

коп.

Всесоюзный совет научных инженерно-технических обществ ВСНТО

УНИВЕРСИТЕТ

ФИЗИКО-ХИМИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

им. академика Н. Д. ЗЕЛИНСКОГО

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ**

Выпуск 7

Проф. И. В. КУРЧАТОВ

РАСЩЕПЛЕНИЕ ЯДЕР НЕЙТРОНАМИ

Москва

1 9 3 6

24828

КОНТРОЛЬНЫЙ ЛИСТОК
СРОКОВ ВОЗВРАТА

КНИГА ДОЛЖНА БЫТЬ
ВОЗВРАЩЕНА НЕ ПОЗЖЕ
УКАЗАННОГО ЗДЕСЬ СРОКА

Колич. пред. выдач

Д.Х.

42
~~42~~ 78
~~85~~
9/12 512 182

24828

21057
Всесоюзный совет научных инженерно-технических обществ

УНИВЕРСИТЕТ

физико-химии и энергетики

им. академика Н. Д. ЗЕЛИНСКОГО

539
К 847

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ

Выпуск 7

1944 г.

Проф. И. В. КУРЧАТОВ

РАСЩЕПЛЕНИЕ ЯДЕР НЕЙТРОНАМИ

24828
АРХИВ

1980
0861

КР
БИБЛИОТЕКА
ОБЛ. БИБЛИОТЕКИ
г. СВЕРДЛОВСК

ЧИТ. ЗАЛ
Центр. обл. биб-ки
им. Зелинского

Москва
1936

539.152

Редактор: Научно-издательский отдел НИС МИХМ А. И. Чацкий

Сдано в набор 29/III-36 г.

Подписано в печать 7/VI-36 г.

Тир. 1500

Мособлгорлит № 80251

Зак. № 881

Бум. 62×94

Печатных листов 1,3, по 48000 бук. зн. в 1 п. л. Авторск. лист. 1,6

Тип. Международного Аграрного Института, Москва, ул. Коминтерна, 14.

РАСЩЕПЛЕНИЕ ЯДЕР НЕЙТРОНАМИ

Общие замечания

Данные о расщеплении атомного ядра физика начала получать лишь в последние годы, но сейчас уже в этой области накоплен обширный материал.

Для химиков и физико-химиков особый интерес представляет расщепление ядер нейтронами, что и составит основную тему этой статьи.

Для того, однако, чтобы лучше разобраться в развитии идей и хода работ с нейтронами нам необходимо, хотя бы немного, остановиться на самых первых работах по расщеплению атомного ядра и ознакомиться с общими методами, которые используются в этих исследованиях.

Попытки вызвать расщепление ядра и добиться превращения одного элемента в другой делались много раз, но только Резерфорду (одному из самых замечательных физиков нашего времени) удалось впервые найти правильные пути решения задачи. Резерфорд применил, как средство расщепления ядер, потоки α -частиц, ядер гелия, двигающихся со скоростями в 20000 километров в секунду.

Долгое время единственным источником столь быстрых частиц служили излучения радиоактивных продуктов распада радия и тория; в последнее время, однако, физики располагают установками, которые позволяют искусственным путем сообщить разным частицам эти большие скорости. Несколько дальше мы ознакомимся с этими установками.

Сейчас же нам нужно разобрать вопрос о том, почему, вообще говоря, необходимо пользоваться для расщепления ядра быстрыми частицами и почему столь редко наблюдаются явления превращения одного элемента в другой.

Достаточно вспомнить современную картину строения атома для того, чтобы сразу ответить на оба вопроса. Мы будем исходить из атома Бора — Резерфорда, оставляя в стороне волновые представления. Нам здесь важно только отметить, что и волновые теории ничего не меняют в принципиальной стороне вопроса.

По Бору и Резерфорду строение атома аналогично строению планетной системы; в центре атома расположено ядро с диаметром приблизительно равным 10^{-12} — 10^{-8} см; положительный заряд ядра, выраженный в зарядах электрона, равен порядковому номеру элемента в периодической системе, масса его практически равна массе атома.

На расстояниях приблизительно в $10^4 - 10^5$ раз больших диаметра ядра, т. е. равных $10^{-8} - 10^{-9}$ см вокруг ядра по определенным орбитам обращаются электроны, число которых также равно порядковому номеру элемента; атом, таким образом, в целом нейтрален. Благодаря этому возможно тесное сближение атомов разных элементов и этим обусловлена большая вероятность нормальных химических реакций, идущих за счет электронных обменов внешней оболочки атомов.

Нетрудно видеть, что совсем другие условия господствуют для ядер. При сближении ядер, они будут испытывать громадное электростатическое отталкивание, так как очевидно, на малых расстояниях (меньших диаметра орбит) электронные оболочки уже не будут компенсировать больших положительных зарядов ядра. Только в том случае и возможно тесное сближение ядер, когда ядра движутся с большой относительной скоростью и несмотря на отталкивание, все же смогут подойти одно к другому на небольшие расстояния.

Вполне понятно с этой точки зрения, что легче могут быть реализованы расщепления легких ядер, имеющих меньший заряд, чем тяжелых. Далее ясно, что легче вызвать расщепление частицами, имеющими малый заряд ядра, и лучше всего употреблять для этой цели атомы водорода, заряд ядра которых равен единице.

Эти представления явились программой работ ряда больших лабораторий и институтов, занимавшихся исследованием свойств ядра. Предполагалось, что, употребляя в качестве снарядов разрушения протоны, удастся вызвать ядерные реакции при относительных скоростях частиц, меньших, чем те, с которыми оперировал Резерфорд и которые лабораторным путем не могут быть пока получены.

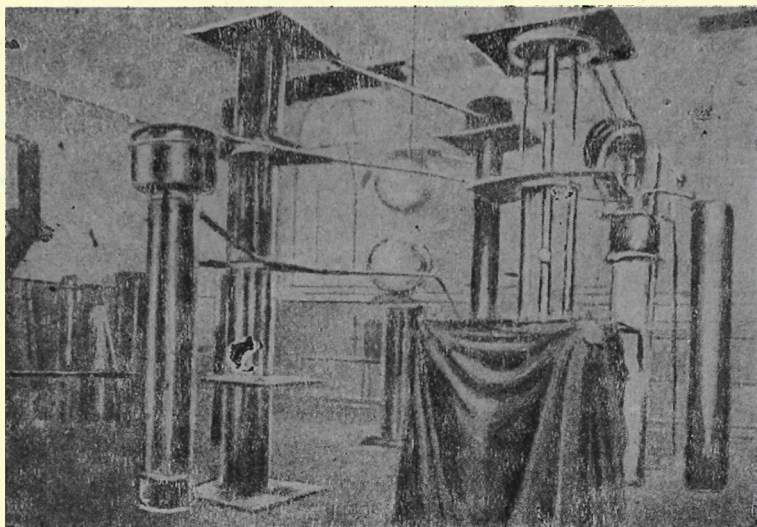
Как хорошо известно, эти предположения оправдались блестящим образом. Кокрофту и Уолтону в Кембридже первым удалось вызвать разрушение ядер пучком протонов. Они получали протоны больших скоростей, ускоряя их в электрическом поле в трубках, очень напоминающих обычные рентгеновские трубки, и работающие на еще более высоких напряжениях до 500 и даже до 700 тысяч вольт.

Трубка Кокрофта и Уолтона представлена на фигуре 1.

Откачивая трубку и прикладывая затем к ней напряжение от установки, Кокрофт и Уолтон ускоряли протоны, которые они, при помощи специального устройства, вводили в верхнюю часть трубки фиг. 1 до скоростей в 8000 километров в секунду. Оказалось, что уже при скоростях протонов 4000 километров в секунду (т. е. энергии порядка 100000 вольт) протоны, попадая на ядра лития, приводят к ядерному взрыву, в результате которого из одного атома водорода и одного атома лития образуется два атома гелия. Как видим, здесь уже можно вызвать ядерные реакции при меньших скоростях, чем с ядрами гелия в первых опытах Резерфорда. Благодаря сравнительно малым отталкивательным силам между ядрами лития с зарядом 7 и протоном с зарядом 1 нужны сравнительно небольшие скорости частиц, для того, чтобы преодолеть эти силы и сблизить ядра.

