

ЗАГАДОЧНЫЕ ЛУЧИ

В конце XVIII в. некоторые физики стали заниматься изучением электричества. Исследование этого нового явления во всех его аспектах было одним из главных направлений развития физической науки в XIX в.

Прежде всего были изучены закономерности прохождения электрического тока через твердые тела, что привело к развитию электротехники. Затем были исследованы особенности прохождения электричества через жидкости. К концу века была создана теория электролитической диссоциации, имеющая большое значение для объяснения химических реакций. Гораздо труднее оказались эксперименты, связанные с прохождением электричества через газы. Ученые наблюдали самые разнообразные эффекты, но не могли объяснить их.

В 1855 г. немецкий физик Юлиус Плюккер сконструировал специальную трубку, которую заполнял различными газами, исследуя их спектры. Необходимо было найти такой способ нагревания газа, чтобы он начал светиться. Плюккер решил использовать для этого электрический разряд. Наблюдая спектры, он заметил, что во время электрического разряда стекло трубки начинает флуоресцировать. Так были открыты (1859) и впервые описаны катодные лучи.

Подобными исследованиями в 60-е годы прошлого века занялся и немецкий ученый Иоганн Гитторф. Он сконструировал специальные трубки (трубки Гитторфа) для исследования электрических разрядов в разреженных газах. Гитторф также наблюдал флуоресценцию, открытую Плюккером, и в 1869 г. описал свойства нового вида лучей. Только два года спустя английский физик Кромвелл Флитвуд Варли высказал предположение, что эти лучи состоят из небольших электрически заряженных частиц, испускаемых катодом.

Эта идея получила подтверждение в 1879 г., когда английский физик Уильям Крукс поместил в модифицированную вакуумную трубку «экран» — мальтийский крест из слюды. Обнаружилось, что крест перекрывал путь катодным лучам и отбрасывал тень на флуоресцирующий экран. Двигая вблизи трубки магнит, Крукс заметил, что тень перемещается; на основании этого он сделал вывод, что катодные лучи представляют собой поток отрицательно заряженных частиц. Не все ученые, однако, согласились с мнением Крукса. За три года до него немецкий физик Эуген Гольдштейн для объяснения природы катодных лучей предложил волновую гипотезу. Она основывалась на результатах Генриха Герца, который изучал прохождение этих лучей через тонкие пластинки из золота, серебра или алюминия. Физики того времени не могли даже и помыслить, что материальные частицы способны беспрепятственно проходить через вещество.

В 1892 г. Генрих Герц посоветовал своему ассистенту Филиппу Ленарду разделить катодную трубку алюминиевой фольгой на две части и таким образом исследовать катодные лучи в двух отдельных пространствах с различным давлением газов. Развивая эту идею, Ленард изготовил катодную трубку с окошком из фольги и установил, что это позволяет вывести катодные лучи за пределы трубки. Изобретение Ленарда было использовано в многочисленных экспериментах, позволивших исследовать природу и свойства катодных лучей, за что ученый был удостоен в 1905 г. Нобелевской премии по физике.

Решающие эксперименты по разгадке тайны катодных лучей были проведены английским физиком Джозефом Джоном Томсоном в 1897 г. Томсон пропускал катодные лучи между двумя электрически заряженными металлическими пластинками, подвергая их одновременно воздействию как магнитного, так и электрического поля. Это дало возможность вычислить скорость частиц, а впоследствии и отношение их массы к заряду. Томсон установил, что частицы, составляющие катодные лучи, несут элементарный электрический заряд («атом» отрицательного электричества), который примерно в 1837 раз легче атома (точнее, ядра) водорода. Частица катодных лучей была названа электроном, что берет свое начало от греческого названия янтаря; название «электрон» было предложено ирландским физиком Джорджем Стонем еще в 1891 г. За открытие электрона Джозеф Джон Томсон был удостоен в 1906 г. Нобелевской премии по физике.

Так, от исследования катодных лучей физики пришли к открытию первой элементарной частицы — электрона. Использование вакуумных трубок привело и к открытию нового вида электромагнитного излучения, которое в конце прошлого века произвело сенсацию в мире. Это были лучи, случайно обнаруженные Вильгельмом Рентгеном. Открытие Рентгена поистине потрясло ученый мир. Только за один год было опубликовано свыше тысячи работ о новых лучах. Известный французский математик и физик Жюль Анри Пуанкаре, имевший привычку щедро раздавать свои идеи в среде ученых, предложил проверить, не излучают ли рентгеновские лучи соли урана, которые, как было замечено, флуоресцируют под действием солнечного света. Стекло рентгеновской трубки флуоресцировало зеленым светом, что напоминало свечение кристаллов урана после того, как их подержали на солнце. Это внешнее сходство натолкнуло Пуанкаре на мысль о возможной связи между флуоресценцией и рентгеновскими лучами.

Проверкой этой гипотезы занялся французский физик Антуан Анри Беккерель. В его семье исследования флуоресценции имели давние традиции. Еще его дядя Антуан Сезар Беккерель, известный ученый и член Парижской академии, проводил эксперименты в этой области. Его отец, Александр Эдмон Беккерель, также академик и даже президент Парижской академии, был автором основополагающих трудов по фосфоресценции и классифицировал это явление в зависимости от различных внешних воздействий.

Опыты Анри Беккереля были исключительно просты. Он брал фотопластинку, заворачивал ее в черную бумагу и клал на нее кристаллики урана.

Выставив пластинку на некоторое время на солнце, он затем проявлял ее и с удовлетворением обнаруживал на ней силуэты кристалликов. На первый взгляд это можно было рассматривать как подтверждение гипотезы о том, что кристаллы урана, флуоресцирующие под действием солнечного света, испускают рентгеновские лучи. Однако Беккерель, будучи ученым очень высокой квалификации, решил поставить и контрольный опыт. Он положил кристаллики урана на фотопластинку, не облучая их предварительно на солнце, и установил, что, несмотря на это, они излучают, не флуоресцируя. Дальнейшие эксперименты подтвердили, что такой эффект вызывается самим ураном, содержащимся в кристаллах. Беккерель обнаружил, что «урановые лучи» ионизируют воздух и делают его электропроводным. Это позволило исследовать их с помощью электроскопа.

