

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

539 173

## ОТКРЫТИЕ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР\*)

О. Фриш, Дж. Уилер

*Успехи, ошибки и явные неудачи нескольких ученых из различных стран придали своеобразный колорит начальному периоду изучения деления ядер. Удачное сочетание пытливого мысли и счастливого случая превратило эту волнующую идею в реальность.*

## ЭТО НАЧИНАЛОСЬ ТАК

О. Фриш

В 1932 г. был открыт нейтрон. Почему, спрашивается, прошло семь лет, прежде чем было обнаружено деление ядер. Ведь деление ядер поистине поразительное явление: оно сопровождается сильной радиоактивностью, а полная ионизация от осколков деления превосходит в десятки раз ионизацию от ранее известных процессов. Почему же так долго не могли открыть деление ядер? Для ответа на этот вопрос лучше всего рассмотреть ситуацию в Европе с точки зрения физика-экспериментатора.

## ИССЛЕДОВАНИЯ В ЕВРОПЕ

В Европе было несколько лабораторий, занимавшихся ядерной физикой, но я думаю, что термин «группа» не успел еще войти в научный обиход. В то время наука развивалась благодаря разрозненным усилиям отдельных ученых, каждый из которых работал только с одним или двумя студентами и ассистентами.

В Париже имелось несколько лабораторий из числа самых активных исследовательских учреждений в Европе. Здесь была открыта радиоактивность. В Париже работала Мария Кюри (до самой кончины в 1934 г.). Ее влияние было огромным. В то время техника измерений — ионизационные камеры и электрометры — была совсем проста, та же, что и на рубеже двух столетий. Этого было вполне достаточно при измерении естественной радиоактивности элементов, но такое оборудование совершенно не отвечало требованиям, которые возникали при выполнении многих работ, посвященных исследованию деления ядер. К теории Мария Кюри относилась без особого уважения. Однажды, когда один из ее студентов, предлагая эксперимент, добавил, что физики-теоретики уверены в том, что он будет успешным, она ответила: «Это не важно, мы поставили бы

\*) Otto R. Frisch, John A. Wheeler, The Discovery of Fission, Phys. Today 20 (11), 43 (1967). Перевод Е. Д. Михальчи.

этот опыт в любом случае». Возможно, из-за такого отношения к теории в этой лаборатории не открыли нейтрон.

Вторым местом, представляющим интерес, был *Кембридж*. Эрнест Резерфорду, который стоит за всеми исследованиями, выполненными в Кембридже, удалось расщепить в 1919 г. атомное ядро. С 1909 г. он с особым интересом занимался вопросами обнаружения и счета отдельных ядерных частиц. Им впервые был введен сцинтилляционный метод,



Старые друзья лорд и леди Резерфорд (слева) с Нильсом и Маргарет Бор в саду Резерфорда. (Приблизительно 1930 г.)

который был его любимым детищем. Главные достоинства работ Резерфорда заключались в простоте и безыскусственности применяемых им методов; этим можно объяснить то недоверие, с которым он относился к сложным приборам. Даже в 1932 г., когда Джон Кокрофт и Эрнест Уолтон впервые расщепили ядро с помощью искусственно ускоренных протонов, для регистрации была использована сцинтилляционная методика. К этому времени Резерфорд понял необходимость развития электронных методов счета частиц. Причиной этого явились очевидные недостатки сцинтилляционного метода: он оказался непригодным как при очень больших, так и при очень малых скоростях счета, а его надежность оставляла желать лучшего. Эти недостатки еще более заметны, если вспомнить о результатах, полученных в третьей лаборатории, а именно в венской.

В *Вене* начиналась моя деятельность. В то время это место было *enfant terrible* ядерной физики. Например, некоторые физики там утвер-

ждали, что не только азот и еще одно или два легких ядра, но практически каждое из легких ядер может быть расщеплено  $\alpha$ -частицами и при этом вылетает значительно больше протонов, чем то, которое до сих пор удалось наблюдать. Я до сих пор не понимаю, как они могли прийти к таким ошибочным заключениям. Очевидно, они заставили вести подсчет числа сцинтилляций студентов, которым ничего не говорилось о предполагаемом числе отсчетов. На первый взгляд такая методика измерений кажется



Кокрофт (слева) и Уолтон выдвинули новую идею расщепления ядер с помощью ускоренных протонов.

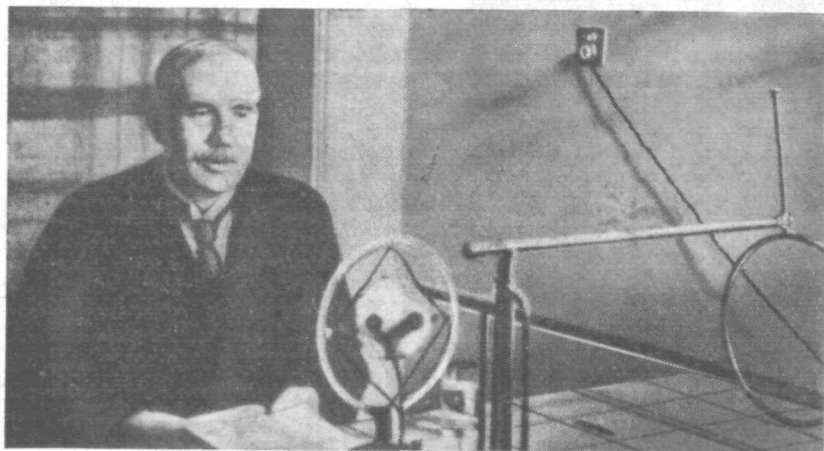
весьма объективной, потому что студенты свободны от каких бы то ни было предубеждений. Однако у них быстро выявилась тенденция в пользу больших чисел, так как они чувствовали, что заслужат одобрение, если обнаружат много частиц. Вполне вероятно, что неверные результаты были получены как в силу такой тенденции, так и вследствие некритического отношения к собственным результатам и желания во что бы то ни стало победить англичан.

Я хорошо помню, как в момент моего отъезда из Вены (после того как мне удалось избежать обычной участи студентов — подсчета числа сцинтилляций) мой руководитель, Карл Пшибрам, сказал мне унылым голосом: «Не сомневаюсь, что Вы скажете «им» в Берлине, что мы вовсе не так плохи, как они о нас думают». Убедить «их» мне не удалось.