Следуя этим общим идеям, Резерфорд в 1933 году исследовал взаимодействие двух ядер, которые должны были бы давать наимень-

шее отталкивание при сближении, а именно взаимодействие двух ядер водорода. По ряду соображений им были выбраны для этой цели ядра тяжелого изотопа водорода с массовым числом 2. Оказалось, что здесь ядерная реакция возникает при скоростях частиц, равных только 1300 километров в секунду (при энергиях в 10—20.000 вольт).



Фиг. 1.

В процессе ядерной реакции из двух ядер тяжелого изотопа водорода возникает два других изотопа того же водорода: один обычный протон, другой изотоп с массовым числом 3. Соответствующая реакция, таким образом, может быть записана в виде:



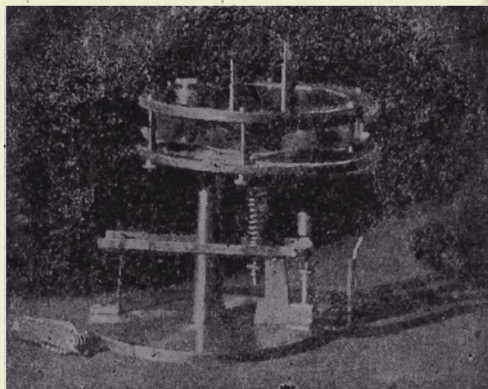
Казалось бы, что реакция водорода с водородом ставит нижний предел для скоростей частиц, которые еще могут вызывать ядерные превращения; в этом случае отталкивательные силы между ядрами минимальны.

Поразительные открытия последних лет показали, однако, что это оказывается неверным. Были обнаружены новые частицы (нейтроны), масса которых равна массе протона и заряд которых равен нулю. Очевидно, что для нейтронов, не имеющих заряда, не будут существовать те ограничительные условия для сближения с ядрами, которые так сильно затрудняют взаимодействие ядер во всех других случаях и а priori ясно, что нейтроны будут очень эффективны в ядерных превращениях.

Прежде чем переходить к рассмотрению работ с нейтронами нам нужно ознакомиться с методами исследования, применяемыми в ядерной физике.

Методы исследования

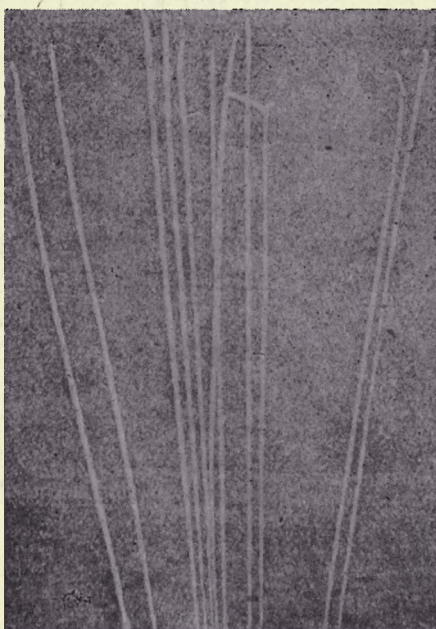
В виду крайней редкости событий, случающихся с ядрами, все эти методы построены на обнаружении одного атома, одного ядра или одного электрона. Решение такой задачи возможно только потому, что частицы в ядерных процессах имеют большие скорости и этим резко отличаются от мириадом атомов и электронов, образующих, применяемую в исследовании, аппаратуру.



Фиг. 2.

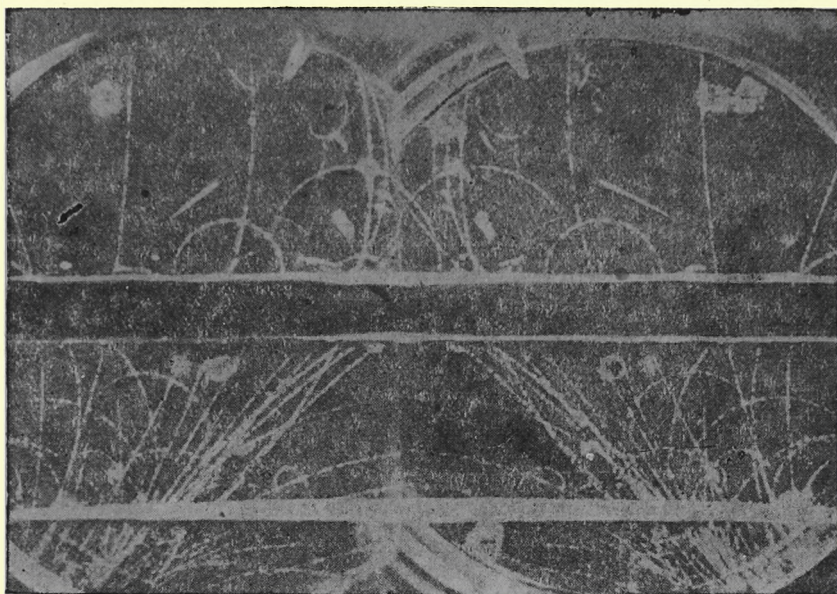
Очень большое значение в методике ядерных исследований имеют камера Вильсона и счетчик Гейгера.

Производя резкое расширение газа, насыщенного парами воды или спирта из-за охлаждения при таком расширении мы создаем атмосферу



Фиг. 3.

перенасыщенного пара в камере Вильсона. Конденсация пара в капельки происходит на тех ионах, которые в момент расширения образовались на пути быстро протекшего через газ камеры ядра или электрона. При интенсивном освещении этих капелек мы, таким образом, можем видеть, по оставленному следу, как летела частица через камеру и какова природа этой частицы. На последний вопрос мы получаем ответ потому, что характер ионизации, создаваемой частицей



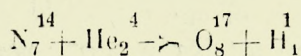
Фиг. 4.

в газе, зависит от ее природы и весьма различен для протона, электрона, α -частицы и т. д. На фигурах 2, 3 и 4 воспроизведена камера Вильсона и фотографии, получающиеся в ней следов частиц. На фотографии 3 даны следы α -частиц, на фотографии 4—следы космических электронов. Камера Вильсона представляет собой могучий и чрезвычайно наглядный метод исследования. Рассмотрим, например, фотографию расщепления ядра азота (фиг. 5), полученную Блэккетом в Кембридже. Мы видим на ней ряд прямых линий, представляющих собой следы α -частиц, вылетающих из одного из продуктов распада радия. Мы видим далее, что с одной из этих частиц что-то случилось особенное на ее пути через, наполненную азотом камеру. Вместо одного пути возникли две (1) и (2) ветви, при этом отличной от первоначального следа α -частицы структуры. На основании изучения структуры этих веток можно утверждать, что тонкий длинный след (1) принадлежит протону, а жирный и короткий (2)—частице с большим зарядом, и массой, чем α -частица.

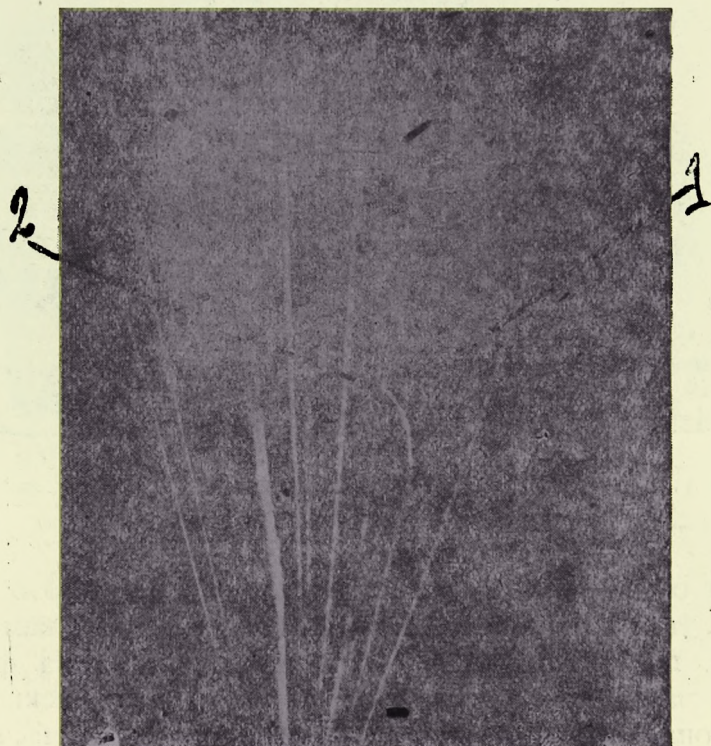
Нельзя иначе трактовать эту картину, как только допустив, что здесь имеют место следующие процессы: α -частица, ядро гелия, попало в ядро азота; из вновь образовавшегося ядра вылетел протон и

оттолкнул при этом, благодаря отдаче, оставшееся ядро. Угол в ветке образовался потому, что большой импульс был получен ядром от налетевшей λ частицы.

