивный импульс излучения на  $5600 \text{ \AA}$  посылается на образец, излучение на  $4100 \text{ \AA}$ , также посылаемое в это же время на образец, испытывает резкое увеличение (поглощение уменьшается), которое спадает за  $\sim 5$  мс. Этот эффект легко объяснить. Импульс света на  $5600 \text{ \AA}$ , который возбуждает ионы с основного уровня в полосу  $4F_2$  уменьшает число ионов на основном уровне, которые можно возбудить светом на  $4100 \text{ \AA}$  в полосу  $4F_1$ . Тем самым уменьшается поглощение фиолетового света. Только после  $\sim 5$  мс, когда ионы возбужденные в полосу  $4F_2$ , пройдя уровень  $2\bar{E}$ , возвратятся на основной уровень, поглощение фиолетового света возвратится к первоначальному состоянию. Этот и другие эксперименты позволили Мейману рассчитать, что изменение населенности основного уровня в 3% вполне осуществимо.

Воодушевленный этим результатом, он модифицировал условия эксперимента, чтобы возбудить максимально возможное число ионов хрома с основного уровня 1 на уровень 2. Для этого он использовал рубин в виде цилиндра, окруженного спиральной импульсной лампой (лампой-вспышкой). Чтобы собрать побольше света на образец рубина, он поместил все в цилиндр с посеребренными внутренними стенками. Таким образом, около 98% света лампы отражалось от них на образец. После внимательного изучения каталога ламп-вспышек, выпускаемых для профессиональных фотографов фирмой Джeneral Электрик, он установил, что три из них, FT 503, FT 506, FT 634, в принципе годятся. Чтобы получить резонатор, он отполировал оба основания цилиндра рубина и сделал их грани параллельными. На них испарением в вакууме наносились слои серебра (получался эталон Фабри-Перо). Один из слоев имел максимальный коэффициент

отражения, а другой имел некоторое малое пропускание для вывода излучения из резонатора. Цилиндр рубина имел длину около 2 см и диаметр несколько меньший 1 см, и полностью окружался спиралью импульсной лампы (рис. 51). Мейман выбрал самую маленькую лампу, FT 506. Через лампу разряжалась батарея конденсаторов, заряженная до нескольких киловольт. Напряжением на батарее определялась интенсивность излучения лампы. Когда энергия разряда была не слишком высока, через не полностью отражающую грань рубина проходил красный свет люминесценции, который можно было наблюдать глазом на экране. С помощью подходящего приемника (фотоэлемент или фотоумножитель) можно было также проследить изменение интенсивности этого света во времени, убеждаясь, что она затухает за характерное время  $\sim 5$  мс, типичное для люминесценции. Однако когда энергия разряда достигала определенного значения, внезапно на экране наблюдалось интенсивное красное пятно диаметром около 1 см.

Этот результат был получен в мае 1960 г. Сигнал лазера был не очень сильным, поскольку образец рубина выбирался из тех, что использовались в мазерах, и был довольно плохого оптического качества. Мейман заказал специальные рубины и немедленно подготовил сообщение о своих впечатляющих результатах, которое он отправил 24 июня в *Physical Review Letters*. Однако редактор журнала не принял статью для публикации, считая, что физика мазеров уже достигла значительного уровня и новые результаты в этой области не заслуживают быстрой публикации. Нет необходимости говорить, что он ничего не понял по существу дела. Однако не будем забывать, что в то время соответствующее устройство обозначалось как оптический мазер, а также то, что люди были склонны верить Шавлову, что R-линии рубина не годятся для лазера. Поэтому можно оправдать скептицизм редактора в отношении достоверности результатов. Во всяком случае, Мейман сделал известным свое изобретение через сообщение в *New York Times* 7 июля 1960 г., а статья, отвергнутая *Physical Review Letters*, через короткое время появилась в британском журнале. В выпуске от 6 августа в *Nature* был описан этот выдающийся эксперимент.

Когда люди, отвечающие за рекламу в Hughes, решили сделать фотографию первого лазера и его создателя Меймана, они использовали самую большую спиральную лампу-вспышку FT503, поскольку фотография Меймана на ее фоне была более фотогенична. Широкое распространение этой фотографии создало представление, что именно такая лампа используется в рубиновом лазере. Это способствовало продаже этой лампы, так как желающие воспроизвести результаты Меймана использовали эту лампу.

Когда Мейман работал над своим проектом, в фирме не было особого энтузиазма. В больших компаниях часто имеется огромное сопротивление к чему-то новому и необычному. Многие люди были настроены скептически и не верили, что оптические мазеры будут созданы. Более того, они видели, что многие занимаются этой проблемой без какого-либо успеха. И наконец, даже если лазер удастся построить, на что он будет нужен? Если этого недостаточно, отметим, что Шавлов сказал, что рубин не годится, а Мейман как раз использовал именно этот материал. Люди фирмы заботились о деньгах. Стоит ли компании финансировать такую работу? Мейман не работал по контракту, но использовал общие фонды на исследования. Во всяком случае к концу девяти месяцев было потрачено 50 000 долларов.

Однако Мейман не опустил руки и был намерен продолжать. Через какое-то время, он 14 ноября 1967 г. получил патент на свой лазер. Сразу же после создания лазера, он оставил Hughes и в 1962 г.

основал собственную компанию, Korad Corporation, которая стала лидером рынка, выпуская рубиновые лазеры высокой мощности. В последующие годы Мейман занимался коммерческой деятельностью. В 1984 г. его ввели в Зал славы Национальных изобретателей.

На следующий день, после того, как Мейман объявил, что рубин успешен, многие продолжали сомневаться в этом. В августе группа, включающая Шавлова, воспроизвела в Bell Labs лазер Меймана и показала, что он эффективно работает. Свои результаты они опубликовали в октябрьском выпуске Physical Review Letters. Многие, из тех кто не видел английских работ Меймана, считали, что первый лазер был создан в научном центре Bell Labs. Это заблуждение поддерживалось тем, что предложение лазера было сделано в том же Bell Labs Шавловым и Таунсом, которые, как было известно, работают над практической реализацией своей идеи. Hughes в Калифорнии была полностью в стороне от этих исследований и от принципиальной команды на Восточном Побережье.

Работу лазера легко понять. Когда возбуждение импульсной лампой достаточно сильное, населенность состояния  $2E$  становится больше, чем населенность основного состояния. В этой ситуации, некоторые из спонтанно испущенных фотонов люминесценции, которые распространяются параллельно оси системы и которые отражаются обратно и вперед на зеркалах концов рубина, многократно проходят через усиливающую среду, стимулируя излучение возбужденных ионов, производя, тем самым, вынужденное излучение. Таким образом, лазерное действие инициируется спонтанным излучением и протекает за счет усиления только того излучения, которое из-за селективных свойств резонатора, распространяется назад и вперед вдоль оси стержня. Фотоны, распространяющиеся не вдоль оси, а по другим направлениям, теряются после нескольких отражений.

В принципе лазерное действие можно получить на R1 или R2 линиях, но обычно оно получается на R1, линии. Лазер характеризуется некоторыми особенными свойствами, присущими источнику этого типа: когерентностью, т.е. способностью производить интерференционные явления; направленностью пучка испусканием очень узкой полосы частот с очень большой мощностью.

Расходимость пучка, т.е. угол, под которым он расходится, был около  $5^\circ$ , на расстоянии 10 м пятно излучения было меньше 9 см в диаметре. Более того, пучок был пространственно когерентным, что было немедленно продемонстрировано путем наблюдения способности производить интерференционные полосы. Испускаемая мощность была около 10 кВт, это означало, что поток, испускаемый в частотном интервале (спектральная мощность), почти в миллион раз превосходил тот, что соответствует солнечному свету на поверхности земли для того же спектрального интервала.

При исследовании временных характеристик лазерного излучения с помощью фотоэлектрического приемника и осциллографа оказалось, что излучение состоит из ряда тесно расположенных импульсов («пиков»), каждый длительностью порядка микросекунды (рис. 52). Эта особенность была названа пиковым режимом, а лазер обозначался как работающий в режиме свободной генерации. Вскоре была использована специальная техника, называемая Q-switching, или модуляция добротности. Этот метод заставляет лазер излучать лишь один импульс с существенно меньшей длительностью и соответственно с существенно большей (в сотни раз) пиковой мощностью.

Получались импульсы света с пиковыми мощностями в сотни и даже тысячи мегаватт. Такие импульсы стали называть гигантскими.

Появление лазера произвело в научном мире эффект разорвавшейся бомбы, вызвав разработку

целого ряда систем лазеров, в реальность которых никто не верил несколькими месяцами ранее. Практически, любая субстанция, включая воздух, могла быть использована для создания лазера. Мы рассмотрим лишь несколько случаев и начнем рассмотрение с примеров твердотельных лазеров, а затем опишем реализацию первого газового лазера, гелий-неонового лазера, который даже сегодня является одним из наиболее широко используемых лазеров с прекрасными характеристиками. Мы также рассмотрим цезиевый лазер, неодимовый лазер, а также лазеры, основанные на растворах органических красителей. Эти лазеры можно перестраивать в очень широком диапазоне частот, и они являются некоторыми из наиболее универсальных лазеров. Наконец, полупроводниковые лазеры, имеющие фундаментальное значение для современных систем коммуникации, основанных на применении оптических волокон. Для этого применения полупроводниковый лазер является идеальным источником.

Второй твердотельный лазер

В сентябре 1959 г. Таунс организовал конференцию «Квантовая электроника — резонансные явления», на которой, хотя лазер еще не был создан, большинство неформальных дискуссий концентрировалось на лазерах.

В этой конференции приняли участие Петер Сорокин и Мирек Стевенсон из Исследовательского Центра им. Томаса Ватсона фирмы IBM. Они стали энтузиастами концепции лазера. Этот Центр был организован в 1956 г. и предоставлял комфортные условия в прекрасном месте вблизи Нью-Йорка. Директор физического отдела Центра Вильям Смит, предложил после прочтения статьи Шавлова и Таунса, чтобы его группа, занимающаяся микроволновой спектроскопией и в которой работали Сорокин и Стевенсон, переключила свои усилия на лазеры.

Петер П. Сорокин был сыном Питирима Сорокина [10], профессора социологии Гарвардского университета. П.П. Сорокин учился в том же университете на физическом факультете. В 1958 г. он под руководством Бломбергера защитил диссертацию по ядерному магнитному резонансу. Молодой человек планировал работать в области теоретической физики твердого тела. На второй год аспирантуры он и его друг получили от Бломбергера тему по ядерному магнитному резонансу. Они сочли ее легкой. В то время Бломбергер был не очень опытным руководителем и оба приятеля делали, что хотели. Но к концу срока профессор пожелал иметь от каждого аспиранта статью с результатами, которые он счел неудовлетворительными. Бломбергер так прокомментировал их: «Эти статьи ничего не говорят о том, чему я вас учил». В результате Сорокин потратил часть лета, чтобы понять ядерный магнитный резонанс и написал новую статью, которую Бломбергер, на этот раз, принял. Он решил, что затратил много времени на тему и теперь может непосредственно приступить к диссертации. Сначала Бломбергер предложил ему теоретическую проблему, и Сорокин в течение года сидел за столом с пачкой бумаг. Наконец, он пришел к профессору и сказал: «Вычеркнуто всё, что я перепробовал, оставшееся очень трудно продвинуть». Бломбергер посмотрел на него и сказал: «Хорошо, Петер, я думаю тебе лучше заняться экспериментом». Итак, Сорокин получил задание сделать измерения ядерного магнитного резонанса на атомах цезия. Однако оказалось, что времена релаксации велики, и это затрудняло эксперимент. Наконец, он построил систему скрещенных катушек, аналогичную той, что использовалась группой Блоха в Стенфорде, и успешно закончил диссертацию.

Смит верил, что лазеры принесут доходы IBM и будут способствовать репутации его новой

лаборатории. После получения степени, Сорокин поступил в ИВМ для работы по микроволновому резонансу в твердых телах. Когда появилась работа Шавлова и Таунса, его руководитель предложил изучить возможность построить лазер. Вместе с Миреком Стевенсоном, который получил докторскую степень под руководством Таунса несколькими годами ранее, он решил сосредоточиться на этой проблеме. После Конференции сентября 1959 г. они устремились в работу. Они захотели построить лазер, работающий непрерывно, используя лампы с мощностью порядка нескольких ватт. Сорокин полагал, что главная проблема — накачка. Для увеличения эффективности нужно существенно уменьшать потери. Поэтому он решил исключить зеркала в резонаторе Фабри—Перо, заменив их двумя призмами полного внутреннего отражения.

Явление полного отражения имеет место, когда свет проходит под определенным углом из среды с большим показателем преломления во вторую среду с меньшим показателем преломления, например из стекла в воздух. Если угол светового пучка в стекле по отношению к нормали к поверхности стекло—воздух больше определенного значения (для стекла с  $n = 1,5$  этот угол около  $57^\circ$ ), то свет полностью отражается и не проходит в воздух. В этом случае исключаются потери при отражении. Глава физического отдела Центра В. Смит предложил выбрать кристалл с показателем преломления как раз таким, чтобы можно было, используя призмы, селективировать моды резонатора. Следуя этим соображениям, Сорокин выбрал кристалл флюорида кальция.

Теперь проблема была найти материал для лазерной среды. После изучения научных публикаций по этому предмету Сорокин обнаружил, что русский ученый П. П. Феофилов изучил испускание света ионами урана и самария в кристаллах флюорида кальция. Добавление урана дает люминесцентное излучение на длине волны около 2,5 мкм. Ионы урана или самария замещают ионы кальция в кристалле флюорида кальция и имеют энергетические уровни, подобные тем, что имеют ионы хрома в рубине, с одним отличием, показанном на рис. 53. Имеется один добавочный уровень, поэтому испускание света может происходить между уровнем, который заселяется из-за распада с одной из полос, на промежуточный уровень, который, если работают при низкой температуре, практически не заселен, так как тепловое возбуждение не способно заселить его из основного состояния. Это обстоятельство, которое мы можем описать, как четырехуровневая система, позволяет значительно легче получать инверсную населенность. Кроме того, флюорид кальция, допированный ураном, имеет сильную полосу поглощения в видимой области. Это значит, что ее можно накачивать ксеноновой лампой высокого давления. Разумеется, система нуждается в охлаждении до низких температур.

Рис. 53. Энергетические уровни трижды ионизованного атома урана в кристалле флюорита кальция ( $\text{CaF}_2:\text{U}^{3+}$ ). При накачке происходит переход с основного уровня (1) в полосу (2). (Поглощением света на уровне 4115 можно пренебречь). Электроны скатываются с полосы (2) на уровни (3), и лазерный переход получается на длине волны около 2,5 мкм между уровнями (3) и (4)

Оба исследователя заказали кристаллы, допированные ураном и самарием. Когда они их получили, то услышали об успехе Меймана с рубином. Они немедленно отказались от идеи использовать полное внутреннее отражение, обработали кристаллы в виде цилиндров с отполированными и посеребренными торцами, и приобрели нужные импульсные лампы. В начале ноября они получили лазерный эффект на кристалле, допированном ураном, а вскоре, и на кристалле, допированном самарием.

После этих успехов они написали статью для *Physical Review Letters*, Стевенсон, будучи прямолинейным и агрессивным, сказал: «Нам не следует посылать статью. Мы должны отправиться в Брукхейвен и сказать Сэму Гоудсмиту (редактору), что мы хотим решения, прежде чем уедем. Сорокин сказал: «Мирек, давай не будем так делать». «Нет, мы именно так сделаем». Итак, они отправились к Гоудсмиту. Он был слегка смущен различием мазеров и лазеров, но сказал, что не хочет еще одной «мазерной» работы, что он и сделал со статьей Меймана. Но Стевенсон настаивал так упорно, что он в конце концов согласился принять статью для публикации.

На прощание Гоудсмит сказал: «Скажите вашим людям в IBM, чтобы они не являлись сюда с автоматами».

Из-за работы по четырехуровневой схеме вместо трехуровневой для рубина, лазер работал с мощностью накачки, которая была в десять раз меньшая, чем требовалась для рубина. Уран имеет сильную полосу поглощения в зелено-синей области. Лазерная генерация получается на длине волны 2,49 мкм, в инфракрасной области. Устройство лазера было подобно устройству лазера на рубине, за исключением некоторого усложнения, обусловленного тем, что кристалл следовало помещать в дьюар для охлаждения до гелиевых температур.

Некоторое время спустя Сорокин со своим техником Джоном Ланкардом построил лазер другого типа на жидкости. Он стал первым в серии лазеров, речь о которых будет далее. В них используются растворы органических красителей. Эти лазеры успешно разрабатывались во многих лабораториях и используются до сих пор.

#### Гелий-неоновый лазер

Кроме Шавлова, еще два исследователя Bell Labs работали в 1958 г. над проблемой лазера: Али Джаван и Джон Сандерс. Джаван был иранцем по происхождению. Он получил докторскую степень в 1954 г. под руководством Таунса по теме радиоспектроскопии. Он четыре года оставался в группе Таунса, работая в области радиоспектроскопии и мазеров. После защиты диссертации, когда Таунс был в творческом отпуске в Париже и в Токио, Джаван стал более активно заниматься мазерами и пришел к идее трехуровневого мазера, прежде чем группа из Bell Labs опубликовала экспериментальную работу по этой теме. Он нашел метод получения усиления безынерционной населенности, используя, в частности, эффект Рамана в трехуровневой системе, однако он опубликовал свои результаты позже, чем группа из Bell.

В апреле 1958 г., когда он искал место в Bell Labs, общался с Шавловым, который рассказал ему о лазерах. В августе 1958 г. он был принят в Bell Labs, и в октябре начал систематические исследования по лазерам. Первоначально он имел там этические затруднения. Компания RCA предварительно изучила его записи о трехуровневом мазере и установила, что его даты предшествуют датам группы из Bell. RCA заплатила ему \$1000 за право на патент, и начала спор с Bell, где Джаван уже работал. В течение примерно шести месяцев Джаван имел дело с юристами из RCA и Bell Labs. К счастью, RCA провела маркетинговое исследование и, убедившись, что этот мазерный усилитель не сулит прибыли, прекратила дело, оставив патент Bell Labs.

Итак, Джаван мог всецело посвятить себя лазеру. Он думал построить его, используя газы, и опубликовал предполагаемую конструкцию в *Physical Review Letters* в 1959 г. Он решил использовать газ в качестве активной среды, поскольку полагал, что это простое вещество облегчит исследования. Однако он думал, что невозможно использовать мощные лампы для накачки атомов

прямо в возбужденное состояние, и рассматривал возбуждение либо прямыми столкновениями с электронами в среде чистого неона, либо путем столкновений второго рода. В последнем случае разрядная трубка наполняется двумя газами, которые выбираются так, что атомы первого газа, возбуждаемые столкновениями с электронами в электрическом разряде, могут передавать свою энергию атомам второго газа, возбуждая их. Некоторые смеси газов имели структуру энергетических уровней, которая удовлетворяла этим условиям. Фактически, необходимо, чтобы энергетический уровень второго газа имел энергию, практически равную энергии возбуждения первого газа. Из возможных комбинаций газов Джаван выбрал комбинацию гелия и неона, уровни которых показаны на рис. 54. Он считал, что любой физический процесс стремится к установлению больцмановского распределения энергии по уровням (т.е. населенность нижнего уровня больше, чем населенность верхнего). Поэтому среда с инверсной населенностью может получиться в стационарном процессе только в результате конкуренции различных физических процессов, протекающих с разной скоростью.

Это можно лучше понять на примере с рассмотрением дерева с ветками (две на рис. 55), на которых сидят обезьяны. Рассмотрим сперва населенность согласно больцмановской статистике, т.е., скажем, четыре обезьяны сидят на верхней ветке (1), пять на нижней (2) и шесть на земле (3, основной уровень). Из этих трех уровней основной наиболее населен, и чем выше уровень, тем менее он заселен. Однако обезьяны не сидят на месте, но прыгают по веткам (для примера мы можем полагать, что это происходит каждую минуту). Населенности на уровнях при этом остаются одними и теми же во времени (равновесная ситуация). Предположим теперь, что мы продолжаем заселять ветки с той же скоростью (одна обезьяна за минуту), но в то же время мы смачиваем ветку 2 и делаем ее скользкой. Теперь обезьяны не могут оставаться на ней более, например, 10 секунд. Поэтому эта ветка быстро расселяется, и вскоре на ветке 1 оказывается больше обезьян, чем на ветке 2. Таким образом, получается инверсная населенность из-за того, что время пребывания обезьяны на разных ветках различно. Хотя это очень примитивные рассуждения, но они помогают понять соображения Джавана.