Открытие естественной радиоактивности дало физикам возможность проникнуть в новый мир. В конечном счете это привело к представлениям о сложности структуры атома и к овладению атомной энергией. За открытие естественной радиоактивности Анри Беккерель получил в 1903 г. Нобелевскую премию по физике. Вместе с ним были награждены два других исследователя естественной радиоактивности — французские физики Пьер Кюри и Мария Склодовская-Кюри.

Используя тот факт, что радиоактивное излучение урана ионизирует воздух, Мария Склодовская-Кюри применила в своих исследованиях электроскоп; она поставила задачу — выяснить, не обладают ли подобными свойствами и другие вещества. В 1898 г. Склодовская-Кюри одновременно (и независимо) с немецким физиком Эрхардом Карлом Шмидтом установила, что элемент торий также радиоактивен. Наряду с этим она заметила, что некоторые соединения урана и тория имеют более сильное излучение, нежели это можно было предположить, исходя из процентного содержания в них названных элементов. Это указывало на возможность существования неизвестных радиоактивных субстанций.

Мария и Пьер Кюри провели химический анализ некоторых минералов, содержащих уран, и, переработав тонны руды, в июле 1898 г. открыли новый химический элемент. Он был назван полонием — в честь Польши, родины Марии Склодовской-Кюри. В декабре того же года был открыт еще один элемент, который из-за сильного излучения получил название «радий».

Супруги Кюри по праву считаются пионерами современной атомной физики. Сам термин «радиоактивность» был предложен Марией Склодовской-Кюри. Пьер Кюри в 1901 г. обнаружил биологическое воздействие радиации, а в 1903 г. сформулировал закон уменьшения радиоактивности и ввел понятие «период полураспада». Он предложил использовать явление радиоактивности для определения абсолютного возраста земных пород. В том же году Пьер Кюри совместно с А. Лабордом обнаружил самопроизвольное выделение тепла солями радия, установив, что 1 г радия выделяет 100 кал тепла в час. Это указывало на то, что в атоме сосредоточена огромная энергия. К сожалению, Пьер Кюри погиб в 1906 г. от несчастного случая, едва достигнув

47 лет. Исследования были продолжены Марией Склодовской-Кюри, которая в 1910 г. вместе с французским химиком А. Дебьерном выделила металлический радий в чистом виде. Она определила атомный вес радия и указала его место в периодической системе элементов, за что в 1911 г. была удостоена второй Нобелевской премии — на этот раз по химии.

Законы излучения

В конце XVII в. Исаак Ньютон с помощью трехгранной стеклянной призмы разложил белый свет на семь цветов (в спектр). Этот эффектный эксперимент положил начало исследованиям света, которые два столетия спустя привели к важным последствиям в физике. Благодаря усовершенствованиям оптических приборов в начале XIX в. были получены довольно хорошие спектры света различных источников. Постепенно накопленные данные были обобщены в 1859 г. Густавом Робертом Кирхгофом и Робертом Вильгельмом Бунзеном, которые выдвинули гипотезу о наличии связи между спектрами и свойствами атомов.

В 1868 г. Эйльхард Мичерлих высказал предположение, что спектры несут информацию о процессах, происходящих в самом атоме. В дальнейшем обнаруженные в спектрах закономерности все более убеждали физиков в справедливости этого предположения. В 1885 г. Иоганн Бальмер установил простую зависимость между длинами волн линий видимой части спектра атома водорода, которую он выразил математической формулой (формула Бальмера). Позднее, в 1890 г., Иоганнес Роберт Ридберг ввел в спектроскопию свою хорошо известную константу R (постоянная Ридберга), выражающую взаимосвязь между различными сериями спектральных линий элемента.

Классическая физика не могла объяснить эти закономерности, так как ученым не была ясна природа излучения. В конце прошлого века эти процессы рассматривались с позиций термодинамики. Сначала, в 1879 г., Йозеф Стефан экспериментально установил, что энергия, излучаемая нагретым телом, пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры. Этот закон теоретически вывел в 1884 г. Людвиг Больцман. Над проблемой излучения начал работать и немецкий физик Вильгельм Вин, с 1890 г. ассистент Германа Гельмгольца в Физико-техническом институте в Берлине. В 1893 г. Вин опубликовал результаты своих исследований спектрального распределения излучения нагретого тела. Вин математически описывает общеизвестный факт, что с увеличением температуры свечение тела изменяется от красного до синевато-белого (т. е. максимум излучения смещается в область коротких волн). Эта закономерность получила в науке название «закон смещения Вина». В 1896 г., исходя из классических представлений, ученый вывел закон распределения энергии в спектре абсолютно черного тела (закон излучения Вина).

Эти открытые экспериментально закономерности были вершиной достижений классической физики в теории излучения нагретого тела. Исследо-

вания немецкого ученого подготовили почву для революционных изменений, наступивших в области физики в начале XX в., ив знак признания его заслуг в 1911 г. Вильгельму Вину была вручена Нобелевская премия по физике — за открытие закона теплового излучения.

Законами излучения в конце прошлого века занимался и другой известный ученый — Джон Уильям Стретт (лорд Рэлей), который в 1900 г. опубликовал результаты своих исследований распределения энергии в спектре излучения. Его данные, однако, не согласовались с выводами Вина, сделанными для другой (коротковолновой) части спектра. В науке заговорили о так называемой «ультрафиолетовой катастрофе», так как именно в этом диапазоне спектра отмечалось несоответствие между результатами Вина и Рэля. Это было одним из тех небольших облачков, которые в конце XIX в. появились на чистом горизонте классической физики.

Чтобы как-то согласовать противоречивые выводы, крупный немецкий физик-теоретик того времени Макс Планк высказал смелое предположение. В 1900 г., после 6 лет работы над проблемой излучения абсолютно черного тела, он предположил, что атомы излучают энергию определенными порциями, квантами, причем энергия каждого кванта пропорциональна частоте волны, т. е. цвету излучаемого света. Это ознаменовало рождение квантовой теории. Благодаря этому допущению Планк теоретически вывел закон распределения энергии в спектре абсолютно черного тела.

