

РАДИОАКТИВНЫЕ ИЗОТОПЫ ИОДА

Б. Г. Дзантиев и М. Б. Нейман

ВВЕДЕНИЕ

Применение искусственно-радиоактивных элементов в различных областях химии, физики и биологии требует знакомства с физическими характеристиками используемых радиоактивных изотопов.

В зависимости от условий задачи, для решения которой привлекаются радиоактивные изотопы, может встретиться необходимость предъявить к ним требования не только химического или физиологического, но и физического порядка. В ряде случаев необходимо, чтобы элемент с определённым химическим поведением и физиологическим действием был одновременно носителем определённых физических свойств, т. е. обладал определённым периодом полураспада, испускал β -частицы и γ -кванты определённых энергий и пр.

В рамках данного химического элемента эти требования в ряде случаев могут быть удовлетворены путём использования различных радиоактивных изотопов. Это в значительной мере относится к радиоактивному йоду, который давно уже нашёл широкое применение как в качестве индикатора в различных процессах, так и в качестве терапевтического агента. Советскими исследователями с помощью этого элемента был решён ряд вопросов в области механизма химических реакций, химии комплексных соединений, строения растворов, подвижности атомов в кристаллической решётке и пр. В большинстве этих работ применялся изотоп йода J^{128} с периодом полураспада 25 минут.

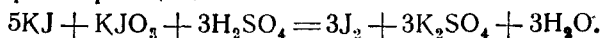
В настоящее время у йода известно до 14 радиоактивных изотопов с различными периодами полураспада от нескольких секунд до нескольких месяцев и с различными типами и энергиями излучения. Рациональное использование этих изотопов с учётом их физических характеристик позволит значительно расширить круг вопросов, которые могут быть решены с помощью радиоактивного йода.

Некоторые изотопы йода открыты в самое последнее время и знакомство с ними представляет самостоятельный интерес.

ПОЛУЧЕНИЕ И ВЫДЕЛЕНИЕ ИЗОТОПОВ ИОДА

Изотопы иода обладают массовыми числами в интервале $M = 124-137$, причём только один из изотопов является стабильным¹.

Значительная часть этих изотопов была выделена из продуктов деления урана и тория под действием нейтронов. Некоторые радиоактивные изотопы иода получают при бомбардировке нейтронами, протонами, дейтонами и α -частицами стабильных изотопов J, Te, Sb, Cs. Очевидно, возможно получить иод также при нейтронной бомбардировке ксенона по реакции $\text{Xe}_{54}(n, p)\text{J}_{53}$, но, насколько нам известно, такая реакция не осуществлена. Существенным преимуществом радиоактивного иода, по сравнению со многими другими искусственно радиоактивными элементами, является возможность относительно просто отделить его от бомбардируемой мишени и побочных радиоактивных продуктов ядерной реакции. Так как иод наиболее полно выделяется в элементарном виде², то обычно применяемые химические методы отделения радиоиода от мишени заключаются в операциях окисления иода до элементарного состояния и выделения его из раствора мишени с использованием или высокой упругости пара элементарного иода, или его растворимости в ряде органических растворителей. Носитель добавляется в облучённую мишень обычно или в виде KJ или в виде эквивалентной смеси $\text{KJ} + \text{KJO}_3$. В первом случае для окисления иода применяются «мягкие» окислители типа KNO_3 , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, не действующие на другие галоиды, что особенно существенно при выделении иода из продуктов деления тяжёлых ядер. Во втором случае элементарный иод выделяется при подкислении раствора по реакции:



Есть основания полагать, что этим путём достигается более полное количественное выделение иода, так как в этом случае в процессе перехода в элементарное состояние должны участвовать все атомы радиоактивного иода, в каком бы валентном состоянии они не получались в результате ядерной реакции³.

В тех случаях, когда имеется некоторая вероятность совместного окисления брома, в раствор (для уменьшения вероятности выделения активного брома) кроме KJ добавляется некоторое количество KBr.

Если в качестве мишени служит стабильный иод, то согласно метода Спиларда и Чалмерса⁴, широко развитого рядом авторов^{5,6}, концентрирование невесомых количеств радиоактивного изотопа и отделение его от стабильного иода производится с использованием изменения валентного состояния и химического поведения атома, полученного в результате ядерной реакции. Выделенный тем или иным способом элементарный иод, содержащий активные изотопы, отделяется от раствора мишени или встраиванием с соответствующими органическими растворителями (CCl_4 , CHCl_3), или путём отгонки с паром из кипящего раствора.

В результате этих операций удаётся избежать обычной в большинстве других случаев необходимости осаждения требуемого элемента непосредственно в растворе мишени. Таким образом в данном случае отпадает опасность соосаждения и адсорбции других радиоактивных элементов, которые могут образоваться совместно с иодом при ядерной реакции. Кроме указанных химических способов, в некоторых случаях применялось электролитическое выделение активного иода непосредственно в процессе облучения^{5,7}.

ИЗОТОПЫ ИОДА И ИХ ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

При рассмотрении отдельных изотопов иода мы будем касаться следующих вопросов: а) ядерные реакции, приводящие к образованию данного изотопа, б) тип радиоактивного распада, в) период полу-

распада, г) массовое число, сопоставляемое данной активности, д) β -спектр, γ -лучи, схема распада.

J^{124} . $T = 4$ дня.

Изотоп с $M=124$ обладает наименьшим массовым числом из всех известных изотопов иода. Он был получен Ливингудом и Сиборгом⁸ при бомбардировке сурьмы α -частицами с $E=16$ MeV. При измерениях активности иода, выделенного из облучённой α -частицами сурьмы, была получена приведённая на рис. 1 кривая распада, которая может быть представлена как результат суперпозиции двух кривых с периодами $T = 4,0 \pm 0,3$ дня и $T = 13,0 \pm 0,3$ дня. Наличие двух периодов находится в соответствии с тем обстоятельством, что у сурьмы имеется два стабильных изото-

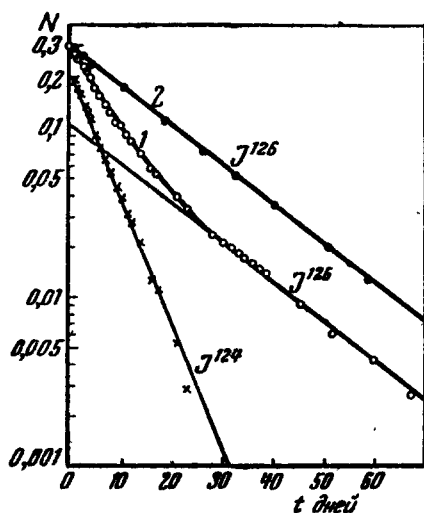


Рис. 1. Кривые распада J^{124} и J^{126} . 1. Распад радиоактивных изотопов иода, образующихся по реакции $Sb(\alpha, n)J$. 2. Распад J^{126} , образующегося при облучении иода быстрыми нейтронами.

па — Sb_{51}^{121} (56%) и Sb_{51}^{123} (44%), из которых под действием α -частиц по реакции $Sb_{51}(\alpha, n)J_{53}$ образуется два изотопа иода: J^{124} и J^{126} . Так как в результате других ядерных реакций показано, что 13-дневный период должен принадлежать J^{126} , то активность с $T=4$ дня соответствует J^{124} . Этот изотоп по Ливингуду и Сиборгу получается по реакции $Sb_{51}^{121}(\alpha, n)J_{53}^{124}$ с выходом в 1 активный атом на $2 \cdot 10^7$ бомбардирующих α -частиц, обладающих энергией $E=16$ MeV. J^{124} испускает позитроны, причём образуется стабильный теллур: $J^{124} \rightarrow Te^{124} + \beta^+$.

Спектр позитронов, испускаемых J^{124} , и наличие γ -лучей при β -распаде не исследованы.

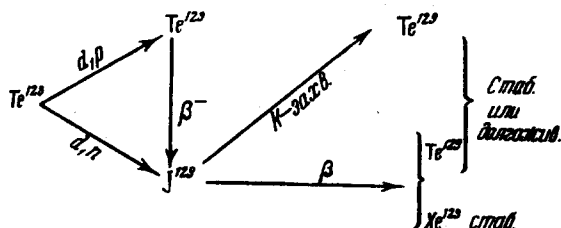
В литературе имеются сведения⁹, что тот же изотоп иода был получен Дюбриджем при бомбардировке теллура протонами по реакции $Te(p, n)J$.

Любопытно, что при бомбардировке теллура дейтонами с $E = 8$ MeV и $E = 11,5$ MeV возникновение 4-дневной позитронной активности не было обнаружено^{8, 10, 11}, хотя её образование можно было бы ожидать по реакциям (d, n) и $(d, 2n)$.

J^{125} . $T = 56$ дней.

До недавнего времени среди радиоактивных изотопов иода не было такого, которому можно было бы приписать массовое число $M = 125$. В таблице изотопов Сиборга⁹ изотоп J^{125} отсутствует. В 1946 г. Рейд и Кестон¹² сообщили, что при бомбардировке теллура в течение 40 часов дейтонами с $E = 14,5$ MeV ими была получена долгоживущая активность, не исчезающая в течение 6 месяцев. Эта активность следует за иодом при осаждении AgJ , экстрагировании CCl_4 ; при введении крысам она концентрируется в щитовидной железе. Период полураспада этой активности, которую следует признать принадлежащей иоду, оказался равным $T = 56$ дней.

При исследовании радиации, испускаемой этим радиоактивным изотопом, путём поглощения в алюминиевой, медной и серебряной фольгах было обнаружено характеристическое рентгеновское излучение с $E = 27,0$ KeV, что соответствует $K\alpha$ линии Te . γ -лучей большей энергии обнаружено не было. Отсюда авторы сделали вывод, что радиоактивное превращение нового изотопа иода заключается главным образом в K -захвате с переходом в Te . Одновременно они высказали недостаточно обоснованное предположение, что 56-дневный период принадлежит J^{129} , и предложили сложную схему превращений, включающую уникальный случай изомерного перехода, состоящего из последовательных β -распада и K -захвата (схема).



В 1947 г. Гленденин и Эдвардс¹³ подтвердили существование изотопа иода с $T = 56$ дней, но приписали этот период J^{125} . В этом случае 56-дневная активность была выделена из теллура, подвергнутого бомбардировке дейтонами около года назад. Химическая идентичность этой активности с иодом была доказана серией последова-

тельных операций окисления иода нитритом натрия, извлечения его CCl_4 и восстановления раствором сульфита натрия, причём оказалось, что 56-дневная активность во всех операциях следует за стабильным иодом. В результате трёх циклов таких операций начальная активность оставалась неизменной в пределах ошибки эксперимента.

При исследовании абсорбции излучения, испускаемого 56-дневным иодом, в Ag, Cd, In, Sn, Al и полистироле было обнаружено только рентгеновское излучение с $E=27,5$ KeV и $E=3,8$ KeV, что соответствует $K\alpha$ и $L\alpha$ линиям теллура. Никаких γ -лучей с $E>30$ KeV и никаких частиц в излучении 56-дневного иода не обнаружено. Таким образом, очевидно, можно считать доказанным, что радиоактивный изотоп иода с $T=56$ дней существует и что его радиоактивный распад заключается в чистом K -захвате.

Что касается до массового числа 56-дневного иода, то этот период вероятно следует приписать J^{115} .

Предположение Рейда и Кестона следует признать ошибочным как на основании общих соображений¹³ о вероятном характере радиоактивного превращения ядра с $Z=53$ и $M=129$, так и на основании экспериментальных данных, которые будут обсуждаться позже и из которых можно сделать вывод, что J^{129} должен быть приписан другой период.

С другой стороны J^{125} может образоваться при бомбардировке теллура дейтонами из стабильных изотопов Te^{124} (4,5%) и Te^{125} (6%) по реакциям: $\text{Te}_{52}^{124}(d, n) J_{53}^{125}$ и $\text{Te}_{52}^{125}(d, 2n) J_{53}^{125}$. Радиоактивный распад путём K -захвата у J^{125} не является неожиданным (ср. рядом стоящий J^{124} , претерпевающий тот же процесс превращения нуклонов $p \rightarrow n$) и непосредственно приводит к стабильному Te^{125} .

