ИСКУССТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ, СОЗДАВАЕМАЯ НЕЙТРОННОЙ БОМБАРДИРОВКОЙ — II *

Э. Амальди, О. д'Агостино, Э. Ферми, Б. Понтекорво, Ф. Разетти и Э. Сегрэ

Введение

В этой статье описаны некоторые дальнейшие результаты по искусственной радиоактивности, вызываемой нейтронами, полученные в физической лаборатории Римского университета после опубликования нашей первой статьи [1] на ту же тему. Основные результаты данной работы были уже опубликованы некоторыми из нас в ряде предварительных сообщений [2].

Наиболее интересные новые результаты получены по вопросу о влиянии веществ, содержащих водород, на активацию некоторых элементов при облучении их нейтронами (§ 1). Мы даем объяснение этого явления, принимая, что нейтроны замедляются при столкновениях с ядрами водорода (§ 2). Некоторые аномально-большие эффективные сечения для поглощения медленных нейтронов дискутируются в § 3. Во многих случаях аномальное поглощение связано с испусканием γ-лучей (§ 4). В § 5 описаны некоторые опыты, сделанные для оценки энергии нейтронов. Опыты по рассеянию медленных нейтронов описаны в § 6. В § 7 описаны опыты по получению медленных нейтронов с помощью веществ, которые не содержат водорода. В § 8 полученные выше результаты дискутируются с точки зрения теории. В § 9 и 10 описаны химические методы для разделения радиоактивных изотопов, а также улучшения в технике измерений. Результаты систематического исследования различных элементов даются в § 11. Они собраны в таблицу, помещенную в конце статьи.

§ 1. Влияние содержащих водород веществ на активацию

В нашей предыдущей работе мы отмечали некоторые нерегулярности в интенсивности активации серебра при облучении его нейтронами от источника, состоящего из радона (эманация радия) и бериллия (Rn + Be). Эти отступления, несомненно, зависели от

---

* Proc. Roy. Soc. A, 149, 522, 1935, перев. Л. В. Грошева.

каких-то не совсем ясных геометрических факторов. Дальнейшее исследование показало, что активация сильно зависит от тел, окружающих источник нейтронов. В частности она сильно возрастала при окружении источника нейтронов и активируемого вещества большим количеством воды или парафина. Сразу же выяснилось, что этот эффект вызывается наличием водорода, так как вещества, не содержащие водород, не давали подобного эффекта (см. § 7).

Для выяснения того, чем вызывается сильная активация — нейтронами или γ-лучами, которые в большом количестве испускались нашим источником, мы повторили опыт, применяя 100 *мг* радия в отсутствии бериллия. Наведенная радиоактивность в этом случае отсутствовала. Отсюда следует, что наблюдаемый эффект вызывается нейтронами. Это подтверждается также и тем, что мы наблюдали тот же самый протонный эффект с нейтронами от Po + Be-источника*; при этом интенсивность эффекта находилась в согласии с числом испускаемых нейтронов.

Не всякое вещество, которое активируется под действием нейтронов, показывает увеличение активности при облучении его под водой. Среди веществ, активность которых сильно изменяется, находятся: Na (15 час.)**; Al (2,3 мин.); V (3,75 мин.); Ag (22 сек, 2,3 мин.); Cu (5 мин.); Rh (44 сек, 3,9 мин.); J (25 мин.). Активность других элементов или отдельных периодов распада (в случае возникновения нескольких радиоактивных элементов) при облучении через воду не изменяется. Сюда относятся: Si (2,3 мин.); Al (10 мин.); Mg (40 сек.); Zn (5 мин.). Мы наблюдали, что во всех случаях, где активные элементы являются изотопами облучаемого (около 20 случаев), активность увеличивается в присутствии воды.

Для того чтобы можно было приблизительно измерять чувствительность различных активаций в отношении действия воды и парафина, мы выражаем ее в условной шкале. Цилиндр (около 2 *см* диаметром и 5 *см* высотой) исследуемого вещества облучается нейтронами от источника, который находится в центре облучаемого тела. Источник и цилиндр с помощью тонкой металлической подставки располагаются на некотором расстоянии от других предметов. После надлежащего времени облучения измеряется полученная в цилиндре активность. Затем цилиндр окружается большим цилиндрическим куском парафина (диаметр 27 *см*, высота 20 *см*) и вновь облучается нейтронами при прежних геометрических условиях и в продолжение того же промежутка времени. Отношение активностей в присутствии и отсутствии парафина принимается за меру чувствительности данной активации в отношении водородсодержащего вещества. Обозначим это отношение через α. В этой шкале $\alpha = 1$ означает, что данное вещество не обнаруживает увеличения активности при облучении его в парафине. Конечно, это определение коэфициента чувствительности является чисто эмпирическим,

* Po, в отличие от Rn с его продуктами распада, испускает лишь мягкие γ-лучи и при этом в небольшом количестве (*Прим. перев.*).

** В скобках указаны периоды полураспада активных элементов (*Прим. перев.*).

так как он до некоторой степени зависит от геометрических условий. Наблюдаемые коэфициенты чувствительности, отличные от единицы, менялись от $\alpha = 1{,}6$ для U (13 мин., 100 мин.) до $\alpha = 40$ для V (3,75 мин.). Однако нужно отметить, что последнее значение не является наибольшим, так как многие вещества совсем не активируются при облучении их в воздухе, но активируются под водой, но и в этом случае достаточно слабо.

Увеличение активности, вызываемое присутствием парафина или воды, много больше, если источник и облучаемое вещество расположены на расстоянии нескольких сантиметров друг от друга (см. § 5).

§ 2. Интерпретация с помощью медленных нейтронов

Описанные в предыдущем параграфе опыты могут быть объяснены на основании гипотезы, которая утверждает, что эффект воды или, вернее, водорода вызывается рассеянием и замедлением первичных нейтронов при столкновении их с водородными ядрами.

Легко показать, что при столкновении нейтрона с протоном энергия нейтрона уменьшается в среднем в e раз. Отсюда следует, что после 10 столкновений она уменьшается приблизительно до $^1/_{20\,000}$ ее первоначального значения. Принимая начальную энергию равной $4 \cdot 10^6$ eV, получим для энергии нейтрона после 10 столкновений значение 200 eV. Необходимо меньше 20 столкновений, чтобы энергия нейтронов уменьшилась до значений, соответствующих тепловому равновесию.

Описанные выше явления могут быть теперь объяснены на основании допущения, что медленные нейтроны захватываются некоторыми ядрами много легче, чем быстрые. В этом и последующих параграфах при обсуждении результатов наших опытов мы будем придерживаться этой гипотезы.

Увеличение активности, вызываемое присутствием водорода, может быть приписано как рассеянию нейтронов, которое увеличивает поток нейтронов через активируемое вещество, так и большой эффективности столкновения медленных нейтронов по сравнению с быстрыми. Для того чтобы показать, что главное значение имеет второй фактор, мы провели следующий опыт.

Серебряный цилиндр облучался нейтронами от источника Rn + + Be, содержащего 350 милликюри эманации. Расстояние между источником и цилиндром было 20 *см*. Если облучение производилось в воздухе, то после облучения цилиндр не давал никакой активности. Однако если окружить источник цилиндрическим сосудом с водой (диаметр 14 *см*, высота 14 *см*), не меняя расстояния от источника до облучаемого тела, то серебряный цилиндр приобретал большую активность (около 100 импульсов в минуту в наших счетчиках). Этот опыт показывает, что медленные нейтроны более эффективны, чем быстрые. Действительно, при окружении источника водой число попадающих на серебро нейтронов

в 1 сек. не увеличивается (возможно, оно немного уменьшается вследствие поглощения), в то время как активность серебра сильно возрастает. Отсюда можно заключить, что активность, рассчитанная на один падающий на вещество нейтрон, сильно возрастает при замедлении нейтронов.

§ 3. Поглощение медленных нейтронов

Тот факт, что эффективное сечение для активации многих элементов много больше для медленных нейтронов, чем для быстрых, заставляет выяснить вопрос о том, будут ли медленные нейтроны сильно поглощаться в тех веществах, которые они наиболее сильно активируют. С этой целью мы провели систематическое исследование поглощения медленных нейтронов в различных веществах.

Основная цель этого исследования заключалась в отыскании элемента с аномально большим коэфициентом поглощения для медленных нейтронов, и поэтому мы применяли обычно возможно более тонкие слои поглощающего вещества. Установка для измерения поглощения показана на рис. 1. Источник нейтронов, трубка с Rn+Be, помещался внутри парафинового цилиндра P (диаметр 24 *см*, высота 14 *см*) на расстоянии приблизительно 2 *см* от его верхней поверхности. Второй парафиновый цилиндр P' ставился на первый. В его нижней части вырезалось углубление диаметром в несколько сантиметров и глубиной 2 или 3 *см*. Внутрь этого углубления помещался детектор медленных нейтронов — родиевая пластинка (иногда применялась серебряная пластинка). После облучения нейтронами в продолжение определенного времени измерялась активность этой пластинки один раз в отсутствии поглощающего вещества, другой раз с ним; при этом во втором случае пластинка помещалась между двумя слоями поглощающего вещества, как это показано на рис. 1 (A — два слоя поглощающего вещества). Отношение активностей, полученных в том и другом случае, дает поглощение нейтронов в данном веществе. В рассматриваемых опытах, а также во многих других мы обычно применяли как детектор для медленных нейтронов родиевую пластинку ввиду ее очень большой активности. Это позволило производить очень точные измерения с помощью ионизационной камеры. Кроме того, из двух периодов родия—44 сек. и 3,9 мин. — практически важен лишь первый, что позволяет легко повторять измерения.

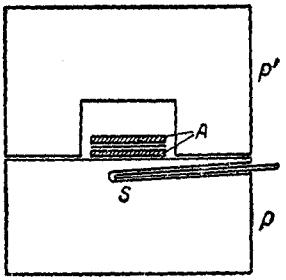

Рис. 1.

Измерения показали, что толщина поглощающего слоя δ, необходимая для уменьшения числа нейтронов в два раза *, меняется

* Более точно δ означает толщину поглощающего слоя, необходимого для уменьшения активности детектора в два раза. Приведенная в тексте

для различных элементов в довольно широких пределах. Для некоторых элементов эта величина чрезвычайно мала; например, мы нашли для бора $\delta = 0{,}004$ *г/см²*, для иттрия $\delta = 0{,}015$ *г/см²*, для кадмия $\delta = 0{,}014$ *г/см²*. Для других элементов δ в несколько тысяч раз больше; например, несколько сантиметров свинца поглощают меньше, чем тонкий слой бора в несколько миллиграмм на квадратный сантиметр.

