

СОВРЕМЕННАЯ АЛХИМИЯ ¹⁾*Лорд Резерфорд*

В этой лекции я намерен вкратце изложить современные исследования в области превращения элементов. Заглавие имеет целью 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 материи возникла еще в начале нашей эры. Поиски философского камня, с помощью которого можно было бы превращать одни элементы в другие и в особенности извлекать золото и серебро из обычных металлов, неустанно продолжались на протяжении всего средневековья. Распространение этой идеи на протяжении ряда столетий было 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 материи могут быть изменены. Проникнутым этими воззрениями алхимикам казалось очевидным, что одно вещество может быть превращено в другое, если только будет найден 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 один за другим люди, утверждающие, что открыли великую тайну превращения металлов в золото, но мы имеем все основания полагать, что ни одной крупинки золота таким путем никогда не было получено. С точки зрения нынешнего уровня наших знаний ясно, что превращение элементов было безнадежной затеей при тех чрезвычайно ограниченных возможностях, какими располагали экспериментаторы того времени. По мере развития экспериментальной техники и непрерывного роста знаний в области химии, идея о превращении элементов постепенно отбрасывалась и теряла свое влияние на прогресс

¹⁾ По материалам лекции памяти Генри Сиджвика, прочитанной в ноябре 1936 г. в Гьюнхемском колледже (Кембридж).

науки. Однако в умах широкой публики старинные алхимические идеи 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 настолько убедительно пользуются научным жаргоном, что по временам тревожат сон самых трезвых финансистов. Мы увидим далее, что в настоящее время с помощью современных методов можно искусственно произвести чрезвычайно ничтожные количества золота, но и то лишь путем превращения еще более дорогостоящего элемента, а именно — платины.

С ростом знаний в области химии старые идеи о превращении элементов теряли под собой почву. Было установлено, что материя может быть разложена на 80 или большее число элементов, атомы которых оказались неизменными и неразрушимыми. Обычные физические и химические агенты, находившиеся тогда в нашем распоряжении, оказались 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 весьма медленным темпом. Этот вывод вытекал из открытия радиоактивных свойств у двух вышеупомянутых тяжелых элементов, которые самопроизвольно испускают несколько типов проникающего излучения, вызывающего почернение фотографической пластинки и разряд наэлектризованных тел. Эти радиоактивные свойства являются 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 тыс. км в 1 сек. β -частица — это лишь другое название легкой отрицательно заряженной частицы — электрона; она обычно испускается со скоростью во много раз большей. Иногда процесс превращения сопровождается проникающим излучением типа рентгеновских лучей, известным под названием γ -лучей.

Радиоактивные превращения

Если мы возьмем 1 г элемента урана, то в 1 сек. в нем распадается около 24 тыс. атомов, каждый из которых выбрасывает α -частицу. Однако число атомов в 1 г настолько велико, что потребовалось бы около 4500 млн. лет, чтобы половина всех атомов подверглась преобразованию. 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 ряде его превращений,

Активность радиоактивного вещества, измеряемая интенсивностью испускаемого им излучения, с течением времени падает 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 является универсальным 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 законам случайных событий.

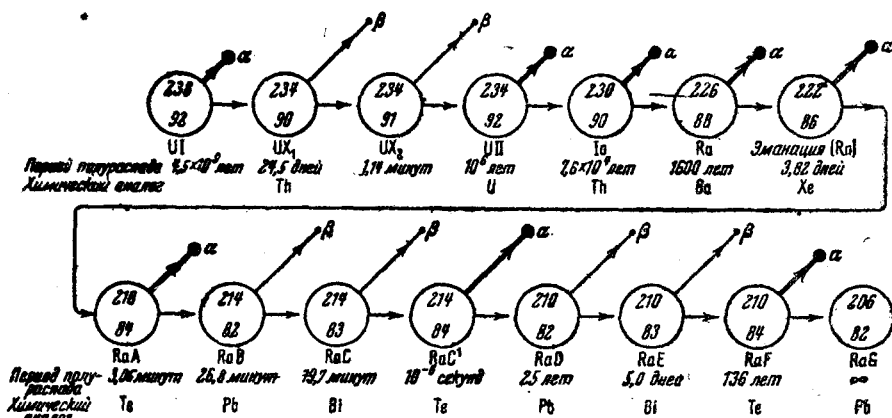


Рис. 1. Ряд превращений урана. Верхняя цифра в каждом кружке означает атомный вес, нижняя — порядковый номер элемента и заряд ядра. Длина жирной стрелы показывает относительную длину пробега α-частиц.

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 твердо установлена эта последовательность изменений, заняло бы слишком много времени;

однако необходимо обратить внимание на исключительную простоту соотношений, связывающих между собой все члены ряда превращений.

Мы знаем теперь, что химические свойства элемента определяются его порядковым номером, который вместе с тем указывает число естественных единиц заряда в ядре атомов элемента. Так как 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.

Освобождающаяся при превращении α - или β -частица вылетает непосредственно из ядра атома. Таким образом выбрасывание α -частицы, несущей 2 положительных единицы заряда и обладающей массой 4, понижает атомный номер ядра на 2 единицы и его массу на 4 единицы. С другой стороны, при испускании β -частицы, несущей единичный отрицательный заряд, общий заряд ядра на единицу увеличивается. 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, достаточны для удовлетворительного объяснения атомных номеров и масс всех элементов в длинной цепи превращений. В настоящее время 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 ядра, 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 преобладающим является изотоп с атомным весом 206. Конечный продукт ряда урана, обычно называемый урановым свинцом, является, таким образом, одним из изотопов обычного свинца (изотоп 206). Свинец, выделенный из старого уранового минерала, состоит, главным образом, из этого изотопа свинца. Отметим также, что в ряде урана встречаются 2 радиоактивных изотопа свинца с атомным номером 82, а именно: радий В с атомным весом 214 и радий D с атомным весом 210.

Необходимо упомянуть, что подобная же длинная последовательность превращений обнаружена у элементов тория и актиния. Конечным продуктом ряда тория является опять-таки изотоп свинца, но с атомным весом 208, а не 206, как для уранового свинца.

Свинец, извлеченный из чистого 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. Замечательно, что конечным продуктом всех трех рядов превращений являются три различных изотопа свинца. 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 в 3,8 дня. Интенсивная радиоактивность этого газа может быть продемонстрирована простым опытом. Ничтожное количество этого газа, объемом менее $\frac{1}{10}$ мм³, при нормальном давлении, впускается в эвакуированный стеклянный сосуд, стенки которого изнутри покрыты слоем фосфоресцирующего сернистого цинка. В ту же секунду 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 наиболее сильно действующих взрывчатых веществ. 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 излучаться 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 по истечении 1600 лет.

α -частицы при прохождении сквозь материю 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 распадающегося вещества, 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 того, как эманация поме-

щена в запаянную трубочку, между emanацией и ее четырьмя недолговечными продуктами распада устанавливается своего рода равновесие, когда активность продуктов распада определяется распадом emanации. Через 1—2 мес. практически вся emanация превращается в радий D. Период полураспада последнего (25 лет) настолько велик по сравнению с периодами продуктов его разложения—радия E и радия F, что окончательный распад этих продуктов определяется периодом полураспада радия D.

Представим себе, что нам удалось получить значительное количество, скажем килограмм, emanации радия и поместить его в бомбу из жароупорного материала. По истечении, примерно, 2 час. количество выделяемого в единицу времени тепла будет соответствовать мощности 20 тыс. kW, и если не предусмотреть весьма эффективного охлаждения, бомба расплавится. Этот тепловой эффект будет ослабевать таким же темпом, каким идет распад emanации, и сократится наполовину по истечении 3,8 дней. По истечении около 2 мес. большая часть emanации исчезнет, и бомба окажется наполненной газом гелием, получившимся из α -частиц, с объемом в 3 раза большим первоначального объема emanации, в то время 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 — 3 — 4 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 мы и можем предсказать с достоверностью последствия изложенного эксперимента, мы лишены всякой возможности осуществить его на практике, ибо, для того чтобы получить 1 кг emanации, потребовалось бы около 200 т радия, в то время как все количество добытого до сих пор радия составляет, вероятно, менее 1 кг. Однако мы можем быть благодарными этому обстоятельству, так как при проведении эксперимента такого масштаба исходящее из бомбы интенсивное излучение энергии в форме проникающих γ -лучей, эквивалентное мощности в 1000 kW, безусловно, оказалось бы опасным для здоровья находящихся поблизости людей.

