

Э. Резерфорд
СОВРЕМЕННАЯ АЛХИМИЯ

**По материалам лекции памяти Генри Сиджвика, прочитанной в ноябре
1936 г. в Ньунхемском колледже, Кембридж
(1937 г.)**

Предисловие

Эта небольшая книга представляет собой несколько расширенный вариант лекции памяти Генри Сиджвика, прочитанной в Ньунхемском колледже 28 ноября 1936 г.

Еще на заре возникновения учения о радиоактивности мое внимание очень занимала проблема превращения элементов, и я с необычайным интересом и энтузиазмом следил за бурным прогрессом наших знаний в последние несколько лет. Этот успех во многом обязан созданию новых мощных методов исследований этой фундаментальной проблемы. Поэтому я счел интересным добавить краткое описание новых приборов и методов, которые сейчас применяются во многих лабораториях мира.

Я включил также иллюстрации, которые приводил в своей лекции. Я признателен Ч. Т. Р. Вильсону, Е. Лоуренсу, П. М. С. Блэкетту, Дж. Чадвику, П. Ди, Ч. Гильберту, Г. Тейлору и М. Голдгаберу за разрешение привести некоторые из полученных ими фотографий. Я также благодарю М. Олифанта и П. Ди за помощь в подготовке иллюстраций и исправление ошибок.

*Февраль 1937 г.
Резерфорд.*

В этой лекции я намерен вкратце изложить современные исследования в области превращения элементов. Название лекции должно оттенить контраст между этими исследованиями и старинной алхимией, которая в течение почти двух тысячелетий с такой исключительной силой привлекала к себе человеческие умы. Вера в возможность превращения вещества возникла еще в начале нашей эры. Поиски философского камня, с помощью которого можно было бы превращать одни элементы в другие и особенно извлекать золото и серебро из обычных металлов, неустанно продолжались на протяжении всего средневековья. Распространение этой идеи в течение ряда столетий в значительной мере связано с философской концепцией природы вещей, опиравшейся на авторитет Аристотеля. Согласно этой концепции, предполагалось, что все тела состоят из одной и той же первичной субстанции, и четыре основных элемента — земля, воздух, огонь и вода — отличаются друг от друга лишь тем, что в различной степени обладают качествами холода, теплоты, сухости и влажности. Путем усиления или ослабления одного из этих качеств свойства вещества могут быть изменены. Алхимикам, впитавшим эти воззрения, казалось очевидным, что одно

вещество может быть превращено в другое, надо только найти надлежащий метод такого превращения. В эпоху зарождения химии, когда природа химических соединений была мало понятна, заметное изменение внешнего вида и свойств вещества при химической реакции служило подтверждением подобных воззрений. Время от времени появлялись люди, утверждающие, что они открыли великую тайну, однако есть все основания полагать, что ни одной крупинки золота таким путем никогда не было получено. Когда мы оглядываемся назад с вершины сегодняшних наших знаний, то становится ясно, что при тех чрезвычайно ограниченных возможностях, какими располагали экспериментаторы того времени, превращение элементов было безнадежной затеей. По мере развития экспериментальной техники и непрерывного роста знаний в области химии идея о превращении элементов постепенно отбрасывалась и теряла свое влияние на прогресс науки. Однако в умах широкой публики старинные идеи алхимии укрепились прочнее, и даже по сию пору находятся шарлатаны или жертвы самообмана, претендующие на обладание рецептами изготовления значительных количеств золота путем превращения. Эти шарлатаны нередко столь убедительно пользуются научным жаргоном, что иной раз тревожат сон самых трезвых финансистов. Мы увидим далее, что в настоящее время с помощью современных методов можно искусственно произвести чрезвычайно ничтожные количества золота, да и то лишь путем превращения еще более дорогостоящего элемента — платины.

С ростом знаний в области химии старые идеи о превращении элементов теряли под собой почву. Было установлено, что вещество может быть разложено на 80 и более элементов, атомы которых казались неизменными и неразрушаемыми. Обычные физические и химические агенты, находившиеся тогда в нашем распоряжении, казались бессильными каким бы то ни было образом изменить атомы элементов. Идее неизменности атомов был нанесен сильный удар, когда в 1902 г. было обнаружено, что атомы двух хорошо известных элементов — урана и тория — претерпевают подлинный процесс спонтанного превращения, хотя и идущего с очень малой скоростью. Этот вывод вытекал из открытия радиоактивных свойств этих двух тяжелых элементов, которые самопроизвольно испускают несколько типов проникающего излучения, вызывающего почернение фотографической пластинки и разряд наэлектризованных тел. Эти радиоактивные свойства служат признаком неустойчивости атомов. Время от времени какой-нибудь атом самопроизвольно взрывается, выбрасывая из себя с огромной силой быструю α - или β -частицу; α -частица представляет собой заряженный атом гелия с массой 4, выбрасываемый со скоростью около 10 000 км/сек; β -частица — это лишь другое название легкой, заряженной отрицательно частицы — электрона; она обычно испускается со скоростью, во много раз большей. Иногда процесс превращения сопровождается проникающим излучением типа рентгеновских лучей, известным под названием γ -излучения.

Радиоактивные превращения

Если мы возьмем 1 г элемента урана, то в 1 сек в нем распадается около 24000 атомов, каждый из которых выбрасывает α -частицу. Однако число атомов в 1 г настолько велико, что для превращения половины всех атомов требуется около 4500 млн. лет. В результате испускания α -частицы с массой 4 из атома урана с атомным весом 238 образуется новый атом с атомным весом 234. Атомы этого нового элемента очень неустойчивы и быстро распадаются, причем каждый атом испускает быструю β -частицу. Раз начавшись, этот процесс превращения проходит ряд последовательных стадий, при которых из одного неустойчивого атома образуется другой. Хорошо известный элемент радий происходит от урана и является пятым продуктом в ряду его превращений.

Активность радиоактивного вещества, измеряемая интенсивностью испускаемого им излучения, с течением времени спадает по закону геометрической прогрессии. Если активность сокращается наполовину за время T , называемое периодом полураспада, то за время $2T$ она уменьшится до $1/4$ своей первоначальной величины, за время $3T$ — до $1/8$ и т. д. Можно легко подсчитать, что по истечении времени $20T$ активность будет составлять менее одной миллионной своей первоначальной величины. Этот закон распада — универсальный закон для всех радиоактивных веществ, но период полураспада T для каждого радиоактивного вещества имеет свое характеристическое значение, изменяющееся для разных веществ в чрезвычайно широких пределах. Например, период полураспада урана равен 4500 млн. лет, радия — 1600 лет, а для одного из продуктов распада радия, известного под названием радия С', он составляет всего лишь миллионную долю секунды. Этот закон распада выражает тот факт, что количество атомов, распадающихся за единицу времени, в среднем всегда пропорционально числу атомов, оставшихся на данный момент неизменными. Такого соотношения и следовало ожидать, если предположить, что распад отдельных атомов происходит по вероятностным законам.

Поразительная цепь превращений урана изображена на рис. 1, где кружками обозначены ядра последовательно образующихся атомов. Для каждого вещества приведен период полураспада и указана природа испускаемых им частиц (α - или β -частицы). Описание методов, с помощью которых была однозначно установлена эта последовательность превращений, заняло бы слишком много времени; однако необходимо обратить внимание на исключительную простоту соотношений, связывающих между собой все члены ряда превращений.

Теперь мы знаем, что химические свойства элемента определяются его атомным номером, который также соответствует числу естественных единиц заряда в атомном ядре. Поскольку электричество имеет атомную структуру, то заряд ядра всегда выражается целым числом, изменяющимся от 1 для ядра легчайшего элемента — водорода до 92 для ядра самого тяжелого элемента — урана. Внутри каждого кружка на рис. 1 указан атомный номер ядра и его

атомный вес, выраженный через атомный вес кислорода, который принят равным 16.

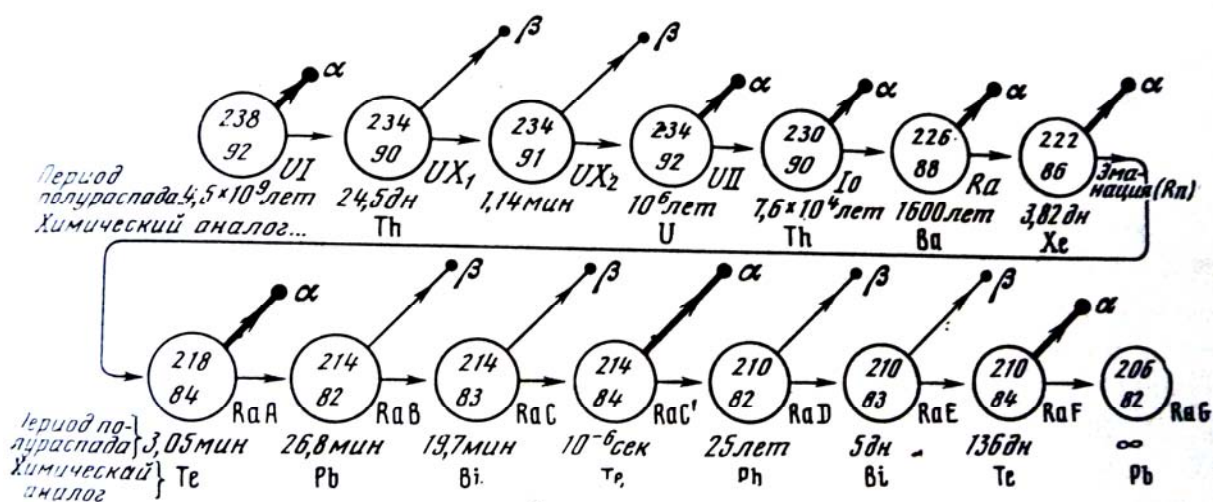


Рис. 1. Ряд превращений урана. Верхняя цифра в каждом кружке означает атомный вес, нижняя — порядковый номер элемента и заряд ядра. Длина жирной стрелки показывает относительную длину пробега α -частиц.

Освобождающиеся при превращении α - или β -частицы вылетают из самого ядра атома. Таким образом, выбрасывание α -частицы, несущей две положительные единицы заряда и обладающей массой 4, понижает атомный номер ядра на две единицы и его массу на четыре единицы. С другой стороны, при испускании β -частицы, несущей единичный отрицательный заряд, общий заряд ядра увеличивается на единицу. Так как β -частица обладает очень малой массой, то при вылете ее масса атома в первом приближении не меняется. Эти простые соображения, основанные на рассмотрении природы испускаемого излучения, удовлетворительно объясняют атомные номера и массы всех элементов в длинной цепи превращений. Сейчас твердо установлено, что масса и энергия эквивалентны. Зная точную массу α -частицы (ядра гелия) и максимальную кинетическую энергию выбрасываемой α - или β -частицы, можно точно вычислить атомные веса всех атомов ряда, если только известен атомный вес урана. Конечный продукт ряда, не обнаруживающий никаких следов активности, имеет тот же атомный номер, что и свинец, но его атомный вес равен 206 в отличие от атомного веса обычного свинца 207,2.

В настоящее время хорошо известно, что большинство элементов представляет собой смесь нескольких изотопов, т. е. атомов с одинаковым зарядом, но с различными массами. Астон показал, что обычный свинец состоит по крайней мере из трех изотопов с атомными весами 206, 207 и 208, из которых преобладает изотоп с атомным весом 206. Таким образом, конечный продукт ряда урана, обычно называемый урановым свинцом, — это один из изотопов обычного свинца (изотоп 206). Свинец, выделенный из старого уранового минерала, состоит главным образом из этого изотопа 206. Отметим также, что в ряду урана встречаются два радиоактивных изотопа

свинца с атомными номерками 82 — радий В с атомным весом 214 и радий D с атомным весом 210.

Необходимо упомянуть, что подобная же длинная цепь последовательных превращений обнаружена у элементов тория и актиния. Конечный продукт ряда тория — снова изотоп свинца, но с атомным весом 208, а не 206, как у уранового свинца. Свинец, извлеченный из чисто ториевого минерала, состоит главным образом из изотопа с атомным весом 208. Конечный продукт актиниевого ряда превращений также представляет собой изотоп свинца, но с атомным весом 207. Знаменательно, что конечные продукты всех трех рядов превращений — это три изотопа свинца, но с различными атомными весами.

Поразительные изменения химических и физических свойств элементов при радиоактивных превращениях хорошо иллюстрируются на примере превращения радия. Радий в чистом виде представляет собой металл, по своим химическим свойствам напоминающий барий. Он распадается, испуская α -частицы, с периодом полураспада 1600 лет, и превращается в тяжелый радиоактивный газ, называемый теперь радоном. Этот газ химически инертен и в этом отношении принадлежит к хорошо известной группе инертных газов, куда относятся, в частности, гелий, неон и аргон. Атомы эманации весьма неустойчивы по сравнению с атомами радия: половина их распадается за 3,8 дня. Интенсивная радиоактивность этого газа может быть продемонстрирована простым опытом. Ничтожное количество этого газа, объемом менее $0,1 \text{ мм}^3$ при нормальном давлении, впускается в откачанный стеклянный сосуд, стенки которого изнутри покрыты слоем фосфоресцирующего сернистого цинка. Тотчас же сосуд начинает ярко светиться вследствие интенсивной бомбардировки сернистого цинка огромным количеством α -частиц, выбрасываемых эманацией при ее распаде.

Следует иметь в виду, что энергия, освобождающаяся при превращении одного атома, главным образом в форме кинетической энергии α - и β -частиц, огромна по сравнению с энергией, выделяемой на один атом в наиболее сильных взрывчатых веществах. Если поместить 1 г чистой радиевой соли в закрытую стеклянную трубочку, то α -частицы, выбрасываемые радием и продуктами его распада, будут поглощаться либо радиевой солью, либо стеклянными стенками, и их энергия движения в конечном счете превратится в тепло *in situ*. Некоторые наиболее быстрые β -частицы и большая часть γ -лучей будут проходить через стеклянные стенки. Благодаря выделению тепла, трубочка с радием всегда оказывается на несколько градусов теплее окружающей среды. Излучение тепла со временем будет медленно ослабевать и сократится наполовину через 1600 лет. При прохождении через вещество α -частицы теряют свою скорость, а в конце концов и заряд, превращаясь в обычные атомы гелия. Полученный таким путем гелий может быть выделен при растворении или нагревании радиевой соли. Громадные количества излучаемого радиоактивным веществом тепла лучше всего могут быть иллюстрированы на примере более быстро распадающихся веществ, например эманации радия с периодом полураспада 3,8 дня. Как видно из

рис. 1, эманация, распадаясь с испусканием α -частицы, порождает четыре быстро изменяющихся продукта — радий А, радий В, радий С и радий С', два из которых испускают α -частицы, а два — β -частицы. Через несколько часов после введения эманации в запаянную трубку между нею и ее четырьмя короткоживущими продуктами распада устанавливается своего рода равновесие, когда активность продуктов распада определяется распадом эманации. Через 1—2 месяца практически вся эманация превращается в радий D. Период полураспада последнего (25 лет) настолько велик по сравнению с периодами продуктов его разложения — радия Е и радия F, что окончательный распад этих продуктов определяется периодом полураспада радия D.