В этом случае не требуется искусственных предположений, которые принуждены были ввести Рейд и Кестон.

Все эти соображения, хотя и косвенно, но довольно убедительно указывают на то, что 56-дневный период должен принадлежать изотопу J^{125} . Однако прямых доказательств идентичности изотопа иода с $T=56$ дней с J^{125} пока не имеется.

$J^{126} \cdot T=13$ дней.

Тейп и Корк¹⁴ при бомбардировке стабильного иода быстрыми нейтронами обнаружили радиоактивный изотоп иода с периодом полураспада $T=13$ дней, которому они приписали массовое число $M=126$. Наблюдениями в камере Вильсона было установлено, что 13-дневный иод при радиоактивном распаде испускает электроны.

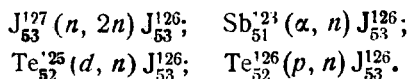
Существование электронно-активного 13-дневного иода было подтверждено Ливингудом и Сиборгом^{8, 15}, которые получили его при облучении стабильного иода быстрыми нейтронами, а также выделили его из сурьмы, бомбардированной α -частицами с $E=16$ MeV и из теллура, активированного дейтронами с $jE=8$ MeV.

Кривые распада 13-дневного иода, выделенного из сурьмы и из стабильного иода, приведены на рис. 1.

Вследствие наличия у теллура большого количества стабильных изотопов, кривая распада радиоактивного иода, выделенного из теллура, состоит из ряда периодов. Анализ конца интегральной кривой с учётом распространённости различных стабильных изотопов теллура позволяет сделать вывод о наличии в смеси радиоактивных изотопов иода компоненты с 13-дневным периодом полураспада.

По сообщению Сиборга⁹, этот же изотоп иода был получен Дюбриджем при бомбардировке теллура протонами по реакции (p, n) .

Образование 13-дневного иода возможно четырьмя независимыми путями по реакциям:



Это убедительно доказывает, что периоду $T=13$ дней должно быть сопоставлено массовое число $M=126$.

Излучение, испускаемое J^{126} , исследовалось Ливингудом и Сибгоргом⁸ по поглощению в Al и Pb и Тейпом¹⁶ с помощью камеры Вильсона в магнитном поле. При абсорбционных измерениях были обнаружены β -частицы с пробегом $R=0,44 \text{ г/см}^2$ Al и γ -лучи, поглощающиеся наполовину в $4,5 \text{ г/см}^2$ Pb. Отсюда максимальная энергия β -частиц, вычисленная по формуле Фэзера¹⁷

$$R = 0,543 E_m - 0,160$$

равна $E_m = 1,1 \text{ MeV}$. Энергия γ -лучей $E_\gamma = 0,5 \text{ MeV}$.

Тейп с помощью камеры Вильсона в магнитном поле исследовал β -спектр радиоиода, полученного бомбардировкой NaJO_3 быстрыми $(\text{Li} + \text{D})$ нейтронами. На основании промера 1060 треков был получен простой β -спектр с $E_m = 1,20 \pm 0,03 \text{ MeV}$. Экстраполирование графика Ф. Кюри¹⁸, построенного применительно к теории β -распада Ферми в координатах $\left(\frac{N}{f}\right)^{1/2}$ и E , даёт значение максимальной энергии β -спектра $E_m = 1,22 \text{ MeV}$.

Таким образом в пределах точности имеющихся данных схему распада $\text{J}^{126} \rightarrow \text{Xe}^{126}$ можно представить в виде графика, данного на рис. 2.

В связи с тем, что имеются указания на наличие рентгеновской радиации у долгоживущего иода¹¹, возможно, что у J^{126} существует некоторая вероятность и другой схемы распада, заключающейся в K -захвате с переходом в Te^{126} .

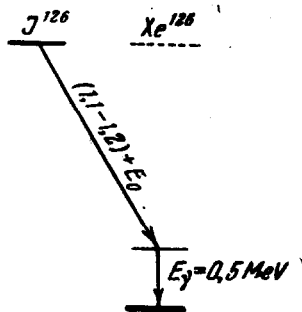


Рис. 2. Схема распада $\text{J}^{126} \rightarrow \text{Xe}^{126}$.

J¹²⁷.

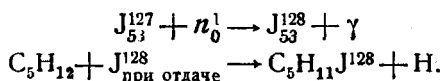
Из масспектрографических измерений Нира¹ следует, что J¹²⁷ является единственным стабильным изотопом иода. Присутствие в природном иоде других стабильных изотопов иода возможно — по отношению к J¹²⁷ — в количествах:

$$\begin{aligned} J^{123} &\leq 1/50\,000; & J^{124} &\leq 1/50\,000; & J^{125} &\leq 1/50\,000 \\ J^{126} &\leq 1/25\,000; & J^{128} &\leq 1/15\,000; & J^{129} &\leq 1/40\,000. \\ J^{130} &\leq 1/120\,000; & J^{131} &\leq 1/250\,000; \\ J^{128}, T &= 25 \text{ мин.} \end{aligned}$$

В первых работах по получению искусственно-радиоактивных элементов под действием нейтронов Ферми, Амальди и др.^{5, 19} при облучении иода медленными нейтронами обнаружили активность с $T=25$ мин., следующую за иодом при осаждении его в виде AgJ в присутствии Te и Sb. Эта активность была приписана J¹²⁸, образующемуся при радиационном захвате нейтрона стабильным иодом по реакции: J₅₃¹²⁷ (n, γ) J₅₃¹²⁸. Затем радиоактивный иод был получен и исследован в ряде лабораторий.

Исследование и использование J¹²⁸ в значительной мере было облегчено благодаря открытой Сцилардом и Чалмерсом⁴ возможности отделять небольшие количества активного изотопа от массы неактивного. Метод химического разделения изотопов, нашедший впоследствии широкое применение, был впервые проверен именно на реакции J¹²⁷ (n, γ) J¹²⁸ выделением активного J¹²⁸ из массы неактивного этилиодида C₂H₅J¹²⁷.

Интересно, что этот процесс, в основе которого лежит использование отдачи, испытываемой атомом при испускании γ -кванта, допускает своеобразное обращение. Отдача, имеющая место в результате радиационного захвата нейтрона, может быть использована не только для вырывания активного атома из молекулы, но и для введения активного атома в молекулу какого-либо вещества. Так, Рейд²⁰, облучая медленными нейтронами раствор иода в нормальном пентане, обнаружил, что около 40% активности оказывается связанной с *n*-амилиодидом. Очевидно имеет место процесс:

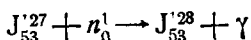


Такого рода процессы, возможно, смогут быть применены для синтеза химических соединений, содержащих активные атомы, как для целей химических исследований, так и для получения высокоактивных препаратов с определенным физиологическим действием.

Выход радиоактивного иода в реакции J¹²⁷ (n, γ) J¹²⁸ не зависит от валентного состояния стабильного иода, облучаемого нейтронами.

По данным Кнауэра²¹, при облучении иода в форме J' , JO_3' , J_2 выход радиоактивного иода неизменен в пределах 2—3%.

Эффективное сечение ядерной реакции



и его зависимость от энергии нейтронов исследовалась рядом авторов²²⁻²⁹. Для быстрых (Rn—Re) нейтронов В. С. Дементий и Д. В. Тимошук²⁹ определили $\sigma = 6,57 \cdot 10^{-26} \text{ см}^2$. Для медленных нейтронов эффективное сечение по крайней мере в 100 раз больше. На рис. 3 представлена полученная Джонсом²⁷ зависимость общего

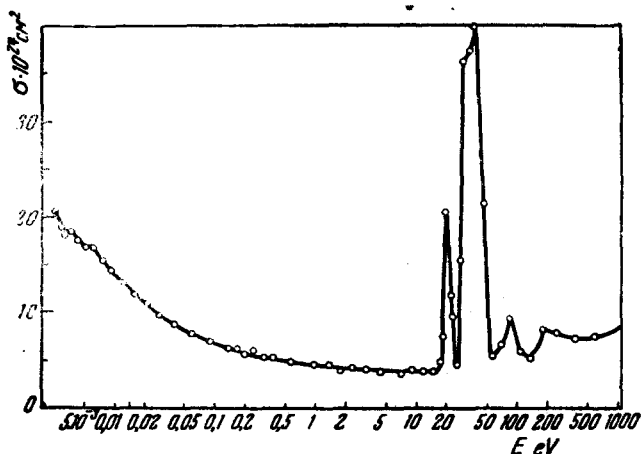


Рис. 3. Сечение J , как функция энергии нейтронов.

сечения J от энергии нейтронов в интервале энергий от 0,0026 eV до 1000 eV. Для тепловых нейтронов ($E=0,025 \text{ eV}$) сечение реакции (n, γ) с учётом сечения рассеяния равно $\sigma_c = 6,7 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$. При $E < 3 \text{ eV}$ взаимодействие иода с нейтронами идёт по закону $1/v$, при $E = 20,3 \text{ eV}$ имеет место резонансная линия, а в интервале $E = 25-50 \text{ eV}$ — резонансная полоса, содержащая по крайней мере три резонансных максимума.

Радиоактивный иод с периодом $T=25 \text{ мин.}$ может быть получен не только по рассмотренной выше ядерной реакции, но и другими путями. Ливингуд и Сиборг⁸ выделили иод с $T=25 \pm 1 \text{ мин.}$ из теллура, подвергнутого бомбардировке дейтонами с $E=8 \text{ MeV}$. В этом случае J^{128} образуется из стабильного изотопа Te^{128} (32,8%) по реакции $Te_{51}^{28}(d, 2n)J_{53}^{28}$ с выходом в 1 активный атом на $2 \cdot 10^7$ дейтонов с $E=8 \text{ MeV}$. Образование J^{28} таким путём было подтверждено Тейпом¹⁶, который получил его также при бомбардировке иодида свинца 7 MeV дейтонами, очевидно, по реакции $J_{53}^{27}(d, p)J_{53}^{28}$. Кроме

того, этот изотоп иода образуется при бомбардировке теллура протонами⁹ по (p, n) реакции.

Период полураспада J^{128} определён очень точно, вследствие чего этот изотоп может применяться для калибровки приборов, служащих для измерения радиоактивности. По данным Халла и Си-лига³⁰ период полураспада J^{128} равен $T = 24,99 \pm 0,02$ мин.

Излучение, испускаемое J^{128} при β -распаде, исследовалось рядом авторов. Ферми, Амальди и др.³, выделившие 25-минутный

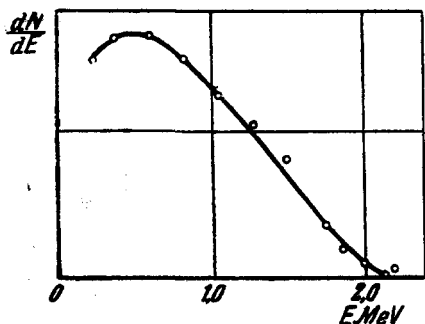


Рис. 4. β -спектр J^{128} .

J , доказали испускание этим изотопом электронов и γ -лучей и определили поглощение β -частиц в алюминии. β -спектр J^{128} был впервые снят советскими учёными Алихановым, Алиханяном и Желеповым^{31, 32} с помощью оригинального прибора с двумя счётчиками совпадений в магнитном поле. Полученный таким образом β -спектр приведён на рис. 4 и имеет $E_m = 2,1$ MeV. Наибольшее число электронов обладает $E \approx 0,5$ MeV. М. И. Корсунский,

Н. Н. Николаевская и М. А. Бак⁷ исследовали β -спектр J^{128} в интервале энергий 0,6 — 2,0 MeV тем же методом магнитного анализа с двумя счётчиками совпадений. Пользуясь более мощным источником, они более детально исследовали β -спектр 25-минутного J в указанных пределах энергии.