Тем не менее, я полагаю, что такой воображаемый эксперимент может вам получить представление о гигантских размерах излучения энергии при радиоактивных изменениях, а также о поразительной природе трансформаций, в результате которых emanация в конце концов превращается в гелий и урановый свинец. Эти радиоактивные превращения являются спонтанными и не поддаются внешним воздействиям. Ни сильный жар, ни чрезвычайный холод, ни в ма-

лейшей степени не влияют на этот естественный процесс. Мы можем только наблюдать и изучать эти удивительные превращения, не будучи в состоянии каким бы то ни было путем повлиять на них.

Радиоактивные свойства проявляются заметным образом у двух наиболее тяжелых элементов—урана и тория, и лишь в очень слабой степени у немногих других элементов. Большинство элементов обычно не обнаруживает никаких признаков радиоактивности, так что мы можем с полным правом заключить, что атомы этих элементов в обычных на нашей земле условиях являются неизменно устойчивыми. 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. Этими познаниями мы обязаны интенсивным исследованиям, длившимся в течение ряда лет, и развитию новых, мощных методов атаки этой наиболее фундаментальной проблемы 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 превращений обычных элементов было обнаружено существование еще нескольких типов элементарных частиц, освобождающихся при взрывах атомных ядер. Наиболее важными из этих вновь открытых частиц являются протон, нейтрон, дейтерон (или дейтон) и положительный электрон. Протоном называется ядро водорода с зарядом 1 и массой 1,0076. Нейтрон представляет собой незаряженную частицу с массой несколько больше протона, а именно 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 электрона и, наоборот, протон может быть превращен в нейтрон путем прибавления 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 очень тесную комбинацию протона и электрона, хотя до настоящего времени объяснение разницы в массах этих частиц наталкивается на известные трудности.

α -частица представляет собой ядро гелия с зарядом 2 и массой 4,0029. Недавно сделанное Юреем открытие, 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 водородный атом 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 электрон и становятся положительно заряженными ионами. Эти ионы называются „дейтеронами“ (или дейтонами), в то время как ионы обычного водорода, как мы видели, называются „протонами“. Для этих двух ионов желательно иметь различные названия, так как они часто применяются в качестве быстрых частиц для бомбардировки материи. Мы увидим далее, что быстрые протоны и дейтоны, наряду с α -частицами и нейтронами, оказались чрезвычайно эффективными агентами для превращения многих элементов. Существуют непосредственные экспериментальные доказательства того, что дейтон, как этого и можно было ожидать, представляет собой тесную комбинацию протона с нейтроном.

При некоторых превращениях появляется также положительный электрон — антипод отрицательного электрона малой массы. Эта неуловимая частица впервые была открыта Андерсоном несколько лет назад при экспериментах с космическими лучами. Мы можем теперь в лабораториях получать положительные электроны в небольших количествах, пропуская через вещество γ -лучи с высокой квантовой энергией. 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, а именно: ${}^3\text{H}$ и ${}^3\text{He}$. Оба эти изотопа, повидимому, устойчивы, но ни один из них до сих пор не удалось обнаружить в обычных веществах. Первоначально предполагалось, что ${}^3\text{H}$ присутствует в препаратах тяжелой воды, но последующие наблюдения этого не подтвердили.

Методы обнаружения быстрых частиц

Мы видели, что все виды излучения радиоактивных веществ обладают характерным свойством 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 обычно изучалось и сравнивалось с по-

мощью такого электрического метода, причем измерительным прибором служил электроскоп или электрометр. Этот электрический метод является очень удобным средством для обнаружения ничтожных количеств радиоактивного вещества и еще поныне широко применяется в тех случаях, когда можно ожидать легко измеримого эффекта.

Имевший место за последние годы быстрый прогресс наших знаний о превращениях элементов, в значительной мере был обусловлен открытием тонких методов обнаружения и подсчета индивидуальных 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.

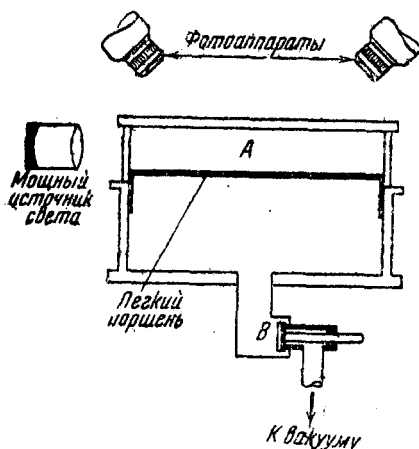


Рис. 2. Камера Вильсона. Легкий поршень внезапно опускается посредством понижения давления под ним. Газ *A* в пространстве над поршнем расширяется, охлаждаясь при этом настолько, что содержащийся в нем пар становится пересыщенным. Этот пар конденсируется в виде маленьких капелек на присутствующих в газе заряженных частицах (ионах). Камера освещается через стеклянную стенку, и образующиеся капли фотографируются в рассеянном им свете, попадающем в расположенные сверху два фотоаппарата.

A — пространство, содержащее газ, насыщенный водяным паром
B — давление в этом пространстве внезапно понижается посредством открытия клапана.

Метод расширения (камера Вильсона)

Самый замечательный из этих методов был изобретен проф. Ч. Т. Р. Вильсоном. Он основан на том наблюдении, что образующиеся при движении быстрой частицы ионы могут при определенных условиях 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 тыс. 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 путей частиц в пространстве.

Аппарат, применяемый для этой цели, называется камерой Вильсона. Типичная схема такой камеры, вместе с пояснением принципа действия, приведена на рис. 2. Камера имеет цилиндрическую форму: пространство *A* насыщено водяными парами. Пред-

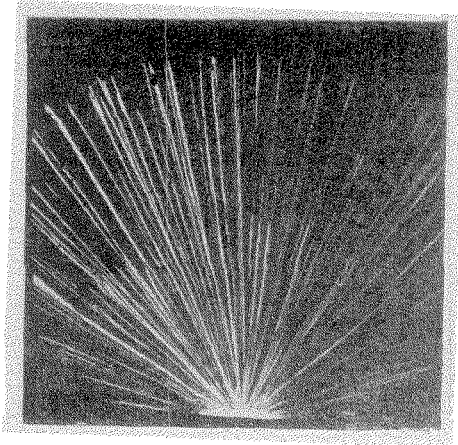


Рис. 3. Следы α -частиц, испускаемых торием (С + С'), разделяющиеся на две группы с пробегами 8,6 см и 4,8 см в воздухе.

(Фотография проф. Дж. Чадвика).

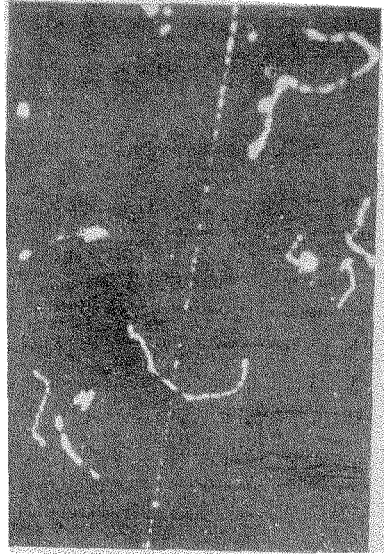


Рис. 4. Следы фотоэлектронов с пробегом около 1 см, образованных при абсорбции характеристического К-излучения серебра в воздухе (энергия около 21 000 V). Прямолинейный след принадлежит электрону с гораздо большей энергией и, вероятно, вызван космическими лучами.

(Фотография проф. Ч. Т. Р. Вильсона).

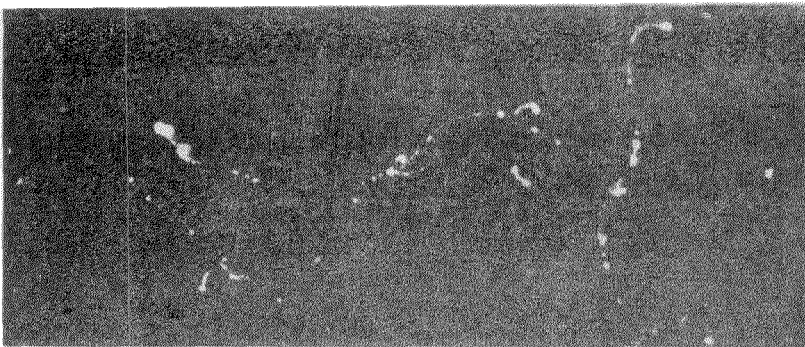


Рис. 5. След фотоэлектрона, образованного при поглощении кванта рентгеновых лучей с энергией $\sim 40\,000$ V. В своем начальном прямолинейном участке след испытывает резкое отклонение в результате тесного сближения электрона с атомным ядром. На снимке отчетливо заметна возрастающая плотность ионизации и искривление пути вследствие столкновений по мере уменьшения скорости частицы к концу следа.