Выбор гелий-неоновой смеси проходил через тщательный отбор, чтобы получить систему, обещающую оптимальную среду, и лишь последующий успех принес а posteriori полное доверие Джавану. Даже после того, как он убедился, что гелий-неон является лучшей смесью, находилось немало скептиков, которые говорили ему, что газовый разряд слишком хаотичен. Они говорили, что слишком много неопределенностей, и его попытки напоминают охоту на диких гусей.

Джаван потратил много денег, но, к счастью, система заработала, иначе администрация уже готова была закрыть проект и прекратить эксперименты. К концу проекта на это исследование были затрачены два миллиона долларов. Хотя эта сумма, по-видимому, преувеличена, проект, несомненно, требовал значительных затрат.

Между тем, Джон Сандерс, физик экспериментатор из Оксфордского университета, был приглашен в Bell Labs, чтобы он попытался реализовать инфракрасный лазер. В течение менее одного года, выделенного на это исследование, Сандерс не тратил времени на теоретическое изучение, а сразу решил возбуждать чистый гелий в разрядной трубке с резонатором Фабри—Перо внутри ее. Он пытался получить лазерный эффект путем проб и ошибок, варьируя параметры разряда.

Максимальное расстояние, на котором можно было установить зеркала, все еще остающимися

параллельными друг другу, было 15 см. Сандерс не использовал разрядные трубки большей длины. Джаван считал это принципиальным ограничением. Он предполагал, что усиление в газе очень мало и резонатор Сандерса не заработает. Трубка, которую использовал Джаван, была намного длиннее, и поскольку крайне трудно было настроить зеркала Фабри—Перо на таком расстоянии, он решил сперва определить требуемые значения параметров для работающего устройства, а затем уж постараться настроить зеркала методом проб и ошибок. Так он работал. Без всей предварительной работы по выбору режима He-Ne для получения известного усиления, было невозможно добиться успеха.

Сандерс послал письмо в *Physical Review Letters*, в котором сообщал, что было трудно получить достаточное число возбужденных атомов с помощью импульсной лампы, и предлагал использовать возбуждение, производимое ударами электронов. Такое возбуждение легко осуществить при электрическом разряде в газе или в парах. Инверсия населенности могла быть получена, если в активном материале существуют возбужденные состояния с большими временами жизни, а также состояния с более низкими энергиями и с короткими временами жизни (как мы рассматривали в примере с обезьянами).

Сразу же после этой статьи, в том же выпуске *Physical Review Letters*, А. Джаван опубликовал свою статью, в которой также рассматривал эти проблемы, и среди других схем предложил одну очень оригинальную. Рассмотрим долго живущее состояние в газе. В условиях разряда это состояние можно заселить подходящим образом из-за его большого времени жизни. Если теперь возбужденное состояние второго газа имеет энергию очень близкую к этому долго живущему состоянию, то очень вероятно, что при столкновении энергия будет передана от первого атома ко второму, который станет возбужденным. Если этот атом имеет другие состояния с более низкими энергиями, то они останутся невозбужденными и, тем самым может получиться инверсная населенность между состоянием с высокой энергией по отношению к состоянию с более низкой энергией. В своей работе Джаван упомянул о смесях криптона и ртути, а также о смеси гелия с неоном. Эта работа была опубликована в *Physical Review Letters* 3 июня 1959 г.

Джаван работал в тесном контакте с Вильямом Р. Беннеттом мл., спектроскопистом из Йельского университета, и который был другом Джавана в Колумбии. Они работали до самой ночи целый год. Осенью 1959 г. Джаван попросил Дональда Р. Херриота, специалиста по оптической аппаратуре в Bell Labs, участвовать в работе над проектом. Одной из принципиальных проблем, было снабдить разрядную трубку двумя прозрачными окнами очень высокого оптического качества, чтобы не искажать выходной пучок. Также требовалось установить зеркала резонатора. Была разработана схема (рис. 56) с зеркалами внутри разрядной трубки, снабженная специальными устройствами с микрометрическими винтами, которые обеспечивали возможность тонкой настройки зеркал по углам. В сентябре 1959 г. Беннетт перешел из Йеля в Bell Labs и вместе с Джаваном начал программу интенсивных и тщательных исследований с расчетами и измерениями спектроскопических свойств гелий-неон смесей при различных условиях, с целью определить факторы, определяющие получение инверсии. Они установили, что при наилучших условиях можно получить лишь очень малое усиление, порядка 1,5%. Такое малое усиление делало совершенно необходимым минимизировать потери и использовать зеркала с наибольшим возможным коэффициентом отражения. Такие зеркала получают путем нанесения на прозрачную поверхность (стекло) многих слоев подходящих

(прозрачных) диэлектрических материалов с разными коэффициентами преломления. Высокий коэффициент отражения получается за счет многолучевой интерференции при отражениях на границах между слоями. Три исследователя сумели использовать такие зеркала, которые на длине волны 1,15 мкм имели коэффициент отражения 98,9%.

В 1960 г. Джаван, Беннетт и Хериотт наконец испытали свой лазер. Сначала они пытались осуществить электрический разряд в кварцевой трубке, содержащей газовую смесь, с помощью мощного магнетрона, но трубка плавилась. Пришлось переделать аппаратуру и внести изменения. 12 декабря 1960 г. они стали работать с новой трубкой и организацией разряда. Они пытались настроить зеркала, чтобы получить лазерную генерацию, но безуспешно. Затем, в полдень, Хериотт увидел сигнал: «Я, как обычно, поворачивал микрометрические винты одного из зеркал, когда, внезапно, появился сигнал на осциллографе. Мы настроили монохроматор и зарегистрировали пик сигнала на длине волны 1,153 мкм, т.е. на ожидаемой длине волны». Родился первый лазер, использующий газ в качестве активной среды, и работающий в непрерывном режиме! Его излучение было в ближнем ИК-диапазоне и поэтому невидимое глазом. Для регистрации требовался подходящий приемник, связанный с осциллографом.

А шестью месяцами ранее, техник Эд Баллик, помогавший в работе, позднее получивший степень в Оксфордском Университете и преподававший в Канаде, купил бутылку вина столетней давности. Она предназначалась для торжественного момента — по случаю работы лазера. Когда, наконец, эксперименты по созданию лазера привели к успеху, через несколько дней Джаван позвонил главе Bell Labs и пригласил его обмыть событие столетним вином. Тот страшно обрадовался, но потом воскликнул: «Черт, Али. У нас проблема!». Это произошло с утра, Джаван, так и не поняв в чем проблема. Но в полдень по лаборатории был распространен циркуляр, уточняющий предыдущий, выпущенный несколькими месяцами ранее, и запрещающий распитие алкоголя на территории научного центра. Уточнение запрещало распивать любой алкоголь, возраст которого не достиг 100 лет. После этого они подняли бокалы за успех, не нарушив правила!

Первый лазер работал на переходе с длиной волны 1,15 мкм, ближнем ИК-диапазоне. Джаван использовал зеркала, которые имели максимальное отражение на этой длине волны, которая соответствует одному из возможных переходов неона. Он знал, что были и другие возможные длины волн. Он выбрал эту длину волны, поскольку его исследования показали, что на ней можно ожидать наибольшее усиление. Чтобы использовать переходы в видимой области, требовалась трубка с таким малым диаметром, что невозможно было настроить плоские зеркала, которые в то время использовались для резонатора Фабри—Перо.

В лазере Джавана разрядная трубка содержала неон и гелий при давлении 0,1 и 1 торр соответственно (1 торр — почти тысячная часть давления в одну атмосферу). Трубка из плавленого кварца имела длину 80 см и диаметр 1,5 см. На каждом конце была металлическая полость, в которых располагались плоские зеркала с высоким отражением. Использовались гибкие рукава (сильфоны), позволяющие микрометрическими винтами настраивать (путем прецизионных наклонов) зеркала Фабри—Перо. Это позволяло обеспечить параллельность с точностью до 6 угловых секунд. На концах располагались плоские стеклянные окна с поверхностями, отполированными с точностью, лучшей 100 А. Они позволяли выпускать пучок излучения без искажений. Электрический разряд возбуждался с помощью внешних электродов, используя

генератор на 28 МГц с мощностью 50 Вт. Зеркала с высоким отражением получались напылением 13 слоев диэлектрических материалов ( $MgF_2$ ,  $ZnS$ ). В области между 1,1 и 1,2 мкм коэффициент отражения был 98,9%. Лазер работал в непрерывном режиме и был первым лазером этого типа. Следуя примеру Hughes, исследовательский центр Bell Labs также устроил публичную демонстрацию гелий-неонового лазера 14 декабря 1960 г. Чтобы продемонстрировать возможную важность для коммуникаций, была организована передача телефонного разговора, используя пучок лазерного излучения, который модулировался телефонным сигналом.

Этот лазер стали называть He-Ne-лазером, используя химические символы его компонент для названия. Он был представлен прессе 31 января 1961 г. Работа, описывающая его, была опубликована 30 декабря 1960 г. в *Physical Review Letters*.

В то время, когда Джаван проводил эксперименты весной 1960 г., два исследователя Bell Labs, А. Фокс и Т. Ли, стали изучать вопрос, какие моды существуют в резонаторе Фабри—Перо. Дело в том, что резонатор Фабри—Перо сильно отличается от микроволновых резонаторов в виде замкнутых полостей. Они определили вид этих мод, и их результат побудил других исследователей Bell Labs, Гэри Д. Бонда, Джеймса Гордона и Хервига Когельника, найти аналитические решения в случае зеркал сферической формы. Важность изучения оптических резонаторов для развития газовых лазеров нельзя недооценивать. До того как были получены эти результаты, газовый лазер был, в лучшем случае, маргинальным устройством, генерация которого в сильнейшей степени зависела от юстировки концевых зеркал. Теоретические исследования резонаторов со сферическими зеркалами показали, что могут быть конфигурации, относительно слабо зависящие от юстировки зеркал, а внутренние потери в резонаторе могут быть меньшими, чем в резонаторе с плоскими зеркалами. Это позволяет использовать активные среды со значительно меньшими, чем думали раньше, усилениями. От резонатора с плоскими зеркалами практически отказались, и все открытия новых газовых лазеров делались с помощью резонаторов со сферическими зеркалами.

В 1961 г. в Bell Labs началась большая программа лазерных исследований. Исследователей, занятых другими проблемами, переориентировали на новую тематику, были приняты новые сотрудники. Решение использовать в резонаторе два одинаковых сферических зеркала, расположенных в положении их фокусов (такая конфигурация называется конфокальным резонатором), показало, каких трудностей мог бы избежать Джаван, если бы использовал такой резонатор. В результате, Вильям В. Ригрод, Хервиг Когельник, Дональд Р. Хериотт и Д. Дж. Брангачио построили весной 1962 г. первый конфокальный резонатор со сферическими зеркалами, которые концентрируют свет к оси разрядной трубки, причем эти зеркала помещались вне трубки. Это позволило получить генерацию на красной линии 6328 Å. Часть света неизбежно теряется при отражениях от поверхностей окон (френелевское отражение). Этих потерь, однако, можно избежать, если наклонить окна под определенным углом, называемым углом Брюстера. В этом случае для света определенной поляризации потери практически равны нулю. Такая новая конфигурация лазера показана на рис. 57. Рис. 57. Конфокальный оптический резонатор. Трубка, в которой газ возбуждается электрическим разрядом, закрыта окошками, наклоненными под углом Брюстера. Вогнутые зеркала с равными радиусами кривизны располагаются за трубкой так, чтобы расстояние между ними было равно радиусу кривизны

Красный He-Ne-лазер стал широко применяться, и до сих пор находит применение, в частности, в

медицине. Кроме того, он сильно способствует пониманию принципиальных различий между лазерным (высококогерентным) и обычным (некогерентным) светом. С помощью этого лазера легко наблюдаются явления интерференции, а также модовая структура лазерного пучка, которая легко и наглядно изменяется небольшим наклоном зеркала резонатора. Также стимулировалась разработка других, многочисленных типов лазеров.

Современный He-Ne-лазер может генерировать на одном из нескольких переходах, показанных на рис. 54. Для этого многослойные зеркала изготавливаются с максимальным отражением на нужной длине волны. Генерация получается на длинах волн 3,39 мкм, 1,153 мкм, 6328 Å° и даже при использовании особых зеркал, на длинах волн 5433 Å (зеленая линия), 5941 Å° (желтая линия), 6120 Å° (оранжевая линия).

### Цезиевый лазер

1961 г. был годом реализации еще двух лазеров, над которыми специалисты работали с самого начала появления концепции лазера. Одним из них был цезиевый лазер. После того как Таунс и Шавлов написали свою работу, было решено, что Таунс попытается построить лазер на парах калия. Выбор был обусловлен тем, что расчеты показывали возможность работы, а также тем, что пары калия являются простым одноатомным газом с хорошо известными свойствами. Таунс хотел работать с системой, свойства которой можно было проанализировать в деталях. Позднее он говорил: «Мой стиль физики заключается в том, чтобы обдумать проблему теоретически, проанализировать ее, а затем поставить эксперимент, который должен работать. Если он не получается, вы должны заставить его заработать. Вы анализируете и усиливаете теоретические условия в лаборатории, до тех пор, пока вы не добьетесь проблему». Его предварительные расчеты показывали, что калиевый лазер будет иметь высокомонохроматическое излучение, что было бы весьма полезно для специальных применений. Но были и недостатки: малый коэффициент полезного действия (около 0.1%) и выходная мощность в доли милливатта.

В то время как Таунс сконцентрировался на парах калия, Шавлов в Bell Labs, изучая рубин, пришел к заключению, что его линии, которые позднее Мейман использовал для создания первого лазера, не годятся. Таунс запросил и получил финансирование от Военно-воздушного ведомства. Это позволило ему привлечь к проекту двух аспирантов: Г. Камминса и И. Абелла.

Однако в работе возник ряд проблем. Пары калия вызывали потемнение стекла разрядной трубки и действовали химически на вакуумную аппаратуру. В конце 1959 г. Таунс попросил О. Хивенса, британского специалиста по диэлектрическим зеркалам, приехать и помочь, а также решил использовать пары цезия вместо калия, накачивая их гелиевой лампой.

Одна из узких линий поглощения атома цезия имеет в точности такую же энергию, как одна из узких линий гелия. Поэтому можно использовать свет гелиевой лампы, испускаемой на этой длине волны (389 нм), для селективной накачки уровня цезия и заселить его больше, чем нижние уровни. Таким образом, можно получить инверсную населенность (рис. 58). После сообщения Меймана Таунс перевел Абелла на работу с рубином, а Камминс продолжал работу с цезием. Цезиевый лазер был запущен в TRG между концом 1961 г. и первыми месяцами 1962 г. Полем Рабиновичем, Стефеном Джакобсом и Голдом. Он испускал излучение на 3,20 и 7,18 мкм. Это был один из лазеров, запущенных благодаря конфокальным зеркалам. Исследователи из TRG также начали с калия, но после одного из семинаров, на котором Хивенс сказал, что цезий лучше, также перешли на этот

материал и оказались первыми, стремясь показать, что миллион долларов, выделенный им, потрачен не напрасно. Они в марте 1961 г. добились получения инверсии, и получили генерацию в начале 1962 г.

Этот лазер был скорее любопытен, чем практичен. В настоящее время генерацию на этих длинах волн более легко получают другими методами, к тому же цезиевые пары ядовиты.

#### Неодимовый лазер

Другой лазер, запущенный в 1961 г. и все еще остающимся одним из главных, — лазер на неодимовом стекле. В 1959—1960 гг. Американская Оптическая Компания также заинтересовалась лазерными исследованиями, которые проводил один из ее ученых, Элиас Снитцер. Эта компания первоначально концентрировалась на оптических приборах и офтальмологических изделиях. Она также была сильна в области изготовления стекла и изделий из него. В течение 1950-х гг. компания решила расширить производство и, поэтому запустила исследовательские проекты в новых областях, таких как военная электрооптика и волоконная оптика. Элиас Снитцер был принят в начале 1959 г. в исследовательскую группу и начал свои работы по распространению электромагнитных волн в оптических волокнах. Для компании эта работа принесла патенты в области волоконной оптики и укрепила ее имидж в этой области в научном мире. Снитцер уловил связи между исследованиями оптических волокон и лазерными работами. Поскольку стеклянное волокно может поддерживать моды электромагнитного излучения, то его можно превратить в лазерный резонатор, если на его концах разместить зеркала. Это предположение было интересно, поскольку в научной среде были сомнения, будет ли работать резонатор Фабри—Перо. Стекло само по себе может стать лазерным материалом, если его допировать подходящим веществом, таким как самарий или иттербий, и накачивать требуемые уровни с помощью некогерентного света, посылаемого либо через поверхность, либо через торец волокна. Снитцер полагал, что он может даже сконцентрировать больше света накачки в волокне, если покроет его тонким слоем стекла с несколько отличающимся показателем преломления.

В начале 1960 г. Снитцер с двумя сотрудниками начал исследования серии стеклянных волокон, допированных ионами, имеющими линии люминесценции в видимой области. Стекло было необычным выбором. Все исследованные материалы были либо газами, либо кристаллами. После успеха Меймана Снитцер попробовал волокна рубина. До этого он использовал ртутные лампы большого давления, непрерывно испускающие свет. Теперь он приобрел лампы-вспышки. Группа исследовала 200 волокон. В конце 1960 г. оба помощника Снитцера были переведены на закрытый проект ВВС, имеющий цель создать лазерный излучатель с солнечной накачкой. Снитцер остался один и решил перейти от видимого диапазона к инфракрасному. Это решение означало замену допированных материалов. В инфракрасной области можно было использовать редкие земли: неодим, празеодим, гольмий, эрбий и тулий. Снитцер также решил оставить волокна и сосредоточиться на простом стержне допированного стекла. В октябре 1961 г. он получил лазерную генерацию на стержне стекла, допированного неодимом.

Ионы неодима, когда они введены в кристаллы или в аморфный материал, подобный стеклу, имеют узкие спектры. Использование стекла в качестве лазерного материала дает ряд преимуществ. Методы приготовления оптических стекол хорошо освоены, и изготовление стеклянного образца значительно проще выращивания кристалла. Кроме того, оптическое качество стекла несравненно лучше, чем у

кристаллов, и можно изготавливать стеклянные образцы значительно больших размеров. Более того, стекла, допированные ионами редких земель (окрашенные стекла), уже производились в течение многих лет, в частности для использования в фотографии.

Уровни неодима в стекле показаны на рис. 59. Уровень  $4F3/2$  является люминесцентным, и лазерные переходы получаются между этим уровнем и уровнями  $4I13/2$ ,  $4I11/2$ ,  $4I9/2$  на длинах волн 1,06 1,35 мкм, соответственно. Возбуждение получается путем оптической накачки с основного уровня на уровни, лежащие выше состояния  $4F3/2$ . Имеются три уровня поглощения в инфракрасном диапазоне, уровни, которые поглощают в желтой области около  $5800 \text{ \AA}$ , и другие уровни, поглощающие главным образом в ультрафиолете. На рис. 59 уровни выше, чем уровень  $4F3/2$ , показаны жирными линиями. Из этих уровней возбужденные атомы распадаются за счет безызлучательных переходов на уровень  $4F3/2$ , с которого и начинается лазерное излучение.

Лазеры, использующие неодимовое стекло, важны прежде всего потому, что они являются примером твердотельного материала, отличного от синтетических кристаллов. Также определенные стекла, допированные неодимом, обладают большими выходными энергиями на единицу объема материала. И наконец, стеклянная матрица позволяет иметь лазеры в виде стержней или волокон.