В дальнейшем β -спектр J^{128} исследовался в ряде лабораторий различными методами, причём результаты отдельных определений не всегда хорошо согласуются между собой. Ливингуд и Сиборг⁸ определили поглощающий слой для β -лучей J^{128} равным $1,05 \text{ г/см}^2 \text{ Al}$, что в пересчёте по формуле Фэзера соответствует $E_m = 2,23$ MeV. Тейп¹⁶ при измерениях в камере Вильсона с магнитным полем получил при промере радиусов кривизны 1330 треков, полученных от нескольких препаратов, β -спектр с $E_m = 2,4$ MeV. Он же сообщает³³ другое значение $E_m = 2,2$ MeV. Построение графика Ф. Кюри в координатах $\left(\frac{N}{f}\right)^{1/k} - E$ при $K=2$ и $K=4$ даёт при

экстраполяции в первом случае $E_m = 2,2$ MeV, во втором $E_m = 2,94$ MeV. Это заставляет считать, что β -спектр J^{128} следует скорее оригинальной теории Ферми, чем теории Конопинского-Юленбека.

С другой стороны, Бэкон, Грайзевуд и ван-дер-Мерве^{34, 35} также исследовали спектр β -частиц, испускаемых J^{128} , с помощью камеры Вильсона в магнитном поле и анализировали график Кюри при $K=4$, исходя из предположения о применимости теории Конопинского-Юленбека к β -спектру 25 минутного иода. При этом допущении

излом на графике Конопинского-Юленбека (рис. 5) интерпретировался авторами, как указание на наличие у J^{128} сложного спектра. При разложении графика Конопинского-Юленбека в две прямые и экстраполяции их до пересечения с осью абсцисс получают величины граничных энергий двух групп β -частиц: $E'_m = 1,05$ MeV, $E''_m = 2,10$ MeV. Эти данные приводятся в известных таблицах изотопов Сиборга и Маттауха. Однако эти значения вызывают сомнение как потому, что получены при спорном допущении применимости теории Конопинского - Юленбека к β -распаду J^{128} , так и потому, что не согласуются с другими экспериментальными данными.

Действительно, по данным других авторов^{7,16} теория Конопинского-Юленбека не достаточно хорошо согласуется с экспериментальными значениями максимальной энергии β -спектра J^{128} , давая завышенные результаты. Кстати и сами авторы⁸⁵ не делают определённых выводов о применимости теории Конопинского-Юленбека. С другой стороны, для решения вопроса о наличии у J^{128} двух групп β -частиц с $E'_m = 1,05$ MeV и $E''_m = 2,10$ MeV весьма существенным является характер и энергия γ -лучей, испускаемых ядром He^{128} при радиоактивном распаде $J^{128} \rightarrow He^{128}$. Очевидно, что если значения E_{max} , предложенные Бэконом, Грайзевудом и ван-дер-Мерве верны, то при β -распаде должны наблюдаться достаточно интенсивные γ -лучи с $E_\gamma = 1,05$ MeV.

Однако по данным, полученным в ряде лабораторий, известно, что хотя J^{128} при β -распаде и испускает γ -лучи^{5, 16, 36}, но их интенсивность весьма незначительна, а энергия значительно менее 1 MeV. Так, Робертс и Ирвин³⁷ и сами Бэкон, Грайзевуд и ван-дер Мерве³⁵ не смогли обнаружить γ -лучей в количестве большем, чем 1 фотон на 10 β -частиц. Если бы даже энергия этих фотонов соответствовала разности граничных энергий двух групп β -частиц, то весьма сомнительно, чтобы столь незначительное количество β -частиц (10%), за испусканием которых следует излучение γ -кванта, могло существенно повлиять на форму β -спектра и соответствующий график Кюри.

Кроме того, абсорбционные измерения энергии γ -лучей, произ-

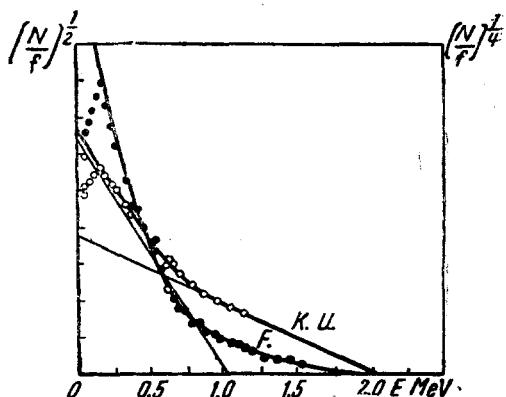


Рис. 5. Графики Ферми и Конопинского-Юленбека для β -спектра J^{128} (по Бэкону, Грайзевуду и ван-дер-Мерве).

ведённые М. А. Бак и Н. Н. Николаевской и Ливингудом и Сиборгом⁸, дают для энергии γ -лучей 25-минутного иода совпадающее значение $E_\gamma \approx 0,4$ MeV, что совершенно не соответствует вышеуказанным значениям максимальной энергии двух групп β -частиц.

Более удовлетворительная схема распада J^{128} предложена Зигбаном и Холе³⁹, которые исследовали β -излучение этого изотопа иода с помощью β -спектрографа и определяли энергию γ -лучей по энергии фотоэлектронов, выбиваемых из свинца. Препарат радиоактивного иода помещался в медную капсулу, перед которой находи-

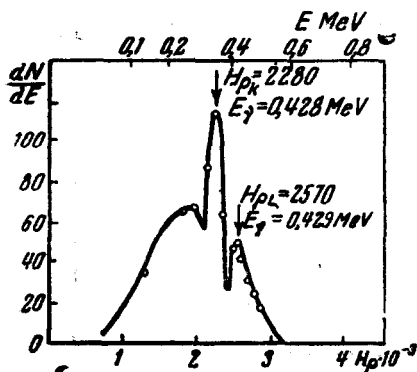


Рис. 6. Спектр вторичных электронов, образующихся под действием γ -лучей J^{128} .

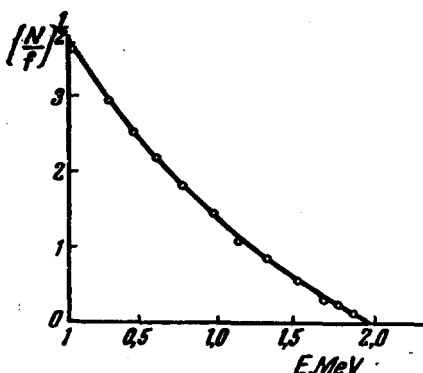


Рис. 7. График Ферми для β -спектра J^{128} .

лась свинцовая фольга толщиной 0,1 мм. β -частицы, испускаемые J^{128} , полностью поглощались в стенках капсулы, а вторичные электроны исследовались с помощью β -спектрографа. На рис 6. представлен спектр вторичных электронов, возникающих при действии γ -лучей радиоиода на медную капсулу и свинцовую фольгу. На фоне комптоновских электронов видно два пика, соответствующих фотоэлектронам из K и L слоя свинца. Значение энергии γ -лучей, вычисленное из энергии фотоэлектронов с учётом энергии K и L связи Pb, хорошо совпадают между собой и равны $E_\gamma = 0,428$ MeV. γ -лучи более высокой энергии обнаружены не были. Эти результаты согласуются с данными, полученными путём абсорбционных измерений. γ -лучи с $E_\gamma = 0,428$ MeV обладают малой интенсивностью и, как показано регистрацией импульсов в β - и γ -счётчиках, испускаются в количестве 7 γ -квантов на 100 β -частиц. Таким образом испускание γ -квантов сопровождает только 7% β -распадов и, следовательно, β -спектр J^{128} должен состоять из двух групп с разностью между значениями $E_{\max}$, равной 0,428 MeV.

Построение графика Ферми, приведённого на рис. 7, даёт $E = 2,02$ MeV, что достаточно хорошо совпадает со значением, полученным Алихановым, Алиханяном и Джелеповым.

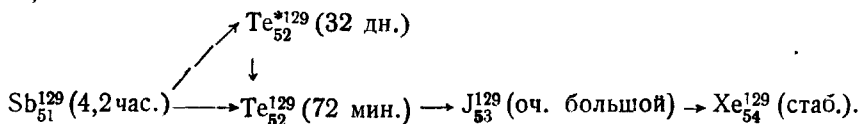
Понятно, что вследствие малой интенсивности второй группы β -частиц их присутствие не отражается на графике Ферми. В соответствии с изложенным выше, распад $J^{128} \rightarrow Xe^{128}$ может быть согласно Зигбану и Холе представлен схемой рис. 8. 93% β -частиц испускается с переходом на основной уровень ядра Xe^{128} . 7% β -частиц испускается с переходом на возбужденный уровень Xe^{128} с испусканием энергии 1,59 MeV и последующим излучением γ -кванта с $E_\gamma = 0,428$ MeV.

J^{129} . $T \geq 10^8$ лет.

Изотоп иода с массовым числом $M=129$ долгое время не удавалось обнаружить ни среди стабильных, ни среди радиоактивных изотопов.

Исследуя изомерию у Te^{129} , Сиборг, Ливингуд и Кеннеди⁴⁰ обнаружили изомерный переход Te^{129} (32 дня) $\rightarrow$ Te^{129} (72 мин.), но не нашли никакой радиации от продуктов распада 72-минутного Te^{129} . С другой стороны, по Ниру¹, J^{129} не является стабильным или, точнее говоря, не содержится в природном иоде в количестве более 1/40 000. Таким образом J^{129} должен быть или весьма редким стабильным изотопом, или обладать очень большим периодом полураспада.

Действительно, из опубликованных данных по плутониевому проекту⁴¹ следует, что J^{129} образуется при делении U^{235} , обладает «очень большим» периодом полураспада и испускает электроны, превращаясь в стабильный Xe^{129} . J^{129} образуется в результате цепи β -превращений первичных осколков, возникающих при делении урана, по схеме:



При анализе интегральной кривой распада радиоактивных изотопов иода, выделенных из облученного нейтронами урана, не удаётся обнаружить периода $T > 8$ дней. Даже при облучении урана в течение 123 дней на Клинтонском котле⁴² отделенный от него иод даёт кривую распада, содержащую только известные периоды и распадается до фона с $T=8$ дней, что соответствует хорошо известному изотопу J^{131} . Но этот же образец иода, подвергнутый после распада до фона облучению медленными нейтронами, обнаруживает

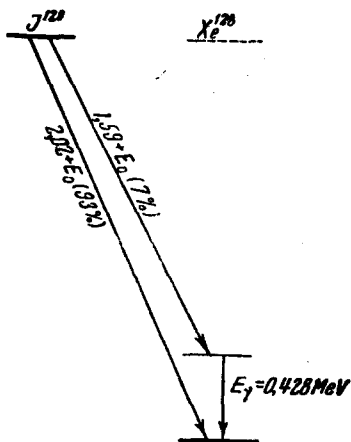


Рис. 8. Схема распада $J^{128} \rightarrow Xe^{128}$.

значительную активность, принадлежащую иоду с $T = 12,5$ часа. Эта активность по периоду полураспада и результатам абсорбционных измерений в Al идентифицирована как J^{130} . Его образование следует, очевидно, приписать радиационному захвату нейтронов изотопом иода с $M = 129$. Эффективное сечение реакции $J^{129}(n, \gamma) J^{130}$ можно грубо оценить равным $\sigma = 8 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$.

Очень большой период полураспада J^{129} ($T \geq 10^8$ лет) позволяет допустить его присутствие в природном иоде в количестве примерно в 80 раз меньшем предела, указанного Ниром.

J^{130} . $T = 12,6$ часа.

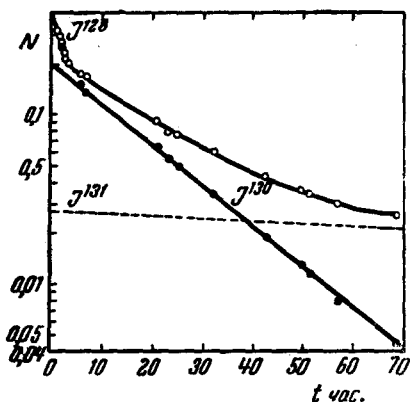


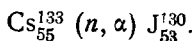
Рис. 9. Кривая распада радиоактивных изотопов иодз, образующихся при бомбардировке Те дейтонами.