(Фотография проф. Ч. Т. Р. Вильсона)



положим, например, что через газ в момент расширения проходит α -частица. Тогда, если степень расширения подобрана подходящим образом, то каждый ион, образующийся на пути α -частицы, становится центром конденсации, и тем самым путь частицы оказывается отчетливо заметным. Фотография следов α -частиц, полученная описанным способом, приведена на рис. 3. Источником α -частиц в данном случае была небольшая металлическая пластинка, активированная путем облучения эманацией тория и помещенная в камеру расширения. Поверхность пластинки покрыта невидимой пленкой активного вещества, содержащего два источника γ -лучей — торий С и торий С'. Все α -частицы, испускаемые торием С', имеют одинаковую скорость и длину пробега в воздухе, равную 8,6 см. Следы α -частиц из тория С с более коротким пробегом (4,8 см) видны на фотографии попеременно с преобладающими следами более быстрых α -частиц,

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. β -частица при своем прохождении через газ дает след, обнаруживающий некоторые характерные отличия от следа более массивной α -частицы. Во-первых, след β -частицы гораздо менее плотен вследствие значительно меньшей ионизации, производимой β -частицей на единице пути. Это ясно видно на фотографии путей β -частиц, приведенной на рис. 4. Прямолинейный путь быстрой β -частицы намечен вереницей капель, настолько далеко отставших друг от друга, что их число почти можно сосчитать. Во-вторых, легкая β -частица вследствие 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 является результатом увеличения производимой β -частицей ионизации при понижении ее скорости.

Фотография пути β -частицы, приведенная на рис. 5, интересна тем, что показывает ряд приключений, 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 представляют собой пути вторичных электронов, вылетающих из атомов в результате соударений с быстрой β -частицей.

Скорость и энергия пролетающей β -частицы могут быть непосредственно определены путем измерения 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 кряду. 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 (ИОНИЗАЦИОННАЯ КАМЕРА И СЧЕТЧИК *ГЕЙГЕРА)

В ряде экспериментов важно иметь возможность сосчитать количество быстрых частиц, попадающих в камеру прибора за данный промежуток времени. Это проще всего может быть достигнуто с помощью электрического метода подсчета (ионизационной камеры). Принцип метода пояснен на рис. 6. Предположим, например, что нужно сосчитать α -частицы. Они направляются в камеру через тонкую металлическую фольгу *A* и останавливаются, наталкиваясь на параллельную ей изолированную пластинку *B*. К электродам приложено достаточное напряжение для того, чтобы переносить к ним ионы, образующиеся между пластинками, отстоящими друг от друга обычно на расстоянии 3—5 мм. Каждое попадание α -частицы в камеру вызывает небольшое увеличение потенциала пластинки *B*, которое автоматически повышается более чем в 100 млн. раз серией специально приспособленных для этой цели усилителей.

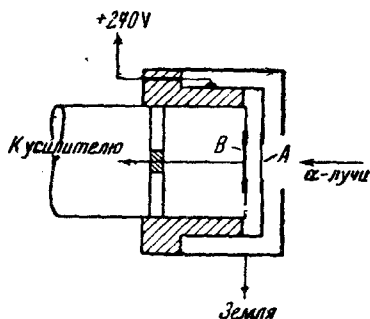


Рис. 6. Счетчик с одной камерой.

Мгновенное повышение потенциала на выходе достаточно велико— порядка 100 V, — чтобы вызвать отклонение рассчитанного на большие мощности осциллографа, имеющего очень малый собственный период колебаний. 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 полоса — естественное движение ленты осциллографа при отсутствии попаданий α -частиц в камеру. С помощью быстро движущейся фотографической ленты могут быть зарегистрированы отдельные частицы даже если в минуту влетает в камеру 1000 частиц. Аналогичным путем могут быть сосчитаны также быстрые протоны в дейтоны. Однако вследствие того, что обе эти частицы несут единичный заряд, в то время как заряд α -частицы равен 2, ионизация, производимая α -частицей, приблизительно в 4 раза больше ионизации, вызванной протоном или дейтоном, обладающими той же скоростью. Поэтому попадающий в камеру протон дает отклонение приблизительно в 4 раза меньше, чем α -частица равной скорости. Полученная таким путем регистрация протонов также показана на рис. 7. Разница в величине отбросов позволяет

судить о том, насет ли частица ординарный или двойной заряд, и при известных условиях можно легко различить записи протонов и α -частиц.

Описанный метод электрического счета частиц не применим к быстрым β -частицам, так как в этом случае ионизация слишком мала, чтобы дать измеримое отклонение. Однако Гейгером был изобретен другой простой и чувствительный способ подсчета β -частиц, вошедшей 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 β -частица проходит через газ при таких условиях, то производимая ею ионизация во много раз усиливается благодаря хорошо известному процессу ионизации толчком, 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 замечательно эффективным средством подсчета быстрых положительных и отрицательных электронов, попадающих в цилиндр через стенки.

Так как γ -лучи, проходя через стенки цилиндра и наполненное газом пространство, порождают β -лучи, то счетчик Гейгера может служить также чувствительным средством для обнаружения γ -лучей.

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 подсчета α -и β -частиц. Обычно для этой цели камера счетчика наполняется водородом, гелием или воздухом. В общем случае не более, чем один нейтрон из 5 тыс., попадающих в счетчик, производит измеримый отброс в осциллографе. Регистрация нейтронных частиц отдачи в гелии приведена на рис. 7.

Мы увидим дальше, что для подсчета очень медленных нейтронов разработан ряд эффективных методов, основанных на способ-

ности таких нейтронов производить превращения некоторых элементов, в частности лития и бора.

ПРЕВРАЩЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПОСРЕДСТВОМ α -ЧАСТИЦ

После того как ряды естественных превращений урана и тория были изучены, можно было надеяться, что когда-нибудь нам удастся найти методы разрушения устойчивых атомов некоторых обыкновенных элементов. Для того чтобы приступить к штурму этой проблемы с какими-то шансами на успех, необходимо было получить некоторое представление о строении атомов 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 единице 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 Мозели, 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 вместе. Между тем, атомное ядро сдерживается чрезвычайно мощными силами, и поэтому с самого начала было ясно, что для расщепления ядра необходимо воздействовать на него весьма концентрированными источниками энергии. 20 лет назад из всех известных науке 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 явились результатом изучения рассеяния α -частиц под большими углами при их прохождении через вещество. Рассмотрим, например, путь α -частицы, проходящей в непосредственной близости к ядру 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 отталкива-

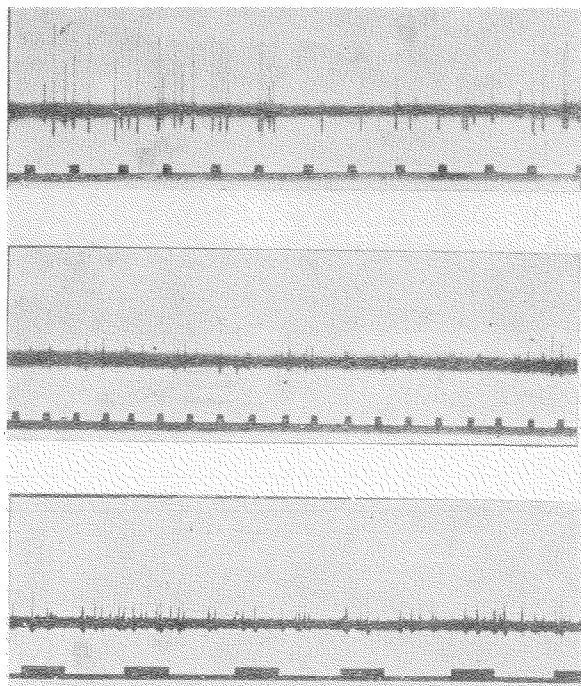


Рис. 7. Регистрация ионизирующих частиц на ленте осциллографа. Две верхние фотографии были получены в идентичных условиях и разница в размерах отбросов объясняется различной ионизирующей способностью α -частиц и протонов. Нижняя фотография показывает отклонения, произведенные атомами отдачи гелия, которые были приведены в движение ударами нейтронов с энергией в 2 млн. V. Отмеченные интервалы времени — секунды.

a — α -частица, *b* — протон.

