1969 г. Ноябрь *Том 99, вып. 3*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

537+534.73

РАННИЙ ЭТАП ИЗУЧЕНИЯ ДИФРАКЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ *)

Г. П. Томсон

Можно привести множество доводов в пользу изучения истории науки. Один из наилучших аргументов заключается в том, что при этом можно наглядно увидеть, как совершаются открытия. Для этого, конечно, необходимо иметь много примеров, так как пути, которыми исследователи идут к открытию, весьма разнообразны и очень редко бывают прямыми. Начальная стадия изучения дифракции электронов может служить наглядным образцом. Например, использование в наше время явления дифракции электронов в металлургии вряд ли связано с проблемой излучения абсолютно черного тела или даже с испусканием вторичных электронов твердыми телами, хотя именно изучение этих проблем привело нас к практическому применению рассматриваемого явления.

Для того чтобы понять первую из указанных выше проблем, нам придется вернуться к началу двадцатых годов этого столетия. Это был, по-видимому, один из наиболее волнующих периодов во всей истории физики. Я бы осмелился даже сказать, что он был наиболее озадачивающим для тех, кто прошел через него.

Молодому физику (я боюсь, что молодыми мне придется называть всех физиков моложе 60 лет) очень трудно представить себе состояние науки в начале двадцатых годов. Классическая теория света все еще сохраняла свое значение, тем более, что она получила сильную поддержку после успеха в применении явления дифракции рентгеновских лучей для изучения структуры кристаллов. В то же время планковская теория излучения уже была принята, поскольку она объясняла аномалии в поведении теплоемкостей при низких температурах, а работы Артура Комптона показали, что рентгеновские лучи, по крайней мере в некоторых случаях, проявляли свойства, обычно приписываемые частицам. И более того, успех детальных, хотя и не во всем совершенных предсказаний атомной теории, развитой Нильсом Бором и Арнольдом Зоммерфельдом, показал, что не все обстоит благополучно с таким краеугольным камнем науки, как ньютоновская механика. Все это казалось противоречащим обычной логике. Нельзя было просто сказать, что старая теория света и механика неверны. Наоборот, вы могли бы заявить, что они оказались применимы даже в тех областях, где вы вряд ли смели ожидать этого, но достигнутый успех

*) Sir George Thomson, The Early History of Electron Diffraction, Contemp. Phys. 9, 1 (1968). Лекция, прочитанная в Физическом институте в Физическом обществе на собрании, посвященном сорокалетию со дня открытия дифракции электронов, в Глазго в июле 1967 г. Перевод И. М. Дрёмина.

выглядел весьма загадочно. Многократно уже цитировалось высказывание, сделанное старшим Брэггом в то время. Однако оно настолько хорошо описывает сложившуюся тогда ситуацию, что я осмелюсь напомнить его вам еще раз: «Свет ведет себя подобно волнам по понедельникам, средам и пятницам, подобно частицам по вторникам, четвергам и субботам и ни с чем не сравним по воскресеньям». И вот над всем этим витала величайшая тайна величины h.

В то время все мы думали над возможными путями согласования явно не совместимых вещей. Один из таких путей состоял в предположении, что свет, возможно, в конце концов, состоит из частиц, которые каким-то образом замаскированы под волны. Однако никто не смог бы вам ясно изложить, как может возникнуть такая ситуация. Одно из первых предложений, которые я знаю и которые не покоятся целиком на свойствах излучения, исходило от младшего Брэгга, У. Л. Брэгга. Однажды он сказал мне, что, по его мнению, электрон совсем не так прост, как это кажется. Однако он так и не развил этой идеи. Тем не менее она произвела на меня глубокое впечатление и подготовила меня к благоприятному восприятию первой статьи де Бройля в «Philosophical Magazine» в 1924 г., являвшейся частью его диссертации, защищенной в Парижском университете.

Рис. 1. Луи де Бройль.

Идея де Бройля состояла в том, чтобы сопоставить каждой частице волну довольно своеобразным способом. Начало этой деятельности было положено исследованиями излучения абсолютно черного тела, проходившими под влиянием идей Эйнштейна. Была предпринята попытка объяснить, используя статистические методы, формулу Планка с помощью представления о наличии дискретных квантов. Как хорошо известно, это можно сделать, применив статистику Бозе — Эйнштейна. Однако за два года до появления в 1924 г. статьи Бозе де Бройль (1922 г.) подошел вплотную к этому, выведя формулу Вина. Он применил релятивистскую механику к световым квантам в предположении, что они обладают весьма малой, но все же конечной массой покоя. В его диссертации, а затем и в статье в «Philosophical Magazine» (1924 г.) была высказана идея о неразрывной связи с частицей-квантом колебаний с частотой $\nu = E/h$, где E — энергия этой частицы, масса покоя которой все еще считалась очень малой. Внешне это проявляется в виде волны. Тогда де Бройль постулировал, что такая волна могла бы переносить «один, два или более атомов» (т. е. квантов), что приводит к формуле Планка и в действительно-

сти эквивалентно замене статистики Больцмана на статистику Бозе — Эйнштейна. В той же статье он показывает, что групповая скорость волн, связанных с частицей любой массы покоя, равна скорости этой частицы, а также что «пути фазовых волн (распространяющихся быстрее света) определяют все динамически возможные пути». В несколько более