Ливингуд и Сиборг^{8,15} выделили из теллура, подвергнутого бомбардировке дейтонами с $E = 8 \text{ MeV}$, радиоактивный изотоп иода с $T = 12,6$ часа, испускающий при распаде электроны. Этот период был приписан J^{130} , образуемому из стабильного Te^{130} (33,1%) по реакции: $\text{Te}_{52}^{130}(d, 2n) J_{53}^{130}$ с выходом в 1 атом на $1 \cdot 10^7$ дейтонов с $E = 8 \text{ MeV}$. При бомбардировке теллура дейтонами с $E = 14 \text{ MeV}$ выход J^{130} в абсолютных распадах составляет $32 \cdot 10^6$ распадов/ $\mu\text{A} \cdot \text{час}$, что

соответствует выходу в один активный атом на $1,1 \cdot 10^4$ дейтонов.

При бомбардировке теллура дейтонами образуется несколько изотопов иода. На рис. 9 представлена сложная кривая распада иода, выделенного из активированного дейтонами теллура, и её анализ (по Ливингуду и Сиборгу).

Убедительным доказательством того, что период $T = 12,6$ часа принадлежит J^{130} , является тот факт, что иод с $T = 12,6$ часа получается также при бомбардировке цезия быстрыми нейтронами⁴⁴. Так как цезий имеет только один стабильный изотоп Cs_{55}^{133} , то образование радиоактивного иода происходит по реакции



Этот же изотоп был получен при облучении теллура протонами⁹ по очевидной реакции: $\text{Te}_{52}^{130}(p, n) J_{53}^{130}$.

К имеющимся в литературе сообщениям, что радиоактивный иод с периодом, близким к $T = 13$ часов, может быть выделен из продуктов деления урана⁴⁵ и тория^{45,46} под действием нейтронов, сле

дует сноситься с известной осторожностью. Наличие нескольких радиоактивных изотопов иода, образующихся в этих случаях, распад некоторых изотопов с образованием активных продуктов и изменение соотношений между интенсивностями отдельных активностей в зависимости от условий облучения чрезвычайно затрудняют анализ интегральной кривой распада. Весьма вероятно, что при определённых условиях облучения 22-часовой период J^{133} может маскироваться наличием 6,6-часового периода J^{135} и 9,4-часового периода возникающего из него He^{135} . Очевидно, этому обстоятельству следует приписать тот факт, что в различных лабораториях при анализе интегральной кривой распада радиоидов, выделенных из продуктов деления тяжёлых ядер, был получен ряд промежуточных периодов: $T = 12$ часов 45 , $T = 15 - 16$ часов $^{46, 47}$, $T = 18,5$ часа 48 .

Таким образом обнаруженный Полесицким и Орбели период $T = 15 - 16$ часов, образующийся при делении тория, может принадлежать как J^{130} , так и J^{133} . Это обстоятельство отмечается, впрочем, и самими авторами 47 .

Что касается наличия J^{130} среди продуктов деления урана, то оно, повидимому, исключается позднейшими работами 41 .

При делении U^{235} в качестве первичного осколка с массой 130 образуется стабильный Te^{130} , и, таким образом, возникновение цепи β -превращений, приводящей к J^{130} , невозможно.

Излучение, испускаемое J^{130} при β -распаде, исследовалось с помощью абсорбции 8 в Al и Pb, в камере Вильсона в магнитном поле 16 и — наиболее детально — Робертсом, Даунингом, Эллиоттом, Дейчем $^{11, 49, 50}$ с помощью магнитного спектрометра и метода совпадений.

На рис. 10 представлен полученный этими авторами β -спектр J^{130} , на котором видны 4 пика, соответствующие электронам внутренней конверсии. Энергии соответствующих γ -квантов, вычисленные с учётом энергии K -связи Xe, равны: $E_1 = 0,416 \pm 0,005$ MeV, $E_2 = 0,538 \pm 0,007$ MeV, $E_3 = 0,665 \pm 0,008$ MeV, $E_4 = 0,747 \pm 0,010$ MeV. Близкие значения E_γ получаются при анализе спектров вторичных электронов, образующихся при действии γ -лучей J^{130} на Au, Pb, Sn (0,417; 0,535; 0,670; 0,740 MeV).

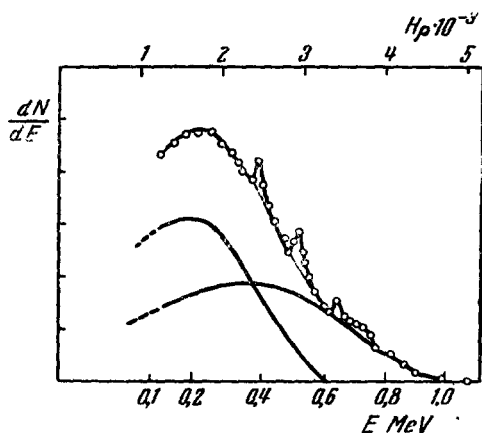


Рис. 10. β -спектр J^{130} .

Для исследования схемы распада J^{130} весьма существенен тот факт, что эти 4 типа γ -квантов не являются равноправными. Интенсивность линии $E_\gamma = 0,416 \text{ MeV}$ составляет только $0,3 \pm 0,1$ от средней интенсивности других γ -линий. Следовательно, γ -квант с $E_\gamma = 0,416 \text{ MeV}$ испускается не при каждом акте β -распада. С другой стороны, исследование изменения числа β — γ -совпадений, приходящихся на одну зарегистрированную β -частицу, в зависимости от толщины абсорбента, помещённого между β -счётчиком и источником,

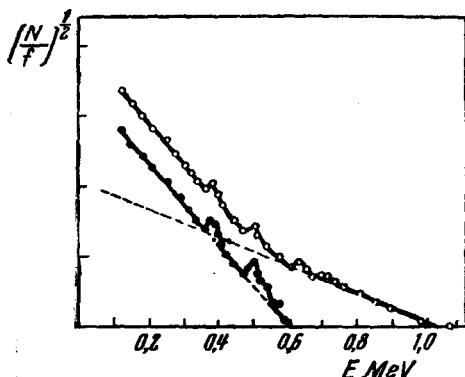


Рис. 11. График Ферми для β -спектра J^{130} .

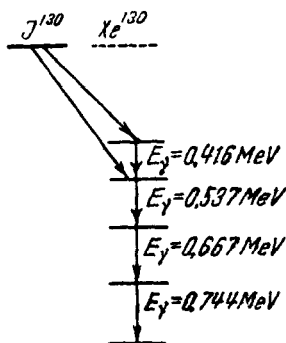


Рис. 12. Схема распада $J^{130} \rightarrow Xe^{130}$.

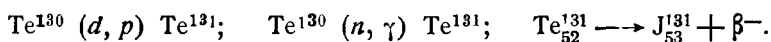
даёт возможность установить, что при энергии β -частиц E , большей $0,6 \text{ MeV}$, число β — γ -совпадений не зависит от толщины поглотителя. Из этих экспериментальных фактов следует вывод, что β -спектр J^{130} должен состоять из двух групп β -частиц, из которых одна с $E \approx 0,6 \text{ MeV}$ сопровождается испусканием 4 γ -квантов, а вторая сопровождается теми же γ -квантами, за исключением кванта с $E_\gamma = 0,416 \text{ MeV}$. С этими выводами согласуются данные, полученные при анализе графика Ферми, построенного вышеуказанными авторами для полученного ими β -спектра J^{130} (рис. 11). В координатах $\left(\frac{N}{f}\right)^{1/2} - E$ получается ломаная, при разложении которой на две прямые определяются два значения максимальной энергии β -частиц: $E'_m = 0,61 \pm 0,02 \text{ MeV}$ и $E''_m = 1,03 \pm 0,02 \text{ MeV}$. Значение $E'_m = 0,61 \text{ MeV}$ хорошо согласуется с результатами исследования β — γ -совпадений, а $E''_m = 1,03 \text{ MeV}$ практически совпадает с $E_m = 1,05 \text{ MeV}$, полученным Ливингудом и Сиборгом при абсорбционных измерениях. Разность $E''_m - E'_m = 0,42 \text{ MeV}$, что как раз соответствует $E_\gamma = 0,416 \text{ MeV}$.

Таким образом распад $J^{130} \rightarrow Xe^{130}$ должен в основном соответствовать схеме¹¹, данной на рис. 12. Имеет место испускание двух

групп β -частиц с $E'_m = 0,61 \text{ MeV}$ и $E''_m = 1,03 \text{ MeV}$. В обоих случаях имеет место переход на возбуждённые уровни Xe^{130} . Энергии этих уровней отличаются на $0,416 \text{ MeV}$. Оба перехода сопровождаются испусканием нескольких γ -квантов в каскаде, в результате чего ядро Xe^{130} переходит в основное состояние. Порядок испускания γ -квантов, кроме γ -кванта с $E_\gamma = 0,416 \text{ MeV}$, не определён и на схеме указан произвольно.

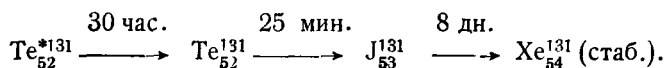
J^{131} . $T = 8$ дней.

Тейпом и Корком ¹⁴ при бомбардировке теллура дейтонами была получена активность с периодом $T = 8$ дней, которую они ошибочно приписали Te^{131} . Вскоре Ливингуд и Сиборг ^{8,15} показали, что восьмидневная активность химически идентична с иодом и образуется при бомбардировке теллура дейтонами и нейтронами. 8-дневный иод получается как непосредственно по реакции $\text{Te}_{52}^{130} (d, n) \text{J}_{53}^{131}$, так и при β -распаде радиоактивного изотопа Te^{131} , возникающего при активации теллура дейтонами и нейтронами:



Возникновение J^{131} непосредственно в процессе ядерной реакции $\text{Te}_{52}^{130} (d, n) \text{I}_{53}^{31}$ идёт с выходом: при энергии дейтонов $E = 8 \text{ MeV}$ — 1 атом на $5 \cdot 10^6$ дейтонов ⁸, при $E = 14 \text{ MeV}$ — 1 атом на $0,7 \cdot 10^4$ дейтонов ⁴³.

Так как у Te^{131} известны два изомерных состояния с $T = 30$ часов и $T = 25$ минут, представляет интерес выяснение вопроса о том, какой из изомеров является непосредственным предшественником J^{131} , когда последний образуется при β -распаде Te^{131} . Как показали Сиборг и Кеннеди ^{40,51}, J^{131} образуется из 25-минутного изомера Te^{131} , причём имеет место цепь превращений:



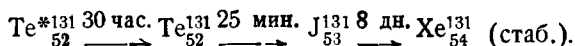
Существование именно такого механизма образования J^{131} при β -распаде Te^{131} было доказано с помощью химического метода разделения изомеров ⁵², применёмого в том случае, если изомеры генетически связаны, т. е. если одно изомерное состояние возникает из другого в процессе изомерного перехода. Идея этого метода заключается в том, что в результате отдачи, испытываемой ядром при сильно конвертированных изомерных γ -переходах, имеет место изменение валентного состояния атома, претерпевшего изомерный переход. В результате атомы, испытавшие изомерный переход и находящиеся в основном состоянии, могут быть отделены от атомов, находящихся в метастабильном состоянии.

Оказывается, что если к облучённой дейтонами теллуровой кислоте добавить неактивной теллуристой кислоты и через некоторое время в растворе $3N\ HCl$ восстановить последнюю пропусканием SO_2 до элементарного Te , то осадок содержит только 25-минутный теллур, распадающийся с образованием 8-дневного иода. Это является доказательством вышеуказанной схемы превращений.