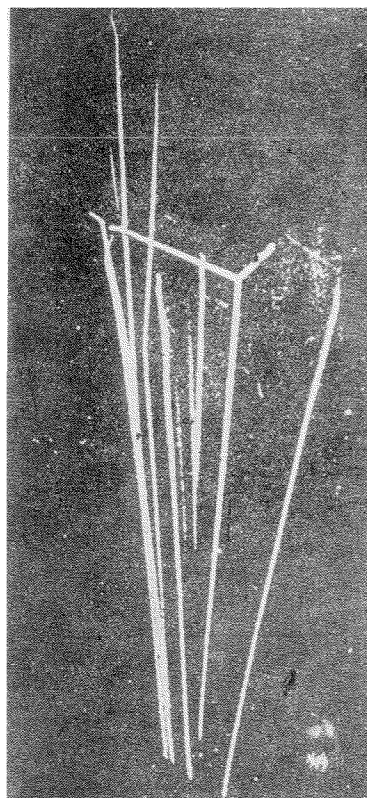


Рис. 9. Следы α -частиц в кислороде. Один след на конце раздваивается в результате столкновения с ядром кислорода, причем короткая ветвь принадлежит отброшенному ядру кислорода, а более длинная — отклонившейся α -частице. Измерения углов отклонения двух ветвей показали, что количество движения и энергия при данном столкновении сохраняются.

(Фотография проф. П. М. С. Блекетта)

ния, сильно возрастающие вблизи ядра. Поэтому α -частица описывает криволинейный путь около ядра, и если силы взаимодействия подчиняются закону Кулона, то этот путь имеет вид гиперболы, асимптоты которой совпадают с направлениями приближения и удаления α -частицы. α -частица может претерпеть значительное отклонение в результате одного столкновения с ядром. Орбиты α -частиц, пролетающих на различном расстоянии от центра ядра, изображены на рис. 8, где относительные размеры тяжелого ядра показаны черным кружком. α -частица, летящая прямо к центру ядра, на некотором расстоянии от него поворачивает назад; это минимальное расстояние, 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, рассеиваемых под различными углами при прохождении через вещество, дало результаты, полностью согласующиеся с вычислениями, основанными на этих предположениях.

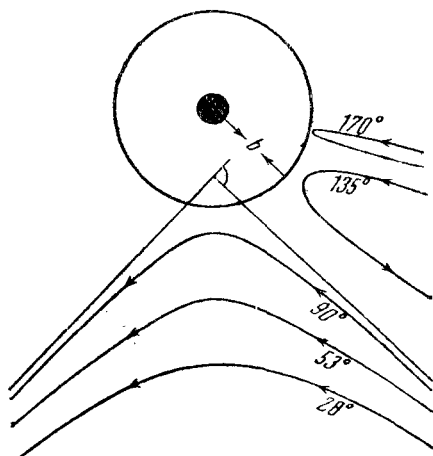
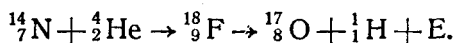


Рис. 8. Орбиты α -частиц, пролетающих вблизи тяжелого ядра.

Доля α -частиц, рассеянных под данным углом, зависит от квадрата заряда ядра и быстро возрастает при понижении скорости α -частицы. Нужно иметь в виду, что площадь мишени, которую представляет собой ядро, настолько мала, что α -частица редко проходит достаточно близко к ядру, чтобы претерпеть значительное отклонение. 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, как крошечные идеальноупругие бильiardные шары. Никакое превращение элементов здесь не имеет места. Ясно, однако, что в случае „лобового“ соударения быстрой α -частицы с легким ядром, несущим небольшой заряд, отталкивающие силы будут относительно малы и могут позволить α -частице подойти очень близко к ядру и, 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. Прodelывая этот опыт, я в 1919 г. получил экспериментальные доказательства того, что небольшое число атомов азота при бомбардировке распалось, испустив быстрые водородные ядра, 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 с массой 18 и зарядом 9. Это ядро, которое в природе не существует, является чрезвычайно неустойчивым 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 перед каждым символом обозначают массу и заряд ядра данного элемента. Как видно из уравнения, общий заряд ядер при превращении сохраняется так же, 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 кислородного ядра за вычетом первоначальной энергии α -частицы.



Превращение происходит в ничтожных масштабах, ибо всего лишь одна α -частица из 50 тыс. приближается к ядру достаточно близко, чтобы быть им захваченной. Фотографируя следы нескольких сотен тысяч α -частиц в наполненной азотом камере Вильсона, Блекетт установил 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 всех случаях освобождается быстрый протон. В течение последних нескольких лет механизм этих превращений подвергался тщательному изучению, которое принесло ряд важных результатов. Оказалось, что испускаемые протоны состоят из двух или большего числа групп, каждая из которых обладает определенной скоростью. Различная энергия протонов этих групп является, повидимому, результатом излучения энергии из взрывающихся ядер в форме γ лучей. Имеются также явные доказательства наличия в ядре определенных уровней энергии или „резонансных“ уровней, что приводит к избирательному захватыванию α -частиц определенной скорости.

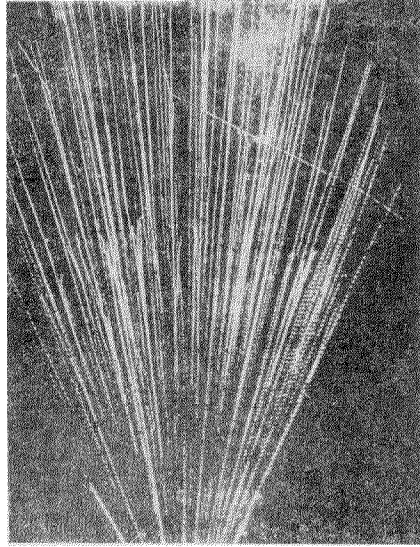
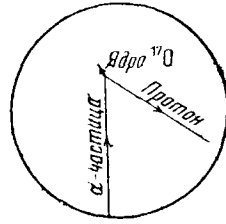
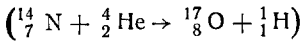


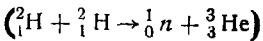
Рис. 10. Расщепление азота α -частицами. Из большого числа проходящих через азот α -частиц одна частица осуществила превращение ядра азота в ядро ^{17}O с испусканием обладающего большой энергией протона



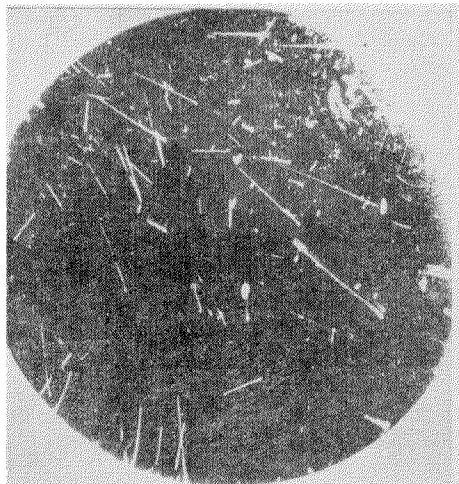
(Фотография проф. П. М. С. Блекетта).

S

Рис. 11. Следы протонов отдачи, возникающие при обстреле метана нейтронами с энергией в 2,4 млн. V. Источник нейтронов помещался в S, где мишень из тяжелого водорода бомбардировалась ускоренными дейтонами



Фотография П. И. Ди и Ч. В. Джильберта)



ОТКРЫТИЕ НЕЙТРОНА

Мы уже видели, что протон появляется как продукт превращения ряда легких элементов при бомбардировке их 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 нашел, 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, Чаувиц 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, повидимому, в следующем: время от времени α -частица захватывается ядром бериллия с массой 9, на мгновение образуя ядро ^{13}C с большим избытком энергии. Это ядро немедленно распадается на устойчивое ядро и нейтрон, причем избыточная энергия реакции выделяется в форме кинетической энергии двух частиц — конечных продуктов реакции. Весьма удобный и стойкий источник нейтронов можно получить, смешав около 100 мг чистой радиевой соли с порошком бериллия в запаянной трубочке. В результате бомбардировки бериллия α -частицами получается в 1 сек. 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 таким же темпом, как и распад эманации.

Мысль о возможности существования нейтронов, как составных частей атомного ядра, обсуждались еще задолго до их экспериментального открытия. Может быть, небезынтересно будет процитировать заявление, сделанное автором по этому вопросу на беккеровской лекции, прочитанной в Британском королевском обществе в 1920 г.:

„Если наше предположение верно, то кажется весьма правдоподобным, что один электрон в состоянии связать также два ядра H, а может быть и одно ядро H. Первое предположение влечет за собой возможность существования атома с массой, примерно равной 2, несущего единичный заряд. Такой атом нужно рассматривать как изотоп водорода. В другом случае предполагается возможность существования атома с массой 1 и нулевым зарядом ядра. Такого рода атомная структура отнюдь не представляется невозможной. По современным воззрениям нейтральный

атом водорода рассматривается как ядро с единичным зарядом, к которому присоединен на некотором расстоянии 1 электрон, и спектр водорода объясняется движениями этого удаленного электрона. Однако при определенных условиях не исключена возможность более тесного сочетания электрона с ядром H и о разности своего рода нейтрального дублета. Такой атом обладал бы весьма своеобразными свойствами. Его внешнее поле было бы практически равно нулю повсюду, за исключением области, непосредственно прилегающей к ядру, благодаря чему он мог бы свободно проходить через материю. 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 соединиться с ядром, либо распасться в его интенсивном поле, результатом чего будет, вероятно, испускание атома H или электрона или же обоих сразу“.