В Германии исследования по ядерной физике велись в нескольких местах. Группа Отто Гана и Лизе Мейтнер (это была одна из первых групп, где начали изучать радиоактивные элементы) к этому времени разделилась на две группы, проводившие независимые исследования. Ган работал над различными приложениями радиоактивности для изучения химических реакций, структуры осадков и аналогичных явлений; Лизе Мейтнер использовала радиоактивные материалы в основном для изучения процессов  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения и взаимодействий  $\gamma$ -лучей с веществом.

Кроме того, в Германии работал Ганс Гейгер. Еще до 1909 г. в дни, предшествовавшие открытию ядра, он работал у Резерфорда. Резерфорд чувствовал ненадежность сцинтилляционного метода и попросил Гейгера разработать для проверки этого метода электрический счетчик. Но как

только Резерфорд увидел, что эти два метода дают один и тот же результат, он вернулся к сцинтилляционной методике, которая казалась ему более простой и надежной, если применять ее с соответствующими мерами предосторожности. Гейгер, возвратившись в Германию, продолжал улучшать электрические счетчики и в 1928 г. вместе с В. Мюллером разработал счетчик для регистрации  $\beta$ -лучей. Ранее созданные счетчики были непригодны для этой цели, а регистрировать  $\beta$ -лучи сцинтилляционным методом нельзя было. Однако и новые счетчики никак нельзя было назвать быстродействующими, так как разряд между центральным электродом



Резерфорд впервые применил сцинтилляционный метод для детектирования частиц.

и цилиндрической оболочкой гасился на большом сопротивлении (многомегомном), включенном в цепь; соответственно скорость счета была ненамного больше, чем у сцинтилляционного метода. Даже при нескольких сотнях частиц в минуту необходимы были существенные поправки.

Вальтер Боте первым применил метод совпадений, как при попытках исследовать некоторые характеристики космических лучей, так и для измерения энергии  $\gamma$ -лучей по образовавшимся вторичным электронам. Фактически это был первый надежный метод измерения энергии слабого  $\gamma$ -излучения.

До 1932 г. единственными источниками, применявшимися для расщепления атомного ядра, были элементы, обладающие естественной  $\alpha$ -радиоактивностью. К ним относились: полоний, достать который было очень трудно (практически весь его запас был в Париже), и один из короткоживущих продуктов распада радия. Хотя последний получался без примесей, он обладал малым временем жизни и давал сильное  $\gamma$ -излучение.

#### ГОД ОТКРЫТИЙ

В 1932 г., который с полным правом можно назвать «годом чудес», был открыт нейтрон и, кроме того, произошли два других важнейших события. В США Эрнест О. Лоуренс запустил первый циклотрон, перспективы которого казались многообещающими, а в Англии Кокрофт и Уолтон построили первый ускоритель протонов, которые были способны расщеплять ядра. Нет необходимости говорить, что эти машины положили

начало огромному скачку в развитии ядерной физики. Большинство физиков, занимавшихся ядром, впоследствии не могли обойтись по крайней мере без одного из этих двух инструментов для исследования ядра. Однако самое интересное заключается в том, что оба эти прибора практически не смогли указать тот путь, который привел к открытию деления ядер.

Я не хочу очень подробно останавливаться на истории открытия нейтрона, потому что этому было посвящено несколько интересных лекций на Конгрессе по истории науки, состоявшемся в 1962 г. в Итаке (штат Нью-Йорк). В опубликованном сборнике трудов этого конгресса есть интересные доклады Нормана Фэзера и сэра Джеймса Чадвика. Там сказано, что открытие нейтрона в Кембридже было не просто удачей, которая может выпасть на долю каждого исследователя, а явилось результатом поисков нейтрона, проводившихся в Кембридже (несмотря на ошибочные теоретические идеи). Это открытие окрылило ученых Кембриджа. Они обнаружили важное явление, которое могло бы остаться незамеченным. Х. К. Вебстер нашел, что интенсивность странных проникающих лучей, испускаемых бериллием при облучении его  $\alpha$ -частицами, была больше в направлении движения падающих  $\alpha$ -частиц, чем в противоположном. Этот результат был абсолютно непонятен, если бы испускались  $\gamma$ -лучи, как думали в то время. Даже французские физики Кюри и Жолио разделяли эту точку зрения, которая существенно подкреплялась всеми теоретическими предсказаниями. Затем эксперименты Чадвика ясно показали, что мистическое излучение состоит из частиц с массой, приблизительно равной массе протона. Возникло некоторое замешательство, так как Энрико Ферми и Вольфганг Паули уже называли «нейтроном» частицу, позже переименованную в «нейтрино».

Конечно, после открытия нейтронов интерес к ним заметно возрос, но никто не знал, что именно надо делать. Нейтроны, в конце концов, были вторичными продуктами расщепления ядер, число их было невелико. Выход нейтронов был мал, так как для облучения использовались элементы с естественной  $\alpha$ -радиоактивностью.

Кроме того, одним из главных детекторов была камера Вильсона, с помощью которой удастся обнаружить лишь незначительное число реакций, в которых участвует нейтрон. Это довольно утомительно — пытаться восстановить истинную картину по нескольким детектированным трекам ядер отдачи.

Лео Сциллард однажды в шутку сказал, что если мужчина совершает какой-нибудь неожиданный поступок, то за этим кроется женщина, ну а если в атомном ядре внезапно что-то произошло, то в этом чаще всего виноват нейтрон.

Электронная методика счета тогда только развивалась. Основным поводом для ее развития послужили неверные результаты, полученные в Вене; оказалось, что никто не мог их подтвердить. Поэтому необходимость разработки электронных счетчиков и усилителей стала очевидной. Венские ученые сами начали вести работы в этом направлении, но без особого успеха. Некоторые результаты были получены Германом Грейнахером в Швейцарии.

Однако, как я думаю, путь, который привел к созданию хороших счетчиков, был найден в Англии Чарльзом Вином-Вильямсом, использовавшим для изготовления электронных счетчиков хорошую защиту, электронные лампы с низким уровнем шумов и т. д. Тем не менее эти счетчики — хотя они и были использованы с большим успехом Чадвиком в опытах с нейтронами — обладали высоким уровнем шумов, что мешало их более широкому применению.

## ИСКУССТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ

По-настоящему все пришло в движение в 1934 г., когда Кюри и Жолио открыли искусственную радиоактивность. Я думаю, что они должны были быть очень счастливы, так как им удалось наверстать то, что они упустили при открытии нейтрона. Эти открытия разделяют два года; они были сделаны чуть ли не в один и тот же день в середине января. За много



Супруги Жолио-Кюри открыли искусственную радиоактивность.

месяцев до этого Кюри и Жолио знали, что алюминий, облучаемый  $\alpha$ -частицами, излучает позитроны, но им никогда не приходило в голову, что здесь может играть какую-то роль процесс распада. Они наблюдали испускание позитронов только во время облучения мишени. Лоуренс со своей группой, работавшей на циклотроне в Калифорнии, допустил такую же ошибку. Более того, в Калифорнии заметили, что счетчик ведет себя несколько «странно» после выключения циклотрона, и даже разработали специальное приспособление, автоматически выключавшее счетчик одновременно с циклотроном. Будь они повнимательнее, они могли бы открыть искусственную радиоактивность раньше, чем это было сделано во Франции.

Удивительно, что никому для этого не пришла в голову мысль о том, что в результате ядерного расщепления может возникнуть нестабильное ядро, хотя о существовании нестабильных ядер было, конечно,

известно уже лет тридцать или более того. Мне говорили, что после открытия искусственной радиоактивности Резерфорд написал Жолио и, поздравляя его, заметил, что сам не раз думал о том, что образующиеся ядра могли быть нестабильными, но сам он всегда искал только  $\alpha$ -частицы, потому что  $\beta$ -частицы его никогда не интересовали.

В январе 1934 г., как только стала известна эта работа, многие ученые стали повторять и расширять эксперимент. К сожалению, большинство из них ринулось по пути тривиального воспроизведения опытов Кюри и Жолио, бомбардируя  $\alpha$ -частицами другие элементы. (По тому же пути пошел и я в лаборатории Блэккетта в Лондоне.)

Но в Риме в это время Ферми уже решил, что в ядерной физике есть еще важные и интересные направления исследований. У него уже были наготове некоторые экспериментальные установки. Поэтому, когда было сделано это открытие, он быстро поставил эксперименты с целью понять, могут ли ядра становиться радиоактивными под действием нейтронов.

Я помню, что моя реакция, как, возможно, и реакция многих других, была скептической: эксперимент Ферми казался бессмысленным, потому что нейтронов было много меньше, чем  $\alpha$ -частиц. Этот простой аргумент, конечно, не учитывал значительно бóльшую эффективность нейтронов. Нейтроны не замедляются электронами, их не отталкивает кулоновское поле ядра. Действительно, не прошло и четырех недель после открытия Кюри и Жолио, как Ферми опубликовал первые результаты, доказывавшие, что различные элементы становятся радиоактивными после их облучения нейтронами. Только спустя месяц он заявил, что при бомбардировке урана возникает некий новый тип радиоактивности, который, как ему кажется, должен быть связан с трансурановыми элементами. На основании как теоретических соображений (кулоновский барьер и тому подобное), так и экспериментальных данных считали, что поглощение нейтронов тяжелыми элементами не может привести к их распаду. Поэтому все были уверены в том, что так должно быть и в случае с ураном.

Конечно, работы Ферми представляли значительный интерес для радиохимиков. Многие из них принялись за дело, но опять, как ни странно, главным стимулом послужил неверный результат — работа Аристиды фон Гроссе (химика, работавшего в США, немца по национальности), по мнению которого один из этих элементов вел себя как протактиний.

Совместно с Ганом он сделал одну из первых работ по протактинию вскоре после открытия этого элемента в 1917 г., поэтому полученные им результаты заставили Гана и Мейтнер мобилизовать все свои силы. Они считали протактиний собственным детищем и решили проверить выводы фон Гроссе. Лизе Мейтнер уговорила Гана снова объединить усилия. Скоро ими было показано, что Гроссе ошибся: это был не протактиний. С другой стороны, было обнаружено так много странных явлений, что работа увлекла их и они решили продолжать исследования. Результат превзошел все ожидания.

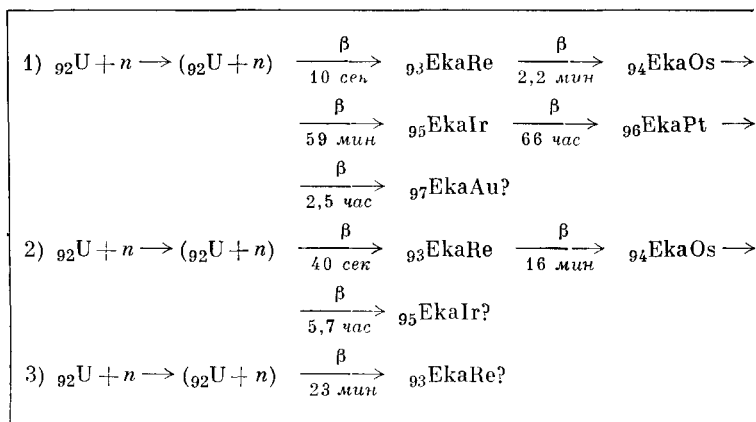


Схема каналов распада радиоактивных элементов (из статьи Гана, Мейтнер и Штрассмана, опубликованной в журнале «Naturwissenschaften» в 1938 г.)

Выше приведены цепочки радиоактивных элементов, классифицированных Ганом и Мейтнер. Они еще не присвоили специальных названий трансурановым элементам, а употребили приставку «эка», чтобы подчеркнуть их связь с рением, осмием и т. д.; ряд трансурановых элементов заканчивался на эказолоте. Очевидно, такое большое число новых



химических элементов вызвало у Гана желание ознакомиться с ними и изучить их свойства. В наши дни элементы, идущие за ураном, известны, конечно, как нептуний, плутоний, америций и т. д., а современные данные об их химических свойствах отличаются от сведений, полученных Ганом.

#### ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ЦЕПОЧКИ

Результаты оказались удивительными по двум причинам. Прежде всего были обнаружены три параллельные цепочки. Судя по образующимся продуктам распада, все вновь полученные элементы вели свое начало от  $U^{238}$ ; возможно, что некоторые из них происходили от  $U^{235}$



Отто Ган и Лизе Мейтнер сыграли выдающуюся роль в открытии деления ядер. Они сняты перед названным в их честь институтом.

(который встречается значительно реже). Таким образом, дело выглядело так, что есть по крайней мере две параллельные цепочки элементов-изомеров. Изомерные свойства распространяются на всю цепочку элементов, возникающих при  $\beta$ -распадах.

Изомерия ядер была в 1938 г. новинкой, и не было ясно, как ее интерпретировать. Было предложено считать (как это принято и сейчас), что она обусловлена угловыми моментами высокого порядка, но были также предположения, что она является следствием существования каких-то жестких образований внутри ядра. Можно было представить себе, что такое жесткое образование могло бы уцелеть при  $\beta$ -распаде и влиять на время жизни следующего продукта распада.

Но и в этом случае большая длина цепочки все еще казалась непонятной. В конце концов уран сам по себе не был  $\beta$ -радиоактивным. Другие элементы этой группы никогда не испытывают больше двух последовательных  $\beta$ -распадов, а здесь наблюдалось четыре или пять. Ган-химик наслаждался столь большим числом новых элементов, а Гана-радиохимика или физика-ядерщика беспокоил механизм, который мог бы объяснить их существование.



Политическая ситуация в Германии затрудняла проведение всех этих работ. У власти был Гитлер, и институт вел тонкую политическую игру с правительством, чтобы предотвратить преследование некоторых сотрудников института по расовым мотивам. Когда в 1938 г. нацисты оккупировали Австрию, положение Мейтнер стало весьма небезопасным; начали распространяться слухи о том, что она может потерять свое место и ей не разрешат выехать из Германии, так как она слишком много знает. Это вызвало у нее беспокойство. Датские коллеги предложили провезти ее нелегально в Голландию без визы. Поэтому в начале лета 1938 г. она уехала из Германии, проехала Голландию, сделала короткую остановку в Дании и воспользовалась гостеприимством Манне Зигбана из Нобелевского института в Стокгольме.

### ВЕЛИЗИ ЦЕЛИ

После этого группа Гана, в которую уже вошел Штрассман, стала продолжать работу, но Лизе Мейтнер там не было. Между тем аналогичными вопросами стали заниматься в Париже. Интересно отметить, что точки зрения этих двух групп не совпадали. Сначала трансурановыми элементами в Париже мало интересовались. Однако вскоре интерес к ним резко возрос, так как была обнаружена новая, пропущенная ранее цепочка радиоактивных элементов с атомным весом  $4n + 1$ , получающаяся при бомбардировке тория нейтронами. Известно, что ряды с атомным весом  $4n$ ,  $4n + 2$ ,  $4n + 3$  состоят из элементов с естественной радиоактивностью. Но цепочка  $4n + 1$  не была известна, и поэтому Ирэн Кюри, дочь мадам Кюри-Склодовской, вместе с австрийцем Гансом фон Гальбаном и швейцарцем Петером Прайсверком, приступила к исследованию этой серии и опубликовала несколько работ по этому вопросу.

Позже эта группа распалась, потому что Гальбан уехал в Копенгаген, где в течение некоторого времени занимался вместе со мной исследованием медленных нейтронов. Ирэн Кюри нашла нового сотрудника в лице югослава Павле Савича. Они пытались разобраться в вопросах, связанных с трансурановыми элементами. Понимая, что это — целый ряд различных веществ, Ирэн Кюри предложила остроумный метод выделения одного из них по высокой проникающей способности испускаемых им  $\beta$ -лучей. Покрыв образцы достаточно толстым листом латуни, они исследовали только те препараты, излучение которых проходило через этот экран. Но они не могли даже представить себе, что при такой методике могло бы отбираться не одно вещество, а несколько, тем более что время жизни, равное 3,5 часа, оказалось всюду одинаковым. По своим химическим характеристикам, как они сначала думали, это вещество напоминало торий.

Ган проверил эту работу и пришел к заключению, что это не торий. Он сообщил об этом в Париж. Кюри и Савич продолжали работу и в более поздней заметке летом 1938 г. подтвердили, что вещество с периодом полураспада 3,5 часа не является торием, но по своим свойствам немного напоминает актиний, а еще больше лантан. Кюри действительно вплотную подошла к гипотезе о делении ядер, но, к сожалению, не высказала ее достаточно ясно. Она писала, что этот элемент определенно не актиний, очень похож на лантан, «от которого может быть отделен только фракционным методом». Все же, по ее мнению, их можно было разделить. Причиной этого, возможно, было то, что Кюри получила смесь двух веществ; в этом случае, конечно, можно было осуществить отделение одной составной части от другой. Затем эту работу в свою очередь проделали Ган и Штрассман, которые обнаружили радиоактивные продукты, напоминавшие

своим поведением активний и отчасти радий. Примерно в то же самое время другие ученые были тоже близки к цели: Готфрид фон Дросте — физик, работавший с Лизе Мейтнер, попытался обнаружить, испускает ли уран после облучения его нейтронами  $\alpha$ -частицы с большой длиной пробега. Если бы он, подав смещение на усилитель, отсек тем самым обычные  $\alpha$ -частицы, то он бы, конечно, обнаружил явление деления ядер. К сожалению, вместо того чтобы использовать смещение, он применял фольгу, толщина которой была достаточной для того, чтобы через нее не прошло не только  $\alpha$ -излучение от урана, но и осколки деления; также не были найдены длиннопробежные  $\alpha$ -частицы, которые должны были бы появляться в случае образования изотопов радия и актиния.

Позже Ган и Штрассман, тщательно исследовав химические свойства этого «радия», обнаружили его идентичность с барием.