В связи с вопросом об изомерных превращениях Te^{131} , предшествующих образованию J^{131} , любопытно не проверенное, но и не опровергнутое сообщение Робертса и Ирвина¹⁰, выделивших из теллура, активированного дейтонами с $E = 11,5\ MeV$ повторно на протяжении нескольких месяцев, радиоактивный иод, по периоду полураспада и результатам абсорбционных измерений очень мало отличный от 8-дневного J^{131} . В случае идентификации этой активности с J^{131} возникает необходимость в предположении о существовании у Te^{131} третьего долгоживущего изомера.

Образование J^{131} имеет место всякий раз, когда в результате какого-либо процесса возникает Te^{131} . Так, этот изотоп иода был обнаружен Абельсоном^{51, 54, 55} и Ганом и Штрассманом^{48, 56} в продуктах деления урана под действием нейтронов, а Ферми и Серге⁵⁷ выделили его из урана, облучённого α -частицами с $E = 32\ MeV$.

J^{131} не является первичным продуктом деления урана, а возникает в результате β -распада Te^{131} , причём имеет место цепь



Выход этой цепи при делении урана как на медленных, так и на быстрых нейтронах исследовался рядом авторов. Исходя из работ Енчке^{58, 59}, можно предположить, что значительной разницы в коэффициентах выхода для этих двух случаев быть не должно. Действительно, коэффициенты выхода цепи с массовым числом $M = 131$ при делении урана на медленных^{41, 60, 61} и на быстрых⁶¹ нейтронах весьма близки и составляют 2,2—2,8% от общего числа делений. Яффе и Макинтош⁶¹ путём определения отношений активностей J^{131} и Ba^{140} , выделенных из урана при облучении последнего медленными и быстрыми нейтронами, получили почти одинаковое значение для этих коэффициентов. По ранее определённым значениям выходов Ba^{140} при делении урана на медленных и на быстрых нейтронах⁶² коэффициенты выхода J^{131} были определены равными соответственно: $2,23 \pm 0,11\%$ и $2,27 \pm 0,11\%$.

Излучение и схема распада. β -спектр 8-дневного иода исследовался абсорбцией в $Al^{18, 41, 61}$, с помощью камеры Вильсона в магнитном поле¹⁶ и с помощью магнитного спектрометра^{63, 64}. Из довольно пёстрых данных наиболее достоверными представляются результаты Дейча, Даунинга, Робертса, обнаруживших с помощью магнитного спектрометра и исследования $\beta - \gamma$ -совпадений, что J^{131}

имеет простой спектр с $E_m = 0,595 \pm 0,01$ MeV. Значение максимальной энергии β -спектра $E_m = 0,595$ MeV получается как из самого β -спектра (рис. 13), так и из соответствующего графика Ферми (рис. 14). Эта величина согласуется со значением $E_m = 0,6$ MeV, полученным из абсорбционных измерений⁴¹.

Энергия γ -лучей J^{131} определялась поглощением в Rb^{81} и по энергии вторичных^{16, 49, 64} и конверсионных^{49, 63, 64} электронов, причём результаты измерений различными методами достаточно хорошо согласуются между собой. По Даунингу, Дейчу и Робертсу^{50, 64} каждая β -частица сопровождается испусканием двух γ -квантов в каскаде с $E_\gamma = 0,357 \pm \pm 0,007$ MeV и $E_\gamma = 0,080 \pm 0,001$ MeV. Порядок испускания γ -квантов не определён.

Вероятная схема распада $J^{131} \rightarrow Xe^{131}$ приведена на рис. 15 и заключается в испускании β -частиц с $E_m = 0,595$ MeV с переходом на

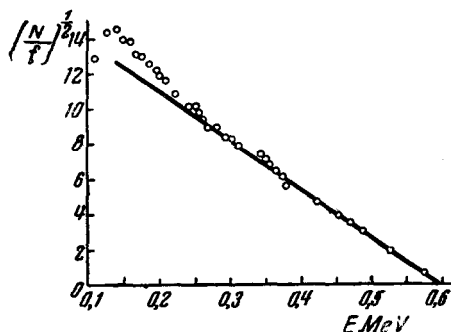


Рис. 14. График Ферми для β -спектра J^{131} .

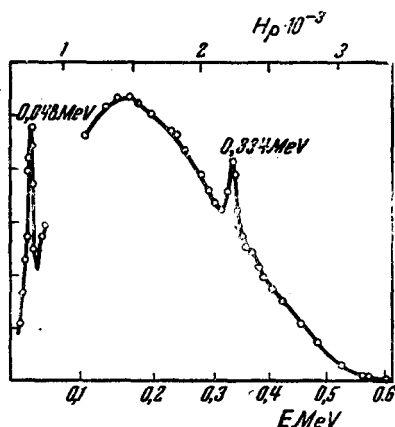


Рис. 13. β -спектр J^{131} .

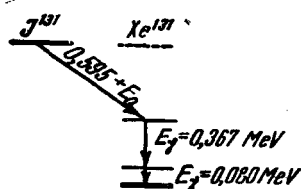


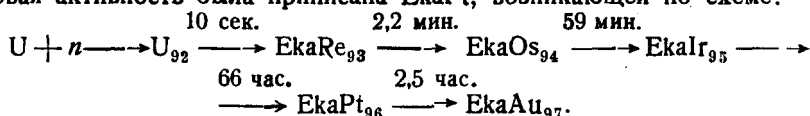
Рис. 15. Схема распада $J^{131} \rightarrow Xe^{131}$.

возбуждённый уровень Xe^{131} и в последующем излучении двух γ -квантов в каскаде с переходом в основное состояние Xe^{131} .

$J^{(132)} \cdot T = 2,4$ часа.

β -активность с периодом $T = 2,5$ часа была впервые обнаружена в 1937 г. Мейтнер, Ганом и Штрассманом⁶⁵ в уране, подвергнутом облучению нейтронами. Тогда же было установлено, что она не принадлежит первичному продукту взаимодействия урана с нейтронами,

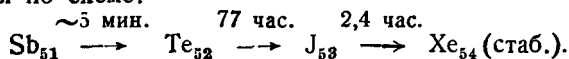
а возникает в результате ряда β -превращений. В соответствии с существовавшими в то время представлениями о «трансуранах», 2,5-часовая активность была приписана EkaPt, возникающей по схеме:



Вскоре после открытия факта деления урана Абельсон⁶⁶ и Фэзер и Бретчер⁶⁷ почти одновременно показали, что 2,5-часовая активность химически идентична с иодом, а её предок, обладающий периодом около 3 суток (66—77 час.), является теллуром. Эти результаты были получены при анализе абсорбции в ряде веществ излучения, испускаемого «трансурановыми» элементами, и путём химического отделения активностей с соответствующими носителями. Они явились новым и независимым доказательством факта деления ядра урана.

Кажется весьма странным, что типичный металлоид иод мог быть ранее идентифицирован как EkaPt. Интересно, что для этого приводились, казалось бы, веские доказательства. 66-часовая и 2,5-часовая активности осаждались из кислого раствора облучённой нейтронами соли урана сероводородом совместно с платиной. Затем 2,5-часовая активность отделялась при кристаллизации хлорплатинита аммония. Всё это в свете тогдашних представлений о «трансуранах» казалось достаточно хорошим доказательством химической идентичности 2,5-часовой активности с EkaPt. В действительности, с одной стороны имело место осаждение Te, который при β -распаде давал 2,5-часовой иод, и адсорбция J на поверхность-активных сернистых осадках, с другой стороны, — совместная кристаллизация с хлорплатинитом аммония соответствующего иодного комплекса.

Цепь β -распадов, возникающая из первичного осколка, получающегося при делении урана под действием нейтронов, и приводящая к радиоиоду, была подробно исследована Абельсоном^{53, 55}, акад. В. Г. Хлопиным с сотрудниками^{68, 69, 70, 71} и Ганом и Штрассманом^{3, 48, 56}. В итоге были химически идентифицированы все элементы цепи и уточнены их периоды. Первичным осколком является Sb, распадающаяся по схеме:



Рассматриваемый изотоп иода образуется не только при делении урана, но, как показали Ган, Штрассман и Флюгге⁷² и Полесицкий и Немеровский⁷³, также при делении тория под действием нейтронов. Он также был выделен из урана, подвергнутого бомбардировке α -частицами с $E = 32 \text{ MeV}$ ⁵⁷.

Так как, насколько нам известно, радиоактивный иод с $T = 2,4$ часа был выделен только из продуктов деления тяжёлых ядер и не был получен в других ядерных реакциях, то не все его характеристики могут быть указаны с достаточной определённойностью. Это в

первую очередь относится к массовому числу 2,4-часового изотопа. Кажется вероятным приписать этому радиоиду массовое число $M = 132$, но прямое доказательство этого предположения затруднительно.

Вторая характеристика — период полураспада — может быть определена достаточно точно, несмотря на сложный характер интегральной кривой распада радиоактивных изотопов иода, выделенных из продуктов деления тяжёлых ядер. Это возможно благодаря тому, что «предок» 2,4-часового иода обладает большим периодом полураспада $T = 77$ часов, в то время как все остальные радиоактивные изотопы иода образуются из короткоживущих изотопов теллура. Вследствие этого 2,4-часовая активность может быть выделена практически в чистом виде при вторичной экстракции иода из облучённой соли. Рационально выбирать время первого и второго извлечения иода, можно получить достаточное количество чистого J^{132} и определить его период полураспада, не прибегая к сопряжённому с возможными ошибками анализу интегральной кривой распада. Из ряда определений $T = 2,3—2,4$ часа.

Коэффициент выхода 2,4-часового иода при делении урана под действием нейтронов составляет $3,3—3,6\%$ ^{41, 61}. Излучение, испускаемое 2,4-часовым иодом, недостаточно исследовано. Имеющиеся в литературе данные малочисленны и не согласуются между собой. По абсорбционным измерениям Борна и Зеельман-Эггеберта ⁷⁴ данный изотоп иода обладает простым β -спектром с $E_m = 1,35$ MeV и испускает γ -лучи с $E_\gamma = 0,85$ MeV. По данным, приведённым в опубликованном отчёте по плутониевому проекту ⁴¹ и полученным также с помощью поглощения в Al и Pb, β -спектр 2,4-часового $J^{(132)}$ состоит из двух групп с $E'_m = 1,0$ MeV (50%) и $E''_m = 2,1$ MeV (50%) и имеет место испускание двух γ -квантов с $E_\gamma = 0,60$ MeV (50%) и $E_\gamma = 1,4$ MeV (50%).

Такие противоречивые результаты не позволяют построить схему распада данного изотопа иода.

J^{133} . $T = 22$ часа.

Радиоактивный изотоп иода с $T = 22$ часа был впервые обнаружен Абельсоном ^{53, 54} в продуктах деления урана под действием нейтронов. Образование этого изотопа при облучении урана нейтронами было подтверждено Ганом и Штрассманом ^{49, 56}, В. Г. Хлопниным с сотрудниками ⁶⁹, Додсоном и Фаулером ⁷⁵ и др. Этот радиоактивный иод получается также при делении урана под действием α -частиц ⁵⁷ и, повидимому, при облучении тория быстрыми нейтронами ^{45, 47, 76, 77}. Исследование данного изотопа представляет известные трудности. Так как 22-часовой иод был получен только при делении тяжёлых ядер, то он исследовался всегда в смеси с другими радиоактивными изотопами иода, образующимися в данном случае, и активными продуктами их распада. В данном случае нет возможности выделить интересующую активность в чистом виде, как это удастся в случае J^{132} .

В таких условиях факт отделения 22-часовой активности с неактивным иодом ещё не является доказательством того, что эта активность принадлежит иоду. Возникает необходимость ставить специальные опыты для того, чтобы убедиться, что интересующая активность действительно принадлежит иоду, а не продукту распада какого-либо изотопа иода⁴⁸. Определение периода полураспада возможно только путём анализа сложной кривой распада, отражающей как распад нескольких изотопов иода с различными коэффициентами выхода, периодами полураспада, энергиями β -частиц, так и сложный

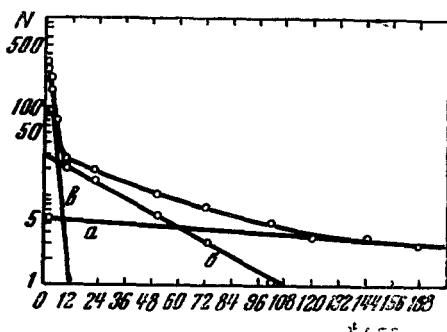
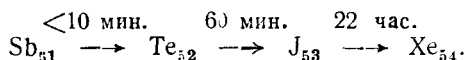


Рис. 16. Пример интегральной кривой распада радиоактивных изотопов иода.
а — 8 дн. J^{181} , б — 22 час. J^{183} ,
в — 54 мин. J^{184} .