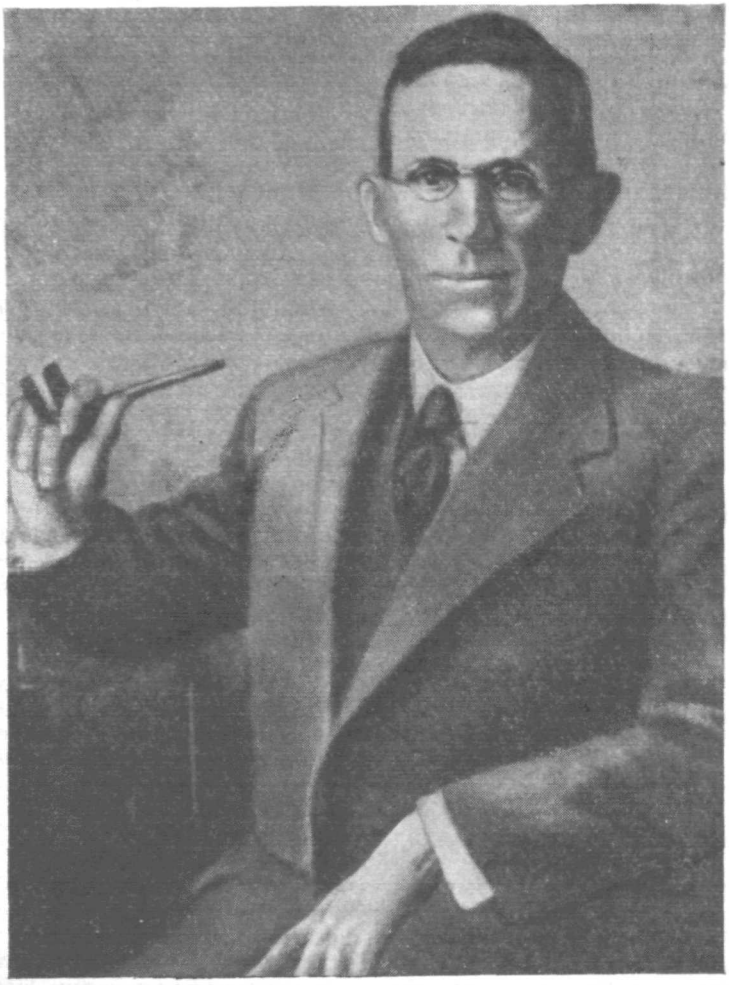


Рис. 2. Клинтон Дж. Дэвиссон.

сложном виде он приводит знаменитую формулу $\lambda = h/p$. Конечно, не все волновые системы обладают такими путями. Эти волны применены в статье и к описанию атома Бора. При этом показано, что орбиты в нем таковы, что «данная волна соответствует определенной длине пути». Именно это положение особенно привлекло мое внимание, когда я прочел статью. В результате я написал в «Philosophical Magazine» (1925 г.) статью, посвященную дальнейшему развитию этой идеи. Она не имеет большого значения, и я упомянул о ней только лишь для того, чтобы показать, что я был хорошо подготовлен к восприятию идей, подобных высказанной де Бройлем.

Тем временем Клинтон Дж. Дэвиссон с сотрудниками изучали в лаборатории телефонной компании «Белл» испускание электронов с поверх-

ности металла, бомбардируемой электронами с самыми разнообразными энергиями. Эта область исследований была уже не новой; было проделано множество работ, из которых не удалось извлечь каких-либо определенных заключений. Вряд ли кто-либо мог предположить, что здесь могут быть получены очень интересные выводы. Результаты этой работы выглядели весьма нестабильными, очень сильно зависевшими от изучаемого образца. Большинство рассеянных электронов обладало энергией всего лишь в несколько электрон-вольт независимо от энергии первичных электронов, а число их могло даже превышать число первичных электронов. Однако были и такие электроны, энергия которых в точности или почти совпадала с энергией первичных.

К. Дэвиссон и К. Кенсмен исследовали свойства таких электронов и опубликовали в ноябре 1921 г. свою первую статью в журнале «Science». Они обнаружили, что при нормальном падении электронов на поликристаллическую никелевую мишень вместо сферической симметрии при рассеянии были заметны две области, в которых число электронов на единичный телесный угол было заметно больше, нежели в других местах. Одна из них соответствовала направлению рассеяния назад, когда электроны рассеиваются точно на 180°, а положение второй зависело от напряжения и для 200-вольтных электронов соответствовало углу, равному 70° относительно нормали.

Конечно, такая картина совершенно отлична от того, что наблюдалось в случае α-лучей, но электроны — это не α-лучи, и, кроме того, энергия электронов в этих опытах была только порядка сотен электрон-вольт в отличие от миллионов электрон-вольт для случая α-лучей. Даже на столь большие углы рассеяние могло быть вызвано соударениями с отдельными электронами или же с группами их. В атоме никеля содержится 28 электронов. Дэвиссон предположил, что они образуют две концентрические, равномерно заряженные сферические оболочки. Задачу можно было рассмотреть в рамках классической электродинамики, и он заявил: «Основные черты угловых распределений при рассеянии на никеле, включая и максимум с изменяющимся положением, можно объяснить, если электроны в атоме никеля расположены в виде двух оболочек».