Пересчитывая коэфициенты поглощения на эффективное сечение для активации при столкновении медленного нейтрона с ядром, мы нашли в ряде случаев неожиданно большие значения, например, $\sigma = 3000 \cdot 10^{-24}$ *см²* для B, $\sigma = 7000 \cdot 10^{-24}$ для Y, $\delta = 10\,000 \cdot 10^{-24}$ для Cd. Это последнее значение является наибольшим из всех найденных до сих пор *. Замечательно то, что эти эффективные сечения во много раз больше геометрических поперечных сечений ядра, в то время как для быстрых нейтронов эффективные сечения и геометрические поперечные сечения одного и того же порядка [3]. Действительно, нам непосредственно удалось показать, что для бора поглощение быстрых нейтронов по крайней мере в 1000 раз меньше, чем для медленных.

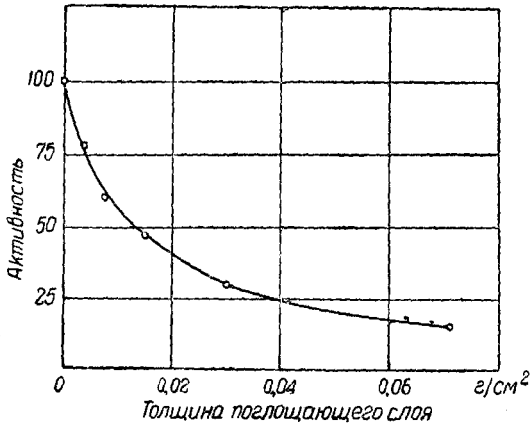

Рис. 2.

В произведенных измерениях поглощения нейтронный пучок не является однородным. В самом деле, кривая поглощения не спадает экспоненциально — коэфициент поглощения нейтронов постепенно уменьшается с увеличением толщины поглощающего слоя, как это можно видеть, например, из кривой поглощения для кадмия, приведенной на рис. 2. Нужно отметить, что толщина слоя, необходимая для поглощения половины нейтронов, несколько зависит от расположения парафина, так как это изменяет среднюю скорость нейтронов. Например поглощение нейтронов внутри вырезанного в парафине углубления больше, чем на внешней стороне парафина.

величина δ будет совпадать с приводимым в примечании значением δ лишь в том случае, если поглощающий слой не меняет скоростной спектр проходящих через него нейтронов. Величину δ ради краткости условимся называть в дальнейшем „полупоглощающим слоем" (*Прим. перев.*).

* Для σ в последнее время найдены еще большие значения. Для гадолиния $\delta = 30000 \cdot 10^{-24}$ *см²*. См. [17] (*Прим. перев.*).

§ 4. Испускание γ-лучей при захвате нейтрона ядром

В связи с аномально большим поглощением медленных нейтронов необходимо более детально исследовать сам процесс поглощения. Наиболее простое допущение заключается в том, что нейтрон захватывается ядром с образованием изотопа с массой, на единицу бо́льшей массы исходного элемента. Если этот более тяжелый изотоп неустойчив, то можно ожидать сильной наведенной радоактивности для элементов с большим поглощением. Это имеет место, например, для индия и иридия, в случае которых, как известно, образуются радиоактивные изотопы. Грубая оценка активности активируемого вещества и числа поглощаемых нейтронов показывает, что приблизительно на каждый акт поглощения нейтрона образуется один активный атом. В других случаях было установлено, что аномально сильное поглощение не связано с появлением наведенной активности, по крайней мере значительной (B, Y, Cd). В этих случаях мы могли бы ожидать, что захват нейтронов сопровождается образованием устойчивых ядер. Очевидно, что это более легко может происходить для элементов, обладающих многими устойчивыми изотопами, отличающимися по атомного весу на единицу (Cd, Hg). Предполагая простой захват нейтрона, мы могли бы ожидать, что в обоих случаях процесс поглощения сопровождался бы испусканием γ-лучей, энергия которых соответствует энергии связи нейтрона в ядре. О наличии подобного γ-излучения для случая быстрых нейтронов имеются указания Ли[4].

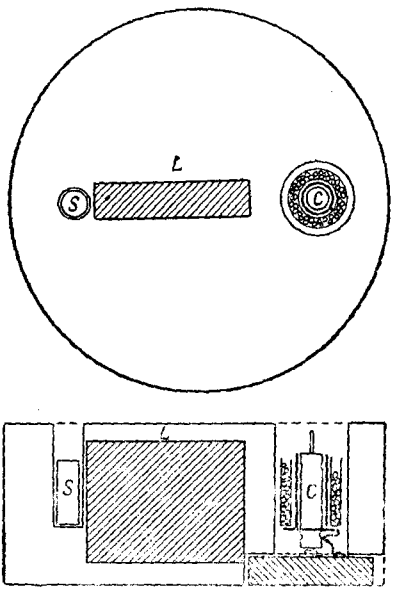

Рис. 3.

В случае медленных нейтронов нам удалось установить для некоторых элементов наличие подобной довольно сильной γ-радиации с помощью следующего опыта.

Po + Be-источник нейтронов S в 60 милликюри (рис. 3) помещался в парафин вместе с нашим стандартным счетчиком Гейгер-Мюллера C. Свинцовый экран L толщиной в 10 *см* служил для защиты счетчика от γ-лучей источника. Счетчик был окружен слоем свинца толщиной в 2 *мм*. В этих условиях счетчик давал около 30 импульсов в минуту. Небольшой цилиндрический слой различных веществ помещался вокруг счетчика, с внешней стороны свинцового слоя. Мы наблюдали обычно заметное увеличение числа

импульсов для случая сильно поглощающих веществ. Это имело место, например, для Co, Cd, Y, Cl, Ir, Au, Hg, где число импульсов иногда увеличивалось больше чем в два раза. Исключение в этом отношении показывают бор и литий, которые не дают никакого γ-излучения, несмотря на сильное поглощение медленных нейтронов. Было установлено, что для этих элементов поглощение медленных нейтронов связано с испусканием тяжелых частиц (см. § 11). Такое испускание тяжелых частиц теоретически возможно лишь для очень легких элементов, для которых потенциальный барьер ядра достаточно низок.

Следующие опыты показывают, что описанное выше γ-излучение вызывается медленными нейтронами. γ- излучение отсутствует, если удалить парафин. Кроме того, эффект сильно уменьшается при окружении исследуемого вещества и счетчика экраном из бора.

§ 5. Энергия медленных нейтронов

Было бы очень важно как-нибудь оценить среднюю энергию медленных нейтронов, вызывающих в веществе активность. В этом параграфе мы описываем некоторые попытки, сделанные нами в этом направлении.

Мы уже отмечали, что средняя энергия нейтронов уменьшается в e раз при каждом упругом столкновении с протоном, если только энергия велика по сравнению с энергией теплового движения. Если энергия нейтронов действительно была уменьшена до тепловой, то можно было бы ожидать, что процесс диффузии зависел бы от температуры. Мы попытались обнаружить этот эффект с помощью следующего опыта.

Детектор из родия или серебра облучался от источника нейтронов Rn + Be в одних и тех же геометрических условиях один раз в парафине при температуре 200° C, другой раз при 20° C в смеси бензина и пентана, которая при этой температуре имела ту же плотность и тот же состав, что и парафин при 200° C. В двух проведенных сериях в пределах 2% не было найдено никакой разницы в активации в том и другом случае. Смесь заполняла цилиндрический сосуд диаметром 26 *см* и высотой 15 *см*. Детектор помещался на оси цилиндра, на расстоянии 1 *см* под поверхностью. Источник располагался также на оси 2 *см* ниже. Опыт показал, что температура не влияет на активность, по крайней мере в данных условиях. Это можно было бы интерпретировать тем, что энергия активирующих нейтронов больше энергии теплового движения. Однако это не совсем убедительно, так как неизвестна для медленных нейтронов зависимость как эффективного сечения для активации, так и средней длины свободного пути от скорости.

Непосредственный метод измерения или по крайней мере установления верхнего предела для энергии медленных нейтронов заключался бы в измерении средней ионизации, вызываемой при каждом столкновении медленного нейтрона с ядром. Это может быть сделано измерением полной ионизации в камере, наполненной водо-

родом, или же непосредственным измерением ионизации в отдельном процессе посредством линейного усилителя. В обоих методах действие медленных и быстрых нейтронов может быть разделено помещением перед камерой тонкого слоя бора. Мы пытались осуществить подобные опыты, но они пока еще не дали определенных результатов.

Мы исследовали, будет ли наблюдаемое увеличение активности, вызываемое парафином, иметь место также с другими источниками нейтронов. Мы проделали это с нейтронами, испускаемыми Be при облучении его γ-лучами радия [5], и нашли с этим источником большой эффект. Это показывает, что получающиеся в парафине медленные нейтроны обладают меньшими скоростями по сравнению с нейтронами, возникающими при облучении Be γ-лучами.

§ 6. Рассеяние и диффузия медленных нейтронов

В связи с измерениями поглощения, описанными в § 3, мы грубо провели также исследование рассеяния нейтронов некоторыми элементами. Экспериментальная установка показана на рис. 4. Источник нейтронов S вкладывался в парафиновый цилиндр P, как это описано в § 3. Детектор—родиевая пластинка—помещался на верхней поверхности парафина. Активность детектора измерялась один раз в присутствии исследуемого вещества, которое располагалось слоем над родиевой пластинкой, другой раз без него. В некоторых случаях было установлено увеличение активности при наличии исследуемого вещества. Это указывает на действие нейтронов, рассеянных исследуемым веществом в обратном направлении. Например слой углерода толщиной в несколько сантиметров увеличивает активность детектора в 5 раз. Аналогичные результаты были найдены для некоторых легких элементов (Be, C, Si). Тяжелые элементы дают обычно много меньший эффект. Бор, обладающий большим коэфициентом поглощения, совсем не увеличивает активности детектора. Это показывает, что аномально большое поглощение этого элемента вызывается, главным образом, истинным поглощением, а не рассеянием. Мы повторили тот же самый опыт с водой. Полученные результаты для зависимости интенсивности активности пластинки от толщины рассеивающего слоя воды указаны на рис. 5. Аналогичные результаты получаются, если вместо воды употреблять парафин.

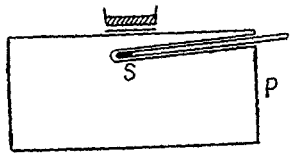

Рис. 4.

Другие опыты по рассеянию были сделаны с помощью установки, указанной на рис. 6. В центре парафинового цилиндра диаметром 13 *см* и высотой 11 *см* помещается источник нейтронов S. Детектор — серебряный или родиевый цилиндр R — распола-

гается на расстоянии 30 *см* от источника. Между источником и детектором помещается экран из исследуемого вещества *D*. Его размеры таковы, что на него падают все нейтроны, которые могли бы попасть на детектор из парафинового цилиндра. Разность активностей, измеренных с экраном и без него, дает меру

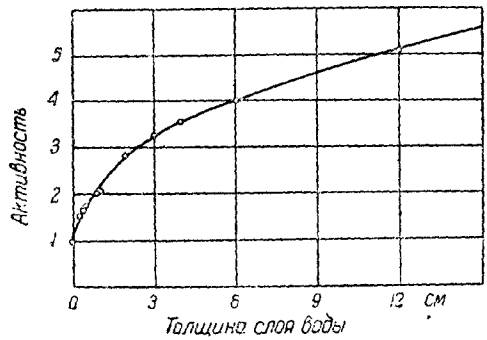

Рис. 5.