иода, но и путём последовательных отделений было показано, что данный радиоиод не является первичным осколком, а образуется из теллура с $T = 60$ минут, который в свою очередь возникает при β -распаде Sb с $T < 10$ минут⁵⁵. Таким образом имеет место цепь:



Однако эта цепь не кончается на ксеноне. Ещё ранее рядом авторов^{77, 78, 79} отмечался факт возникновения радиоактивного ксенона из иода, выделенного из продуктов деления урана и тория. Путём последовательных отделений ксенона от иода, выделенного из урана, Сегре и Ву^{77, 80} и Додсон и Фаулер⁷⁵ показали, что при распаде 22-часового иода образуется радиоактивный ксенон с периодом около 5 дней, распадающийся в свою очередь с образованием стабильного цезия.

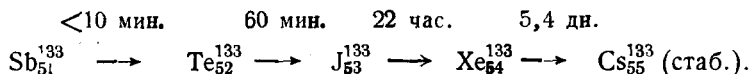
Это обстоятельство было использовано Ву^{44, 80} для определения массового числа 22-часового J и всей цепи. Цезий, имеющий один стабильный изотоп Cs^{133} , подвергался бомбардировке нейтронами. При этом был получен радиоактивный газ, который по периоду полураспада и кривой поглощения испускаемого им излучения был идентифицирован с 5-дневным Хе, выделяемым из 22-часового иода.

характер изменения их продуктов распада (рис. 16). Так как характер интегральной кривой распада определяется многими факторами, в том числе условиями облучения мишени, характером применяемого счётного устройства и пр., то трудности, возникающие при определении периода полураспада, очевидны. Из многих определений^{41, 48, 53, 55, 69, 77} наиболее достоверным значением является $T = 22$ часа.

Несмотря на указанные трудности, не только был установлен период 22-часового

Так как, очевидно, имеет место ядерная реакция $\text{Cs}_{55}^{133}(n, p)\text{Xe}_{54}^{133}$, то 5-дневному ксенону, 22-часовому иоду и всем их «предкам» должно быть приписано массовое число $M=133$.

Таким образом на основании всего вышеизложенного имеет место цепь:



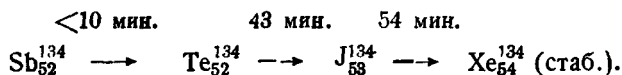
Выход этой цепи при делении U^{235} равен 4,5%⁴¹.

Излучение, испускаемое J^{133} при β -распаде, исследовалось с помощью камеры Вильсона в магнитном поле⁸¹ и абсорбцией в Al и Pb⁴¹. Полученные этим методом значения максимальной энергии β -спектра J^{133} соответственно равны: $E_m=1,1$ MeV и $E_m=1,3$ MeV. Энергия γ -лучей по абсорбционным измерениям равна $E_\gamma=0,55$ MeV. Несмотря на довольно удовлетворительное совпадение между значениями E_m , полученными двумя разными способами, к оценке достоверности данных о β -спектре J^{133} в связи с трудностями отделения его от других радиоактивных изотопов следует подходить с известной осторожностью. В частности, методика, применённая для получения образца J^{133} в опытах Перфилова⁸¹, допускает принципиальную ошибку в определении β -спектра J^{133} . На основании данных о коэффициентах выхода цепей, приводящих к образованию радиоактивных изотопов иода, и периодах полураспада изотопов, входящих в эти цепи⁴¹, легко показать, что при имевшей место в обсуждаемом опыте длительности облучения и последующей выдержке отделённого от урана радиоактивного иода перед внесением его в камеру Вильсона в смеси с J^{133} неизбежно должны присутствовать значительные количества других изотопов иода (J^{131} , J^{135}) и ксенона (Xe^{133} , Xe^{135}). Даже при достаточно произвольном предположении, что весь ксенон, образующийся в кристаллах AGJ — в период между отделением иода от урана и началом измерений, — полностью диффундирует в атмосферу; образец содержит далеко не чистый J^{133} . Кстати и характер графика Ферми, построенного для полученного β -спектра⁸¹, указывает на то, что имеет место не одна группа β -частиц.

J^{134} . $T=54$ мин.

Так же как и предыдущий изотоп иода, 54-минутный J^{134} выделен только из продуктов деления тяжёлых ядер. Этот изотоп был впервые обнаружен Абельсоном^{53, 54, 55} при анализе кривой распада радиоактивного иода, выделенного из облучённого нейтронами урана. Этим путём 54-минутный иод был получен затем в ряде лабораторий^{48, 56, 60}. Этот же изотоп иода получается также при расщеплении урана под действием α -частиц⁵⁷ и, как показали Додсон и Фаулер⁴⁵ и Полесицкий и Орбели^{46, 47}, может быть выделен из тория, облучённого нейтронами. 54-минутный иод образуется при де-

лении тяжёлых ядер не в виде первичного осколка, а является продуктом серии β -распадов. Цепь, включающая 54-минутный иод, исследовалась рядом авторов^{46, 47, 53, 54, 55, 70} и в настоящее время может быть представлена в виде:



Периоды элементов, входящих в цепь и предшествующих 54-минутному J, устанавливаются путём исследования изменения активности иода (соответственно теллура) при последовательных отделениях от выделенного из урана теллура (или уранового раствора).

При исследовании J^{134} имеют место те же трудности, что и в случае J^{133} .

Коэффициент выхода 54-минутного J при делении урана на медленных нейтронах равен примерно 5,7%⁴¹.

Массовое число 54-минутного иода определено в самое последнее время. В таблицах изотопов Сиборга⁹ 54-минутный J обозначен как J^{131} , а в отчёте плутониевого проекта⁴¹ ему предположительно приписана масса 134 ($\text{J}^{(134)}$).

Проверка этого предположения путём бомбардировки элементов с близкими к иоду атомными номерами нейтронами, протонами, дейтонами и α -частицами невозможна. У Sb, Te, Cs отсутствуют подходящие стабильные изотопы, а активация Xe не может дать однозначного ответа. Однако возможен другой путь решения этой задачи. В 1947 г. Яффе и Макинтош⁶¹, определяя отношения активностей 54-минутного J и Ba^{139} , по известному выходу Ba^{139} при делении урана⁶² получили для 54-минутного J коэффициент выхода при делении как на медленных, так и на быстрых нейтронах, в среднем равный 5,75%. С другой стороны, из масспектрографических измерений Тодде и Грехэма⁸² известно, что при делении урана образуется четыре стабильных изотопа ксенона: Xe^{131} , Xe^{132} , Xe^{134} , Xe^{136} , являющихся конечными продуктами цепей с соответствующими массовыми числами. Отношения выходов изотопов ксенона с $M = 132, 134, 136$ Xe^{131} , а следовательно, отношения коэффициентов выхода соответствующих цепей равны: $k_{132}/k_{131} = 1,48 - 1,50$; $k_{134}/k_{131} = 2,63 - 2,67$; $k_{136}/k_{131} = 2,17 - 2,30$.

k_{131} был определён для 8-дневного J^{131} по отношению активностей J^{131} и Ba^{140} и равен 2,23—2,27%⁶¹.

Отсюда следует, что коэффициент выхода цепи с $M = 134$ равен 5,85%, что в пределах ошибки опыта соответствует выходу 54-минутного иода. Кстати, такой же способ может быть применён для определения массового числа 2,4-часового иода.

Выходы Ba^{139} и Ba^{140} , из которых исходили при определении коэффициентов выхода 54-минутного J и 8-дневного J определяются — для деления на медленных нейтронах — по отношению активностей

U^{239} и Ba^{139} (соответственно Ba^{140}) из отношения

$$\frac{\beta\text{-активность } U^{239}}{\beta\text{-активность } Ba^{139}} = \frac{\sigma_c}{\sigma_f \cdot k_{139}},$$

где σ_c — сечение захвата U^{238} , σ_f — сечение деления U^{235} , k_{139} — коэффициент выхода Ba^{139} при делении U^{235} на медленных нейтронах, т. е. отношение числа делений, приводящих к образованию Ba^{139} , к общему числу делений. Выходы Ba^{139} и Ba^{140} при делении на быстрых нейтронах определяются по отношению соответствующих активностей при делении U^{235} и U^{238} .

Излучение J^{134} практически не исследовано. Известно только, что при β -распаде J^{134} испускаются γ -лучи с $E_\gamma > 1 \text{ MeV}$.

$$J^{135}. T = 6,6 \text{ часа.}$$

Сегре и Ву^{77, 80} обнаружили в продуктах деления тяжёлых ядер ещё один изотоп иода с периодом $T = 6,6$ часа. Этот радиоактивный иод, присутствие которого было подтверждено другими авторами^{47, 60, 75}, образуется при распаде короткоживущего теллура^{75, 77}, возникающего непосредственно при делении урана и тория.

Образующийся при β -распаде J^{135} ксенон радиоактивен^{75, 77}, что и дало возможность установить как наличие 6,6-часового иода среди продуктов расщепления тяжёлых ядер, так и его массовое число.

Присутствие 6,6-часового периода трудно определить непосредственно по интегральной кривой распада радиоактивного иода, выделенного из облучённых нейтронами урана и тория. Большое количество активностей, образующих эту кривую, маскирует 6,6-часовой период, и определение его таким образом удаётся только в редких случаях. Обыкновенно при анализе интегральной кривой удаётся отметить только факт нарастания активности, принадлежащей радиоактивному потомку 6,6-часового иода — ксенону, с периодом полураспада $T = 9,2 - 9,4$ часа. Практически период полураспада J^{135} устанавливается путём ряда последовательных отделений ксенона от иода, выделенного из облучённых нейтронами урана и тория.

Отделение ксенона от иода производится или путём продувания газа через кипящий щелочной раствор иодистого натрия, или методом Лангсдорфа и Сегре⁷⁹, заключающимся в приготовлении эманлирующего образца, из которого ксенон переходит в эвакуированную камеру. Приготовление эманлирующего образца производится следующим образом. Силикагель пропитывается нитратом серебра погружением на 15 минут в 0,1N раствор $AgNO_3$ и затем сушится несколько часов при $T = 70^\circ \text{C}$. Несколько кубических сантиметров приготовленного таким образом силикагеля встряхивается с раствором активного иода в CCl_4 до обесцвечивания раствора. Активный ксенон, образующийся в эманлирующем образце, переходит или в эвакуированную камеру, окружающую счётчик, или непосредственно внутрь счётчика.

Выделенный тем или другим образом из иода ксенон содержит два изотопа: Xe^{133} с $T=5,4$ дня и Xe^{135} с $T=9,4$ часа. Однако из-за большой разницы в периодах и незначительной энергии электронов, испускаемых Xe^{133} ($\text{Xe}^{133} - E_m \approx 0,3$ MeV; $\text{Xe}^{135} - E_m \approx 0,95$ MeV) при определённых условиях опыта, отделённый от иода ксенон распадается фактически с одним периодом $^{83} T=9,4$ часа. На рис. 17 в полулогарифмических координатах точками представлен

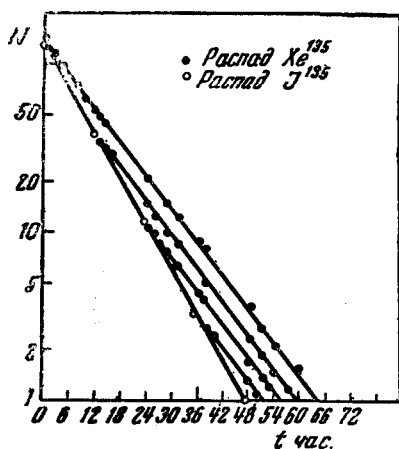


Рис. 17. Кривая распада J^{135} .