Он продолжал изучать некоторые другие металлы, в том числе и платину (1923 г.), в поликристаллическом состоянии, где проявлялось еще большее количество пиков и минимумов. В 1925 г. он вновь вернулся к исследованию никеля, а в апреле 1925 г. произошло знаменитое событие. По его собственным словам, это случилось так:

«Во время работы произошел взрыв как раз в тот момент, когда мишень была сильно нагрета. Трубка, в которой она находилась, треснула, и мишень окислилась, поскольку внутрь попал воздух. Потом окись удалили, а также сняли верхний слой мишени. Однако при этом пришлось многократно прогревать мишень в водороде и в вакууме. Когда эксперименты начались вновь, мы обнаружили, что угловое распределение рассеиваемых электронов полностью изменилось. Столь заметная перемена в картине рассеяния была приписана рекристаллизации мишени, происшедшей в результате длительного нагревания. Непосредственно перед этим, а также в ранее проведенных экспериментах мы изучали рассеяние электронов на множестве маленьких кристаллов, а в опытах, проделанных после этого случая, рассеяние происходило только на нескольких довольно больших кристаллах. Число их было порядка десяти».

В 1925 г. Эльзассер в письме, направленном в журнал «Naturwissenschaften», заметил, что доказательство волновой природы электронов можно было бы получить из исследований их взаимодействий с кристаллами, и указал на работу Дэвиссона и Кенсмена, в которой они

изучали рассеяние на платине, как на возможный пример, где это проявляется.

Теперь я приведу заявление Дэвиссона, сделанное им в 1933 г. К. Дарроу и использованное Мервином Келли в биографических мемуарах, подготовленных для Национальной Академии наук:

«*К. Дж. Дэвиссон в 1925 г. обратил внимание на заметку Эльзассера.* Однако он не придал ей большого значения, так как он не верил в то, что теория, разработанная Эльзассером для объяснения полученных им (Дэвиссоном) ранее результатов, была верной. Эта заметка не оказала никакого влияния на его последующую работу. Действительно, к открытию он пришел благодаря широко известному случаю с окислением поликристаллической мишени, после чего уже было выдвинуто предположение, что *рассеяние на отдельных кристаллах может привести к обнаружению* интересных эффектов. Когда было принято решение о постановке опытов с отдельными кристаллами, то уже было ясно, что будут открыты «направления прозрачности» в кристаллической решетке. В 1926 г. Дэвиссону представилась хорошая возможность посетить Англию и участвовать в работе совещания, созванного в Оксфорде Британской ассоциацией развития науки. Он захватил с собой несколько кривых, полученных *в результате опытов с отдельным кристаллом.* Они были не особенно впечатляющими (удивительно, до чего редко удавалось зарегистрировать прохождение пучков!). Он показал их Борну, Хартри и, возможно, Блекетту. Борн позвал еще одного европейского физика (по-видимому, Франка) и показал ему эти кривые. Они долго обсуждали их. После возвращения из трансатлантического путешествия Дэвиссон много работал, пытаясь понять статьи Шрёдингера, так как у него возникла мысль (возможно, подсказанная дискуссиями в Оксфорде) о том, что с помощью этих статей он найдет объяснение наблюдаемых им явлений. Осенью 1926 г. Дэвиссон вычислил возможные местоположения пучков, попробовал искать их и не нашел. Тогда он разработал программу детального исследования и 6 января 1927 г. получил интенсивные пучки, обусловленные линейной упорядоченностью поверхностных атомов. В том же месяце он доказал существование этого с помощью расчетов». Результаты Дэвиссона и Гермера были опубликованы в виде заметки в «Nature» в апреле 1927 г., а затем появилась их подробная статья в декабрьском выпуске «Physical Review». Опубликованная работа представляла собой огромное экспериментальное достижение для того времени. Был получен самый высокий по тем временам вакуум, порядка 10^{-18} *тор*. В столь хорошо откачанном сосуде помещался кристалл никеля. Электроны падали на его поверхность (111). Упруго рассеянные частицы попадали на коллектор, который с помощью весьма оригинального устройства можно было перемещать как в азимутальном, так и в полярном направлении относительно нормали к этой поверхности. Симметрия гранецентрированного кубического кристалла относительно оси (111) обусловливает существование *шести идентичных C-азимутов и по три A- и B-азимута.* Азимуты *A*- и *B*-типов связаны с одинаковыми верхними слоями атомов, но различаются по более глубоко лежащим слоям (см. рис. 3, *а*; Дэвиссон и Гермер, 1927 г.). Большинство наблюдений было проведено с одним из этих основных азимутов. В результате была обнаружена предполагаемая симметрия. Под каждым из этих азимутальных углов были найдены рассеянные электроны. Каждый электронный пучок характеризовался определенным *полярным углом и заданной величиной энергии электронов*, при которых он был наиболее интенсивен, хотя детектировать его можно было в достаточно широкой области энергий. Дэвиссон и Гермер отложили длину волны электронов, вычисленную по формуле де Бройля, в функ-

ции от синуса полярного угла (рис. 3, *б*). Если бы пучки возникали за счет интерференции волн, рассеянных на атомах верхнего слоя, то они должны были бы идти вдоль определенных линий, проходящих