Экспериментаторы сразу же приняли новую теорию и вскоре нашли ей многочисленные подтверждения. Для теоретиков, однако, это было большим ударом. Начиная еще с работ Ньютона и Лейбница., создателей дифференциального исчисления, оперирующего с бесконечно малыми величинами, физики были твердо убеждены в беспредельной «делимости» предметов и явлений. И вдруг оказалось, что излучение носит атомистический характер и не может происходить произвольно. Даже сам Планк сдержанно принимал свое открытие, воспринимая его скорее как необходимость.

Следующий шаг на пути утверждения идеи квантов был сделан в 1905 г. Альбертом Эйнштейном. В то время как Планк принимал, что излучение происходит порциями, Эйнштейн показал, что и свет имеет квантовую структуру и представляет собой, поток световых квантов (фотонов). Это по существу было возрождением старой корпускулярной теории света Ньютона. Опираясь на эти идеи, Эйнштейн сумел объяснить ряд явлений, в том числе и фотоэлектрический эффект.

Фотоэффект (явление взаимодействия между светом и веществом, которое выражается в освобождении электронов из вещества под действием электромагнитного излучения) был открыт в 1887 г. Генрихом Герцем. Вскоре на основе экспериментов было дано его описание русским физиком Александром Столетовым. Эти два ученых, по существу, наблюдали так называемый внешний фотоэффект, при котором фотоны выбивают электроны из вещества. Наряду с этим существует еще и внутренний фотоэффект (открытый в 1873 г. американским физиком У. Смитом), при котором выбитые из ато-

мов электроны остаются внутри вещества и регистрируются по повышению электропроводности.

Представление Эйнштейна о свете как о потоке частиц позволило объяснить фотоэффект передачей энергии фотонов электронам атома. Прошло, однако, немало времени, прежде чем новые взгляды утвердились в науке. Планк стал лауреатом Нобелевской премии только в 1918 г., т. е. почти два десятилетия спустя после того, как вывел свой знаменитый закон излучения и предложил гипотезу квантов. Альберт Эйнштейн получил Нобелевскую премию по физике в 1921 г. В то время он был уже всемирно известным физиком, автором знаменитой теории относительности, и поэтому в мотивации награждения наряду с открытием законов фотоэффекта упоминается и о его заслугах в теоретической физике.

Объяснение, данное Эйнштейном фотоэффекту, не сразу получило признание физиков, так как отсутствовали подтверждавшие его экспериментальные данные. Лишь в 1910—1914 гг. американский физик Роберт Энд-рус Милликен провел в Чикагском университете первые опыты, подтвердившие новые представления о свете. Милликен создал оригинальный прибор, который позволял измерять количество электронов (и их энергию), выбитых из металлов при освещении их светом различной длины волны (т. е. различного цвета). Этот интересный прибор дал возможность прежде всего определить так называемую постоянную Планка, устанавливающую связь между энергией и частотой кванта. Кроме того, Милликен экспериментально проверил уравнения Эйнштейна для фотоэффекта в видимой и ультрафиолетовой областях спектра.

Талантливому экспериментатору Роберту Милликену принадлежит еще одно крупное достижение, которое принесло ему широкую известность. Используя оригинальную аппаратуру и разработанный им метод капель, он провел огромное количество опытов, позволивших ему точно измерить электрический заряд электрона («атома» электричества). За это открытие, а также за исследование фотоэффекта Милликен получил в 1923 г. Нобелевскую премию по физике.

В 60-е годы XIX в. в физике произошло крупное событие: английский физик Джеймс Клерк Максвелл объединил явления электричества, магнетизма и света, создав теорию электромагнитного поля. Так возник новый раздел физики, получивший название электродинамики. Идеи Максвелла были развиты дальше и поставлены на новую основу нидерландским физиком-теоретиком Хендриком Антоном Лоренцем. Объединив электромагнитную теорию Максвелла с представлениями об атомистическом характере электричества, он создал классическую электронную теорию. Электрические, магнитные и оптические явления теория Лоренца объясняла как движение дискретных электрических зарядов.

Основы электронной теории Лоренц заложил в 1880 г., а окончательно она оформилась к 1909 г., после того как был открыт электрон. Согласно этой теории, атомы состоят из электронов и положительно заряженных частиц,

которые их нейтрализуют. При движении этих зарядов возникают электрические и магнитные поля. Исходя из этих представлений, Лоренц объяснил ряд электрических и оптических явлений и даже предсказал явления, которые тогда не наблюдались. В частности, он указал, что спектральные линии излучения (которое обусловлено движением электронов) должны расщепляться под действием электрических и магнитных полей, поскольку поля влияют на движение электронов. Предсказание Лоренца было подтверждено в августе 1896 г. его соотечественником, молодым нидерландским физиком Питером Зееманом.

В своем эксперименте Зееман поместил пламя газовой горелки между полюсами электромагнита. При добавлении обычной поваренной соли пламя окрашивалось в желтый цвет—спектральная линия излучения натрия. При включении магнитного поля спектральные линии расширялись в полном соответствии с теорией Лоренца. В этот же период времени Томсон исследовал катодные лучи и данные, полученные им в опытах, никак не связанных с экспериментами Зеемана, послужили убедительным свидетельством в пользу реального существования электронов.

Идеи Лоренца и открытия Зеемана были крупным шагом вперед в изучении теории излучения. Уже в 1902 г. их работы получили признание Нобелевского комитета, принявшего решение о присуждении двум нидерландским ученым премии по физике.

Согласно теории Лоренца, электрическое поле должно также воздействовать на свет. Экспериментальное доказательство этого вывода значительно задержалось по чисто техническим причинам.

Влияние электрического поля на спектральные линии натриевого пламени нельзя было изучать, поместив пламя между двумя электродами. Поскольку пламя проводит ток, электрическое поле при этом вообще исчезает. Лишь в 1913 г. Йоханнес Штарк, чтобы обойти эту трудность, создал другую экспериментальную установку, используя свойства так называемых каналových лучей. Это своего рода антипод катодных лучей. Если в катоде электронно-лучевой трубки проделать отверстия, то через них проходят частицы, которые представляют собой положительные ионы, излучающие свет. Направляя каналовые лучи в электрическое поле, Штарк обнаружил, что при этом происходит расщепление спектральных линий излучения, как и предсказывала теория Лоренца. По аналогии с уже известным «эффектом Зеемана» это явление получило название «эффект Штарка». В 1919 г. Йоханнес Штарк получил за свое открытие Нобелевскую премию по физике.