Представим себе, что нам удалось получить значительное количество, скажем килограмм, эманации радия и поместить его в бомбу из жароупорного материала. Примерно через 2 час количество выделяемого в единицу времени тепла будет соответствовать мощности 20000 *квт*, и, если не предусмотреть весьма эффективного охлаждения, бомба расплавится. Этот тепловой эффект будет ослабевать с той же скоростью, с какой идет распад эманации, и уменьшится наполовину через 3,8 дня. Примерно через 2 месяца большая часть эманации исчезнет и бомба окажется Наполненной газом гелием, получившимся из α -частиц с объемом, превышающим втрое первоначальный объем эманации, тогда как стенки сосуда будут покрыты слоем осадка из 946 г радия D, который представляет собой медленно распадающийся радиоактивный изотоп свинца с атомным весом 210. Если бы мы могли продолжать эксперимент еще 200 лет, то к концу этого времени обнаружили бы, что радий D почти целиком исчез, а на его месте появился неактивный изотоп свинца — урановый свинец с атомным весом 206. В результате выбрасывания α -частиц из радия F объем гелия увеличился бы в 4/3 раза.

Интересно отметить, что последний радиоактивный элемент ряда, радий F, известный обычно под названием полония, был первым радиоактивным элементом, выделенным из урановых минералов Марией Кюри в 1897 г.

Хотя можно уверенно предсказать последствия такого эксперимента, мы совершенно лишены возможности осуществить его на практике, ибо чтобы получить 1 кг эманации, потребовалось бы 200 т радия, а все количество добытого до сих пор радия составляет, вероятно, менее 1 кг. Однако нам следует лишь благодарить это обстоятельство, ибо при проведении эксперимента такого масштаба исходящее из бомбы интенсивное излучение энергии в форме проникающих γ -лучей, эквивалентное мощности в 1000 *квт*, безусловно, оказалось бы опасным для здоровья находящихся поблизости людей.

Тем не менее я полагаю, что такой воображаемый эксперимент поможет получить представление о гигантских размерах излучения энергии при радиоактивных изменениях, а также о поразительной природе превращений. в результате которых эманация в конце концов превращается в гелий и урановый свинец. Эти радиоактивные превращения происходят спонтанно и

не поддаются внешним воздействиям. На этот естественный процесс ни в малейшей степени не влияют ни сильный жар, ни чрезвычайный холод. Мы можем лишь наблюдать и изучать эти поразительные превращения, не будучи в состоянии как-то повлиять на них.

Радиоактивные свойства проявляются заметным образом в двух наиболее тяжелых элементах — уране и тории — и лишь в очень слабой степени в немногих других элементах. Большинство элементов обычно не обнаруживает никаких признаков радиоактивности, так что можно с полным правом заключить, что атомы этих элементов в обычных на нашей Земле условиях неизменно устойчивы. За последние несколько лет были найдены способы не только искусственного превращения одного элемента в другой, но и получения множества новых радиоактивных веществ, распадающихся по тем же законам, что и естественные радиоактивные вещества. Эти познания — результат интенсивных исследований, длившихся многие годы, и развития новых, мощных методов наступления на эту наиболее фундаментальную проблему физики.

Элементарные частицы

Изучение радиоактивных превращений привело нас к открытию быстрых α - и β -частиц как возможных составных частей тяжелого атомного ядра. При дальнейших исследованиях обычных элементов было обнаружено существование еще нескольких типов элементарных частиц, высвобождающихся при взрыве атомных ядер. Наиболее важными из этих вновь открытых частиц являются *протон*, *нейтрон*, *дейтрон* и *положительный электрон*.

Протоном названо ядро водорода с зарядом 1 и массой 1,0076. Нейтрон представляет собой незаряженную частицу с массой, несколько превышающей массу протона, т. е. 1,0090. По современным представлениям эти две частицы — протон и нейтрон — тесно связаны друг с другом. Полагают, что под действием интенсивных сил, существующих внутри атомного ядра, нейтрон может быть превращен в протон путем отнятия у него отрицательного электрона, и, наоборот, протон может быть превращен в нейтрон путем прибавления отрицательного электрона. Хотя мы пока не располагаем прямыми доказательствами подобных взаимных превращений, общие данные, безусловно, говорят в пользу представлений о наличии определенной связи между этими двумя частицами. Естественно предположить, что нейтрон представляет собой тесную комбинацию протона и электрона, хотя до настоящего времени объяснение разницы в массах этих частиц наталкивается на серьезные трудности.

Альфа-частица представляет собой ядро гелия с зарядом 2 и массой 4,0029. Открытие, которое недавно сделал Юри, что изотоп водорода с массой 2 всегда присутствует в небольшой пропорции в обычном водороде, оказалось очень важным как для физики, так и для химии. Подвергая обыкновенную воду многократному электролизу, можно получить чистую тяжелую воду, в которой атом водорода с массой 1 заменен своим изотопом с

массой 2. Такая вода приблизительно на 11% тяжелее обычной и имеет иные точки кипения и замерзания. Тяжелый водород с массой 2 был назван дейтерием и получил химический символ D. При пропускании электрического разряда через тяжелый водород некоторые атомы его теряют отрицательный электрон и становятся положительно заряженными ионами. Эти ионы называют «дейтронами», тогда как ионы обычного водорода, как мы видели, называются «протонами». Эти два иона желательно называть по-разному, так как они часто применяются в качестве быстрых частиц для бомбардировки вещества. Мы увидим далее, что быстрые протоны и дейтроны наряду с α -частицами и нейтронами оказались чрезвычайно эффективными агентами для превращения многих элементов. Существуют непосредственные экспериментальные доказательства того, что дейтрон, как этого и можно было ожидать, представляет собой плотное соединение протона с нейтроном.

При некоторых превращениях появляется также положительный электрон — антипод отрицательного электрона малой массы. Эта неуловимая частица впервые была открыта несколько лет назад Андерсоном при экспериментах с космическими лучами. Теперь мы можем в лабораторных условиях получать положительные электроны в небольших количествах, пропуская через вещество γ -излучение высокой квантовой энергии. Кроме того, некоторые легкие элементы выбрасывают положительные электроны с большой скоростью при бомбардировке их α -частицами. Положительному электрону было присвоено название «позитрон»; считают, что он обладает той же незначительной массой, что и обычный отрицательный электрон, и равным, но противоположным по знаку зарядом.

При некоторых превращениях образуются еще два легких элемента, или, вернее, два новых изотопа водорода и гелия: H^3 и He^3 . Оба изотопа, по видимому, устойчивы, но ни один из них до сих пор не удалось обнаружить в обычных веществах. Первоначально предполагалось, что H^3 присутствует в препаратах тяжелой воды, но последующие наблюдения этого не подтвердили.

Обнаружение быстрых частиц

Мы видели, что все виды излучения радиоактивных веществ обладают характерными свойствами разряжать наэлектризованное тело. Это свойство объясняется способностью движущихся α - и β -частиц при прохождении через газ образовывать множество положительно и отрицательно заряженных частиц — ионов. Первичный акт ионизации заключается в отрыве от атома или молекулы одного из внешних электронов в результате соударения с быстрой частицей. Ионы движутся через газ в электрическом поле, причем положительные ионы идут к отрицательному электроду, и наоборот. Движение этих двух сортов ионов в противоположных направлениях эквивалентно прохождению электрического тока через газ.

В начальный период исследования радиоактивности действие различных типов излучения изучалось и сравнивалось с помощью такого

электрического метода, причем измерительным прибором служил электроскоп или электрометр. Этот электрический метод представляет собой очень удобное средство для обнаружения ничтожных количеств радиоактивного вещества и еще поныне широко применяется в тех случаях, когда можно ожидать легко измеримый эффект.

Быстрый прогресс за последние годы наших знаний о превращениях элементов в значительной мере обусловлен открытием чувствительных методов обнаружения и подсчета отдельных частиц, движущихся с большими скоростями, например протонов или α - и β -частиц. Все эти методы основаны в конечном счете на явлении ионизации газа пролетающими через него быстрыми частицами.

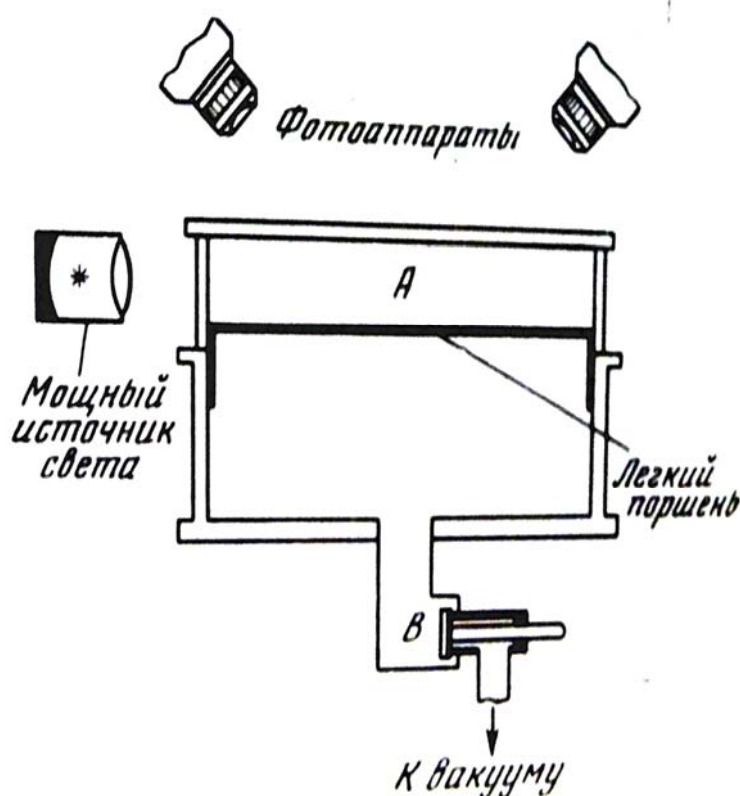


Рис. 2. Камера Вильсона. Легкий поршень внезапно опускается посредством понижения давления под ним. Газ А в пространстве над поршнем расширяется, охлаждаясь при этом настолько, что содержащийся в нем пар становится пересыщенным. Этот пар конденсируется в виде маленьких капелек на присутствующих в газе заряженных частицах (ионах). Камера освещается через стеклянную стенку, и образующиеся капли фотографируются в рассеянном ими свете, попадающем в расположенные сверху два фотоаппарата. А — пространство, содержащее газ, насыщенный водяным паром; В — давление в этом пространстве внезапно понижается посредством открытия клапана.

Метод расширения. Самый замечательный из этих методов изобретен Ч.Т.Р. Вильсоном. Он основан на том наблюдении, что образующиеся при движении быстрой частицы ионы при определенных условиях могут стать центрами, около которых происходит конденсация водяных паров. При этом

вокруг каждого иона образуется видимая капелька воды. Так как быстрая α -частица при своем прохождении сквозь газ образует более 100 000 пар положительных и отрицательных ионов, то истинный путь пролетающей частицы становится видимым как полоска теснящихся друг за другом водяных капелек. Стереоскопические фотографии следов, заснятые тотчас после расширения, отчетливо показывают положение траекторий частиц в пространстве.

Прибор, применяемый для этой цели, называется камерой Вильсона. Типичная схема такой камеры, а также пояснение принципа ее работы приведены на рис. 2. Камера имеет цилиндрическую форму; пространство A насыщено водяными парами. Предположим, например, что через газ в момент расширения проходит α -частица. Тогда, если степень расширения подобрана надлежащим образом, каждый ион, образующийся на пути α -частицы, становится центром конденсации, и путь частицы отчетливо виден.

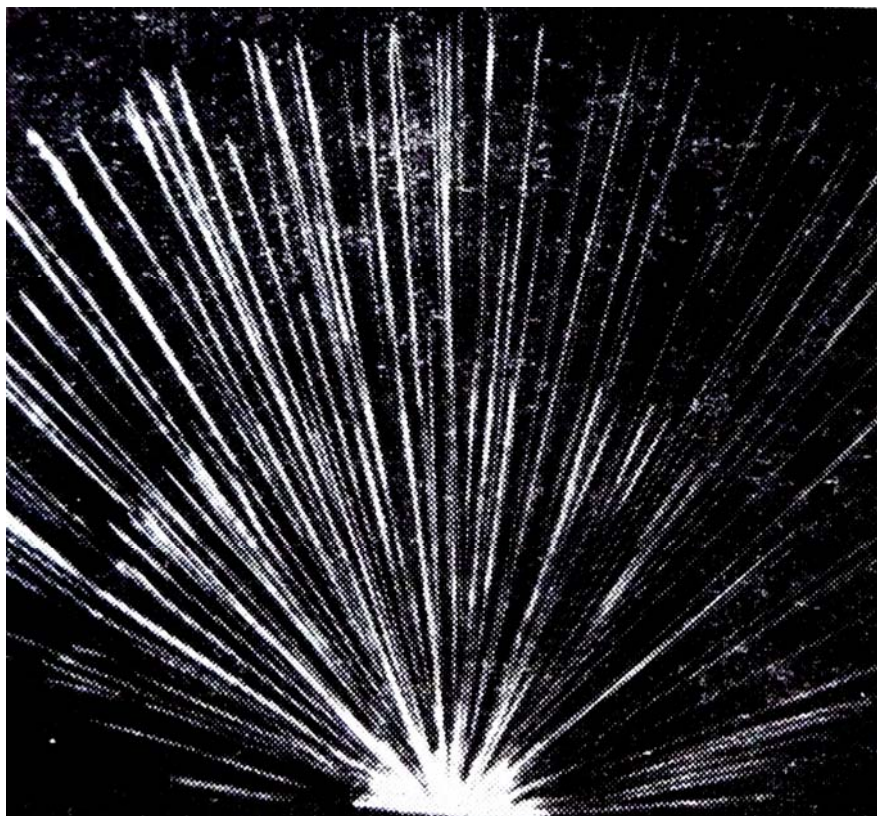


Рис. 3. Следы α -частиц, испускаемых торием ($C + C'$), разделяющиеся на две группы с пробегами 8,6 и 4,8 см в воздухе (фотография Дж.Чадвика)

Фотография следов α -частицы, полученная описанным способом, приведена на рис. 3. Источником α -частиц в данном случае служила небольшая металлическая пластинка, активированная путем экспозиции в эманации тория и помещенная в камеру расширения. Поверхность пластинки была покрыта невидимой пленкой активного вещества, содержащего два источника α -лучей — торий C и торий C' . Все α -частицы, испускаемые торием C' , имеют одинаковую скорость и длину пробега в воздухе, равную 8,6 см. Следы α -частиц, испущенных торием C , с более коротким пробегом

(4,8 см) видны на фотографии попеременно с преобладающими следами более быстрых α -частиц.



