

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

Физик

ИСКУССТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ, СОЗДАВАЕМАЯ НЕЙТРОННОЙ БОМБАРДИРОВКОЙ*

Э. Ферми, Э. Амальди, О. д'Агостино, Ф. Разетти и Э. Сегре

Рим

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящей статье мы собираемся дать полный отчет обо всех экспериментах, произведенных в физической лаборатории Римского университета над новыми радиоактивными элементами, получаемыми при помощи бомбардировки нейтронами. Предварительные результаты нам уже приходилось излагать в различных кратких сообщениях¹⁻⁸.

Кюри и Жолио⁹ впервые обнаружили, что атомы, получающиеся в результате искусственного разложения, не обязательно должны соответствовать устойчивым изотопам, но могут начать распадаться с испусканием легких частиц, обладая при этом довольно значительной средней продолжительностью жизни. Кюри и Жолио воспользовались для бомбардировки α -частицами полония. При этом оказалось, что испускаемые легкие частицы являются, главным образом, позитронами. Подобные же результаты были получены и другими экспериментаторами на различных элементах, причем бомбардировка производилась как α -частицами, так и протонами и дейтонами, которым искусственно сообщалось значительное ускорение¹⁰⁻¹⁴.

Применение для бомбардировки заряженных частиц заставляет ограничиться возбуждением радиоактивности лишь у легких элементов, поскольку таким способом можно активизировать только примерно десять элементов, у которых порядковый номер не превышает 15.

Нам представилось поэтому весьма целесообразным попытаться вызвать тот же эффект с помощью бомбардировки нейтронами, способными подходить близко к ядрам даже наиболее тяжелых атомов. Правда, имеющиеся в нашем распоряжении источники нейтронов являются значительно менее интенсивными, чем источники α -частиц, протонов или дейтонов, однако было достаточно оснований предположить, что этот фактор компенсируется большей эф-

* Proc. Roy. Soc. A. 146, 483, 1934, перевод Е. Л. Фейнберга.

фективностью разложения при помощи нейтронов. И действительно, наши опыты показали, что из шестидесяти исследованных элементов более сорока могут быть этим способом активизированы.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В наших опытах источником нейтронов служила запаянная стеклянная трубочка диаметром около 6 мм и длиной 15 мм, содержащая около 800 милликури (mC) бериллиевого порошка и радона. Согласно обычно принимаемым цифрам выхода нейтронов из бериллия число нейтронов, испускаемых этим источником, должно иметь порядок 1000 в секунду на 1 mC. Энергия большинства из этих нейтронов меняется в очень широких пределах — от нуля до 7—8 млн. В. Однако присутствует также некоторый весьма малый процент частиц, энергия которых почти вдвое превосходит этот верхний предел.

Нейтронное излучение сопровождается весьма интенсивным γ -излучением, которое, однако, не создает никаких неудобств, поскольку, как удалось показать, радон без бериллия вовсе не возбуждает радиоактивности. Вылет нейтронов из бериллия сопровождается испусканием γ -излучения более жесткого, чем γ -излучение какого-либо из продуктов распада радона (от 5 до 6 млн. В в количестве одного кванта на нейтрон). Однако весьма маловероятно, чтобы наблюдаемый эффект был в какой-либо мере связан с этим γ -излучением, если γ -излучение гораздо большей интенсивности и лишь незначительно меньшей энергии не создает никакого эффекта.

Электроны, испускаемые активизированным веществом, регистрировались счетчиком Гейгера—Мюллера, имеющим около 5 см в длину и 1,4 см в диаметре. Стенки счетчика были изготовлены из тонкой алюминиевой фольги от 0,1 до 0,2 мм толщиной. Приложенное напряжение варьировалось в пределах от 1000 до 1500 В. Усиленные импульсы подсчитывались автоматическим приспособлением, работавшим с помощью тиратрона.

Исследуемое вещество обычно приготавливалось в форме цилиндра, которым для сведения к минимуму обуславливаемых геометрическими соотношениями потерь интенсивности можно было окружать счетчик. Во время облучения вещество помещалось возможно ближе к источнику. Те вещества, которые после облучения приходилось подвергать химическому исследованию, часто брались в виде концентрированного раствора, заключенного в пробирке.

Кривые распада для возбужденной радиоактивности у многих элементов обнаружили простую экспоненциальную зависимость. Иногда же их можно было разложить на две или более экспоненциальных кривых. Поэтому для достижения различной степени активизированности у различных компонент было удобно облучать различные вещества в течение промежутков времени разной длины. Наличие нескольких значений средней продолжительности жизни в некоторых случаях объясняется, конечно, присутствием несколь-

ких радиоактивных изотопов. В тех же случаях, когда присутствует один изотоп, оно может быть приписано наличию альтернативных процессов распада, а иногда (уран) целой цепи таких процессов. Интенсивность активизации у различных элементов меняется в широких пределах. Иногда эффект с трудом мог быть измерен из-за того, что число импульсов, возбуждаемых облученным веществом, имело порядок числа самопроизвольных разрядов в счетчике. В других же случаях возбуждение являлось настолько сильным, что при слишком близком расположении объекта число импульсов достигало нескольких тысяч в минуту, благодаря чему они не могли быть сосчитаны из-за недостаточности разрешающей способности счетчика.

Точных измерений интенсивности активизации различных элементов мы не предпринимали, потому что это потребовало бы от нас проведения опытов при точно определенном расположении всех приборов, а также знания как к. п. д. нашего счетчика в отношении подсчета электронов, так и поглощения в исследуемом веществе и в алюминиевой фольге. Однако мы произвели грубую оценку всех этих факторов, вследствие чего получили возможность давать численное выражение интенсивности активизации (i). Под этим выражением понимается число распадов, происходящих за 1 сек. в 1 г данного вещества, помещенном на расстоянии 1 см от нейтронного источника, содержащего 1 мС радона (находящегося в радиоактивном равновесии с его продуктами распада) и бериллиевого порошка.

Облучение продолжалось всегда до тех пор, пока не достигалось насыщение. Коэффициент полезного действия нашего счетчика (учитывая поглощение в алюминиевой фольге и геометрические факторы) равнялся примерно $\frac{1}{20}$, что было определено измерением числа импульсов, даваемых известными количествами калия и урана.