Ядерная реакция в этом случае должна быть записана следующим образом:



Камера Вильсона позволяет как бы видеть весь процесс расщепления; благодаря этому методу мы можем следить за ядерными реакциями даже более детально, чем за обычными химическими реакциями атомов.

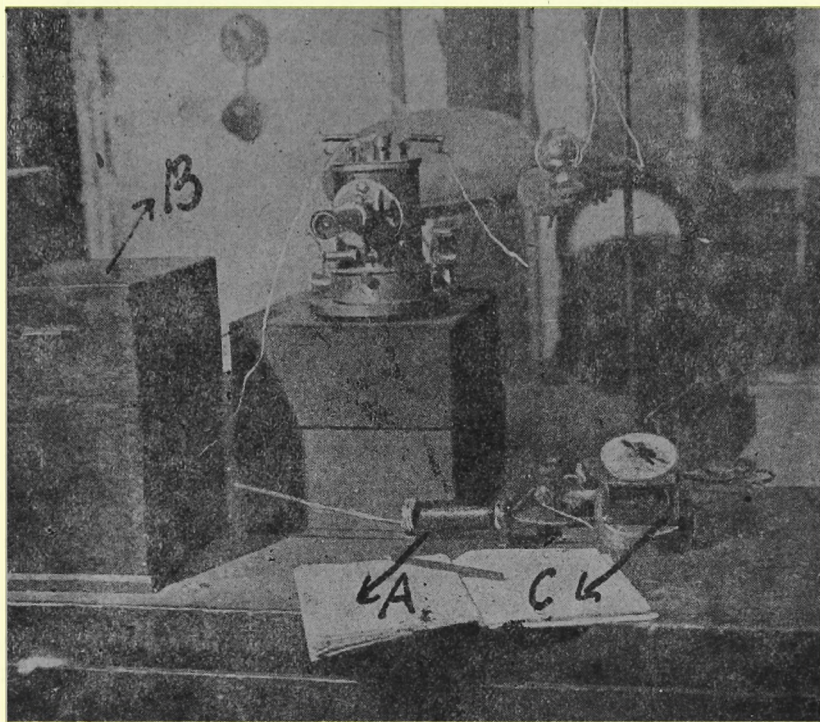


Фиг. 5.

Вместе с тем такой метод исследования очень громоздок, требует затраты очень больших усилий и времени. Достаточно здесь сказать, что Блэккету, фотографию расщепления азота которого, мы только что рассматривали, пришлось сделать 23000 снимков для того, чтобы найти в них 8 таких расщеплений. Понятно поэтому, что метод камеры Вильсона может иметь лишь ограниченную распространенность.

Счетчик Гейгер—Мюллера, позволяющий отмечать прохождение через него каждой быстрой заряженной частицы, представляет собой трубку, на оси которой натянута тонкая проволока диаметром в 0,1—0,2 миллиметра. Концы трубки закрыты изолирующими пробками. Между трубкой и нитью прикладывается напряжение такой величины,

что газ в трубке близок к состоянию пробоя, когда он теряет свои изолирующие свойства и становится проводником электрического тока. Если в этих условиях через счетчик пролетает быстрый электрон или быстро движущееся ядро, оно вызывает ионизацию, в результате чего через счетчик пройдет импульс тока. Этот импульс тока может быть усилен при помощи радиотехнических схем и тогда он будет приводить в движение электромагнитный механизм, отмечающий движением стрел-



Фиг. 6.

ки. на одно деление каждую, пролетевшую через счетчик, частицу. На фиг. 6 приведена фотография установки со счетчиком Гейгер-Мюллера. На фотографии мы видим счетчик (А)—ящик, в котором собрана усилительная схема и расположен источник высокого напряжения (В) и электромагнитное реле. (С).

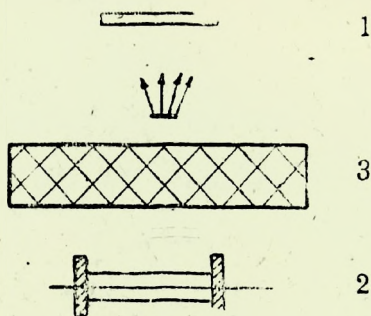
Обратимся теперь непосредственно к нашей теме.

Открытие нейтрона

Ботэ и Бэккер производили в 1930 году следующие опыты. α -частицы полония (одного из продуктов распада радия) они направляли на разные вещества (1) и следили за отбросами счетчика (2), который был защищен от радиоактивного источника большой толщиной свинца (3) (фиг. 7). В этих опытах они хотели выяснить, не излучают ли те ядра, которые подвергаются расщеплению α -частицами γ -излучения. В своих измерениях Ботэ и Бэккер действительно подтвер-

дили эти ожидания, так как те ядра, относительно которых было известно, что они испытывают превращения, испускали и γ лучи.

Испускаемое при превращении γ -излучение проходило через свинец и вызывало дополнительные отбросы в счетчике. Оказалось, что чем больше вероятность расщепления вещества, тем больше и интенсивность γ -излучения. В этой закономерности оказалось, однако, одно очень интересное исключение. По старым данным было известно, что ядра бериллия не испытывают превращения при обстреле α -частицами и вместе с тем счетчик давал максимальное число отбросов именно тогда, когда над радиоактивным источником помещалась бериллиевая пластинка.

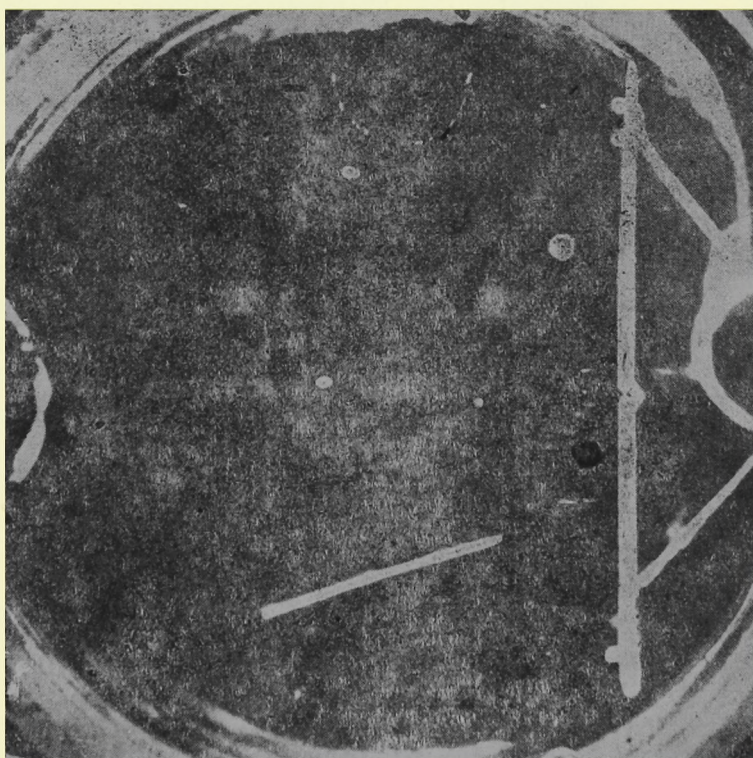


Фиг. 7.