Рис. 4. Следы фотоэлектронов с пробегом около 1 см, образованных при абсорбции характеристического K -излучения серебра в воздухе (энергия около 21 000 эв) Прямолинейный след принадлежит электрону с гораздо большей энергией и, вероятно, вызван космическими лучами (фотография. Ч. Т. Р. Вильсона).

Огромное большинство α -частиц пронизывает газ по прямолинейным траекториям, причем конец следа указывает точку, в которой скорость α -частицы настолько понизилась, что она уже не способна более образовывать ионы. При прохождении β -частицы через газ возникает след, имеющий некоторые характерные отличия от следа более массивной α -частицы. Во-первых, след α -частицы гораздо менее плотен вследствие значительно меньшей ионизации, производимой β -частицей на единице пути. Это ясно видно на фотографии следа β -частицы, приведенной на рис. 4. Прямолинейный путь быстрой β -частицы намечен вереницей капель, настолько далеко отстоящих друг от друга, что их число почти можно сосчитать. Во вторых, легкая β -частица в результате столкновений с атомами чаще отклоняется от прямолинейного пути, чем движущаяся с той же скоростью α -частица. Этим и объясняется извилистый характер следов β -частиц на фотографии. Заметное утолщение в конце следа есть результат

увеличения производимой β -частицей ионизации при уменьшении ее скорости.



Рис. 5. След фотоэлектрона, образованного при поглощении кванта рентгеновских лучей с энергией 46 000 эв. В своем начальном прямолинейном участке след испытывает резкое отклонение в результате тесного сближения электрона с атомным ядром. На снимке отчетливо заметна возрастающая плотность ионизации и искривление пути вследствие столкновений по мере уменьшения скорости частиц к концу следа (фотография Ч. Т. Р. Вильсона).

Фотография пути β -частицы, приведенная на рис. 5, интересна тем, что отражает те приключения, которые происходят с β -частицей при прохождении ее через газ. Длинный след, идущий слева, резко загибается почти под прямым углом. Это происходит в результате столкновения β -частицы с тяжелым ядром одного из атомов.

Ответвляющиеся от главного пути короткие следы — пути вторичных электронов, вылетающих из атомов в результате соударений с быстрой β -частицей.

Скорость и энергия пролетающей β -частицы могут быть непосредственно определены измерением кривизны пути частицы в однородном магнитном поле. Если поле перпендикулярно направлению полета, то β -частица движется по окружности. Если поле достаточно сильное и скорость β -частицы не слишком велика, то след частицы в газе может описать полный круг много раз подряд. Направление отклонения частицы в магнитном поле зависит от знака ее заряда. Если известно направление движения частицы, то этим способом можно сразу определить, принадлежит ли след быстрому положительному или отрицательному электрону.

Электрический метод. В ряде экспериментов необходимо бывает сосчитать количество быстрых частиц, попадающих в детектирующую камеру за данный промежуток времени. Проще всего это может быть сделано электрическим методом подсчета. Принцип метода пояснен на рис. 6. Предположим, например, что нужно сосчитать α -частицы. Они направляются в камеру через тонкую металлическую фольгу А и останавливаются, наталкиваясь на параллельную ей изолированную пластинку В. К электродам приложено достаточное напряжение, чтобы быстро переносить к ним ионы, образующиеся между пластинками, находящимися обычно на расстоянии 3–5 мм друг от друга. Каждое попадание α -частицы в камеру вызывает небольшое увеличение потенциала пластинки В, которое автоматически повышается более чем в 100 млн. раз серией специально приспособленных для этой цели усилителей. Мгновенное повышение потенциала на выходе достаточно велико (порядка 100 в), чтобы вызвать значительное отклонение осциллографа, имеющего очень малый собственный период колебаний — меньше 0,001 сек.

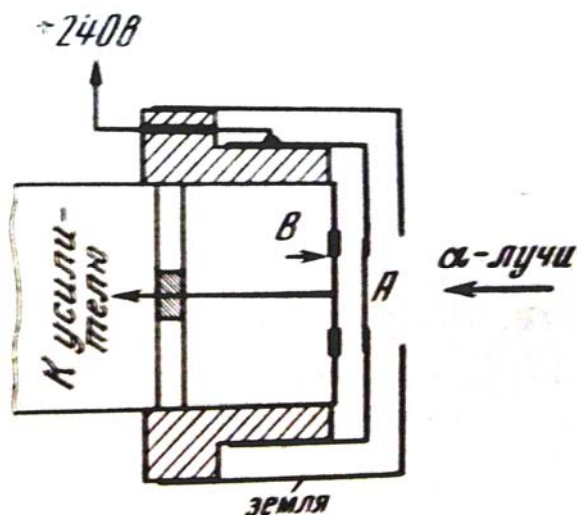


Рис. 6. Счетчик с одной камерой

Фотографическая запись отклонений осциллографа, вызванных попаданием в камеру α -частиц, показана на рис. 7. Каждая вертикальная линия отображает усиленное электрическое действие одной α -частицы, а непрерывная горизонтальная линия — естественное движение ленты осциллографа при отсутствии попаданий α -частиц в камеру. С помощью быстро движущейся фотографической ленты можно зарегистрировать отдельные частицы, даже если в 1 мин влетает в камеру 1000 частиц. Аналогичным путем могут быть сосчитаны также быстрые протоны и дейтроны. Однако вследствие того, что обе эти частицы несут единичный заряд, а заряд α -частицы равен 2, ионизация, производимая α -частицей, приблизительно в четыре раза больше ионизации, вызванной протоном или дейтроном, обладающими той же скоростью. Поэтому попадающий в камеру протон дает отклонение приблизительно в четыре раза меньше, чем α -частица.

равной скорости. Полученная таким путем регистрация протонов также показана на рис. 7. Разница в величине импульсов позволяет судить о том, несет ли частица единичный или двойной заряд, и при известных условиях можно легко различить записи протонов и α -частиц.

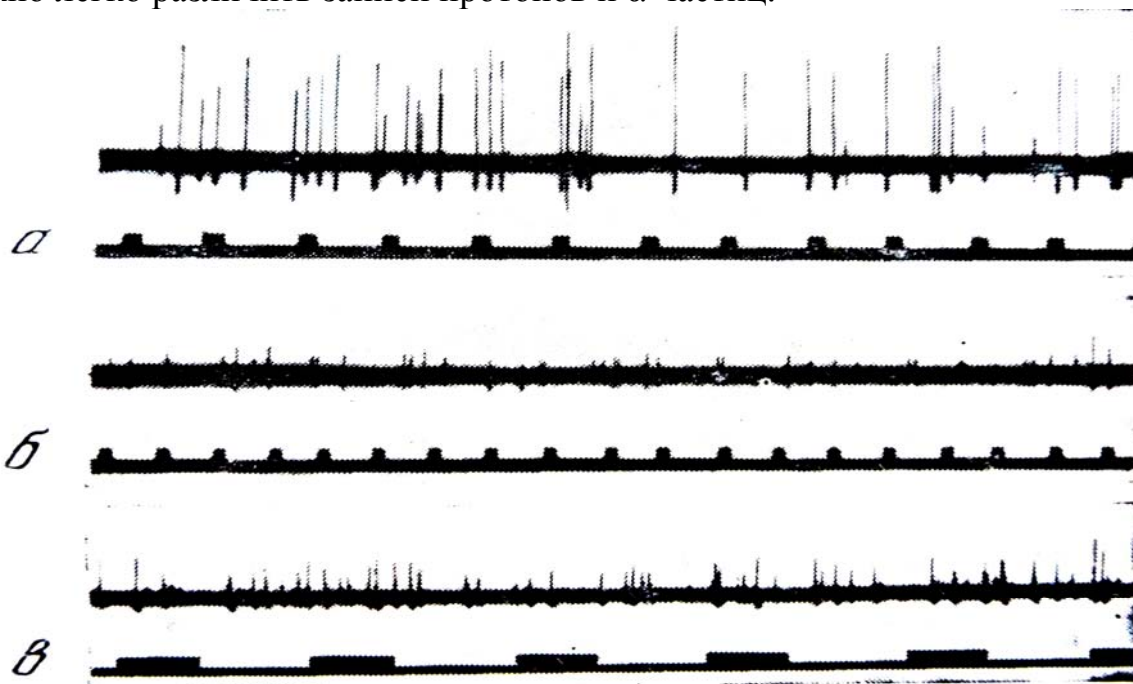


Рис. 7. Осциллограммы ионизирующих частиц

а — α -частицы; *б* — протоны; *в* — нейтронные частицы отдачи. Две верхние фотографии (*а, б*) получены одинаковых условиях, и различие в величине отклонений связано с разной ионизационной способностью α -частицы и протона. На нижней фотографии (*в*) показаны отклонения, вызванные гелиевыми атомами отдачи, возникшими в результате столкновения с нейтронами с энергией 2 млн. в. Шкала времени — секунды.

Описанный метод электрического счета частиц неприменим к быстрым β -частицам, так как в этом случае ионизация слишком мала, чтобы дать измеримое отклонение. Однако Гейгер придумал другой простой и чувствительный способ подсчета β -частиц, вошедший во всеобщее употребление. Конструкция этого счетчика чрезвычайно проста. Он состоит в основном из полого металлического цилиндра, закрытого с обоих концов изолирующими пробками, сквозь которые по оси проходит проволока или стержень, присоединенный к простой усилительной системе. В цилиндре, наполненном воздухом или другим газом, устанавливается определенное давление, и к нему прикладывается напряжение, почти достаточное для того, чтобы в газе начался разряд. Когда при таких условиях через газ проходит β -частица, производимая ею ионизация во много раз усиливается за счет хорошо известного процесса ионизации ударом, и между проволокой и цилиндром проходит мгновенный разряд. Ток разряда увеличивается усилителями, и β -частицы могут быть подсчитаны так же, как и α -частицы, либо по щелчкам в телефоне, либо с помощью осциллографа. Этот прибор, называемый счетчиком Гейгера—Мюллера, является эффективным средством

подсчета быстрых положительных и отрицательных электронов, попадающих в цилиндр через стенки.

Поскольку γ -излучение, проходя через стенки цилиндра и наполненное газом пространство, порождает β -лучи, то счетчик Гейгера может служить также чувствительным средством для обнаружения γ -излучения.

В тех случаях, когда требуется подсчитать большие количества быстрых частиц, будь то α - или β -частицы или протоны, часто применяется автоматическая система подсчета, при которой число частиц регистрируется автоматическим счетчиком. Остроумные методы автоматического счета частиц разработаны Винн-Вильямсом и широко применяются во многих лабораториях.

Так как нейтрон не имеет заряда, то он может свободно проходить сквозь внешнюю оболочку атомов, не образуя при этом ионов. Однако иногда нейтрон сталкивается на своем пути с атомным ядром и приводит его в быстрое движение. Это ядро отдачи способно образовывать ионы в газе до тех пор, пока оно не остановится. Частицы отдачи могут быть обнаружены с помощью методов, применяющихся для обнаружения и подсчета α - и β -частиц. Обычно для этой цели камера счетчика наполняется водородом, гелием или воздухом. В общем случае не более одного нейтрона из 5000, попадающих в счетчик, производят измеримый импульс в осциллографе. Регистрация нейтронных частиц отдачи в гелии приведена на рис. 7.

В дальнейшем мы увидим, что для очень медленных нейтронов разработан ряд эффективных методов, основанных на способности таких нейтронов вызывать превращения некоторых элементов, в частности лития и бора.

Превращение элементов под действием α -частиц

После того как ряды естественных превращений урана и тория были изучены, естественно было надеяться, что когда-нибудь удастся найти методы разрушения устойчивых атомов некоторых обычных элементов. Чтобы приступить к штурму этой проблемы с какими-то шансами на успех, необходимо было получить некоторое представление о строении атома различных элементов. Теперь мы считаем, что атомы всех элементов построены по одному типу и тесно связаны между собой определенными соотношениями. В центре каждого атома помещается чрезвычайно маленькое ядро, имеющее избыточный положительный заряд. В этом ядре сосредоточена большая часть массы атома. Заряд ядра меняется на единицу при переходе от одного элемента к следующему и, как мы уже видели, равен для водорода и 92 для урана. Вокруг ядра на некотором расстоянии от него расположены легкие отрицательные электроны, число которых равно заряду ядра. Заряд ядра данного элемента определяет число и распределение внешних электронов, так что свойства атома, как это впервые показал Мозли, определяются целым числом. Почти всем целым числам от 1 до 92 соответствуют известные нам элементы.

Некоторые из внешних, или планетарных, электронов могут быть легко отделены от атома посредством электрического разряда или другими способами, но через короткое время их место занимают другие электроны, и атом возвращается в прежнее состояние. Чтобы осуществить устойчивое превращение атома, надо изменить либо заряд ядра, либо его массу, либо и то и другое одновременно. Между тем атомное ядро сдерживается чрезвычайно мощными силами, поэтому с самого начала было ясно, что для расщепления ядра необходимо воздействовать на него весьма концентрированными источниками энергии.