Зная это число, выражающее интенсивность, легко получить эффективное сечение для возбуждающего удара нейтрона, если известно число нейтронов, испускаемых в 1 сек. 1 мС источника. Полагая это число равным 1000, сразу находим, что эффективное поперечное сечение равно

$$\sigma = 2 \cdot 10^{-26} \cdot i \cdot A,$$

где A — атомный вес элемента.

Для того чтобы иметь возможность рассматривать ядерные реакции, в результате которых появляется данный активный элемент, необходимо сначала определить, что данный элемент собою представляет. Можно считать, что порядковый номер активного элемента близок к порядковому номеру Z бомбардируемого. Ввиду того, что количество получаемого активного вещества чрезвычайно незначительно (в наиболее благоприятных случаях около 10^9 атомов), нет никакой надежды на выделение его обычными методами. Поэтому приходится поступать следующим образом: растворяя облученное вещество, прибавляем к нему небольшое количество

какого-либо неактивного вещества, которое по предположению могло бы быть изотопом радиоактивного продукта распада. После этого облученное вещество химически отделяем от добавленного и каждое из них в отдельности испытываем на радиоактивность. В большинстве случаев оказывается, что активность переходит к какому-либо одному элементу. В этом случае можно считать, что активный продукт распада является изотопом данного элемента.

Мы производили также предварительное исследование проникающей способности β -лучей новых радиоактивных элементов. В наших опытах применялся счетчик стандартного типа, причем исследуемому объекту опять придавалась форма цилиндра, внутренний диаметр которого несколько превышал диаметр счетчика, благодаря чему между ними можно было вводить цилиндрические алюминиевые экраны различной толщины. Поскольку расположение приборов и объектов при такого рода измерениях поглощения несколько отличается от обычного и, кроме того, поскольку у нас измерялась не общая ионизация, а число импульсов, нам пришлось проверить наш метод путем измерения коэффициента поглощения для уже изученных радиоактивных веществ. Как и следовало ожидать, мы обнаружили расхождение порядка 20%. Все данные исправлены на эту величину.

В некоторых случаях не удавалось достичь полного поглощения, даже вводя слой свинца толщиной в 2 мм. Этот факт рассматривался как доказательство существования γ -излучения.

Весьма важно было выяснить, представляют ли собой испускаемые легкие частицы положительные или отрицательные электроны. Поскольку излучение является чрезвычайно слабым, удобным для этой цели методом оказался метод неоднородного магнитного поля Тибо¹⁵. Однако даже в этом случае пришлось ограничиться исследованием лишь тех элементов, которые удается сильно активизировать (Al, Si, P, S, Cr, As, Br, Rh, Ag, J, Ir, U). При этом во всех случаях нами были обнаружены одни лишь отрицательные электроны. Это, однако, не исключает возможности присутствия небольшого количества (до 15%) и положительных электронов.

В случае очень небольшого числа сильно активизируемых элементов испускаемые электроны удалось сфотографировать в камере Вильсона.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

Ниже приводятся результаты исследования различных элементов, расположенные в зависимости от порядкового номера. Итог всех исследований сведен в таблицу, помещенную в конце статьи.

1. Водород. Не обнаруживает никакого эффекта даже после 14-часового облучения (воды) источником в 670 мС.

3. Литий. Гидрат окиси лития остается неактивным после 14-часового облучения источником в 750 мС.

4. Бериллий. Обнаруживает крайне слабую активность, которую с успехом можно приписать загрязнению препарата.

5. Бор. То же, что бериллий.

6. Углерод. Парафин, облучавшийся в течение 15 час. источником в 220 мС, не проявляет активности.

7. Азот. Углекислый гуанидин (содержащий около 35% N) после 14-часового облучения источником в 500 мС не обнаруживает активности.

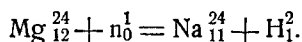
8. Кислород. Не обнаруживает активности, см. водород.

9. Фтор. Подвергая облучению фтористый кальций, можно добиться получения сильно активного продукта ($i = 0,7$). Поскольку доказано, что кальций активностью не обладает, этот эффект должен быть целиком приписан фтору. Активность его быстро убывает, обнаруживая период полураспада, равный 9 сек. В этом случае нельзя произвести химического разделения. Однако поскольку известно, что под действием нейтронной бомбардировки фтор распадается, испуская σ -частицу, можно заключить, что активным ядром является по всей вероятности N^{16} . Этот неустойчивый изотоп, испуская один электрон, переходит в устойчивый O^{16} . Большая устойчивость этого последнего ядра хорошо согласуется с наблюдаемой очень высокой энергией β -лучей. Их интенсивность уменьшается до половины первоначальной после прохождения через $0,24 \text{ г/см}^2 \text{ Al}$ (все дальнейшие цифры, как и эта, относятся к алюминию).

11. Натрий. Этот элемент подвергался облучению в виде карбоната. Натрий проявляет довольно большую активность. Период полураспада равен примерно 40 сек.

12. Магний. Магний может быть активизирован довольно сильно. Кривая распада обнаруживает существование двух периодов, равных приблизительно 40 сек. и 15 час. Для длинного периода слой половинного ослабления равен $0,06 \text{ г/см}^2$.

Активный элемент, имеющий период полураспада, равный 15 час., удалось выделить химически. Для этого облученный магний растворялся и к раствору добавлялась соль натрия. Затем магний осаждался в виде фосфата и обнаруживал при этом отсутствие радиоактивности, в то время как оставшийся в растворе натрий оказался активным. Этим устанавливается, что активные атомы не являются изотопами магния, а поскольку неон вообще должен быть исключен из рассмотрения, остается предположить, что они являются изотопами натрия, образующимися в согласии с реакцией

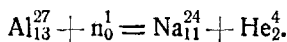


13. Алюминий. Этот элемент в результате нейтронной бомбардировки становится очень активным. Кривая распада указывает на существование двух периодов, равных примерно 12 мин. ($i = 0,8$) и 15 час. ($i = 0,5$). Слой половинного ослабления равен соответственно $0,07$ и $0,06 \text{ г/см}^2$.