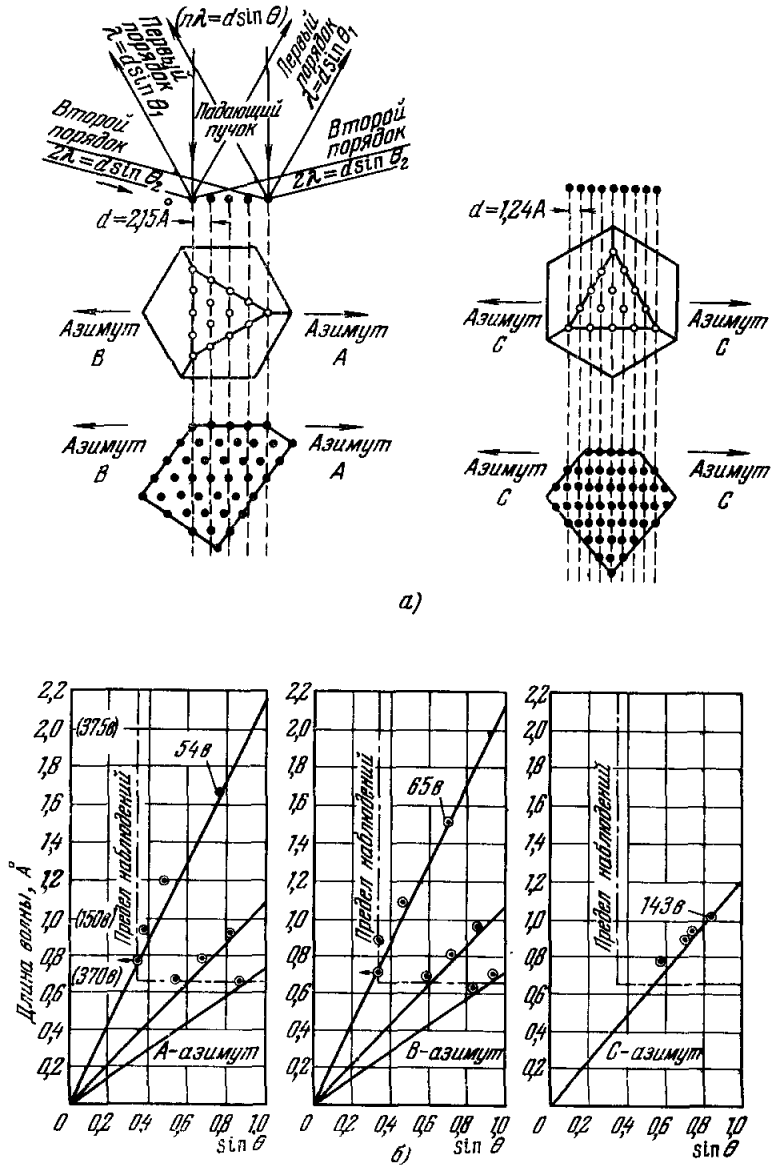


Рис. 3. *а*) Соотношение $n\lambda = d \sin\theta$ для разных азимутов в опыте Дэвиссона и Гермера. *б*) Длина волны (в Å) электронов, вычисленная по формуле де Бройля, в функции от $\sin\theta$.

через начало координат с наклоном, зависящим только от интерференционного порядка и от постоянной решетки. Поскольку последнюю можно вычислить, зная размеры кристаллической решетки никеля, то все параметры становятся известными. Оказалось, что полученные точки с весьма большой точностью находятся на этих линиях. Из ожидаемых 24 пучков

в той области, в которой эффективно действовал коллектор, было обнаружено 20, если не учитывать ряд других пучков, приписываемых абсорбированному газу. Однако положения экспериментальных точек на этих линиях, определяемые интерференцией волн от атомов второго и более низких слоев, отличались от ожидаемых, хотя и удавалось поставить наблюдаемую точку в соответствие с вычисленным положением. Расхождение могло быть отнесено либо за счет отличия расстояния между поверхностными слоями атомов от расстояний в толще кристалла, как это было предположено авторами, либо за счет такого воздействия кристалла на волны, которое проявлялось бы, если бы кристалл обладал некоторым коэффициентом преломления, точнее, комбинацией двух таких коэффициентов.

Несмотря на это расхождение, не могло быть никакого сомнения в том, что электроны ведут себя подобно волнам с длиной, задаваемой формулой де Бройля.

Я тоже присутствовал на совещании в Оксфорде, но, как мне кажется, не встречался с Дэвиссоном. По крайней мере я не обсуждал с ним его эксперименты. Однако было множество дискуссий по работе де Бройля. Было ли при этом упомянуто имя Эльзассера, я не помню. Я прочитал его статью только много лет спустя. Но вполне возможно, что влияние высказанных в ней идей сказалось на людях, с которыми я там беседовал. Возвращаясь с совещания домой, я встретил Даймонда из Кембриджа. Он работал над проблемой рассеяния электронов на гелии. Он получил несколько кривых, которые могли бы быть объяснены явлением дифракции, и мы обсудили еще раз идеи де Бройля. Приблизительно в это время он послал заметку в «Nature» (1926 г.) о результатах, полученных им незадолго до того в Принстоне. Возможно, что он показал мне именно эти результаты. Тогда мне пришла в голову мысль, что если тут и кроется нечто интересное,— а я думал, что это так, — то его легче удастся обнаружить в экспериментах, поставленных с твердыми веществами. Я вспомнил об опытах с «эриометром» Юнга, которые я проводил в студенческие годы в лаборатории К. Т. Р. Вильсона. Здесь использовалась обычная пряжа и обычный свет. Поэтому казалось, что достаточно будет исследовать все с помощью органических молекул и волн длиной 10^{-9} *см*. А это значило, что можно применить обычные катодные лучи, работа с которыми была значительно проще, чем со 100-вольтными электронами в опытах Даймонда. Именно по этой причине Даймонду позднее пришлось отказаться от своих первых результатов, как от ошибочных. Действительно, в области использованных в его опытах энергий рассеяние на гелии не обнаруживает никаких заметных эффектов. Он, подобно Эльзассеру, просто находился под сильным влиянием статьи Дэвиссона и Кенсмена.