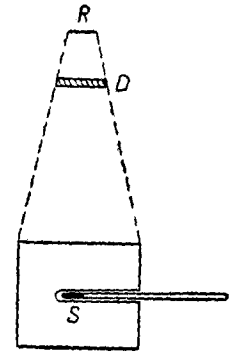

Рис. 6.

эффекта рассеяния плюс поглощения. Мы нашли с помощью этой установки, что слой парафина 0,5 *г/см*^{2} уменьшает активность серебра до половинного значения. Было установлено также, что поглощение не следует экспоненциальному закону. Аналогичные результаты получаются, если рассеивателем брать воду. Из этих опытов мы можем вывести порядок величины средней длины свободного пути медленных нейтронов в воде и парафине — она сравнима с наблюдаемой толщиной слоя, необходимой для уменьшения активности детектора в два раза.

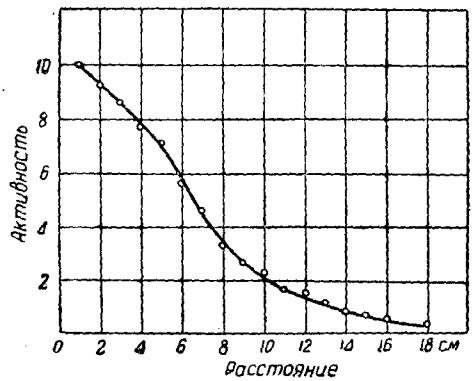

Рис. 7.

Для углерода этот „полупоглощающий слой" составляет около 5 *г/см*^{2}. Свинец толщиной в 4 *г/см*^{2} дает лишь слабое уменьшение активности, которое обязано, главным образом, рассеянию.

Другая серия опытов была проведена для того, чтобы установить, как зависит интенсивность активации родия в воде от расстояния между источником и детектором. Источник погружался в резервуар с водой размерами $40 \times 40 \times 100$ *см*^{3} и измерялась с помощью ионизационной камеры наведенная активность родие-

вой пластинки для различных расстояний ее от источника. Результаты приведены на рис. 7, где построена зависимость активности пластинки от расстояния. Аналогичные опыты были проделаны с 2% раствором борной кислоты и воде. Полученная кривая похожа на приведенную, отличаясь от нее по величине интенсивности, сильно уменьшенной ввиду поглощения нейтронов бором.

На основании этих опытов можно вывести следующую картину замедления нейтронов. Большая часть процесса диффузии имеет место тогда, когда первичные нейтроны обладают еще большой частью своей начальной энергии, столкнувшись с ядрами водорода всего несколько раз. Когда скорость нейтронов уменьшается до значений, при которых поглощение в боре становится значительным, средняя длина свободного пути в водороде становится малой, и процесс диффузии по достижении этой стадии замедления ограничивается лишь малым объемом. Этим объясняется также и тот факт, что коэфициент поглощения бора для нейтронов в воде почти не зависит от расстояния от источника.

§ 7. Влияние на активацию веществ, не содержащих водород

Мы попытались выяснить, не дают ли эффект увеличения активности также вещества, не содержащие водород. Ввиду большого количества материала, необходимого для проведения данных опытов, можно было исследовать лишь небольшое число веществ: Pb, SiO_2, C, Fe. Во всех случаях, за исключением железа, было установлено увеличение активности родия. При описанных ниже геометрических условиях эффект увеличивался от 2 до 5 раз, в то время как в воде это увеличение могло бы быть в несколько сот раз. Наблюдаемое увеличение активности вызывается, главным образом, уменьшением скорости нейтронов, а не рассеянием их. Это доказывается тем фактом, что активация кремния при данных условиях не увеличивается; кроме того, тонкий слой кадмия сильно уменьшает активацию родия. Эти факты кажутся странными, особенно для свинца, так как здесь было бы трудно объяснить замедление нейтронов упругими столкновениями.

Опыты проводились следующим образом. Мы составили из кусков свинца куб со сторонами 50 *см*, в центре которого помещался источник нейтронов, а на расстоянии 10 *см* от него — детектор из родия. Наблюдаемая активность была приблизительно в три раза больше, чем в тех же геометрических условиях в отсутствии свинца. Аналогичные результаты получаются с серебряным детектором вместо родиевого, в то время как для детектора из кремния совсем не наблюдается увеличения активности. Этот факт указывает на то, что скорость нейтронов уменьшается при столкновении их с ядрами свинца. То же самое подтверждается наблюдением, что введение поглощающего слоя кадмия в 1 *г/см*^{2} уменьшает активность родия в свинце в два раза. Сравнивая это

поглощение нейтронов кадмием с поглощением того же элемента для медленных нейтронов в воде („полупоглощающий слой" равен 0,014 *г/см*^{2}), можно заключить, что средняя энергия нейтронов в свинце не так мала, как в воде.

Аналогичные опыты были выполнены с графитовым цилиндром объемом 3 *л*. Источник нейтронов помещался в центре цилиндра, а родиевый детектор—на расстоянии 5 *см* от него. Увеличение активности было приблизительно таким же, как и в случае свинца. Поглощение нейтронов кадмием в данном случае было не меньше, чем в предыдущем. Аналогичные результаты были получены с кремнеземом, взятом в виде кизельгура. Отсутствие подобного эффекта для железа объясняется, вероятно, его относительно большим поглощением.

Из этих опытов мы заключаем, что большинство веществ обладает свойством увеличивать активацию. При количественном исследовании наведенной нейтронами радиоактивности нужно всегда учитывать возможное действие окружающих тел и, возможно, даже воздуха. По этим соображениям приведенные выше данные о влиянии некоторых веществ должны рассматриваться только как предварительные указания.

§ 8. Теоретическое обсуждение свойств медленных нейтронов.

В первой нашей статье мы оставили нерешенным вопрос о том, какой процесс сопровождает образование радиоактивного изотопа исходного элемента при нейтронной бомбардировке—захват падающего нейтрона или же испускание дополнительного нейтрона из ядра, т. е. какой атомный вес имеет вновь возникающий радиоактивный элемент — $A+1$ или $A-1$ (A — атомный вес исходного элемента). Мы думаем, что накопленные данные говорят в пользу первой гипотезы. Основные пункты этих доказательств следующие:

a) Были открыты две новых слабых активности: одна с периодом распада 15 час. в натрии, другая с периодом 2,3 мин. в алюминии. В обоих случаях периоды распада удалось отождествить с известными ранее — в первом случае с периодом алюминия и магния, во втором — с периодом кремния и фосфора. Химические данные (см. § 11) показывают, что носителями этих активностей являются соответственно изотоп Na и изотоп Al. Так как оба эти элемента имеют лишь по одному устойчивому изотопу, а именно ^{23}Na и ^{27}Al, выбор для радионатрия может происходить только между ^{24}Na и ^{22}Na, а для радиоалюминия между ^{28}Al и ^{26}Al. Однако оба легких изотопа, ^{22}Na и ^{26}Al, как известно из других реакций, обладают другими периодами и вместо электронов испускают позитроны. Таким образом можно с достаточным основанием считать, что по крайней мере в этих случаях происходит захват нейтрона ядром.

b) В то время как не имеется теоретического затруднения

в понимании захвата ядром нейтрона с незначительной кинетической энергией, кажется неправдоподобным, что такой нейтрон может выбить другой нейтрон из стабильного ядра. Еще труднее было бы понять во втором случае испускание γ-лучей.

В дальнейшем при обсуждении экспериментальных фактов мы будем придерживаться точки зрения, что нейтроны, в частности медленные, легко могут захватываться многими ядрами.

Имеются, однако, некоторые теоретические трудности в понимании этого процесса захвата или по крайней мере при объяснении тех больших эффективных сечений, которые экспериментально наблюдались в ряде случаев. Тем не менее имеет смысл указать некоторые общие выводы теории, которые всегда нужно иметь в виду при рассмотрении данной проблемы.

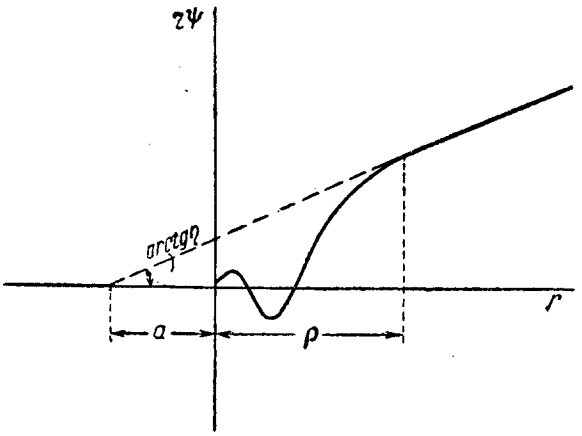

Рис. 8.

Допустим, как это обычно принимается, что взаимодействие нейтрона с ядром имеет место лишь на расстояниях, сравнимых с радиусом самого ядра. Если это так, то де-броглевская волна для быстрых нейтронов сравнима с радиусом взаимодействия, а следовательно, для медленных нейтронов она много больше. Хорошо известная теория столкновений, в которой ядро рассматривается как потенциальная яма, принимает в этом случае очень простую форму. Пусть ψ—собственная функция состояния s, соответствующая нулевой энергии. На рис. 8 представлена зависимость $r\psi$ от радиуса-вектора r; ρ представляет радиус взаимодействия. Кривая имеет неправильный ход для $r < \rho$, в то время как для $r > \rho$ она является прямой линией. Для нормировки ψ положим $\psi(0) = 1$. Тогда уравнение прямой, выражающее зависимость $r\psi$ от больших r, будет иметь следующий вид:

$$r\psi \to \eta\ (a + r).$$

Геометрическое значение η и a понятно из рис. 8.

Значения этих величин легко могут быть вычислены из теории столкновений, если только известна форма потенциальной ямы, представляющей ядро. Эффективное сечение для упругих столкновений в пределе для малых скоростей принимает значение:

$$\sigma_{el} = 4\pi a^2, \tag{1}$$

в то время как плотность вероятности нахождения нейтрона в центре ядра:

$$P = \frac{n}{\eta^2}, \tag{2}$$

где n — плотность нейтронов вне ядра.

Каков бы ни был механизм захвата, естественно допустить, по крайней мере в некотором приближении, что вероятность захвата нейтрона ядром в единицу времени пропорциональна P, т. е. эта вероятность будет даваться выражением kn/η^2, где k есть постоянная для каждого ядра.