Активный элемент с длинным периодом может быть химически отделен следующим путем: растворим облученный алюминий и добавим к раствору небольшое количество натрия и магния. Затем

осадим алюминий и магний в виде гидрата окиси и фосфата. Осадок оказывается неактивным. После этого раствор, содержащий натрий, выпариваем и обнаруживаем значительную радиоактивность с периодом полураспада в 15 час.

Активное вещество, вероятно, представляет собой тот же элемент, который мы получаем и в случае магния. На это нам указывает тождественность периодов и слоев половинного ослабления. В данном случае ядерная реакция имеет вид:

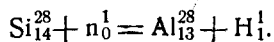


После этого активный изотоп Na^{24} , испуская один электрон, переходит в устойчивый изотоп Mg^{24} .

Активный продукт распада с 12-минутным периодом не был выделен, однако мы склонны рассматривать его как Mg^{27} , поскольку другие две возможности, Al^{28} и Al^{26} , по всей вероятности, исключены: первая вследствие того, что Al^{28} , как мы увидим впоследствии, является радиоактивным изотопом с периодом в 3 мин., а последняя потому, что Al^{26} должен был бы, вероятно, распадаться с испусканием позитрона.

14. Кремний. Кремний также весьма активен ($i=0,7$), период его составляет величину, повидимому, меньшую 3 мин. Слой половинного ослабления равен $0,16 \text{ г/см}^2$.

Химическое отделение активного элемента было произведено путем нагревания облученной кремневой кислоты вместе с фтористоводородной и серной кислотой, после того как к ней были добавлены алюминий и магний. При этом кремний улетучивался в виде фтористого соединения, а осажденный из остатка алюминий оказался носителем активности. Отсюда мы заключаем, что активное вещество является изотопом алюминия и ядерная реакция имеет вид:



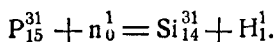
Это согласуется и с гипотезой Кюри, Жолио и Прайсверка¹⁶, утверждающей тождественность этого активного изотопа с тем, который образуется при соударении α -частицы с Mg^{25} и имеет действительно тот же самый период.

15. Фосфор. Этот элемент обнаруживает весьма сильную активность ($i=0,6$), убывающую с периодом около 3 час., а также активность в 10 раз меньшей интенсивности, период которой равен 3 мин., впервые замеченную Кюри, Жолио и Прайсверком. Слой половинного ослабления β -лучей для элемента с 3-часовым периодом равен $0,09 \text{ г/см}^2$.

Активный элемент с 3-часовым периодом удалось химически отделить. Для этой цели фосфор подвергался облучению в виде концентрированного раствора фосфорной кислоты. Затем раствор разбавлялся водой, добавлялись серная кислота и небольшое количество кремнекислого натрия. Все это высушивалось до выделе-

ния нерастворимого кремнезема и затем растворялось в воде и фильтровалось. Активность при этом переходила на кремнезем.

Следовательно, ядерная реакция должна иметь вид:

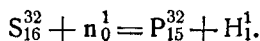


Элемент с 3-минутным периодом не был химически выделен. Совпадение периодов наводит на мысль о том, что это может быть тем же самым Al^{28} , который получается и из кремния.

16. Сера. Сера проявляет довольно сильную активность с периодом полураспада примерно в 13 дней (цифра измерена довольно неточно). Слой половинного ослабления равен $0,10 \text{ г/см}^2$.

Химическое отделение активного продукта распада было произведено следующим способом: облученная серная кислота разбавлялась водой и к ней подбавлялось чрезвычайно малое количество фосфорнокислого натрия, а затем фосфор осаждался в виде фосфорномолибденовой кислоты путем добавления молибденовокислого аммония. Активность обнаруживалась в осадке.

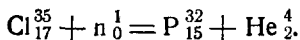
Мы полагаем поэтому, что ядерная реакция такова:



Этот активный P^{32} , испуская электрон, переходит в устойчивый изотоп S^{32} .

17. Хлор. Период полураспада и проникающая способность β -лучей для этого элемента выражаются примерно теми же цифрами, что и для серы. Интенсивность $i=0,1$. Активное вещество выделялось совершенно таким же способом, как и в случае серы. Облученный хлористый аммоний растворялся в разбавленной азотной кислоте, добавлялся фосфор, который затем выделялся тем же способом, что и в предыдущем случае. Этот элемент, как и тогда, являлся носителем активности.

Ядерная реакция, дающая такой же самый активный фосфор, как и в случае серы, имеет следующий вид:



20. Кальций. Не удалось обнаружить какой бы то ни было активности.

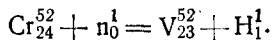
21. Титан. Удалось наблюдать лишь очень слабый эффект, причем период оказался равным нескольким минутам. При этом не исключено, что и он вызван посторонними примесями.

22. Ванадий. Этот элемент проявляет среднюю активность. Период полураспада равен примерно 4 мин. и в пределах ошибки наблюдений совпадает с периодом продуктов разложения хрома и марганца, которые оба являются изотопами ванадия. Это наталкивает на предположение о том, что активный элемент есть не что иное, как V^{52} . Слой половинного ослабления тот же, что и у хрома $0,16 \text{ г/см}^2$.

24. Хром. Металлический хром в результате нейтронной бомбардировки приобретает довольно сильную активность. Период по-

лураспада, как и в предыдущем случае, равен 4 мин. Слой половинного ослабления β -лучей — $0,16 \text{ г/см}^2$.

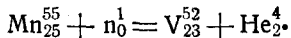
Для определения химической природы активного элемента мы поступали следующим образом: к облученному хромовоокислому аммонiu добавлялось немного ванадиевоокислого натрия, а затем ванадий осаждался добавлением хлористого аммония. Активность обнаруживалась в осадке. Следовательно, она свойственна веществу, не являющемуся изотопом хрома. Чтобы проверить, не является ли это вещество изотопом титана, к облученному соединению хрома кроме ванадиевой соли добавлялась титановая, а затем титан осаждался путем гидролиза. Осадок не обнаруживал активности. Следовательно, мы должны рассматривать активное вещество по всей вероятности как тот же самый, что и в предыдущем случае, изотоп V^{52} , который появляется в результате ядерной реакции:



25. Марганец. Мы подвергали облучению двуокись марганца, в результате чего смогли обнаружить довольно значительную активность, убывающую в соответствии с наличием двух периодов полураспада: около 4 мин. и около 2,5 час. Слой половинного ослабления для электронов элемента с периодом в два с половиной часа равен $0,16 \text{ г/см}^2$.