В тот же год лазерная генерация была получена Л. Джонсоном, Г. Бойдом, К. Нассау и Р. Соденом из Bell Labs на кристаллах вольфрамата кальция, допированного неодимом. Их лазер при охлаждении жидким азотом работал в непрерывном режиме. Длина волны генерации была 1,06 мкм.

В декабре 1961 г. ARPA (Advanced Research Projects Agency — агентство, организованное в 1959 г. для поддержки фундаментальных исследований в области перспективных военных технологий) организовало научный комитет, который установил высшие приоритеты исследований лазеров на рубине и стекле. На следующий год Снитцер получил излучение в волокне диаметром 32 мкм. Сегодня на основе волокон, допированных редкими землями, создаются прекрасные лазеры и усилители, с успехом используемые, в волоконно-оптических системах связи.

Трехвалентный ион неодима был введен в большое число матриц. Одна из них решетка кристалла  $Y_3Al_5O_{12}$ , который обычно обозначается как YAG (сокращение для иттрий-алюминиевого граната). Уровни неодима в них, по существу, одни и те же, не зависящие от матрицы. Лазер YAG работает как в импульсном, так и в непрерывном режиме. Этот лазер был сделан в Bell Labs Дж. Гейзеком и Е. Сковилом. Они в 1962 г. написали обзорную статью о мазерах и лазерах, в которой обсуждалась аналогия оптической накачки лазера и термодинамической, тепловой, накачкой. Эта аналогия дала критерий отбора лазерных материалов, который позволил отобрать около 40 кристаллов, среди которых был и YAG. Проблемой с этими материалами было то, что не было достаточно длинных кристаллов. Благодаря сотрудничеству с отделением Union Carbide удалось разработать достаточно длинные кристаллы высокого оптического качества и продемонстрировать преимущества этого лазера, который является альтернативой другим мощным лазерам (рубин и  $CO_2$ ). Этот лазер является примером междисциплинарного сотрудничества, типичного для крупных американских лабораторий, которое позволило за пару лет разработать новый лазер с исключительными характеристиками.

#### Лазеры на органических красителях

Если большинство лазеров, которые мы рассмотрели, появились в результате высокосоординированных усилий и требовали развития передовых технологий (это объясняет,

почему они все появились в США), то случай органических красителей (просто красителей) можно рассматривать как совершенно отличающийся. Первый лазер этого типа появился случайно благодаря лазерной методике, называемой модуляцией добротности, которую предложил в 1961 г. Роберт Хелворт из Hughes Research Lab. Этот метод, как отмечалось выше, позволяет в огромной мере увеличить импульсную мощность лазерного излучения путем генерации «гигантских импульсов». Суть метода заключается в следующем. В период накачки, добротность резонатора искусственно поддерживается на низком уровне и генерация не возникает. Отсутствие генерации позволяет получить большую инверсную населенность (при генерации вынужденное излучение обедняет верхний лазерный уровень). В момент достижения максимального значения инверсной населенности быстро включается максимальная добротность резонатора (резко уменьшаются его потери). Условия генерации оказываются сильно перевыполненными. В результате генерация очень быстро развивается и запасенная в активной среде энергия высвечивается в виде короткого импульса (его длительность составляет несколько времен обхода светом расстояния между зеркалами резонатора). Таким способом можно получить от рубинового лазера одиночный импульс с типичной длительностью 30 нс и мощностью порядка десятков или сотен миллионов ватт (мегаватт). Вначале осуществление этого метода было очень грубым [11]. Внутри резонатора, т.е. между зеркалами, помещался быстро вращающийся диск из непрозрачного материала, в котором была щель, открывающая путь свету (для быстрого открытия щель располагалась в общем фокусе двух линз, которые фокусировали параллельный пучок и снова превращали его в параллельный). Накачка светом импульсной лампы производилась в тот интервал времени, когда диск перекрывал свет между зеркалами. В момент, когда инверсная населенность оказывалась максимальной, щель открывала путь свету, так что получался резонатор с минимальными потерями. Эта система давала слишком медленное включение добротности и была неудобна в обращении. Часто получался не один, а два или три импульса с меньшей мощностью.

Так что специалисты стали думать о других методах. Один из них оказался саморегулирующим. Когда свет падает на поглощающее вещество (например, состоящее из молекул), он поглощается из-за того, что молекулы, которые находятся в нижнем энергетическом состоянии, возбуждаются на верхний уровень. Однако, если интенсивность света очень велика, большинство молекул с нижнего состояния перейдут на верхние, и оставшиеся на нижнем состоянии молекулы будут слабее поглощать свет. Поглощающий материал становится «просветленным», или, как говорят, «насыщенным» (если такой материал поместить внутри резонатора, то он автоматически увеличит его добротность во время генерации).

В IBM Петер Сорокин и Джон Ланкард показали в 1966 г., что такими материалами по отношению к свету рубинового лазера могут быть органические красители, называемые фталоцианинами (фталоцианин ванадия), растворенные в некоторых органических жидкостях (нитробензол). Фталоцианин представляет комплекс кольцевых структур с ионом металла в центре. Они попросили своего коллегу Луцци синтезировать это вещество. Сорокин поместил кювету со слоем раствора фталоцианина прямо в резонатор рубинового лазера и включил его. Немедленно был получен одиночный мощный импульс длительностью около 20 нс.

Пытаясь лучше понять, что происходит, Сорокин подумал, что эти вещества можно использовать и в других экспериментах, и сосредоточился на двух из них. В одном эксперименте он хотел

индуцировать эффект, известный в наше время как рамановское рассеяние, или эффект Рамана (в российской литературе этот эффект называют комбинационным рассеянием). Его открыл в 1928 г. индийский физик Чандрасекар Раман (1888— 1970), который за это открытие получил в 1930 г. Нобелевскую премию по физике. Раман показал, что при определенных условиях некоторая доля света, проходящего через прозрачный материал, переизлучается на несколько отличной частоте. Сорокин хотел в другом эксперименте проверить, не могут ли красители, накачиваемые светом рубинового лазера, сами давать лазерный эффект.

Сорокин решил начать с первого эксперимента, посылая пучок рубинового лазера через образец. Исследовав спектр, испускаемый образцом, он убедился, что успешен второй эксперимент [12]. Поместив образец красителя между двумя зеркалами, Сорокин и Ланкард получили мощный лазерный пучок на длине волны  $7555 \text{ \AA}$ . Они испробовали другие красители и убедились, что это общий эффект. Они перепробовали все красители, какие смогли достать. В один из дней Сорокин проходил через лабораторию, спрашивая коллег: «Какой цвет вы желаете?», так как многие длины волн можно было получать, заменяя краситель. Одно обстоятельство, которое они упустили, заключалось в том, что этот новый лазер мог быть перестраиваемым, т.е. испускать длину волны, варьируемой в значительном диапазоне, используя один и тот же материал.

В этих исследованиях у них были предшественники. В 1961 г. два русских ученых С.Г. Раутиан и И.И. Собельман провели теоретическое рассмотрение [13], а в 1964 г. Д.Л. Штокман с сотрудниками сделали эксперименты, в которых были получены некоторые указания на возможный лазерный эффект в ароматических молекулах перилена с накачкой импульсной лампой.

Немного позднее и независимо Фриц Шэфер, который тогда работал в университете Марбурга (Германия), изучая характеристики насыщения некоторых органических красителей семейства цианинов, получил такой же эффект. Он изучал свет, испускаемый красителем, накачиваемым мощным рубиновым лазером с модуляцией добротности. Его студент Волце, исследуя спектры растворов с высокой концентрацией получил сигналы в тысячи раз сильнее, чем ожидалось. Вскоре оба исследователя поняли, что они имеют дело с лазерным эффектом. Вместе с аспирантом Шмидтом они сняли спектры при разных концентрациях, и впервые показали, что можно построить лазер, перестраиваемый по длинам волн в пределах  $600 \text{ \AA}$ , изменяя концентрацию или отражения зеркал резонатора. Вскоре этот результат был распространен на десяток разных красителей семейства цианинов. Возник целый поток результатов в этой области, и в тысячах красителей был получен лазерный эффект. Наконец, в 1969 г. Б. Снэвли и Шэфер показали возможность непрерывной генерации с использованием накачки аргоновым лазером раствора родамина: 6Ж. Эти лазеры осуществили долго вынашиваемую мечту — получить лазер, легко перестраиваемый в широком диапазоне частот. Лазер, перестраиваемый на требуемую длину волны, наконец-то родился! Красители интересны в качестве рабочих сред лазеров и по другим причинам. Подбором красителя, растворителя, концентрации и толщиной кюветы легко получить лазер, генерирующий на нужной длине волны. Охлаждение активной среды, требуемое в любом лазере, легко достигается прокачкой раствора. Более того, в жидкости не возникают необратимые повреждения, характерные для твердотельных сред.

В середине 1967 г. Б. Соффер и Б. МакФаллан заменили одно из зеркал резонатора отражающей дифракционной решеткой и получили лазер, плавно перестраиваемый по длинам волн в области

более 400 А простым поворотом решетки.

Лазеры на красителях в настоящее время позволяют получать лазерное излучение на любой длине волны, от ближнего ИК-диапазона до ультрафиолета. Благодаря тому, что лазеры на красителях имеют чрезвычайно широкие полосы усиления, они позволяют осуществлять режим генерации импульсов длительностью менее пикосекунды (10—12 с).

### Лазерные диоды

Полупроводниковые или диодные лазеры очень важны для многих применений. В них используются не уровни, а энергетические состояния нелокализованных электронов. В твердых телах энергетические уровни электронов группируются в зоны. При температуре абсолютного нуля в полупроводниках, все имеющиеся уровни заполняют одну зону (валентная зона), а последующие свободные уровни группируются в другой зоне (зона проводимости), которая совершенно не заполнена и отделена от валентной зоны некоторым промежутком энергий, для которых нет состояний. Этот интервал называется запрещенной зоной (энергетической щелью). В этих условиях материал не может проводить ток и является изолятором. Когда температура увеличивается и если зона проводимости расположена от валентной зоны не слишком высоко, термическое возбуждение достаточно, чтобы некоторые из электронов перескочили в зону проводимости. Поскольку там все уровни пустые, они способны обеспечить электрический ток. Однако из-за того, что их мало, величина тока невелика. Соответственно материал становится проводящим с плохой проводимостью, т.е. полупроводником. Электроны, которые способны поддерживать ток в зоне проводимости, оставляют вакантными состояния в валентной зоне. Эти вакантные состояния, которые называются дырками, ведут себя как положительно заряженные частицы и также участвуют в проводимости. В чистом полупроводнике термическое возбуждение производит электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне в равных количествах.

Электроны и дырки, способные поддерживать ток, называются носителями. Если по какой-либо причине в зоне проводимости оказывается больше электронов, чем следует по статистике Максвелла-Больцмана, избыток электронов падает на вакантные энергетические уровни валентной зоны и таким образом возвращается в валентную зону и там исчезает дырка. То же самое происходит, если, наоборот, больше дырок присутствует в валентной зоне, чем допускается данной температурой. Этот процесс называется рекомбинацией двух носителей. Он происходит, давая энергию, соответствующую величине интервала между двумя зонами, которая проявляется либо в виде механических колебаний решетки, либо в виде испускания фотона. В последнем случае переход называется излучательным, а энергия фотона соответствует разности энергий уровней в валентной зоне и в зоне проводимости, т.е., грубо говоря, равной энергии запрещенной зоны.

Некоторые полупроводники не вполне чистые. Примеси образуют энергетические уровни электронов внутри зон. Если эти дополнительные уровни находятся вблизи дна зоны проводимости, термическое возбуждение заставляет их электроны перепрыгнуть в зону проводимости, где они способны поддерживать электрический ток. Уровни примеси остаются пустыми и, поскольку они фиксированы в материале, не способны поддерживать ток. В этом случае единственными носителями тока являются электроны в зоне проводимости, и полупроводник называется допированным n-типом («n» напоминает, что проводимость обеспечивается отрицательными зарядами). Наоборот, если уровни примеси располагаются вблизи верха валентной зоны,

термическое возбуждение заставляет электроны из валентной зоны перепрыгнуть на эти примесные уровни, образуя тем самым дырки, которые способны поддерживать ток. Тогда полупроводник называется р-типом («р» — для положительного заряда). Возможно так допировать полупроводник, что получаются области как р-типа, так и n-типа с узкой промежуточной областью между ними. Этот промежуток между различными областями называется р-n-переходом. Если заставить ток протекать через этот переход, делая n область отрицательной и р область положительной, электроны инжектируются в этот переход. На основе этого свойства были изобретены в конце 1940-х гг. транзисторы, вызвавшие революцию в мире электроники.

Хотя полупроводники были известны давно, их физика была полностью понята только после изобретения транзистора в 1948 г. Можно тем самым понять, что были некоторые сомнения в возможности их использования для лазера. Во всяком случае полупроводники были первыми, рассмотренными как возможная среда для получения излучения путем стимулированного испускания. В то время были выдвинуты различные предложения. В 1954 г. Джон фон Нейман обсуждал с Джоном Бардиным (один из изобретателей транзистора) возможность использования полупроводников. Тремя годами позднее, в 1957 г., произошел подлинный взрыв. В Японии 22 апреля 1957 г. был выдан патент Ватанабе и Нишизава, в котором рассматривалось рекомбинационное излучение, получающееся при инъекции свободных носителей в полупроводнике. Позднее он был опубликован 20 сентября 1960 г. Патент назывался «полупроводниковый мазер», и, как пример, рассматривалось рекомбинационное свечение в теллуре на длине волны около 4 мкм, т.е. в ближнем ИК-диапазоне. Авторы наивно рассматривали полупроводник, помещенный в резонаторе, типичном для микроволновой области. Но концепция использовать инъекцию носителей и их рекомбинационное излучение была озвучена. В Линкольновской лаборатории МИТ физик Бенжамен Лэкс провел в 1957 г. семинар с участием Пьера Эгрэна (1924—2002) из Парижа, и начались исследования переходов в группе энергетических уровней, которые возникают, когда полупроводник помещается в сильное магнитное поле (подобные тем, что работают в трехуровневом лазере Бломбергена). Идеи Эгрэна были представлены на международной конференции по физике твердого тела в электронике и телекоммуникациям. Она проходила в 1958 г. в Брюсселе, и на ней обсуждалась возможность использования полупроводников для продвижения мазерного эффекта в область оптических частот. Однако труды этой конференции не были опубликованы.

В бывшем Советском Союзе группа ученых Института им. П.Н. Лебедева (ФИАН) АН СССР, возглавляемая Н.Г. Басовым, в составе Б.М. Вула и Ю.М. Попова, начала в 1957 г. рассматривать возможность использования полупроводников для продвижения излучения лазера в оптический диапазон. Басов начал рассмотрение этой проблемы вместе с Поповым, который тогда работал в лаборатории люминесценции. Оба исследователя познакомились, когда были студентами в МИФИ. Физика полупроводников изучалась в ФИАНе в лаборатории полупроводников, которой руководил Бул. Поэтому он, естественно, принимал активное участие. В результате сотрудничества этих трех ученых появилось предложение лазерной системы с использованием электрического разряда. Оно было опубликовано в июне 1958 г. и обсуждалось Басовым на Западе на Первой конференции по квантовой электронике, организованной Таунсом в США. Этой работы не было в программе, и она была представлена на обеде (полупроводниковый лазер, работающий на этом принципе, был создан

много позже, в 1968 г., в группе Басова). Позднее, в 1960-61 гг., эта группа предложила еще три метода возбуждения: электронный пучок, оптическая накачка и инжекция электронов через p-n-переход. Авторами этих предложений были Н.Г. Басов, Ю.М. Попов и О.Н. Крохин. Выполнялись также экспериментальные исследования. В 1959 г. в ФИАНе под руководством Басова была начата программа «Фотон», которая была первой научной программой в СССР по разработке лазеров. Возможность использования полупроводников рассматривалась в США и обсуждалась в 1959 г. в MIT Кроммером и Цайгером. В 1960 г. Бойль и Томас из Bell Labs получили патент на использование полупроводников для создания лазера.

Тем временем, в 1961 г., двумя французскими исследователями М. Бернардом и Г. Дурафургом из Национального исследовательского центра телекоммуникаций (CNET) был получен важный теоретический результат. Они представили полное и исчерпывающее обсуждение, из которого следовала возможность вынужденного излучения в полупроводниках благодаря переходам между зоной проводимости и валентной зоной. Были получены фундаментальные соотношения, из которых следовала возможность получить лазерный эффект. Они также рассмотрели некоторые материалы, в которых можно ожидать выполнение нужных условий, и предложили среди других материалов полупроводники GaAs (арсенид галлия) и GaSb (антимонид галлия). После публикации этой работы многие группы начали активные исследования. В январе 1962 г. российский ученый Д.Н. Наследов и его коллеги из Физико-технического института АН СССР (г. Ленинград) сообщили, что ширина линии излучения, испускаемого GaAs-диодами, демонстрирует некоторое уменьшение ширины при увеличении тока. Они предположили, что это могло указывать на вынужденное излучение. В США несколько групп из IBM, RCA, Линкольновской лаборатории MIT и General Electric (GE) начали соревновательную гонку, которая коротко описывается здесь.

В Ватсоновском исследовательском центре IBM Р. Ландауер сформировал в 1961 г. небольшую группу для изучения проблемы систематическим путем. В. Думке из IBM показал, что простые (элементарные) полупроводники, такие как кремний и германий, которые широко используются в электронике, не пригодны из-за их структуры зон, и предложил использовать более сложные в структурном отношении полупроводники (полупроводниковые соединения), такие как арсенид галлия. У них минимум энергии зоны проводимости совпадает с максимумом валентной зоны (прямозонные полупроводники). В IBM были хорошие условия для изучения, поскольку уже началась программа для применений арсенида галлия в электронике.

Изучением полупроводниковых соединений, особенно арсенидом галлия, занимались также в General Telephone and Electronics Laboratories (GT&E). Здесь работала группа С. Мэйбурга. В марте 1962 г. он представил на заседании Американского Физического Общества работу по электролюминесценции GaAs диодов при 77 К, т.е. излучение этих диодов, охлажденных до температуры жидкого азота, при пропускании электрического тока. Было показано, что при определенных условиях почти каждый заряд, инжектированный через p-n-переход, дает фотон. Это был результат, аналогичный тому, что получил Мейман для рубина (высокая квантовая эффективность) и указывал, что p-n-переходы являются идеальной системой, для получения лазерного эффекта.

Ж. Панков из RCA провел 1956—1957 гг. в Париже, работая с Эгрэнном. Возвратившись из Франции, он начал исследования, но без финансовой поддержки, поскольку начальство не рассматривало

полупроводниковые лазеры выгодным объектом. В январе 1962 г. на конференции Американского Физического Общества Панков объявил о наблюдении рекомбинационного излучения из переходов арсенида галлия. Мэйбург почувствовал, что его могут опередить, и удвоил усилия.

В IBM, после семинара с Мэйбургом, теоретик Г. Лашер стал изучать вопрос, как сделать резонатор для полупроводникового лазера, а в то же время в соседней лаборатории в Йорктаун Хейтс М. Думке стал размышлять, как сделать лазер на арсениде галлия.

В июле 1962 г. результаты Мэйбурга обсуждались на Конференции по исследованиям твердотельных устройств в университете Нью-Гемпшира и Р. Кейс и Т. Квист из MIT сообщили, что они создали диоды арсенида галлия с люминесцентной эффективностью, которую они оценивают в 85%. Панков в мае представил подобные же результаты на другой конференции. В MIT люминесценция, излучаемая диодом, использовалась для передачи телевизионного канала, о чем было сообщено в New York Times.