Жолио и Кюри исследовали предполагаемое γ -излучение из бериллия другими методами. В одном из опытов на пути излучения, выходящего из бериллия, на который падали α -частицы полония, они поставили камеру Вильсона и обнаружили в ней необычные трэки. Оказалось, что наряду с путями электронов, которые естественно ожидалось и которые получаются в результате вырывания γ -лучами электронов из стенок и газа камеры, в ней были заметны следы протонов и более тяжелых частиц (см. фиг. 8 и 9). В некоторых случаях эти следы зарождались в парафиновой пластинке, расположенной в камере; часто они возникали в наполняющем камеру газе (фиг. 9). Кюри и Жолио не дали правильного объяснения происхождения этих следов. Объяснил появление следов Чадвик, который допустил существование новых частиц—нейтронов. На основании ряда данных он показал, что масса этих частиц равна массе протона, а заряд их равен нулю. Последнее обстоятельство обуславливает малое поглощение нейтронов при их прохождении через вещество; оказалось, что нейтроны без заметного ослабления могут проходить толщи свинца, порядка 10—20 см, между тем как даже самые быстрые протоны, частицы очень близкие по массе нейтрону, но с зарядом, нацело тормозятся уже десятими долями миллиметра того же свинца. По Чадвику появление следов тяжелых частиц, которые наблюдались Кюри и Жолио в камере Вильсона, обусловлено столкновением нейтрона с ядром, напоминающим столкновение бильiardных шаров. При ударе нейтрона об ядро, последнее приходит в движение, и если это ядро было протоном, протон в определенных условиях принимает на себя полную скорость нейтрона, который после такого удара останавливается. Наблюдения с



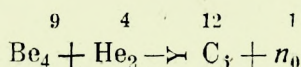
Фиг. 8.



Фиг. 9.

камерой Вильсона, наполненной газами, атомы которых имеют разные массы (водород, гелий, азот и аргон) показали прежде всего, что представления Чадвика являются правильными, и позволили кроме того вычислить скорость тех нейтронов, которые вылетают из бериллия, обстреливаемого α -частицами полония. Скорость таких нейтронов оказалась очень большой, порядка 30000 километров в секунду.

Многочисленные опыты, которые делались за последние годы, доказывают с полной несомненностью существование нейтронов. Теперь известны и другие методы получения этих частиц, но пожалуй самым удобным остается до сих пор метод получения нейтронов из бериллия, обстреливаемого α -частицами радиоактивных элементов. Можно показать, что в этом случае нейтроны получаются в результате превращения ядра бериллия в ядро углерода. Соответствующая ядерная реакция может быть написана следующим образом:



Этот источник нейтронов изготавливается следующим образом: небольшую стеклянную трубку заполняют порошком бериллия, наполняют затем эманацией радия и тщательно запаивают.

Расщепление нейтронами ядер азота и фтора

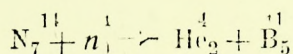
Уже очень быстро после открытия нейтронов была учтена их особая роль в ядерных реакциях. Заряд нейтрона равен нулю; нейтрон, таким образом, может проникать в ядра самых тяжелых элементов и при этом вовсе не обязан обладать большими скоростями. При помощи нейтронов можно рассчитывать получить очень интересные данные в вопросе об ядерных превращениях.

Уже через полгода после открытия нейтронов Фезер в Кэмбридже получил ряд доказательств того, что нейтроны могут вызывать расщепление ядра. Направляя в камеру Вильсона, наполненную азотом, нейтронное излучение Фезер наряду с прямолинейными отрезками, представляющими собой пути атомов отдачи азота, наблюдал значительное число вилок вида, представленного на фиг. 10. Эти вилки несколько напоминают ту вилку для расщепления азота, которую получил Блэккет (фиг. 5). Как же расшифровать те процессы, которыми обусловлено образование вилок?

Фезер выдвинул для этого такое объяснение: нейтрон (пути нейтрона мы в камере не видим, так как, не обладая зарядом, он не производит ионизации) вызывает расщепление ядра азота; азот захватывает нейтрон и испускает затем очень быструю α -частицу (длинный след на фотографии); при вылете α -частицы оставшееся ядро, благодаря отдаче, также получает большую скорость (короткий след на фотографии). Угол между треками той и другой частицы возникает потому, что ядро получает большой импульс со стороны ударившего нейтрона. Фотография допускает количественный расчет вилок; по длинам

трэков могут быть рассчитаны скорость α -частицы и ядра отдачи, а по этим данным и углу между трэками может быть определена и скорость нейтрона. Оказалось, что найденная таким образом скорость нейтрона та же, что и определенная другими методами. Это является очень сильным доказательством правильности объяснения Фезера.

Реакцию расщепления азота нейтронами мы должны, следовательно, записать так:

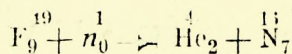


Метод изучения расщепления ядер нейтронами в камере Вильсона получил широкое распространение. Такие же вилки были получены в камере Вильсона при заполнении ее неона и парами фтористых соеди-



Фиг. 10.

нений. Для нас особенно интересен последний случай. По характеру вилок можно было во всех случаях утверждать, что после захвата нейтрона вылетает α -частица; таким образом для фтора реакция расщепления должна быть записана следующим образом:



В результате реакции из нейтрона и фтора получается азот и гелий. Обратим, однако, внимание на массовое число образующегося ядра азота. Оно оказывается равным 16, между тем как устойчивых ядер с таким массовым числом не существует. Как показывает масс-спектрогра-

фический анализ, главная масса ядер обычного азота имеет массовое число 14 и лишь очень немногие имеют массовое число 15. В обычном азоте ядер с массовым числом 16 не существует; можно думать, что они неустойчивы и могут существовать лишь ограниченный промежуток времени.

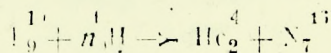
Эти соображения и заключения имели громадное значение в исследовании нейтронов; они привели к принципиально новому, замечательному методу, благодаря которому удалось установить ядерные превращения при нейтронном воздействии практически для всех атомов периодической системы элементов.

Искусственная радиоактивность при нейтронном воздействии

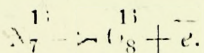
То осложнение, которое получилось при расщеплении фтора нейтронами, требовало очевидно дополнительных исследований образовавшегося продукта реакции, т. е. азота 16. Сам Харкинс пытался провести такого рода изыскания, но не получил определенного ответа. Этот ответ был дан Ферми в замечательной работе, положившей начало новой области ядерной физики.

Ферми подвергал воздействию нейтронов различные элементы, в том числе и фтор, и затем после облучения испытывал при помощи счетчика Гейгер-Мюллера облученные элементы на радиоактивность. Оказалось, что почти все эти элементы вызывали отбросы в счетчике Гейгер-Мюллера. В этих элементах после облучения протекали какие-то ядерные процессы, созданные предварительным облучением нейтронов (далее мы увидим, что часто в течение очень длительного промежутка времени).

Было показано, что отбросы в счетчике Гейгер-Мюллера вызывались во всех случаях потоком β -частиц — электронов с энергией обычно около 1—2 миллионов вольт. Это обстоятельство позволяет нам продолжить реакцию со фтором, которую мы только что рассматривали. Первая стадия тех процессов, которые здесь происходят, как мы видели, может быть представлена уравнением:



Мы знаем далее, что после воздействия нейтронов облученная мишень испускает электроны; нужно думать, что эти электроны вылетают из ядра азота; после излучения электрона масса ядра останется той же, а заряд его возрастет на единицу и, следовательно, можно написать:



Ядро кислорода с массовым числом 16 устойчиво, и последнее уравнение исчерпывает процессы, которые были вызваны в ядре фтора захватом нейтрона.

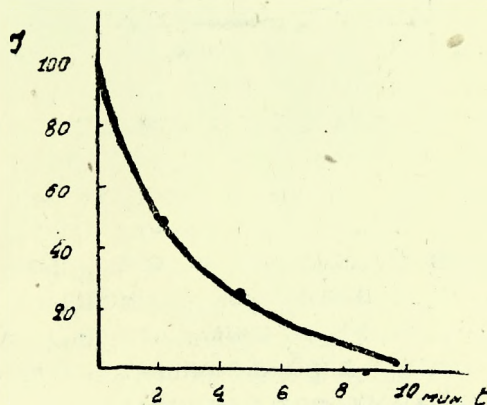
Электронное излучение фтора после нейтронного воздействия, как было выяснено Ферми, падает во времени по тому же закону,

$$J = J_0 e^{-\lambda t}$$

как и излучение обычных радиоактивных тел. Здесь J —интенсивность излучения через промежуток времени, t —после окончания облучения, J_0 —начальная интенсивность излучения, измеренная сейчас же после окончания облучения, а λ —постоянная, характеризующая новое радиоактивное ядро.