Исследования законов излучения дали очень ценную информацию о внутреннем строении атома и привели к созданию различных его моделей. Но чтобы сделать правильный выбор между этими моделями, требовались и другие экспериментальные методы, которые стали возможны только в начале нынешнего столетия.

Модели атома

Концепция атома возникла впервые в древней Греции. Демокрит и другие древнегреческие философы высказывали мысль, что все тела в окружающем нас мире состоят из мельчайших частиц, которые далее не могут делиться и являются основными «кирпичиками» вещества. Отсюда и название «атом», что значит по-гречески «неделимый».

Наука открыла атом лишь в начале XIX в.¹ Первая современная теория о том, что вещество состоит из ограниченного числа частиц, была создана в 1803 г. английским ученым Джоном Дальтоном. Так, вслед за философами атомом занялись химики. Прошло еще 100 лет, прежде чем физики смогли показать, что эта «неделимая» частица представляет собой довольно-таки сложную систему, таящую в себе немало загадок природы. Исследования ряда ученых в конце XIX и начале XX вв. показали, что электричество и свет имеют дискретный характер, т. е. состоят из частиц. Эти представления легли в основу различных моделей атома, которые все более точно воссоздавали его подлинную структуру.

Прежде всего в 1903 г. Дж. Дж. Томсон предложил свою модель атома в виде «пудинга с изюмом», согласно которой атом представляет собой положительно заряженную сферу с вкрапленными в нее электронами. Суммарный отрицательный заряд электронов равен положительному заряду сферы; поэтому в целом атом электрически нейтрален. Модель атома Томсона в какой-то степени позволяла объяснить процессы излучения, рассеяния и поглощения света, и в течение ряда лет она была весьма популярна. Это пример того, как модель, не имеющая ничего общего с действительностью, тем не менее «работает» — дает возможность объяснить некоторые реально наблюдаемые явления.

Примерно в то же время французский ученый Жан Батист Перчен предложил планетарную модель атома. В этой модели наблюдаемые свойства атомов объяснялись орбитальным движением электронов. Подобную модель предложила в 1904 г. и японский физик Хантаро Нагаока. Это так называемая «модель-Сатурна», в которой электроны образуют кольцо, вращающееся вокруг центрального положительно заряженного ядра, подобно тому как кольца обращаются вокруг планеты Сатурн. Эти первые модели атома были весьма умозрительными и не «продержались» долго. Только после появления новых экспериментальных данных стало возможным установить подлинную структуру атома.

В 1906 г. английский ученый Эрнест Резерфорд исследовал взаимодействие между альфа-частицами и веществом. С этой целью проводились опыты, в которых тонкие пластинки из золота и других металлов «обстрелива-

¹ М. В. Ломоносов еще в середине XVIII в. считал, что окружающий нас мир состоит из весомой материи и эфира. «Все тела,— утверждал Ломоносов,—состоят из „корпускул" (молекул), содержащих "элементы" (атомы)».

лись» альфа-частицами. Эксперименты были поручены новозеландскому физики Эрнесту Марсдену, работавшему у Резерфорда в Манчестерском университете. В 1909 г. Марсден вместе с Хансом Гейгером (другим ассистентом Резерфорда) обнаружил, что изредка (примерно в одном случае из 38000) альфа-частицы рассеивались при соударении с мишенью на очень большой угол, словно сталкивались с массивной преградой. Результаты были настолько неожиданными, что Марсден долго не решался сообщить о них Резерфорду, считая, что здесь скрыта какая-то ошибка. Резерфорд действительно был очень удивлен и потом часто вспоминал, что это выглядело столь же невероятным, как если бы летящий снаряд отскочил от листа бумаги.

К 1911 г. было накоплено уже достаточно подобных экспериментальных данных, что позволило Резерфорду предложить его хорошо известную «планетарную модель» атома, основанную уже на прямых результатах наблюдений. Впервые были сделаны оценки размеров атома и находящегося в центре его небольшого положительно заряженного ядра, на котором, собственно, и рассеивались столь сильно альфа-частицы. Модель атома Резерфорда была такова: вокруг ядра, размером примерно в 100 тысяч раз меньше самого атома, вращаются, как планеты вокруг Солнца, отрицательно заряженные электроны. Но «планетарная модель» Резерфорда также объясняла далеко не все, потому что она основывалась на представлениях классической физики. Согласно последним представлениям, вращающийся электрон должен был бы непрерывно излучать энергию и, довольно быстро израсходовав ее, упасть на ядро. Модель Резерфорда находилась лишь в одном шаге от истины — и этот шаг был сделан датским физиком Нильсом Бором.

В 1913 г. Бор, объединив идеи квантования энергии, выдвинутые Планком и Эйнштейном, с моделью атома Резерфорда, выдвинул гипотезу, что электроны движутся вокруг ядра только по таким орбитам, на которых они не излучают и не поглощают энергию. Далее он показал, что излучение и поглощение происходят только квантами в момент перехода электрона с одной орбиты на другую. Теория Бора позволяла легко вывести постоянную Ридберга и успешно объясняла другие результаты, полученные в экспериментальной спектроскопии. Уже на следующий год были проведены спектральные измерения в ультрафиолетовой области, которые подтвердили справедливость новой модели атома.

Модель Бора была первой квантовой моделью атома. Она положила начало новой эпохи в развитии атомной теории, объединив в себе результаты, полученные при исследованиях радиоактивности, оптических и электромагнитных явлений. Новая модель атома сразу же обнаружила свою плодотворность в спектроскопии и теории химической связи. Она ознаменовала собой отход от классических представлений и начало широкого внедрения квантовых идей в современную науку. За создание квантовой теории атома Нильс Бор был удостоен в 1922 г. Нобелевской премии по физике.

Кванты в действии

В период 1913—1917 гг. был проведен ряд экспериментов, подтверждающих гипотезу Макса Планка о квантовании энергии и квантовую модель атома Нильса Бора. Они были осуществлены немецкими физиками Джеймсом Франком и Густавом Герцем.