распад ксенона для четырёх экстракций, следующих с интервалом в 12 часов. При экстраполяции кривых распада (в координатах рис. 17 — прямых) к моменту отделения ксенона от иода по начальным точкам, обозначенным кружками, получается кривая распада «предка» 9,4-часового Xe —радиоиода с $T=6,6$ часа. Исходя из факта, что 9,4-часовой Xe образуется при β -распаде 6,6-часового J и, следовательно, оба они имеют одно и то же массовое число, удаётся доказать, что период $T=6,6$ часа принадлежит изотопу иода с массовым числом $M=135$. При бомбардировке Ba нейтронами $^{44, 80}$ были получены два радиоактивных газа с периодами $T=5$ дней и $T=9,4$ часа, которые по периодам и кривым абсорбции были идентифицированы с радиоактивными изотопами ксенона, образующимися при распаде иода, выделенного из продуктов деления урана и тория. Хотя у бария имеется 7 стабильных изотопов, но очевидная реакция $\text{Ba}_{56}^A(n, \alpha) \text{Xe}_{54}^{A-3}$ приводит к радиоактивному ксенону только для $M=130, 136, 138$. Так как из Ba^{136} образуется Xe^{133} , который, как было ранее доказано, обладает $T \approx 5$ дней, а отношение $\text{Ba}^{130}:\text{Ba}^{138}=1/700$, то можно сделать вывод, что 9,4-часовой Xe образуется по реакции: $\text{Ba}_{56}^{138}(n, \alpha) \text{Xe}_{54}^{135}$. Следовательно, 6,6-часовой период принадлежит J^{135} .

Что касается схемы распада J^{135} , то установлено, что возникающий при β -распаде 6,6-часового иода Xe^{135} образуется в двух изомерных состояниях $^{80, 83, 84} \text{Xe}^{*135}$ с $T=10-13$ минут и Xe^{135} с $T=9,2-9,4$ часа.

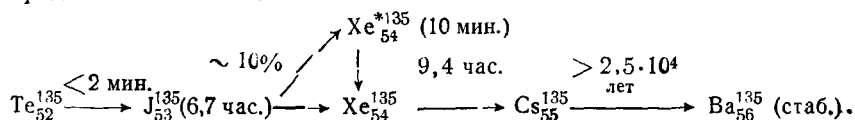
Гётте 83 , исследуя радиоактивный ксенон, образующийся из иода, с помощью установки Зеельман-Эггеберта 85 , впервые обнаружил 10-минутный Xe и показал, что периоды $T=10$ минут и $T=9,4$ часа принадлежат не отдельным изотопам ксенона, образующимся из

различных изотопов иода, а оба имеют своим «предком» 6,6-часовой J и, следовательно, принадлежат двум изомерам одного изотопа Xe^{135} .

Активный иод выделялся из урана, облучённого нейтронами с применением обычной техники носителя. Радиоксенон увлекался из нагретого раствора иодистого натрия током водорода и адсорбировался активным углем при температуре жидкого воздуха. При последующем нагревании угля десорбирующийся ксенон переходил в эвакуированную камеру, окружающую счётчик Гейгера-Мюллера. Продувание водорода производилось с двухчасовыми интервалами. Кривая распада радиоактивных изотопов ксенона каждый раз могла быть разложена в две прямые с $T=10$ минут и $T=9,4$ часа. Активность с $T=5$ дней, принадлежащая Xe^{133} , не наблюдалась, очевидно, как из-за короткого периода аккумуляции, так и благодаря тому, что β -частицы Xe^{133} в значительной степени поглощались в стенке счётчика. Экстраполируя обе прямые с $T=10$ минут и $T=9,4$ часа к начальному моменту времени, Гётте по начальным активностям получил в обоих случаях прямую с одним и тем же 6,6-часовым наклоном.

Ву и Сегре⁸⁰, выделяя ксенон из иода при коротком интервале аккумуляции и анализируя кривые распада, полученные отсчётом β -частиц и γ -квантов, обнаружили, что $T=10$ минут принадлежит возбуждённому изомерному состоянию Xe^{135} . Этот изомер получается при β -распаде J^{135} в количестве $\sim 10\%$ и с испусканием γ -квантов (и электронов внутренней конверсии) переходит в основное состояние Xe^{135} , распадающееся с $T=9,4$ -часа.

По последним данным⁴¹ цепь превращений первичного осколка с $M=135$, включающая образование и распад J^{135} , может быть представлена в виде:



Выход этой цепи при делении урана на медленных нейтронах равен 5,9%.

Энергетические переходы, имеющие место при β -распаде J^{135} , установлены не точно. По имеющимся данным, полученным абсорбционным способом⁴¹, максимальная энергия β -частиц, испускаемых J^{135} , находится в пределах $E_m=1,35-1,5$ MeV, а энергия излучаемых при β -распаде γ -квантов в пределах $E_\gamma=1,6-1,3$ MeV.

Разность энергетических уровней основного и метастабильного состояния Xe^{135} равна $\sim 0,55$ MeV^{41, 80, 81}.

В пределах точности имеющихся экспериментальных данных схема распада J^{135} , исходя из общих закономерностей «высвечивания» возбуждённых ядер, может быть предположительно представлена следующим образом: при β -распаде 100% β -частиц испус-

каются с $E_m = 1,35 - 1,5$ MeV, причём происходит переход на возбуждённый уровень Xe^{135} с энергией возбуждения $E_{\text{возб.}} = 1,6 - 1,3$ MeV. Это возбуждённое состояние с испусканием γ -квантов «высвечивается» на основной или на метастабильный уровень Xe^{136} . Примерно 90% γ -квантов, следующих за испусканием β -частиц, имеют энергию $E_\gamma = 1,6 - 1,3$ MeV и таким образом в 90% всех случаев имеет место переход в основное состояние. 10% γ -квантов имеет энергию $E_\gamma = E_{\text{возб.}} - 0,55 \approx 0,9$ MeV и в этом случае имеет место переход в метастабильное состояние Xe^{135} , которое с периодом $T = 13$ минут разряжается путём конвертированных γ -переходов с $E \approx 0,55$ MeV. При абсорбционных измерениях группа γ -квантов с $E_\gamma \approx 0,9$ MeV могла быть не обнаружена вследствие малой интенсивности (10%).

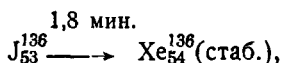
Короткоживущие изотопы иода:

$\text{J}^{(136)}$. $T = 1,8$ мин.; J^{137} . $T = 30$ сек.; $\text{J}^{(137)}$. $T = 22$ сек.

Штрассману и Гану⁸⁸ удалось разработать такую методику выделения радиоактивного иода из облучённого нейтронами урана, что измерение активности AgJ^* можно было начинать через 3 минуты после конца облучения. Благодаря этому они обнаружили в продуктах деления урана два короткоживущих изотопа иода с периодами: $T = 1,8 \pm 0,4$ минуты и $T = 30 \pm 6$ секунд.

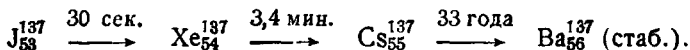
Период $T = 1,8$ минуты условно приписывают $^{41}\text{J}^{136}$, образуемому в качестве первичного осколка при делении урана и распадающемуся в стабильный Xe^{136} .

Если действительно 1,8-минутный период принадлежит J^{136} и имеет место процесс:



то выход 1,8 минутного J при делении урана должен быть равным⁸¹ 4,85%.

Зеельман-Эггеберт и Борн^{84,87} показали, что 30-секундный иод распадается с образованием Xe^{137} с $T = 3,4$ минуты. По американским данным⁴¹ 30-секундный J^{137} образуется непосредственно при делении и распадается по схеме:



По тем же данным^{41,88} при делении урана в качестве первичного осколка образуется ещё один короткоживущий изотоп иода с $T = 22 - 23$ секунды, распадающийся с испусканием электронов и запызывающих нейтронов.

В таблицах I и II приведены характеристические постоянные радиоактивных изотопов иода и ядерные реакции, приводящие к образованию этих изотопов.

Таблица I

M	Тип излучения	T	E_{α} в MeV	E_{γ} в MeV	Реакции образования
124	β^+	4 дня	—	—	$\text{Sb}_{51}^{121} (\alpha, n) \text{J}_{53}^{124};$ $\text{Te}_{52}^{124} (p, n) \text{J}_{53}^{124}$
(125)	K-захват	56 дней	—	—	$\text{Te}_{52}^{(124)} (d, n) \text{J}_{53}^{(125)};$ $\text{Te}_{52}^{(125)} (d, 2n) \text{J}_{53}^{(125)}$
126	β^-, γ	13 дней	1,1—1,2	0,5	$\text{J}_{53}^{127} (n, 2n) \text{J}_{53}^{126};$ $\text{Sb}_{51}^{123} (\alpha, n) \text{J}_{53}^{126};$ $\text{Te}_{52}^{125} (d, n) \text{J}_{53}^{126};$ $\text{Te}_{52}^{126} (p, n) \text{J}_{53}^{126}$
128	β^-, γ	24,99 минут	2,02 1,69	0,428	$\text{J}_{53}^{127} (n, \gamma) \text{J}_{53}^{128};$ $\text{Te}_{52}^{128} (d, 2n) \text{J}_{53}^{128};$ $\text{Te}_{52}^{128} (p, n) \text{J}_{53}^{128};$ $\text{J}_{53}^{127} (d, p) \text{J}_{53}^{128}$
129	β^-	$\geq 10^8$ лет	—	—	U (n)
130	β^-, γ	12,6 часа	1,03 0,61	0,416 0,537 0,667 0,744	$\text{Te}_{52}^{130} (d, 2n) \text{J}_{53}^{130};$ $\text{Te}_{52}^{130} (p, n) \text{J}_{53}^{130};$ $\text{Cs}_{55}^{133} (n, \alpha) \text{J}_{55}^{130}$
131	β^-, γ	8 дней	0,595	0,367 0,080	$\text{Te}_{52}^{130} (d, n) \text{J}_{53}^{131}; \text{U} (n);$ U (α)
(132)	β^-, γ	2,4 часа	1,35 2,1 1,0	0,85 1,4 0,6	U (n); U (α); Th (n)
133	β^-, γ	22 часа	1,1—1,3	0,55	U (n); U (α); Th (n)
134	β^-, γ	54 минуты	—	>1	U (n); U (α); Th (n)
135	β^-, γ	6,6 часа	1,35—1,5	1,3—1,6	U (n); Th (n)
(136)	β^-	1,8 минуты	—	—	U (n)
137	β^-	30 секунд	—	—	U (n)
(137)	$\beta^-, (n)$	22 секунды	—	—	U (n)