Как мы видим, этот метод исследования очень прост; для производства измерений достаточно располагать источником нейтронов, нужным для работы элементом и счетчиком Гейгера Мюллера.

Благодаря крайней простоте метода искусственной радиоактивности, он получил очень широкое распространение и теперь мы обладаем колоссальным материалом, распространяющимся практически на все элементы.

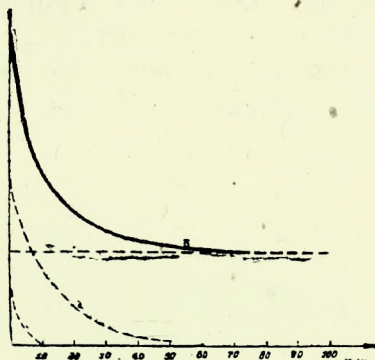


Фиг. 11.

Ферми и другими были подвергнуты нейтронному воздействию почти все элементы периодической системы, за исключением Кг, Хе и радиоактивных элементов. Из радиоактивных элементов подвергались нейтронному облучению только уран и торий. Почти все элементы после облучения испускали электроны, т. е. везде происходили ядерные превращения при действии нейтронов. Не дали пока расщепления и явлений искусственной радиоактивности лишь Н, Не, Ве, С и Са. Обратимся к детальному анализу результатов, полученных в этих исследованиях и рассмотрим сначала характер спада активности во времени, который был установлен в опытах с разными элементами.

В ряде случаев кривая спада активности может быть представлена показательной функцией с определенным для каждого элемента периодом полураспада. Так, после облучения кремния активность падает вдвое через каждые 2,3 минуты независимо от того, через сколько времени после конца облучения начинаются измерения. Здесь образуется, таким образом, в результате воздействия нейтронов лишь одно радиоактивное ядро с периодом полураспада в 2,3 минуты (фиг. 11).

В большинстве случаев, однако, кривые имеют более сложный характер, как например при облучении нейтронами Al. Анализ этой кривой показывает, что она может быть разложена на 3 кривых, спадающих каждая по показательному закону; ординаты первой кривой уменьшаются в два раза через каждые 2,3 минуты; ординаты второй уменьшаются вдвое через каждые 10 минут, и наконец, ординаты третьей уменьшаются вдвое за каждые 15 часов (фиг. 12).



Фиг. 12.

Поскольку сейчас представляется несомненным, что излучения каждого радиоактивного ядра падают во времени по показательному закону, мы должны сделать заключение, что в результате тех превращений, которые испытывает ядро алюминия после столкновения с нейтроном, возникает три новых радиоактивных ядра. Мы сейчас увидим, что это заключение может быть обосновано и непосредственными опытами.

Естественно спросить себя, каков же механизм тех превращений, которые, как мы заключаем из явлений искусственной радиоактивности, происходят после столкновения с нейтронами в ядрах почти всех элементов периодической системы.

На первый взгляд разрешение этого вопроса кажется невозможным. По интенсивности электронного излучения, которое испускают элементы после облучения, можно определить количество радиоактивного вещества, которое получается в опыте. Оказывается, что масса новых радиоактивных элементов, меняясь от одного случая к другому, остается везде очень малой, порядка 10^{-17} — 10^{-18} грамм.

Понятно, что обычные методы химического анализа абсолютно непригодны для определения природы столь ничтожных количеств вещества. Вопрос решают, однако, методы радиохимического анализа, принципиальные основы которого принадлежат Марии Кюри, так блестяще использовавшей их для выделения радия.

В этом методе следят за поведением радиоактивного вещества, которое подвергается тем или иным химическим реакциям, обнаруживая его по активности осадка или раствора на счетчике Гейгер-Мюллера.

Рассмотрим, что дает радиохимический анализ на примере превращений, вызываемых нейтронами в алюминии. Нет оснований думать,

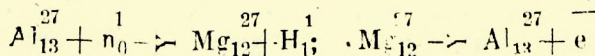
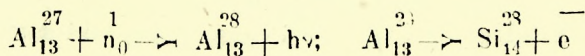
что новые радиоактивные ядра будут сильно отличаться по своему заряду и массе от ядер исходного элемента. Наоборот, все известные сейчас превращения показывают, что в процессе ядерных превращений получаются обычно соседние элементы, т. к. в этих превращениях из ядра вылетает или протон, или α -частица, элементы малого заряда и массы.

Итак, возвращаемся опять к алюминию. Ранее мы указывали, что кривая распада свидетельствует об образовании у алюминия, подвергающегося нейтронному обстрелу, трех радиоактивных ядер. Сейчас мы покажем, что радиохимический анализ позволяет это утверждать с полной определенностью и более того, позволяет сказать какова природа новых ядер.

Для выяснения химической природы радиоактивных элементов, получающихся при облучении алюминия нейтронами, несколько грамм облученного металлического алюминия растворяется в соляной кислоте, после чего в раствор добавляют небольшое количество хлористого магния и хлористого натрия; предполагается, что радиоактивные ядра должны быть или ядрами натрия, или ядрами магния. Далее в раствор приливают избыток раствора едкого натрия (NaOH). Из раствора при этом выпадает осадок гидроокиси магния $[Mg(OH)_2]$, алюминий же остается в растворе в виде алюмината натрия $[Al(ONa)_2]$. Осадок гидроокиси магния, исследованный на радиоактивность, содержит в себе основную массу радио-элемента с периодом полураспада в 10 минут, откуда следует, что этот элемент является радиоактивным изотопом магния. Два других неизвестных радио-элемента остаются при этом в растворе; природа одного из них может быть установлена отдельными опытами следующим образом: облученный алюминий, после растворения в соляной кислоте и добавления небольших количеств хлористого натрия и хлористого магния, осаждают аммиаком в виде гидроокиси $Al(OH)_3$. Натрий в фильтрате осаждается с помощью кислого пиросурьмянокислого калия. Осадок оказывается радиоактивным, распадаясь с периодом полураспада в 15 часов; этот элемент является, следовательно, радиоактивным изотопом натрия.

Третий радио-элемент, живущий всего 2, 3 минуты, не может быть отделен химическим путем от алюминия и можно думать поэтому, что он является радиоактивным изотопом этого элемента.

Ядерные реакции, которые вызывают образование трех рассматриваемых радиоактивных ядер, следовательно, без труда могут быть установлены и должны быть записаны следующим образом:



ЧИТ. ЗАЛ

Центр. обл. биб-ка

им. Белинского

КНИГОХРАНИЛИЩЕ

ОБЛ. БИБЛИОТЕКИ

г. СВЕРДЛОВСК

Тем же путем, как и в случае алюминия, была установлена природа радиоактивных ядер, а тем самым и природа ядерных превращений для очень большого числа элементов. Некоторые из полученных здесь результатов сведены в таблице:

Исходное ядро	Частица, вы- ходящая после захвата нейтрона	Радиоактивное ядро	Период полураспада	Ядро—продукт реакции
$^{19}_{9}\text{F}$	^4_2He	$^{16}_7\text{N}$	9 сек.	$^{16}_8\text{O}$
$^{19}_{9}\text{F}$	$h\nu$	$^{20}_9\text{F}$	40 сек.	$^{20}_{10}\text{Ne}$
$^{23}_{11}\text{Na}$	^4_2He	$^{20}_9\text{F}$	40 сек.	$^{20}_{10}\text{Ne}$
$^{23}_{11}\text{Na}$	$h\nu$	$^{24}_{11}\text{Na}$	15 часов	$^{24}_{12}\text{Mg}$
$^{24}_{12}\text{Mg}$	^1_1H	$^{24}_{11}\text{Na}$	15 часов	$^{24}_{12}\text{Mg}$
$^{27}_{13}\text{Al}$	$h\nu$	$^{28}_{13}\text{Al}$	2,3 мин.	$^{28}_{14}\text{Si}$
$^{27}_{13}\text{Al}$	^1_1H	$^{27}_{12}\text{Mg}$	10 мин.	$^{27}_{13}\text{Al}$
$^{27}_{13}\text{Al}$	^4_2He	$^{24}_{11}\text{Na}$	15 часов	$^{24}_{12}\text{Mg}$
$^{28}_{14}\text{Si}$	^1_1H	$^{28}_{13}\text{Al}$	2,3 мин.	$^{28}_{14}\text{Si}$
$^{31}_{15}\text{P}$	^4_2He	$^{28}_{13}\text{Al}$	2,3 мин.	$^{28}_{14}\text{Si}$
$^{31}_{15}\text{P}$	^1_1H	$^{31}_{14}\text{Si}$	2,4 мин.	$^{31}_{15}\text{P}$
$^{31}_{15}\text{P}$	$h\nu$	$^{32}_{15}\text{P}$	14 дней	$^{32}_{16}\text{S}$
$^{32}_{16}\text{S}$	^1_1H	$^{32}_{15}\text{P}$	14 дней	$^{32}_{16}\text{S}$
$^{35}_{17}\text{Cl}$	^4_2He	$^{32}_{15}\text{P}$	14 дней	$^{32}_{16}\text{S}$

Исходное ядро	Частица, выле- тающая после захвата нейтрона	Радиоактивное ядро	Период полураспада	Ядро — продукт реакции
$^{51}_{23}\text{V}$	$h\nu$	$^{52}_{23}\text{V}$	3,75 мин.	$^{52}_{24}\text{Cr}$
$^{55}_{25}\text{Mn}$	^4_2He	$^{52}_{23}\text{V}$	3,75 мин.	$^{52}_{24}\text{Cr}$
$^{55}_{25}\text{Mn}$	$h\nu$	$^{56}_{25}\text{Mn}$	2,5 часа	$^{56}_{25}\text{Fe}$
$^{56}_{26}\text{Fe}$	^1_1H	$^{56}_{25}\text{Mn}$	2,5 часа	$^{56}_{25}\text{Fe}$
$^{59}_{27}\text{Co}$	^4_2He	$^{55}_{25}\text{Mn}$	2,5 часа	$^{56}_{25}\text{Fe}$
$^{107}_{47}\text{Ag}$	$h\nu$	$^{108}_{47}\text{Ag}$	22 сек.	$^{108}_{48}\text{Cd}$
$^{109}_{47}\text{Ag}$	$h\nu$	$^{110}_{47}\text{Ag}$	2,3 мин.	$^{110}_{48}\text{Cd}$
$^{127}_{53}\text{I}$	$h\nu$	$^{128}_{53}\text{I}$	25 мин.	$^{128}_{54}\text{Xe}$
$^{197}_{76}\text{Au}$	$h\nu$	$^{198}_{79}\text{Au}$	2,7 дня	$^{198}_{80}\text{Hg}^0$
$^{238}_{92}\text{U}$	?	возможны 93, 94 и 95 элементы	15 сек. 100 сек. 13 мин. 100 мин. 2,5 дня	?

Из рассмотрения этой таблицы можно сделать ряд интересных выводов. Прежде всего мы замечаем, что в легких атомах ядерные реакции часто разветвляются: из одного и того же ядра получаются несколько новых ядер в зависимости от того, что случается после захвата нейтрона. Для более тяжелых ядер уже нет этого разнообразия путей реакции. Во всех случаях возникает радиоактивный изотоп облучаемого элемента. Современные схемы строения ядра легко

объясняют эту особенность поведения тяжелых ядер, но мы не будем здесь подробнее останавливаться на деталях вопроса. Интересно только отметить, что теория допускает реакции с вылетом α -частиц и протонов также для тяжелых ядер, если последние обладают естественной радиоактивностью. И в действительности сейчас собрано много данных в пользу того, что такие реакции имеют место для урана и тория, в результате расщепления которых повидимому, образуются 93, 94 и 95 элементы, выходящие за пределы периодической системы.

Рассматривая таблицу мы обнаруживаем и другую интересную особенность: в ряде случаев мы находим, что после облучения нейтронами разных элементов образуется одно и то же радиоактивное ядро. Активность облученного кремния падает во времени так же, как активность облученного фосфора и алюминия. В результате расщепления разных ядер, расщепления идущего с вылетом протона у кремния, α -частицы у фосфора и без вылета каких-бы то ни было частиц у алюминия, везде образуется одно и то же ядро Al с массовым числом 28. Аналогичное соотношение наблюдается при облучении других элементов. Такой результат естественно вытекает из развитой выше схемы ядерных реакций и лишней раз свидетельствует о правильности схемы.

Реакции простого захвата нейтрона

Из всех рассмотренных типов реакций, особый интерес представляют реакции образования радиоактивных изотопов облучаемого элемента, в результате которых нейтрон входит во встречающееся на его пути ядро, которое при этом излучает только энергию, но не выбрасывает тяжелых частиц. Таким образом здесь правильнее говорить о синтезе, а не о расщеплении ядер. Как мы видели, возможность этого процесса простого захвата нейтрона показывается химическими методами, при помощи которых не удается отделить образующегося радиоактивного вещества от облучаемого элемента. Этот способ доказательства, основанный на отрицательных результатах, не является, конечно, особенно убедительным, и были сделаны попытки найти прямые данные правильности схемы реакций простого захвата. Такие прямые данные были получены в замечательно остроумных опытах Сцилларда и Чалмерса. Облучаемое вещество они брали не в виде элемента, а в виде молекулярного соединения. Так, в опытах с бромом они облучали бромистый этил. Можно было думать, что то ядро брома, которое испытает ядерное превращение выйдет из молекулы под влиянием большого импульса, получаемого ядром от нейтрона или γ -излучения, испускаемого в процессе захвата. В бромистом этиле должен, следовательно, образовываться атомный бром, радиоизотоп, облучаемого элемента. Очевидно возможно, путем соответствующих химических операций, отделить этот атомный бром от всей массы брома, связанного в молекуле. Этот выделенный элемент далее уже может быть химически проанализирован.

Сциллард и Чалмерс растворяли в облученном бромистом этиле ($100-200 \text{ см}^3$) небольшое количество (порядка $0,01$ грамма) элементарного брома. С помощью SO_2 переводили его в бромистоводородную кислоту HBr , которую извлекали из бромистого этила встряхиванием этила с водой. Из йодного раствора бром осаждался раствором AgNO_3 в виде AgBr . В этом осадке была сконцентрирована вся активность облученного бромистого этила. Опыты с осадком показали, что радиоактивным веществом является бром.

Реакция Сцилларда и Чалмерса доказывает, как видим, путем прямых опытов реальность реакций простого захвата.

Опыты с медленными нейтронами

Вся совокупность разобранных нами данных целиком оправдала теоретические ожидания о большой эффективности нейтронов в расщеплении атомного ядра. Но только эти опыты еще не исчерпывали бы целиком всех требований к нейтронам, как к средству расщепления ядра, которые бы могли быть к ним предъявлены. В самом деле, рассмотренные выше опыты производились с теми нейтронами, которые вылетают из ядра бериллия в результате расщепления последнего α -частицами радия и его продуктов распада. Нейтрон вылетает при этом из бериллия, как мы уже упоминали, с очень большой скоростью в $30\,000$ километров в секунду. Согласно нашим представлениям эти большие скорости вовсе не являются обязательными для того, чтобы нейтрон мог проникнуть в ядра элементов, расщепления должны были бы создавать и более медленные нейтроны.