Эти ученые исследовали взаимодействие электронов с атомами, в частности происходящее при столкновении движущегося с определенной скоростью электрона с атомом вещества. В экспериментальной установке Франка и Герца пучок электронов проходил через газ. Газ начинал светиться, испуская свет определенной длины волны. Эксперимент позволял проводить точное измерение скорости электронов, а следовательно, и их энергии. Исследуя количественные результаты, ученые показали» что, для того чтобы вызвать излучение атома при столкновении, электрон должен обладать определенной минимальной энергией. Они определили, что эта энергия равна произведению постоянной Планка на частоту светового излучения. Определение этой постоянной новым и независимым способом явилось еще одним доказательством дискретности уровней энергии атомов и подтвердило теорию атома Бора. За это открытие Густав Герц и Джеймс Франк были удостоены в 1925 г. Нобелевской премии по физике.

Исследование излучения абсолютно черного тела привело Планка к идее квантования. Теория фотоэффекта, предложенная Эйнштейном, углубила это представление, показав, что квантами в сущности являются фотоны (частицы света). Фотоны проявляют себя при различных эффектах, один из которых был открыт американским физиком Артуром Холли Комптоном в 1923 г.

При фотоэффекте фотон взаимодействует с электроном вещества, отдавая ему свою энергию, что приводит к высвобождению электрона из атома. При эффекте Комптона фотон взаимодействует со свободным или слабосвязанным электроном, передавая ему только часть своей энергии. В результате такого взаимодействия происходит перераспределение энергии между фотоном и электроном, что изменяет траекторию частиц. Эффект Комптона наблюдается тогда, когда энергия фотона достаточно велика по сравнению с энергией электрона в атоме, так как в этом случае электрон может считаться свободной частицей. Столь высокой энергией обладают фотоны рентгеновского излучения. В своих опытах Комптон установил, что при взаимодействии рентгеновского излучения с веществом происходит упругое рассеяние его на свободных электронах вещества, сопровождающееся увеличением длины волны (эффект Комптона);.. и построил теорию этого явления.

Открытие Комптона стало новым убедительным доказательством реальности квантов. За это достижение он стал в 1927 г. одним из лауреатов Нобелевской премии по физике.

В то время как фотоэффект и эффект Комптона — это явления, наблюдаемые лишь в специальных условиях, так называемое комбинационное рассеяние света встречается значительно чаще. В 1928г. индийские физики Чан-

драсекхара Венката Раман и Кариаманиккам Кришнан из Калькуттского университета исследовали- спектральный состав света после прохождения его через различные жидкости. Они установили, что наряду с основными спектральными линиями наблюдаются и новые линии, смещенные в красную и синюю стороны. Независимо от индийских ученых и даже несколько раньше их аналогичные исследования провели с кристаллами советские физики Л. И. Мандельштам и Г. С. Ландсберг. Советские ученые опубликовали свои результаты после продолжительных экспериментов, тогда как Раман сразу же послал короткое сообщение в английский журнал Nature. Это обеспечило ему приоритет, и сегодня комбинационное рассеяние света часто называют «эффектом Рамана».

Суть этого явления состоит в следующем. Кванты оптического диапазона поглощаются молекулами вещества, вызывая их возбуждение. Возбужденная молекула излучает квант с меньшей энергией, т. е. возникает вторичное излучение, смещенное в красную область спектра. Если другой фотон попадает в ту же самую молекулу в момент, когда она еще находится в возбужденном состоянии, то вторичное излучение будет иметь большую энергию. Это вторичное излучение смещено в синюю область спектра.

Комбинационное рассеяние света объясняет многие явления природы; этот эффект оказался ценным методом для изучения строения молекул. Сегодня спектроскопия рассеянного света широко применяется в химии и молекулярной биологии для качественного и количественного анализов. За свое открытие Раман получил в 1930 г. Нобелевскую премию по физике.

Развитие квантовых представлений

В 1921 г. американский физик Клинтон Джозеф Дэвиссон, работавший тогда в Научно-исследовательском центре фирмы «Белл телефон», обнаружил интересное явление, которое наблюдалось при отражении электронов от поверхности никелевой пластинки. Результаты исследований показывали, что электроны рассеиваются под определенным углом. Это явление удалось объяснить лишь через несколько лет, когда идеи квантовой физики получили новое, более глубокое развитие.

В начале 20-х годов теории стали понимать, что квантовая теория, созданная в начале века, весьма ограничена по своему смыслу и применению. Требовалось ее дальнейшее развитие на основе новых принципов. В 1923 г. французский физик Луи де Бройль в своей докторской диссертации «Исследования теории квантов» выдвинул идею о волновых свойствах материи, которая и легла в основу современной квантовой механики. Развив глубже представления Эйнштейна о двойственной природе света, он распространил их и на вещество, объединив формулу Планка (согласно которой энергия пропорциональна частоте излучения) с формулой Эйнштейна, связывающей энергию и массу ($E=mc^2$), получил соотношение, показывающее, что

любой материальной частице определенной массы и скорости можно приписать соответствующую длину волны.

Луи де Бройль защитил докторскую диссертацию в ноябре 1924 г., изложив тем временем свои идеи в ряде статей. На следующий год молодой немецкий физик Вальтер Эльзассер высказал предположение, что теоретические разработки де Бройля могут быть доказаны при исследовании отражения электронов от кристалла. Но такой опыт был осуществлен Дэвиссоном еще в 1921 г. Американский ученый также следил за публикациями де Бройля, и в начале 1925 г. он приступил к исследованиям углового распределения рассеянных электронов. Наконец, 6 января 1927 г., Дэвиссон вместе с Лестером Джермером получил четкую картину рассеяния электронов, хорошо согласующуюся с теорией.

В то же самое время профессор Абердинского университета Джордж Паджет Томсон, сын известного Джозефа Джона Томсона, независимо от группы Дэвиссона открыл явление дифракции электронов. Лишь месяц спустя после своих американских коллег он также получил убедительные доказательства волнового характера этих частиц. Картины рассеяния электронов, полученные Дэвиссоном и Томсоном, были очень похожи на изображения, получаемые при дифракции рентгеновского излучения, причем эксперименты в этих двух исследованиях ставились по-разному. В то время как Дэвиссон изучал отражение медленных электронов от кристаллов никеля, Томсон исследовал прохождение быстрых электронов через металлическую фольгу. По дифракционным картинам можно было вычислить длину волны, соответствующую движущимся электронам.