### ПЛОДОТВОРНЫЙ ВИЗИТ

Именно с этого момента я активно включился в работу над этой проблемой. Я приехал в Швецию, где Лизе Мейтнер страдала от одиночества, и я, как преданный племянник, решил навестить ее на рождество. Она жила в маленьком отеле Кунгэльв около Гетеборга. Я застал ее за завтраком. Она обдумывала письмо, только что полученное ею от Гана. Я был весьма скептически настроен относительно содержания письма, в котором сообщалось об образовании бария при облучении урана нейтронами. Однако ее привлекла такая возможность. Мы гуляли по снегу, она пешком, я на лыжах (она сказала, что может проделать этот путь, не отстав от меня, и доказала это). К концу прогулки мы уже могли сформулировать некоторые выводы: ядро не раскалывалось, и от него не отлетали куски, а это был процесс, скорее напоминавший капельную модель ядра Бора; подобно капле ядро могло удлиниться и делиться. А тем я исследовал, каким образом электрический заряд нуклонов уменьшает поверхностное натяжение, которое, как мне удалось установить, падает до нуля при  $Z = 100$  и, возможно, весьма мало для урана. Лизе Мейтнер занималась определением энергии, выделяющейся при каждом распаде из-за дефекта массы. Она очень ясно представляла себе кривую дефекта масс. Оказалось, что за счет электростатического отталкивания элементы деления приобрели бы энергию около  $200 \text{ Мэв}$ , а это как раз соответствовало энергии, связанной с дефектом массы. Поэтому процесс мог идти чисто классически без привлечения понятия прохождения через потенциальный барьер, которое, конечно, оказалось бы тут бесполезным.

Мы провели вместе два или три дня на рождество. Затем я вернулся в Копенгаген и едва успел сообщить Бору о нашей идее в тот самый момент, когда он уже садился на пароход, отправляющийся в США. Я помню, как он хлопнул себя по лбу, едва я начал говорить, и воскликнул: «О, какие мы были дураки! Мы должны были заметить это раньше». Но он не заметил, и никто не заметил.

Мы с Лизе Мейтнер написали статью. При этом мы постоянно поддерживали связь по междугородному телефону Копенгаген — Стокгольм. Я рассказал о наших соображениях Плачеку, находившемуся в Копенгагене, прежде чем решил ставить эксперимент. Сначала Плачек не верил, что эти тяжелые ядра, которые, как известно, испускают  $\alpha$ -частицы, могут быть подвержены еще одному типу распада. «Это звучит, — сказал он, — примерно так: человек попал под машину, а при вскрытии оказывается, что пострадавший и без того скончался бы через несколько дней, так как у него злокачественная опухоль». Затем он сказал: «Почему бы Вам не провести контрольные эксперименты, используя камеру Вильсона?» У меня

не было подходящей камеры Вильсона, а найти ее каким бы то ни было образом было трудно. Но я приспособил ионизационную камеру, с помощью которой можно было без труда экспериментально наблюдать большие импульсы, возникающие от ионизации, производимой осколками деления.

Я не считаю, что хронологическая последовательность событий играет существенную роль; кроме того, я не хочу приписать себе особые умственные способности или же оригинальность мышления. Мне просто посчастливилось быть вместе с Лизе Мейтнер, когда она получила сообщение об открытии Гана и Штрассмана. Потребовалось некоторое напоминание извне для того, чтобы я провел решающий эксперимент 13 января. К этому времени наша совместная работа была почти написана. Я продержал ее еще три дня, дописал другую статью и отправил их вместе в «Nature» 16 января; они были опубликованы неделей позже. В первой статье я употребил слово «деление», предложенное мне американским биологом Уильямом А. Арнольдом, у которого я спросил, как размножаются клетки.

Во второй статье содержалось предложение Лизе Мейтнер о том, что осколки деления, возникающие в результате облучения уранового образца, могут быть сосредоточены у его поверхности, а их активность можно измерить. Независимо эту же мысль высказал Жолио, который успешно провел эксперимент по проверке этой идеи 26 января. Приблизительно в то же время эти новости стали известны в США. К каким следствиям это привело, видно из статьи Уилера.

#### ЗАВЕРШАЮЩИЙ ЭТАП ПОИСКОВ

Вернемся к моему первому вопросу: «Почему так долго не могли обнаружить деление?». Почему не был открыт раньше нейтрон? Резерфорд думал над тем, что такая частица может существовать. Он предсказывал некоторые ее свойства еще в своей Бэйкерманской лекции, прочитанной в 1920 г. Однако Жолио не читал ее, считая, что в популярной лекции не может содержаться ничего нового. Когда Жолио и Кюри нашли, что при облучении парафина «бериллиевой радиацией» испускаются протоны, они приписали это некой разновидности комптон-эффекта очень жестких  $\gamma$ -лучей (с энергией около 50 Мэв), не считаясь с возражениями физиков-теоретиков. В конце концов нейтрон был открыт в Кембридже, где предполагали наличие такой частицы и искали ее.

В 1932 г., когда был открыт нейтрон, с помощью импульсных усилителей и ионизационных камер можно было легко определить импульсы от осколков деления. Но это был бы слишком большой скачок в развитии наших представлений. Капельная модель ядра родилась позже. Бор предложил модель компаунд-ядра только в конце 1936 г. Надо было быть гением, чтобы тогда же предсказать деление, однако никто не смог этого сделать.

Открытие искусственной радиоактивности в 1934 г. было опять-таки случайным, никто не искал его, за исключением Резерфорда, который тщетно искал  $\alpha$ -распад. Группа в Беркли просто закрыла глаза на «странное поведение» счетчиков. После открытия искусственной радиоактивности физики, как стадо овец, бросились повторять опыт с абсолютно очевидными вариациями (я сам также входил в это стадо). Только у Ферми хватило ума выбрать оригинальное и на редкость плодотворное направление.

Но затем Ферми пошел по неправильному пути: он был уверен, что уран, подобно остальным тяжелым ядрам, покорно поглотит и замедлит

нейтрон, падающий на него. Он сделал предположение, что образующиеся радиоактивные вещества будут отличаться от любого из известных элементов, расположенных близко к урану. Немецкий химик Ида Ноддак совершенно правильно указала, что они могут быть более легкими элементами. Однако ее замечания (опубликованные в журнале, который читают далеко не все химики и едва ли хоть кто-нибудь из физиков) были расценены как совершенно несущественные. Она не указала, как могут образоваться такие легкие элементы. Возможно, ее статья не оказала никакого влияния на более поздние работы.