На этом этапе четыре группы пустились в гонку. Р. Холл из GE принимал участие в конференции в Нью-Гемпшире и был поражен представленными результатами. На него сильное впечатление произвела высокая эффективность излучения p-n-переходов арсенида галлия, и, возвращаясь, он еще в поезде стал делать расчеты и размышлять, как получить резонатор Фабри—Перо. Идея была: взять p-n-переход, обрезать и отполировать его грани. Холл был астрономом-любителем и в школе сам построил телескоп, он знал, как можно отполировать оптические компоненты. В настоящее время резонаторы полупроводниковых лазеров получают скалыванием кристалла в нужном направлении, но в то время он не знал о такой методике. После некоторых обсуждений он получил разрешение начальства начать работу над проектом. Принципиальной трудностью было изготовление перехода GaAs, который должен был удовлетворять определенным критериям, а именно, сильно допирован. Вторая трудность была вырезать и отполировать грани так, чтобы они были параллельными друг другу. Затем следовало пропустить очень большой ток через переход, чтобы инжектировать достаточное число электронов. Ток должен был быть в виде импульса с короткой длительностью, чтобы не расплавить образец. Чтобы предотвратить чрезмерный рост температуры, следовало использовать охлаждение жидким азотом (77 К).

Хотя Холл был последним, включившимся в гонку, он оказался первым, правда на короткое время, и получил в сентябре 1962 г. первый лазерный диод. Бернард (из Франции) несколько раз посещал лабораторию Холла, обсуждая возможность полупроводниковых лазеров. Во время одного из визитов он появился как раз, когда группа Холла получила результат, но еще не оформила его для публикации. Поэтому достижение держалось в секрете. У Холла возникла проблема, как обсуждать возможность сделать лазер, не сообщая Бернарду, что он уже работает в соседней комнате.

Конференция в Нью-Гемпшире вдохновила также Н. Холоньяка из GE, эксперта по арсениду галлия. Когда первый диод заработал, почти одновременно несколько групп объявили о лазерном действии на p-n-переходах GaAs. Во всех случаях использовалось охлаждение до 77 К, а накачка производилась импульсами тока высокой интенсивности с короткой длительностью (несколько микросекунд). О лазере группы GE было объявлено в работе от 24 сентября 1962 г.; о втором лазере группы М. Натана из IBM Йорктаун Хейтс было объявлено 4 октября; а о третьем из Линкольновской лаборатории MIT — 23 октября. Холоньяк сообщил о своем лазере 17 октября. Все эти лазеры были сделаны на переходе арсенида галлия, охлаждались жидким азотом, и накачивались

интенсивными импульсами тока длительностью несколько микросекунд.

Устройство Холла (рис. 60) представляло куб со стороной 0.4 мм, с переходом, расположенным в горизонтальной плоскости, в центре. Передняя и задняя грани были отполированы параллельно друг к другу и перпендикулярно к плоскости перехода, образуя резонатор Фабри—Перо (арсенид галлия обладает высоким показателем преломления, поэтому френелевское отражение на границе полупроводник—воздух дает достаточно высокий коэффициент отражения). При такой геометрии получается относительно длинный путь в области перехода, где инжектированные носители рекомбинируют и испускают свет, распространяющийся взад-вперед между отполированными гранями (зеркалами резонатора). Лазер работал при подаче импульсов тока длительностью 5—20 мкс, причем полюс тока подавался на р-допированную сторону перехода, а минус на п-допированную сторону. Диод помещался в жидкий азот. Когда ток достигал очень большого значения, 8500 А/см<sup>2</sup>, возникала лазерная генерация, что проявлялось в резком увеличении испускаемого излучения и в сужении спектральной линии от 125 до 15 Å°.

Рис. 60. Схема полупроводникового лазера на р-п-переходе простейшего типа. Лазерное излучение испускается в тонком активном слое между р и п зонами, и отражается взад и вперед параллельными гранями F1, F2, которые действуют как зеркала резонатора

Натан работал с несколько отличной системой, используя переход без резонатора. Порог, достигаемый при температуре жидкого азота, очевидно, был выше между 10 000 и 100 000 А/см<sup>2</sup>. Т. Квист из МИТ использовал структуру 1,4x0,6 мм<sup>2</sup> с отполированными короткими гранями. При температуре жидкого азота порог был около 1000 А/см<sup>2</sup>. Наконец, Холонык использовал переход соединения арсенида галлия с фосфидом. Используя этот материал, удалось получить генерацию при 6000—7000 А/см<sup>2</sup> вместо 8400 А/см<sup>2</sup>, когда использовался простой образец GaAs.

В России (СССР), вскоре после создания лазеров в США, В.С. Багаев, Н.Г. Басов, Б.М. Вул, Б.Д. Копыловский, О.Н. Крохин, Ю.М. Попов, А.П. Шотов и др. создали лазерный диод в ФИАНе. Этот результат обсуждался на 3-й Международной конференции по квантовой электронике в Париже, в 1963 г.

Первые лазеры делались из одного и того же материала с переходом между п и р частями. Они имели высокие пороги. В 1963 г. Х. Кроммер предложил использовать гетеропереходы, в которых полупроводник с относительно узкой запрещенной зоной располагается между двумя слоями полупроводника с более широкими запрещенными зонами (сэндвич-структура). В то же время аналогичное предложение сделали Ж.И. Алфёров и Р.Ф. Казаринов из Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе (г. Ленинград). Российские ученые не опубликовали свое предложение. Прошло шесть лет, прежде чем в Bell Labs и в RCA были разработаны первые гетероструктурные лазеры. К тому времени Алфёров и его сотрудники разработали более сложные многослойные структуры, которые сегодня известны как лазеры с двойной гетероструктурой. Усилия Ж. Алфёрова и Х. Кроммера были отмечены Нобелевской премией по физике в 2000 г. «за разработку полупроводниковых гетероструктур, используемых в высокоскоростной электронике и в оптоэлектронике» вместе с Джеком Килби «за его вклад в изобретение интегральной схемы».

Ж.И. Алфёров родился в Витебске (Белоруссия) в 1930 г. Он окончил Электротехнический институт им. В. И. Ленина (Ленинград) в 1952 г. и в 1953 г. поступил в Физико-технический институт. С 1987 г. он директор этого института. Алфёров — академик РАН и депутат Государственной Думы.

Герберт Кромер родился в Веймаре (Германия) в 1928 г. и получил докторскую степень в университете Гёттингена в 1952 г. за диссертацию, посвященную только появившимся тогда новым транзисторам. В 1968 г. он стал работать в университете Колорадо, а с 1976 г. — в университете Калифорнии (Санта Барбара).

Разработка полупроводниковых лазеров тормозилась по нескольким причинам. Необходимо было разработать новую технологию для работы с полупроводниками, учитывая, что хорошо разработанная технология для кремния не годится. Проблемой также была необходимость работы с короткими импульсами большого тока при низких температурах. По этой причине КПД лазеров был низок. Значительный шаг вперед в решении этих проблем был сделан в 1969 г. путем введения гетероструктур, в гетероструктурном лазере простой p-n-переход заменяется многослойной структурой полупроводников разного состава (рис, 61). Активная область уменьшается по толщине, и ток, требуемый для лазерной генерации, существенно уменьшается, что соответственно уменьшает выделение тепла. Это приводит к тому, что уже не требуется охлаждение, и лазер может работать при комнатной температуре.

Рис. 61. Природный лазер в звезде MWC349. Лазерное излучение происходит в диске водорода, ближайшего к звезде, а мазерное излучение получается в более отдаленных областях. Излучение испускается в плоскости, показанной на рисунке, и достигает Земли, которая случайно оказалась лежащей в этой же плоскости

Два фактора сильно способствовали преобразованию полупроводниковых лазеров из лабораторных устройств, работающих при очень низких температурах в практичные оптоэлектронные устройства, способные работать непрерывно при комнатной температуре. Первое исключительное и счастливое сходство решеток, содержащих арсенид алюминия (AlAs) и арсенида галлия (GaAs), что позволяет изготавливать гетероструктуры из слоев разной композиции соединения типа  $A_xGa_{1-x}As$ . Второе многие важные применения, для которых полупроводниковые лазеры оказываются особенно пригодными из-за их особенностей: малые размеры (несколько кубических миллиметров), высокий КПД (обычно не менее 50%), накачка непосредственно электрическим током, долговечность по сравнению с другими типами лазеров.

Тот факт, что лазер непосредственно накачивается током, позволяет модулировать выходное излучение, простой модуляцией тока. Эта особенность идеальна для систем передачи информации. Существует ли лазер в природе?

Ответ, по-видимому, да! Лазерное излучение с длиной волны около 10 мкм (типичная линия излучения двуокиси углерода, на которой работают мощные CO<sub>2</sub> лазеры, находящие широкое применение, в частности для механической обработки материалов) было обнаружено в атмосферах Марса и Венеры в 1981 г. исследователями из Лаборатории экспериментальной физики Центра управляемых полетов им. Годдарда (НАСА). Это излучение уже наблюдалось в 1976 г. студентами Таунса, который стал заниматься проблемой астрофизики, но только в 1981 г. было установлено, что причиной его является естественный лазер.

Инверсная населенность перехода молекулы двуокиси углерода, которая составляет значительную часть атмосферы этих планет, получается в результате солнечного света, и поэтому получается только на освещенной полусфере. Это такой же механизм, как и в лазерах на CO<sub>2</sub>, построенных на Земле. Они работают на длине волны 10 мкм и используются в качестве мощных лазеров для резки и

сварки металлов и других применений. Линии излучения в атмосферах этих планет почти в 100 миллионов раз интенсивнее, чем если бы газ испускал их в условиях термодинамического равновесия при температуре атмосферы. Часть наблюдаемого излучения является излучением, усиленным в инверсно населенной среде. Если бы можно было поместить два зеркала на орбите вокруг этих планет, мы могли бы получить такую же генерацию, которую получаем в земных условиях. Возможности реализации лазера на планетарном масштабе вне нашего понимания, но что будет в будущем, мы не знаем. Эти линии излучения оказались полезными для измерения температур и ветров на Марсе и Венере.

Космические мазеры, как уже говорилось, были обнаружены много лет назад, и нет причин исключать существование и космических лазеров. Однако для их существования требуется более трудный процесс, поскольку необходимо большие энергии фотонов. В начале 1995 г., группа астрономов зарегистрировала усиленное инфракрасное излучение, приходящее от диска водорода, вращающегося вокруг молодой звезды в созвездии Лебедя, находящейся от нас на расстоянии 4000 световых лет. Интенсивность излучения на одной из длин волн, по сравнению с соседними длинами волн, показывает наличие вынужденного излучения (рис. 62). Предварительные наблюдения в 1994 г. одной из звезд, обозначенной MWC349, уже показали интенсивное мазерное излучение от ее диска на длинах волн 850 мкм и 450 мкм, испускаемое водородом. Изучение процессов, которые ответственны за это излучение, привело к предположению, что также возможно излучение на менее коротких длинах волн, испускаемое из области диска вблизи звезды.

Рис. 62. Природный лазер в звезде MWC349. Лазерное излучение происходит в диске водорода, ближайшего к звезде, а мазерное излучение получается в более отдаленных областях. Излучение испускается в плоскости, показанной на рисунке, и достигает Земли, которая случайно оказалась лежащей в этой же плоскости

Исследователи из NASA поместили инфракрасный телескоп на самолете, летающие на высоте 12 500 м. На этой высоте поглощение исследуемого излучения в атмосфере существенно ослабляется. Они наблюдали линию на 169 мкм, интенсивность которой в шесть раз превышала ожидаемую интенсивность при термическом равновесии. Излучение на этой линии производится атомами водорода, ионизованными интенсивным УФ-излучением звезды или из-за более сложных процессов, происходящих в диске. Когда ионы рекомбинируют со свободными электронами, они испускают фотоны. Большая часть излучения испускается спонтанно, но возможно также и вынужденное излучение. Такой же процесс дает мазерное излучение в других частях диска, но в центральных частях наблюдается лазерное излучение, частично, из-за того, что водород там плотнее, частично, из-за того, что интенсивность ультрафиолетового излучения выше. Случайно, диск ориентирован по отношению к Земле так, что можно зарегистрировать лазерное излучение. Диск представляет собой область, где, как полагают, могут формироваться планеты, и наблюдаемое излучение приходит от той части этой «колыбели планет», которая удалена от звезды на расстояние, приблизительно равное расстоянию между Землей и Солнцем. Поэтому лазерное излучение может помочь нам лучше понять состояние газа в диске. Длина волны 169 мкм лежит на границе областей, которые относят к микроволнам, и оптического диапазона. Поэтому можно говорить как о мазерном, так и о лазерном эффекте.

Лазеры в ультрафиолетовой области также существуют. Излучение в этой области было обнаружено

с помощью космического телескопа Хаббл. Оно испускается из газового облака вблизи звезды  $\eta$ -Киля.

Итак, мы можем заключить, что в космосе уже существуют естественные мазеры и лазеры. Поэтому мы можем более точно сказать, что мазеры и лазеры были не изобретены, а открыты [14].

## ГЛАВА 14

### РЕШЕНИЕ В ПОИСКЕ ПРОБЛЕМЫ ИЛИ МНОГИЕ ПРОБЛЕМЫ С ОДНИМ И ТЕМ ЖЕ РЕШЕНИЕМ?

#### ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ

В 1898 г. г. Уэллс вообразил в своей книге «Война миров» захват Земли марсианами, которые использовали лучи смерти, способные без труда проходить через кирпичи, сжигать леса, и прожигать сталь, как если бы она была бумагой. Подобным оружием пользовались персонажи карикатур, мультфильмов и комиксов перед и после Второй мировой войны. Это рождало мечты военных об оружии будущего. В настоящее время пучки лазеров высокой мощности делают это реальным. Как только был создан первый лазер, сочинители стали использовать его вместо старомодных лучей смерти для своих персонажей, и таблоиды развлекали ужасными выдумками о возможных разработках лазерных пушек и других выдуманных орудиях. Артур Шавлов демонстрировал на конференциях возможности, предоставляемые рубиновым лазером, с помощью пистолета с маленьким рубиновым лазером внутри его, излучение которого взрывало маленький голубой воздушный шарик. Собирая примеры фантазий прессы, он прибил на двери своего кабинета в Стэнфордском университете вырезку со словами «невероятный лазер», под которой написал «если интересуетесь правдоподобным лазером, заходите».

Свет лазера отличается от света обычных источников света примерно так же, как музыкальный звук отличается от шума. Более того, пучок лазера может распространяться на километры, лишь слегка увеличиваясь в диаметре. Так, когда в 1969 г. пучок рубинового лазера был послан на Луну, чтобы отразиться от системы отражателей, установленной Армстронгом, пучок на Луне имел диаметр лишь 9 км.

Еще одна особенность лазеров — их огромная яркость. Когда мы греемся на солнце в полдень летнего дня, солнечный свет, падающий на наш палец, имеет мощность около десятой доли Вт. Свет от лазера можно сконцентрировать в точку на нашем пальце, при этом мощность может достигать 109 Вт!

Эти свойства, а также огромное число типов лазеров привело к многочисленным применениям в самых различных областях, причем их число увеличивается. Эта ситуация сильно отличается от того, что было сразу же после изобретения лазера. Тогда еще не было никаких применений, и люди говорили, что лазер был блестящим решением проблемы, которая еще не существует (решение, ждущее проблемы).

В настоящее время существует множество типов лазеров, от огромных, величиной с футбольное поле, до миниатюрных величиной с булавочную головку. Свет, который они испускают, простирается по спектру от невидимого инфракрасного диапазона до ультрафиолета и даже рентгена, через видимый свет всех цветов радуги. Некоторые из длин волн можно плавно перестраивать. Интенсивность может изменяться на много порядков.

Некоторые лазеры испускают импульсы с длительностью до фемтосекунды (10—15 с), а другие

могут испускать пучки в течение десятилетий. Подобно лучам Уэллса, некоторые лазеры позволяют сфокусировать их свет в яркую точку так, что концентрация энергии в ней оказывается достаточной для испарения стали или любых других материалов. Другие испускают энергию, которой не хватит, чтобы сварить яйцо. Интенсивность сфокусированного мощного лазерного излучения может превышать ту, что получается при ядерном взрыве (разумеется, за очень короткий (фемтосекунды) интервал времени).

Немного найдется научных достижений, которые так возбудили бы воображение ученых и инженеров, как лазер. Лазер дал возможность экспериментально исследовать оптически нагреваемую плазму, причем с помощью мощного лазерного излучения можно получить контролируруемую термоядерную реакцию. Возникло новое научное направление — нелинейная оптика. Она включает такие явления, как генерация оптических гармоник, т.е. новых лазерных длин волн, параметрическое усиление и генерация, позволяющая плавно перестраивать длину волны лазерного излучения, фотонное эхо, самоиндуцированная прозрачность, самофокусировка лазерного пучка. С помощью лазеров производятся точнейшие измерения дистанций вплоть до Луны, фиксируется скорость дрейфа континентов. В спектроскопии реализуется исключительно высокое разрешение. Это позволяет определить значение фундаментальных физических констант со значительно большей точностью. Стала возможной генерация ультракоротких оптических импульсов. С их помощью изучаются сверхбыстрые явления в атомах, молекулах, в газах, жидкостях и твердых телах.

Лазеры также входят в повседневную жизнь. Они используются в принтерах и в проигрывателях компакт-дисков и позволяют получать высококачественные изображения и звук. В криминалистике с помощью лазеров фиксируют отпечатки пальцев, оставленные много лет назад. Голограммы дают трехмерное изображение. Лазерные эффекты используются для спецэффектов в кино, на рок-концертах и других подобных мероприятиях.

В самом начале было мало возможностей для коммерческой деятельности в области лазеров, за исключением продажи деталей и компонентов, нужных для изготовления лазеров и их последующего развития. Компании, которые хотели действовать в этой области, вынуждены были проводить свои собственные прикладные исследования с целью получения контрактов, в особенности от военных. Выражение «лазер — это решение в поиске проблемы» было обычным в то время. Затем лазерные технологии вошли в фазу разработок, в которой были найдены применения. Многие компании на этой фазе не хотели или не решались включиться в технологию, применения которой были туманны, и устранились из этой области. Однако, с другой стороны, многие предприниматели удвоили усилия, стараясь найти применения и коммерческие перспективы. В настоящее время лазерная технология прорвалась. Можно указать много применений, где лазеры при меньшей стоимости обеспечивают лучшую эффективность, чем старые технологии. Сегодня имеется рынок лазерной продукции в области телекоммуникаций, в области обработки и сохранения информации, в типографском деле, в области обработки материалов, в медицине и др. В будущем ожидается ещё большее расширение рынка. Для неспециалиста ясны преимущества лазерных технологий в таких областях, как видео- и аудиодиски, лазерные принтеры, система штрих-кодов на товарах, волоконно-оптическая связь и некоторые медицинские процедуры лечения с помощью лазеров.

Новые слова описывают использование света в его различных применениях. Электроника — термин,

обычно употребляемый для характеристик электронов и применений с их участием. Этот термин используется с 1910 г. Когда был открыт мазер, т.е. электронное устройство, для которого было необходимо знание квантовой механики, был придуман термин «квантовая электроника». Этот термин был затем распространен на все устройства электроники, для которых требовалось понимание квантовой механики, например, транзисторы. «Оптоэлектроника» — термин сравнительно недавнего происхождения (впервые он был введен в 1955 г., даже до изобретения лазера), он относится к явлениям и устройствам, работа которых происходит при совместном действии электроники и оптики. Многие современные устройства, использующие лазеры, являются типичными оптоэлектронными устройствами, и сам лазер можно отнести к оптоэлектронному устройству. Для более специфического описания применений в устройствах с использованием фотонов, особенно в области передачи информации, с 1952 г. стали использовать термин «фотоника», означающий, по аналогии с термином «электроника», применение или получение фотонов в устройствах для передачи информации, а также в ряде явлений. К таким явлениям относятся: получение направленного пучка фотонов (света), его отклонение, модуляция и усиление, оптическая обработка изображений, регистрация и запись световых сигналов. Как можно заметить, нет резких границ между этими терминами, и часто они используются взаимозаменяемым образом. Со временем может прийти более точное определение каждого термина.

В 1984 г. глобальный рынок лазеров превышал более чем два миллиона евро в коммерческой области в добавок к одному миллиону в военных целях. А в 1994 г. общий объем продаж лазеров составил 1 млрд. евро. В течение этой эскалации успехов и применений не обошлось без забавных недоразумений. Например, в 1970-х гг. дин работник американской таможни решил, что лазеры безопасны, и могут без ограничений импортироваться и экспортироваться, но это не относится к лазерным пучкам!