Оказалось, что у одного из студентов, работавших в Абердине над проблемой рассеяния положительно заряженных лучей, была как раз такая аппаратура, которая могла быть использована для этой цели. Мне почти не потребовалось изменять в ней что-либо, кроме полярности разряда, вызываемого индукционной катушкой. Итак, я попросил у Александра Рейда разрешения поставить этот эксперимент с использованием тонкой целлулоидной пленки. На рис. 4 приведено изображение аппаратуры (не той, которую использовал Рейд, а той, которую я применял несколько позднее). Катодные лучи проходят через узкую трубку *B*, замененную впоследствии на два отверстия, а затем попадают на образец *C*, тонкую пленку, через которую они легко проникают. Потом они падают на экран *E*, на котором можно наблюдать флуоресценцию. Для фотосъемок сверху могла опускаться фотографическая пластинка *D*.

Почти сразу же Рейд получил фотографии, на которых было ясно заметно дифракционное гало. Я отнесся к этому слегка скептически, так как на снимках, сделанных с рассеянными положительно заряженными лучами, с которыми мы работали, четко проявлялись резкие края. Как

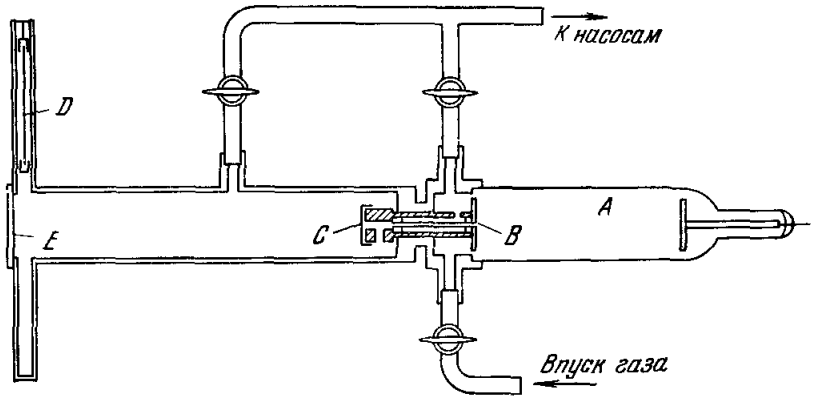


Рис. 4. Прибор, использованный автором в Абердине для изучения дифракции электронов на тонких пленках.

показал более детальный анализ, они были обусловлены просто эффектом контрастности. Однако фотометр подтвердил реальность наличия электронных гало. Они были как раз такими, каких можно было бы ожидать за счет молекул определенного размера, ориентированных в пространстве совершенно случайным образом. При этом диаметр их менялся в зависимости от энергии электронов точно так, как этого следовало ожидать на основании формулы де Бройля. Размер был также примерно таким, какой можно было предвидеть для длинной углеродной цепочки, но эта оценка, конечно, была весьма приближенной. На рис. 5 изображена лучшая из фотографий, которые нам когда-либо удавалось получить с целлулоидными мишенями. Мы опубликовали совместную заметку в «Nature» в июне 1927 г., спустя два или три месяца после первой публикации Дэвиссона и Гермера. Структура целлулоида была в то время не известна. Поэтому для настоящей проверки надо было исследовать дифракцию на какой-либо из известных кристаллических решеток. Естественно, выбор пал на металлы. Их строение было хорошо изученным и довольно простым (рис. 6). Но в то время техника получения тонких пленок еще не была разработана, или по крайней мере я ничего не знал о ней. Пленки, которые я использовал (теперь я уже работал один), были приготовлены из алюминия, золота и платины главным механиком лаборатории, покойным мистером К. Г. Фрезером. Именно ему я полностью обязан успехом эксперимента, потому что его часть работы была весьма трудной. Это был механик старой закалки. По профессии он был часовщиком; у него был редкий дар (что позже проявилось с еще большей силой) — умение создавать сложную и четко работающую аппаратуру сразу же после того, как кто-то рассказал ему о ней и набросал

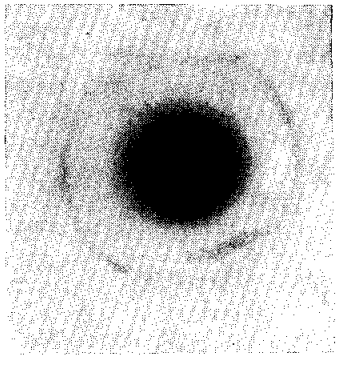


Рис. 5. Дифракционные гало для целлулоида.