Вначале предполагалось, что нейтроны могут быть получены при пропускании электрического разряда через водород. Поставленные в этом направлении эксперименты дали отрицательный результат. Теперь представляется очевидным, что с помощью напряжений обычного порядка 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 смог бы предвидеть тех условий, при которых эта замечательная частица была в конце концов открыта.

Мы видели, что присутствие нейтрона может быть обнаружено в том случае, если он на своем пути испытывает упругое столкновение с ядром. Если, например, нейтрон проходит через водород, то иногда происходит лобовое соударение нейтрона с H-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. На рис. 11 приведена фотография нейтронных частиц отдачи в метане, полученная Ди и Гильбертом с помощью камеры Вильсона. При пропускании потока быстрых нейтронов через водород или водородосодержащее вещество, 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 значительным 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 лишь в долю миллиметра поглощает практически все медлен-

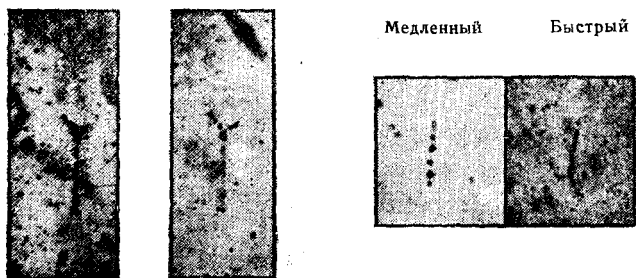
ные нейтроны. Такое сильное поглощение медленных нейтронов некоторыми элементами, несомненно, является следствием захватывания их ядрами элементов, в результате чего последние претерпевают превращение. Иногда захват нейтрона ядром придает ядру такую неустойчивость, что оно распадается на части. В других случаях этот захват может превратить один изотоп элемента в другой, с массой на единицу больше, либо образовать неустойчивый или радиоактивный изотоп, распадающийся с испусканием положительного или отрицательного электрона.

Как показали Фезер, Гаркинс, а также Ферми, со своими со-грудниками, нейтроны, и в особенности медленные, являются чрезвычайно эффективным средством превращения элементов. Благодаря отсутствию заряда медленные нейтроны могут свободно проникать в тяжелые ядра, в то время как заряженной частице необходима большая энергия движения для того, чтобы вплотную приблизиться к тяжелому ядру атома вопреки действию отталкивающих сил его электрического поля. Действенность нейтрона как средства превращения атомов я проиллюстрирую на примере легких элементов лития и бора. Тэйлор и Гольдгабер недавно разработали фотографический метод изучения нейтронных превращений некоторых элементов. Специальная фотографическая пластинка пропитывается раствором соединения, содержащего литий или бор, и облучается в течение нескольких дней источником медленных нейтронов. После проявления пластинки следы быстрых частиц можно отчетливо рассмотреть в мощный микроскоп. В случае облучения лития, его изотоп с массой 6 захватывает нейтрон и затем расщепляется на α -частицу (${}^4\text{He}$) и изотоп водорода с массой 3 (${}^3\text{H}$). Применяя мощный микроскоп, можно отчетливо видеть на пластинке комбинированные следы этих двух частиц, выбрасываемых в противоположных направлениях. Для бора наблюдаются два типа превращения. В одном случае изотоп бора с массой 10 захватывает нейтрон и затем распадается на ядро лития с массой 7 и α -частицу (${}^4\text{He}$); в другом случае неустойчивое ядро расщепляется на две α -частицы и ядро ${}^3\text{H}$. Фотографии следов, полученные таким способом, приведены на рис. 12. На фотографиях ясно видны три следа, расходящиеся из одной точки, причем самый длинный из них принадлежит ядру ${}^3\text{H}$ с единичным зарядом. Эти хорошо заметные превращения лития и бора медленными нейтронами оказались весьма полезными как средство обнаружения и подсчета медленных нейтронов. В одних случаях камера прибора наполняется газообразным фтористым бором, а в других стенки камеры покрываются соединениями бора или лития.

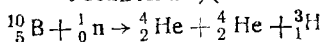
Искусственное получение радиоактивных веществ

Мы переходим теперь 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 пример. Если подвергнуть бор в течение некоторого времени бомбардировке α -частицами и затем исследовать его, то он оказывается радио-



Увеличение $\times 9000$



Увеличение $\times 1250$

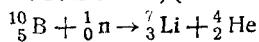
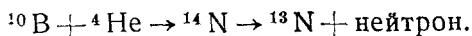


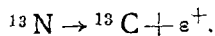
Рис. 12. Следы частиц на фотографической эмульсии. Фотографическая пластинка, пропитанная бором, облучалась медленными нейтронами. Продукты расщепления бора, происшедшего согласно приведенным уравнениям, дали следы в виде цепочки из отдельных почерневших зерен эмульсии.

(Фотография Г. Дж. Тэйлора и М. Гольдгабера)

активным, а именно: испускающим поток позитронов. Активность его падает со временем по геометрической прогрессии, убывая наполовину за 11 мин. Природа превращения и его фазы видны из следующего уравнения:

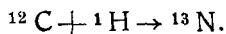


Благодаря избытку энергии ядро ${}^{14}\text{N}$ очень неустойчиво и мгновенно разрушается, превращаясь в более устойчивое ядро ${}^{13}\text{N}$. Последнее затем медленно превращается в устойчивое ядро ${}^{13}\text{C}$, испуская позитрон e^{+} :



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 другим способом. Если бомбардировать углерод быстрыми протонами, то происходит следующая реакция:



Полученный таким путем радиоазот ${}^{13}\text{N}$ по своим радиоактивным

и химическим свойствам идентичен газу, образуемому при бомбардировке бора α -частицами.

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

За последние несколько лет было 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 являются весьма эффективным средством образования радиоактивных веществ даже из самых тяжелых элементов. В настоящее время известно 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 разработки.

Методы искусственного превращения

До сих пор мы имели дело с превращениями, производимыми α -частицами, которые сами получают в процессе распада радиоактивных веществ и нейтронами, возникающими при превращении бериллия α -частицами. Количества радия, которыми располагают наши лаборатории, ограничены, так что результаты превращений, производимых с помощью α -частиц, вообще говоря, малы и могут быть изучаемы лишь благодаря разработанным нами исключительно чувствительным методам подсчета отдельных быстро движущихся атомов материи. 10 лет назад было установлено, что для дальнейшего расширения наших знаний о превращениях 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, то образуется огромное число заряженных атомов H (протонов), а также заряженных молекул. Благодаря недавнему открытию тяжелого водорода с массой 2, известного под названием дейтерия, в нашем распоряжении оказался еще один снаряд, а именно: дейтон, который приобрел важную роль в деле расширения наших знаний о превращениях элементов. Большие количества протонов и дейтонов можно легко получить, пропуская электрический разряд соответственно через водород и дейтерий, но для того чтобы придать им большую скорость, необходимо разогнать их сильным электрическим полем. Это влечет за собой необходимость применения аппаратов в некоторых случаях масштаба инженерных сооружений, а также напряжений порядка миллиона вольт; кроме того, необходимы быстроходные насосы для поддержания хорошего ва-

куума, чтобы предотвратить электрический разряд в ускоряющей системе. В лаборатории Кембриджа высокое постоянное напряжение получалось путем умножения снимаемого с трансформатора напряжения системой конденсаторов и выпрямителей. На рис. 13 приведена фотография установки, применявшейся Кокрофтом и Уолтоном при первых опытах этого рода, поставленных ими в Кембридже. Метод получения и анализа потока быстрых протонов и дейтонов

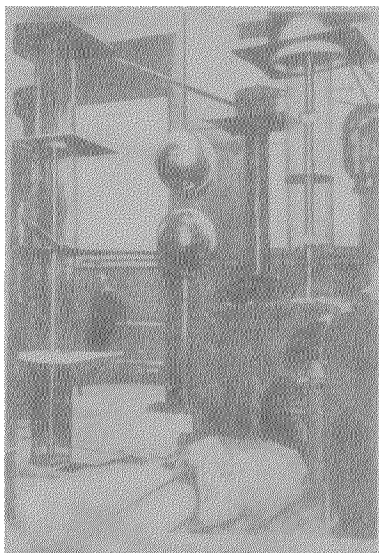


Рис. 13. Высоковольтная установка, применявшаяся в Кембридже Кокрофтом и Уолтоном в их первых опытах по искусственному превращению элементов.