Здесь мы хотим упомянуть о некоторых огромных возможностях лазеров, описав некоторые из применений, имеющих большой интерес, как с исторической, так и с современной точек зрения.

#### Лазер для военных целей

Даже до того, как были созданы первые лазеры, они уже вызвали определенный интерес военных из-за принципиальной возможности ряда применений. Было понятно, что высокая направленность лазерного пучка может обеспечить секретность передачи информации, которая получается путем модуляции его интенсивности. Кроме того, возможность фокусирования и формирования пучка позволяет снизить потери при распространении, т.е. избежать недостатка, присущего радиоволнам. Тогда казалось, что лазер сможет обеспечить уникальный способ коммуникаций или даже передачи энергии. Однако первые же эксперименты, выполненные, как только появились лазеры, показали, что атмосфера Земли оказывает вредное влияние на распространение света, он поглощается или рассеивается. Если идет дождь или снег, а также в тумане, распространение невозможно. Но даже при ясной погоде распространение существенно ухудшается. Например, интенсивность не остается постоянной во времени, а начинает беспорядочно флуктуировать из-за явления, которое известно как турбулентность атмосферы. Это хорошо известно астрономам, которые наблюдают, что изображения звезд флуктуируют во времени (они называют этот эффект сцинтилляциями). Однако такого ограничения можно избежать в вакууме, например, между спутниками или на Луне, а также существенно ослабить его при сравнительно коротких дистанциях.

Прекрасный способ распространения световых сигналов без существенных потерь был получен при использовании оптических волокон. Этот способ заменяет распространение электрических сигналов по проводам или радиоволнами. С помощью специальных стеклянных волокон удается быстро передавать большие объемы информации между континентами. Характеристики волоконно-оптической связи лучше, чем радиосвязь и связь по проводам. Сами волокна весят меньше и дешевле, чем медная проволока.

Военные также держали в голове и другие применения, например радар. Радар на оптической частоте может в принципе улучшить точность и «разглядеть» детали мишени, что невозможно даже при использовании миллиметровых радиоволн. Также возможно измерять скорость мишени. С другой стороны, возмущающие эффекты атмосферы на пучки оптических радаров можно использовать для измерений свойств самой атмосферы (такой прибор называется лидаром), таких, как концентрация озона, загрязнения и турбулентности, информация о которых очень важна для авиасообщений.

Первым военным применением новой лазерной технологии стали дальномеры. Они появились в середине 1960-х гг. Короткий импульс лазерного излучения (около 10—30 нс) посылается на цель, и измеряется интервал времени между посылкой и приходом отраженного сигнала. Так как импульс распространяется со скоростью света, это позволяет определить величину дистанции.

С помощью лазеров можно управлять снарядами. В 1965 г. специализированное издание сообщило об испытаниях ручного лазерного устройства для наведения снаряда на цель. Вскоре были описаны эксперименты, в которых лазер использовался для подсветки целей малого размера и точного наведения сверхзвуковых ракетных снарядов. Первые системы лазерного наведения на цель были использованы в 1972 г. в конце вьетнамской войны. «Умные» бомбы, наводимые лазерами, явились предвестниками появления оружия с очень точным наведением. Это стало поворотным пунктом технологий вооружения, так как новые системы наведения увеличивали вероятность поражения цели по сравнению с обычным бомбометанием. Во время войны в Персидском заливе и в Сербско-Боснийской войне такое оружие с лазерным наведением было обычным. В 1968 г. в США ВМС начали исследования возможности использования лазеров большой мощности и в 1978 г. добились успеха, сумев сбить ракету. Затем Армия изучала возможность использования лазеров для того, чтобы выводить из строя вражеские системы наблюдения и даже ослеплять солдат. Администрация Рейгана ввела в действие программу антиракетной обороны, основанной на использовании лазеров, известной под названием «Стратегическая Оборонная Инициатива» (СОИ). Эта программа была объявлена Рейганом 23 марта 1983 г. в его знаменитой речи «Звездные войны». По этой программе должны были появиться лазерные системы, способные зафиксировать атаку вражескими баллистическими ракетами и уничтожить их. Эта программа встретила значительную критику, и в конце концов было мало сделано для ее осуществления. Администрация Клинтона пересмотрела оборонную стратегию, введя в действие организацию, занимающуюся проблемами обороны с помощью ракет (Ballistic Missile Defence Organization), с менее амбициозными целями, но с большей надеждой на успех.

Большинство оборонных систем спроектировано с целью уничтожения боеголовок ракет, прежде чем они достигнут цели. Уже разработаны такие системы, которые перехватывают ракеты на конечной траектории, после вхождения в атмосферу. Другие системы будут стараться перехватить

ракеты вне атмосферы или даже на начальном участке траектории, сразу же после запуска. Как только баллистическая ракета запускается, включаются следующие действия системы обороны. Прежде всего, инфракрасные датчики, установленные на спутниках, находящихся на геостационарных орбитах, обнаруживают струю горячего газа ракеты, когда она минует облака. Спутник посылает сигнал тревоги военному командованию о том, что произошел запуск, с указаниями области, куда направлена ракета. Эта информация используется, чтобы направить датчики системы обороны в нужные координаты для сопровождения. Эти датчики прослеживают цель, определяют боеголовку и передают данные перехватчику. Обычно такими датчиками являются радары, установленные на Земле, но в будущем вместе с ними будут задействованы спутники на низких орбитах, оборудованные инфракрасными датчиками. На основе этих данных запускается перехватчик, который летит в место, координаты которого рассчитаны на основе полученных данных. Затем от перехватчика отделяется заряд для уничтожения, который использует свою систему наведения в центр мишени.

Этот сложный танец, который мы изложили в простой форме. Его хореография должна включать крайне изощренные боевые системы с исключительно быстрыми временами срабатывания. Полное время полета ракеты «Скад» с радиусом действия 300 км составляет не более 4 мин. Ракеты с большим радиусом действия остаются в полете не более 15 мин.

Одним из возможных сценариев работы системы является уничтожение баллистической ракеты на стадии ее запуска. Преимуществом является то, что двигатели на старте выпускают огромное количество раскаленного газа, испускающего интенсивное ИК-излучение. Это позволяет легко обнаружить запускаемую ракету. Однако необходимо располагаться достаточно близко от ракеты, чтобы перехватить ее, поскольку двигатели работают лишь несколько минут. В этот короткий период времени система обороны должна установить и определить факт запуска, провести расчет траектории и затем перехватить цель.

Пентагон разработал систему, способную осуществить это, а именно, лазер самолетного базирования военно-воздушных сил (Air Force's Airborne Laser). Это химический лазер (COIL — химический кислород-йодный лазер), который устанавливается на самолете Боинг-747. Эта система способна перехватывать ракеты на взлете на расстоянии несколько сотен километров. Интерес к использованию лазерного излучения для непосредственного уничтожения связан с огромным значением скорости света, т.е. достаточно без всякого упреждения направить лазерный пучок на цель. Лазер поражает ракету при наведении и фокусировании на нее пучка. В результате металл нагревается вплоть до разрушения. Каждый металл имеет свою характерную точку разрушения: 460°C для стали и 182°C для алюминия. Существуют, по крайней мере, два возможных способа уничтожения ракеты. Первый способ — для ракет, имеющих баки с жидким горючим. Прожигание сравнительно тонкой оболочки бака приводит к катастрофическим последствиям. Второй способ связан с сильным нагревом воздуха в непосредственной близости от ракеты. Когда это достигается, на ракету начинают действовать аэродинамические и инерциальные силы, которые изгибают ее (рис. 63).

Рис. 63. Левая часть рисунка показывает, как лазерный пучок повреждает бак жидкостной ракеты (верху), или деформирует корпус ракеты (внизу). В результате или повреждается бак и ракета разваливается (вверху), или повреждается ракета (внизу) и сбивается с курса

На борту самолета будут три главные лазерные системы. Первая, которая создает смертельный для ракеты пучок, является лазером непрерывного действия. Две другие являются импульсными лазерами. Один из них служит для наведения на цель, а другой — для формирования главного пучка с учетом состояния атмосферы (см. далее раздел, посвященный адаптивной оптике). Очевидно, что главной частью системы является лазер поражения цели. Им является химический кислород-йодный лазер, который размещается в задней части самолета. Он производит непрерывный лазерный пучок ИК-излучения на длине волны 1,315 мкм с мощностью несколько мегаватт (существенно большей, чем достигалось лазерами этого типа до недавнего времени). В этом лазере возбужденные атомы йода получают при многократных столкновениях с возбужденными молекулами кислорода (т.н. «синглетный кислород»), которые получают в результате химической реакции (реакция хлора со щелочным раствором перекиси водорода). Эта система разрабатывается с 1997 г. и подвергалась некоторой критике.

#### Солнечные лазеры

Сразу же после открытия лазера стали мечтать о прямом преобразовании белого, некогерентного солнечного света в монохроматическое, когерентное излучение лазера. Это позволило бы, например, существенно уменьшить вес лазерной системы, располагаемой на спутнике, поскольку все функции системы накачки могли бы выполняться Солнцем. Эти мечты вскоре были реализованы, и в 1966 г. были созданы лазеры с солнечной накачкой. Однако их эффективность была довольно низкой, типично порядка 1%, т.е. лишь сотая доля собранного солнечного излучения преобразовывалась в лазерный свет. Позднее, были разработаны весьма совершенные способы концентрации солнечного света, немыслимые прежде. В результате получалась концентрация 72 Вт/мм<sup>2</sup>, что превышает интенсивность света на самой поверхности Солнца (63 Вт/мм<sup>2</sup>). С такими значениями интенсивности света накачки можно создать лазеры с улучшенными параметрами. Эффективность уже превзошла 6%.

#### Оптические волокна и лазерная связь

Со времен античности свет использовался для передачи сообщений. В Китае, Египте, и в Греции использовали днем дым, а ночь огонь для передачи сигналов. Среди первых исторических свидетельств оптической связи мы можем вспомнить осаду Трои. В своей трагедии «Агамемнон», Эсхил дает детальное описание цепочки сигнальных огней на вершинах гор Ида, Антос. Масисто, Египланто и Аракнея, а также на утесах Лемно и Кифара, для передачи в Арго весть о захвате Трои ахейцами.

В более поздние, но в античные времена, римский император Тиберий, находясь на Капри, использовал световые сигналы для связи с побережьем.

На Капри до сих пор можно видеть руины античного «Фаро» (свет) вблизи виллы императора Тиберия на Тиберио Маунт.

В Северной Америке одна из первых оптических систем связи была установлена около 300 лет назад в колонии Новая Франция (ныне провинция Квебек в Канаде). Региональное правительство, опасаясь возможности нападения английского флота, установило ряд позиций для сигнальных огней во многих деревнях вдоль реки Святого Лаврентия. В этой цепи, которая начиналась с Иль Верте, на расстоянии около 200 км от Квебека ниже по течению, было не менее 13 пунктов. С начала 1700-х гг. в каждой из этих деревень, каждую ночь периода навигации, был караульный, задачей которого было

наблюдать за сигналом, посылаемым из деревни ниже по течению, и передавать его далее. С помощью такой системы сообщение о британской атаке в 1759 г. достигло Квебека прежде, чем было слишком поздно.

В 1790 г. французский инженер, Клод Шапп, изобрел семафоры (оптический телеграф), располагаемые на башнях, установленных в пределах видимости одна от другой, что позволяло посылать сообщения от одной башни к другой. В 1880 г. Александр Грэхем Белл (1847—1922) получил патент на «фотофон» устройство, в котором использовался отраженный солнечный свет для передачи звука к приемнику. Отраженный свет модулировался по интенсивности путем колебаний отражающей мембраны, помещенной в конце трубки, в которую Белл говорил. Свет проходил расстояние около 200 м и попадал на селеновую ячейку (фотоприемник), связанную с телефоном. Хотя Белл рассматривал фотофон как наиболее важное свое изобретение, его применение ограничивалось погодными условиями. Однако это обстоятельство не помешало Беллу написать отцу:

«Я услышал разборчивую речь, произведенную солнечным светом!... Можно вообразить, что этому изобретению обеспечено будущее!... Мы сможем разговаривать с помощью света на любом расстоянии в пределах видимости без каких бы то ни было проводов ...В условиях войны такую связь нельзя прервать или перехватить».

Изобретение лазера стимулировало возросший интерес к оптической связи. Однако, вскоре было продемонстрировано, что атмосфера Земли нежелательным образом искажает распространение лазерного света. Рассматривались различные системы, такие, как трубки с газовыми линзами и диэлектрические волноводы, но все они были оставлены в конце 1960-х гг., когда были разработаны оптические волокна с малыми потерями.

Понимание, что тонкие стеклянные волокна могут проводить свет за счет полного внутреннего отражения, было старой идеей, известной с XIX в. благодаря английскому физика Джону Тиндалю (1820-1893) и использованной в инструментах и для освещения. Однако в 1960-х гг. даже лучшие стекла обладали большим ослаблением света, пропускаемого через волокно, что сильно ограничивало длину распространения. В то время типичным значением ослабления был один децибел на метр, означая, что после прохода 1 м пропущенная мощность уменьшается до 80%. Поэтому было возможным лишь распространение по волокну длиной несколько десятков метров, и единственным применением была медицина, например эндоскопы. В 1966 г. Чарльз Као и Джордж Хокхэм из Standard Telecommunications Laboratory (Великобритания) опубликовали фундаментальную работу, в которой показали, что если в плавленом кварце тщательно устранить примеси, а волокно окружить оболочкой с меньшим показателем преломления, то можно добиться уменьшения ослабления до -20 дБ/км[15]. Это означает, что при прохождении длины 1 км мощность пучка ослабляется до одной сотой входной мощности. Хотя это и очень малое значение, оно приемлемо для ряда применений.

Как часто бывает в таких ситуациях, в Великобритании, Японии и США начались интенсивные усилия с целью получить волокна с улучшенными характеристиками. Первый успех был достигнут в 1970 г. Е. П. Капроном, Дональдом Кеком и Робертом Майером их Компании Корнинг Глас. Они изготовили волокна, которые имели потери 20 дБ/км на длине волны 6328 Å (длина волны He-Ne-лазера). В том же году И. Хаяши с сотрудниками сообщили о лазерном диоде, работающем при

комнатной температуре.

В 1971 г. И. Джакобс был назначен директором Лаборатории цифровой связи в AT&T Bell Laboratories (Холмдел, Нью-Джерси, США), и ему было поручено разработать системы с высокой скоростью передачи информации. Его начальники У. Даниельсон и Р. Компфнер перевели часть персонала в другую лабораторию, руководимую С. Миллером, чтобы «не спускать глаз» с того, что происходит в области оптических волокон. Тремя годами позднее Даниельсон и Компфнер поручили Джакобсу сформировать исследовательскую группу для изучения практической возможности связи с помощью волокон. Было ясно, что наиболее экономичным, первоначальным применением систем, использующих свет, является связь телефонных станций в крупных городах. Тогда для этого использовались кабели, а информация передавалась в цифровом виде, путем кодирования ее серией импульсов. Волокна, с их способностью передавать огромное количество информации, представлялись идеальной заменой электрических кабелей. Офисы и телефонные станции в больших городах расположены на расстояниях несколько километрах друг от друга, и их уже в то время можно было связать без проблем, даже используя волокна с относительно большими потерями. Итак, предварительный эксперимент был сделан в середине 1976 г. в Атланте с оптическими волоконными кабелями, помещаемыми в трубы обычных кабелей. Первоначальный успех этих попыток привел к созданию системы, которая связала две телефонные станции в Чикаго. На основе этих первых результатов, осенью 1977 г., в Bell Labs было решено разработать оптическую систему для широкого пользования. В 1983 г. связь была установлена между Вашингтоном и Бостоном, хотя это и было связано с многими трудностями. Эта система связи работала со скоростью передачи 90 Мбит/с. В ней использовалось многомодовое волокно на длине волны 825 нм.

Между тем NTTС (японская телеграфная и телефонная компания) сумела вытягивать волокна с потерями лишь 0,5 дБ/км на длинах волн 1,3 и 1,5 мкм, а Линкольновская лаборатория в MIT продемонстрировала работу InGaAsP лазерного диода, способного непрерывно работать в диапазоне между 1,0 и 1,7 мкм при комнатной температуре. Использование волокон с малыми потерями на 1,3 мкм позволило создать более совершенные системы. Были построены системы с пропусканием 400 Мбит/с в Японии и 560 Мбит/с в Европе. Европейская система могла пропускать одновременно 8000 телефонных каналов. В США было произведено более 3,5 миллионов километров волокна.

Единственной частью, которая все еще использует медный провод, является связь между домом и телефонной станцией. Эта «последняя миля», как ее стали называть, также становится объектом волоконной связи.

Первый трансатлантический телеграфный кабель был введен в действие в 1858 г. Почти сто лет спустя, в 1956 г., был проложен первый телефонный кабель, получивший название TAT-1. В 1988 г. начало действовать первое поколение трансатлантических кабелей на оптических волокнах (их стали называть TAT-8). Они работают на длине волны 1,3 мкм и связывают Европу, Северную Америку и Восточную часть Тихого океана. В 1991 г. началось установление второго поколения волоконно-оптической связи, TAT-9, которая работает на 1,3 мкм и связывает США и Канаду с Великобританией, Францией и Испанией. Другая линия работает между США и Канадой и Японией. В мире имеется ряд других волоконно-оптических линий. Для примера, оптическая подводная линия между Англией и Японией покрывает 27 300 км в Атлантическом океане, Средиземном море, Красном море, Индийском океане, в Тихом океане, и имеет 120 000 промежуточных усилителей на

пару волокон. Для сравнения, первый трансатлантический телефонный кабель 1956 г. использовал 36 преобразователей, а первый оптический кабель, проложенный через Атлантический океан, использовал 80 000.

Сегодня, после 30 лет исследований, оптические волокна достигли своих физических пределов.

Кварцевые волокна могут пропускать инфракрасные импульсы на длине волны 1,5 мкм с минимальными потерями 5% на километр. Нельзя уменьшить эти потери из-за физических законов распространения света (законы Максвелла) и фундаментальной природы стекла.

Однако имеется одно достижение, которое может радикально улучшить ситуацию. Это возможность непосредственно усиливать оптические сигналы в волокне, т.е. без необходимости сперва извлекать их из волокон. Путем добавления в материал волокна примесей подходящих элементов, например эрбия, и возбуждения их с помощью подходящего света накачки, пропускаемого через само волокно, можно получить инверсную населенность между двумя уровнями эрбия с переходом, который точно соответствует 1,5 мкм. В результате можно получить усиление импульса света на этой длине волны при его распространении через волокно. Кусок такого активного волокна помещается между двумя концами волокон, через которые распространяется сигнал. С помощью оптического ответвителя в этот кусок направляется и излучение накачки. На выходе остаток излучения накачки выходит наружу, а усиленный сигнал продолжает распространение в волокне. С помощью такого подхода можно исключить промежуточные электронные усилители. В старых системах электронных усилителей свет выходил из волокна, регистрировался фотоэлектрическим приемником, сигнал усиливался и преобразовывался в свет, который продолжал распространяться в следующей секции волокна.

#### Компакт-диски

Одним из самых популярных применений лазеров является их использование в системах записи и воспроизведения компакт-дисков (CD), которые ныне полностью заменили старомодные виниловые диски. Технология оптических дисков берет свое начало в исследовательских лабораториях фирмы Филипс (Нидерланды) в 1969 г. Параллельно исследования в этой области проводились фирмой Сони (Япония). После соглашения обе эти фирмы стали сотрудничать, и в 1982 г. компакт-диски вышли на рынок. В этой системе звуковая информация сначала записывается и преобразуется в серию импульсов, которые представляют первоначальный сигнал (т.е. сигнал оцифровывается). Затем эти импульсы переносятся на поверхность стеклянного диска с помощью сложной техники, использующей лазер, испускающий ультрафиолет. Этот лазер «записывает» последовательность импульсов в виде отверстий на поверхности диска. Каждое отверстие имеет микроскопические размеры с шириной около тысячной миллиметра (0,5 мкм) и глубиной  $1000 \text{ \AA}$ . Таким образом, можно зарегистрировать большой объем информации на очень малой площади диска. Эту предварительную запись используют для изготовления матрицы, с помощью которой изготавливаются пластиковые копии для продажи. Для «считывания» записанной информации диск вращается, и считывание получается с использованием света GaAlAs-диодов, работающих на длине волны 780 нм. Свет диода направляется на диск и отражается той частью поверхности, где нет отверстий, а сами отверстия не отражают свет. Отраженный свет регистрируется подходящим приемником. Сигналы декодируются электроникой с преобразованием в звук (рис. 64). В настоящее время получают лучшие результаты с диодами, работающими в сине-зеленой области спектра.