несколько грубых эскизов на грязных обрывках бумаги прямо у него на скамье. Те из вас, кому довелось огромное счастье работать с

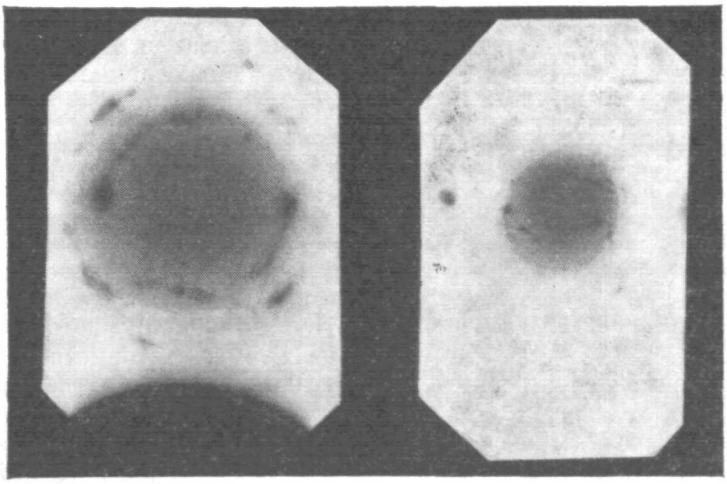


Рис. 6. Алюминий: слева — 15-*мм* искровая щель, справа — 6,5-*мм* искровая щель.

В облучаемой части образца содержится только два или три кристалла. Грани кристалла параллельны поверхности.

таким человеком, знают, что такому механику нет цены (если уж это верно и в отношении жен).

Первые пленки, с которыми мы поставили опыты, были сделаны из алюминия, а последующие — из золота. В обоих случаях на фотопластинках были видны кольца, которые как качественно, так и количественно совпадали с теоретическими предсказаниями для гранецентрированной кубической решетки с параметром решетки, равным примерно 4,06 Å. На рис. 7 приведены фотографии, полученные на золоте. Там вы видите две помещенные рядом фотографии, снятые при разных напряжениях. Видно, что при более низкой энергии размеры колец больше. Впоследствии мы использовали также платину (рис. 8).

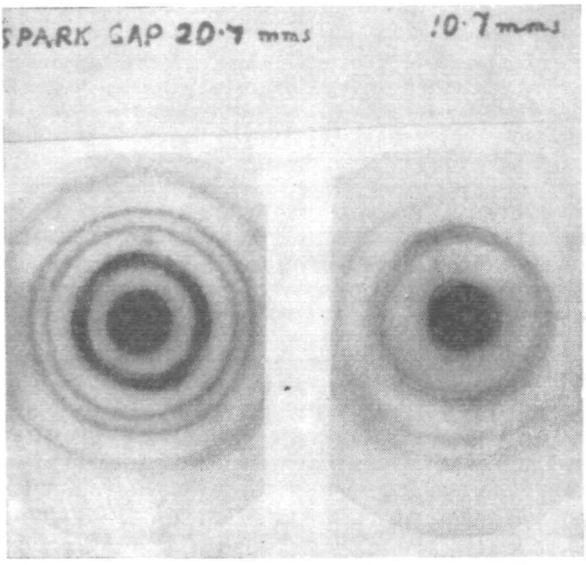


Рис. 7. Золото: кольца для электронов разных энергий.

Образец изготовлен путем сплющивания обычного листового золота.

Результаты для всех трех металлов в точности согласовались с предсказаниями де Бройля, т. е. все кольца получались правильного размера, как по относительным размерам, так и по их соответствию со структурой

металла и по предсказываемому закону изменения с изменением энергии электронов, а также по абсолютному размеру, вычисленному согласно формуле де Бройля. Я опубликовал заметку в «Nature» в декабре 1927 г. об опытах с платиной и статью в «Proceedings of the Royal Society» об экспериментах с золотом и алюминием в феврале 1928 г., двумя или тремя месяцами позже статьи Дэвиссона и Гермера, появившейся в «Physical Review» в конце 1927 г. Возражения, выдвинутые против этих экспериментов, касались главным образом того, что результаты можно было бы объяснить каким-либо способом (в действительности не было указано, каким именно), предположив, что весь эффект вызван тормозным излучением, т. е. рентгеновскими лучами, возникающими при соударении электронов с металлическими пленками. Во второй статье мне удалось опровергнуть эту версию. Я изучал отклонение электронов, прошедших через

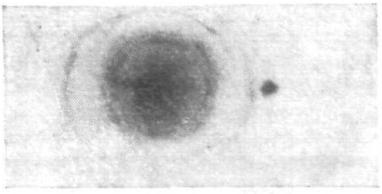


Рис. 8. Платина: вся картина смещена магнитным полем.

Справа от колец видна точка, полученная при быстрой экспозиции центрального пятна до того, как было наложено магнитное поле.

Межатомные расстояния для алюминия, золота, платины и других металлов, определенные с помощью дифракции электронов (столбцы справа) и дифракции рентгеновских лучей

Металл	Параметр решетки, a		Металл	Параметр решетки, a	
	Измерение			Измерение	
	рентгеновские лучи	катодные лучи		рентгеновские лучи	катодные лучи
Алюминий	$4{,}046\cdot10^{-8}$	$4{,}06\cdot10^{-8}$	Свинец	$4{,}92\cdot10^{-8}$	$4{,}99\cdot10^{-8}$
		$4{,}08\cdot10^{-8}$	Железо	$2{,}87\cdot10^{-8}$	$2{,}85\cdot10^{-8}$
Золото	$4{,}06\cdot10^{-8}$	$4{,}18\cdot10^{-8}$	Серебро	$4{,}079\cdot10^{-8}$	$4{,}11\cdot10^{-8}$
		$3{,}99\cdot10^{-8}$	Медь	$3{,}60\cdot10^{-8}$	$3{,}66\cdot10^{-8}$
Платина	$3{,}91\cdot10^{-8}$	$3{,}88\cdot10^{-8}$	Олово (белое), направление ⟨200⟩	$2{,}91\cdot10^{-8}$	$2{,}86\cdot10^{-8}$
		$3{,}89\cdot10^{-8}$			