В конце концов все-таки химики нашли правильный путь. Ирэн Кюри и Павле Савич подошли очень близко к решению проблемы, и лишь наличие двух веществ, свойства которых, как нарочно, были почти одинаковыми, помешало им обнаружить деление урана прежде, чем Ган и Штрассман дали окончательный ответ на этот вопрос.

Кембриджский университет.  
Великобритания

## МЕХАНИЗМ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

*Дж. Уилер*

В первых числах января 1939 г. шведско-американский лайнер «Дротнингхольм» шел, пересекая бурное море, из Копенгагена в Нью-Йорк. На его борту находился Нильс Бор, который вез короткое сообщение, приведшее к тому, что центр ядерных исследований переместился из Европы, где в эти годы, совпавшие по времени с правлением Гитлера, были сделаны первые открытия в области ядерной физики, в США.

Хотя проведение этих исследований привело к роковым последствиям как для США, так и для остального мира, сам процесс передачи этого конкретного сообщения был прост: несколько слов, сказанных Отто Фришем Нильсу Бору на пристани в Копенгагене, и несколько слов, сказанных в нью-йоркском порту Энрико Ферми и мне Нильсом Бором.

На правах младшего участника всех событий, имевших место сразу же после этого и в последующие месяцы, я расскажу о той деятельности, которая привела к опубликованию в журнале «Physical Review» статьи, написанной Нильсом Бором и мной. В этой статье приводились некоторые мысли по поводу сообщения о делении ядер, была рассмотрена капельная модель ядра, которую Фриш применил для объяснения механизма деления и определения фактора упаковки, который учитывала Лизе Мейтнер, делая первые оценки энергии, освобождающейся при делении.

В то время никому не удалось при рассмотрении этого нового процесса использовать все свои знания ядерной физики и правильно интерпретировать это явление. К счастью, уже появились основные идеи, без которых нельзя было найти решение этой проблемы. Пожалуй, здесь уместно будет напомнить, как развивалась ядерная физика в предшествовавшие шесть лет.

### КЛЮЧИ К РАЗГЛАДКЕ

1932 г. был плодотворным для многих физиков. В то время я только что получил докторскую степень. В этом году был открыт нейтрон и Вернер Гейзенберг опубликовал свою знаменитую статью, в которой предполагалось, что ядра состоят из нейтронов и протонов \*). Такие открытия

\*) Это предположение впервые было сделано Д. Д. Иваненко. (Прим. ред.)

позволяли надеяться, что скоро мы будем знать ядро так же хорошо, как атом. Эта воодушевляющая картина ободряла многих молодых людей и меня в их числе. 1933—1934 гг. я проработал у Грегори Брейта, который оказал на меня большое влияние. В эти дни как он, так и вся его группа интуитивно придерживались следующей модели ядра: нейтроны и протоны двигались в общем самосогласованном поле, аналогичном электрическому полю атома. Принятая нами модель была не только «недоработанной», она была во многом неясной. Ни один из нас, особенно Брейт с его осторожностью и проницательностью, не был ее догматическим приверженцем. Поэтому он всегда был готов считать, что в ядре могут находиться не только нейтроны и протоны, но и  $\alpha$ -частицы. Такую точку зрения, казалась, можно было применить при рассмотрении некоторых реакций. Брейт уделял особое внимание расширению исследований, минимально зависящих от модельных представлений. Поэтому многие работы нашей группы были посвящены проникновению в ядро заряженных частиц и изучению зависимости сечений ядерных реакций от энергии. Большое внимание было уделено рассмотрению процессов рассеяния на основе фазового анализа.

По рекомендации Брейта я провел следующий год в Копенгагене в институте Нильса Бора. Здесь я приступил к изучению многих новых идей. По-моему, в ядерной физике в то время не было ничего более значительного, чем сообщение Мёллера, привезенное им весной 1935 г. после краткого визита в Рим на пасху. Он рассказывал об экспериментах Ферми с медленными нейтронами и об открытых им удивительных резонансах. Все проведенные ранее оценки показывали, что частица, проходящая через ядро, имеет чрезвычайно малую вероятность поглотиться ядром или потерять энергию на излучение, если считать верной принятую тогда модель ядра. Однако результаты опытов Ферми оказались диаметрально противоположными предсказаниям этой модели. Они установили наличие огромного сечения и резонансов, которые никак не удавалось объяснить.

Понадобилось несколько недель для того, чтобы проанализировать основные, наиболее важные результаты этого открытия. Оно произвело на всех большое впечатление, но никто не был так заинтересован, как Бор, который всюду устраивал обсуждения и был самым активным участником дискуссий.

#### КАПЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЯДРА

История создания капельной модели и модели составного ядра хорошо известна. Но менее ясно и далеко не очевидно, чем в то время эти идеи отличались друг от друга; основным содержанием модели составного ядра было предположение, что судьба составного ядра не зависит от механизма, приведшего к его образованию; капельная модель является, так сказать, частным случаем модели составного ядра, подтверждающим целесообразность такой модели. Бор предположил, что средняя длина свободного пробега нуклона мала по сравнению с размерами ядра, тогда как, согласно всем предыдущим оценкам, она должна была быть больше. Эта новая идея сделала капельную модель ядра чрезвычайно привлекательной. Никто, оглядываясь назад, не может даже с теперешней выигрышной позиции не выразить удивления по поводу «самой большой случайности в ядерной физике» — того обстоятельства, что средняя длина свободного пробега частиц в ядре оказалась ни чрезвычайно малой по сравнению с размерами ядра (предположение модели составного ядра), ни чрезмерно большой (как предполагалось в ранних моделях), а занимает промежуточное положение. Более того, все удивительные свойства физики ядра очень сильно зависят от величины этого параметра. Не так давно Оге

Бор и Бен Моттelson показали, что даже сколь угодно точное знание этого параметра не дает возможности определить тот из многих альтернативных режимов, по которому пойдет реакция. Только наблюдения могут ответить на этот вопрос.

Имея так мало сведений об этих определяющих параметрах, как это было в 1935 г., и почти не подозревая об их высокой критичности.



Ферми (слева) и Бор на прогулке.