Идеи Луи де Бройля раскрыли новые свойства вещества, о которых ранее даже и не подозревали ученые. В 1929 г., через шесть лет после первых публикаций, де Бройль получил Нобелевскую премию по физике за открытие волновой природы электронов.

Дэвиссон и Д. Д. Томсон разделили в 1937 г. Нобелевскую премию по физике за экспериментальное открытие интерференционных явлений в кристаллах, облучаемых электронами. Наряду с большим теоретическим значением эти открытия представляли практическую ценность. Достаточно упомянуть электронную оптику, в частности электронный микроскоп, который является одним из основных приборов в современных биологических исследованиях.

Работы Луи де Бройля привлекли внимание австрийского физика-теоретика Эрвина Шрёдингера. В течение года (с конца 1925 до конца 1926 г.) он опубликовал несколько работ, в которых была развита теория, получившая название «волновая механика». Выводы Шрёдингера, и в особенности известное уравнение его имени, играют в изучении атомных процессов такую же фундаментальную роль, как законы Ньютона в классической механике.

Если провести аналогию между оптикой и механикой, то можно указать на следующее: классическая оптика принимает, что световые лучи распространяются прямолинейно, и только при исследовании некоторых явлений,

таких, как дифракция или интерференция, обнаруживается волновая природа света; точно так же классическая механика, основанная на законах Ньютона, хорошо описывает явления макромира, но при исследовании микрообъектов проявляются уже волновые свойства материи. Кроме этой оптико-механической аналогии Шрёдингер установил связь между созданной им волновой механикой и матричной механикой, разработанной в тот же период Вернером Гейзенбергом, Максом Борном, Паскуалем Йорданом и Полем Дираком.

Молодой немецкий физик Вернер Гейзенберг в 1925 г., в возрасте всего лишь 24 лет, предложил так называемую матричную механику, в основу которой был положен очень удобный математический аппарат. Однако большую известность Гейзенбергу принес его знаменитый принцип неопределенности, сформулированный в 1927 г., когда ученый стал профессором теоретической физики Лейпцигского университета. Этот принцип, представляющий собой фундаментальное положение квантовой теории, гласит, что информация, которую мы можем получить относительно микрообъектов, ограничена самими методами наблюдения. Если мы решим, например, определить положение (координаты) частицы, то для этого нам придется облучить ее фотонами. Но вследствие взаимодействия с фотонами частица изменит свое положение, так что полученный результат будет «неточным». Принцип неопределенности Гейзенберга утверждал неприменимость законов классической механики в квантовой теории. В новой, волновой квантовой механике необходимы были иные понятия, нежели в классической механике. Так, в модели атома вместо электронных орбит (фигурирующих в классической модели атома Бора) были введены так называемые электронные облака, в пределах которых электрон находится с определенной степенью вероятности.

Дальнейшее развитие квантовая теория получила в исследованиях английского физика Поля Дирака. В 1928 г. он создал релятивистскую теорию движения электрона, применив в квантовой механике соотношения теории относительности. Дирак сумел объединить релятивистские представления с представлениями о квантах и спине (собственном моменте вращения микрочастицы). Из теории Дирака вытекал интересный вывод о возможности существования положительно заряженного «электрона» — и очень скоро, всего лишь через 4 года, был открыт позитрон.

Этот принцип позволил строго объяснить расположение химических элементов в таблице Менделеева. Принцип Паули имеет большое значение для ядерной физики и физики элементарных частиц, где с его помощью удалось объяснить составной характер ядер и элементарных частиц. За свое крупное открытие Вольфганг Паули в 1945 г. получил Нобелевскую премию по физике.

Рентгеновские лучи

В декабре 1895 г. Вильгельм Конрад Рентген, директор Физического института при Вюрцбургском университете, открыл новый вид лучей. Впоследствии историки науки установили, что это излучение, возникающее в катодно-лучевой трубке, многократно наблюдалось прежде.

Во второй половине XIX в. катодные трубки были во всех сравнительно крупных физических лабораториях, и очень странно, что до Рентгена никто не замечал этих лучей. Еще в 1876—1880 гг. Эуген Гольдштейн изучал катодные лучи, а в 1895—1898 гг. наблюдал свечение некоторых солей под их воздействием. Десять лет спустя Джозеф Томсон, проводя свои опыты с катодными лучами, также заметил, что стекло, помещенное более чем в метре от трубки, фосфоресцирует. Однако он не обратил на это внимания. Физики того времени по опыту хорошо знали, что около работающей катодной трубки нельзя оставлять фотоматериалы, ибо они засвечиваются. Эти и некоторые другие факты свидетельствуют о том, что ученые находились на пороге открытия. Последний, решающий, шаг был сделан Рентгеном в 1895 г. Желая улучшить условия наблюдения свечения в катодной трубке, он затемнил лабораторию. Тогда-то Рентген и заметил случайно, что картонный экран, покрытый флуоресцирующим минералом, во время работы катодной трубки начинает светиться.

Известна мысль, высказанная Пастером, что случайность помогает только подготовленному уму. Рентген сразу же поставил серию экспериментов и подробнейшим образом описал свойства вновь открытых лучей. Он установил, что они распространяются на большое расстояние и проникают через многие вещества. Далее он выяснил, что в отличие от катодных эти лучи не преломляются, не отражаются и не отклоняются в магнитном поле. Всего за несколько месяцев Рентген изучил настолько основательно новое излучение, что понадобилось 20 лет, чтобы добавить что-либо к его выводам.

Рентгеновские лучи были интересны сами по себе, но настоящую сенсацию они произвели, когда выяснилась их способность проникать через тело человека и давать изображение его скелета. В конце прошлого века это было невероятным открытием. Известность Рентгена достигла таких масштабов, что в 1901 г. ему первому среди физиков была присуждена Нобелевская премия.