Активный элемент с длинным периодом отделить от марганца не удалось, хотя для этой цели добавлялись хром и ванадий, осаждавшиеся впоследствии в виде хромовоокислого и ванадиевоокислого свинца. Следовательно, мы имеем дело по всей вероятности с изотопом марганца, который получается также и при облучении железа и кобальта, на что указывает совпадение периодов полураспада.

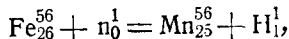
Желя определить активный элемент с 4-минутным периодом, мы подвергали облучению азотнокислый марганец, к которому затем добавлялось ванадиевое соединение, и ванадий осаждался в виде ванадиевоокислого свинца. Активность переходила в осадок. Подобный же опыт был произведен с добавлением хрома. И в этом случае осадок оказался активным, хотя и определенно в меньшей степени. Повидимому, основная активность свойственна изотопу V^{52} , причем ядерная реакция имеет вид:



Один и тот же активный ванадий может быть таким образом получен из хрома, ванадия и марганца (рис. 1).

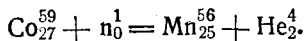
26. Железо. Этот элемент обнаруживает довольно значительную активность ($i = 0,05$), причем период полураспада составляет 2,5 часа¹⁷. Слой половинного ослабления равен $0,16 \text{ г/см}^2$. Активный продукт распада может быть отделен следующим способом: облученное железо растворяется в азотной кислоте, к раствору добавляется небольшое количество растворимой марганцевой соли, а затем марганец осаждается в виде MnO_2 путем прибавления хлорновато-

кислого натрия. Активность обнаруживается в марганцевом осадке. Вероятно, активный элемент образуется в согласии с реакцией



причем этот же самый элемент получается и из марганца.

27. К о б а л ь т. Кобальт также может быть активизирован, причем кривая распада дает тот же самый период, что и у железа. Активный элемент может быть химически выделен вместе с марганцем тем же способом, который описан для железа. Это наводит на мысль о том, что он опять может быть изотопом Mn^{56} . В таком случае ядерная реакция должна бы иметь вид:



Таким образом активный изотоп Mn^{56} может, повидимому, получаться из железа, кобальта и марганца (рис. 1).

28. Н и к е л ь. Не обнаруживает никакой активности даже после 13-часового облучения источником в 250 мС.

29. М е д ь. Проявляет среднюю активность, которой соответствует период, равный примерно 6 мин. Мы считаем вполне возможным, что появляющееся в данном случае активное ядро идентично с тем ядром, с которым мы встречаемся в случае цинка, т. е. что оно является изотопом меди.

30. Ц и н к. Проявляет слабую активность, причем кривая распада указывает на существование двух периодов, из которых один равен примерно 6 мин., а другой, значительно более длинный, еще не измерен.

Активный элемент с 6-минутным периодом был химически выделен,

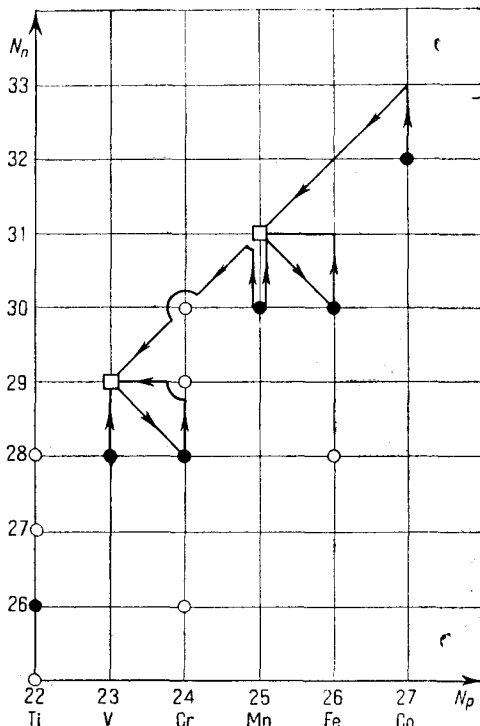


Рис. 1. На рисунке дана возможная схема превращений для элементов, порядковый номер которых лежит в интервале от 23 до 27. По оси абсцисс отложено число протонов в ядре, по оси ординат — число нейтронов. Устойчивые изотопы обозначены кружками: черными (●) если им соответствует более 20% атомов элементов, белыми (○) — в остальных случаях. Активные изотопы обозначены квадратами. Стрелки указывают направление превращений.

для чего облученный металл был растворен, к раствору были добавлены медь и никель, а затем медь осаждалась в виде сульфида или же собиралась электролитическим путем на цинковой пластинке. В обоих случаях медь уносила с собой активность. Осажденный же с помощью диметилглиоксима никель оказался неактивным.

Таким образом активный элемент является, вероятно, изотопом меди.

31. Галлий. Этот элемент обнаруживает активность умеренной силы, убывающую в соответствии с периодом полураспада примерно в 30 мин.

32. Мышьяк. Дает сильный эффект. Активность убывает с периодом около 1 суток. Слой половинного ослабления равен $0,16 \text{ кг/см}^2$. Мы пытались отделить активное вещество, добавляя галлий и германий и осаждая первый в виде ферроцианида, а второй в виде сульфида, удалив предварительно мышьяк. При этом осаждение галлия, было, повидимому, полным, в то время как в совершенстве отделения германия мы не уверены. В обоих случаях отделенное вещество оказывалось неактивным, что приводит к предположению об идентичности активного элемента с изотопом мышьяка. Однако поскольку реакция на германий дала несколько неопределенные результаты, мы не можем считать это предположение строго доказанным.

34. Селен. Этот элемент удалось слабо активизировать. Его период равен примерно 35 мин.