не оставалось ничего другого, как использование «на всю мощь» предположения о малости длины свободного пробега.

В трудах Фрица Калькара и Нильса Бора 1935—1937 гг. капельная модель получила свое дальнейшее развитие. Они использовали ее для расчета целого ряда процессов. В этом случае основным является предположение о составном ядре, т. е. концепция о двух совершенно не зависимых стадиях ядерной реакции. На первой стадии частица, попавшая в ядро, переводит его в возбужденное состояние; затем ядро возвращается в основное состояние, испустив  $\gamma$ -квант, нейтрон,  $\alpha$ -частицу или при помощи какого-нибудь другого конкурирующего процесса.



## БОР ПРИВОЗИТ НОВОСТИ

Сообщение Фриша, полученное Бором перед отъездом из Копенгагена, открыло перед ним новую область применения модели составного ядра. Ко времени своего приезда в Нью-Йорк Бор уже знал, что деление ядер является еще одним конкурирующим процессом наряду с переизлучением нейтрона и испусканием  $\gamma$ -лучей. Через 4 дня после приезда Бор с Розенфельдом окончили статью, в которой содержалась общая картина деления, для объяснения которого использовались понятия об образовании и распаде составного ядра. В течение нескольких месяцев Розенфельд совместно с Бором работал в Принстоне над проблемой измерений в квантовой электродинамике. За это время Бор прочел по этому вопросу не больше шести лекций. Тем не менее эта и многие другие проблемы отнимали у него много времени. Перед входом в его кабинет был вывешен длинный перечень неотложных дел и список лиц, с которыми надо что-то обсудить. При такой занятости легко понять радость Бора, когда он заходил в мой кабинет, чтобы поговорить о выполнявшейся в данное время работе. Мы пытались детально разобраться в механизме деления и для начала проанализировать потенциальный барьер, препятствующий делению, и выяснить, чем определяется его высота.

Прежде всего нами было выдвинуто предположение о наличии порога или барьера. Как можно было согласовать существование барьера с моделью капли? Разве идеальная жидкость не может быть разделена на сколь угодно мелкие капли? Может ли энергия возбуждения, необходимая для того, чтобы ядро, находящееся в исходном состоянии, распалось на две части, быть произвольно малой? Ответить на эти вопросы нам помогло вариационное исчисление, теория максимумов, минимумов и критических точек. Достижения этой отрасли математики мы «осмотически» поглощали из окружающей нас среды, которая была наполнена в течение ряда лет идеями и результатами Мэстона Морса. Стало ясно, что нами найдено конфигурационное пространство, совокупность точек которого описывает деформацию ядра. В этом конфигурационном пространстве можно определить различные траектории, идущие от основного состояния, когда ядро по своей форме близко к сфере, проходящие через барьер и приводящие к распавшемуся ядру. На каждой из этих траекторий энергия деформации достигает своего максимального значения. Величина максимума неодинакова для разных траекторий, образующих в этом пространстве особую точку типа «седла». Наименьший из этих максимумов определяет высоту седловой точки, т. е. порог деления или энергию активации при делении ядра.

Пока мы оценивали высоту барьера и освобождавшуюся энергию для различных типов деления, приближался день открытия пятой ежегодной конференции по теоретической физике, которая должна была начаться в Вашингтоне 26 января. Бор чувствовал свою ответственность перед Фришем и Мейтнер и, как принято в научном мире, считал, что



Розенфельд совместно с Бором участвовал в создании теории деления ядер.

нельзя в настоящее время ни словом обмолвиться об их предположениях и успехах до тех пор, пока им самим не представится удобный случай для публикации. Несмотря на это, Розенфельд вначале не оценил всех затруднений и сложностей в позиции Бора. В день прибытия Бора в США Розенфельд выехал поездом в Принстон. (У Бора в этот день были некоторые дела в Нью-Йорке.) Сообщение о новом открытии, сделанное Розенфельдом в клубе журналистов (открытый по понедельникам вечерний клуб), вызвало всеобщее возбуждение. Исидор И. Раби, присутствовавший там, привез эти новости к себе в штат Колумбию, где Джон Даннинг решил немедленно поставить эксперимент. Тем не менее даже 26 января Бор не хотел говорить об открытии Фриша и Мейтнер до тех пор, пока не получил сообщение о том, что эти результаты уже опубликованы. К счастью, днем ему передали выпуск «Naturwissenschaften», в котором была работа Гана и Фрица Штрассмана; теперь он мог об этом говорить. Сразу же начались новые опыты. Сообщение о первом прямом доказательстве существования деления ядер появилось в газетах 29 января.

### СОЗДАНИЕ ТЕОРИИ

В основе анализа деления лежала капельная модель, которая возвращала Бора к его излюбленной теме. Первая студенческая работа Бора была посвящена экспериментальному исследованию неустойчивости водяной струи при дроблении ее на мелкие капли. Ему была хорошо известна работа Джона У. Стратта, третьего лорда Рэлея. Эта работа являлась отправной точкой для нашего анализа. Однако у нас получились члены более высокого порядка, чем в вычислениях Рэлея, поскольку мы не ограничивались чисто параболической частью ядерного потенциала, т. е. той частью, которая квадратично растет с увеличением деформации. Мы рассмотрели члены третьего порядка с целью определить точку максимума у потенциала. Это дало нам возможность оценить высоту потенциального барьера по крайней мере для тех ядер, заряд которых был достаточно близок к критическому значению, соответствующему немедленному делению.

