

Вальтер Боте

Нобелевская лекция

-- Лекция по случаю вручения Нобелевской премии

Нобелевская лекция *

Метод совпадений

Прежде чем перейти к теме моей лекции, позвольте мне сказать несколько слов человеку, которому, помимо моего учителя Макса Планка, я так многим обязан и который скончался десять лет назад после долгих мучений. В 1912 году Ганс Гейгер был назначен директором новой Лаборатории радиоактивности в Физико-техническом институте Рейха в Берлине-Шарлоттенбурге, президентом которого тогда был Эмиль Варбург; до этого он шесть лет проработал под руководством Резерфорда в Манчестере. В июне 1913 года я стал ассистентом Гейгера. Лаборатория радиоактивности в то время состояла всего из двух комнат; позднее, когда испытания радиоактивных веществ стали более масштабными, она расширилась до четырёх. Эта скромность его требований к помещению – Гейгер неоднократно заявлял, что не стремится к гигантскому институту – характерна для главной черты личности Гейгера как учёного: стремления ограничить научную работу экономическими рамками. Несомненно, здесь сыграло свою роль уникальное влияние Резерфорда; столь же несомненно, что это влияние гармонизовало с естественной тенденцией. Как бы то ни было, эксперименты Гейгера и Марсдена по рассеянию альфа-лучей, как известно, положили начало всей экспериментальной атомной физике последних лет. Я думаю, главный урок, который я усвоил у Гейгера, заключается в том, чтобы выбирать из множества возможных и, возможно, полезных экспериментов тот, который представляется наиболее актуальным в данный момент, и проводить этот эксперимент с максимально простой, то есть наглядно организованной и регулируемой аппаратурой.

В 1924 году я наткнулся на недавно опубликованную теоретическую работу Бора, Крамерса и Слейтера, в которой предлагалась возможная интерпретация корпускулярно-волнового дуализма в общепринятом описании свойств света. Под этим следует понимать тот экспериментальный факт, что свет всех длин волн при чистом распространении ведёт себя как волновой процесс (интерференция), но при преобразовании в другие виды энергии – как частицы (кванты света: фотоэффект, эффект Комптона). Новая идея заключалась в отрицании строгой справедливости закона энергии-импульса. В индивидуальном, или элементарном, процессе, пока речь идёт лишь об одном акте излучения, законы сохранения считались выполняемыми лишь статистически, справедливыми только для макроскопической совокупности очень большого числа элементарных процессов, так что не возникало противоречия с имеющимися эмпирическими данными. Сразу стало очевидно, что этот вопрос необходимо решить экспериментально, прежде чем можно будет добиться определённого прогресса. Мы с Гейгером сразу согласились с тем, что такое решение *возможно*, когда я обсуждал с Гейгером статью Бора, Крамерса и Слейтера.

Экспериментальная задача предполагала несколько способов решения. Мы остановились на эксперименте с эффектом, открытым незадолго до этого А.Х. Комптоном, то есть рассеянием света на практически свободных электронах. Помимо рассеянного света, возникают «электроны отдачи», которые наблюдались и интерпретировались К.Т.Р. Уилсоном в камере Вильсона, а также мной как в камере Вильсона, так и методом ионизации. «Вопрос к природе», на который должен был ответить эксперимент, можно было сформулировать следующим образом: действительно ли в элементарном процессе одновременно испускаются квант рассеяния и электрон отдачи, или между ними существует лишь статистическая связь?

Тем временем Гейгер разработал так называемый игольчатый счетчик, преимущество которого заключается в том, что он реагирует не только на тяжелые частицы, но и на электроны, а следовательно, и на кванты света достаточно высокой энергии, способные высвободить электроны внутри счетчика.

Итак, наша установка состояла из двух игольчатых счётчиков, мимо общей передней стенки которых, не касаясь её, проходил пучок рентгеновских лучей. Рентгеновский луч проходил в атмосфере водорода; в одном счётчике происходили комптоновские процессы, регистрировавшие электроны отдачи, тогда как в другой счётчик проникали только кванты рассеяния, которые с гораздо меньшей вероятностью приводили его в действие посредством испускания электронов. Показания обоих счётчиков записывались рядом на движущейся бумажной диаграмме. Таким образом, после нескольких неудачных попыток, нам удалось установить точность любого временного «совпадения» между показаниями двух стрелок, которая составляла 10^{-4} сек. Однако расход плёнки был настолько велик, что наша лаборатория с развешенными для сушки плёнками порой напоминала промышленную прачечную.

