

Деление урана: от Клапрота до Гана

А. ВАСИЛЬЕВ

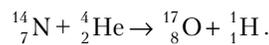
Вильгельм Клапрот (1789) → Анри Беккерель (1896) → Пьер и Мария Кюри (1898) →
Эрнест Резерфорд (1911) → Ганс Бете (1932) → Джеймс Чедвик (1932) →
Ирен и Фредерик Жолио-Кюри (1934) → Энрико Ферми (1935) →
Лизе Мейтнер, Фриц Штрассман, Отто Ган (1938)

ДЕВЯНОСТО ВТОРОЙ ЭЛЕМЕНТ периодической таблицы Менделеева уран был открыт Вильгельмом Клапротом в 1789 году. Через сто с лишним лет, в 1896 году, Анри Беккерель обнаружил, что уран радиоактивен, а еще через два года супруги Пьер и Мария Кюри выделили из урановой руды два новых химических элемента – полоний и радий. Как оказалось, радиоактивность радия в миллион раз превышала радиоактивность естественного урана. Свойство радиоактивности заключается в том, что радиоактивные элементы излучают либо α -, либо β -частицы и превращаются в другие элементы. Как показал Резерфорд, α -частицы представляют собой двукратно положительно заряженные ядра гелия, а β -частицы – это отрицательно заряженные электроны.

Окончательно постулат о неделимости и неизменности химических элементов завершил свое существование при появлении гипотезы Резерфорда и Содди о распаде атомов. Уже на заре изучения радиоактивности были установлены три цепочки радиоактивного распада. Две из них начинались от урана, а одна – от девяностого элемента тория. Периоды полураспада не управлялись никакими физическими и химическими воздействиями, а конечным продуктом всех этих цепочек был свинец. (Факт существования двух различных цепочек распада урана был понят лишь в результате многолетней интенсивной работы ученых разных стран.)

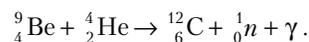
Вначале Резерфорду в 1911 году с помощью бомбардировки ядер α -

частицами удалось преобразовать один элемент в другой, как это видно, например, из реакции



Впоследствии было открыто много таких реакций, однако не с тяжелыми элементами – они эффективно отталкивали α -частицы.

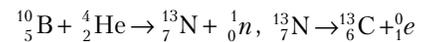
Затем в 1932 году были открыты позитрон, тяжелый водород и, наконец, нейтрон. Облучая бериллий α -частицами, Бете и Беккер в Германии обнаружили сильно проникающее излучение, которое они приняли за γ -лучи. Жолио-Кюри показал, однако, что эти лучи выбивают протоны из водородосодержащих соединений, что невозможно для γ -излучения. То, что сильно проникающим излучением являются нейтроны, показал Чедвик, изучая реакцию



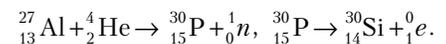
С открытием нейтронов прояснился, наконец, долго мучивший химиков вопрос дробных масс элементов, т.е. существования изотопов. Оказалось, что и уран имеет два основных изотопа: ${}^{235}_{92}\text{U}$ и ${}^{238}_{92}\text{U}$ – они и являются родоначальниками двух радиоактивных цепочек.

Открытие Чедвика позволило использовать при бомбардировке атомных ядер не только α -частицы, но и нейтроны. Между двумя этими процессами вскоре обнаружилось существенное различие. Бомбардировка α -частицами почти всегда приводила к образованию стабильных атомов, если при этом происходило также излучение протона. Если же при бомбардировке атомов α -частицами

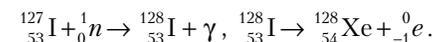
происходило излучение нейтрона, то наряду с ним также излучался позитрон. Излучение позитрона иногда происходило уже после того, как облучение α -частицами прекращалось. Наблюдение таких реакций Ирен и Фредериком Жолио-Кюри в 1934 году предопределило открытие искусственной радиоактивности. Первыми такими реакциями стали:



и



Исключительно важное значение нейтронов для проведения ядерных реакций осознал Ферми. Его команда облучила нейтронами почти все элементы периодической системы и открыла множество искусственных радиоактивных элементов. Например:



На этом пути Ферми добрался до урана и, облучая его нейтронами, обнаружил множество трансмутантов. Некоторые из вновь полученных продуктов облучения обладали очень малыми периодами полураспада. Поскольку многие из этих продуктов излучали электроны, Ферми предположил, что он получил 93-й и 94-й трансурановые элементы. Предположение Ферми, однако, было принято научной общественностью с осторожностью, причем многие полагали, что наиболее надежно установленный так называемый 13-минутный элемент был на самом деле протактинием – элементом с номером 91.