Эта вероятность может быть выражена через эффективное сечение σ_{ca} для процесса захвата следующим соотношением:

$$\sigma_{ca} = k/\eta^2 v, \tag{3}$$

где v есть скорость нейтрона. Предел применимости (3) устанавливается тем обстоятельством, что σ_{ca} может быть, очевидно, самое большее порядка величины квадрата де-броглевской волны. Это позволяет установить верхний предел для энергии медленных нейтронов, рассматривая большие эффективные сечения, найденные экспериментально (для Cd $\sigma_{ca} = 10^{-20}$). Найденный предел оказывается порядка нескольких сот вольт. Однако нужно иметь в виду, что эти выводы справедливы лишь при высказанных выше предположениях.

Формула (3), годная только для малых скоростей, показывает, что эффективное сечение захвата для данного ядра изменяется обратно пропорционально скорости нейтрона. Это объясняет, почему эффективное сечение захвата обычно больше для медленных нейтронов, чем для быстрых. То же самое может быть выражено словами, что средняя продолжительность жизни медленных нейтронов в веществе не зависит от их скорости. В то время как эффективное сечение захвата обратно пропорционально скорости, эффективное сечение для упругого столкновения, выражаемое формулой (1), не зависит от скорости. Это означает что средняя длина свободного пути для этого типа столкновений также не зависит от скорости.

Другой характерной чертой (3) является то обстоятельство, что σ_{ca} обратно пропорциональны η^2. Прямая линия рис. 8 может случайно быть почти параллельной оси абсцисс. В этом случае η очень мало, а следовательно, эффективное сечение захвата очень велико. Такое поведение собственной функции, вероятно, и является причиной тех аномально больших эффективных сечений, которые наблюдались для некоторых ядер.

Для того чтобы вывести из (3) абсолютные значения эффективных сечений, необходимо было бы знать также k, величина которой зависит от физического механизма самого захвата. Из экспериментальных данных известны два различных процесса. В некоторых легких элементах (Li, B) захват нейтрона сопровождается испусканием тяжелых частиц, в то время как в случае более тяжелых элементов, повидимому, процесс состоит в захвате нейтрона с испусканием γ-кванта. При связывании дополнительного нейтрона в ядре освобождается некоторое количество энергии, которое в среднем имеет значение около $7 \cdot 10^6$ eV. Этот излишек энергии мог бы вызвать в некоторых случаях испускание α-частиц, если только окружающий ядро потенциальный барьер достаточно низок для быстрого выбрасывания α-частицы. Следовательно, этот процесс можно ожидать лишь для случая легких элементов, тогда как при активации быстрыми нейтронами испускание заряженных частиц возможно также для элементов с более высокими атомными весами ввиду наличия дополнительной кинетической энергии падающего нейтрона, прибавляющейся к энергии связи [6].

В случае захвата с испусканием γ-кванта, наблюдаемого для элементов, начиная с некоторого атомного веса вплоть до самых тяжелых, обычно принимаемый механизм испускания дает для k, несомненно, слишком малые значения. k зависит от двух факторов, которые трудно оценить: матричных элементов и энергии испускаемого γ-кванта. Так как вероятность испускания γ-кванта ceteris paribus пропорциональна ν^3, то нужно допустить, что предпочтительно происходят процессы с большой энергией связи нейтрона. Эта энергия связи в некоторых случаях может заметно превышать $10 \cdot 10^6$ eV. Тем не менее, вероятно, следует принять слишком большие значения для матричных элементов, чтобы получить правдоподобную картину относительной распространенности элементов с аномально большими эффективными сечениями. Из теории можно было бы также ожидать, что обычно аномальное эффективное сечение для процесса захвата связано с аномальным эффективным сечением для упругого столкновения. Никаких экспериментальных данных по этому вопросу еще не имеется.

В этом параграфе мы также обсудим кратко закон распределения по скоростям для медленных нейтронов в водороде. Из вышеуказанных теоретических рассмотрений [формулы (1) и (3)] кажется вероятным принять, что нейтроны, обладающие скоростями меньше некоторого предела, имеют одну и ту же длину свободного пути λ для упругих столкновений и постоянную продолжительность жизни τ до захвата их ядрами вещества. Легко показать, что для содержащего водород вещества число нейтронов, скорости которых лежат между v и $v + dv$, будет пропорционально:

$$\frac{v \cdot dv}{(v + \lambda/\tau)^3}, \tag{4}$$

для v, меньшего вышеуказанного предела.

Этот закон распределения медленных нейтронов по скоростям может быть применен для объяснения того факта, что кривые поглощения медленных нейтронов не являются экспоненциальными.

§ 9. Разделение радиоактивных изотопов

Сциларду и Чальмерсу [7] впервые удалось отделить химическими методами радиоактивный иод от обыкновенного. Мы распространили их метод на ряд других случаев, применяя вместо органических соединений неорганические. Сущность метода заключается в следующем. Предположим, что перед облучением нейтрона атом входил в состав молекулы или радикала, которые, будучи разложены, имеют практически пренебрегаемую вероятность обратного воссоединения. При ударе нейтрона атом обычно выбивается из молекулы и имеет тенденцию оставаться в атомарном или ионном состоянии. Отсюда следует, что выбитые из молекул атомы после облучения находятся в химическом состоянии, отличном от всей остальной массы, и поэтому могут быть выделены соответствующей реакцией. Энергия химической связи составляет всего несколько вольт, и поэтому, если даже допустить, что падающий на ядро нейтрон имеет ничтожную энергию, для преодоления химической связи была бы достаточна отдача атома при испускании γ-кванта, появляющегося в результате захвата нейтрона ядром.

Сцилард и Чальмерс выделили радиоактивный иод из облученного иодистого этила, прибавляя к нему следы свободного иода и осаждая J^- с помощью $AgNO_3$. Тот же самый метод был применен нами для бромоформа, хлороформа, четыреххлористого углерода и некоторых других галоидных органических соединений. Нам всегда удавалось почти целиком отделить радиоактивный галоид от неактивного вещества.

Мы выделили также радиоактивный хлор (35 мин.) из хлорноватокислого натрия. Атом хлора ударом нейтрона выбивается из иона ClO_3^-. Прибавляя небольшое количество Cl^- для захватывания радиоактивного изотопа и осторожно осаждая с помощью $AgNO_3$ (с прибавлением HNO_3 для избежания осаждения $AgClO_3$), мы нашли активность сконцентрированной в осадке AgCl. Аналогичные результаты получились с бромноватокислым и иодноватокислым натром. В этих соединениях азотная кислота заменялась аммиаком. В осадке концентрировалось от 70 до 90% всей активности. Какодиловая кислота $(CH_3)_2AsOOH$ является хорошим исходным материалом для концентрирования радиоактивного мышьяка. Активность можно сконцентрировать при осаждении трехсернистого мышьяка из облученной $(CH_3)_2AsOOH$.

Облученный нейтронами марганцевокислый калий и затем профильтрованный через обычный бумажный фильтр оставляет на фильтре большую активность в двуокиси марганца, образовавшейся в результате окисления бумаги Прибавлением марганцевой соли и осаждением углекислого марганца удавалось выделить около 80% всей активности. Ион MnO_4^- разбивается нейтроном; при

этом остается атом марганца в состоянии меньшего окисления. Эти атомы собираются с двуокисью марганца на фильтре или осаждаются с углекислым марганцем. Мы провели это разделение, исходя из твердой соли и из раствора; однако никакой существенной разницы в этих случаях обнаружено не было. Также не наблюдалось заметного влияния кислотности и щелочности облученного раствора.

Физический метод разделения радиоактивных изотопов аналогичен хорошо известному методу получения радиоактивного осадка из эманации. Мы применили этот метод к газообразному соединению иода. В стеклянном цилиндре объемом около 1 *л* помещался вплотную к стенкам цилиндрический алюминиевый электрод, а вдоль оси располагался другой (никелевый). Сосуд наполнялся иодистым этилом или метилом. Температура цилиндра подбиралась таким образом, чтобы давление пара было около атмосферного. Весь аппарат помещался в горячую воду. Между электродами устанавливалась разность потенциалов в 3000 V. Источник нейтронов (Rn + Be) располагался вне сосуда. Никелевый электрод после облучения удалялся. Он показал наличие активности с периодом иода. (Активный осадок собирался на никель потому, что последний не активируется под действием нейтронов). Интенсивность осадка была достаточно мала. Изменение полярности электродов не дало согласованных результатов.

§ 10. Методы измерения

Сильная активация, вызываемая медленными нейтронами, открывает возможность получения более интенсивных источников искусственно радиоактивных элементов по сравнению с прошлым годом. Это позволяет провести более точное измерение констант распада радиоактивных элементов, пользуясь ионизационной камерой вместо счетчиков Гейгер-Мюллера.

Ионизационная камера была изготовлена из стали; внутренними электродами являлись проволока из чистого металла и латунный стержень. Электроны попадали в камеру через круглое отверстие диаметром 6 *см*, проделанное в крышке и закрытое алюминиевой фольгой толщиной 0,01 *см*. Камера наполнялась CO_2 под давлением 3 *ат*. Она соединялась с электрометром Перукка, чувствительность которого была 0,02 V на одно деление. Емкость всей системы составляла около 20 *см*. Нулевой эффект и чувствительность системы, проверяемая с помощью стандартного уранового препарата, оставались постоянными. На рис. 9 и 10 приведены некоторые кривые распада, полученные с этой установкой.

Та же самая установка применялась для измерения поглощения β-лучей В этом случае окошко закрывалось алюминиевой фольгой, и измерялась активность при различных толщинах алюминия. Полученные кривые поглощения приблизительно экспоненциальны.

Иногда вещества, кроме β-активности, обнаруживают сильное γ-излучение. Мы условно приписываем γ-излучению ту остаточную

ионизацию, которая получается в камере, если она закрыта 2 *см* свинца. При вычислении коэфициента поглощения β-лучей принималось в расчет наличие этого γ-излучения. Для контроля были промерены коэфициенты поглощения β-лучей RaE и UX_2. Полученные результаты находились в согласии с обычно принимаемыми значениями.

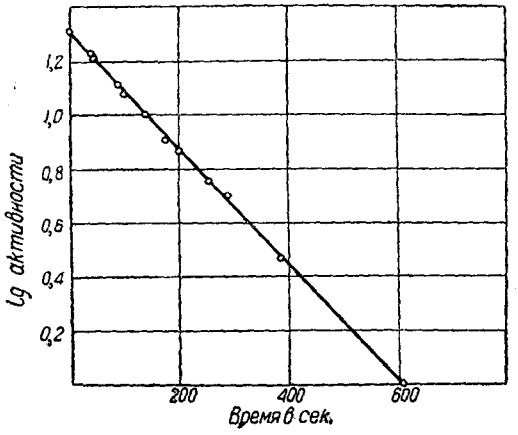

Рис. 9.

§ 11. Систематическое исследование элементов

В этом параграфе мы сообщаем все новые полученные нами данные для каждого элемента как по наведенной радиоактивности, так и по свойствам элементов по отношению к медленным нейтронам. Некоторые данные немного отличаются от наших предыдущих данных ввиду увеличения точности измерений.