35. Бром. Бромистый аммоний в результате нейтронной бомбардировки оказался сильно активизированным. Кривая распада дала два периода, равные примерно 30 мин. и 6 час. Для определения активного элемента мы добавляли мышьяк и селен и затем осаждали их: первый в виде сульфида, второй — электролитически. Оба они оказались неактивными. Таким образом активный элемент является, повидимому, изотопом брома. Для проверки этого предположения добавлялись мышьяк и селен и затем осаждался бром в виде бромистого серебра. Осадок оказался активным. Мы полагаем, что два периода могут соответствовать двум активным изотопам Br^{80} и Br^{82} , образующимся из двух обычных изотопов Br^{79} и Br^{81} .

37. Рубидий. Азотнокислый рубидий проявил весьма слабую активность с периодом полураспада около 20 мин.

38. Стронций. Этот элемент, облучавшийся в течение 13 час. источником в 400 мС, не обнаружил активности.

39. Итрий. Этот элемент не обнаружил активности, несмотря на длившееся около 20 мин. облучение источником в 750 мС.

40. Цирконий. Окись циркония проявила крайне слабую активность с периодом в несколько минут. Возможно, что и ее следует приписать посторонним примесям.

42. Молибден. Этот элемент оказался весьма малоактивным. Кривая распада свидетельствует о наличии по меньшей мере двух периодов, из которых один равен примерно 15 мин., а другой более чем одним суткам.

44. Рутений. Не обнаружил активности после 40-минутного облучения источником в 750 мС.

45. Родий. Металлический родий удается сильно активизировать, причем кривая распада складывается из двух кривых с периодами, равными 50 сек. и 5 мин. Слой половинного ослабления для электронов элемента с периодом в 5 мин. равен $0,10 \text{ г/см}^2$.

46. Палладий. Под влиянием нейтронной бомбардировки приобретает умеренную активность. Кривая распада, определенная, правда, не очень точно, указывает, что период есть величина порядка 6 час. Слой половинного ослабления равен $0,03 \text{ г/см}^2$.

47. Серебро. Элемент, обладающий большой активностью. Кривая распада дает периоды примерно в 20 сек. и в 2 мин. (интенсивность последнего $i = 0,5$, слой половинного ослабления — $0,08 \text{ г/см}^2$).

48. Кадмий. Металлический кадмий удалось активизировать лишь в очень малой степени. Кривая распада указывает, что период несколько превышает 1 час.

50. Олово. Этот металл проявляет чрезвычайно слабую активность, которую, быть может, следует приписать посторонним примесям.

51. Сурьма. То же, что и олово.

52. Теллур. Обнаруживает слабую активность, убывающую в соответствии с периодом, равным примерно 1 часу.

53. Иод. Облучению подвергались как иод, так и иодистый аммоний. В обоих случаях была обнаружена сильная активность с периодом в 30 мин. Интенсивность $i = 0,4$. Слой половинного ослабления — $0,09 \text{ г/см}^2$. После добавления к раствору облученного иодистого аммония теллура и сурьмы активный элемент переходит в осадок вместе с иодом, выделяемым путем прибавления азотной кислоты. Он следует за иодом также и в том случае, если иод осаждается в виде иодистого серебра в присутствии теллура и сурьмы. Весьма вероятно, что мы имеем здесь дело с образованием активного изотопа иода.

55. Цезий. Цезий (виннокислый) проявляет весьма слабую активность. Соответствующий период измерен пока еще очень неточно.

56. Барий. В результате облучения гидрата окиси бария была обнаружена слабая активность. Кривая распада указывает, что период близок к 3 мин.

57. Лантан. Продолжает оставаться неактивным после 40-минутного облучения источником в 400 мС.

58. Церий. Этот элемент после 30-минутного облучения источником в 400 мС не обнаружил активности.

59. Празеодим. Препараты как этого элемента, так и других редких земель — Nd, Sm и Pr — были любезно предоставлены нам проф. Ролла из Флорентийского университета. Эти препараты являются весьма чистыми. Исследовались они в виде окислов.

Празеодим проявляет довольно слабую активность. Кривая рас-

пада указывает на существование периода распада в 5 мин., а также, быть может, на существование еще одного более длинного.

60. Неодим. Проявляет довольно слабую активность. Период около 1 часа.

62. Самарий. Также проявляет слабую активность. Период около 40 мин.

73. Тантал. Этот элемент после 2,5-часового облучения источником в 750 мС не обнаружил никакой активности.

74. Вольфрам. Проявляет чрезвычайно слабую активность, повидимому, с длинным периодом.

75. Рений. Этот элемент, несмотря на длившееся 10 мин. облучения источником в 750 мС, не обнаружил активности.

76. Осмий. Несмотря на 15-часовое облучение источником 450 мС активности не приобрел.

77. Иридий. Этот элемент приобретает сильную активность, убывающую в соответствии с периодом, равным примерно 20 час. Слой половинного ослабления равен $0,13 \text{ г/см}^2$.

Для установления химической природы активного элемента мы подвергали облучению четыреххлористый иридий, затем добавляли к нему осмий и рений и отделяли первый из них перегонкой в виде четырехоксида, а второй в виде сульфида. Оба оказались неактивными. Иридий же продолжал сохранять активность, которую, таким образом, следует приписать его изотопу.

78. Платина. Чистая платина (полученная от Гереуса) обнаружила чрезвычайно слабую активность, которой соответствует короткий период.

79. Золото. Этот металл проявляет довольно значительную активность. Период полураспада составляет около двух суток. Слой половинного ослабления равен $0,33 \text{ г/см}^2$.

Мы пытались отделить активное вещество, растворяя облученное золото в царской водке, добавляя к раствору платину и иридий и осаждая их в виде хлороплатината и хлороиридата. Оба осадка не проявили активности, в то время как золото ее все время сохраняло. Это показывает, что активное вещество является его изотопом. Золото продолжает оставаться активным и в том случае, если попробовать прибавлять ртуть и затем выпаривать ее.

80. Ртуть. После очень сильного облучения проявляет лишь крайне слабую активность, которая может быть объяснена наличием посторонних примесей.