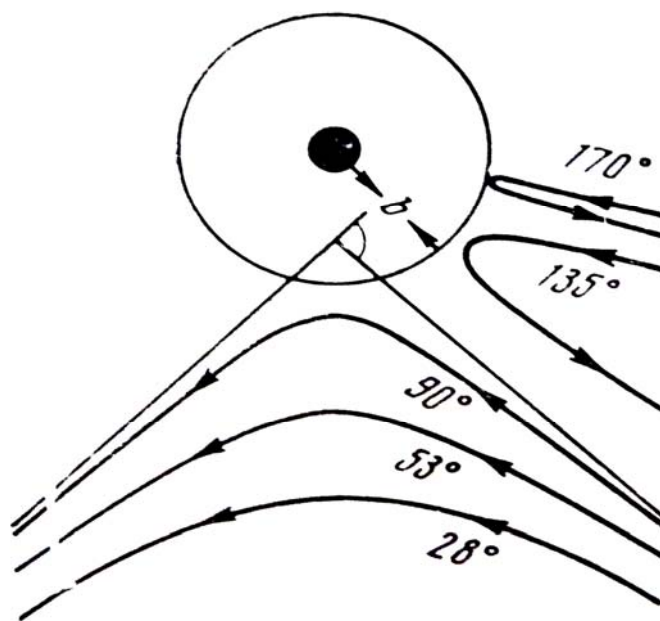


Рис. 8. Орбиты α -частиц, пролетающих вблизи тяжелого ядра

Из всех известных науке 20 лет назад частиц наибольшей энергией обладали быстрые α -частицы, спонтанно выбрасываемые радием и другими радиоактивными веществами. Скорость и энергия этих частиц настолько велики, что они могут проникать глубоко в недра атома, и, наблюдая за их отклонением или рассеянием, можно получить ценные сведения о природе и интенсивности отклоняющего поля внутри атома. И в самом деле, нынешние представления о ядерном строении атомов появились в результате изучения рассеяния α -частиц под большими углами при их прохождении через вещество. Рассмотрим, например, путь α -частицы, проходящей в непосредственной близости от ядра тяжелого атома. Так как α -частица несет 2 единицы положительного заряда и само ядро имеет большой положительный заряд, то между ядром и α -частицей появляются силы отталкивания, значительно возрастающие вблизи ядра. Поэтому α -частица описывает криволинейный путь около ядра, и если силы взаимодействия подчиняются закону Кулона, то этот путь имеет вид параболы, асимптоты которой совпадают с направлением приближения и удаления α -частицы. В результате одного столкновения с ядром α -частица может претерпевать значительное отклонение. Орбиты α -частиц, пролетающих на различном расстоянии от центра ядра, изображены на рис. 8, где относительные размеры

тяжелого ядра показаны черным кружком. Летящая прямо к центру α -частица на некотором расстоянии от него поворачивает назад; это минимальное расстояние (b), на которое α -частица может приблизиться к данному ядру, показано на рис. 8 очерченным вокруг ядра кругом. Чем ближе к центру ядра проходит направление удара α -частицы, тем больше угол ее рассеяния. Измерение количества α -частиц, рассеянных под различными углами при прохождении через вещество, дало результаты, полностью согласующиеся с вычислениями, основанными на этих предположениях. Доля α -частиц, рассеянных под данным углом, зависит от квадрата заряда и быстро возрастает при понижении скорости α -частицы. Нужно иметь в виду, что площадь мишени, которую представляет собой ядро, настолько мала, что α -частицы редко проходят достаточно близко к ядру, чтобы претерпеть значительное отклонение.

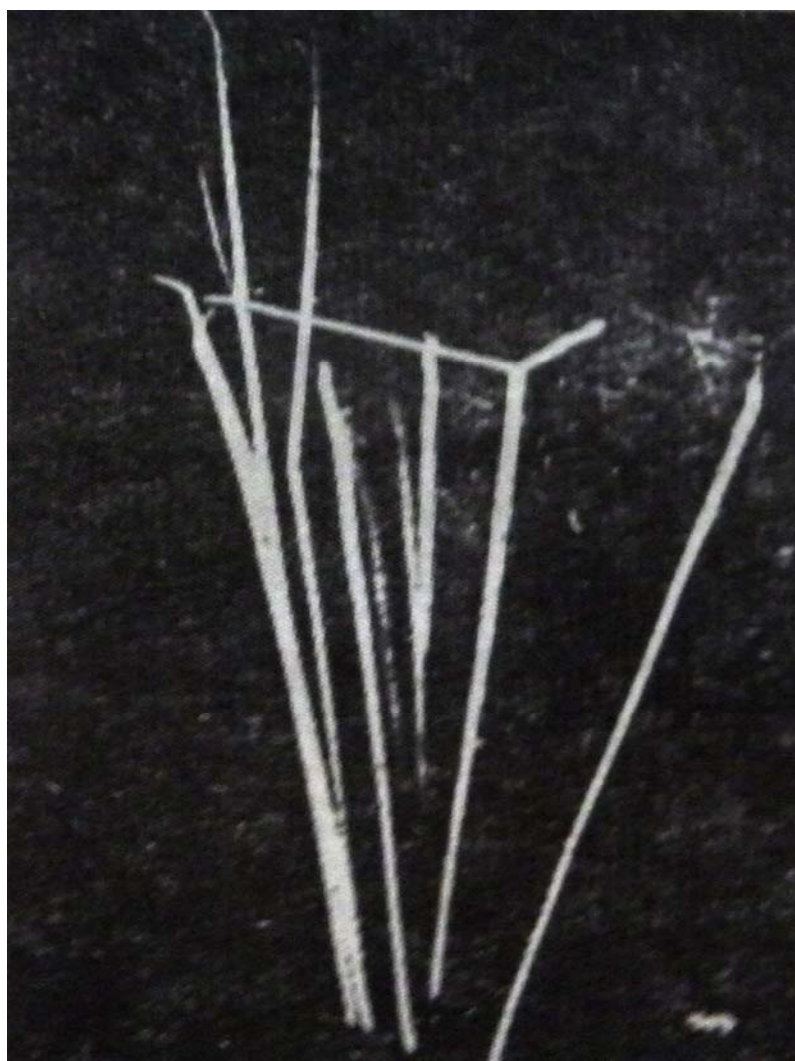
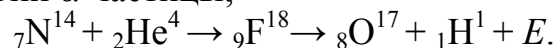


Рис. 9. Траектории α -частиц в кислороде, на одной из которых видна вилка, обусловленная столкновением с ядром кислорода. Короткая ветвь образована кислородным ядром отдачи, а длинная — отклоненной α -частицей. Измерение углов отклонения показало, что при столкновении сохраняются и импульс и энергия.

Пример такого сильного отклонения α -частицы при прохождении через кислород показан на рис. 9. При столкновении α -частица отклонилась влево, а след ядра отдачи виден справа. До сих пор мы рассматривали лишь «упругие» отклонения, подчиняющиеся законам механики. Действительно, в подобных случаях сталкивающиеся ядра ведут себя подобно крошечным идеально упругим бильiardным шарам. Никакого превращения элементов здесь не происходит. Ясно, однако, что в случае «лобового» соударения быстрой α -частицы с легким ядром, несущим небольшой заряд, силы отталкивания будут относительно малы и могут позволить α -частице подойти очень близко к ядру, а может быть, даже проникнуть в него. В этом последнем случае вся структура ядра была бы сильнейшим образом нарушена, что могло бы привести к его распаду.

Исходя из этих соображений, атомы нескольких легких элементов были подвергнуты бомбардировке очень большим количеством α -частиц. Выполнив эти опыты, я в 1919 г. получил экспериментальные доказательства того, что небольшое число атомов азота при бомбардировке распалось, испустив быстрые ядра водорода, известные теперь под названием протонов. В свете позднейших исследований общий механизм этого превращения вполне ясен. Время от времени α -частица действительно проникает в ядро азота, образуя на одно мгновение новое ядро типа ядра фтора а массой 18 и зарядом 9. Это ядро, которое в природе не существует, чрезвычайно неустойчиво и сразу же распадается, выбрасывая протон и превращаясь в устойчивое ядро кислорода с массой 17. Фазы этого процесса превращения показаны ниже в виде соотношения, напоминающего химическое уравнение. Левая часть уравнения содержит вступающие в реакцию элементы, а правая часть — конечные продукты превращения. Два числа у каждого символа обозначают массу и заряд ядер данного элемента. Как видно из уравнения, общий заряд ядер при превращении сохраняется, как и их масса, если только учесть эквивалентность массы и энергии. С этой целью в правую часть уравнения вводится символ E , который обозначает массу, эквивалентную сумме кинетических энергий протона и ядра кислорода за вычетом первоначальной энергии α -частицы;



Превращение происходит в ничтожных масштабах, ибо всего лишь одна α -частица из 50 000 приближается к ядру достаточно близко, чтобы быть им захваченной. Фотографируя следы нескольких сотен тысяч α -частиц в наполненной азотом камере Вильсона, Блэкett наблюдал несколько отчетливых случаев превращения ядра азота. Одна из таких фотографий приведена вместе с пояснительной схемой на рис. 10. На снимке отчетливо виден обратный путь протона с большим пробегом и короткий след ядра отдачи.

Превращение аналогичного типа происходит с целым рядом легких элементов при бомбардировке их α -частицами, причем во многих случаях высвобождается быстрый протон. В течение последних нескольких лет механизм этих превращений тщательно изучался и в результате получены

важные данные. Оказалось, что испускаемые протоны состоят из двух или большего числа групп, каждая из которых обладает определенной скоростью. Различная энергия протонов этих групп, по-видимому, результат излучения энергии из взрывающихся ядер в форме γ -излучения». Имеются также явные доказательства наличия в ядре определенных уровней энергии, или «резонансных» уровней, что приводит к избирательному захвату α -частиц определенной скорости.

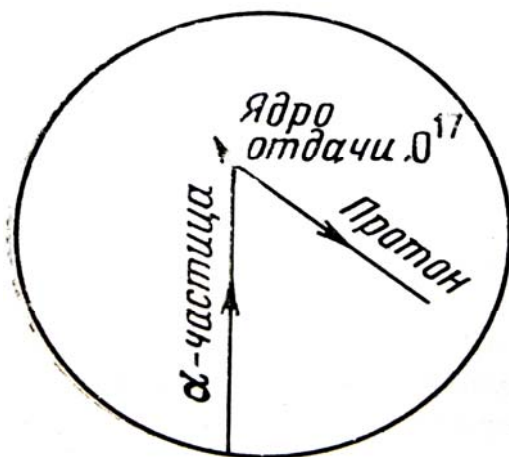


Рис. 10. Расщепление азота α -частицами. Из большого числа проходящих через азот α -частиц одна частица осуществила превращение ядра азота в ядро O^{17} с испусканием обладающего большой энергией протона (${}_7N^{14} + {}_2He^4 \rightarrow {}_8O^{17} + {}_1H^1$) (фотография П. Блэкетта).

Открытие нейтронов

Мы уже видели, что протон есть продукт превращения ряда легких элементов при их бомбардировке α -частицами. При более детальном изучении этих превращений была обнаружена еще одна частица, значение которой очень велико. При бомбардировке α -частицами легкого элемента бериллия с массой 9 протоны не образуются, но Боте обнаружил, что при этом излучается радиация с проникающей способностью, превышающей даже максимальную проникающую способность радиевых γ -лучей. Супруги Кюри-Жолио обнаружили некоторые специфические особенности поглощения этого вида излучения. Наконец, Чадвик в 1932 г. показал, что главная часть этого излучения вовсе не принадлежит к типу γ -лучей, а состоит из потока быстрых незаряженных частиц с массой, приблизительно равной массе атома водорода. Эти частицы, названные нейтронами, обладают весьма своеобразными свойствами, так как благодаря отсутствию заряда нейтрон свободно проходит через атомы и не производит ионизации на своем пути. Механизм превращения, при котором образуется нейтрон, состоит, по-видимому, в следующем: время от времени α -частица захватывается ядром бериллия с массой 9, на мгновение образуя ядро C^{13} с большим избытком энергии. Это ядро немедленно распадается на устойчивое ядро C^{12} и нейтрон, причем избыточная энергия реакции выделяется в форме кинетической энергии двух частиц — конечных продуктов реакции. Весьма удобный и постоянный источник нейтронов можно получить, смешав в запаянной

трубочке около 100 мг чистой радиевой соли с порошком бериллия. В результате бомбардировки бериллия α -частицами за 1 сек получается около полумиллиона нейтронов, большинство которых проходит сквозь стенки трубки. Интенсивные источники нейтронов можно также получить, применяя вместо радиевой соли эманацию радия. В этом случае испускание нейтронов ослабевает со временем с такой же скоростью, как и распад эманации.

Возможность существования нейтронов как составных частей атомного ядра обсуждалась еще задолго до их экспериментального открытия. Небезынтересно процитировать заявление, сделанное мною по этому вопросу в Бейкерианской лекции, прочитанной перед Британским Королевским обществом в 1920 г.:

«Если это предположение верно, то кажется весьма правдоподобным, что один электрон может связать также два Н-ядра, а может быть, и одно Н-ядро. Тогда в первом случае возможно существование атома с массой, примерно равной 2, и одним зарядом, которые нужно рассматривать как изотоп водорода. В другом случае предполагается возможность существования атома с массой 1 и нулевым зарядом ядра. Подобная атомная структура представляется вполне возможной. С современной точки зрения нейтральный атом водорода следует рассматривать как ядро с единичным зарядом, к которому на некотором расстоянии присоединен электрон и спектр-водорода объясняется движением этого удаленного электрона. При определенных условиях электрон может быть связан с Н-ядром намного сильнее, образуя нечто вроде нейтрального дублета. Такой атом обладал бы весьма своеобразными свойствами. Его внешнее поле было бы практически равно нулю повсюду, за исключением области, прилегающей непосредственно к ядру, благодаря чему он мог бы свободно проходить через вещество. Присутствие таких атомов было бы, вероятно, трудно обнаружить с помощью спектроскопа, и их невозможно было бы сохранять в герметически закрытом сосуде. С другой стороны, они должны легко проникать в недра атома и могут либо соединяться с ядром, либо распасться под действием интенсивного поля, результатом чего будет, вероятно, испускание Н-атома или электрона или же обоих вместе».

Вначале предполагалось, что нейтроны могут быть получены при пропускании электрического разряда через водород. Поставленные в этом направлении эксперименты дали отрицательные результаты. Теперь представляется очевидным, что с помощью обычных напряжений таким путем нейтроны получить нельзя.

Чадвик и я много лет назад ставили также опыты с целью установить, образуются ли нейтроны при бомбардировке алюминия быстрыми α -частицами, но получили отрицательные результаты. Никто не мог предвидеть тех условий, при которых эта замечательная частица была в конце концов открыта.