для бомбардировки материи пояснен на рис. 14. Этот аппарат, спроектированный доктором Олифантом, применялся для изучения превращений легких элементов. Мы надеемся в новой лаборатории высоких напряжений в Кембридже получить для целей ускорения устойчивое постоянное напряжение в 2 млн. V, посредством которого можно было бы получать искры длиной около 8 м. В США Ван-дер-Грааф изобрел новый электростатический генератор для получения необходимого высокого напряжения. Машина такого типа применялась в экспериментах по превращению элементов Тюве, Хавсталом и Далем в Вашингтоне, причем получались устойчивые потенциалы до миллиона вольт. Проф. Э. Лоуренс в Калифорнийском университете сконструировал остроумный аппарат, названный „циклотроном“, в котором заряженные частицы автоматически повторно подгоняются большое число раз. Этот метод

требует применения гигантских электромагнитов и мощных электрических осцилляторов. На рис. 15 показана схема ускоряющей системы циклотрона. Однородное магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости рисунка, и разгоняемый протон или дейтон описывает спиральный путь с постоянно увеличивающимся радиусом. Успех этого метода многократного ускорения основан на том обстоятельстве, 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 дейтон может совершить 1 тыс. оборотов, не испытав значительного рассеяния остатками газов. Таким путем ему удалось получить интенсивные потоки протонов и дейтонов с энергией, доходящей до 6 млн. V.

Эта энергия значительно выше той, которую мы можем рассчитывать получить в лаборатории непосредственным применением высоких напряжений. Полагают, что в ближайшем будущем удастся получить частицы с еще большей энергией, применяя более мощный электромагнит и более интенсивные поля.

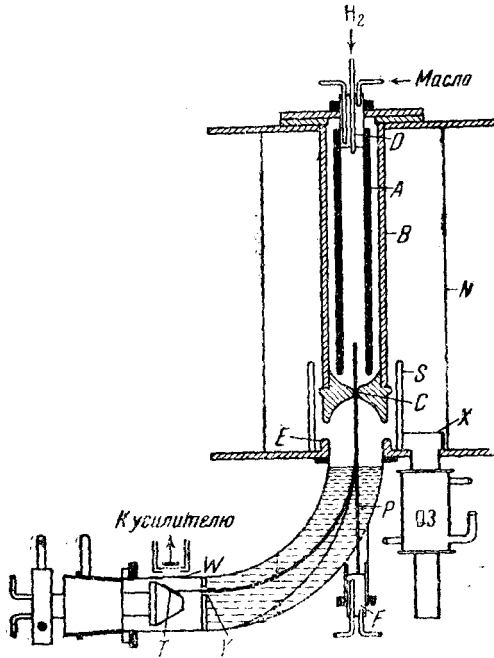


Рис. 14. При пропускании электрического разряда между анодом *A* с масляным охлаждением и стальным катодом *B*, через находящийся под низким давлением водород, образуется пучок водородных ионов, выходящий через отверстие *C* в катоде. Ионы ускоряются приложенным к электродам *C* и *E* напряжением, которое может быть доведено до 300 000 В. Стальной экран *S* служит для предохранения стеклянных стенок аппарата *N*.

Система откачивается быстроходным насосом *03*, снабженным предохранительным щитком *X*. Пучок ионов проходит через магнитное поле и частицы нужного типа направляются на мишень *T* через диафрагму *I*. Тонкое слюдяное окошко *W* пропускает все образующиеся быстрые частицы в камеру счетчика. Цилиндр Фарадея *F* предназначен для собирания пучка *P*, когда электромагнит не включен.

За последний год были сконструированы приспособления, позволяющие вывести наружу из камеры ускорения циклотрона пучок разогнанных до большой скорости частиц, что является большим преимуществом при целом ряде экспериментов. На рис 16 приведена полученная Лоуренсом фотография светящегося пучка дейтронов с энергией в 6 млн. В, соответствующего току в 6 μ А.

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 $3,8 \cdot 10^{13}$ дейтонов в 1 сек., что эквивалентно потоку α -частиц, выбрасываемых за 1 сек. примерно из 1 тыс. г чистого радия.

Каждый из этих методов получения быстрых частиц имеет известные преимущества при разрешении проблем определенного типа.

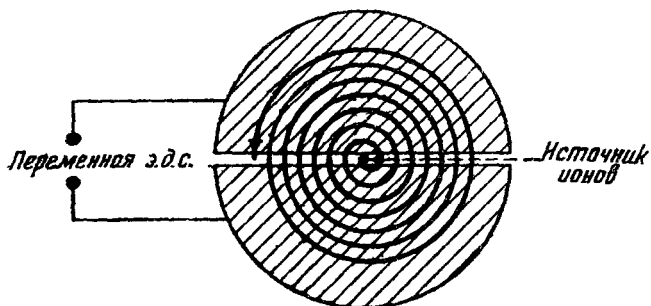


Рис. 15. Циклотрон. Положительные ионы водорода, образованные в разреженном газе электронами из вольфрамовой нити, ускоряются между *D*-образными электродами, к которым приложено переменное напряжение высокой частоты. Магнитное поле, направленное перпендикулярно плоскости рисунка, заставляет ионы двигаться 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 подгонять.

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. *V*. Однако вычисления, основанные на принципах волновой механики, показали, что имеется небольшая вероятность проникновения частицы внутрь ядра даже в тех случаях, когда ее энергия значительно ниже, чем энергия α -частицы. Эта идея полностью подтвердилась позднейшими экспериментами. Кокрофт и Уолтен впервые показали, что искусственное превращение лития и бора может быть достигнуто путем бомбардировки протонами с энергией порядка всего лишь 100 тыс. *V*¹⁾. Процессы превращения этих элементов протонами и дейтонами сейчас хорошо изучены и представляют интерес во многих отношениях. 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

¹⁾ Таким способом удобно выражать кинетическую энергию быстрых частиц. Например, если электрон движется в вакууме между двумя точками с разностью потенциалов в 1 млн. *V*, то он к концу приобретает энергию в 1 млн. *eV*, или, сокращенно, в 1 млн. *V*.

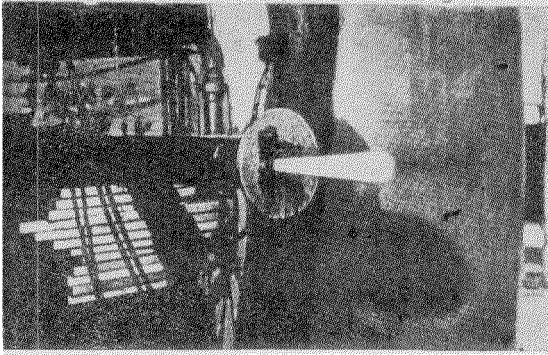


Рис. 16. Пучок дейтонов с энергией в 6 млн. В, выходящей из циклотрона.
(Фотография проф. Э. Лоуренса)

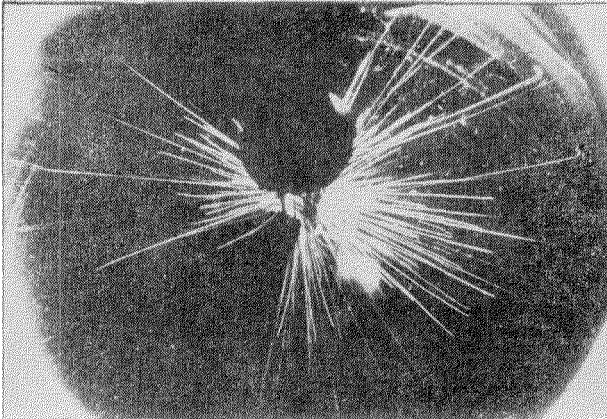
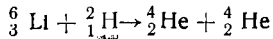
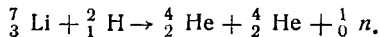


Рис. 18. Следы α -частиц, образующихся при бомбардировке лития искусственно ускоренными дейтонами. α -частицы, летящие по направлению к стенкам камеры, имеют длину пробега > 10 см и образованы при превращении



(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



Подвергавшаяся обстрелу литиевая мишень помещалась в вакууме внутри камеры из слюдяных окошек, которая видна в центре фотографии под трубкой, откуда выходит вниз поток быстрых дейтонов.

(Фотография П. И. Ди и Э. Т. С. Уолтона).