81. Таллий. То же, что и ртуть.

82. Свинец. Этот элемент не приобрел активности даже после 10-часового облучения источником в 500 мС.

83. Висмут. То же, что и свинец.

90. Торий. До настоящего времени исследован в недостаточной мере. Азотнокислый торий, очищенный от его обычных β -активных продуктов распада, после облучения становился весьма активным. Кривая распада указывает на наличие по крайней мере двух периодов, один из которых не превышает 1 мин., а другой равен 15 мин.

92. Уран. Мы приведем здесь лишь основные результаты исследований этого элемента, так как его поведение недавно подвергалось уже обсуждению в другом месте¹⁸.

Помимо периодов в 10 сек., 40 сек. и 13 мин. нам впоследствии удалось определить присутствие еще одного, равного примерно 1,5 час. Интенсивность для каждого из них имеет порядок 0,5. Нам уже пришлось однажды рассматривать опыты, которые, повидимому, доказывают, что активный продукт распада с периодом в 13 мин. не является изотопом ни одного из элементов, порядковый номер которых лежит в интервале от 86 до 92 (эманация, экацезий, радий, актиний, торий, протактиний, уран). Эти опыты впоследствии были повторены в различных условиях, причем главной целью являлось получение отрицательного ответа при отождествлении элемента, соответствующего 13-минутному периоду, с протактинием. Этот ответ было чрезвычайно трудно получить вследствие малости периода доступного нам изотопа протактиния — UX_2 . Уже описанная нами реакция на марганец дает выход 13-минутного продукта распада, равный примерно 15%. Ее выход для UX_2 очень сильно зависит от условий опыта и может быть изменяем от 2 до 10%, причем принимается во внимание и естественный распад этого вещества.

Для выделения 13-минутного продукта распада значительно более эффективной является следующая реакция. Облученный азотнокислый уран растворяется в разбавленной соляной кислоте. Затем добавляется азотнокислый рений, после чего рений осаждается в виде сульфида добавлением гипосульфита. Этот осадок несет приблизительно 50% первоначальной активности, а иногда больше. Процент найденного в рениевом осадке UX_1 и UX_2 также меняется в зависимости от условий протекания реакции (в частности, от кислотности), но может быть сделан очень низким, пожалуй, даже меньшим 1%. Таким способом нам удалось отделить 13-минутный продукт распада и измерить его период, пользуясь препаратом урана, который предварительно совершенно не подвергался очистке от примесей UX . 90-минутный продукт обладает, повидимому, химическими свойствами, аналогичными свойствам 13-минутного, о чем мы можем заключить по тому, что во всех реакциях оба вещества всегда получаются в одном и том же процентном соотношении. Итак, в обоих случаях активность должна быть приписана элементам, порядковый номер которых больше 92, и которые являются, может быть, изотопами одного и того же элемента.

4. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ РАССМОТРЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обсудим теперь с теоретической точки зрения те процессы, которые могут происходить под влиянием нейтронной бомбардировки. Нельзя не отметить, что при современном состоянии теории ядра всякого рода высказывания могут носить лишь сугубо предварительный характер.

Все результаты опытов, изложенные в предыдущем разделе, мы можем суммировать в следующих немногих положениях.

1. В большинстве случаев элементы независимо от их атомного веса могут быть активизированы. С этой точки зрения между легкими и тяжелыми элементами вообще нельзя провести никакого различия.

2. Поперечное сечение соударения с нейтроном для наиболее интенсивно активизируемых элементов имеет порядок геометрического поперечного сечения ядра. Это означает, что соударение нейтрона с ядром в большинстве случаев вызывает появление активного атома.

3. Активное вещество иногда является изотопом исходного атома (порядкового номера Z), иногда же его порядковый номер ниже на одну или две единицы. В этом отношении между легкими и тяжелыми элементами различие, повидимому, имеется. Так, у легких элементов порядковый номер активного вещества обычно ниже Z , между тем как у пяти исследованных нами тяжелых элементов, не обладающих спонтанной радиоактивностью, активный продукт реакции всегда является изотопом бомбардируемого элемента.

4. Испускаемые электроны всегда обладают отрицательным зарядом; по крайней мере нам ни разу не удалось обнаружить присутствия позитронов.

Объяснение общего механизма возбуждения легких элементов, повидимому, не встречает каких-либо специфических трудностей. Очевидно, этот процесс обычно состоит в захватывании ядром ударяющегося о него нейтрона, вслед за чем немедленно следует выбрасывание α -частицы или протона. В том случае, когда энергия выбрасываемой α -частицы или протона имеет порядок нескольких миллионов вольт, время, необходимое для испускания частицы, согласно теории Гамова очень мало. Следовательно, довольно значительна вероятность того, что этот процесс совершится, прежде чем нейтрон покинет ядро. В результате этого процесса, который может длиться в течение промежутка времени порядка 10^{-20} сек., первоначальное ядро превращается в другое, обладающее большим атомным весом, чем это следует из значения его ядерного заряда, так как процесс поглощения нейтрона и испускания α -частицы или протона повышает отношение числа нейтронов к числу протонов в ядре. Это, вероятно, и служит причиной того, что мы всегда наблюдаем испускание отрицательных электронов. Процесс испускания электрона восстанавливает правильное значение отношения числа нейтронов к числу протонов и соответствует образованию устойчивого изотопа.

Поскольку атомный вес бомбардируемого элемента возрастает, потенциальный барьер вокруг ядра становится еще более серьезным препятствием для испускания тяжелых положительно заряженных частиц. С этой точки зрения становится понятным, почему испускание протонов и α -частиц делается очень маловероятным.