Мы видели, что присутствие нейтрона можно обнаружить в том случае, если на своем пути он испытывает упругое столкновение с ядром. Например, при прохождении нейтрона через водород иногда происходит лобовое

соударение его с Н-ядром. При этом энергия нейтрона передается ядру, которое приходит в движение со скоростью, равной скорости налетающего нейтрона. При скользящем ударе ядру передается лишь часть энергии нейтрона.

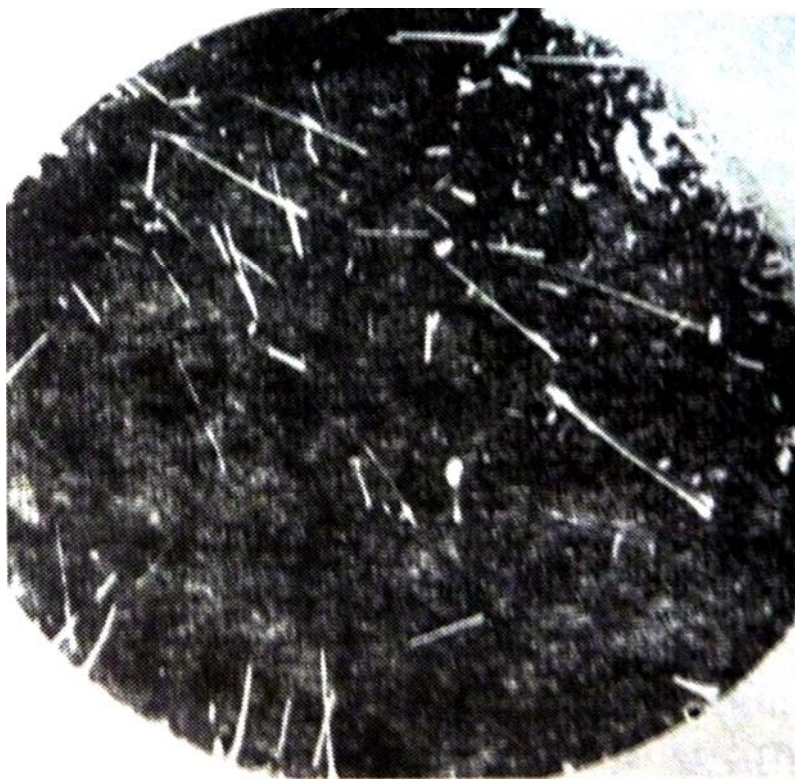


Рис. 11. Следы протонов отдачи, возникающие при обстреле метана нейтронами с энергией в 2,4 млн. в. Источник нейтронов помещался в S, где мишень из тяжелого водорода бомбардировалась ускоренными дейтронами (${}_1\text{H}^2 + {}_1\text{H}^2 \rightarrow {}_0n^1 + {}_3\text{He}^3$) (фотография П. Ди и Ч. Гильберта).

На рис. 11 приведена фотография нейтронных частиц отдачи в метане, полученная Ди и Гильбертом в камере Вильсона. При пропускании потока быстрых нейтронов через водород или водородсодержащие вещества, например воду или парафин, многие нейтроны быстро затормаживаются этими столкновениями, пока, наконец, их энергия не становится сравнимой с энергией теплового движения окружающих молекул. Этот способ получения очень медленных нейтронов оказался весьма полезным при многих экспериментах. Такие медленные нейтроны проходят с незначительным поглощением через толстые слои многих веществ, например железа и свинца, но сильно поглощаются определенными элементами, в частности бором, кадмием и гадолинием. Поглощение нейтронов гадолинием настолько велико, что слой этого вещества толщиной всего в долю миллиметра поглощает практически все медленные нейтроны. Такое сильное поглощение медленных нейтронов некоторыми элементами, несомненно, есть следствие захватывания их ядрами элементов, в результате чего последние претерпевают превращение. Иногда захват нейтрона ядром придает ему такую неустойчивость, что оно распадается на части. В других случаях этот

захват может превратить один изотоп в другой с массой на единицу больше либо образовать неустойчивый или радиоактивный изотоп, распадающийся с испусканием положительного или отрицательного электрона.

Как показали Фезер, Харкинс, а также Ферми с сотрудниками, нейтроны представляют собой чрезвычайно эффективное средство превращения элементов. Благодаря отсутствию заряда медленные нейтроны могут свободно проникать в тяжелые ядра, тогда как заряженным частицам необходима большая энергия движения, чтобы вплотную приблизиться к тяжелому ядру вопреки действию сил отталкивания его электрического поля.

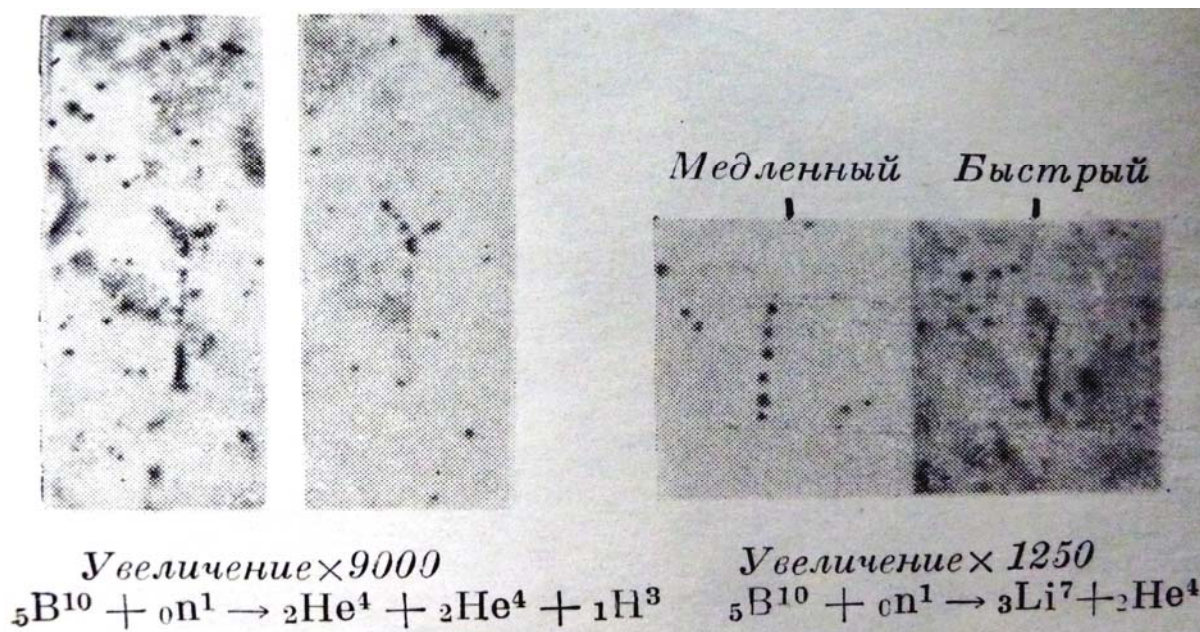


Рис. 12. Следы частиц на фотографической эмульсии. Фотопластинка, пропитанная бором, облучалась медленными нейтронами. Продукты расщепления бора, происходившего согласно приведенным уравнениям, дали следы в виде цепочки из отдельных почерневших зерен эмульсии (фотография Г. Тейлора и М. Голдхабера)

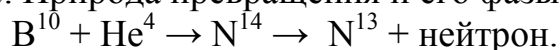
Действенность нейтрона как средства преобразования атомов я проиллюстрирую на примере легких элементов лития и бора. Тейлор и Голдхабер недавно разработали фотографический метод изучения нейтронных превращений некоторых элементов. Специальная фотопластинка пропитывается раствором соединения, содержащего литий или бор, и облучается в течение нескольких дней источником медленных нейтронов. После проявления пластинки следы быстрых частиц можно отчетливо видеть и рассмотреть в микроскоп с большим увеличением. При облучении лития его изотоп с массой 6 захватывает нейтрон, а затем расщепляется на α -частицу (He^4) и изотоп водорода с массой 3 (H^3). Применяя микроскоп с большим увеличением, можно отчетливо видеть на пластинке следы этих двух частиц, выбрасываемых в противоположных направлениях. Наблюдаются два типа превращения бора; в одном случае изотоп бора с

массой 10 захватывает нейтрон, а затем распадается на ядро лития с массой 7 и α -частицу (He^4); в другом случае неустойчивое ядро расщепляется на две α -частицы и ядро H^3 .

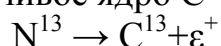
Фотографии следов, полученные таким способом, приведены на рис. 12. Ясно видны три следа, расходящиеся из одной точки, причем самый длинный из них принадлежит ядру H^3 с единичным зарядом. Эти хорошо заметные превращения лития и бора медленными нейтронами оказались весьма полезным средством обнаружения и подсчета медленных нейтронов. В одних случаях детектирующая камера наполняется газообразным фтористым бором, а в других стенки камеры покрываются соединениями бора в лития.

Получение радиоактивных веществ

Теперь мы переходим к очень важному открытию, сделанному супругами Кюри-Жолио в 1933 г. Они обнаружили, что при бомбардировке некоторых легких элементов α -частицами образуются радиоактивные элементы, распадающиеся по тем же законам, что и естественные радиоактивные вещества, но испускающие в процессе распада не α - или β -частицы, а быстрые положительные электроны. В качестве иллюстрации приведем один единственный пример. Если подвергнуть бор в течение некоторого времени бомбардировке α -частицами, а затем исследовать его, то он окажется радиоактивным, т. е. испускающим поток позитронов. Активность его спадает со временем по геометрической прогрессии, убывая наполовину за 11 мин. Природа превращения и его фазы таковы:

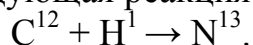


Благодаря избытку энергии ядро N^{14} очень неустойчиво и мгновенно разрушается, превращаясь в более устойчивое ядро N^{13} . Последнее затем медленно превращается в устойчивое ядро C^{13} , испуская позитрон e^+ :



Получение этого «радиоазота» подтверждается тем фактом, что, будучи собран, он ведет себя как радиоактивный газ с химическими свойствами азота.

Интересно отметить, что тот же радиоактивный газ может быть получен совершенно иным способом. Если бомбардировать углерод быстрыми протонами, то происходит следующая реакция:



Полученный таким путем радиоазот N^{13} по своим радиоактивным и химическим свойствам идентичен газу, образующемуся при бомбардировке бора α -частицами.

Подобным же образом бомбардируемый α -частицами алюминий порождает радиоактивный фосфор с атомным весом 30 и периодом полураспада 3,2 мин. Радиофосфор, испуская позитрон, превращается в устойчивое ядро кремния с атомным весом 30.

За последние несколько лет получено большое количество радиоактивных веществ путем бомбардировки элементов не только α -частицами, но и быстрыми протонами и дейтронами. Ферми и его

сотрудники показали также, что медленные нейтроны представляют собой весьма эффективное средство образования радиоактивных веществ даже из самых тяжелых элементов. Сейчас известно уже более 50 таких радиоактивных элементов, причем в большинстве случаев они распадаются с испусканием отрицательных электронов (β -частиц). Даже самые тяжелые элементы — уран и торий — преобразуются при бомбардировке медленными нейтронами и в каждом случае порождают ряд новых радиоактивных веществ, но точная интерпретация этих превращений находится еще в процессе обсуждения.

Методы искусственного превращения

До сих пор мы имели дело с превращениями, вызванными α -частицами, которые сами получаются в процессе распада радиоактивных веществ, и нейтронами, понижающими при превращении бериллия под действием α -частиц. Количество радия, которым располагают наши лаборатории, ограничено, так что результаты превращений, вызванных α -частицами, вообще говоря, малы и могут изучаться лишь благодаря разработанным нами исключительно чувствительным методам подсчета отдельных быстро движущихся атомов вещества. Десять лет назад было установлено, что для дальнейшего расширения наших знаний о превращении элементов необходимы гораздо более интенсивные потоки бомбардирующих частиц. Давно известно, что при прохождении электрического разряда через разреженный газ образуется множество заряженных атомов и молекул. Например, если пропускать разряд через водород, образуется огромное число заряженных H-атомов (протонов), а также заряженных молекул. Благодаря недавнему открытию тяжелого водорода с массой 2, известного под названием дейтерий, в нашем распоряжении оказался еще один снаряд — дейтрон, который приобрел важную роль в расширении наших знаний о превращении элементов. Большие количества протонов и дейтронов можно легко получить, пропуская электрический разряд соответственно через водород и дейтерий, но, чтобы придать им большую скорость, необходимо разогнать их сильным электрическим полем. Это требует применения в некоторых случаях приборов масштаба инженерных сооружений, а также напряжений порядка 1 млн. в; кроме того, необходимы высокопроизводительные насосы для поддержания хорошего вакуума, чтобы предотвратить электрический разряд в ускоряющей системе. В лаборатории Кембриджа высокое постоянное напряжение получалось умножением снимаемого с трансформатора напряжения системой конденсаторов и выпрямителей.

На рис. 13 показана фотография установки, применявшейся Кокрофтом и Уолтоном в их первых опытах такого рода, поставленных в Кембридже.

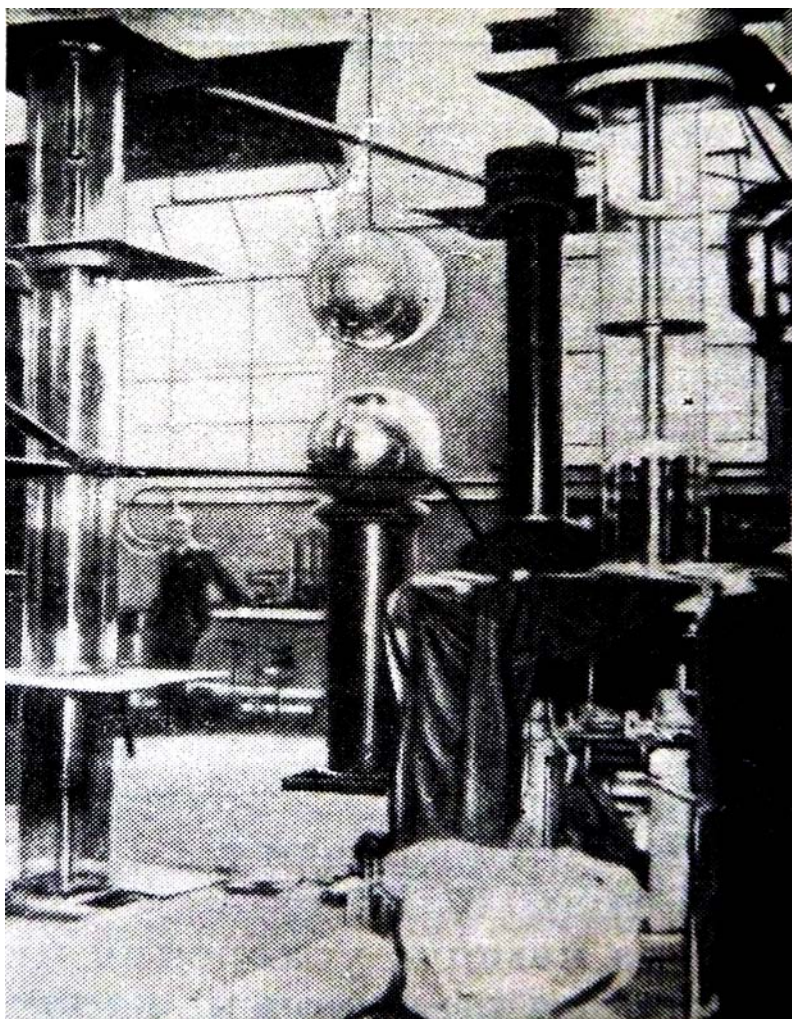


Рис. 13. Высоковольтная установка, применявшаяся в Кембридже Кокрофтом и Уолтоном в их первых опытах по искусственному превращению элементов.