Следуя этим идеям Ферми и его сотрудники произвели в конце 1934 г. опыты, которые привели к поразительным заключениям. Итальянские физики решили замедлить нейтроны, заставляя их проходить большие толщи водородосодержащего соединения. В качестве такого соединения они обычно использовали парафин или воду. Нейтроны, проходя через воду, испытывают время от времени столкновения с протонами и ввиду того, что масса обоих частиц примерно одинакова, при каждом столкновении энергия нейтрона в среднем уменьшается в два раза. Можно было предположить на основании некоторых наблюдений, что в среднем на каждые $2-3 \text{ см}$ пути в парафине нейтрон испытывает одно столкновение с протоном. В том случае, если толщина парафина или воды будет порядка 20 см , нейтрон испытывает $\frac{20}{2} = 10$ столкновений и, следовательно, его энергия уменьшится в 2^{10} раз, а скорость упадет приблизительно в 30 раз. Вместо быстрых нейтронов мы получим, таким образом, медленные, со скоростью в 1000 километров в секунду.

Результат исследования искусственной радиоактивности, возбуждаемой такими замедленными нейтронами, оказался совершенно неожиданным. Оказалось, что медленные нейтроны не только вызывают искусственную радиоактивность, но в еще большей степени, чем быстрые.

В некоторых случаях они оказались в 1000 раз более эффективными, чем быстрые. Эти замечательные опыты окончательно доказывают справедливость наших исходных предположений. Кроме того они приводят нас к важному выводу, что медленно движущиеся нейтроны значительно более эффективны в ядерных реакциях. Полученные с медленными нейтронами результаты настолько поразительны, что в первое время казалось, что здесь мы имеем дело вовсе не с нейтронами, а с какими-то новыми частицами. Исследование поглощения медленных нейтронов в кадмии показывает, что слой в 0,1 мм кадмия достаточен для того, чтобы поглотить практически все нейтроны, между тем как быстрые нейтроны проходят через десятки сантиметров того же кадмия. Если вычислить по данным для поглощения замедленных нейтронов, то расстояние между нейтронами и ядром, начиная с которого нейтрон уже попадает в ядро кадмия, оказывается, что это расстояние равно 10^{-10} см, т. е. в тысячу раз больше радиуса ядра атома и нейтрона. Этот поразительный результат теперь получил истолкование с волновой точки зрения; старая теория здесь не может, конечно, дать вразумительного ответа.

Детальное исследование свойств замедленных (водой или парафином) нейтронов показало, что их скорости еще меньше, чем мы выше рассчитывали, предполагая, что расстояние, которое проходит в воде или парафине нейтрон без столкновения, — порядка 2 см. Оказалось, что это расстояние для нейтронов, скорость которых ниже 5000 километров в секунду, меньше и равно всего лишь 0,5 см; в связи с этим нейтроны, проходя через воду или парафин, испытывают большее число столкновений, чем это было указано выше и должны достигать по расчету в конце концов (в толщинах парафина всего лишь в 10 см) тепловых скоростей молекул водорода при нормальной температуре, т. е. скоростей порядка 2-х километров в секунду.

Эти выводы позволили поставить совершенно необычные опыты, в которых было доказано влияние температуры среды на ядерные реакции.

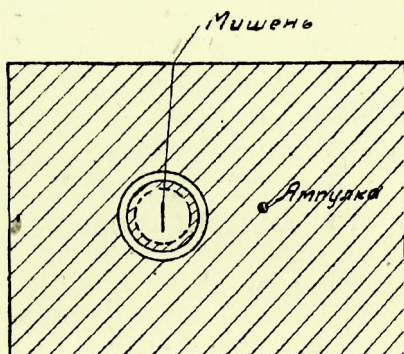
Если бы соображения о том, что при прохождении нейтронов через водород содержащие соединения в них устанавливается равновесие между скоростями нейтронов и протонов были бы верными, мы бы могли менять температуру парафина изменять и скорость нейтрона, а тем самым быть может и эффективность вызываемых нейтронами расщеплений.

Влияние температуры на ядерные превращения, вызываемые нейтронами было показано Тилеманом и Муном в следующем опыте (фиг. 13).

Внутри большого парафинового блока устанавливалась ампула и цилиндрический сосуд дюара, так, как это показано на фигуре. В дюаровском стакане был расположен полный парафиновый цилиндр с толщиной стенок около 2 см.

В опыте измерялась на счетчике Гейгер-Мюллера активность серебряной пластины (в серебре после облучения нейтронами образуются радиоактивные изотопы) один раз — когда парафин в дюаре имел ком-

натную температуру, другой раз — когда он был охлажден до температуры кипения жидкого воздуха, т. е. приблизительно до 180°C . Оказалось, что нейтроны, прошедшие через холодный парафин, вызывали активность серебра приблизительно на 40% (большую той, которая получается для парафина при комнатной температуре).



Фиг. 13.

Такие соотношения были установлены не только для серебра, но и для некоторых других элементов.

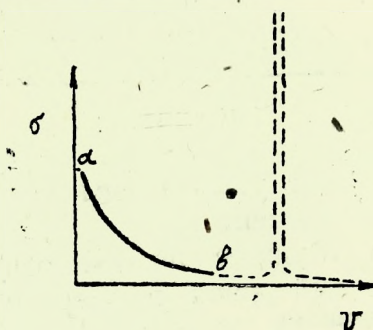
Опыты Тильмана и Муна с полной отчетливостью доказывают эффективность тепловых нейтронов в ядерных превращениях.

Последовательное развитие идей, лежащих в основе ядерной химии привело нас в конце концов к существенным выводам. Мы видим, что основные условия возможности ядерных реакций, которые мы ранее указывали (наличие большой скорости у взаимодействующих частиц) не всегда обязательны. Оказывается, что наоборот — при малых скоростях нейтронов ядерные расщепления проходят с максимальной интенсивностью.

Благодаря этому ядерные реакции с нейтронами изучаются сейчас, как мы видим, почти столь же просто и с теми же средствами, как и обычно исследуемые химиками реакции в электронных оболочках атома.

На первой стадии исследований с медленными нейтронами казалось, что вероятность ядерных реакций простого захвата у всех элементов обратно пропорциональна скорости нейтрона, т. е. графически должна быть представлена в зависимости от скорости нейтрона кривой AB на фиг. 14. Эти представления вытекали из общей теории захвата нейтрона, разработанной Бете и находились в хорошем согласии с экспериментальными фактами. Теперь, однако, выяснилось, что истинная зависимость вероятности захвата нейтронов от скорости имеет более сложный характер. Необходимость заключить это выяснилась из опытов по изучению поглощения медленных нейтронов. В этих опытах, на пути нейтронов от источника, окруженного парафином, до мишени по искусственной радиоактивности которой судят об интенсивности нейтронного потока, располагают слои вещества; измеряя активность мишени для разных фильтров между источником и мишенью определяют вероятность захвата нейтронов в исследуемом фильтре. Детальное исследо-

вание поглощения нейтронов в кадмии, в том случае когда интенсивность нейтронного потока определялась по искусственной радиоактивности серебра, привели к неожиданному результату. Оказалось, что пластина кадмия в 0,2 мм, расположенная между источником и мишенью, уменьшает приблизительно вдвое активность мишени; дальнейшее же увеличение слоя кадмия больше не сказывается на величине активности. Этому результату можно дать единственное толкование, допустив, что помимо общего и большого поглощения нейтронов при тепловых скоростях, каждый из этих элементов чувствителен кроме того к определенным скоростям нейтронов, при которых вероятность захвата также достигает больших значений. Интересно отметить, что в некоторых случаях в этой области скоростей нейтронов вероятность



Фиг. 14.

захвата даже больше, чем в области тепловых скоростей. Таким образом истинная зависимость вероятности захвата от скорости нейтрона должна быть представлена не кривой АВ фиг. 14, а более сложной кривой, изображенной пунктиром на той же фигуре.

Взаимодействие нейтронов с протонами

Итак, мы многое узнали о ядерных превращениях, направляя на ядра потоки нейтронов. Полученные нами сведения носят, однако, до известной степени формальный характер; базируясь на них мы еще очень мало можем сказать о структуре ядра. Изложенный материал весь в целом является пока предварительной стадией исследования ядра, накоплением и некоторой систематикой опытных данных. Сейчас, однако, мы, повидимому, получили некоторые возможности более углубленного исследования. Правда, здесь еще нет оформившихся представлений, но уже намечаются пути дальнейшей работы.

Сейчас представляется весьма вероятным, что в состав ядер всех элементов входят только протоны и нейтроны; число тех и других легко может быть определено по заряду и массе ядра. Порядковый номер элемента дает число протонов в ядре, а разность между массовым числом и порядковым номером, число нейтронов.