Однако теоретическое истолкование встречается с трудностями

при рассмотрении реакции другого типа, обычно совершающейся в случае тяжелых элементов, а именно, когда активный атом является изотопом исходного. Проще всего было бы предположить, что мы имеем дело с захватыванием соударяющегося нейтрона, в результате чего появляется неустойчивый изотоп бомбардируемого элемента с атомным весом, превосходящим атомный вес этого исходного элемента на единицу. Эта гипотеза, хорошо согласующаяся с наблюдаемым фактом испускания отрицательных электронов, приводит, однако, к серьезным трудностям, когда нам приходится переходить к объяснению процесса захватывания нейтрона ядром, находящимся в устойчивом или квази-устойчивом состоянии. Обычно считают, что нейтрон притягивается ядром только в том случае, если его расстояние от ядра имеет порядок 10^{-12} см. Следовательно, нейтрон с энергией в несколько миллионов вольт может находиться в ядре (т. е. испытывать сильно взаимодействие с составными частями ядра) только в течение промежутка времени порядка 10^{-21} сек., что является классически вычисляемым временем прохождения нейтрона через ядро. Нейтрон может быть захвачен ядром только в том случае, если в течение этого промежутка времени он сумеет потерять весь свой избыток энергии (например, испустив γ -квант). Если мы обычными методами вычислим вероятность этого процесса испускания, то получим значение слишком малое, чтобы им можно было объяснить наблюдаемое значение поперечного сечения. Желая сохранить гипотезу захватывания, можно допустить или что вероятность излучения γ -кванта (или совершения эквивалентного процесса образования пары электрон—позитрон) значительно больше обычно принимаемой, или же что вследствие каких-то непонятных нам при современной состоянии теории причин ядро может по крайней мере в течение 10^{-16} сек. оставаться в энергетическом состоянии, достаточно высоком для того, чтобы допустить испускание нейтрона.

В противоположность этой гипотезе можно предположить, что соударяющийся нейтрон не захватывается ядром, а лишь вызывает выбрасывание другого нейтрона. Этот процесс может быть описан следующим образом: в результате своего рода неупругого соударения первый нейтрон теряет часть своей энергии, переводя ядро в возбужденное состояние. Теоретически легко допустить, что именно такой процесс совершается в большом числе случаев соударения нейтрона с ядром. Если энергия возбуждения достаточно высока, ядро может, прежде чем отдать ее излучением γ -кванта, испустить нейтрон. Образующийся в результате такого процесса атом является изотопом исходного и обладает на единицу меньшим атомным весом. Возражение, которое можно выдвинуть против этой гипотезы, заключается в том, что при происходящем при этом уменьшении (вместо увеличения) числа нейтронов а priori более вероятным было бы испускание не отрицательного электрона, как это имеет место в действительности, а позитрона. Однако в нескольких исследованных случаях тяжелых элементов, активизирующихся под влиянием нейтронной бомбардировки и превращающихся в свои

ТАБЛИЦА 1

| Порядк. номер | Изотопы | Период полурасп. | Интенсивность | Средн. эн. β -лучей в млн. V | γ -лучи | Активные изотопы |
|---------------|--------------------|------------------|---------------|------------------------------------|----------------|------------------------------------|
| 1 H | 1, 2 | — | — | — | — | — |
| 3 Li | 6, 7 | — | — | — | — | — |
| 4 Be | 9 | ? | ? | — | — | — |
| 5 B | 10, 11 | ? | ? | — | — | — |
| 6 C | 12, 13 | — | — | — | — | — |
| 7 N | 14, 15 | — | — | — | — | — |
| 8 O | 16, 17, 18 | — | — | — | — | — |
| 9 F | 19 | 9 сек. | с. | 2 | да | Na ¹⁶ (?) |
| 11 Na | 23 | 40 сек. | ср. | — | — | — |
| 12 Mg | 24, 25, 26 | 40 сек; 15 час. | ср.; ср. | —; 0,5 | ?; да | —; Na ²⁴ |
| 13 Al | 27 | 12 мин.; 15 час. | с.; с. | 0,6; 0,5 | да; да | —, Na ²⁴ |
| 14 Si | 28, 29, 30 | 3 мин. | с. | 1,3 | да | Al ²⁸ |
| 15 P | 31 | 3 мин.; 3 часа | ср.; с. | —; 0,7 | ? | Si ³² |
| 16 S | 32, 33, 34 | 13 суток | ср. | 0,8 | — | P ³² |
| 17 Cl | 35, 37 | 13 суток | ср. | 0,8 | — | P ³² |
| 20 Ca | 40, 42, 43, 44 | — | — | — | — | — |
| 22 Ti | 46, 47, 48, 49, 50 | 3 мин. | сл. | — | — | — |
| 23 V | 51 | 4 мин. | ср. | 1,3 | — | V ⁵² (?) |
| 24 Cr | 50, 52, 53, 54 | 4 мин. | ср. | 1,3 | да | V ⁵² |
| 25 Mn | 55 | 4 мин.; 150 мин. | ср.; ср. | —; 1,3 | — | V ⁵² ; Mn ⁵⁶ |
| 26 Fe | 54, 56 | 150 мин. | ср. | 1,3 | да | Mn ⁵⁶ |
| 27 Co | 59 | 150 мин. | сл. | — | — | Mn ⁵⁶ |
| 28 Ni | 58, 60, 61, 62, | — | — | — | — | — |
| 29 Cu | 63, 65 | 6 мин. | ср. | — | — | — |
| 30 Zn | 64, 66, 67, 68, 70 | 6 мин.; ? | сл.; сл. | — | — | — |