с ${}^6\text{Li}$, либо с ${}^7\text{Li}$. При бомбардировке протонами время от времени какой-либо протон проникает в ядро ${}^7\text{Li}$ и захватывается им. Получившееся ядро ${}^8\text{Be}$ является неустойчивым и немедленно распадается на 2 быстрых α -частицы, выбрасываемые в почти противоположных направлениях. Схема этого типа превращения показана на рис. 17. При захватывании протона ядром ${}^6\text{Li}$ образуется ${}^7\text{Be}$, который распадается на α -частицу и изотоп гелия с массой 3 (${}^3\text{He}$). Если производить бомбардировку не протонами, а дейтонами, то захватывание дейтона ядром ${}^6\text{Li}$ снова приводит к образованию ядра ${}^8\text{Be}$, 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 захватывании протона ядром ${}^7\text{Li}$. Более того, эти частицы являются, за одним исключением, наиболее быстрыми среди α -частиц, наблюдаемых при всех превращениях, так как их пробег в воздухе равен 13 см. При захватывании дейтона ядром ${}^7\text{Li}$ образуется ${}^9\text{Be}$, сразу же распадающийся на три составные части — две α -частицы и нейтрон.

Я упомяну здесь лишь о некоторых из наиболее важных типов превращения двух изотопов лития. Табл. 1 наглядно демонстрирует широкое разнообразие превращений, происходящих при бомбардировке лития различными частицами.

Превращения лития могут быть прекрасно проиллюстрированы путем фотографирования следов, возникающих при этих превращениях частиц в камере Вильсона. На рис. 18 приведена одна из таких фотографий, полученная Ди и Уолтоном, где видны пути α -частиц, образующихся при превращении лития дейтонами. На многих фотографиях, полученных таким методом, отчетливо заметно появление пары частиц, разлетающихся в почти противоположных направлениях.

Превращение бора ${}^{11}\text{B}$ при протонной бомбардировке было предметом длительного изучения. В этом случае образуется ядро ${}^{12}\text{C}$, распадающееся на три α -частицы. Ди и Гильберт показали, что основной тип этого преобразования проходит две фазы. Прежде всего выбрасывается α -частица и образуется остаточное ядро ${}^8\text{Be}$, содержащее избыток энергии, а затем, через очень короткий промежуток времени, это ядро расщепляется на две α -частицы. В силу технических трудностей редко удается получить на фотографической пластинке след всех трех α -частиц, образующихся при одном

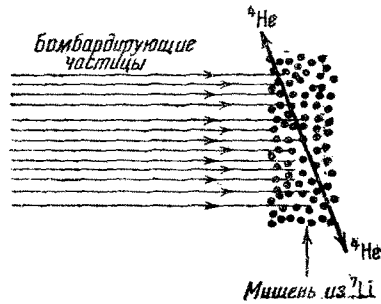


Рис. 17. Схема, иллюстрирующая превращение изотопа лития с массой 7 при протонной бомбардировке. На каждую сотню миллионов протонов с энергией в 200 000 В одно ядро лития превращается в два гелиевых ядра. Длина пробега возникающих α -частиц около 8,4 см.

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

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 превращения, представляющих выдающийся интерес. Простейший возможный случай превращения имеет место при бомбардировке дейтерия ^2D дейтонами. Соедине-

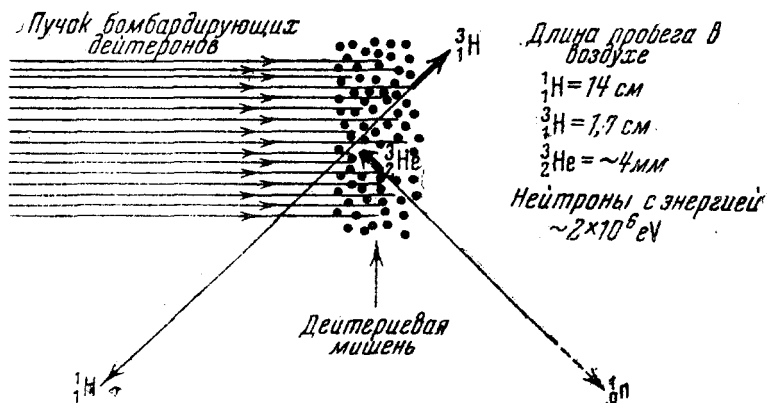


Рис. 20. Схема расщепления дейтерия при бомбардировке дейтонами. Около 2 млн. дейтронов с энергией 100 000 В бомбардируют мишень из чистого дейтерия, производят одно превращение по какой-либо из двух указанных реакций.

ние этих двух частиц должно привести к образованию ядра ^4He , но 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 (^3H), а в другом — на быстрый нейтрон и ядро гелия с массой 3 (^3He). 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 фотографии (рис. 21), где длинные следы принадлежат протонам, а гораздо более короткие — ядрам ^3H .

Описанные превращения могут быть обнаружены, если дейтом разгоняется напряжением всего в 20 тыс. В, но количество получающегося при превращении вещества, конечно, быстро растет

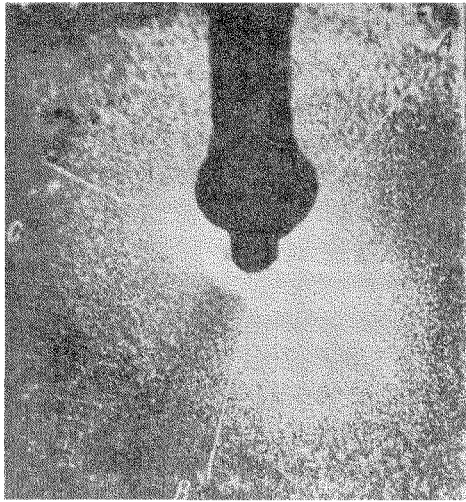
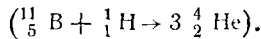


Рис. 19. Типичный случай расщепления бора на три α -частицы при протонной бомбардировке



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.

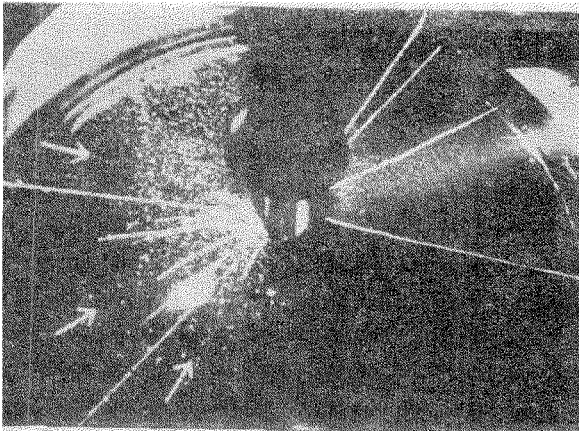
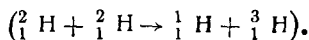


Рис. 21. Три примера испускания частиц ${}_{1}^{1}\text{H}$ и ${}_{1}^{3}\text{H}$ в противоположных направлениях при бомбардировке искусственно ускоренными дейтонами тонкой мишени, содержащей дейтерий



Следы частиц ${}_{1}^{3}\text{H}$, 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.

с увеличением энергии бомбардирующих дейтронов. Эти типы превращения являются наиболее эффективными из всех известных нам трансформаций, происходящих с низкой энергией бомбардирующих частиц; они снабжают нас для экспериментальных целей мощным однородным источником нейтронов с энергией 2,4 млн. V и однородной группой протонов с энергией около 3 млн. V.

Эти интересные превращения, принадлежащие к наиболее простому типу из всех возможных, были впервые 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 превращении. Может быть небезынтересно будет проделать здесь эти вычисления для случая ${}^3\text{H}$. Если соблюдается закон сохранения энергии, то для масс ядер должно выполняться следующее соотношение

$${}^2\text{H} + {}^2\text{H} = {}^1\text{H} + {}^3\text{H} + E,$$

$$2,0147 + 2,0147 = 1,0081 + {}^3\text{H} + 0,0042,$$

где E обозначает массу, эквивалентную выделенной при превращении энергии. Значение E вычисляется из наблюдаемой длины пробега протонов в воздухе, составляющей 14,70 см, что соответствует энергии в 2,98 млн. V. Из закона сохранения количества движения, который при расщеплении должен выполняться, следует, что $\frac{3}{4}$ всей освобождаемой энергии выделяется в форме кинетической энергии протона. Таким образом вся выделяющаяся энергия E составляет 3,97 млн. V. 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 была подтверждена для ряда случаев, где были точно известны массы участвующих в превращении атомов. Выделение энергии в количестве 3,97 млн. V эквивалентно убыванию массы на 0,0042 атомных единиц. Приведенное выше уравнение остается верным и в том случае, если в обоих 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. Для того чтобы массы элементов обеих частей уравнения сбалансировались, необходимо, очевидно, чтобы масса ${}^3\text{H}$ равнялась 3,0171.