Метод получения и анализа потока быстрых протонов и дейтронов для бомбардировки вещества пояснен на рис. 14. Этот прибор, спроектированный Олифантом, применялся для изучения превращений легких элементов. Мы надеемся в новой лаборатории высоких напряжений в Кембридже получить для целей ускорения постоянное напряжение в 2 млн. в, которое даст искру длиной около 8 м. В США Ван-де-Грааф изобрел новый электростатический генератор для получения необходимого высокого напряжения. Машину такого рода применяли в экспериментах по превращению элементов Тюве, Хафстад и Даль в Вашингтоне, причем получили устойчивые потенциалы до 1 млн. в. В Калифорнийском университете Лоуренс сконструировал остроумный аппарат, названный «циклотроном», в котором заряженные частицы автоматически многократно ускоряются. Этот метод требует применения гигантских электромагнитов и мощных электрических генераторов.

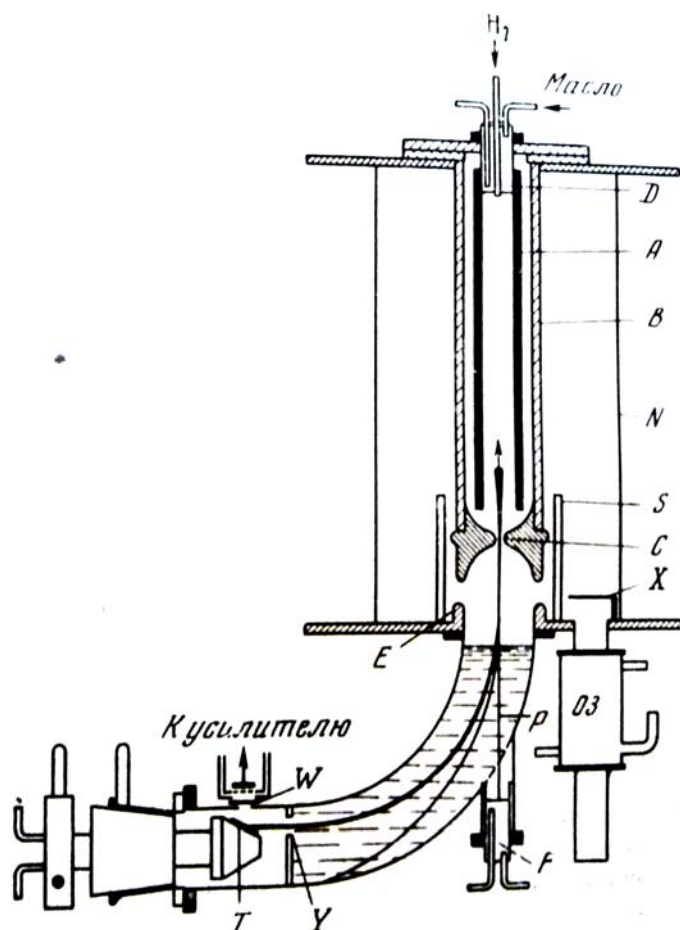


Рис. 14 Прибор для ускорения протонов и дейтронов.

При пропускании электрического разряда между анодом *A* с масляным охлаждением и стальным катодом *B* через находящийся под низким давлением водород образуется пучок водородных ионов, выходящий через отверстие *C* в катод. Ионы ускоряются приложенным к электродам *C* и *E* напряжением, которое может быть доведено до 300000 в. Стальной экран *S* служит для предохранения стеклянных стенок аппарата *N*. Система откачивается быстрым насосом 03, снабженным предохранительным щитком *X*. Пучок ионов проходит через магнитное поле, и частицы нужного типа направляются на мишень *T* через диафрагму *Y*. Тонкое слюдяное окошко *W* пропускает все образующиеся быстрые частицы в камеру счетчика. Цилиндр Фарадея *F* предназначен для собирания пучка *P*, когда электромагнит не включен.

На рис. 15 показана схема ускоряющей системы циклотрона. Однородное магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости рисунка, а разгоняемый протон или дейтрон описывает спиральную траекторию с постоянно увеличивающимся радиусом. Успех этого метода многократного ускорения основан на том, что время, потребное частице для совершения полного оборота, не зависит от ее скорости и, следовательно, от радиуса вращения, если только масса частицы остается почти неизменной. Лоуренс считает, что протон или дейтрон может совершить 1000 оборотов, не испытав значительного рассеяния на остаточном газе. Таким путем ему удалось получить интенсивные потоки протонов и дейтронов с энергией, достигающей до 6 млн. в. Эта энергия значительно больше той, которую можно рассчитывать получить в лаборатории, непосредственно применив высокие

напряжения. Есть надежда, что в ближайшем будущем, применяя более мощный электромагнит и более интенсивные поля, удастся получить частицы с еще большей энергией.

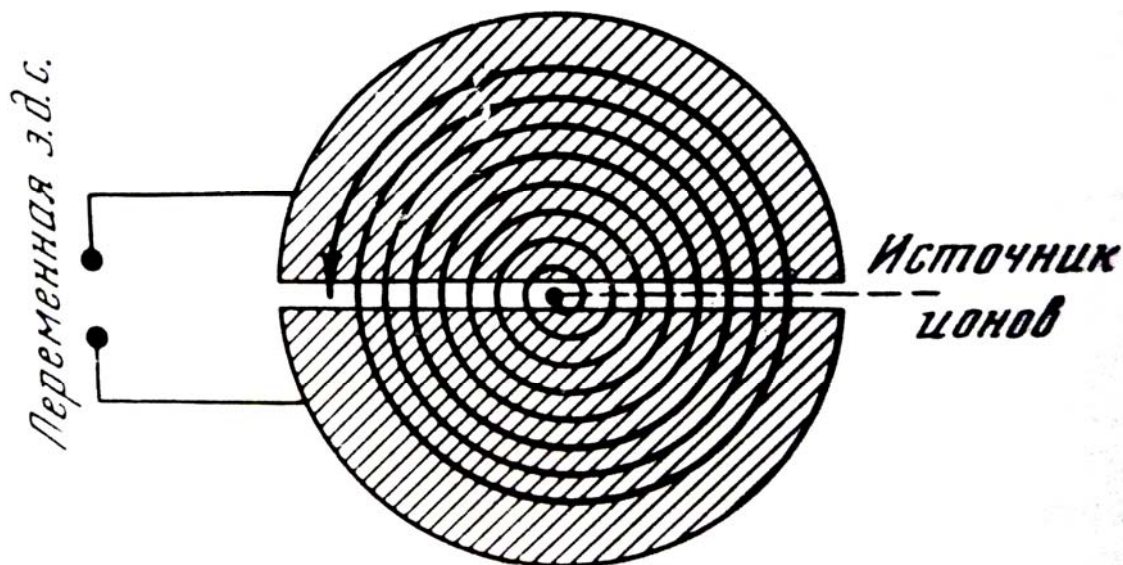


Рис. 15. Циклотрон

Положительные ионы водорода, образующиеся в разреженном газе электронами в результате бомбардировки электронами, ускоряются между D-образными электродами, к которым приложено переменное напряжение высокой частоты. Магнитное поле, направленное перпендикулярно плоскости рисунка, заставляет ионы двигаться по дуге круга, и при определенной частоте переменной э.д.с. они всегда будут попадать в место раздела двух D в тот момент, когда поле снова будет направлено так, чтобы их ускорять.

За последние годы были сконструированы устройства, позволяющие вывести наружу из камеры ускорения циклотрона пучок разогнанных до большой скорости частиц; это очень важно для целого ряда экспериментов.

На рис. 16 приведена полученная Лоуренсом фотография светящегося пучка дейтронов с энергией 6 млн. в, соответствующего току 6 мка. В этом случае получается почти параллельный пучок, выходящий через платиновое окошко на конце трубки на расстоянии 2 м от камеры ускорения. Такой пучок соответствует вылету $3,8 \cdot 10^{13}$ дейтронов в 1 сек, что эквивалентно потоку α -частиц, выбрасываемых за 1 сек примерно из 1000 г чистого радия. Каждый из этих методов получения быстрых частиц имеет известные преимущества при решении проблем определенного типа.

Первоначально предполагалось, что для проникновения в ядра сравнительно легких элементов потребуется частица, обладающая энергией того же порядка, что и α -частица, т. е. около 7 млн. в. Однако в своих расчетах, основанных на принципах волновой механики, Гамов показал, что имеется небольшая вероятность проникновения частицы внутрь ядра даже в тех случаях, когда ее энергия значительно меньше энергии α -частицы. Эта идея полностью подтвердилась позднейшими экспериментами. Кокрофт и Уолтон первыми показали, что искусственное превращение лития и бора может быть достигнуто бомбардировкой протонами с энергией порядка всего

лишь 100 000 в. Процессы превращения этих элементов протонами и дейтронами сейчас хорошо изучены и интересны во многих отношениях.

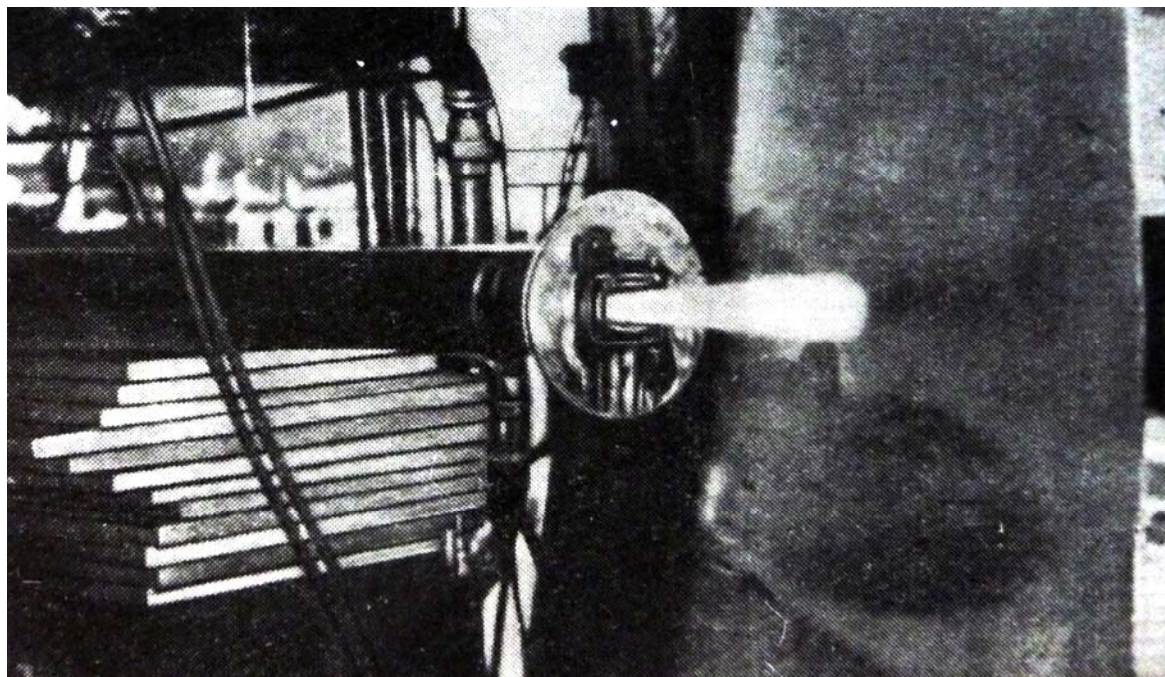


Рис. 16. Пучок дейтронов с энергией в 6 млн. в, выходящий из циклотрона (фотография Э. Лоуренса).

Рассмотрим сначала процесс превращения лития, который, как мы знаем, состоит из двух изотопов с массами 6 и 7. Недавно были найдены методы разделения этих изотопов, так что эксперименты могут быть поставлены либо с Li^6 , либо с Li^7 . При бомбардировке протонами время от времени какой-либо протон проникает в ядро Li^7 и захватывается им. Получившееся ядро Be^8 неустойчиво и немедленно распадается на две быстрые α -частицы, выбрасываемые в почти противоположных направлениях. Схема этого типа превращения показана на рис. 17.

При захвате протона ядром Li^6 образуется ядро Be^7 : которое распадается на α -частицу и изотоп гелия с массой 3 (He^3). Если бомбардировать не протонами, а дейтронами, то захват дейтрона ядром Li^6 снова приводит к образованию ядра Be^8 , но с большим избытком энергии. Это ядро, как и в предыдущем случае, распадается на две α -частицы, имеющие, однако, большую скорость, чем α -частицы, образующиеся при захвате протона ядром Li^7 . Более того, эти частицы, за одним исключением, наиболее быстрые среди α -частиц, наблюдаемых при всех превращениях, так как их пробег в воздухе равен 13 см. При захвате дейтрона ядром Li^7 образуется ядро Be^9 , сразу же распадающееся на три составные части — две α -частицы и нейтрон.