При этом нами было установлено, что вся проблема сводится к определению зависимости функции  $f$  от одной безразмерной переменной  $x$ . Этот «параметр делимости» определяется отношением квадрата заряда ядра к его массе. Величина этого параметра равна единице для неустойчивых ядер сферической формы. Для значений, близких к единице, пользуются разложением в степенной ряд около  $x = 1$ , что позволяет оценить высоту барьера. Действительно, вычисление первых двух членов разложения по степеням  $(1 - x)$  дает высоту барьера. Можно проанализировать и противоположный предельный случай. В этом пределе заряд ядра так мал, что высота барьера почти целиком определяется силами поверхностного натяжения. Ролью кулоновских сил при распаде можно пренебречь. Эти два случая (разложение в степенной ряд около точек  $x = 0$  и  $x = 1$ ) весьма сильно отличаются друг от друга. Мы понимали, что потребуется очень большая работа для того, чтобы определить свойства потенциального барьера в промежуточной области. Поэтому мы просто ограничились интерполяцией между этими двумя предельными случаями. В течение последующих 28 лет во многих работах было проведено весьма большое число вычислений, определяющих топографию энергии деформации в конфигурационном пространстве. Мы пока еще далеки от завершения этого анализа. Прекрасная работа Владислава Дж. Святецкого и его коллег из Беркли содержит намного больше данных о структуре барьера деления, чем все то, что мы знали об этом ранее. В ней указано на неожиданный

Здесь особенно интересно отметить ту осторожность, с которой Бор воспринял эту формулу. Он заходил к нам чуть ли не каждый день, и мы сидели, быть может, до полудня, пытаясь подойти к этому вопросу то с одной стороны, то с другой. Но его чрезвычайная осторожность



Дискуссии с Плачем при обсуждении теории деления ядер были весьма полезны.

в этом вопросе. Прочитируем фразу, в которой мы осторожно говорим о числе каналов: «Следует заметить, что специфические квантовомеханические эффекты, которые начинаются при энергии, меньшей или равной критической энергии деления, могут даже оказать свое влияние при энергиях, несколько больших критической, и вызвать слабые осцилляции в начале кривой выхода, что, возможно, допускает прямое определение числа каналов». Теперь-то мы знаем, что позже, в 50-х годах, эти отклонения были найдены Ламфером и Грином, а также другими авторами, и это привело к непосредственному измерению числа каналов.

#### ТОРЖЕСТВО БОРА

Важнейшая часть принстонского периода деятельности Бора относится к тому времени, когда я не был непосредственно связан с Бором. Однажды снежным утром Бор шел пешком от Нассау-клуба до своего кабинета в Файн-Холле. После разговора за завтраком с Плачем, который относился весьма скептически к соображениям о делении ядер, Бор с удвоенной энергией начал искать объяснения необычной зависимости сечения деления от энергии нейтрона. Во время прогулки он пришел к заключению, что деление  $U^{235}$  вызвано медленными нейтронами, а  $U^{238}$  — быстрыми. К моменту прихода в Файн-Холл, где собрались Плачек, Розенфельд и я, он был готов изложить эту идею на доске. Согласно предложенной им концепции ядро  $U^{238}$  не испытывает деления как под действием тепловых нейтронов, так и при облучении нейтронами промежуточных энергий; эффективными оказывались нейтроны с энергией в миллион электрон-вольт или больше. Кроме того, наблюдавшееся при более низких энергиях деление происходило по той причине, что имеется  $U^{235}$ , а сечение захвата нейтрона в этой области энергий обратно пропорцио-

проявилась особенно ярко, когда мы хотели определить число уровней в промежуточном состоянии. В наши дни эта величина носит название «числа каналов», и мы использовали ее в формуле для скорости деления, полученной с помощью теории многоканальных реакций. Кроме того, мы применили аналогичные соображения для описания других ядерных реакций. Но в то время мысль о том, что каждый отдельный канал может быть в принципе экспериментально наблюдаем, не казалась нам достаточно убедительной. Еще более сомнительным мы считали то, что каждый канал может характеризоваться своим отличным от других угловым распределением, из которого удастся определить величину  $k$  для этого канала. И только более поздние работы Оге Бора помогли нам разобраться

нально скорости ( $\sim 1/v$ ). Нам уже были известны экспериментальные данные о резонансном захвате нейтронов промежуточных энергий. С помощью простых соображений мы смогли показать, что к резонансным реакциям урана с нейтронами  $U^{235}$  не имеет никакого отношения. Мы пришли к такому заключению, так как было известно, что резонансное сечение превышает теоретический предел, равный квадрату длины волны, если  $U^{235}$  является ответственным за резонансный эффект. Таким образом, резонанс был обусловлен  $U^{238}$ , а сам по себе факт, что резонансные нейтроны не вызывают деления, доказывал, что  $U^{238}$  не мог делиться под действием нейтронов такой малой энергии. Таким образом, если деление не происходило при такой энергии, оно и подавно не произошло бы при более низких энергиях; следовательно, при низких энергиях происходило деление ядра  $U^{235}$ .

Несколькими днями позже, 16 апреля, Плачек, Вигнер, Розенфельд, Бор, я и другие обсуждали вопрос о том, возможно ли создание ядерной взрывчатки. Мысли о возможности отделения  $U^{235}$  в то время казались столь преждевременными, что я не могу забыть слов Бора, сказанных по этому поводу: «Нужно мобилизовать силы всей страны, чтобы сделать бомбу». Он не мог предвидеть, что на самом деле для достижения этой цели понадобятся усилия тысяч людей, приехавших из трех стран.

С помощью теории стало возможным предсказать в общих чертах зависимость сечения деления от энергии. Одновременно с нашей работой по созданию теории в пальмерской физической лаборатории Рудольф Лиденберг, Джеймс Кэннер, Гейнц Г. Баршалл и Ван-Вурис измерили сечение для урана и тория в области от 2 до 3 Мэв; оказалось, что поведение сечения следует предсказаниям теории. Безусловно, что те же самые соображения можно было использовать для предсказания о делении плутония-239. Этим особенно активно занимался Луис А. Тёрнер. Он положил начало направлению, неизбежно ведущему к гигантскому плутониевому проекту, хотя на первых порах он руководствовался только теоретическими оценками.

Спонтанное деление являлось наиболее привлекательным приложением этих идей в сочетании с гипотезой о проникновении через потенциальный барьер\*). Другое приложение касалось разницы между быстрыми нейтронами и вторичными нейтронами. В заключение надо отметить, что деление ядра является процессом, отличным от всех других процессов, с которыми мы имели дело раньше в ядерной физике. Это отличие состоит в том, что в процессе деления превращение ядра носит коллективный характер. В этом смысле деление открыло дверь для развития в послевоенные годы коллективной модели ядра.

Принстон, США

---

\*) Спонтанное деление ядер было открыто Г. Н. Флеровым и К. А. Петряком. (Прим. ред.)