Таблица II

Радиоактивные изотопы иода, образующиеся при делении урана ⁴¹

М		Коэфф. выхода при делении U^{235} %
129	$ \begin{array}{c} \text{Te}^* (32 \text{ дн.}) \\ \swarrow 72 \text{ мин.} \\ \text{Sb} (4,2 \text{ часа}) \rightarrow \text{Te} \rightarrow \text{J} \xrightarrow{\geq 10^8 \text{ лет}} \text{Xe} \\ \downarrow \\ \text{Te} (30 \text{ час.}) \end{array} $	0,7
131	$ \begin{array}{c} \text{Te} \xrightarrow{25 \text{ мин.}} \text{J} \xrightarrow{8 \text{ дн.}} \text{Xe} \end{array} $	2,8
(132)	$ \text{Sb} \xrightarrow{\sim 5 \text{ мин.}} \text{Te} \xrightarrow{77 \text{ час.}} \text{J} \xrightarrow{2,4 \text{ часа}} \text{Xe} $	3,6
133	$ \text{Sb} \xrightarrow{< 10 \text{ мин.}} \text{Te} \xrightarrow{60 \text{ мин.}} \text{J} \xrightarrow{22 \text{ часа}} \text{Xe} \xrightarrow{5,4 \text{ дня}} \text{Cs} $	4,5
134	$ \text{Sb} \xrightarrow{< 10 \text{ мин.}} \text{Te} \xrightarrow{43 \text{ мин.}} \text{J} \xrightarrow{54 \text{ мин.}} \text{Xe} $	5,7
135	$ \begin{array}{c} \text{Xe} (10 \text{ мин.}) \\ \swarrow 9,4 \text{ часа} \\ \text{Te} \xrightarrow{< 2 \text{ мин.}} \text{J} (6,7 \text{ ч.}) \rightarrow \text{Xe} \rightarrow \text{Cs} \xrightarrow{> 2,5 \cdot 10^4 \text{ лет}} \text{Ba} \\ \downarrow \\ \text{Xe} \end{array} $	5,9%
136	$ \text{J} \xrightarrow{1,8 \text{ мин.}} \text{Xe} $	4,8
137	$ \text{J} \xrightarrow{30 \text{ сек.}} \text{Xe} \xrightarrow{3,4 \text{ мин.}} \text{Cs} \xrightarrow{33 \text{ года}} \text{Ba} $	—

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При ядерных реакциях, приводящих к образованию радиоактивных изотопов иода, обычно имеет место совместное образование нескольких изотопов. Особенно это относится к случаю деления тяжёлых ядер. В этом процессе образуется более половины изотопов иода, причём получение многих из них другими путями неизвестно. Реакция деления тяжёлых ядер, как источник радиоиода, имеет ряд преимуществ и недостатков. С одной стороны, это наиболее доступный путь получения радиоактивных изотопов иода с широким интервалом периодов. Этот способ доступен любой лаборатории, располагающей (Ra—Be) или (Rn—Be) источником нейтронов, и не требует сложного высоковольтного оборудования. Получаемый этим способом иод состоит из ряда изотопов с периодами от нескольких секунд до нескольких дней, что позволяет решать целый ряд задач.

С другой стороны, именно совместное образование ряда трудно отделимых друг от друга изотопов является некоторым недостатком метода. До некоторой степени этот недостаток может быть преодолен варьированием времени облучения, выдержкой облученного урана и выдержкой отделенного иода. На основании данных таблицы II условия получения радиоиода могут быть рационально выбраны таким образом, чтобы получились оптимальные количества интересующего изотопа. Имеется также возможность отделять периоды, используя различную энергию β -частиц и применяя при измерении активности соответствующие фильтры.

Существенным обстоятельством является факт образования радиоактивных изотопов ксенона при распаде J^{133} и J^{135} , что вызывает искажение кривой распада. При пользовании в качестве индикатора радиоиодом, содержащим эти изотопы, очевидно, необходимо принимать меры к тому, чтобы все образцы радиоактивного иода, участвующие в различных процессах, на протяжении опыта были в равных условиях в отношении возможности диффузии радиоксенона из образца.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. A. O. Nier, *Phys. Rev.* **52**, 933 (1937).
2. C. G. Lu, S. Sugden, *J. Chem. Soc.* 1273 (1939).
3. O. Hahn, F. Strassmann, *Naturwiss.*, **27**, 451 (1939).
4. L. Szilard, T. A. Chalmers, *Nature* **134**, 462 (1934).
5. E. Amaldi, O. D'Agostino, E. Fermi, B. Pontecorvo, F. Rasetti, E. Segré, *Proc. Roy. Soc. A* **149**, 522 (1935).
6. O. Erbacher, K. Philipp, *Zeits. phys. Chemie, A* **176**, 169 (1936).
7. М. И. Корсунский, Н. Н. Николаевская, М. А. Бак, *ЖЭТФ* **9**, 524, (1939).
8. J. J. Livingood, G. T. Seaborg, *Phys. Rev.* **54**, 775 (1938).
9. G. T. Seaborg, *Rev. Mod. Phys.* **16**, 1 (1944).
10. J. Roberts, J. Irvine, *Phys. Rev.* **59**, 936 (1941).
11. A. Roberts, L. Elliott, J. Dawning, W. Peacock, M. Deutsch, *Phys. Rev.* **64**, 268 (1943).
12. A. F. Reid, A. S. Keston, *Phys. Rev.* **70**, 987 (1946).
13. L. E. Glendenin, R. R. Edwards, *Phys. Rev.* **71**, 742 (1947).
14. G. F. Tape, J. M. Cork, *Phys. Rev.* **53**, 676 (1938).
15. J. J. Livingood, G. T. Seaborg, *Phys. Rev.* **53**, 1015 (1938).
16. G. F. Tape, *Phys. Rev.* **56**, 965 (1939).
17. N. Feather, *Proc. Cambr. Phil. Soc.* **34**, 599 (1938).
18. F. Kurie, J. Richardson, H. Paxton, *Phys. Rev.* **49**, 368 (1936).
19. E. Fermi, E. Amaldi, O. D'Agostino, F. Rasetti, E. Segré, *Proc. Roy. Soc. A* **146**, 483 (1934).
20. A. F. Reid, *Phys. Rev.* **69**, 530 (1946).
21. F. Knauer, *Zeits. f. Physik*, **120**, 103 (1942).
22. C. Lapointe, F. Rasetti, *Phys. Rev.* **58**, 554 (1940).
23. F. Rasetti, *Phys. Rev.* **58**, 869 (1940).
24. K. Sinma, F. Yamasaki, *Phys. Rev.* **59**, 402 (1941).
25. F. Houtermans, *Zeits. f. Physik*, **118**, 424 (1941).
26. C. S. Wu, L. J. Reinwater, W. W. Havens, *Phys. Rev.* **71**, 175 (1947).

27. W. B. Jones, *Phys. Rev.* **72**, 362 (1947).
28. J. H. E. Griffiths, *Proc. Roy. Soc. A* **170**, 513 (1939).
29. В. С. Дементий, Д. В. Тимошук, *ДАН*, **27**, 926 (1940).
30. D. Hull, H. Seelig, *Phys. Rev.* **60**, 553 (1941).
31. А. И. Алиханов, А. И. Алиханян, Б. С. Джелепов, *Nature*, **135**, 393 (1935).
32. А. И. Алиханов, А. И. Алиханян, Б. С. Джелепов, *Phys. Zeits. Sowjetun.* **10**, 78 (1936).
33. G. E. Tare, *Phys. Rev.* **55**, 1135 (1939).
34. R. Bacon, E. Grisewood, C. van der Merwe, *Phys. Rev.* **54**, 315 (1938).
35. R. Bacon, E. Grisewood, C. van der Merwe, *Phys. Rev.* **59**, 531 (1941).
36. E. Amaldi, *Phys. Zeits.* **38**, 692 (1937).
37. A. Roberts, J. Irvine, *Phys. Rev.* **53**, 609 (1938).
38. М. А. Бак, Н. Н. Николаевская, *ДАН*, **22**, 316 (1939).
39. K. Siegbahn, N. Hole, *Phys. Rev.* **70**, 133 (1946).
40. G. T. Seaborg, J. J. Livingood, J. W. Kennedy, *Phys. Rev.* **57**, 363 (1940).
41. «Nuclei formed in Fission», *J. Am. Chem. Soc.* **68**, 2411, (1946).
42. S. Katcoff, *Phys. Rev.* **71**, 826 (1947).
43. E. T. Clarke, J. W. Irvine, *Phys. Rev.* **70**, 893 (1946).
44. C. S. Wu, *Phys. Rev.* **58**, 926 (1940).
45. R. Dodson, R. Fowler, *Phys. Rev.* **55**, 880 (1939).
46. А. Е. Полесицкий, М. Л. Орбели, *ДАН*, **28**, 216 (1940).
47. А. Е. Полесицкий, Н. Немеровский, М. Л. Орбели, Н. М. Баранчик, *Изв. АН СССР, сер. физ.* **5**, 603 (1941).
48. O. Hahn, F. Strassmann, *Naturwiss.* **27**, 529 (1939).
49. M. Deutsch, A. Roberts, *Phys. Rev.* **60**, 362 (1941).
50. J. Downing, M. Deutsch, A. Roberts, *Phys. Rev.* **61**, 389 (1942).
51. G. T. Seaborg, J. W. Kennedy, *Phys. Rev.* **55**, 410 (1939).
52. E. Segré, R. S. Halford, G. T. Seaborg, *Phys. Rev.* **55**, 321 (1939).
53. P. Abelson, *Phys. Rev.* **55**, 670 (1939).
54. P. Abelson, *Phys. Rev.* **55**, 876 (1939).
55. P. Abelson, *Phys. Rev.* **56**, 1 (1939).
56. O. Hahn, F. Strassmann, *Phys. Zeits.* **40**, 673 (1939).
57. E. Fermi, E. Segré, *Phys. Rev.* **59**, 680 (1941).
58. W. Jentschke, F. Prankl, *Zeits. f. Physik.* **119**, 696 (1942).
59. W. Jentschke, *Zeits. f. Physik*, **120**, 165 (1943).
60. H. Andersen, E. Fermi, A. Grosse, *Phys. Rev.* **59**, 52 (1941).
61. L. Yaffe, C. Mackintosh, *Canad. Journ. Res. B* **25**, 371 (1947).
62. W. Grummitt, J. Guéron, G. Wilkinson, L. Yaffe, *Canad. J. Res. B* **25**, 364 (1947).
63. M. Deutsch, *Phys. Rev.* **59**, 940 (1941).
64. J. Downing, M. Deutsch, A. Roberts, *Phys. Rev.* **61**, 686 (1942).
65. L. Meitner, O. Hahn, F. Strassmann, *Zeits. f. Physik* **106**, 249 (1937).
66. P. Abelson, *Phys. Rev.* **55**, 418 (1939).
67. N. Feather, E. Bretscher, *Nature*, **143**, 516 (1939).
68. В. Г. Хлопин, М. А. Пасвик-Хлопина, Н. Ф. Волков, *ДАН*, **24**, 117 (1939).
69. В. Г. Хлопин, М. А. Пасвик-Хлопина, Н. Ф. Волков, *ДАН*, **24**, 847 (1939).
70. В. Г. Хлопин, М. А. Пасвик-Хлопина, Н. Ф. Волков, *ДАН*, **24**, 851 (1939).
71. В. Г. Хлопин, *Изв. АН, сер. физ.* **4**, 305 (1940).
72. O. Hahn, F. Strassmann, S. Flügge, *Naturwiss.* **27**, 544 (1939).
73. А. Е. Полесицкий, Н. Н. Немеровский, *ДАН*, **28**, 218 (1940).

74. H. J. Born, W. Seelmann-Eggebert, *Naturwiss.* 31, 201 (1943).
 75. R. Dodson, R. Fowler, *Phys. Rev.* 57, 966 (1940).
 76. A. Langsdorf, *Phys. Rev.* 56, 205 (1939).
 77. E. Segrè, C. Wu, *Phys. Rev.* 57, 552 (1940).
 78. В. Г. Хлопин, М. А. Пасвик-Хлопина, Н. Ф. Волков, ДАН, 24, 665 (1939).
 79. A. Langsdorf, E. Segrè, *Phys. Rev.* 57, 105 (1940).
 80. C. S. Wu, E. Segrè, *Phys. Rev.* 67, 142 (1945).
 81. Н. А. Перфилов, ДАН, 33, 491 (1941).
 82. H. G. Thode, R. L. Graham. *Canad. J. Res. A* 25, 1 (1947).
 83. H. Götze, *Naturwiss.* 28, 449 (1940).
 84. W. Seelmann-Eggebert, *Naturwiss.* 31, 491 (1943).
 85. W. Seelmann-Eggebert, *Naturwiss.* 28, 451 (1940).
 86. F. Strassmann, O. Hahn, *Naturwiss.* 28, 817 (1940).
 87. W. Seelmann-Eggebert, H. J. Born, *Naturwiss.* 31, 59 (1943).
 88. A. H. Snell, J. Levinger, Wilkinson, Meiners, Sampson, *Phys. Rev.* 70, 111 (1946).
-