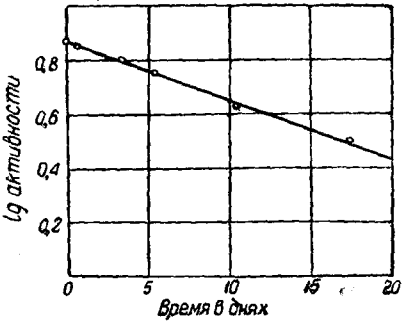

Рис. 10.

1 — Водород. Не удалось обнаружить никакой активности ни в воде, ни в парафине, облученных в большом сосуде с водой в продолжение нескольких дней от источника Rn + Be в 500 милликюри эманации.

3 — Литий. Гидрат окиси лития не давал активности после облучения медленными нейтронами (14 час. 400 милликюри). Хотя литий остается неактивным, он сильно поглощает медленные нейтроны. „Полупоглощающий слой" для лития равен 0,05 *г/см*². Поглощение нейтронов не сопровождается испусканием γ-лучей. Было показано независимо друг от друга, нами и Чадвиком и Гольд-

габером [8], что при поглощении медленных нейтронов литий испускает заряженные тяжелые частицы. По данным Чадвика и Гольдгабера процесс можно представить следующей формулой *:

$$^{6}_{3}\mathrm{Li} + ^{1}_{0}\mathrm{n} = ^{4}_{1}\mathrm{He} + ^{3}_{1}\mathrm{H}.$$

4 — Бериллий. Сильно облученный медленными нейтронами металлический бериллий (99% чистоты) показал крайне малую активность, вызываемую, возможно, примесями. Примеси легко могут исказить результаты ввиду сильной активности, которую получают некоторые из них при облучении под водой.

5 — Бор. Металлический бор оставался неактивным после облучения под водой в продолжение 14 час. от источника в 500 милликюри. Он имеет наибольший коэфициент поглощения, найденный до сих пор для медленных нейтронов. „Полупоглощающий слой" $\delta = 0{,}004$ *г/см*^{2}, что соответствует эффективному сечению около $3 \cdot 10^{-21}$ *см*^{2}. Процесс поглощения не сопровождается γ-излучением. В этом случае, как и в случае лития, вместо γ-излучения испускаются α-частицы, как это было показано Чадвиком и Гольдгабером и нами. Испускание α-частиц легко может быть обнаружено по сильному разряду в ионизационной камере, наполненной BF_3, окруженной парафином и облученной нейтронами от Po + Be-источника. Экранирование ионизационной камеры тонким слоем кадмия (для поглощения медленных нейтронов) значительно уменьшает ионизационный ток. Тот же самый эффект наблюдается в камере с воздухом, на дне которой находится небольшое количество бора. Испускание α-частиц было установлено также с помощью маленькой ионизационной камеры, связанной с линейным усилителем как для случая распыленного на ее стенках бора, так и для случая наполнения ее BF_3.

Для объяснения процесса мы выдвигаем следующую реакцию:

$$^{10}_{5}\mathrm{B} + ^{1}_{0}\mathrm{n} = ^{7}_{3}\mathrm{Li} + ^{4}_{2}\mathrm{He}.$$

Чадвик и Гольдгабер выдвинули другую реакцию:

$$^{10}_{5}\mathrm{B} + ^{1}_{0}\mathrm{n} = 2\,^{4}_{2}\mathrm{He} + ^{3}_{1}\mathrm{H}.$$

В настоящее время еще не существует достаточных данных для выбора между этими двумя возможностями. Мы пытаемся теперь провести более точное измерение числа ионов, образующихся в каждом процессе в ионизационной камере, содержащей бор или в газообразной форме (полный эффект) или в распыленном состоянии на стенках (эффект одной или двух частиц). Мы пытаемся также наблюдать разрушение ядра в камере Вильсона, содержащей газообразное соединение бора **.

---

* Опыты Курчатова и Латышева с камерой Вильсона показали, что эта реакция, действительно, сопровождается выбрасыванием двух тяжелых заряженных частиц (*Прим. перев.*).

** (Прим. при корректуре. Тэйлор и Гольдгабер, Nature **135**, 341, 1935, показали, что реакция происходит по первой схеме).

Курчатов и Латышев наблюдали процесс расщепления в камере Вильсона с газообразным соединением бора. Они установили, что реакция идет с выбрасыванием двух тяжелых частиц. (*Прим. перев.*).

6 — Углерод. Активность отсутствует (см. водород). О рассеянии нейтронов см. § 6.

7 — Азот. Азотнокислый аммоний, облученный под водой в продолжение 12 час. от источника в 600 милликюри, не дает активности.

8 — Кислород. Активность отсутствует (см. водород).

9 — Фтор. Обе активности этого элемента (периоды 9 и 40сек.) не меняются в присутствии вещества, содержащего водород.

11 — Натрий. Этот элемент имеет две активности, одна из которых (период 40 сек.) нечувствительна к веществам с содержанием водорода *. Очень слабая активность с длинным периодом была обнаружена Бьерджем и Весткоттом[9]. Так как эта активность сильно увеличивается в присутствии воды, нам удалось достаточно точно определить ее период распада. Он оказался равным 15 час. Ввиду теоретической важности этой активности (см. § 8) мы тщательно сравнили ее кривую распада с таковой для алюминия (длинный период) с целью установления их тождественности. Для химического исследования радиоактивного вещества мы облучали нейтронами чистый углекислый натрий (Кальбаум). Облученное вещество мы растворяли в соляной кислоте и добавляли в раствор хлористый магний и хлористый алюминий. Гидраты окиси последних металлов, осажденные прибавлением аммиака, оказались неактивными. После мы добавляли в раствор немного фтористого натрия и осаждали фтор в виде фтористого бария. Этот осадок оказался также неактивным. Раствор, содержащий исходный натрий, затем выпаривался и осадок осторожно сжигался, чтобы исключить неон, в котором мог бы образоваться активный изотоп. Активность была обнаружена в просушенном хлористом натрии. Отсюда мы заключаем, что активный элемент является изотопом натрия ^{24}Na. Этот же самый изотоп был получен нами в прошлом году при облучении нейтронами алюминия и магния. ^{24}Na недавно был также получен в заметных количествах и довольно подробно исследован Лауренсом[10]. В этом случае ^{24}Na получался бомбардировкой некоторых элементов искусственно ускоряемыми частицами.

12 — Магний. Чистая окись магния (Кальбаум), специально исследованная нами на отсутствие в ней алюминия, облучалась под водой. Вещество располагалось на некотором расстоянии от источника, чтобы не возникала активность, нечувствительная к воде. Была найдена новая очень слабая активность с периодом около 10 мин. Так как этот период совпадает с 10-минутным периодом алюминия, который принадлежит ^{27}Mg (см. алюминий), то вполне вероятно, что и он принадлежит тому же самому изотопу, образующемуся при захвате нейтрона ядром ^{26}Mg, присутствующим в количестве 11% в обычном магнии.

13 — Алюминий. Облученный под водой алюминий показывает довольно сильную новую активность с периодом 2,3 мин.

* Т. е. $\alpha = 1$. (*Прим. перев.*).

(измерен с помощью ионизационной камеры). При облучении вне воды эта активность чрезвычайно мала. Период новой активности совпадает с 2,3-минутным периодом кремния, принадлежащим ^{28}Al; поэтому мы принимаем, что новая активность принадлежит тому же изотопу ^{27}Al, образующемуся при захвате нейтрона ядром.

Второй период алюминия, измеренный с помощью ионизационной камеры, оказался равным 10 мин. вместо 12. Эта активность нечувствительна к воде. Было проведено химическое выделение носителя этой активности. Облученный металлический алюминий растворялся в растворе едкого натра; затем туда добавлялся хлористый магний. Осадок гидрата окиси магния обладал 10-минутной активностью. Мы принимаем, что активным изотопом является ^{27}Mg, образующийся по следующей реакции:

$$^{27}_{13}Al + ^{1}_{0}n = ^{27}_{12}Mg + ^{1}_{1}H.$$

14 — Кремний. Мы определили с помощью ионизационной камеры короткий период этого элемента. Он оказался равным 2,3 мин. Эта активность не меняется в присутствии воды.

Кроме этой активности, мы нашли при облучении под водой кремнезема новую активность с периодом в несколько часов. Эта активность очень слаба, но очень чувствительна к воде. Мы предполагаем, что носителем ее, вероятно, является ^{31}Si, который получается также при облучении фосфора и имеет период 2,4 часа. ^{31}Si мог бы образоваться при захвате нейтрона ядром ^{30}Si, присутствующим в количестве около 3%.

15 — Фосфор. Активность этого элемента с коротким периодом (2,3 мин.) не увеличивается в присутствии воды. Кюри, Жолио и Прейсверк[11] приписывают этот период ^{28}Al. Следующий химический опыт говорит в пользу этой гипотезы. Мы облучали фосфорную кислоту, нейтрализовали раствор углекислым натрием и прибавляли хлористый алюминий. Активность оказалась сконцентрированной в алюминиевом осадке.

Мы получили кривую распада фосфора с длинным периодом, применяя ионизационную камеру. Период оказался равным 2,4 часа вместо 3, указанных ранее. Мы измерили с помощью ионизационной камеры также „полупоглощающий слой“ * для соответствующих β-лучей и нашли его равным 0,15 *г/см*² Al.

16 — Сера. С помощью ионизационной камеры мы определили период фосфора, извлеченного из облученной серы. Период оказался равным 14 дням. Полупоглощающий слой для β-лучей равен 0,10 *г/см*² Al.

17 — Хлор. Облученный под водой хлор обнаруживает новый период в 35 мин., определенный электрометрически. О химическом отождествлении носителя этой активности см. § 9. Хлор сильно

---

* „Полупоглощающим слоем“ для β-лучей мы называем толщину поглощающего слоя (располагаемого непосредственно у окошка камеры), проходя через которую электроны вызывают в ионизационной камере в два раза меньший ток. Эта величина характеризует собой поглощение электронов в данном веществе. (*Прим. перев.*).

поглощает медленные нейтроны. „Полупоглощающий слой" 0,3 *г/см*^{2}. Процесс поглощения сопровождается испусканием γ-лучей.

19 — Калий. Мы нашли в облученном калии наведенную радиоактивность, сильно зависящую от присутствия воды и распадающуюся с периодом в 16 час. Химическое исследование носителя этой активности, выполненное тем же самым методом, что и в случае натрия, исключило элементы Cl, A, Ca. Отсюда мы заключаем, что носителем активности является, вероятно, изотоп калия. По Гевеши[12] этот изотоп должен быть отождествлен с ^{42}K, который был им получен при облучении скандия нейтронами и который имеет тот же самый период распада.

20 — Кальций. Никакой активности не было обнаружено при 14-часовом облучении в воде фтористого кальция от источника в 600 милликюри.

23 — Ванадий. Распад наведенной активности ванадия был измерен ионизационной камерой. Результаты получились следующие: период полураспада 3,75 мин. „Полупоглощающий слой" для β-лучей 0,17 *г/см*^{2} Al. β-лучи сопровождаются γ-излучением. Активность ванадия очень чувствительна к веществам, содержащим водород; по определению § 1 $\alpha = 40$.