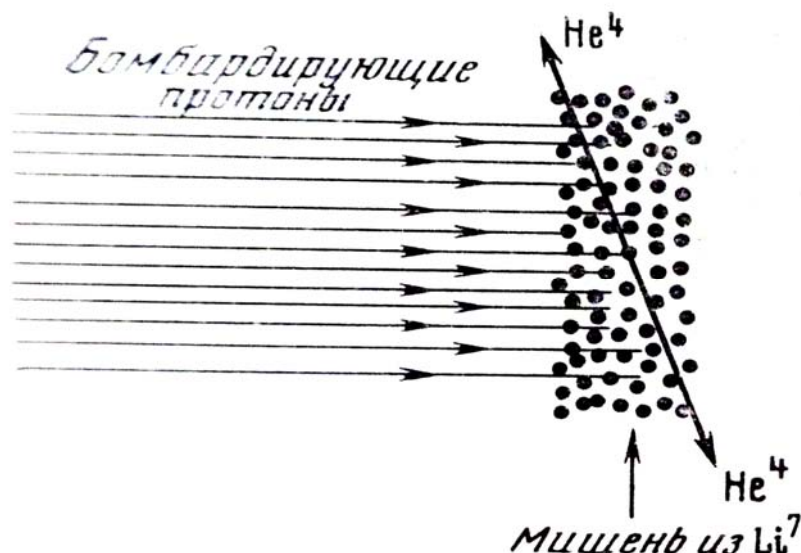


Рис. 17. Схема, иллюстрирующая превращение изотопа лития с массой 7 при бомбардировке протонами. На каждую сотню миллионов протонов с энергией в 200 000 в одно ядро лития превращается в два гелиевых ядра. Длина пробега возникающих α -частиц около 8,4 см

Я упомянул здесь лишь о некоторых наиболее важных типах превращения двух изотопов лития. Приведенная таблица наглядно иллюстрирует широкое разнообразие превращений, происходящих при бомбардировке лития различными частицами. Превращения лития могут быть легко обнаружены путем фотографирования в камере Вильсона следов возникающих при этих превращениях частиц. На рис. 18 приведена одна из таких фотографий, полученная Ди и Уолтоном; на ней видны пути α -частиц, образовавшихся при бомбардировке лития дейтронами. На многих фотографиях, полученных таким методом, отчетливо заметно появление пары частиц, разлетающихся в почти противоположных направлениях.

Превращение бора B^{11} при бомбардировке протонами было предметом длительного изучения. В этом случае образуется ядро C^{12} , распадающееся на три α -частицы. Ди и Гильберт показали, что в основном это превращение проходит в две фазы. Прежде всего выбрасывается α -частица и образуется остаточное ядро Be^8 , содержащее избыток энергии, а затем, спустя очень короткий промежуток времени, это ядро расщепляется на две α -частицы. В силу технических трудностей редко удается получить на фотопластинке след всех трех α -частиц, образующихся при одном превращении.

Красивая фотография следов такой тройки α -частиц приведена на рис.19. Все три следа, как и следовало ожидать, лежат в одной плоскости, и их суммарная кинетическая энергия соответствует энергии, освободившейся при реакции. Превращения B^{10} и B^{11} под действием бомбардировки дейтронами очень сложны и происходят с испусканием групп протонов с различными скоростями, а также α -частиц.

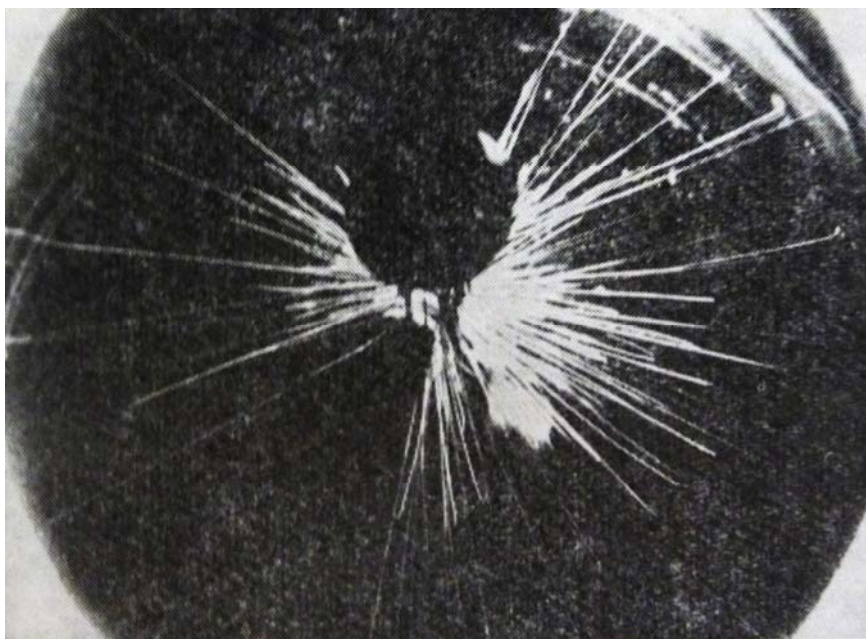


Рис. 18. Следы α -частиц, образующихся при бомбардировке лития искусственно ускоренными дейтронами.

α -частицы, летящие по направлению к стенкам камеры, имеют длину пробега > 10 см и образованы при превращении ${}^6_3\text{Li} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$ (длина пробега α -частицы 13,4 см).

На фотографии видны также следы группы α -частиц с непрерывным распределением пробегов до 8 см. Эта группа образуется в результате процесса ${}^7_3\text{Li} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$. Подвергавшаяся обстрелу литиевая мишень помещалась в вакууме внутри камеры со слюдяными окошками, которая видна в центре фотографии под трубкой, откуда выходит вниз поток быстрых дейтронов (фотография П. Ди и Э. Уолтона)

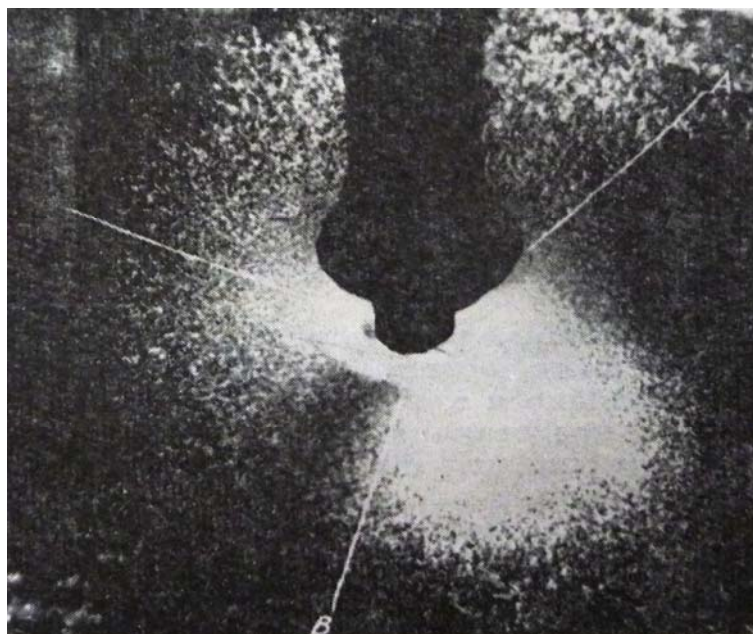


Рис. 19. Типичный случай расщепления бора на три α -частицы при протонной бомбардировке (${}^{11}_5\text{B} + {}^1_1\text{H} \rightarrow 3 {}^4_2\text{He}$)

В центре фотографии заметна мишень из бора в виде тонкой линии, окруженной белой сферой, образовавшейся в результате рассеяния протонов из бомбардирующего пучка; α -частицы A и B были выброшены в почти противоположных направлениях, в то время как третья α -частица C получила очень малый запас энергии и едва вышла за пределы пучка рассеянных протонов

Превращения лития при бомбардировке протонами (${}_1\text{H}^1$), нейтронами (${}_0n^1$), дейтронами (${}_1\text{H}^2$) и α -частицами

	Освобождаемая энергия, Мэв	Примечания
Изотоп Li^6		
${}_3\text{Li}^6 + {}_1\text{H}^1 \rightarrow {}_2\text{He}^4 + {}_2\text{He}^3$	3,6	
${}_3\text{Li}^6 + {}_0n^1 \rightarrow {}_2\text{He}^4 + {}_1\text{H}^3$	4,7	
${}_3\text{Li}^6 + {}_1\text{H}^2 \rightarrow {}_3\text{Li}^7 + {}_1\text{H}^1$	5,0	
\searrow ${}_2\text{He}^4 + {}_2\text{He}^4$	22	
Изотоп ${}_3\text{Li}^7$		
${}_3\text{Li}^7 + {}_1\text{H}^1 \rightarrow {}_2\text{He}^4 + {}_2\text{He}^4$	17	
\searrow ${}_4\text{Be}^8 + h\nu$	$h\nu=17$	Монохроматический пучок γ -лучей
или ${}_2\text{He}^4 + {}_2\text{He}^4$		
\nearrow ${}_2\text{He}^4 + {}_2\text{He}^3 + {}_0n^1$	14,6	Группа нейтронов с непрерывным распределением скоростей
${}_3\text{Li}^7 + {}_1\text{H}^2 \rightarrow {}_4\text{Be}^8 + {}_0n^1$	14?	Нейтроны монохроматические
\searrow ${}_3\text{Li}^8 + {}_1\text{H}^1$?	Группа протонов, пока не обнаружена
${}_3\text{Li}^7 + {}_2\text{He}^4 \rightarrow {}_5\text{B}^{10} + {}_0n^1$	—3	Медленные нейтроны

При этих реакциях образуются протоны, нейтроны, атомы ${}_1\text{H}^3$, ${}_2\text{He}^3$, ${}_2\text{He}^4$, ${}_3\text{Li}^8$, ${}_4\text{Be}^8$, ${}_5\text{B}^{10}$ и γ -лучи.

Подчеркнутый изотоп лития радиоактивен и имеет период полураспада 0,8 сек. Он распадается с испусканием быстрых β -частиц. Интересно отметить, что при бомбардировке Li^7 протонами испускаются также интенсивные γ -лучи с квантовой энергией 17 млн. эв — наибольшей из наблюдавшихся до сих пор при превращениях.

Изложение даже основных результатов, полученных при бомбардировке всех элементов быстрыми частицами различных сортов, отняло бы слишком много времени. Однако я хотел бы остановиться на нескольких случаях превращений, представляющих особый интерес. Простейший возможный случай превращения имеет место при бомбардировке дейтерия D^2 дейтронами. Соединение этих двух частиц должно привести к образованию ядра He^4 , во с очень большим избытком энергии. Это ядро немедленно распадается каким-либо одним из двух одинаково вероятных способов, показанных на рис. 20. В одном случае ядро расщепляется на быстрый протон и изотоп водорода с массой 3 (H^3), а в

другом — на быстрый нейтрон и ядро гелия с массой 3 (He^3). Если энергия бомбардирующих дейтронов мала по сравнению с энергией, освобождающейся при превращении, то две частицы в обоих случаях будут выбрасываться почти в противоположных направлениях. Это хорошо заметно на фотографиях (рис. 21), где длинные следы принадлежат протонам, а гораздо более короткие — ядрам H^3 .

Описанные превращения могут быть обнаружены, если дейтрон разгоняется напряжением всего в 20000 в. Количество получающегося превращения вещества, конечно, быстро растет с увеличением энергии бомбардирующих дейтронов. Эти типы превращений наиболее эффективны из всех известных нам превращений, происходящих с низкой энергией бомбардирующих частиц; они снабжают нас для экспериментальных целей мощным источником нейтронов с энергией 2,4 млн. в, группой протонов с энергией около 3 млн. в.

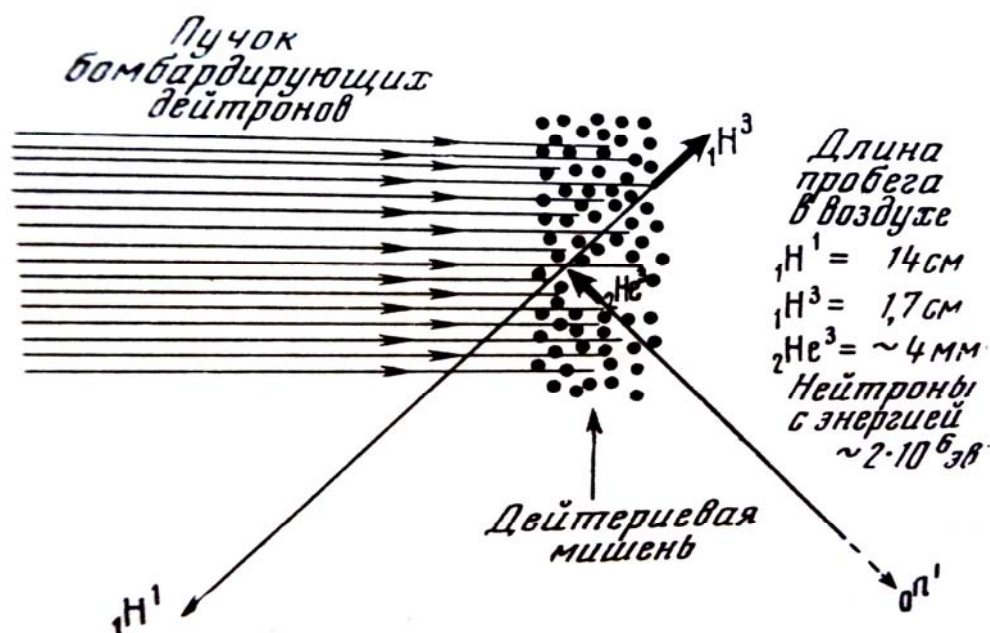


Рис. 20. Схема расщепления дейтерия при бомбардировке дейтронами. Около 2 млн. дейтронов с энергией 100000 в, бомбардирующих мишень из чистого дейтерия, производят одно превращение по какой-либо из двух указанных реакций.

Эти интересные превращения, принадлежащие к наиболее простому типу из всех возможных, впервые были изучены Олифантом и Гартеком и привели к открытию нового изотопа водорода с массой 3 и нового изотопа гелия также с массой 3. Массы этих двух изотопов могут быть точно вычислены, если известна энергия, выделяющаяся при их превращении. Пожалуй, небезынтересно проделать здесь эти вычисления для случая H^3 .