металлическую фольгу, до их попадания на фотопластинку. В этой области было наложено магнитное поле. Мне удалось показать (в действительности качественные стороны этого явления я наблюдал и раньше), что электроны, вызывавшие появление колец (я называл их дифрагировавшими электронами), отклонялись при этом точно так же, как и многочисленные электроны, прошедшие прямо через пленку, которая несмотря на то, что она была весьма заботливо приготовлена, имела столько «пустот», что девять из десяти электронов проходили через нее прямо. Этим опровергалась точка зрения, согласно которой кольца образовывались за счет рентгеновского излучения, которое, конечно, не должно было бы отклоняться под действием магнитного поля.

Затем мы начали эксперименты с напыленными пленками, относительно техники изготовления которых мне дал весьма ценные указания Жолио. В дальнейшем все наши фотографии (рис. 9) были получены с такими пленками. Энергия электронов была порядка 20—60 *кэв* *).

*) Электронограммы такого типа были одновременно с Г. П. Томсоном получены и П. С. Тартаковским, в опытах которого использовались относительно медленные электроны с энергией до 2 *кэв* (см.: П. С. Тартаковский, Экспериментальные основания волновой теории материи, М., ГТТИ, 1932). (*Прим. перев.*)

Такие электроны легко получить, если использовать индукционную катушку в сочетании с не слишком большим конденсатором из лейденских банок. Это все, что у меня было в то время.

За этим последовали работы Кикучи в Японии. Он использовал пластинки слюды и показал, что подобные эффекты возникали при пропускании электронов через эти пластинки. Рис. 10, *а* является репродукцией рисунка, взятого из статьи Кикучи, которая была опубликована в 1928 г. На нем видны пересекающиеся пунктирные линии, характерные для очень тонких пластинок слюды. При более толстых пластинках (рис. 10, *б*) получались электронные кольца, для которых выполнено третье условие интерференции, помимо тех, которые выполнялись в предыдущем случае, а также заметны хорошо известные пары светлых и темных параллельных линий, которые Кикучи объяснял просто как результат двойного рассеяния электронов в пленке. Примерно в то же время Ничикава и Кикучи впервые обнаружили дифракцию в виде «линий» при отражении быстрых электронов, т. е. дифракцию электронов, которые не проходили сквозь образец, а появлялись с той же стороны, с которой они были направлены на него. В 1929 г. Фрезер изготовил первый прибор, пригодный для полного изучения

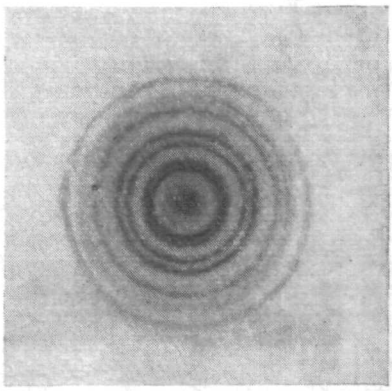
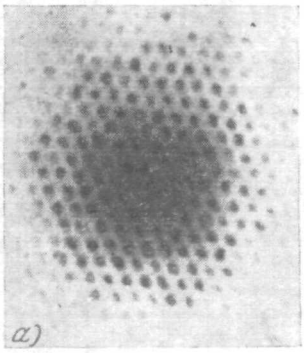


Рис. 9. Дифракция на напыленной золотой пленке.



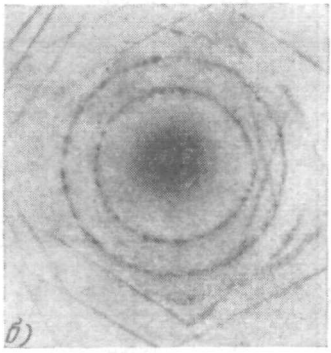


Рис. 10. Пластинки слюды (Кикучи).

а) Очень тонкие пластинки; *б*) более толстые пластинки; видны линии, обусловленные двойным рассеянием.

явления дифракции при отражении быстрых электронов. Образец, помещенный в вакуум, мог независимо смещаться в трех направлениях.

Как дифракционные эксперименты Дэвиссона и Гермера при низких энергиях, так и опыты, поставленные в Абердине с электронами в интервале энергий 20—60 *кэв*, доказывают, что электроны, рассеиваемые атомами твердых тел, ведут себя подобно волнам с длиной h/p в том смысле, что они наблюдаются в том месте, где такие волны имели бы сильные интерференционные максимумы.

По-моему, истинный гений де Бройля проявился в том, что он приписал волны всем частицам без исключения. Ведь значительно проще

было бы использовать эту идею только в отношении тех объектов, которыми он вначале интересовался, а именно в отношении квантов излучения. Тогда это был бы просто один из способов устранения трудностей в проблеме излучения. Правда, при этом оказалось бы, что надо сделать несколько неудовлетворительное предположение об отличной от нуля массе покоя этих объектов.