| | | | | | | |
|-------|---|-----------------|----------|------------|----|-------------------------------------|
| 31 Ga | 69, 71 | 30 мин. | ср. | 1,3 | да | As ⁷⁶ |
| 33 As | 75 | 1 сутки | с. | | | |
| 34 Se | 74, 76, 77, 78, 80, 82 | 35 мин. | сл. | | | |
| 35 Br | 79, 81 | 30 мин.; 6 час. | с.; с. | —; 0,7 (?) | — | Br ⁸⁰ ; Br ⁸² |
| 37 Rb | 85, 87 | 20 мин. | сл. | | | |
| 38 Sr | 86, 87, 88 | — | — | | | |
| 39 Y | 89 | — | — | | | |
| 40 Zr | 90, 91, 92, 94, 96 | ? | сл. | | | |
| 42 Mo | 92, 94, 95, 96, 97, 98, 100 | 15 мин.; (?) | сл.; сл. | | | |
| 44 Ru | 96, 98, 99, 100, 101, 102, 104 | — | — | | | |
| 45 Rh | — | 50 сек.; 5 мин. | с.; ср. | 0,8 | — | J ¹²⁸ |
| 46 Pd | — | 6 час. (?) | сл. | 0,3 | — | |
| 47 Ag | 107, 109 | 20 сек.; 2 мин. | с.; с. | —; 0,7 | — | |
| 48 Cd | 110, 111, 112, 113, 114, 116 | 70 мин. | сл. | | | |
| 50 Sn | 112, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 124 | — | — | | | |
| 51 Sb | 121, 123 | ? | ? | | | |
| 52 Te | 122, 123, 124, 125, 126, (127), 128, 130 | — | — | | | |
| 53 J | 127 | 30 мин. (?) | с. | | | |
| 55 Cs | 133 | 30 мин. | сл. | 0,7 | — | J ¹²⁸ |
| 56 Ba | 135, 136, 137, 138 | (?) | сл. ? | | | |
| 57 La | 139 | 3 мин. | сл. | | | |
| 58 Ce | 140, 142 | — | — | | | |

(продолжение табл. 1)

| Порядк. номер | Изотопы | Период полурасп. | Интенсивность | Средн. эн. β -лучей в млн. V | γ -лучи | Активные изотопы |
|---------------|---|-------------------------------------|----------------|------------------------------------|----------------|------------------|
| 59 Pr | 141 | 5 мин. | сл. | | | |
| 60 Nd | 142, 143, 144, 145, 146 | 1 час. | сл. | | | |
| 62 Sm | 144, 147, 148, 149, 150, 152, 154 | 40 мин. | сл. | | | |
| 73 Ta | 181 | — | — | | | |
| 74 W | 182, 183, 184, 186 | (?) | сл. (?) | | | |
| 75 Re | 185, 187, | — | — | | | |
| 76 Os | 186, 187, 188, 189, 190, 192 | — | — | | | |
| 77 Ir | — | 20 час. | с. | 1,1 | да | Ir |
| 78 Pt | — | (?) | сл. (?) | | | |
| 79 Au | — | 2 суток | с. | 0,3 | — | Au |
| 80 Hg | 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204 | (?) | (?) | | | |
| 81 Tl | 203, 205 | (?) | (?) | | | |
| 82 Pb | 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209 | — | — | | | |
| 83 Bi | 209 | — | — | | | |
| 90 Th | 232 | 1 мин. (?) 15 мин. | с.; с. | | | |
| 92 U | 238 | 15 сек.; 40 сек.; 13 мин.; 100 мин. | с.; с.; с.; с. | | да | |

см. стр. 19-20

изотопы, когда известны изотопы, составляющие соседние элементы, всегда возможным конечным продуктом превращений является устойчивый изотоп элемента $Z + 1$, обладающий атомным весом на единицу меньшим, чем исходный.

Кроме того надо иметь в виду, что если для неустойчивого ядра энергетически возможно испускание как электрона, так и позитрона, то теория β -лучей¹⁹ указывает, что при прочих равных условиях более вероятным является испускание электрона.

В заключение следует отметить, что в настоящее время нельзя еще твердо остановиться ни на одной из вышеизложенных взаимоисключающих гипотез и для разрешения создавшегося положения необходимо предпринять дальнейшие экспериментальные исследования.

5. ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ

В табл. 1 (стр. 948) сведены основные результаты исследований. В первом столбце приводятся порядковый номер и обозначение исследуемых элементов. Во втором столбце — изотопы данного элемента, причем жирным шрифтом отмечены изотопы, которым соответствует более 20% атомов элемента. Третий столбец дает период полураспада. Черта означает, что в результате исследований радиоактивности не обнаружено. В четвертом столбце дается грубая оценка интенсивности: с. (сильная), ср. (средняя) и сл. (слабая). В пятом столбце указывается средняя энергия электронов в миллионах вольт. Эти данные получены в результате довольно грубой экстраполяции, основанной на значениях коэффициента поглощения для обычных β -активных веществ, не дающих сильного γ -излучения (RaE и UX₂). Шестой столбец указывает, присутствуют ли γ -лучи. Черта указывает, что, несмотря на специальные попытки, обнаружить присутствие γ -лучей не удалось. В седьмом столбце указан вероятный активный продукт распада. Ради упрощения мы всюду полагали, что имеет место захватывание нейтрона. Если же предположить, что нейтрон был испущен, то соответствующие атомные веса следует понизить на 2 единицы. В случае наличия двух или более периодов данные столбцов четвертого, пятого, шестого и седьмого относятся к различным периодам в порядке их написания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fermi, Ric. Scient. 1, 283, 330, 1934.
 2. Amaldi, d'Agostino, Fermi, Rasetti, Segré, Ric. Scient. 1, 452, 652, 21, 1934.
 3. Fermi, Rasetti, d'Agostino, Ric. Scient. 1, 533, 1934.
 4. Fermi, Nature 133, 757, 898, 1934.
 5. Fermi, Nuovo Cim. 11, 1934.
 6. Amaldi, Fermi, Rasetti, Segré, Nuovo Cim. 11, 442, 1934.
 7. Amaldi a. Segré, Nuovo Cim. 11, 452, 1934.
 8. D'Agostino, Gz. Chim. Ital. (печатается), 1934.
 9. Curie et Joliot, C. r. Acad. Sci. Paris. 198, 254, 561, 1934.
 10. Wertenstein, Nature 133, 564, 1934.
 11. Frisch, Nature 133, 721, 1934.
 12. Cockcroft, Gilbert a. Walton, Nature 133, 328, 1934.
 13. Neddermeyer a. Anderson, Phys. Rev. 45, 498, 1934.
 14. Lauritse, Crane a. Harper, Science 79, 234, 1934,
 15. Thibaud, C. r. Acad. Sci. Paris. 197, 447, 1933.
 16. Curie, Joliot et Preiswerk, C. r. Acad. Sci. Paris 198, 2089, 1934.
 17. См. также Fleischmann, Naturwiss. B. 22, 434, 1934.
 18. Fermi, Nature 133, 898, 1934.
 19. Fermi, Z. Physik. B. 88, 161. 1934.
-