24 — Хром. Активность хрома нечувствительна к воде.

25 — Марганец. Активность с коротким периодом нечувствительна к воде ($\alpha = 1$). Активность же с длинным периодом (2,5 часа; определена с помощью ионизационной камеры) сильно увеличивается в присутствии воды ($\alpha = 23$). „Полупоглощающий слой" для β-лучей, измеренный электрометрически, равен 0,14 *г/см*^{2} Al. Распад сопровождается γ-излучением. Известно, что элемент с периодом 2,5 часа является изотопом марганца. В § 9 был описан метод концентрирования этого радиоактивного элемента. Для получения нового доказательства, что активный продукт является изотопом марганца, мы сначала концентрировали полученную в облученном марганце ($KMnO_4$) активность осаждением углекислого марганца. Содержащий активность углекислый марганец растворялся затем в соляной кислоте, и в раствор прибавлялось большое количество солей хрома, ванадия и железа. Потом марганец еще раз отделялся в виде двуокиси с помощью азотной кислоты и хлорноватокислого натрия. Марганцевый осадок обладал активностью, в то время как фракции, содержащие хром, ванадий и железо, были найдены неактивными.

26 — Железо. Активность этого элемента (период 2,5 часа) нечувствительна к воде. „Полупоглощающий слой" для поглощения медленных нейтронов равен 8 *г/см*^{2}.

27 — Кобальт. Этот элемент довольно сильно поглощает медленные нейтроны. „Полупоглощающий слой" равен 0,7 *г/см*^{2}. Поглощение сопровождается испусканием γ-излучения.

29 — Никель. Сильно облученный никель обнаруживает лишь сомнительные следы активности.

29 — Медь. Обе наведенные активности этого элемента (периоды 5 мин. и 10 час.) сильно увеличиваются в присутствии воды. Для

первой активности $\alpha = 15$. Медь поглощает медленные нейтроны с „полупоглощающем слоем“ около 3 *г/см*². Это поглощение сопровождается слабым γ-излучением.

Облученная металлическая медь растворялась в соляной кислоте, и туда добавлялись в небольших количествах соли кобальта, никеля и цинка. Из кислого раствора осаждалась сернистая медь. Она оказалась активной. Осадки сернистого цинка, кобальта и никеля, полученные нейтрализацией раствора и добавлением сернистого аммония, оказались неактивными. Так как необходимое для этих опытов время было достаточно большим, то результаты относятся только к длинному периоду. Носителем этой активности можно считать изотоп меди, как это было предположено Бьерджем и Весткоттом (см. выше).

30 — Цинк. Активность цинка с коротким периодом не увеличивается в присутствии воды. Длинный период другой активности был измерен электрометрически и оказался равным 10 час. Для установления носителей этой активности был проведен следующий опыт. Облученный металлический цинк растворялся в соляной кислоте, и туда добавлялись в небольших количествах соли меди, никеля и кобальта. Медь осаждалась частично восстановлением на нерастворимом металлическом цинке и частично как сернистая медь в кислом растворе. Полученная медь была сильно активной. Другие элементы, осажденные нейтрализацией раствора и добавлением сернистого аммония, оказались неактивными. Этим подтверждаются результаты Бьерджа и Весткотта, что длинный период цинка принадлежит изотопу меди и, вероятно, тому самому, который дает длинный период самой меди. Имеется некоторое расхождение между данными этих авторов и нашими только в отношении величины периода (по Бьерджу и Весткотту период равен 6 час.).

31 — Галлий. Активность с 20-минутным периодом (измерен электрометрически) не очень чувствительна к воде ($\alpha = 3$). „Полупоглощающий слой“ для соответствующих β-лучей равен 0,17 *г/см*² Al. Носителем этой активности является по всей вероятности изотоп галлия. Для проверки этого утверждения мы облучали азотнокислый галлий и затем добавляли к раствору следы меди и цинка. Медь выделялась в виде металлического осадка на порошок цинка, а цинк выделялся прибавлением роданистой ртути. Оба элемента оказались неактивными.

Кроме этой 20-минутной активности, мы нашли при облучении под водой еще новую активность, сопровождаемую довольно сильным γ-излучением. Период ее распада равен 23 час. (измерен электрометрически).

33 — Мышьяк. Активность этого элемента сильно зависит от присутствия воды ($\alpha = 6$). Мы измерили электрометрически период ее распада (26 час.) и „полупоглощающий слой“ для β-лучей (0,16 *г/см*² Al). О концентрировании этой активности см. § 9.

34 — Селен. Активность этого элемента (период 35 м.) чувствительна к воде ($\alpha = 4$). Облученный селенистый ангидрид растворялся в 30% соляной кислоте, и к раствору прибавлялся мышь-

яковистый ангидрид. Мы осаждали металлический селен восстановлением с помощью газообразного серного ангидрида. Осадок оказался неактивным. Мы осаждали из раствора трехсернистый мышьяк и нашли его неактивным. Эти испытание исключает, кажется, также и германий. Отсюда мы заключаем, что активность принадлежит изотопу селена.

35 — Бром. Обе активности этого элемента чувствительны к воде. Активность с коротким периодом имеет $\alpha = 10$. Периоды активностей были измерены электрометрически и оказались равными 19 минут и 4,2 часа. „Полупоглощающий слой" для β-лучей для обеих активностей равен 0,12 *г/см*^{2} Al. Обе активности сопровождаются γ-излучением. О концентрировании активности см. § 9.

38 — Стронций. Активность отсутствовала после сильного и длительного облучения под водой.

39 — Иттрий. Сильно облученная окись иттрия давала лишь очень слабую активность, которая, возможно, вызывалась примесями. Иттрий очень сильно поглощает медленные нейтроны. „Полупоглощающий слой" $\delta = 0{,}015$ *г/см*^{2}. Это поглощение сопровождается γ-излучением.

40 — Циркон. Сильно облученный азотнокислый циркон давал лишь очень слабую активность, которая, возможно, вызывалась примесями.

41 — Ниобий. То же самое, что циркон.

45 — Родий. Активность с коротким периодом чувствительна к воде ($\alpha = 15$). Период и „полупоглощающий слой" для β-лучей были определены электрометрически (44 сек, 0,15 *г/см*^{2} Al). Мы сделали также более точное измерение длинного периода с помощью ионизационной камеры и нашли для него значение 3,9 мин. Активность сопровождается слабым γ-излучением. Родий довольно сильно поглощает медленные нейтроны. „Полупоглощающий слой" 0,3 *г/см*^{2}. Полупоглощение, вероятно, соответствует образованию активных изотопов.

46 — Палладий. Активности этого элемента также чувствительны к воде. Мы нашли два периода: один короткий около 15 мин. и другой около 12 час. Мак Леннан, Гриммет и Рид нашли период 14 час., который согласуется с нашим в пределах точности измерений.

47 — Серебро. Два периода вновь были определены с помощью ионизационной камеры. Они равны 22 сек. и 2,3 минут Обе активности очень чувствительны к воде, имея соответственно $\alpha = 30$ и 15. Сильной активации этого элемента соответствует значительное поглощение для медленных нейтронов. „Полупоглощающий слой" $\delta = 1{,}2$ *г/см*^{2}.

Мы прибавляли к раствору облученного азотнокислого серебра хлористый родий и азотнокислый палладий. Прибавлением соляной кислоты мы осаждали серебро, которое было найдено активным. Из профильтрованного раствора диметилглиоксимом мы осаждали палладий и восстановлением—родий. Оба осадка были неактивными. Этот опыт, относящийся только к длинному периоду в силу дли-

тельности операций, показывает, что носителем данной активности по всей вероятности является изотоп серебра.

48 — Кадмий. Облученный при различных условиях кадмий давал несколько слабых активностей с различными периодами (еще не измерены). Кадмий очень сильно поглощает медленные нейтроны. „Полупоглощающий слой“ $\delta = 0{,}013$ *г/см*². Соответствующее эффективное сечение является наибольшим из всех найденных до сих пор для медленных нейтронов ($\sigma = 10^{-20}$ *см*²). Поглощение сопровождается интенсивным γ-излучением и соответствует, вероятно, преобразованию одного стабильного изотопа кадмия в другой стабильный изотоп того же элемента.

49 — Индий. Наведенная в индии активность имеет три периода. Активность, соответствующая наиболее короткому из них (13 сек.), чувствительна к воде ($\alpha = 12$). Вторая активность (период 54 мин., смерена электрометрически) также очень чувствительна к воде. Опыты с магнитным полем показывают, что испускаемые электроны имеют отрицательный знак. Соответствующий им „полупоглощающий слой“ равен 0,045 *г/см*² Al. Еще более длинный период в несколько часов отмечается Сцилардом и Чальмерсом [13]. Эта последняя активность или совсем нечувствительна к воде, или обладает умеренной чувствительностью.

Были проделаны химические опыты с целью установления носителей двух последних активностей. К раствору с облученным азотнокислым индием прибавлялось серебро, которое затем осаждалось из раствора в виде хлористого серебра. Осадок оказывался неактивным. После к раствору добавлялись олово, сурьма и кадмий, которые осаждались в виде сернистого олова, трехсернистой сурьмы и сернистого кадмия с помощью сероводорода. Кислотность раствора подбиралась таким образом, что индий оставался в растворе, в то время как остальные металлы осаждались. Этот осадок оказался также неактивным. Нейтрализуя раствор, мы осаждали сернистый индий, который оказался активным. Было установлено, что наряду с сильной активацией этот элемент обладает заметным поглощением для медленных нейтронов. „Полупоглощающий слой“ $\delta = 0{,}3$ *г/см*².

50 — Олово. Сильно облученное под водой олово не обнаруживает активности.

51 — Сурьма. Мы нашли для этого элемента одну активность с периодом 2,5 дня. Активность чувствительна к веществам, содержащим водород. „Полупоглощающий слой“ для испускаемых β-лучей равен 0,09 *г/см*² Al. Следующий химический опыт показывает, что носителем этой активности является изотоп сурьмы. Мы растворяли в царской водке облученную металлическую сурьму и добавляли в раствор некоторое количество олова. После отделения сернистого олова (по Кларку) мы нашли активность в осадке трехсернистой сурьмы. Трехсернистая сурьма затем вновь растворялась. К раствору прибавлялся индий и в растворе средней кислотности осаждалась трехсернистая сурьма. Затем раствор нейтрализовался и из него осаждался индий, который был найден неактивным. К новому раствору сурьмы мы прибавляли теллур и иод.

Сначала восстановлением осаждался теллур, затем в виде иодистого серебра осаждался иод. Оба осадка оказались неактивными.

52 — Теллур. Показывает слабую активность, чувствительную к воде. Период ее равен 45 мин. вместо 30, указанных в первой нашей работе.