Уменьшение длины волны позволяет уменьшить размеры отверстий и тем самым записать большую информацию на той же площади диска.

Рис. 64. Схема системы считывания с оптического диска. Свет, излучаемый лазерным диодом, формируется в пучок, который направляется на диск с записанной информацией. Та же оптическая система собирает отраженный свет и посылает его на приемник

Разумеется, реальная система значительно сложнее, чем описано. Используются весьма искусные оптические системы, которые обеспечивают, что лазерный свет всегда нужным образом фокусируется на диск (положение фокуса изменяется не более 0,5 мкм), а диск вращается с постоянной скоростью. На диске также закодированы сигналы номеров содержания диска, продолжительность выбранного трека и всей записи. Эти сигналы служат для выбора желаемого куска информации на диске без необходимости прослушивать всю запись. Принципиальным преимуществом является то, что диск записывается и считывается световым пучком, без какого-либо механического контакта. Поэтому исключаются все царапины и повреждения, характерные для старых пластинок. Более того, можно записывать информацию с избытком, поэтому малые царапины и следы от пальцев часто не сказываются на работе. Разумеется, если грязь и пыль накапливается на диске, он может выйти из строя.

Оптические диски позволяют вообще сохранять огромное количество данных. Наиболее важным применением оптических дисков является т.н. CD-ROM (компакт-диск только для считывания памяти), которые обычны в компьютерах.

#### Медицинские применения

Применение в медицине — одно из интереснейших использований лазеров. Лазеры начинают широко использоваться в биологических исследованиях и в медицинской практике. Большинство применений основано на стандартном коммерчески доступном оборудовании.

Одним из первых применений лазеров стала офтальмология. Фотокоагуляция с потерей зрения, которая может произойти при наблюдении затмения, известна с античных времен. Платон предостерегал людей никогда не смотреть прямо на затмение, так как это могло привести к ослеплению. Это было забыто людьми, наблюдающими взрыв первой атомной бомбы, некоторых из которых были ослеплены вспышкой. В 1950-х гг., до появления лазера, коагуляторы сетчатки глаза использовали свет от ксеноновых дуговых ламп. Действие этого света на сетчатку было таким же, как и действие солнечного света. Одним из первых применений было восстановление отслоенной сетчатки. Врачи использовали ксеноновую лампу для выжигания, которое позволяло вернуть на место отслоенную сетчатку глаза. Естественным было использование лазера для улучшения этой процедуры, и это оказалось успешным!

Фотокоагуляция заключается в следующем. Лазерный свет превращается в тепло с возрастанием температуры приблизительно до 65°. Это повышение температуры приводит к денатурации белка с образованием коагулянта. Таким же способом можно также устранить ненормальные кровеносные сосуды, кисты, опухоли и другие ненормальности в глазу. Это может также обеспечить слипание отслоенной ретины и сосудистой оболочки.

Главной причиной потери зрения людей в возрасте от 20 до 64 лет является болезнь сосудов, в частности диабетная ретинопатия. Причиной потери зрения также является дегенерация роговицы, которая получается или при снижении эффективности сосудистой оболочки, или при чрезмерном

увеличении кровеносных сосудов в центре сетчатки. Во многих случаях коагуляция этих сосудов может стабилизировать эти проблемы.

Одним из пионеров в области лазерной офтальмологии был американец Френсис Эсперанс (Francis L'Esperance Jr.), который работал в Институте глаза (Нью-Йорк, США). После экспериментов с рубиновым лазером он решил, что лазер, генерирующий синее-зеленое излучение, значительно лучше. Поскольку вскоре после рубинового лазера появился аргоновый лазер, работающий как раз на этих длинах волн, то он решил приобрести его. Он узнал, что Компания Raytheon изготовила такой лазер с выходной мощностью 10 Вт для американского правительства, который предполагалось использовать для военных целей. Это было огромное чудовище длиной более 3,5 м! После изготовления этого лазера он стал не нужен правительству и Эсперанс получил его. Лазер был застрахован, и его должны были доставить в лабораторию на девятом этаже. Лазер был слишком велик и не помещался в лифте. Поэтому был нанят лучший такелажник Нью-Йорка, который не ронял ничего в своей жизни. Лазер поднимался из окна. Большая толпа собралась наблюдать подъем. Лазер подняли почти до пятого этажа, но затем «трах, трах», что-то оборвалось, и весь ящик рухнул на землю. Люди были испуганы. Можно было подумать, что кто-нибудь из семьи Эсперанс умер: люди плакали и выражали свое сочувствие.

Френсис отправил разбитый ящик обратно компании и, к удивлению, лазер был работоспособен. Но, разумеется, компания отказалась от гарантии и предложила изготовить другой. К счастью, страховка была выплачена, и Эсперанс смог заказать новый лазер. Спустя некоторое время Raytheon предоставила ему лазер меньшего размера. С ним начались лабораторные эксперименты, которые показали превосходство аргонового лазера над рубиновым лазером.

Первое испытание состоялось 14 февраля 1968 г. Была предпринята попытка устранить бельмо на зрачке у молодой девушки. Операция оказалась успешной, и у девушки полностью восстановилось зрение. В настоящее время аргоновый лазер является стандартным инструментом в офтальмологии. Лазер используется для лечения глаукомы и для коррекции зрения с помощью изменения кривизны роговицы, путем аккуратного испарения тонкого слоя роговицы.

Еще одно применение — удаление камней мочевого пузыря. Обычно камни представляют собой некоторое органическое образование, окружаемое кристаллической субстанцией разной природы (фосфат кальция, мочевая кислота и др.). При прохождении камня из почки в мочеиспускательный канал возникают сильные колики. Кроме удаления камней традиционными хирургическими методами были разработаны альтернативные методы, такие, как фармакологическое растворение и эндоскопическая хирургия. Дробление камней бескровным способом является очень прогрессивным. Обычно используют ультразвук или гидравлические волны, производимые электрическим разрядом вблизи расположения камня. С появлением лазера в 1968 г. стал применяться лазерный метод.

Лазерный свет, направляемый на камень с помощью оптического волокна, испаряет и разрушает его. После дробления фрагменты выходят наружу естественным путем.

Существуют и другие применения лазеров в медицине, например, в хирургии, причем с помощью оптических волокон операция может выполняться в труднодоступных местах. Лазеры также применяются во многих терапевтических процедурах и для диагностики.

Быстрое развитие лазеров ультракоротких импульсов и выпуск на рынок образцов таких лазеров на рынок способствовали быстрому внедрению их в биомедицинскую сферу. В частности, в области

лазерной хирургии излучение в виде ультракоротких импульсов позволяет производить более точные разрезы с существенно меньшими повреждениями окружающих тканей. Такие лазеры также с успехом используются в офтальмологии.

Здесь мы должны остановиться. Хотя говорилось далеко не обо всем, но даже то, что изложено, позволяет понять фундаментальную важность использования лазеров в медицине.

#### Технические применения

Способность сконцентрировать лазерный свет в очень малой области позволяет производить с высокой скоростью и точностью такие технологические операции, как резка, прожигание отверстий, сварка, закалка и др. При этом можно работать с самыми различными материалами, такими, как металлы, керамика, пластмассы, дерево и др. Возможность точно контролировать выполнение таких операций с помощью компьютера делает их совместимыми с роботами, т.е. полностью автоматизировать их.

Лазерные технологии нашли применения в автомобильной и авиационной промышленности.

Использование лазеров для резки, сварки и закалки в производстве автомобилей позволяет существенно повысить их характеристики и снизить стоимость изготовления.

Лазерный пучок можно направить с высокой точностью в заданное место, не вызывая никаких вредных воздействий на окружающий материал. При этом можно достигать трудно доступные места. С помощью лазеров можно производить закалку более эффективно, чем с помощью обычных печей. В то время, как печь должна функционировать круглые сутки, для работы всего лишь в течение нескольких часов, лазер дает энергию только тогда, когда требуется. Автомобильная промышленность была первой, где использовались лазеры для термической обработки распределительных валов, цилиндров и клапанов. При обработке поверхностей лазерным излучением материал подвергается структурным изменениям, и становится прочнее и менее подверженным коррозии.

Лазерная резка используется не только с металлами, но также в текстильной промышленности, например для раскройки материалов, кожи, бумаги или дерева. Электронная промышленность является одной из главных областей применения лазеров. Они с успехом используются в производстве микросхем. С их помощью производится изготовление и очистка печатных схем, пайка элементов и ремонт быстродействующих микросхем путем прецизионного устранения нежелательных соединений в схеме.

Интересным примером является резка алмаза. Иногда требуется разрезать алмаз в направлениях, не связанных с его кристаллическими ориентациями. Обычно алмаз при механической обработке раскалывается по определенным направлениям (плоскости спаянности). Лазер позволяет обойти это ограничение.

Наконец, можно сказать и об использовании лазерных роботов в качестве инструментов или датчиков.

#### Измерительные системы

Свет используется для измерений во многих случаях. Это системы различных интерферометров, позволяющие измерять малые перемещения, контроль поверхности, с высокой точностью порядка длины волны света.

Область оптических, бесконтактных, измерительных систем очень широка. Она простирается от

исследовательских лабораторий до промышленных предприятий. Поэтому имеется большая заинтересованность в разработках и распространении таких систем. Они используются для измерений размеров предметов или их перемещения, для измерения и контроля вибраций, измерения скорости и для контроля состояния поверхности. Для этого удобно использовать лазерные диоды, свет которых можно коллимировать и фокусировать на исследуемый объект.

Система бесконтактного оптического измерения обычно включает три принципиальные части: измерительная головка, система электроники, система регистрации и обработки информации.

Принципиальным преимуществом бесконтактных измерений является полное отсутствие воздействия на объект и высокая скорость измерений, которая в некоторых случаях может превышать 25 000 измерений в секунду.

Обычно профиль линии на некоторой механической поверхности измеряют путем проведения вдоль этой линии некоторого щупа, который касается поверхности, и измерения его смещений. Таким щупом обычно служит алмазная игла, зона контакта которой имеет диаметр несколько мкм.

Вертикальные перемещения иглы, следующие за нерегулярностями поверхности, измеряют, и это представляет рельеф поверхности (шероховатость). Такие инструменты улучшались в течение ряда лет, и в настоящее время они обычны в измерительных лабораториях. Эквивалентный оптический инструмент использует вместо алмазной иглы хорошо коллимированный пучок лазерного диода, который фокусируется объективом на поверхность. Отраженный свет собирается тем же объективом. Этот отраженный свет несет информацию о шероховатости поверхности. Когда система правильно настроена и сбалансирована и точка фокуса находится точно на поверхности, тогда отраженный свет формируется после объектива в хорошо коллимированный пучок. Если поверхность ближе к объективу, тогда пятно на поверхности уже не является пятном совершенной фокусировки, и после объектива формируется расходящийся пучок. Наоборот, в случае, если поверхность находится за точкой фокуса, при отражении получается сходящийся пучок. Существуют оптические устройства, позволяющие точно измерить степень сходимости или расходимости пучка. Соответствующим образом система вырабатывает сигнал ошибки для управления сервомеханизмом (обратная связь), который поддерживает точное фокусирование на поверхность. Знание перемещений сервомеханизма при движении пучка вдоль поверхности дает измерение рельефа. Аналогичная система используется в системах компакт-дисков. Поэтому в ней исключаются влияния нерегулярности поверхности и системы вращения диска.

Оптический профилометр позволяет измерять смещения с точностью до нескольких ангстрем, без прямого контакта с любой механической частью. Как было сказано, этот принцип важен для устройств компакт-дисков. Но он также важен в тех случаях, когда нужно избежать повреждения поверхности, в частности для нежных, хрупких поверхностей, например, резиновых и пластиковых пленок, биологических тканей, полупроводников. Еще одним преимуществом является то, что измерительная часть не изнашивается. Благодаря малому размеру светового пятна получается высокая разрешающая способность и скорость измерения в любом направлении.

Совершенно другим применением является лазерный гироскоп, способный измерять очень малые вращения. Первые такие гироскопы были сделаны в 1963 г. и стали развиваться с 1965 г. Принцип действия был установлен французским физиком Саньяком (1869—1928), который в 1913 г. отметил, что пучки света, распространяющиеся в противоположных направлениях по замкнутому кольцу,

можно использовать для измерения вращения этого кольца. В самом деле, если точка, из которой пучки начинают свое распространение, движется по кольцу, то эти пучки должны проходить разные пути вдоль кольца до точки возврата. Этот факт легко установить с помощью интерферометра. В 1965 г. были построены лазерные гироскопы, способные обнаружить скорость вращения менее  $5^\circ$  за час. Подобные гироскопы и другие более совершенные версии их были установлены на самолетах Боинг 757 и 767. Такие гироскопы являются необходимой частью систем наведения.

#### Оптические считыватели информации в торговле

В настоящее время в каждом супермаркете и в большинстве магазинов используется система чтения универсального кода. Лазерная система читает код, записанный на товарах в виде системы линий (штрих-код). Преимущества этой системы в ускорении контроля цен и уменьшения ошибок при расчетах очевидны. Лазерный свет направляется на картину символов, последовательности параллельных линий, черных и белых разной толщины. Он частично отражается, и его интенсивность оказывается промоделированной этой последовательностью линий. Отраженный свет собирается той же системой, что и излучает свет, и из этой модуляции получается информация о виде товара и его цене, которая выводится на дисплей кассового аппарата.

#### Применения в строительстве

Очень часто лазер используется для проверки прямизны зданий. Способность лазерного пучка, по своей природе, распространяться прямолинейно сразу же дает такую возможность. Трудность была лишь в том, чтобы иметь достаточно компактный лазер, работающий в непрерывном режиме в видимом диапазоне. Таким лазером стал красный He-Ne-лазер. В конце 1960-х гг. системы с этим лазером использовались при прокладке туннеля в Сан-Франциско. После этого одна из фирм, производящая He-Ne-лазеры, желая привлечь покупателей к новой технике, стала окрашивать свои изделия в яркий желтый цвет, так что они стали выглядеть как обычное оборудование, применяемое в строительстве.

Подобные лазерные системы стали применяться в топографических измерениях, для прокладки дренажных труб и выравнивания их наклона, труб, используемых в сельском хозяйстве для орошений. Такие лазеры также используются при прокладке дорог. С их помощью направляются тяжелые машины, подготавливающие грунт и укладываемые покрытие дороги. Точность при ручном контроле не превышает 2 см, а при автоматическом контроле может быть доведена до 5 мм. Искривления могут быть аккуратно проконтролированы по вертикали и по горизонтали.

#### Атмосфера

Лазеры позволяют изучать атмосферу. Устройство, используемое для этого, называется лидаром. В лидаре, также как и в радаре, регистрируется и измеряется свет, рассеянный в обратном направлении молекулами или частицами (аэрозолями, каплями воды и др.) в атмосфере. В простейшей системе регистрируется свет, пришедший обратно, и по нему идентифицируется наличие в атмосфере водяных капель, облаков, частиц дыма и др. Таким способом можно получить профили изменения концентраций по высоте, а также изменения их во времени. При использовании лидара, работающего на двух разных длинах волн, можно также обнаружить и измерить концентрацию определенного газа. Одна длина волны подбирается для полосы поглощения этого газа, а другая располагается в области прозрачности. Разумеется, в этом случае возвращенные сигналы будут различными (непоглощенный сигнал будет сильнее). По разности сигналов можно обнаружить искомым газ и

измерить его концентрацию. Такие лидары называются DIAL (лидар с разностным поглощением). Они были установлены в некоторых городах для измерения загрязняющих примесей, таких, как пестициды, дым (смог), и газов SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, NO, выбрасываемых в атмосферу промышленными предприятиями.

Загрязнение атмосферы городов имеет типичные источники. Ими обычно являются выхлопные газы, а также выбросы предприятий и результат сжигания отходов. Контроль и идентификация всех этих загрязнений необходимо для понимания их происхождения и для принятия мер по их уменьшению. В Европе были проведены мероприятия по измерению городских загрязнений. В Лионе (Франция) лидар типа DIAL был установлен вблизи кафедрального собора для измерений NO, выделяемого автомобильным движением в центре города. Наибольшая концентрация была обнаружена в старой части города, где движение медленней, а вентиляция улиц затруднена. Эти результаты указали, что в этой части города следует установить пешеходную зону. В Штутгарте (Германия), который окружен несколькими холмами, при некоторых условиях наблюдается скапливание воздуха, загрязненного автомобильным движением (главным образом в результате NO), на высоте 450 м. В Берлине выбросы SO<sub>2</sub> оказались сильнее в восточной части города из-за низкого качества угля, который используется для отопления, а в районе Александрплатц концентрация оказалась ниже, поскольку ее сдувает юго-восточный ветер. Концентрация SO<sub>2</sub> является существенной причиной кислотных дождей. Она появляется при смоге, в результате обогрева домов, выбросами автомобилей и тепловых электростанций. Это было измерено в Лейпциге. Было показано, что главная проблема — автомобили и обогрев домов.

Такие измерения показали, что топографические и метеорологические условия часто играют более важную роль, чем интенсивность выделения загрязнений: в узких улицах с медленным движением загрязнение сильнее, чем в широких, проветриваемых магистралях даже с интенсивным движением. Летом 1994 г. в Афинах Европейским Сообществом была проведена кампания для выявления фотохимических и метеорологических процессов, которые ответственны за летние туманы в этой области. Была установлена существенная роль химических реакций между NO, образующимся при автомобильном движении, и NO<sub>2</sub> и озоном.

Важным применением лидаров является измерение концентрации озона (O<sub>3</sub>) в стратосфере над Антарктикой и Арктикой. Знание концентрации и распределения озона в атмосфере имеет важное значение как для проблемы загрязнений, так и для химических процессов в тропосфере.

Концентрация озона влияет на климат из-за экранирования ультрафиолетового солнечного излучения и термических и химических равновесий в стратосфере. Дело в том, что озон, присутствующий в верхних слоях атмосферы, поглощает солнечное ультрафиолетовое излучение, которое имеет вредное биологическое действие, тем самым слой озона защищает поверхность Земли от чрезмерного воздействия вредного ультрафиолета. Хорошо известно, что в течение последних нескольких лет наблюдалось постоянное уменьшение толщины озонового слоя над полюсами (т.н. «озоновая дыра»). Эта дыра получается в результате химических реакций с некоторыми летучими продуктами, связанными с индустрией (например, газ фреон, используемый в холодильниках, или в аэрозольных баллончиках). Вертикальное распределение озона, которое определяет развитие «дыры» в пространстве и во времени, было измерено с помощью лидаров.

Лидар может быть использован для измерений скорости ветра, что необходимо для метеорологии и

разработок моделей климата, а также для измерения скорости аэрозолей, дыма и пр. В этом случае используется эффект Доплера, заключающийся в малых изменениях частоты света, испускаемого движущимися телами, или отраженного от них. Измеряя эти изменения частоты отраженного (рассеянного в обратном направлении) света тем или иным способом, можно получить информацию о скорости. Соответствующий инструмент называется доплеровским лидаром.

С помощью лидара можно изучать конвекционные явления в облаках. Облака отражают и переизлучают инфракрасное излучение, несущее тепло. Они важны для нагрева и охлаждения атмосферы, но никто не знает, как описать их влияние. Можно также изучать водяные пары, которые играют роль в образовании ураганов. Путем измерения изменений в спектрах молекул кислорода получается информация об атмосферном давлении и температуре.