Лизе Мейтнер и Отто Ган решили перепроверить эксперимент Ферми

с тем чтобы определить, является ли 13-минутный элемент протактинием. Поскольку вновь обнаруженный продукт реакции не оказался ни протактинием, ни ураном, ни актинием, ни торием, они заключили, что вновь обнаруженный элемент является трансурановым 93-м элементом. Никакие другие возможности ими тогда не рассматривались. С открытием нейтрона и использованием искусственных источников радиации действительно наблюдалось огромное количество необычных реакций, однако продуктами этих реакций всегда являлись либо изотопы облучаемых веществ, либо элементы, отстоящие на одну или, в крайнем случае, на две позиции от облучаемых элементов. Возможность развала тяжелого ядра на легкие тогда просто не существовала.

Независимо от этих опытов, Кюри и Савич описали в 1937–38 годах так называемый 3,5-часовой изотоп, который возникал при облучении урана нейтронами. Его свойства напоминали пятьдесят седьмой элемент лантан. В то же время в экспериментах Гана и Штрассмана по облучению урана нейтронами был получен еще более странный результат: наряду с предполагаемыми трансурановыми элементами возникали, путем последовательного излучения α -частиц, три искусственно β -активных изотопа радия с различными временами жизни, которые, в свою очередь, превращались в β -активные изотопы актиния. Вывод о том, что в эксперименте наблюдались именно изотопы радия, основывался на том, что, согласно законам химии, это могли быть только барий или радий, однако появление пятьдесят шестого элемента бария по существовавшим тогда представлениям считалось невозможным. Станным в этих опытах было то, что α -распад не сопровождался появлением медленных нейтронов, однако сразу же появлялось много различных изотопов. Чтобы получить максимально обогащенный искусственным радием образец, экспериментаторы попытались выделить его, используя в качестве носителя хлорид бария, но все попытки завершились неудачей. В то же время контрольные опыты с действительно изотопами радия всегда оказывались успешными – первый осадок всегда был богаче радиоактивным элементом.

В этой драматической ситуации Ган и Штрассман предприняли контрольный «показательный» опыт. Они смешали чистый натуральный радий с искусственным радием и провели разделение изотопов. Оказалось, что естественный радий, как всегда, выделяется хорошо, а искусственный отделить от бария невозможно. Далее, при β -распаде радия образуется актиний, а при β -распаде бария – лантан. Смесь естественного и искусственного радия давала и тот, и другой элемент.

Ган вынужден был признать, что наблюдавшийся им искусственный радий был на самом деле барием. В первом сообщении от 6 января 1939 года об опытах, которые «противоречили всем явлениям, наблюдавшимся до сих пор в ядерной физике», Ган высказал предположение, что второй продукт распада должен иметь атомную массу порядка 100, так чтобы суммарная масса вновь образуемых элементов совпала с массой урана. Во втором сообщении от 10 февраля 1939 года Ган и Штрассман описали расщепление тория, продуктами распада которого были инертный газ и щелочной металл.

Сразу вслед за этими сообщениями появилась статья Лизе Мейтнер и ее племянника Отто Фриша, в которой расщеплению ядра урана на два более легких ядра было дано теоретическое обоснование. Они же показали, что деление ядер урана должно сопровождаться громадным выходом энергии. Уран, порядковый номер которого 92, превращается в барий с номером 56 и криптон с номером 36. Хотя условие сохранения заряда в этой реакции выполняется, оба получающихся в ней искусственных изотопа имеют слишком большую массу. Они, следовательно, должны превратиться в другие, более стабильные изотопы. Так, наивысший стабильный изотоп криптона имеет массу 86, а в процессе деления ядер урана возникает нестабильный криптон с массой 88. За реакции с тепловыми, т.е. медленными, нейтронами ответствен ${}_{92}^{235}\text{U}$. Если бы не было других продуктов распада, искусственный изотоп бария должен был бы иметь массу $(235 + 1) - 88 = 148$. В то же время самый тяжелый стабильный изотоп бария имеет массу лишь 138. Учитывая это обстоятельство, в своем сообщении Ган и Штрассман предполо-

жили, что в результате реакции деления тяжелых ядер наряду с легкими ядрами появляются также нейтроны. (Экспериментально это впервые показал Фредерик Жолио-Кюри.) Высвобождающиеся в ходе этой реакции нейтроны способны инициировать дальнейшие реакции распада тяжелых ядер, что при достаточном запасе «горючего» приводит к цепной реакции.