53 — Иод. Период и „полупоглощающий слой" для β-лучей были определены электрометрически (25 мин., 0,11 *г/см*^{2} Al). Активность по отношению к воде обладает средней чувствительностью ($\alpha = 5$). О концентрировании активности см. § 9.

56 — Барий. Была найдена новая активность с периодом 80 мин., чувствительная к воде ($\alpha = 8$). Следующий химический опыт подтверждает предположение, что носителем этой активности является изотоп бария. Мы растворили облученный гидрат окиси бария в соляной кислоте, добавили небольшое количество хлористого натрия и осадили сернокислый барий. Активность была обнаружена в этом осадке. Испарив раствор, мы нашли оставшийся осадок натрия неактивным.

57 — Лантан. После сильного облучения не было найдено никакой активности.

58 — Церий. То же самое, что лантан.

59 — Празеодим. Активность с коротким периодом нечувствительна к воде. При облучении под водой мы нашли новую активность, чувствительную к воде и распадающуюся с периодом 19 час. „Полупоглощающий слой" для соответствующих β-лучей равен 0,12 *г/см*^{2} Al (то и другое значения получены электрометрически).

64 — Гадолиний. Мы облучали под водой очень чистый препарат окиси гадолиния, любезно предоставленный нам вместе с другими редкими землями проф. Ролля. Мы нашли активность, распадающуюся с периодом в 8 час.

73 — Тантал. После 12-часового облучения была обнаружена лишь сомнительная активность.

74 — Вольфрам. Облученный под водой металлический вольфрам показал активность ($\alpha = 15$), распадающуюся с периодом около одного дня[14]. Мы облучали трехокись вольфрама и растворяли ее в растворе едкого натра, затем прибавляли и выделяли пятиокись тантала, которая оказалась неактивной. К раствору с вольфрамом добавлялся раствор с рением, и прибавлением соляной кислоты осаждалась трехокись вольфрама. Осадок обладал активностью, в то время как рений, осажденный из фильтрата в виде сернистого рения, оказался неактивным. Так как мы не имели гафния, то проделали следующий опыт, чтобы исключить изотоп этого элемента как носитель активности. Из облученного раствора трехокиси вольфрама в аммиаке мы осаждали гидрат окиси циркона. Осадок не давал активности. Мы заключаем, что вызываемая в вольфраме активность принадлежит, вероятно, изотопу этого элемента.

75 — Рений. Мы облучали под водой чистый металлический рений. Возникающая в нем активность сильно увеличивается

в присутствии воды и распадается с периодом 20 часов. „Полупоглощающий слой“ для электронов составляет 0,12 *г/см*² Al. Активность, вероятно, принадлежит изотопу рения. Облученный рений растворялся в азотной кислоте. В раствор добавлялись тантал и вольфрам, выделяемые затем в виде пятиокиси тантала и трехокиси вольфрама. Оба осадка были неактивны, в то время как рений сохранял активность.

77 — Иридий. Наведенная радиоактивность этого элемента очень чувствительна к воде. Период активности и „полупоглощающий слой“ для β-лучей были определены с помощью ионизационной камеры (19 час., 0,12 *г/см*² Al). Сильной активации иридия соответствует сильное поглощение медленных нейтронов, „полупоглощающий слой“ для которых равен 0,3 *г/см*². Поглощение сопровождается испусканием γ-лучей.

78 — Платина. Облученная под водой очень чистая металлическая платина (4 стандарт чистоты по Гереусу) обладала активностью с периодом около 50 мин. Мак Леннан, Гримметт и Рид дают период 36 мин.

79 — Золото. Активность этого элемента чувствительна к воде. Ее период равен 2,7 дня (определен электрометрически). Отклонение β-лучей в магнитном поле показало, что они состоят из отрицательных электронов. β-лучи имеют очень малую проникающую способность: „полупоглощающий слой“ для них 0,04 *г/см*² Al. При облучении золота медленными нейтронами испускаются γ-лучи.

80 — Ртуть. Не было обнаружено никакой активности после сильного облучения. Этот элемент сильно поглощает медленные нейтроны. „Полупоглощающий слой“ равен 0,2 *г/см*². При поглощении нейтронов испускается γ-излучение.

81 — Таллий. Не было обнаружено никакой активности после сильного облучения.

82 — Свинец. То же самое, что таллий.

83 — Висмут. То же самое, что таллий.

90 — Торий. Активности с периодами 1 и 24 мин. (измерены электрометрически) почти нечувствительны к воде.

92 — Уран. Мы исследовали также влияние веществ с содержанием водорода на наведенную активность этого элемента (периоды 15, 40 сек.; 13, 100 мин.). Было установлено, что отвечающие 1, 3 и 4 периодам активности немного увеличиваются при облучении под водой, активность же с периодом 40 сек. при этом не изменяется. Мы определили увеличение активности при облучении в воде для периодов 15 сек., 13 мин. и 100 мин. Мы нашли для всех их $\alpha \approx 1.6$. Для активности с периодом 15 сек. измерение было сделано со счетчиками и не очень точно ввиду краткости периода. Для двух других активностей коэфициент α был определен с помощью ионизационной камеры, при этом было обращено особое внимание на установление того, что α для двух этих периодов имеет одно и то же значение. Для этого мы сравнили три кривые распада активности, полученные после 14-часового облучения од-

ного и того же количества окиси урана один раз в воздухе, располагая уран в особой трубке вокруг источника нейтронов; другой раз в тех же геометрических условиях, но при окружении трубки парафином, и третий раз при расположении источника нейтронов на расстоянии 5 *см* от трубки с окисью урана и погружении всего этого в большую массу парафина. Во всех этих измерениях мы нашли, что кривые распада были пропорциональны, т. е. показывали одно и то же отношение активностей. Мы думаем, что тождественность коэфициентов чувствительности для этих двух активностей установлена более точно, чем их абсолютная величина и их тождественность с коэфициентом чувствительности 15-секундной активности. Ясно, что все активные продукты, возникающие в результате одного и того же первичного процесса, должны иметь один и тот же коэфициент чувствительности. Отсюда мы заключаем, что активность с периодом 40 сек. вызывается независимым первичным процессом, в то время как три других активности являются, вероятно, результатом одного и того же первичного процесса. Это заключение ограничивается возможностью случайного совпадения коэфициентов чувствительности в достаточно широких пределах точности наших измерений.

В предположении тождественности α для трех периодов эти три активности должны были бы принадлежать семейству элементов (исходным продуктом являлась бы активность с коротким периодом), может быть, усложненному наличием ответвлений. Некоторое доказательство в пользу такого предположения, по крайней мере в отношении 13- и 100-минутных периодов, дает следующий опыт. Мы измеряли электрометрически кривые распада для толстого слоя облученного урана. Анализ этих кривых показал, что отношение начальных активностей с периодами 13 и 100 мин. составляет около 100 : 45. „Полупоглощающий слой" для β-лучей 13-минутной активности равен 0,14 *г/см*^{2}. Для длинного периода эта величина не может быть смерена сколько-нибудь точно, но она определенно меньше предыдущего значения и, вероятно, раза в два. Эти результаты согласуются с предположением, что число распадов для активностей с периодами 13 и 100 мин. одно и то же.

В первой нашей статье мы приводили некоторые химические факты, которые, казалось, указывали на то, что носители 13- и 100-минутной активностей не являлись изотопами известных наиболее тяжелых элементов; скорее активность принадлежала элементам, расположенным за ураном. С тех пор наша точка зрения была подвергнута критике со стороны Гросс и Агрусса[15], которые, хотя и не экспериментировали никогда с активированным ураном, но на основании наших опытов пришли к противоположному заключению, что носителями этих активностей являются изотопы протактиния. Мы выполнили поэтому некоторые новые химические опыты по вопросу о поведении этих активностей.

Было повторено выделение активности с сернистыми соединениями некоторых металлов (серебро, медь, свинец, ртуть). Кислотность раствора (соляная кислота) была около 20%; иногда она

немного изменялась для облегчения осаждения сульфида применяемого металла. Выпадение активности с осадком было обычно хорошим — около 50% и варьировалось с изменением условий осаждения. Азотная кислота очень сильно уменьшает количество выпадающей активности. В сернистом осадке выпадает большое количество активности в присутствии фтористо-водородного раствора тантала. Мы провели также опыт, чтобы посмотреть, будет ли наведенная активность участвовать в реакции, которая по данным Гросс и Агрусса наиболее характерна для протактиния.

Мы растворяли в 25% растворе соляной кислоты заранее очищенную и облученную окись урана и добавляли затем к раствору азотнокислый циркон и фосфорную кислоту. Осадок фосфорнокислого циркона оказался неактивным. После отделения циркона мы осадили из раствора сульфид. В нем оказалась активность в обычном количестве. Согласно Гросс и Агрусса эта реакция должна рассматриваться как доказательство того, что носитель активности не является изотопом протактиния.

Проведя различные химические опыты Мейтнер и Ган [16] также пришли к выводу, что носители 13- и 100-минутной активности по всей вероятности являются элементами, лежащими за ураном. Мы повторили некоторые из их опытов и нашли те же результаты.

Две активности, вне сомнения, ведут себя в химическом отношении одинаково. Некоторое слабое доказательство возможности их разделения получилось лишь в следующем опыте. Тщательно очищенная и облученная нейтронами окись урана растворялась в соляной кислоте. Затем этот раствор вливался в раствор углекислого аммония до тех пор, пока урановый осадок вновь не растворялся полностью. Прибавляя азотнокислый свинец или марганец, мы собирали осадок соответствующей углекислой соли, который обладал 13- и 100-минутной активностями. В фильтрате мы осаждали сернистую медь и нашли в ней обе активности. Кажется, что отношение активностей в двух осадках было несколько отличным — 13-минутная активность имелась в большем количестве в сернистом осадке.

Эти опыты дают дальнейшее подтверждение нашей гипотезы, что носителями наведенной радиоактивности урана с периодами 13 и 100 мин. являются элементы, лежащие за ураном. Наиболее простая интерпретация, согласующаяся с известными фактами, заключается в допущении, что активности с периодами 15 сек., 13 мин. и 100 мин. являются продуктами одной и той же цепи, вероятно, с атомными номерами соответственно 92, 93 и 94 и атомным весом 239.

12. Табличные результаты

Основные результаты по наведенной нейтронной бомбардировкой радиоактивности собраны в таблицы. 1-й столбец содержит атомные номера и символы исследуемых элементов. Столбец 2 дает изотопический состав данного элемента. Жирным шрифтом указаны изо-

Таблица 1.