Аналогичные методики можно использовать и для морских измерений, например для измерений количеств хлорофилла и фитопланктона. Важность таких измерений очевидна, так как фитопланктон поставляет около двух третей поступающего в атмосферу кислорода. Загрязнения воды разлившейся с кораблей нефтью и другие загрязнения, а также температуру воды и ее соленость также можно измерять.

Можно также изучать явления сгорания. Целью исследовательских программ в этой области является разработка диагностических методик контроля процессов сгорания в промышленных предприятиях. Можно измерять температуру, концентрацию и скорость различных газов, а также размеры частиц дыма.

Для всех этих измерений используются лазеры самых разных типов, в зависимости от определенного применения: рубиновые, неодимовые, на красителях, диодные и др. Их стоимость может изменяться в широких пределах, они могут быть как стационарными, так и портативными, для установки на различные транспортные средства.

Адаптивная оптика

Мы теперь опишем несколько применений, которые, на первый взгляд, могут показаться из научной фантастики. Одно из них — т.н. адаптивная оптика.

Адаптивная оптика улучшает качество изображения в больших телескопах путем компенсации искажений, вызываемых атмосферой, т.е. искажений световых пучков при их прохождении через атмосферу. Такие искажения можно легко видеть, если, например, в жаркий день наблюдать пейзаж при заходящем солнце. Изображение кажется дрожащим (марево). Адаптивная оптика компенсирует эти искажения, и поэтому ее иногда называют «методикой, которая останавливает мерцание звезд».

Это определение может вызвать возмущенную реакцию: «Но это ужасно, и должно быть запрещено!»

Давайте посмотрим, что получается на самом деле. Звезды расположены настолько далеко от Земли, что их свет приходит к нам в виде плоских волн (плоский волновой фронт). В теории телескоп снабжен совершенной оптикой, которая концентрирует свет в маленький, яркий кружок, размеры которого ограничены лишь явлениями дифракции, т.е. действием диаметра главного объектива или зеркала на падающую на него волну. Две близкие звезды можно видеть отчетливо отдельными, если угол, под которым они видны в телескоп, больше минимального значения угла, при котором оба ярких пятна, каждый из которых производится звездой, сливаются в одно пятно. Этот минимальный угол называется угловым разрешением. Лорд Рэлей дал критерий, определяющий эту величину.

Угловое разрешение телескопа порядка угловых секунд определяется постоянством времени волнового фронта для волны, преобразуемой входной апертурой телескопа. Так космический телескоп «Хаббл» на орбите вокруг Земли имеет диаметр телескопа 2,4 м, и угловое разрешение, близкое к 0,05 угловых секунд. На Земле такой же 2,4 м телескоп имеет угловое разрешение в 20 раз хуже из-за искажений в атмосфере.

Телескопы строятся с большими апертурами, т.е. с зеркалами большого диаметра (до нескольких метров), с поверхностью, обработанной с высокой точностью (до долей длины волны). Гигантские собиратели света дают возможность обнаруживать и изучать свойства очень слабых (удаленных) объектов, именно из-за того, что их огромные входные апертуры могли собрать слабый свет, испускаемый объектом. Более того, телескопы с высоким разрешением позволяют разглядеть больше деталей наблюдаемых объектов. К сожалению, малые флуктуации температуры атмосферы вызывают флуктуации коэффициента преломления воздуха. Это, в свою очередь, приводит к тому, что разные части первоначального волнового фронта проходят несколько различные пути, и изображение в телескопе, соответственно, размывается. О таких аберрациях мы уже говорили. Изображение диска звезды, получаемого с помощью телескопа с диаметром 4 м, установленного на земле типично в 40 раз больше того оптимального размера, который должен был бы получаться согласно теории дифракции. Технически это обозначается, как когерентный диаметр атмосферы, и его значение обычно составляет 10—20 см. Тот факт, что фотоны от далекого объекта разбрасываются по пятну в 40 раз большего, чем дифракционный предел, означает, что интенсивность изображения в 40<sup>2</sup> раз меньше. Поэтому даже хотя большие телескопы с апертурой, большей, чем когерентный диаметр атмосферы, могут собрать больше фотонов, это ничего не дает в смысле увеличения разрешения. Критики могут интерпретировать этот факт как то, что величайшие телескопы мира имеют чрезмерную стоимость.

Исаак Ньютон писал в 1730 г. в своей книге *Opticks*:

«Если Теорию изготовления Телескопов можно было бы продолжить к Практике, то даже и в этом случае были бы некоторые Пределы, которые нельзя перейти при изготовлении Телескопов. Воздух, через который мы смотрим на Звезды, находится в состоянии вечного Дрожания; как мы можем видеть дрожащее движение Теней, отбрасываемых высокими Башнями, и мерцанием Звезд. Но эти Звезды не мерцают, когда их наблюдают через Телескопы с большими апертурами. Лучи Света, которые попадают на разные части апертуры, дрожат сами по себе, с разным и иногда противоположным действием. Они падают в одно и то же время на разные места сетчатки глаза, и их дрожащие Движения слишком быстры и смешиваются, а не воспринимаются раздельно. И все эти освещаемые Точки создают одну широкую яркую Точку, составленную из этих многих дрожащих Точек, спутано и неразлично смешанных друг с другом за счет очень коротких и быстрых Дрожаний. Из-за этого Звезда кажется более широкой, чем на самом деле, и совсем без дрожания. Длинные Телескопы могут сделать объект более ярким и большим, в отличие от того, что могут сделать короткие телескопы, но и они не могут устранить размытия Лучей, которые вызываются Дрожанием в Атмосфере. Единственным Средством является прозрачный и спокойный Воздух, такой, который, пожалуй, может быть найден на вершинах высочайших Гор, выше высочайших Облаков».

Очевидно, что необходимы какие-нибудь системы, чтобы исправить эффекты возмущения

атмосферой, известные со времен Ньютона. Такой системой является адаптивная оптика.

Исторически можно сослаться на первый пример использования адаптивной оптики Архимедом в 215 г. до н. э. для уничтожения римского флота. Когда римский флот приблизился к Сиракузам, солдаты, выстроенные в линию, смогли сфокусировать на корабли солнечный свет, используя свои щиты в качестве зеркал. Таким способом сотни пучков солнечного света направлялись на малую область корабля. Интенсивность была достаточной, чтобы поджечь его. Таким образом, как гласит легенда, удалось предотвратить атаку вражеским флотом. Эта оригинальная идея вошла в легенду как «сжигающее зеркало» Архимеда.

В 1953 г. Бабкок, который в то время был директором астрономической обсерватории Маунт Вилсон в Калифорнии, предложил использовать деформируемые оптические элементы, управляемые датчиками волнового фронта, для компенсации искажений изображений в телескопе, которые вызываются атмосферой. Это, по-видимому, самое первое научное предложение использовать адаптивную оптику.

Большинство пионерских работ по адаптивной оптике были выполнены американскими военными в 1970-х и 1980-х гг. Они были заинтересованы в применениях, связанных с распространением лазерных пучков в атмосфере, для лучшего определения положений спутников и для лучшего управления полетом ракет. Эти исследования были строго засекречены. Первая система адаптивной оптики была в 1982 г. установлена (и до сих пор работает) Военно-Воздушными Силами на Гавайях. В астрономии экспериментальные системы адаптивной оптики начали развиваться с начала 1980-х гг., когда большинство военных работ было все еще засекречено. Две исследовательские программы, одна, включающая астрономов, и другая, относящаяся к военным, развивались параллельно, без взаимного обмена информацией. Первоначально был скептицизм относительно полезности этой техники, и было трудно получить финансирование. В 1991 г. ситуация изменилась. Большинство материалов было рассекречено, и телескопы стали давать более четкие изображения в результате адаптивной оптики. С тех пор военные и академические работники действовали сообща.

Рис. 65 показывает общую схему телескопа, в котором используется адаптивная оптика. Датчик волнового фронта фиксирует волновой фронт проходящей волны для того, чтобы измерить величины нужных локальных деформаций. Система обработки информации превращает ее в сигнал, который сразу же можно использовать для коррекции волнового фронта.

Рис. 65. Схема системы адаптивной оптики. Свет, направляющийся в телескоп, сперва попадает на подвижное зеркало M1, которое корректирует наклон волнового фронта. Затем оставшиеся aberrации исправляются деформируемым зеркалом M2, и исправленная волна направляется на приемник C. Часть света собирается наклонными зеркалами S1 и S2 для получения сигналов, нужных для управления зеркалами M1 и M2

Коррекция, в реальном времени, должна произвести искажение, равное и противоположное по знаку тому, которое вызывается атмосферой. Эта операция должна быть повторяемой с той же быстротой, с какой происходят изменения в атмосфере, типично между 10 и 1000 раз в секунду. В реальной системе такая коррекция делается с помощью деформируемого зеркала, представляющего собой тонкую мембрану, форма которой контролируется набором пьезоэлектрических толкателей, прикрепленной к задней стороне.

Информация об искажении волнового фронта можно получить от самого объекта (цели), если он

является точечным источником (звезда) и достаточно яркая — ярче звезды шестой величины (самая слабая звезда, различимая невооруженным глазом). Однако многие объекты, интересные для астрономов, не являются точечными источниками, а представляют собой протяженные объекты (такие, как планеты или туманности), более чем в тысячи раз слабее звезды шестой величины. В этих случаях можно использовать ближайшую звезду, чтобы определить опорный волновой фронт, но свет должен проходить через тот же участок атмосферы, через который проходит свет от изучаемого объекта. Это означает, что такая опорная звезда должна быть внутри угла около 2 угловых секунд. Это соответствует очень малой части неба, в которой трудно найти достаточно яркую звезду. Таким образом, остается единственная альтернатива: искусственно создать путеводную звезду (маяк), ярче шестой величины.

Здесь лазер вступает в действие. Такой искусственный источник получается путем освещения мощным лазером некоторой области в верхних слоях атмосферы, где имеются вещества, которые при освещении их способны переизлучить свет. Натрий, который присутствует в достаточной концентрации в атмосфере между 80 и 100 км, можно использовать с этой целью. Для возбуждения натрия (D-линия) используется лазер с длиной волны 5890 Å. Системы с такими опорными звездами были, например, построены в обсерваториях в Альбукерке (Нью Мексика, США), в Калар Альто (Испания), и в Ликской обсерватории (Калифорния, США).

Вскоре астрономы смогут измерять диаметры звезд ярче, чем десятой величины; наблюдать пятна на их поверхности и измерять изменения в положении, позволяющих судить о наличии планет вокруг них. Огромный достигнутый прогресс позволяет нам верить, что удастся также увидеть планеты вблизи удаленных звезд. Эти планеты нужно увидеть на фоне рассеянного света самой звезды, вокруг которой они вращаются (различие в яркостях 10<sup>9</sup>). С другой стороны, в исследованиях по поиску планет можно использовать саму звезду в качестве опорного источника. Следующее поколение наземных телескопов даст возможность обнаружить планеты, вращающиеся вокруг некоторых из ближайших к нам звезд.

### Спектроскопия

Если мы теперь обратимся к более фундаментальным применениям, нам следует упомянуть спектроскопию. Когда были изобретены лазеры на красителях и стало очевидным, что их длины волн можно широко изменять в некотором заданном диапазоне, сразу же было осознано, что они являются идеальными источниками для спектроскопии. Эти лазеры обеспечили новые уровни чувствительности и разрешения. Взрыв использования лазеров в спектроскопии произошел в 1970-х гг. Например, лазер может испарить мельчайшее количество вещества исследуемого образца, обеспечивая исключительно прецизионный микроанализ. Ряд очень квалифицированных исследователей использовали лазеры для спектроскопии; среди них Шавлов, который в 1981 г. получил Нобелевскую премию по физике за разработку лазерной спектроскопии.

Спустя некоторое время было показано, что можно обнаруживать, контролировать и манипулировать отдельными атомами. В одном из экспериментов одиночный атом цезия был зарегистрирован и идентифицирован из сосуда, содержащего 10<sup>18</sup> других атомов. Атомы с помощью лазеров можно охладить до температур, которые выше абсолютного нуля лишь на одну миллионную градуса. С помощью ультракоротких импульсов лазерного излучения можно изучить детали событий, происходящие при химических реакциях молекул, с точностью до времени, с которым электрон

обращается вокруг атомного ядра. В 1997 г. Нобелевскую премию по физике получили К. Коен-Таннуджи, С. Чу и В.Д. Филипс за их вклад в разработку методов охлаждения и захвата атомов в ловушки с использованием лазеров, отмечая их мастерство в использовании спектроскопических методов для достижения их результатов.

### Геофизика

Геофизики используют спутники, способные отражать свет в обратном направлении (с уголковыми отражателями) для измерения движений земной коры. Путем измерения времени, которое требуется лазерному импульсу, чтобы дойти до спутника и вернуться обратно, можно измерить с очень высокой точностью расстояние между лазером и спутником. Если спутник находится на стационарной орбите, так что его расстояние до Земли не изменяется, то этот метод позволяет измерить малые перемещения места, на котором установлен лазер. Это позволяет измерять дрейф континентов.

Континенты плавают по расплавленному внутреннему слою Земли, как плиты земной коры. Эти плиты сталкиваются друг с другом, вызывая землетрясения, появление островов и извержения вулканов. Поэтому измерения дрейфа континента имеют огромную важность. Спутниковая программа LAGEOS (лазерный геодинамический спутник) дала в 1970-е гг. доказательства дрейфа континентов. В настоящее время эти измерения продолжают со вторым спутником такого типа. Например, были выполнены измерения вдоль линии разлома в Калифорнии. С помощью измерения таких малых перемещений делаются попытки предсказать землетрясение, прежде чем оно случится. С помощью такой же методики можно проследивать, как Земля вращается вокруг оси и изменяет свою форму.

### Лазер и Луна

Bell Labs использовала один из первых лазеров для исследований рельефа поверхности Луны. Во время экспедиции Аполлон 11, отправленной на Луну 21 июля 1969 г., астронавты установили на ее поверхности два уголковых отражателя, способных отражать лазерный свет, посланный с Земли[16]. Группа астрономов Ликской Обсерватории в Калифорнии послала на Луну мощный пучок рубинового лазера, что позволило измерить расстояние Земля—Луна с точностью, намного превышающей точность обычных астрономических наблюдений.

Лазерный альтиметр был использован в проекте MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter), чтобы получить трехмерное глобальное изображение Марса.

### Гравитационные волны

В 1919 г. Эйнштейн предсказал, что движущиеся массы производят гравитационные волны, распространяющиеся со скоростью света. К сожалению, амплитуда такого гравитационного излучения, испускаемого любым источником, созданным в лаборатории, слишком мала, и гравитационные волны нельзя обнаружить. С другой стороны, астрофизические явления, которые могут вовлекать огромные массы с релятивистскими скоростями, могут произвести гравитационное излучение, которое поддается измерению. Косвенные доказательства наличия существования гравитационных волн были найдены, и за это Алан Рассел Хале (г. р. 1950) и Жозеф Хутон Тейлор (г. р. 1941) получили в 1993 г. Нобелевскую премию по физике. Однако прямые, определенные доказательства все еще отсутствуют. Гравитационные волны возникают от ускоренных масс способом, во многом подобным испусканию электромагнитных волн ускоренными зарядами. Они

воздействуют на массы, растягивая их в одном направлении и сжимая в другом, перпендикулярном, направлении.

Когда гравитационная волна проходит, она может привести массу в колебательное движение, вверх-вниз, подобно океанским волнам. Чтобы обнаружить гравитационные волны, необходимо измерить такое движение.

В принципе смещения, производимые гравитационной волной, можно было бы измерить с помощью большого цилиндра, изолированного от внешних воздействий. Он резонировал бы механически на частоту гравитационной волны. Чувствительные датчики преобразуют эти колебания в сигналы, которые можно измерить. Первый детектор на основе резонансного цилиндра был сконструирован в конце 1950-х гг. Джозефом Вебером, о котором мы уже говорили, когда обсуждали мазер. Вебер изготовил алюминиевый цилиндр весом несколько тонн, который резонировал на частоте около 1 кГц. Он объявил, что получил положительные результаты, но никто не подтвердил их. Затем другие детекторы подобного типа были построены в ряде институтов во всем мире. Лучшие из этих устройств способны зафиксировать смещение на уровне 10—12. Но это все же оказалось недостаточным, чтобы обнаружить гравитационные волны, если только они не возникают достаточно близко и в результате крайне сильных астрономических событий.

Альтернативный способ детектировать гравитационные волны заключается в измерении времени, которое требуется свету для прохождения между двумя зеркалами, которые располагаются на двух тяжелых маятниках. Они могут колебаться под действием гравитационной волны. Этот метод включает сравнение времен прохождения двух лазерных пучков, которые распространяются под прямыми углами в интерферометре Майкельсона (подобно тому, как он использовался для измерений скорости света в двух, взаимно перпендикулярных направлениях). Гравитационная волна должна сжимать один путь, делая его короче и растягивать другой, делая его длиннее. Рис. 66 показывает возможную схему. Эксперименты начались в 1970-х гг. Если интерферометр имеет длину плеча 4 км, типичная гравитационная волна изменит его длину, менее чем на 10—14 часть, что составляет одну тысячную размера атомного ядра. В интерферометре свет проходит много раз между неподвижным зеркалом и зеркалом, подверженном смещению. В результате разница в длинах суммируется многократно.

Рис. 66. Интерферометр, предназначенный для обнаружения гравитационных волн, включает четыре зеркала S1, S2, S3, S4, укрепленных на тяжелых маятниках, изолированных от внешних (земных) воздействий. Эти зеркала обеспечивают распространение лазерного света в двух взаимно перпендикулярных направлениях, по путям S1S2 и S3S4. Лазерный пучок расщепляется на две части с помощью полупрозрачного зеркала Sp и после пробегов много раз между парами зеркал попадает на приемник D. Если приходит гравитационная волна, то она действует на маятники, изменяя длины путей в плечах интерферометра с противоположным знаком. Эти изменения, составляющие малую часть длины волны лазера, могут изменить условия интерференции, которая регистрируется приемником. Тем самым будет зарегистрировано действие гравитационной волны на массы маятников

Интерферометры такого типа были построены в разных частях мира. Вебер уже в 1970-х гг. понимал, что лазерный интерферометр может быть более чувствительным, чем подход, основанный на использовании цилиндра. Идея лазерного интерферометра для обнаружения гравитационных волн

была независимо выдвинута российскими учеными М. Герштейном и В. Пустовойтом из Московского университета и Р. Вайсом из MIT (США). Первый интерферометр был построен в 1978 г., а в 1983 г интерферометр длиной 40 м был установлен в Калифорнийском технологическом институте. Подобные же интерферометры существуют в настоящее время в Италии, Германии и Японии. Недавно было спроектировано даже более мощное устройство с интерферометром длиной 4 км, помещаемого в туннель для защиты распространения света. Две установки с такими интерферометрами были реализованы в Хэнфорде (штат Вашингтон) и в Ливингстоне (штат Луизиана). Эти интерферометры обозначаются как LIGO (Laser Interferometer Gravitational wave Observatory). Они обладают чувствительностью в одну часть на 10<sup>15</sup>, которую можно увеличить в 100 раз. Работы по этому проекту продолжаются с августа 2002 г.

В Италии такое исследование очень активно. В рамках итало-французского проекта VIRGO был построен интерферометр длиной 3 км вблизи Пизы. Он был официально открыт в июле 2003 г. Астрофизические аспекты LIGO и VIRGO заключаются в том, что со временем они смогут обнаружить гравитационные волны, производимые сильно релятивистскими событиями, такими, как столкновениями двух черных дыр, поскольку до сих пор никаких определенных сигналов не было зафиксировано.

Германские и Британские физики построили устройство вблизи Ганновера длиной 600 м, названное GEO 600, а меньшее устройство длиной 30 м (ТАМА детектор) установлено вблизи Токио.

#### Лазеры ультракоротких импульсов

С помощью специальных методик можно создать импульсные лазеры, испускающие импульсы излучения, длительность которых всего лишь несколько единиц 10—15 с (фемтосекунд). Эти времена столь коротки, что их можно сравнить с временами обращения электрона вокруг атомного ядра. С такими импульсами можно исследовать химические, биологические, физические явления и др. Продолжительность этих импульсов соответствует длинам распространения света, порядка размеров некоторых молекул. Используя такие импульсы, группа химиков, например, изучила свойства фотохроматических стекол[17].