Полученный нами конечный результат заключался в том, что систематические совпадения действительно происходят с частотой, которую можно было оценить, исходя из экспериментальной геометрии и вероятностей срабатывания счётчиков, исходя из предположения, что в каждом элементарном комптоновском процессе *одновременно* генерируются квант рассеяния и электрон отдачи. Была продемонстрирована строгая справедливость закона сохранения энергии даже в элементарном процессе, и было показано, что остроумный выход из корпускулярно-волновой проблемы, обсуждаемый Бором, Крамерсом и Слейтером, оказался тупиком.

Этот результат был подтвержден разными исследователями, использовавшими различные экспериментальные установки. Когда, более десяти лет спустя, возникли сомнения в правильности этого результата, я вместе с моим тогдашним ассистентом Г. Майером-Лейбницем попытался дополнить и улучшить исходный эксперимент в одном пункте: целью было продемонстрировать одновременно и единообразно направления рассеянного кванта и отдачи электрона, как того следовало ожидать согласно теории Комптона, то есть согласно законам упругого удара двух тел. В данном случае мы использовали высокоэнергетическое гамма-излучение препарата радиотория. Результат снова оказался явно положительным. Это продемонстрировало как сохранение энергии, так и сохранение импульса.

К сожалению, сотрудничество с Гейгером прекратилось в 1925 году, когда Гейгера пригласили в Кильский университет. При разделе области, в которой мы до сих пор работали вместе, метод совпадений, по великодушному предложению Гейгера, был отдан мне.

Возможность чисто статистической справедливости теорем сохранения, обсуждавшихся Бором, Крамерсом и Слейтером, оказалась достаточно важной, чтобы проверить её ещё в одном случае. В элементарном процессе *излучения света* испускается сферическая волна. Проблема заключалась в следующем: может ли эта сферическая волна инициировать акт поглощения только в одном направлении излучения, как постулирует энергетическая теорема, или же она может делать это статистически независимо в нескольких направлениях, как того следует ожидать, согласно Бору, Крамерсу и Слейтеру? В эксперименте такого рода следует учитывать, что, в отличие от эффекта Комптона, вероятность демонстрации акта поглощения не может быть по порядку величины значительно ниже единицы, поскольку в противном случае любые возможные систематические совпадения были бы поглощены неизбежными случайными совпадениями. Это было достигнуто путём согласования источника излучения (железного или медно-калиевого флуоресцентного излучения) и газового заряда игольчатых счётчиков (аргона), установленных по обе стороны, таким образом, чтобы вероятность поглощения в газовом заряде была максимально близка к единице. Кроме того, телесные углы, которые два счётчика подводят к источнику излучения, должны были составлять по возможности 2π . Результатом этого эксперимента (1926) было *отсутствие* систематических совпадений, по крайней мере, с частотой, ожидаемой согласно Бору, Крамерсу и Слейтеру. Строгое сохранение энергии в элементарном процессе было, таким образом, подтверждено и отрицательным экспериментом. Корпускулярно-волновая проблема оставалась открытой лишь короткое время. В течение этого времени мне посчастливилось постоянно обсуждать её с Эйнштейном. Некоторые эксперименты, проведённые по предложению Эйнштейна, не дали никаких решающих новых результатов. Решение (по крайней мере формальное) давала волновая механика; оно заключается просто в предположении, что волна Шрёдингера системы, состоящей из n частиц, является волной в $3n$ -мерном «конфигурационном пространстве».

Совершенно иной областью, в которой метод совпадений принёс плоды, было изучение «космического излучения» или «ультраизлучения», как называл его первооткрыватель Гесс. Тем временем Гейгер разработал в Киле мощный прибор – счётчик Гейгера-Мюллера. Совпадения между незащищёнными счётчиками, вызванные космическими лучами, наблюдались как самим Гейгером, так и В. Кольхёрстером, тогда гостем моей берлинской лаборатории. Более глубоких открытий можно было ожидать, размещая поглощающие слои переменной толщины между счётчиками и/или над ними. Подобные эксперименты, проведённые мной совместно с Кольхёрстером в 1929 году, привели к смелому выводу о том, что космическое излучение состоит не из гамма-лучей, как обычно предполагалось ранее из-за их высокой проникающей способности, а из материальных частиц с энергией не менее 1000 миллионов электрон-вольт. Подобные схемы контрсовпадений стали применяться в последующий период всё чаще, с использованием всё большего числа счётчиков, частично в сочетании с камерами Вильсона, ионизационными камерами, сцинтилляционными счётчиками и т.д. Корпускулярная природа первичного космического излучения была подтверждена, хотя процессы оказались значительно сложнее, чем мы предполагали. В качестве простого примера упомянем лишь, что Б. Росси, который также некоторое время гостил в моей лаборатории PTR, впоследствии сумел наблюдать первые признаки появления ливней частиц с помощью совпадений между *соседними* счётчиками («кривая Росси»). Возможности применения метода совпадений к исследованию космического излучения ещё далеко не исчерпаны.