Элемент	Изотопы	Периоды полураспада	Полупоглощающий слой в г/см² Al	γ-лучи	Чувствительность к водороду	Носитель активности	δ в г/см²
1 H	**1**, 2, 3	—	—	—	—	—	—
2 He	3, **4**	—	—	—	—	—	—
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 с.; 40 с.	0,24; —	да	1 ; 1	^{16}N (?)	> 3
10 Ne	**20**, 21, 22	—	—	—	—	—	—
11 Na	23	40 с.; 15 ч.	— ; 0,12	да	1 ; *a*	^{23}Ne (?); ^{24}Na	> 4
12 Mg	**24**, 25, 26	40 с.; 10 м.; 15 ч.	— ; 0,07; 0,12	„	1 ; *a*	^{23}Ne (?); ^{27}Mg; ^{24}Na	> 0,5
13 Al	**27**	2,3 м.; 10 м.; 15 ч.	0,16; 0,07; 0,12	„	*a* ; 1	^{28}Al; ^{27}Mg; ^{24}Na	> 7
14 Si	**28**, 29, 30	2,3 м.; 2,4 ч.	0,16; —	„	1 ; *a*	^{28}Al; ^{31}Si	> 5
15 P	**31**	2,3 м.; 2,4 ч.	0,16; 0,15	—	1 ; —	^{28}Al; ^{31}Si	> 3
16 S	**32**, 33, 34	14 дней	0,10;	—	—	^{32}P	> 2
17 Cl	**35**, **37**	35 м.; 14 д.	— ; 0,10	—	*a*	Cl; ^{32}P	0,3
18 A	**36**, 38, **40**	—	—	—	—	—	—
19 K	**39**, 41	16 ч.	—	—	*a*	^{42}K	> 1
20 Ca	**40**, 42, 43, 44	—	—	—	—	—	> 3
21 Sc	**45**	16 ч.	—	—	*a*	^{42}K	> 2
22 Ti	46, 47, **48**, 49, 5 0	3 м.	—	—	—	—	—
23 V	**51**	3,75 м.	0,17	да	40	^{52}V	> 1
24 Cr	50, **52**, 53, 54	3,75 м.	0,17	„	1	^{52}V	> 2
25 Mn	**55**	0,75 м.; 2,5 ч.	0,17; 0,14	да	1 ; 23	^{52}V; ^{56}Mn	< 3

Продолжение табл. 1.

Элемент	Изотопы	Периоды полураспада	Полупоглощающий слой в *г/см²* Al	γ-лучи	Чувствительность к водороду	Носитель активности	δ в *г/см²*
26 Fe	54, **56**	2,5 ч.	0,14	да	1	^{56}Mn	8
27 Co	**59**	2,5	0,14	„	—	^{58}Mn	0,7
28 Ni	56, **58**, **60**, 61, 62, 64	—	—	—	—	—	> 3
29 Cu	**63**, **65**	5 м.; 10 ч.	—	да	15; *a*	Cu; Cu	3
30 Zn	**64**, **66**, 67, 68, 70	5 м.; 10 ч.	—	„	1; —	Cu; Cu	> 10
31 Ga	**69**, **71**	20 м.; 23 ч.	0,17; —	„	3; *a*	Ga	> 5
32 Ge	**70**, **72**, 73, **74**, 76	30 м. (?)	—	—	—	—	—
33 As	**75**	26 ч.	0,16	да	6	^{76}As	> 3
34 Se	74, 76, 77, **78**, **80**, 82	35 м.	—	—	4	Se	4
35 Br	**79**, **81**	18 м.; 4,2 ч.	0,12; 0,12	—	10; *a*	Br; Br	3
36 Kr	78, 80, 82, 83, **84**, 86	—	—	—	—	—	—
37 Rb	**85**, **87**	? ?	—	—	—	—	> 2
38 Sr	86, 87, **88**	—	—	—	—	—	> 2
39 Y	**89**	—	—	—	—	—	0,015
40 Zn	**90**, 91, 92, **94**, (96)	—	—	—	—	—	> 3
41 Nb	**93**	—	—	—	—	—	—
42 Mo	92, 94, 95, 96, 97, **98** 100	30 м.; 36 ч.	—	—	—	—	> 3
43 Ma	—	—	—	—	—	—	—
44 Ru	96, 98, 99, 100, **101**, **102**, **104**	—	—	—	—	—	> 3
45 Rh	—	44 с.; 3,9 м.	0,15; —	—	15; *a*	—	0,3
46 Pd	—	15 м.; 12 ч.	—	—	—; *a*	—	> 2
47 Ag	**107**, **109**	22 с.; 2,3 м.	—; 0,08	да	30; 15	—; Ag	1,2

Продолжение табл. 1.

Элемент	Изотопы	Периоды полураспада	Полупоглощающий слои в $г/см^2$ Al	γ-лучи	Чувствительность к водороду	Носитель активности	δ в $г/см^2$
48 Cd	106, 108, 110, 111, **112**, 113, **114**, 115, 116	? ?	—	—	—	—	0,013
49 In	113, 115	13 с.; 54 м.; 3 ч. (?)	—; 0,045; —	да	12; *a*; —	— In; In	0,3
50 Sn	112, **114**, 115, 116, 117, **118**, 119, **120**, 121, 122, 124	—	—	—	—	—	>10
51 Sb	**121**, **123**	2,5 д.	0,09	да	*a*	Sb	>10
52 Te	122, 123, 124, 125, **126**, (127), 128, 130	45 м.	—	—	*a*	—	> 3
53 J	**127**	25 м.	0,11	да	5	^{128}J	4
54 Xe	124, 126, 128, **129**. 130, **131**, **132**, 134, 136	—	—	—	—	—	—
55 Cs	**133**	1,5 (?) ч. (?)	—	—	—	—	—
56 Ba	135, 136, 137, **138**	3 м.; 80 м.	—	—	1; 8	—; Ba	> 3
57 La	**139**	—	—	—	—	—	—
58 Ce	**140**, 142	—	—	—	—	—	—,5
59 Pr	**141**	5 м.; 19 ч.	—; 0,12	—	1; *a*	—	—
60 Nb	**142**, 143, **144**, 145, 146	1 ч.	—	—	—	—	—
61	—	—	—	—	—	—	—
62 Sm	144, 147, 148, 149, 150, **152**, **154**	40 м.	—	—	—	—	—
63 Eu	**151**, **153**	—	—	—	*a*	—	—
64 Gd	**155**, **156**, 157, **158**, 160	8 ч.	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 1.

Элемент	Изотопы	Период полураспада	Полупоглощающий слой в *г/см²* Al	γ-лучи	Чувствительность к водороду	Носитель активности	δ в *г/см²*
65 Tb	**159**	—	—	—	—	—	—
66 Dy	**161, 162, 163, 164**	—	—	—	—	—	—
67 Ho	**165**	—	—	—	—	—	—
68 Er	**166, 167, 168,** 170	—	—	—	—	—	—
69 Tu	**169**	—	—	—	—	—	—
70 Yb	171, **172,** 173, **174,** 176	—	—	—	—	—	—
71 Lu	**175**	—	—	—	—	—	—
72 Hf	176, 177, 178, 179, 180	—	—	—	—	—	—
73 Ta	**181**	?	—	—	—	—	—
74 W	**182, 183, 184, 186**	1 д.	—	—	15	W	—
75 Re	**185, 187**	20 ч.	0,12	—	*a*	Re	
76 Os	**186,** 187, 188, 189, **190** **192**	—	—	—	—	—	
77 Ir	—	19 ч.	0,12	—	*a*	Ir	0,3
78 Pt	—	50 м.	—	—	*a*	Au	
79 Au	—	2,7 д.	0,04	—	*a*	—	2
80 Hg	196, 197, 198, 199, 200 201, **202,** 203, 204	—	—	— —	—	—	0,2
81 Tl	**203, 205**	—	—	—	—	—	> 6
82 Pb	203, 204, 205, **206** 207 **208,** 209, 210	—	—	— —	—	—	—
83 Bi	**209**	—	—		—	—	> 10
90 Th	**232**	1 м.; 24 м.	—	—	~ 1; ~ 1	—	—
92 U	**238**	15 с.; 40 с.; 13 м.; 100 м.	—; —; 0,14; 0,07	да	—	см. § 11	—

топы, составляющие не меньше 20% данного элемента. Столбец 3 дает найденные периоды полураспада в порядке их возрастания. Столбец 4 дает „полупоглощающий слой" для β-лучей в *г/см* алюминия. Средняя энергия β-лучей в миллионах вольт грубо может быть получена умножением данных 4 и 8-го столбцов. Столбец 5 указывает, сопровождается ли β-испускание γ-лучами. Столбец 6 дает чувствительность активации по отношению к веществам, содержащим водород. Она дается или указанием численной величины коэфициента чувствительности (его определение см. в § 1; коэфициент чувствительности, равный единице, означает, что активация не увеличивается в присутствии веществ с содержанием водорода) или буквой *a*, что означает, что активация увеличивается веществами с содержанием водорода, но коэфициент чувствительности не измерен. Столбец 7 указывает носителя активности. Столбец 8 дает полупоглощающий слой для медленных нейтронов.

В некоторых случаях двум активным продуктам, полученным при бомбардировке нейтронами различных элементов, приписывался один и тот же период (хотя бы точно был измерен только один из них), если химическими опытами была установлена тождественность этих продуктов. То же самое имеет место для некоторых полупоглощающих слоев для β-лучей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fermi, Amaldi, D'Agostino, Rasetti, Segrè, Proc. Roy Soc. A **146**, 483, 1934 (см. Успехи физич наук т. **14**, в. 8, 1934).
2. Fermi, Amaldi, Pontecorvo, Rasetti, Segrè, Ric. Scient. **2**, 280, 1934; Fermi, Pontecorvo, Rasetti, Ric. Scient. **2**, 380, 1934; Amaldi, D'Agostino, Segrè, Ric. Scient. **2**, 381, 1934; Amaldi, D'Agostino, Fermi, Pontecorvo, Rasetti, Segrè, Ric. Scient., **2**, 467, 1934; 1, 123, 1935; некоторые из наших опытов были повторены Бьерджем и Весткоттом (Bjerge a. Westcott, Proc. Camb. Phil. Soc., **31**, 145, 1935) при этом были получены аналогичные результаты.
3. Dunning, Phys. Rev. **45**, 586, 1934.
4. Lea, Nature **133**, 24, 1934. Proc. Roy. Soc. A, **150**, 637, 1935.
5. Szilard a. Chalmers, Nature **134**, 494, 1934.
6. Meitner, Naturwiss. **45**, 789, 1934.
7. Szilard a. Chalmers, Nature **134**, 462, 1934.
8. Chadwick a. Goldhaber, Nature **135**, 65, 1935.
9. Bjerge a. Westcott, Nature **134**, 286, 1934.
10. Lawrence, Phys. Rev. **47**, 17, 1935.
11. Curie, Joliot a. Preiswerk, C. R. **198**, 2089, 1934.
12. v. Hevesy, Nature, **135**, 96, 1935.
13. Szilard a. Chalmers, Nature, **135**, 493, 1935.
14. Mc Lennan, Grimmett a. Read, Nature, **135**, 147, 1935.
15. Grosse a. Agruss, Phys. Rev. **46**, 241, 1934.
16. Hahn u. Meitner, Naturwiss. **23**, 37, 1935.
17. Dunning, Begram, Sink a. Mitschell, Phys. Rev. **48**, 265, 1935.