Сразу же после открытия рентгеновских лучей возник старый спор, который в то время сопутствовал открытию любого вида излучения: является это излучение потоком частиц или электромагнитными волнами? В 1899 г. нидерландские физики Г. Хага и К. Х. Винд пропустили пучок рентгеновских лучей через узкую щель и обнаружили слабый дифракционный эффект. Отсюда они сделали вывод о волновой природе рентгеновских лучей и оценили длину волны этого излучения: она была порядка одного ангстрема (одной стомиллионной сантиметра). Для сравнения укажем, что видимый свет имеет длину волны порядка нескольких тысяч ангстрем. В 1904 г. английский фи-

зик Чарлз Баркла занялся проверкой гипотезы английского физика Джорджа Стокса о том, что если рентгеновские лучи являются электромагнитными волнами, то они должны поляризоваться, причем поляризация должна зависеть от способа их образования в катодной трубке. Поляризация действительно была обнаружена, и это было воспринято как серьезный аргумент в пользу волновой природы рентгеновских лучей.

В то же самое время, однако, выявились и некоторые факты, свидетельствующие о корпускулярном характере рентгеновских лучей. В 1908 г. Уильям Генри Брэгг исследовал процесс возникновения заряженных частиц под действием рентгеновского излучения. Он, в частности, наблюдал возникновение при этом потока электронов, на основании чего сделал вывод, что рентгеновские лучи представляют собой поток частиц, ибо подобный эффект могут вызвать только частицы. Эти опыты склонили чашу весов в сторону корпускулярной теории, и такое положение сохранилось до 1912 г., когда неожиданно было представлено блестящее доказательство волновых свойств рентгеновских лучей.

В Мюнхенском университете, где продолжал работать Рентген, профессор Арнольд Зоммерфельд поручил своему сотруднику Макс фон Лауэ написать для энциклопедии статью на тему «Волновая оптика». Это побудило Лауэ внимательно изучить теорию дифракции света. В то же самое время один из учеников Зоммерфельда, Пауль Эвальд, работал над диссертацией по оптическим свойствам кристаллов. Часто консультировавший его Лауэ пришел к мысли, что расстояние между атомами в кристаллических решетках — того же порядка, что и предполагаемая длина волны рентгеновских лучей. В этом случае при прохождении лучей через кристалл должно было бы наблюдаться явление дифракции.

Проверкой предположения Лауэ занялись молодью исследователи Вальтер Фридрих и Пауль Книппинг. После нескольких экспериментов им удалось получить фотографии сложных дифракционных картин. Так, в 1912 г. была сфотографирована дифракционная картина, возникающая при прохождении рентгеновских лучей через кристалл сульфата меди. Это открытие вызвало большой резонанс в научных кругах и явилось убедительным подтверждением волновой природы рентгеновского излучения. Инициатор этих исследований Макс фон Лауэ за открытие дифракции рентгеновских лучей получил в 1914 г. Нобелевскую премию.

Однако толкование рентгеновской дифракционной картины оказалось делом довольно сложным. Лауэ занимался этим вопросом, но с весьма небольшим успехом. Эту проблему разрешили английский физик Уильям Лоренс Брэгг (сын У. Г. Брэгга) и независимо русский кристаллограф Георгий Викторович Вульф. В 1913 г. они вывели формулу, описывающую условия интерференционного отражения рентгеновских лучей от кристаллов (формула Брэгга — Вульфа). С помощью этой формулы можно определить отклонение рентгеновского луча при прохождении через вещество. Указанная формула, связывающая длину волны рентгеновского излучения с периодом кри-

сталлической решетки кристалла, позволяет, с одной стороны, использовать рентгеновские лучи определенной длины волны, исследовать структуру вещества, а с другой — используя такие кристаллы, как поваренная соль, структура которой известна, можно исследовать сами рентгеновские лучи. Обширные эксперименты такого рода, проведенные отцом и сыном Брэггами, положили начало рентгеноструктурному анализу и принесли в 1915 г. этим ученым Нобелевскую премию по физике. У. Л. Брэгг, которому тогда было только 25 лет, долго и плодотворно работал в этом направлении. В период 1938—1953 гг., возглавляя знаменитую Кавендишскую лабораторию, У. Л. Брэгг всячески способствовал использованию рентгеноструктурного анализа в зарождающейся молекулярной биологии. И действительно, этот новый метод сыграл важную роль в открытии структуры ДНК («двойная спираль») и определении пространственного строения некоторых белковых молекул.

Интересные исследования с рентгеновским излучением осуществил в начале века Чарлз Баркла. Он первым в 1904 г. экспериментально осуществил поляризацию рентгеновских лучей, доказав их волновую природу, а в 1906 г. открыл так называемое характеристическое рентгеновское излучение. Обычно рентгеновское излучение имеет непрерывный спектр. Оно возникает при резком торможении быстрых электронов при соударении с мишенью. При высоком напряжении (свыше 10 кВ), однако, наряду с излучением, имеющим непрерывный спектр, возникает рентгеновское излучение определенной длины волны. Это излучение Баркла назвал характеристическим, потому что его спектр зависел от характера вещества мишени.

Замеченное явление в то время не удавалось объяснить теоретически. На практике его использовали для получения рентгеновских лучей с определенными свойствами, что было необходимо для рентгеноструктурного анализа. Важность открытия стала ясной через десять лет, после того как отец и сын Брэгги показали возможность исследования рентгеновских спектров с помощью кристаллов с известным строением. В то время Нильс Бор предложил квантовую модель атома, и характеристическое рентгеновское излучение стали объяснять квантовыми переходами электронов с внешних оболочек атома на внутренние. Значение открытия Баркля все более возрастало, и наконец в 1917 г. ему была присуждена Нобелевская премия по физике, которую, однако, он получил лишь в следующем году» после окончания первой мировой войны. Исследование Барклой рентгеновских лучей методом Брэггов положило начало рентгеновской спектроскопии. Ценный вклад в эту область внесли французский физик Морис де Бройль (старший брат Луи де Бройля) и английский физик Генри Мозли.

Мозли первым начал исследовать спектры рентгеновского излучения химических элементов. Он открыл закон (закон Мозли), связывающий частоту спектральных линий с порядковым номером излучающего элемента в периодической таблице Менделеева. Это открытие имело большое значение для установления физического смысла атомного номера элемента. Мозли показал, что характеристическое рентгеновское излучение создается внутрен-

ними электронами (находящимися вблизи ядра) атома. Оно дает такую же информацию о внутренних электронах атома, как обычный свет о внешних электронах.