Итак, что же происходит в уране? Уран в основном состоит из двух изотопов ${}_{92}^{235}\text{U}$ и ${}_{92}^{238}\text{U}$, причем их количества в природном уране находятся в соотношении 1 : 140. За счет медленных нейтронов идет цепная реакция деления лишь U-235, а с U-238 происходит следующее. При захвате им нейтрона образуется короткоживущий изотоп U-239, самопроизвольно излучающий электрон. В результате образуется элемент с номером 93, т.е. нептуний. Изотоп нептуния ${}_{93}^{239}\text{Np}$ – тоже радиоактивен, его период полураспада составляет 2,3 дня. Нептуний также излучает электрон, в результате чего образуется элемент с номером 94, т.е. плутоний. Период полураспада ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ около 24000 лет. (Имена этим элементам американский физик Гленн Сиборг дал по названиям планет: Уран – Нептун – Плутон.) Кроме указанных ядерных реакций, при облучении урана-238 нейтронами рождается еще один изотоп, когда нейтрон не захватывается, а, наоборот, сам выбивает еще один нейтрон из ядра. В результате β -излучающий изотоп урана с массой 237 превращается в ${}_{93}^{237}\text{Np}$ с периодом полураспада в миллионы лет. В дополнение ко всему, в уране-238 также происходят естественные реакции деления, образующие около 200 изотопов с номерами от 30 до 64. Таким образом, наличие ${}_{92}^{238}\text{U}$ в природной смеси урана выводит нейтроны из цепной реакции с ${}_{92}^{235}\text{U}$, однако в этих же процессах идет накопление плутония, а с ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ также возможна цепная реакция.

В заключение – несколько строк о человеке, которому принадлежит честь открытия расщепления тяжелых ядер. Отто Ган родился почти через сто лет после открытия Клапротом урана – 8 марта 1879 года во Франкфурте-на-Майне. Химическое образование он получил в Мюнхене

(Окончание см. на с. 30)

и Марбурге, а первые шаги в науке делал под руководством Уильяма Рамзая в Лондоне и Эрнеста Резерфорда в Монреале. По возвращении в Германию Ган продолжил свои исследования радиоактивных элементов в Химическом институте Берлинского университета. Здесь же он встретился с Лизе Мейтнер, которая прибыла в Берлин из Вены на учебу к Макс Планку. Сотрудничество Отто Гана и Лизе Мейтнер продолжалось более 30 лет. В 1912 году Ган стал директором радиохимической группы вновь созданного Института физической химии и электрохимии

Общества кайзера Вильгельма. В годы первой мировой войны Ган принимал участие в боевых действиях на Западном фронте. После окончания войны Ган продолжил исследования радиоактивности и в 1928 году стал директором Института физической химии и электрохимии. В 1934 году его ближайшая сотрудница Лизе Мейтнер была вынуждена покинуть Германию, и их работа продолжалась лишь по переписке. В годы второй мировой войны Ган занимался фундаментальными исследованиями продуктов ядерного распада, хотя и был подключен к неко-

торым проектам центра ядерных исследований вермахта. В конце войны Ган и его коллеги были арестованы союзными войсками и переправлены в Англию. Здесь же Отто Ган узнал о ядерных бомбардировках японских городов Хиросима и Нагасаки и пережил по этому поводу сильнейшее потрясение. В 1946 году Ган вернулся в Германию и стал президентом Общества кайзера Вильгельма, переименованного в Общество Макса Планка. В этом же году ему была вручена Нобелевская премия по химии за 1944 год. Выступая с публичными лекциями об опасности распространения ядерного оружия, Отто Ган объединил многих ученых в борьбе за мирное развитие человечества.