Если соблюдается закон сохранения энергии, то для масс ядер должно выполняться соотношение

$$H^2 + H^2 = H^1 + H^3 + E.$$

$$2,0147 + 2,0147 = 1,0081 + H^3 + 0,0042,$$

где E — масса, эквивалентная выделенной при превращении энергии. Значение E вычисляется из наблюдаемой длины пробега протонов в воздухе,

составляющей 14,70 см, что соответствует энергии 2,98 млн. в. Из закона сохранения количества движения, который при расщеплении должен выполняться, следует, что 3/4 всей освобождающейся энергии выделяется в форме кинетической энергии протона. Таким образом, вся выделяющаяся энергия E составляет 3,97 млн. в. Согласно теории Эйнштейна, масса и энергия эквивалентны между собой, и уменьшение массы системы на dm эквивалентно выделению энергии в количестве $c^2 dm$, где c — скорость света. Правильность этого соотношения подтверждена для ряда случаев, когда были точно известны массы участвующих в превращении атомов. Выделение энергии в количестве 3,97 млн. в эквивалентно убыванию массы на 0,0042 а.е.м. Приведенное уравнение остается верным, если в обеих частях его вместо масс ядер поставить массы атомов. Под химическими символами элементов указаны значения атомных весов водорода и дейтерия, найденные Астоном с помощью масс-спектрографа. Чтобы массы элементов обеих частей уравнения сбалансировались, необходимо, очевидно, чтобы масса H^3 была равна 3,0171.

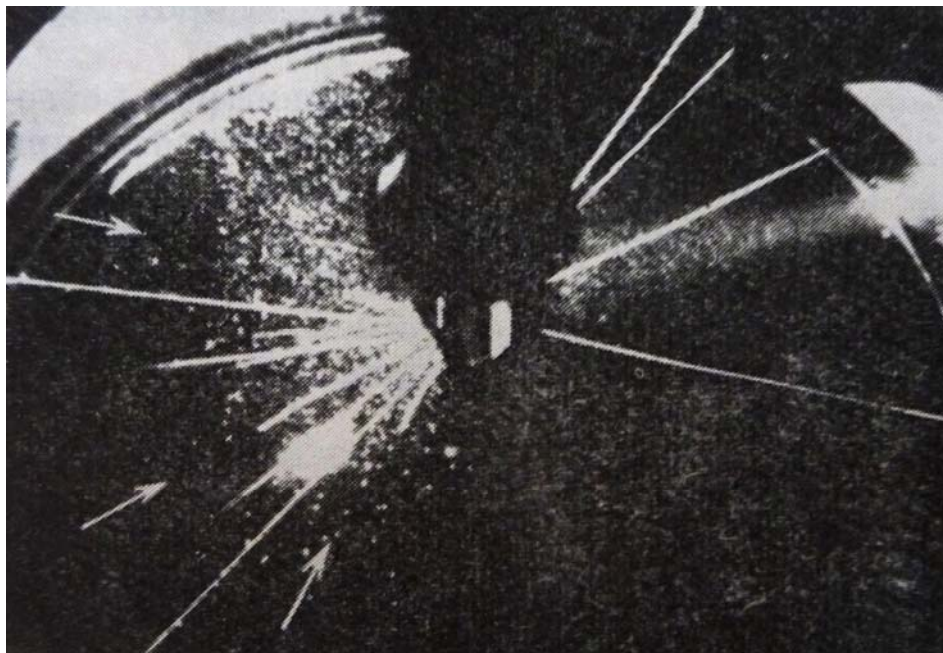


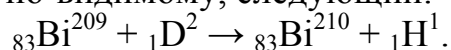
Рис. 21. Три примера испускания частиц ${}_1H^1$ и ${}_1H^3$ в противоположных направлениях при бомбардировке искусственно ускоренными дейтронами тонкой мишени, содержащей дейтерий (${}_1H^2 + {}_1H^2 \rightarrow {}_1H^3$)

Следы частиц ${}_1H^3$, заметные слева от трубки с мишенью, имеют пробег в 1,6 см, в то время как длина пробега протонов, вылетающих в противоположную сторону, составляет 15 см

Аналогичным образом путем определения энергии быстрого нейтрона, испускаемого при другом типе превращения, было найдено, что масса He^3 равна 3,0171, т. е. в пределах точности измерений совпадает с массой H^3 . Имеются достаточные основания полагать, что значения атомных весов, вычисленные этим путем, соответствуют действительности. Известно, например, что He^3 образуется также при бомбардировке Li^6 протонами (см.

таблицу), и масса He^3 , вычисленная из этой реакции, совпадает с приведенной выше.

Наконец, я хотел бы вкратце остановиться на некоторых важных открытиях, сделанных Лоуренсом и его сотрудниками, применявшими циклотрон для получения очень быстрых дейтронов с энергией 6 млн. в. При бомбардировке висмута такими быстрыми дейтронами образуется радиоактивный изотоп висмута, который во всех отношениях идентичен хорошо известному радиоактивному веществу — радию Е. Полученное из висмута радиоактивное вещество не только испускает β -частицы и распадается в точности с тем же периодом, что и радий Е, но образует при этом испускающее α -частицы вещество, идентичное с полонием (радий F). Механизм превращения, по-видимому, следующий:



Как указано на рис. 1, радий Е представляет собой изотоп висмута с атомным весом 210. Это доказательство получения одного из природных радиоактивных веществ искусственным путем представляет огромный интерес и имеет выдающееся значение.

Я не могу не упомянуть еще об одном превращении, которое может оказаться весьма ценным с технической точки зрения. При бомбардировке натрия с атомным весом 23 (т. е. обыкновенной поваренной соли) быстрыми дейтронами образуется радиоактивный изотоп натрия с атомным весом 24 — радионатрий и быстрый протон. Радионатрий распадается с испусканием β -частицы и образует устойчивое ядро магния с атомным весом 24. Период полураспада радионатрия 15 час. Наряду с β -частицей каждое ядро радионатрия, по-видимому, испускает γ -лучи большой энергии и такой же проникающей способности, как и γ -лучи, испускаемые радием, находящимся в равновесии с продуктами своего распада. Лоуренсу уже удалось получить таким путем мощный источник γ -излучения из радионатрия, приблизительно эквивалентный в этом отношении 1 г радия. Итак, возможно, что искусственно созданный источник γ -излучения сможет когда-нибудь в медицине заменить радий.

Превращение с помощью γ -лучей

До сего времени бомбардировка вещества быстрыми частицами был наиболее эффективным методом изучения превращения элементов, хотя мы уже видели, что в случае более тяжелых элементов чрезвычайно эффективны медленные нейтроны. В некоторых случаях, однако, можно вызвать превращение элементов, применяя γ -излучение высокой квантовой энергии. Чадвику и Голдхаберу недавно удалось с помощью γ -лучей расщепить дейтерий ${}_1\text{D}^2$ на протон и нейтрон. В этом случае энергия кванта излучения должна быть больше энергии связи протона и нейтрона, составляющей около 2,3 млн. в. Подобным же образом Сцилард нашел, что бериллий с массой 9 распадается на Be^8 и нейтрон при облучении γ -лучами с энергией немногим больше 1 млн. в. Этот новый метод превращения может оказаться

эффективным и в других случаях, если только нам удастся получить достаточно интенсивные источники γ -лучей высокой квантовой энергии.

Общие выводы

За последние несколько лет прогресс наших знаний в области превращения элементов происходил очень быстро; было показано, что почти все элементы с помощью соответствующих воздействий могут быть подвергнуты превращению. Интересно отметить, что существуют достаточно убедительные доказательства возможности получения изотопа золота путем бомбардировки платины быстрыми нейтронами. Однако еще не ясно, какой именно изотоп платины принимает участие в превращении. В процессе этой работы было открыто более 50 новых радиоактивных веществ. Они представляют собой неустойчивые изотопы элементов, вероятно когда-нибудь существовавшие на Солнце, но исчезнувшие при остывании Земли. Возможно, что из всей большой группы радиоактивных элементов только уран и торий сохранились потому, что их периоды полураспада велики по сравнению с возрастом Земли. Хотя предстоит еще много работы, чтобы выяснить во всех деталях природу многих превращений, но уже сейчас накоплено достаточно данных, указывающих, что посредством бомбардировки находящимися в нашем распоряжении быстрыми частицами можно осуществить большое количество самых разнообразных превращений. Для элементов, имеющих много изотопов, число возможных превращений должно быть очень велико. Вообще установлено, что имеют место все мыслимые превращения элементов, совместимые с сохранением ядерного заряда, а также с законом сохранения энергии, если принимаются в расчет изменения массы. Однако частота различных типов превращения элементов может меняться в широких пределах. При большинстве превращений неустойчивое ядро расщепляется на две частицы, испуская при этом γ -лучи; известны, однако, случаи превращения более легких элементов, когда взрывающееся ядро распадается на три частицы. В процессе этой работы было открыто несколько новых, устойчивых изотопов, в частности H^3 , He^3 , Be^8 , Be^{10} , ранее в природе не наблюдавшиеся. Кроме того, как мы уже видели, был обнаружен ряд новых элементарных частиц, в том числе нейтрон, протон, α -частица и положительный электрон.

Превращения элементов происходят обычно в ничтожных масштабах, и лишь изредка количество образующегося при превращении вещества может быть взвешено или видимо. Однако наши методы обнаружения и распознавания образующихся при превращении движущихся частиц так необычайно чувствительны, что даже самое ничтожное по своим масштабам превращение вызывает весьма значительный эффект в наших измерительных приборах. Достоверность наших методов обнаружения и анализа быстрых частиц во многих случаях выше, чем достоверность обычных химических методов, даже если предположить, что количество превращенного вещества было бы достаточно велико для химического анализа.

Вообще говоря, количество вещества, образующегося при превращении путем бомбардировки толстого слоя элемента, быстро растет с увеличением энергии бомбардирующих частиц. В некоторых случаях заметного превращения не наблюдается до тех пор, пока энергия частицы не достигнет определенной величины, а затем масштабы превращения начинают быстро возрастать при повышении энергии частиц, сверх этого уровня. В случае таких легких элементов, как, например, дейтерий и литий, превращение становится заметным, когда бомбардирующие частицы обладают энергией 20000 эв или даже меньше. Но в большинстве случаев необходимая для совершения заметного превращения энергия бомбардирующих частиц должна быть выше этого значения и с повышением атомного номера бомбардируемого элемента быстро растет.

Мы видели, что эти соображения неприменимы к нейтронам, так как во многих случаях масштабы превращения бывают наибольшими, когда нейтроны обладают небольшой энергией (порядка долей вольта), сравнимой с энергией теплового движения молекул. Имеются основания полагать, что каждый медленный нейтрон, проходящий, например, через бор, вызывает в конечном счете превращение ядра бора. Представляется также вероятным, что самостоятельное существование нейтрона в нашей атмосфере должно быть очень непродолжительным, так как он скоро будет захвачен ядрами азота и кислорода и при этом произведет превращение этих элементов. Поэтому мы не должны ожидать сколько-нибудь заметного накопления нейтронов в нашей атмосфере на протяжении веков.

Мы уже говорили о выделении больших количеств энергии при спонтанном превращении атомов природных радиоактивных веществ. В некоторых случаях искусственного превращения с помощью протонов и дейтронов количество излучаемой энергии, приходящейся на один атом, даже больше, чем в случае радиоактивных превращений. Например, энергия, освобождающаяся при превращении одного атома лития шестью дейтронами, составляет 22,5 млн. эв, т. е. почти вдвое больше энергии, излучаемой при распаде любого радиоактивного атома. Поскольку превращение может быть произведено дейтроном, обладающим энергией всего в 20 000 эв, то ясно, что в этом индивидуальном процессе получается большой выигрыш энергии. Но, с другой стороны, лишь один из 108 дейтронов оказывается эффективным, так что в конечном счете затрачивается гораздо больше энергии, чем ее излучается при превращении. Даже если учесть, что общий коэффициент полезного действия процесса растет с увеличением энергии бомбардирующих частиц, остается мало надежды на получение таким путем полезной энергии из атомов. Исключительная эффективность медленных нейтронов, вызывающих превращение отдельных элементов с выделением больших количеств энергии, на первый взгляд кажется в этом отношении многообещающей. Однако нельзя упускать из виду то обстоятельство, что сами нейтроны могут быть получены лишь в результате чрезвычайно невыгодного процесса превращения. Перспективы получения полезной

энергии из атомов посредством искусственного превращения, таким образом, не выглядят обещающими.

Атомное ядро представляет собой целый мир, где в ничтожно малом объеме заключен ряд частиц, в частности протонов и нейтронов, удерживаемых вместе чрезвычайно мощными неизвестными силами. В настоящее время делаются энергичные попытки приспособить существующие идеи к объяснению структуры атомного ядра, и в нескольких простых случаях уже достигнуты некоторые успехи. Однако мы все еще далеки от понимания структуры сложного ядра и причин, вызывающих его распад при определенных условиях. В то время как волновая механика оказалась адекватной для объяснения внешней электронной структуры атома, где электроны достаточно удалены друг от друга, эта теория не может быть с уверенностью применима к сложному ядру, где имеет место такая исключительная концентрация массивных частиц в очень небольшом пространстве. Чтобы преодолеть эти трудности, Бор предложил более общий способ подхода к проблеме, при котором ядро рассматривается как агрегат из неразличимых частиц, способный колебаться как целое и обладающий строго определенными энергетическими уровнями. В пользу этой новой точки зрения имеется много соображений, и ее перспективы на будущее кажутся более обнадеживающими. Большое количество накопленных к настоящему времени экспериментальных данных о превращении элементов должно оказаться весьма полезным подспорьем при разрешении этой наиболее трудной и фундаментальной проблемы.

Приобретенные нами сведения о превращении элементов могут оказать большую помощь еще и в другом направлении. Очевидно, что внутри раскаленной звезды, подобной нашему Солнцу, где температура очень высока, протоны, нейтроны и другие легкие частицы должны иметь скорости теплового движения, достаточно большие для того, чтобы производить превращения элементов на Солнце. В условиях такой непрерывной бомбардировки должен происходить постоянный процесс построения новых атомов и расщепления других и через короткое время должно быть достигнуто состояние равновесия, во всяком случае временного. Из наших сведений об относительном преобладании элементов на Земле можно составить себе довольно верное представление также и о том, каков был средний состав Солнца 3000 млн. лет назад, когда Земля отделилась от Солнца. Когда наши знания в области превращений элементов продвинулись еще дальше, мы сможем установить, чем объясняется относительное преобладание некоторых элементов на нашей Земле и почему элементы с четными атомными номерами встречаются в среднем значительно чаще, чем с нечетными. Таким образом, прогресс современной алхимии значительно расширит наши познания не только о самих элементах, но и об их относительном преобладании в нашей Вселенной.

The Newer Alchemy, Cambridge, 1937