Тот же принцип измерения, что и в случае космического излучения, конечно, применим и к обычным бета- и гамма-лучам. Например, с помощью всего двух счётчиков и переменного поглотителя между ними можно очень просто определить среднюю энергию гамма-излучения в смеси гамма-лучей и их вторичных электронов (Боте и Беккер, 1930). Этот метод может быть полезен в тех случаях, когда по каким-либо причинам невозможно применить обычный спектрометрический метод с магнитным отклонением.

Технология подсчёта совпадений за это время значительно усовершенствовалась. Вместо сложной фоторегистрации мы давно перешли на ламповые схемы в сочетании с механическими счётчиками, что обеспечивает большую простоту и позволяет сократить так называемый период разрешения на несколько порядков, так что мешающие «случайные» совпадения во многих случаях вообще не играют роли. Я использовал схему с многосеточным счётчиком совпадений ещё в 1929 году. Росси первым описал другую систему, работающую с параллельными лампами; её преимущество в том, что её можно легко расширить на совпадения между более чем двумя событиями, и поэтому она широко используется в настоящее время. (Недавно З. Бэй и другие в США добились сокращения периода разрешения совпадений до 10^{-11} с с помощью умножителей.)

Ещё одной обширной областью применения метода совпадений являются ядерные реакции. В совместном исследовании с моим коллегой Х. Френцем (1928) и Позе в Галле было обнаружено, что при искусственном превращении ядра (в нашем случае ^{10}B) альфа-лучами возникает несколько дискретных групп протонов с различной энергией. Вскоре после этого (1930) я, совместно с Х. Беккером, открыл гамма-излучение, возникающее при бомбардировке альфа-лучами не только бора, но и других элементов. Оба эти результата нашли единое толкование. В процессе превращения вновь образующееся ядро не всегда сразу находится в основном состоянии, а иногда – в одном из возможных активированных состояний. В этом случае образующаяся частица имеет соответственно меньшую энергию, тогда как ядро-продукт переходит в основное состояние с испусканием количества энергии, сохранённого в виде гамма-излучения. Как правило, этот переход происходит за неизмеримо короткий промежуток времени, то есть практически одновременно с испусканием новой частицы. Продемонстрировать эту одновременность отнюдь не тривиально, поскольку, например, может случиться, что ядро-продукт *всегда* сначала образуется в активированном состоянии. Это можно установить с помощью измерений совпадений. В этом случае даже самая богатая энергией группа образующихся частиц должна была бы быть связана с гамма-излучением, чего не происходит, если эта группа принадлежит основному состоянию ядра-продукта. (В случае «метастабильных» состояний возбуждения эти аргументы следует модифицировать аналогичным образом.) Такие измерения были впервые проведены в 1925 году Х. Й. фон Байером, тогда моим студентом в Гейдельберге, снова для уже упомянутого случая превращения бора под действием альфа-лучей. Таким же образом можно определить, образуются ли два или несколько гамма-квантов, образующихся в ядерной реакции, в одном и том же ядре, то есть практически одновременно, или же они испускаются поочередно при превращении отдельных ядер. Эти вопросы важны для баланса энергии, то есть для измерения энергии реакции и массы ядра. Связь направлений между различными излучениями, генерируемыми в ядерной реакции, как друг с другом, так и с инициирующим излучением, также может быть обнаружена и измерена по совпадениям; это даёт ценную информацию о структуре атомных ядер. Аналогичные задачи спонтанных превращений (естественной и искусственной радиоактивности) можно решить экспериментально таким же образом, как это было продемонстрировано на примере разложения RaC (Боте и Майер-Лейбниц, 1937).

Таким образом, метод совпадений найдет широкое применение в обширной области ядерной физики, и мы можем без преувеличения сказать, что этот метод является одним из важнейших инструментов современного физика-ядерщика.