Генри Мозли было всего лишь 26 лет, когда он в 1913 г. опубликовал свою работу, навеки вписавшую его имя в науку. Он погиб два года спустя при высадке английского десанта в проливе Дарданеллы; это произошло тогда, когда уже был подписан и выслан приказ о его демобилизации.

Незавершенная Мозли работа была продолжена шведским физиком-экспериментатором Карлом Манне Георгом Сигбаном. Он разработал новые методы получения детальных рентгеновских спектров и исследовал рентгеновские спектры почти всех химических элементов. Это позволило получить исчерпывающие данные о структуре электронных оболочек атомов.

Сигбан изготовил дифракционную решетку для исследования длинноволнового рентгеновского излучения. Тем самым он ликвидировал пробел между жестким (коротковолновым) рентгеновским излучением, которое исследуется с помощью кристаллических решеток, и оптическим ультрафиолетовым излучением, исследуемым с помощью обычной оптической дифракционной решетки. Исследования шведского ученого показали, как дополняются электронные оболочки атома при переходе от более легких элементов к тяжелым. Его наблюдения позволили определить, сколько электронов находится в соответствующей оболочке того или иного элемента. За обширные и детальные исследования в области рентгеновской спектроскопии Карл Манне Георг Сигбан был удостоен в 1924 г. Нобелевской премии по физике.

Случилось так, что 57 лет спустя такая же награда была вручена Каю Сигбану — сыну Карла Сирбана. Увлекаясь с раннего возраста физикой, Кай Сигбан также занялся исследованием рентгеновского излучения, в частности изучением электронов, выбиваемых рентгеновскими лучами из вещества. В 1951 г., будучи уже профессором, молодой шведский ученый положил начало новому методу электронной спектроскопии и использовал его для химического анализа. Основная заслуга этого исследователя состоит в том, что он сконструировал прибор для исследования энергетических спектров электронов, выбиваемых из атомов рентгеновскими лучами. Разработанный им рентгеновский электронный спектрометр оказался исключительно ценным прибором для современной химии. Максимумы электронных спектров соответствуют энергиям связи электронов на внутренних оболочках атомов, и это дает возможность исследовать структуру молекул. Метод отличается высокой чувствительностью, что позволяет ограничиваться для анализа поверхностным слоем вещества толщиной не более 50—100 Å (ангстрем). Это, между прочим, дает возможность исследовать процессы коррозии, адсорбции и другие поверхностные химические явления. Приборы для электронной спектроскопии являются непременной составной частью оснащения любой современной лаборатории, занимающейся химическим анализом. За развитие метода электронной спектроскопии Кай Сигбан был удостоен в 1981 г. Нобелевской премии по физике.

Первый эффект, вызванный рентгеновскими лучами (свечение флуоресцирующего экрана), Вильгельм Рентген наблюдал в ноябре 1895 г. В декабре он сделал предварительное сообщение об этом открытии, где, в частности, упоминалось, что лучи дают возможность получить изображение скелета человека. Первой рентгенограммой был рентгеновский снимок руки госпожи Рентген, на котором особенно четко выделялось золотое кольцо. Идея о применении рентгеновских лучей в медицине была встречена с энтузиазмом, и уже 20 января 1896 г. в Дартмуте (шт. Нью-Гэмпшир, США) врачи наблюдали с помощью рентгеновских лучей перелом руки пациента. Почти во всех университетских лабораториях того времени имелись катодно-лучевые трубки, которые немедленно были приспособлены для медицинских целей. Довольно быстро была создана и специальная рентгеновская аппаратура для врачебных нужд — было положено начало рентгенологии. Все это, однако, уже относилось к чисто инженерной работе, не интересовавшей теоретиков. В течение десятилетий рентгеновская диагностика оставалась практически на неизменном уровне. Такое положение сохранялось до 1963 г., когда Аллан Кормак, физик из Кейптауна, разработал компьютерный метод рентгеновской томографии. В то время еще не было, однако, достаточно совершенных компьютеров, поэтому идея Кормака реализовалась лишь в 1969 г. Это сделал английский инженер Годфри Хаунсфилд, создав первый действующий аппарат.

При сканирующей томографии тонкий пучок рентгеновских лучей проходит через тело человека и регистрируется детектором. Поскольку ткани тела поглощают излучение, интенсивность пучка уменьшается. На практике используются тысячи детекторов, показания которых автоматически записываются на магнитную ленту. Компьютер обрабатывает данные, и на его выходе получается цветное телевизионное изображение, показывающее детальное строение внутренних органов. Обычные рентгеновские аппараты способны зарегистрировать разницу в поглощении рентгеновских лучей (или, по существу, разницу в плотности тканей) порядка $1/10$. Компьютерный томограф улавливает разницу в поглощении порядка $1/1000$. Его шкала охватывает диапазон плотностей от тысячи до тысячной доли плотности воды, что позволяет регистрировать поглощение рентгеновских лучей различными веществами — от воздуха до кости. Единица плотности, характеризующая степень поглощения веществом рентгеновских лучей, получила название «хаунсфилд». Например, коэффициент поглощения печени лежит в пределах 30—60, селезенки 45—70. Очаги воспаленных тканей и опухоли более прозрачны для рентгеновских лучей, нежели здоровые ткани. Обычным рентгеновским аппаратом эта разница почти не улавливается, а при исследованиях с помощью компьютерного томографа она отчетливо видна; этот аппарат позволяет обнаруживать опухоли размером с булавочную головку.

Компьютерная томография произвела подлинную революцию в методах медицинской диагностики. Она резко увеличила возможность ранней диагностики, что, безусловно, повышает шансы на выздоровление. Врачи очень

высоко оценили метод компьютерной томографии, и, считаясь с общественным мнением, Нобелевский комитет при Каролинском институте вынужден был присудить в 1979 г. премию по медицине физику и инженеру — Аллану Кормаку и Годфри Хаунсфилду.

Источник: Чолаков В. Нобелевские премии. Ученые и открытия: Пер. с болг. / Под ред. и с предисл. А.Н. Шамина. — М.: Мир, 1986. — 386с.