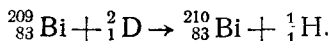
Аналогичным образом, путем определения энергии быстрого нейтрона, испускаемого при другом типе превращения, было найдено, что масса ${}^3\text{He}$ равна 3,0171, т. е. в пределах точности измерений совпадает с массой ${}^3\text{H}$. У нас есть достаточные основания полагать, что значения атомных весов, вычисленные этим путем, соответствуют действительности. Известно, например, что ${}^3\text{He}$ образуется также при бомбардировке ${}^6\text{Li}$ протонами (табл. 1), и масса ${}^3\text{He}$, вычисленная из этой реакции, совпадает с приведенной выше.

ТАБЛИЦА I

превращения лития при бомбардировке протонами (${}^1_1\text{H}$), нейтронами (${}^1_0\text{n}$), дейтонами (${}^2_1\text{H}$) и α -частицами.

Изотоп ${}^6\text{Li}$:	Освобождаемая энергия в eV	Примечания
${}^6_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^3_2\text{He}$	3,6	
${}^6_3\text{Li} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^3_1\text{H}$	4,7	
${}^6_3\text{Li} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H}$	5,0	
\searrow ${}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$	22	
Изотоп ${}^7\text{Li}$:		
${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \left\{ \begin{array}{l} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He} \\ \rightarrow {}^8_4\text{Be} + h\nu \\ \text{или } \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He} + h\nu \end{array} \right\}$	17 $h\nu = 17$	Монохроматический пучок γ -лучей
${}^7_3\text{Li} + {}^2_1\text{H} \left\{ \begin{array}{l} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n} \\ \rightarrow {}^8_4\text{Be} + {}^1_0\text{n} \\ \rightarrow [{}^8_3\text{Li}] + {}^1_1\text{H} \end{array} \right\}$	14,6 14? ?	Группа нейтронов с непрерывным распределен. скоростей Однородная группа нейтронов
${}^7_3\text{Li} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n}$	0,3	Группа протонов, до сих пор не обнаружен. Медленные нейтроны
<p>При этих реакциях образуются протоны, нейтроны, атомы ${}^3_1\text{H}$, ${}^3_2\text{He}$, ${}^4_2\text{He}$, ${}^8_3\text{Li}$, ${}^8_4\text{Be}$, ${}^{10}_5\text{B}$ и γ-лучи.</p> <p>Заключенный в квадрат изотоп лития ${}^8\text{Li}$ радиоактивен и имеет период полураспада 0,8 сек. Он распадается с испусканием быстрых β-частиц. Интересно отметить, что при бомбардировке ${}^7\text{Li}$ протонами испускаются также интенсивные γ-лучи с квантовой энергией 17 млн. В — наибольшей из наблюдавшихся до сих пор при превращениях.</p>		

Наконец, я хотел бы вкратце остановиться на некоторых важных открытиях, сделанных проф. Лоуренсом и его сотрудниками, применявшими циклотрон для получения очень быстрых дейтонов с энергией в 6 млн. В. При бомбардировке висмута такими быстрыми дейтонами образуется радиоактивный изотоп висмута, который во всех отношениях идентичен хорошо известному радиоактивному веществу радью 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, повидимому, следующий:



Как указано на рис. 1, радий Е представляет собой изотоп висмута

атомным весом 210. Это доказательство получения одного из природных радиоактивных веществ искусственным путем представляет огромный интерес и имеет выдающееся значение.

Я должен упомянуть еще об одном превращении, которое может оказаться весьма ценным с технической точки зрения. При бомбардировке натрия с атомным весом 23 (или обыкновенной поваренной соли) быстрыми дейтонами образуется, с испусканием протона, радиоактивный изотоп натрия с атомным весом 24 — радионатрий. 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, повидимому, излучает γ -лучи с большой энергией, обладающие такой же проникающей способностью, что и γ -лучи, испускаемые радием, находящимся в равновесии с продуктами своего распада. Лоуренсу уже удалось получить таким путем мощный источник γ -лучей из радионатрия, приблизительно эквивалентный в этом отношении 1 г радия. Таким образом возможно, что подобный искусственно созданный источник γ -лучей сможет когда-либо послужить заменой радия в целях терапии.

ПРЕВРАЩЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ γ -ЛУЧЕЙ

До сего времени бомбардировка материи быстрыми частицами оставалась наиболее эффективным методом изучения превращения элементов, хотя мы уже видели, что в случае более тяжелых элементов чрезвычайно эффективными оказываются медленные нейтроны. В некоторых случаях, однако, мы можем рассчитывать произвести превращение элементов, применяя γ -излучение с высокой квантовой энергией. Чадвику и Гольдгаберу недавно удалось с помощью γ -лучей расщепить дейтерий ${}^2\text{D}$ на протон и нейтрон.

В этом случае энергия кванта излучения должна быть больше, чем связывающая энергия протона и нейтрона, составляющая около 2,3 млн. В. Подобным же образом Сицлард нашел, что бериллий с массой 9 распадается на ${}^8\text{Be}$ и нейтрон при облучении γ -лучами с энергией, немногим большей 1 млн. В. Этот новый метод превращения может оказаться эффективным и в других случаях, если только нам удастся получить достаточно интенсивные источники γ -лучей с высокой квантовой энергией.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

За последние несколько лет прогресс в области наших знаний о превращениях элементов происходил очень быстро, и было показано, что почти все элементы могут быть подвергнуты превращению с помощью соответствующих воздействий. Интересно отметить, что существуют достаточно убедительные доказательства возможности получения изотопа золота путем бомбардировки платины

быстрыми нейтронами; но 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, возможно когда-нибудь существовавшие на солнце, но исчезнувшие при остывании земли. По всей вероятности, уран и торий одни сохранились из всей большой группы радиоактивных элементов лишь 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; но известно несколько случаев превращения более легких элементов, когда взрывающееся ядро распадается на три частицы. В процессе этой работы было открыто несколько новых, устойчивых изотопов, в частности ^3H , ^3He , ^8Be , ^{10}Be , ранее в природе не наблюдавшихся. 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, чтобы его можно было подвергнуть химическому анализу.

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 легких элементов, как, например, дейтерия и лития, превращение становится

заметным, когда бомбардирующие частицы обладают энергией в 20 тыс. V или даже меньше. Но в большинстве случаев необходимая для совершения заметного превращения энергия бомбардирующих частиц должна быть выше этого значения и быстро растет при повышении атомного номера обстреливаемого элемента.

Мы видели, что эти соображения не применимы 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. Есть основания полагать также, что каждый медленный нейтрон, проходящий, например, через бор, вызывает в конечном счете превращение ядра бора (см. стр. 42). Представляется также вероятным, что самостоятельное существование нейтрона в нашей атмосфере должно быть очень непродолжительным, так как он скоро был бы захвачен ядрами азота и кислорода, производя при этом 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 дейтонов количество излучаемой энергии, приходящейся на один атом, даже больше, чем в случае радиоактивных превращений. Например, энергия, освобождающаяся при превращении 1 атома лития 6 дейтонами, составляет 22,5 млн. V, т. е. почти вдвое больше, чем энергия, излучаемая при распаде любого радиоактивного атома. Так как превращение может быть произведено дейтоном с энергией всего в 20 тыс. V, то ясно, что в этом индивидуальном процессе получается большой выигрыш энергии. Но, с другой стороны, лишь один из 10^8 дейтонов 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 полезной энергии из атомов таким путем. Исключительная эффективность медленных нейтронов, вызывающих превращения 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 являются благоприятными.

Атомное ядро представляет собой целый мир, где в ничтожно малом объеме заключен целый ряд различных частиц, в частности протонов и нейтронов, удерживаемых вместе чрезвычайно мощными неизвестными нам 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 применяема 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 имеющий строго определенные энергетические уровни. В пользу этой новой точки зрения имеется много соображений, и ее перспективы на будущее кажутся более благоприятными. 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 по другой линии. 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 солнца. В условиях такой непрерывной бомбардировки должен происходить постоянный процесс построения новых атомов и расщепления других и через короткое время должно было быть достигнуто состояние равновесия, во всяком случае временного. Из наших сведений об относительном преобладании элементов на земле мы можем составить себе довольно верное представление и о том, каков был средний состав солнца 3 000 млн. лет назад, когда земля отделилась от солнца. Когда наши знания в области превращений элементов продвинутся 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 мы видим, что прогресс современной алхимии значительно расширит наши познания не только о самих элементах, но и об их относительном преобладании в нашей вселенной.