Если сравнивать две рассмотренные серии экспериментов, то сразу станет ясно, что опыты, проведенные Дэвиссоном и Гермером, были огромным триумфом экспериментальной техники, одним из самых крупных в истории науки. В то же время эксперименты, поставленные в Абердине, были очень простыми и легко воспроизводимыми. Единственная трудность здесь состояла в том, чтобы изготовить достаточно хорошие

Рис. 11. Слева направо: автор, де Бройль и Дэвиссон после конференции в Глазго, созванной Британской ассоциацией развития науки в 1928 г.

образцы. Довольно нетрудно понять, в чем заключается причина такого различия. Дэвиссон открыл эффект, который, по его мнению, мог быть важен для весьма определенной цели. Он должен был изучать этот эффект

более или менее в том виде, в каком он его обнаружил. Если бы он поставил совершенно отличный эксперимент, то оказалось бы невозможным доказать или отвергнуть предложенное объяснение найденного им эффекта. Я же пытался подтвердить справедливость (или же нереальность) идеи, основанной на весьма общей теории, и потому мог попытаться провести самый простой эксперимент, от которого разумно было ожидать получения соответствующих выводов.

Очевидно, что даже если в рамках чисто кинематической теории учесть явления отражения и изменения длины волны под действием внутреннего потенциала, то она все еще будет неполной. На самом деле нам сильно повезло, что с помощью этой теории удается объяснить так много явлений, поскольку правильная динамическая теория намного сложнее. Первое удовлетворительное объяснение полученных результатов было дано Бете в 1928 г. в статье, замечательной той аналогией с рентгеновскими лучами, которая была четко рассмотрена в ней. Дальнейшее развитие эти идеи получили в работах Кикучи и Шинохары и ряде других. Они широко используются при исследовании конкретных эффектов в металлургии. В этой теории кристалл рассматривается как единое целое. Для применения ее надо знать величины некоторых вполне определенных коэффициентов. В случае очень маленьких кристаллов простейшая теория может дать интенсивности различных колец. Для этого необходимо лишь знать кривые атомного рассеяния на исследуемых атомах.

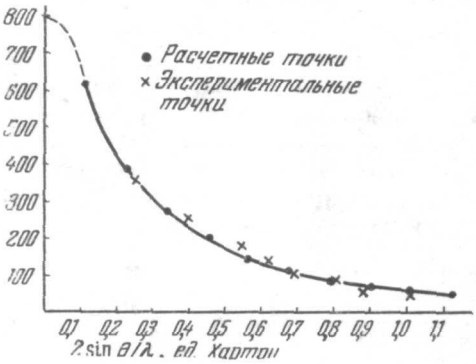


Рис. 12. Сравнение с вычислениями кривой атомного рассеяния для золота.

Кривая проведена через расчетные точки, нормированные на эксперимент при $2 \sin \theta/\lambda = 0{,}8$.

Автор измерял эти кривые для золота в 1929 г., сравнив интенсивности различных колец. Результаты хорошо согласовались с теоретическими вычислениями Мотта (рис. 12). В действительности это был всего лишь счастливый случай, так как с довольно большими кристаллами, для которых кольца проявляются еще более четко, ситуация значительно сложнее.

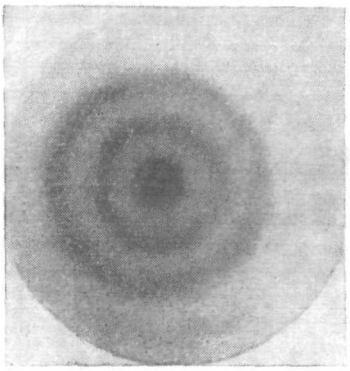


Рис. 13. Тетрахлорид углерода (Марк и Вирль).

В 1930 г. Марк и Вирль показали, что для некоторых газов можно получить дифракционную электронограмму в виде размытых колец. Вирль в 1931—1932 гг. изучил детально это явление и показал, что по виду этих колец можно получить много информации о расстояниях между атомами в молекулах исследуемых газов. Эта методика оказалась очень важной для ряда задач химии.

Ни один из первоначальных экспериментов не мог претендовать на точность, большую, чем 2%. Однако Фризен в 1935 г. улучшил эту точность сразу по крайней мере на порядок. И вновь не было обнаружено никакого отклонения от закона де Бройля. Дж. У. Хьюз показал, что β-лучи с энер-

гией до 1 *Мэв* также могли давать дифракционную картину. Для таких лучей релятивистская поправка уже довольно велика и длина волны определяется формулой

$$\lambda = \sqrt{1-(v^2/c^2)}\, h/mv,$$

т. е. отношением h/p, а не h/mv. И действительно, было показано, что формула h/p справедлива с точностью до 5%. Курран подтвердил эти результаты в 1937 г.

Дальнейшая история дифракции электронов состоит в основном из приложений ее к большому числу конкретных задач. В течение долгого времени дифракция электронов была одним из наиболее важных методов исследования строения твердых тел, особенно их поверхностной структуры. С тех пор как стал использоваться электронный микроскоп, специальные приборы для изучения электронной дифракции стали применяться реже, так как для многих задач желательно изучение одного и того же образца как под сфокусированным микроскопом, так и при изменении фокусировки таким образом, чтобы получалась дифракционная картина.

После многих лет забвения вновь стал применяться метод Дэвиссона и Гермера. Сейчас ведется много работ, в которых применяются электроны с энергией около 100 *эв*. Это оживление вызвано применением (довольно запоздалым) прибора, сконструированного Эренфельдом, для ускорения дифрагировавших электронов и последующей регистрации их на флуоресцирующем экране.