Для того, чтобы понять структуру ядра, нам необходимо, таким образом, знать, по каким законам взаимодействуют нейтрон с протоном,

нейтрон с нейтроном и протон с протоном, (основные элементы структуры ядра).

Еще год тому назад принималось, что по сравнению с теми силами, которые господствуют между нейтронами и протонами, силами взаимодействия между двумя нейтронами и двумя протонами можно пренебречь при рассмотрении явлений в ядре, т. е. в том случае, когда расстояния между частицами крайне малы. Что же касается взаимодействия между нейтронами и протонами принималось, что взаимодействие между ними равно нулю на расстояниях, больших 10^{-13} см и только тогда, когда они (если грубо говорить) приходят в соприкосновение, между частицами возникают громадные силы притяжения, в колоссальное число раз превосходящие, обычно нам известные, силы взаимодействия между другими частицами.

Экспериментальные работы последнего года, посвященные вопросу поглощения нейтронов протонами и исследования над частотой столкновений, которые испытывает нейтрон, проходя через водородсодержащие соединения (парафин и воду), с полной определенностью показали, что эти представления не точны и во всяком случае не могут быть признаны удовлетворительными.

Установленные на опыте закономерности не позволяют пока выяснить закона взаимодействия между нейтронами и протонами; можно подобрать разные формы этого взаимодействия; все они отличны от предположений, которые мы рассматривали выше и все они дают объяснение опытным данным.

Сейчас оформилось несколько точек зрения по этому вопросу. По представлениям И. Е. Тамма силы между двумя нейтронами и двумя протонами того же порядка, как и силы между нейтроном и протоном, но противоположны по знаку; сверх этого они повидимому, распространяются на большие расстояния, чем предполагалось раньше. Другая точка зрения принадлежит Ферми, который допускает возможность различных состояний нейтрона, возможность возбуждения нейтрона.

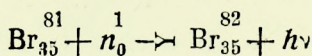
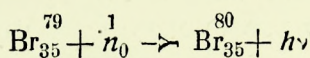
Экспериментальные факты также хорошо объясняются, если допустить, что между нейтроном и протоном на больших расстояниях порядка 10^{-11} и 10^{-10} см существует слабое отталкивание, которое на расстоянии в 10^{-13} см переходит в притяжение. Каждое из этих представлений приводит к своим выводам в вопросах структуры ядра. Нужно думать, что экспериментальные факты приведут в ближайшем будущем к выяснению истинного характера закона взаимодействия между элементарными тяжелыми частицами; тогда учение об ядре должно вступить в новую фазу и законы, управляющие строением ядра, будут для нас более ясными.

Изомерия ядра.

В заключение мы остановимся на одном обстоятельстве, которое было вскрыто методами искусственной радиоактивности, и которое представляет значительный интерес.

Опыты с облученным бромом нейтронами показывают, что в результате облучения здесь образуется три новых радиоактивных ядра, периоды полураспада которых равны соответственно 18 минутам, 4 часам и 36 часам. Химический анализ природы этих ядер показывает, что все они являются ядрами брома. Каким же образом могли образоваться эти три различных по своему строению радиоактивные ядра?

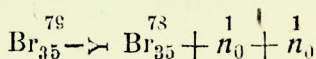
По масс-спектрографическим данным известно, что обычный бром имеет два устойчивых изотопа с массовым числом 79 и 81. Естественно ожидать, что после захвата нейтрона мы должны были бы получить два же новых радиоактивных ядра по реакциям:



Каким же образом при облучении нейтронами возникает третье ядро брома?

Обнаружив третье ядро с периодом полураспада в 36 часов, мы сначала думали, что оно возникает в результате реакции нового типа, реакции без захвата нейтрона, сопровождающейся выбрасыванием еще одного ядерного нейтрона.

Такая реакция имела бы следующий вид:



Однако, как показали и наши исследования и исследования Ферми — это объяснение неприемлемо. Дело в том, что радиоактивные ядра образуются при облучении брома и медленными нейтронами, между тем как реакция без захвата (как реакция эндотермическая) могла бы происходить только при сообщении ядру энергии извне, т. е. только для быстрых нейтронов.

Остается допустить, что массовое число и порядковый номер элемента еще не определяют всех свойств ядра. Повидимому, также как и в обычной химии, число и природа образующих молекулу частиц еще не определяют всех свойств молекулы, как и не все свойства ядра задаются числом образующих его нейтронов и протонов. Из опытов с искусственной радиоактивностью, возбуждаемой нейтронами в бrome следует, повидимому, допустить существование ядер изомеров; это два изотопа с одним и тем же массовым числом, но разной структуры.

Аналогичные соотношения установлены сейчас и для родия. Здесь известен только один устойчивый изотоп, между тем, как после облучения нейтронами возникает два радиоактивных ядра, химические свойства которых заставляют нас считать их ядрами родия.

Современная теория ничего сейчас не может сказать об явлениях изомерии; эти явления получают, очевидно, правильную трактовку только тогда, когда мы будем располагать теорией структуры ядра. Будем надеяться, что ближайшие годы приведут нас к этой теории.

ОБЗОРНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Книги

Гамов Строение атомного ядра и радиоактивность ГТТИ, 1925.
Курчатов Расщепление атомного ядра. ОНТИ 1935 г.
Лукирский Нейтрон ОНТИ 1935.
Корсунский Нейтрон ОНТИ 1935.

Статьи

Шпольский Успехи физ. наук XII, 404, 1932.
Ландау Успехи физ. наук XIII, вып. 5, 1933.
Ландау Успехи физ. наук XIV, 333, 1934.

Литература по отдельным вопросам

Открытие нейтрона

Bothe und Becker Z. für Physik 66, 289, 1930.
Curie et Joliot Comptes Rendus 193, 1412, 1931, 194, 273, 1932.
Chadwick Nature 129, 312, 1932.
Chadwick Proc. Roy. Society 136, 692, 1932, 142, 1, 1933.

Источники нейтронов

Dunning Phys. Rev. 45, 586, 1934.
Meitner und Philipp Naturwissensch. 20, 929, 1932, Z. für Physik 87, 484, 1934.
Crane, Lauritsen und Soltan Phys. Rev. 44, 514, 1933.
Curie, Joliot Comptes Rendus 196, 397, 1933.
Curie Joliot et Savel Comptes Rendus 194, 2201, 1912.
Scillaud and Chalmers Nature 134, 494, 1934.
Brasch, Lange, Waiy, Banks, Chalmers und others Nature 134, 880, 1934.
Lawrence Livingston und Lewis Pliyr Rew. 44, 56, 1933.
Ruhrerford, Oliphant und Harteck Proc. Roy Soc. 144, 692, 1934.

Расщепление ядер нейтронами и искусственная радиоактивность

Feather Proc. Roy. Soc. 136, 709, 1932.
Harkins, Newson, Hans Phys. Review 41, 362, 1933; 44, 529, 1933; 44, 236, 1933;
44, 945, 1933.
Meitner und Philipp Zeitschrift für Physik 87, 484, 1934.
Fermi Nature 133, 757, 1934; 133, 898, 1934.
Fermi and others Proc. Roy. Society 1 September 1934; 149, 522, 1935.
И. Курчатов и другие Докл. Ак. Наук СССР 1934.
Bjerge and Westcott Nature 134, 286, 1934, Proceed. Comb. Phil Soc 31, 145, 1935.
Moon and Tilman. Nature, 135, 904, 1935.
Dunning Pegram, Fink und Mitchell Phys. Review 47, 796, 1935; 47, 888, 1935; 47,
416, 1935.
Bethe. Phys. Review 47, 747, 1935.

1p. 75k.

M 8336

1710-49 p

Цена 1 р. 75 коп.

8336

ОВ Т

на нол

ВСК

Г

вари

яще

19

ова, Т

под

—вскр

ракта.

что В

ые ка

силу,

эти

ашпсто

их в

6 их

30-втор

не во

ти им

аничес

при в

услов

огут

немел

6 слу

неме

риуф

опу п

фран

уеся

встр

енный

гра

оказа

уда

6 от

чен

ю

ан