Эти материалы знакомы тем, кто пользуется солнечными очками с изменением своего пропускания в зависимости от интенсивности солнечного света. Эта группа показала, что изменения в пропускании происходят за счет модификации структур молекул, причем эти модификации происходят за времена нескольких пикосекунд. Ультракороткие лазерные импульсы также находят применения в промышленности при лазерной обработке металлов.

#### Нелинейная оптика

До появления лазеров, прозрачные оптические материалы рассматривались, по существу, как пассивные объекты, не влияющие на проходящий через них свет. Высокая мощность лазерных пучков, впервые, позволила наблюдать, что присутствие света само по себе может влиять на среду. Интенсивный свет может, например, изменить показатель преломления среды или ее поглощение. Когда это происходит, свет сам испытывает это изменение, так, что уже конечный результат больше не является независимым от интенсивности света, но имеет сложную зависимость от нее. В таких случаях говорят о нелинейной оптике.

Нелинейный отклик материала может преобразовать лазерный свет в новые цвета. Эта возможность крайне важна в практическом отношении, так как хотя даже существует множество лазеров, любой

лазер обычно генерирует только одну или несколько близко расположенных частот, и немногие типы лазеров коммерчески доступны. Поэтому потребность иметь новые длины волн и изменять их вызывает усиленный интерес к возможностям, которые, в этом отношении, открывает нелинейная оптика.

Наблюдения, что интенсивный свет может вызывать изменения, которые сами воздействуют на свет, первоначально возникли как проблема пропускания мощных лазерных пучков через оптические материалы. В зависимости от свойств материала, свет может либо самофокусироваться [18], либо самодефокусироваться. В первом случае это может привести к разрушению материала, во втором случае это приводит к порче самого пучка. Позднее эти свойства были использованы в устройствах информатики, для создания переключателей света, ответвителей, и для обработки информации.

Нелинейный отклик материала может быть очень быстрым, часто порядка пикосекунды.

Изменение показателя преломления, индуцированное светом, может само служить для получения особых световых импульсов, называемых солитонами. В оптических волокнах солитоны представляют импульсы света, которые остаются сами собой с неизменной длительностью, вопреки явлению дисперсии, которое обычно уширяет длительность импульса. Импульс света получается из сложения лучей разного цвета, которые из-за дисперсии распространяются с разными скоростями, так что при прохождении некоторого расстояния импульс уширяется. Если импульс достаточно яркий, то наведенная нелинейность в точности компенсирует этот эффект, и импульс может распространяться в волокне на тысячи километров без изменения своего временного профиля (формы импульса).

Существует солитон другого вида, т.н. пространственный солитон, в котором нелинейность в точности компенсирует эффект дисперсии, который вызывает поперечное увеличение диаметра пучка светового импульса при его распространении. Такой пространственный солитон может проходить большие расстояния без изменения своих пространственных размеров.

Свойства солитонов и их взаимодействие делает такие импульсы пригодными, в частности, для создания таких устройств, как световые переключатели, ответвители; их, тем самым, можно использовать для передачи в оптических волокнах. В будущем солитоны могут составить основные элементы оптических компьютеров.

### Квантовая криптография

Теперь мы рассмотрим одно из наиболее курьезных и интригующих применений лазеров, квантовой оптики и квантовой механики: т. н. квантовую криптографию. Это одно из фантастических применений, которое стало возможным благодаря лазерам и законам квантовой механики.

Квантовая криптография является новым методом засекречивания передачи информации. В отличие от обычных методов криптографии, в квантовой криптографии зашифровка передаваемой информации осуществляется благодаря законам физики. Криптография имеет долгую и замечательную историю в военном деле и в дипломатии, со времен античной Греции. В настоящее время секретность информации становится очень важной и для коммерческой деятельности. В добавок к практическим возможным применениям, квантовая криптография иллюстрирует несколько интересных аспектов квантовой оптики, включая роль принципа неопределенности Гейзенберга в оптических измерениях и двухфотонной интерферометрии.

Первые методы криптографии использовали секретный код (ключ) для зашифровки послания перед

его отправкой и для расшифровки при получении. Секретность этих методов часто оказывается под угрозой из-за похищения кода, или анализа, который приводит к расшифровке кода, или ошибок, т.е. всего, что ломает код. Самые современные методы не используют секретный код, а основаны на математических изощренных методах, с помощью которых раскрытие содержания послания представляет результат поиска всех возможных комбинаций, чтобы найти правильную. В любом случае секретность этих методов может быть взломана неожиданными успехами математических технологий расшифровки или увеличения быстродействия компьютеров.

Квантовая криптография использует секретный ключ для кодирования и декодирования информации, которая передается по открытым каналам, но сам ключ не передается обычным способом. Один из методов квантовой криптографии устанавливает идентичные ключи в двух разных местах без передачи какой-либо информации. Хотя это может показаться невозможным с точки зрения классической физики, это становится возможным благодаря нелокальным свойствам двухфотонного интерферометра. В другом методе, с другой стороны, ключ посылается в форме одиночных фотонов, а принцип неопределенности квантовой механики обеспечивает невозможность несанкционированного перехвата информации.

Все методы квантовой криптографии основаны на принципе, что в квантовой механике любое измерение возмущает систему непредсказуемым образом. Объяснить в деталях, как это удивительное применение работает, не легко. Мы ограничимся представлением некоторых идей случая, в котором используется т.н. метод двухфотонной интерферометрии.

Рассмотрим рис. 67. Два человека, Алиса и Боб, находятся на большом расстоянии друг от друга, и имеют два одинаковых интерферометра, в которых используются два полностью отражающих и два частично отражающих зеркала, как показано на рис. 67. Один фотон, который приходит на один из двух интерферометров, например на левый, имеет, согласно квантовой механике, две возможности: либо прямо распространяться от  $S'1$  до  $S'2$  либо, следуя путем  $S'1$ ,  $S'2$ ,  $S'3$ ,  $S'4$ . Если эти два пути очень отличаются друг от друга, то интерференция не происходит, и поэтому в первом случае фотон идет в направлении 2A, в то время как во втором он идет в направлении 2B. То же самое происходит и для фотона, который попадает на другой интерферометр. Возможные результаты A и B обозначены, как 1A и 1B для правого интерферометра, и 2A и 2B для левого интерферометра, чтобы различать их.

Рис. 67. Метод двухфотонной интерферометрии. Два интерферометра I1 и I2 включают четыре зеркала  $S4$ ,  $S3$ ,  $S'4$ ,  $S'3$  (полностью отражаемых) и четыре зеркала  $S1$ ,  $S2$ ,  $S'1$ ,  $S'2$  (полупрозрачных). Выходы 1A и 2A представляют, например, бит 0, тогда как выходы 1B и 2B представляют бит 1. Теперь главный момент! Одной из возможностей нелинейной оптики является получение новых цветов света, которые получаются из-за того, что в нелинейном материале два фотона, имеющие некоторые частоты, т.е. некоторые энергии, сливаются в один фотон, энергия которого является суммой двух фотонов, и поэтому его частота является суммой двух частот. Если оба фотона имеют одну и ту же частоту, тогда новый фотон имеет удвоенную частоту. Это явление известно как генерация второй гармоники. Если два фотона имеют разные частоты, тогда говорят о параметрическом эффекте. Также возможно получить другой, обратный, процесс, в котором фотон при нелинейном взаимодействии распадается на два фотона, каждый из которых, имеет частоту, в точности равной половине частоты первоначального фотона. Этот процесс называют даун-

конверсией. Законы этого процесса гарантируют, что оба фотона испускаются в одно и то же время, несмотря даже на то, что квантовая механика (принцип неопределенности) не допускает знание точного момента, когда они испускаются, так как их энергии точно известны.

Теперь предположим, что источник, который испускает эти фотоны, размещается посередине между двумя наблюдателями. Процесс может проходить так, что один фотон посылается на правый интерферометр, а другой на левый. Если приемники, справа и слева, отрегулированы так, чтобы давать сигнал только тогда, когда на них поступает фотон, тогда условие, что два фотона испущены одновременно, означает, что если фотон зарегистрирован в 1А, то другой должен быть зарегистрирован в 2А, и наоборот, если он зарегистрирован в 1В, то второй должен быть зарегистрирован в 2В. Алиса и Боб не обменивались никакими сигналами, но если Алиса зарегистрировала фотон в 1А, то она знает, что Боб также зарегистрировал фотон в 2А. Таким образом, оба наблюдателя имеют один и тот же сигнал, без обмена информацией. Если теперь фотон, зарегистрированный в А, представляет информацию бита «0», а фотон, зарегистрированный в В, представляет бит «1», то наблюдая случайную последовательность фотонов, испускаемых источником, оба наблюдателя получают одну и ту же случайную последовательность знаков 0 и 1, которая включает в себе секретный код, которым передается и читается послание. Никакой информации не посылается между Алисой и Бобом, чтобы установить этот секретный код, поскольку выход с интерферометра не определен до тех пор, пока не сделано измерение.

На этом этапе квантовая механика требует, что если правый интерферометр измеряет фотон через 1А, то левый интерферометр должен зарегистрировать его через 1А. Если кто-нибудь захочет вставить свои фотоны в линию передачи от источника к одному из интерферометров, то очевидно, что вставленный фотон не будет зарегистрирован ни одним из интерферометров, так как отсутствует совпадение сигналов. Такой фотон просто не влияет на секретный код, установленный двумя наблюдателями.

Системы криптографии, такие, как только что описанная, или основанные на экспериментах другого вида, были экспериментально продемонстрированы и выглядят весьма обещающими.

#### Захват атомов

В 1997 г. Нобелевская премия по физике была присуждена Стивену Чу (г. р. 1948) из Стэнфордского университета (США), Клоду Коен-Тануджи (г. р. 1933) из Коллеж де Франс и Эколь Нормаль Супериор (Франция) и Вильяму Филлипсу из Национального Института Стандартов и Технологии (США) за разработку методов охлаждения и захват в ловушки атомов с помощью лазеров. В захвате атомов в ловушку и их охлаждение с помощью лазеров участвуют два разных процесса, которые, однако, связаны. Поскольку ловушки для нейтральных атомов обычно обладают малой глубиной, нужно охладить атомы до температуры ниже 1 К, а уж потом думать, как их захватить в ловушку. Охлаждение атомного газа с помощью лазеров было предложено в 1975 г. Теодором Хэншем и Артуром Шавловым из Стенфордского университета (США). В тот же год Дэвид Вайнланд и Ганс Демелт из университета штата Вашингтон (Сиетл, США) предложили аналогичную схему охлаждения ионов. За работу с ионами Демелт (г. р. 1922) и Вольфанг Поль (1913—1993) из Боннского университета (ФРГ) разделили Нобелевскую премию по физике за 1989 г. («за разработку методики ловушек ионов») с Н. Рамси.

Принцип охлаждения с помощью лазера основан на передаче импульса фотона атому. Атом при

поглощении фотона получает толчок в направлении, в котором летел фотон. При последующем излучении фотона, атом испытывает отдачу. Если испускание спонтанно, тогда направления испускания фотонов хаотичны. Серия поглощений и последующих излучений передает импульс атому в направлении лазерного пучка, в то время как отдача усредняется до нуля. В результате атом, который движется навстречу лазерному пучку, замедляется, подобно велосипедисту, катящемуся против ветра.

В 1960-х гг. Филлипс со своими сотрудниками использовал этот принцип для замедления пучка атомов натрия, а в 1985 г. они захватили охлажденный таким способом пучок с помощью магнитного поля.

В 1985 г. Чу со своими сотрудниками добился успеха в охлаждении атомного газа, используя шесть лазерных пучков, сформированных в пары с противоположными направлениями и при ортогональном расположении этих пар. В такой конфигурации каждый атом двигался в произвольном направлении, замедляя скорость своего движения.

Тремя годами позднее Коен-Тануджи открыл способ охлаждать атомы до температур, невозможными с помощью этих простых методов, используя процессы квантовой интерференции в лазерных пучках, распространяющихся навстречу друг другу. В 1995 г. он сумел охладить газ из атомов гелия до фантастически низкой температуры, только на 4 миллионных долей градуса выше абсолютного нуля.

Методики охлаждения и захвата нейтральных атомов позволили продемонстрировать конденсацию Бозе—Эйнштейна и открыли возможность создания часов с невообразимой точностью хода, сверхпрецизионные методы измерения гравитации и др.

#### Конденсация Бозе-Эйнштейна

Несомненно, одним из наиболее впечатляемых результатов современной физики было полученное в 1995 г. экспериментальное доказательство конденсации Бозе—Эйнштейна. В 1924 г. Эйнштейн предсказал существование особого состояния материи, в котором все атомы с определенными свойствами, т.н. бозоны (со спинами, кратными  $h$ ), могут оставаться с совершенно одинаковыми квантовыми свойствами. В 1995 г. Эрик Корнел (г. р. 1962) из Национального Института стандартов и технологий и Карл Виман (г. р. 1951) из университета Колорадо сумели охладить с помощью лазерного пучка атомы рубидия и захватить их в магнитную ловушку. Затем было произведено дополнительное охлаждение с помощью метода, называемого испарительным охлаждением, действующим так же, как охлаждается чашка чая, т.е. позволяя улетучиваться более горячим атомам.

Когда достигается очень низкая температура, атомы в новом состоянии начинают двигаться вместе с одной и той же скоростью и в одном и том же направлении, вместо того, чтобы двигаться произвольно, как это имеет место для обычного газа. Атомы теряют свою индивидуальность и теперь становятся одиночной коллективной единицей. Их организованная конфигурация приводит к необычным свойствам. Конденсация Бозе—Эйнштейна получалась в облаке атомов рубидия-87, которые охлаждались до  $\sim 170$  нК. Самый полный образец содержал около 2000 атомов, которые в течение более, чем 15 сек находились в одиночном квантовом состоянии. Вольфганг Кеттерль (г. р. 1957) и его группа из МИТ (США) сумели получить конденсат натрия-23, содержащий в сто раз больше атомов. Корнел, Кеттерль и Виман получили в 2001 г. Нобелевскую премию по физике «за

достижение конденсации Бозе-Эйнштейна в разряженных газах и за пионерские, фундаментальные изучения свойств этого конденсата». С помощью конденсата Бозе-Эйнштейна возможно изучить некоторые аспекты квантовой механики и, может быть, лучше понять явление сверхпроводимости (свойство некоторых материалов совершенно терять электрическое сопротивление). Происхождение Вселенной, также связывают в некоторых теориях с конденсацией Бозе-Эйнштейна.

Поведение таких сконденсированных атомов по сравнению с обычными атомами, напоминает отличия лазерного света от света обычной лампы. В лазерном свете все фотоны в фазе — свойство, которое делает лазерные пучки мощными и способными быть сфокусированными в очень малое пятно. Подобным же образом, атомы в конденсате Бозе—Эйнштейна все находятся в фазе, и физики работают над тем, чтобы они вели себя так, чтобы быть «атомным лазером». Такой пучок атомов допускает манипуляции и измерения в удивительно малых масштабах. В атомном лазере все атомы могут двигаться как один. Такие атомные лазеры можно было бы использовать для помещения атомов на подложку с экстраординарной точностью, заменяя обычную фотолитографию. Можно было бы построить и атомный интерферометр, который, поскольку длины волн атомов (волны де Бройля) много меньше световых, мог бы производить измерения с большей точностью по сравнению с лазерным интерферометром. Это позволило бы создать более точные атомные часы, получить и изучить нелинейные взаимодействия, подобные оптическим, и т.д.

Мы могли бы представить много других применений и будущих перспектив лазеров, но надеемся, что и то, о чем говорилось, вполне достаточно, чтобы понять замечательные возможности лазерных устройств в современном обществе.

## ИЛЛЮСТРАЦИИ

### Примечания

1

Martin J. Klein, 1963. The Natural Philosopher vol. 2, pp. 59-86

2

"По-русски" — корпускулярно-волновой (OCR)

3

В русской литературе более употребительно «принцип Паули». Прим. пер.

4

Е.К. Завойский и С.Д. Фанченко впервые показали, что для непосредственного наблюдения сверхбыстрых процессов можно использовать электронно-оптический преобразователь (ЭОП). Использование ЭОПов с пикосекундным временным разрешением сыграло большую роль в исследованиях лазеров ультракоротких импульсов. — Прим. пер.

5

В Гринвилле, родине Таунса, был установлен памятник, представляющего Таунса, сидящего на скамье парка в Вашингтоне, где его осенила идея мазера. — Прим. перев.

6

А.М. Прохоров впервые предложил и экспериментально продемонстрировал использование микроволнового резонатора нового типа, состоящего из двух параллельно расположенных пластин. — Прим. пер.

7

Гоулд был в 1991 г. занесен в реестр Национального Холла славы изобретателей. Он скончался 16 сентября 2005 г. — Прим. пер.

8

Первый лазер был создан Т. Мейманом 16 мая 1960 г. — Прим. пер.

9

Вообще-то, “мы говорим” — легирование (OCR)

10

Питирим Сорокин — знаменитый русский философ и социолог, который был по приказу Ленина выслан в эмиграцию с другими выдающимися русскими интеллектуалами на борту т.н. «философского парохода». — Прим. пер.

11

Первый лазер с модуляцией добротности был продемонстрирован Хелвартом и МакКлангом. В нем включение добротности осуществлялось с помощью электрооптического затвора. Автор описывает эксперимент, который был выполнен позднее. — Прим. пер.

12

Автор не точно описывает открытие рамановского лазера, т.е. лазера, использующего вынужденное комбинационное рассеяние света. После предложения Хелворта метод модуляции добротности был реализован им вместе с МакКлангом, который для быстрого включения добротности использовал электрооптический затвор Керра, помещаемый внутри резонатора рубинового лазера. За счет быстрогодействия затвора получался гигантский импульс с длительностью десятков нс. В этом затворе используется ячейка с нитробензолом, и интенсивное лазерное излучение взаимодействовало с ним. Изучение спектра выходного излучения показало, что наряду с R-линией рубина присутствует линия и с другой, большей, длиной волны. Она соответствовала спектру комбинационного рассеяния излучения рубинового лазера в нитробензоле. Стало ясно, что можно получать генерацию на новых длинах волн, используя эффект Рамана в различных веществах. — Прим. пер.

13

Раутиан и Собельман рассмотрели возможность использования люминесцирующих молекул для лазера в 1960 г. Оптика и спектроскопия, 10, 134 (1961) (поступило в редакцию 29 апреля 1960 г.) — Прим. пер.

14

Для работы мазера и лазера кроме усиливающей (инверсно-заселенной среды) нужен еще резонатор. Автор справедливо говорит, что для получения природного лазера нужны были бы зеркала резонатора, что невозможно. Но резонатор Фабри—Перо не является единственным способом осуществления положительной обратной связи, необходимой для генерации. Исследования Р.В. Амбарцумяна, Н.Г. Басова, П.Г. Крюкова, В.С. Летохова привели к открытию лазера нового типа, в котором обратная связь осуществляется не отражением от зеркал, а рассеянием в обратном направлении. Это — лазер с нерезонансной обратной связью. В.С. Летохов показал (см., например, В.С. Летохов. Астрофизические лазеры, Квантовая электроника, 32, 1065 (2002)), что именно обратная связь за счет рассеяния может объяснить действие космических мазеров и лазеров. — Прим. пер.

15

За этот результат Ч. Као получил в 2009 г. Нобелевскую премию по физике. — Прим. пер.

16

До этого уголкового отражатель был установлен на Луне с помощью советского «Лунохода-1». — Прим. пер.

17

Лазеры фемтосекундных импульсов позволяют не только изучать быстрые химические реакции, но и управлять выходом продуктов реакции. Это называют квантовым, или когерентным, управлением химических реакций, или фемтохимией. За работы в этой области американский ученый египетского происхождения А. Зевайл получил Нобелевскую премию по химии. — Прим. пер.

18

Изменение показателя преломления среды под действием интенсивной электромагнитной волны было установлено в 1962 г. Г.А. Аскарьяном. Он и ввел термин «самофокусировка». — Прим. пер.