

УДК 546.799

Синтез ^{260}Ku при облучении ^{249}Bk ионами ^{15}N

ДРУИН В. А., БОЧЕВ Б., КОРОТКИН Ю. С., КОСЯКОВ В. Н., ЛОБАНОВ Ю. В., МИНИН Е. А., ПОЛУБОЯРИНОВ Ю. В., РЫКОВ А. Г., САГАЙДАК Р. Н., ТРЕТЬЯКОВА С. П., ХАРИТОНОВ Ю. П.

В течение ряда лет в ОИЯИ изучается спонтанное деление изотопов курчатовия (элемента 104), открытого в Дубне в 1964 г. [1]. Получена обширная информация о периодах спонтанного деления как четных, так и нечетных изотопов курчатовия в широком диапазоне массовых чисел (от 253 до 260), что позволило установить новую закономерность в изменении стабильности ядер по отношению к этому виду распада [2]. Был накоплен большой опыт детектирования и идентификации короткоживущих спонтанно делящихся активностей, образующихся в ядерных реакциях с тяжелыми ионами.

К настоящему времени известно уже девять изотопов курчатовия. Особое место среди них занимает ^{260}Ku ($T_{1/2} = 0,1$ с), так как, во-первых, именно с ^{260}Ku связывают открытие курчатовия и, во-вторых, исторически это первое ядро, свойства которого оказались в противоречии с предсказаниями систематики периодов спонтанного деления, установленной для ядер с Z от 96 до 102. Это отклонение в 100 тыс. раз в сторону большего значения периода полураспада ($0,1$ с вместо 10^{-6} с) имеет принципиальное значение с точки зрения новых закономерностей в систематике и, следовательно, оценки стабильности более тяжелых ядер ($Z \geq 104$).

В Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ было проведено несколько серий экспериментов по его синтезу в ядерных реакциях ^{242}Pu ($^{22}\text{Ne}, 4n$) ^{260}Ku и ^{246}Cm ($^{18}\text{O}, 4n$) ^{260}Ku [1, 3–5]. Результаты этих серий по своим основным выводам целиком совпадали. Для идентификации ^{260}Ku тщательно измеряли функции возбуждения реакций синтеза, проводили перекрестные облучения и изучали угловое распределение атомов отдачи — продуктов ядерного взаимодействия.

Однако в течение многих лет группа из Лаборатории им. Э. Лоуренса в Беркли высказывает

сомнения относительно правильности определения в Дубне радиоактивных свойств ^{260}Ku . Сначала возражения основывались только на графических экстраполяциях [6]. Затем берклевская группа предприняла несколько оказавшихся безуспешными [7] попыток зарегистрировать спонтанное деление ^{260}Ku . В литературе появились ссылки на работы, которые, к сожалению, не были опубликованы даже в виде препринтов (см., например, [8]). Poleмические выступления А. Гиорсо приняли особенно острый характер после того, как в 1968 г. в Беркли был изучен α -распад некоторых нечетных изотопов курчатовия [9].

Последний этап полемики характеризуется получением в Беркли противоречивых данных и их произвольной интерпретацией [10, 11]. В октябре 1975 г. в докладе А. Гиорсо сообщалось о том, что в экспериментах в Беркли по облучению ^{249}Bk ионами ^{15}N , направленных на синтез ^{260}Ku , никаких короткоживущих активностей не наблюдалось [10]. В другой серии опытов по изучению спонтанного деления продуктов взаимодействия ^{249}Bk и ^{15}N , выполненных в Беркли в мае 1976 г., наблюдалось спонтанное деление с $T_{1/2} \approx 20$ мс [11]. Это противоречие требовало дополнительных экспериментов и более тщательного анализа ранее полученных результатов. Более чем 10-летняя история «проблемы ^{260}Ku » не была завершена, несмотря на претенциозное название доклада А. Гиорсо на Конференции по ядрам, удаленным от стабильности, в мае 1976 г. («Окончательное решение вопроса об элементе 104»).

В сентябре 1976 г. в Дубну был приглашен в качестве наблюдателя И. Ничке, сотрудник Лаборатории им. Э. Лоуренса, участник майских опытов в Беркли, интерпретированных в докладе А. Гиорсо [11]. В его присутствии в экспериментах на ускорителе ЛЯР ОИЯИ

было еще раз подтверждено наличие активности с периодом полураспада $\sim 0,1$ с, обусловленной распадом ^{260}Ku в продуктах облучения ^{249}Vk ионами ^{15}N .

В настоящей статье излагаются результаты этих опытов, проведенных в Дубне, в сопоставлении с данными Беркли (май 1976 г.) [11].

Экспериментальная методика и результаты.

В экспериментах по синтезу трансурановых элементов с помощью тяжелых ионов ядра — продукты реакций — отделяются от исходного вещества мишени вследствие передачи импульса налетающей частицей. Далее атомы отдачи улавливаются тем или иным способом и переносятся к детекторам излучения для анализа (определения) их радиоактивных свойств.

Сложность экспериментов заключается в создании условий, при которых роль фоновых активностей сведена до минимума. Если речь идет о долгоживущем фоне при регистрации спонтанного деления, то идеальной представляется транспортирующая система с бесконечно длинной лентой — сборником атомов отдачи. В этом случае «долгоживущий» фон распределяется на большой площади так, что его удельная активность на единицу поверхности детектора осколков становится пренебрежимо малой.

Неоднократно отмечалось [1, 3, 5], что в опытах по синтезу ^{260}Ku при облучении ^{242}Pu ионами ^{22}Ne и изотопов кюрия ионами $^{16,18}\text{O}$

одновременно в реакциях передачи возникают по крайней мере две «фоновые» (т. е. затрудняющие детектирование $\sim 0,1$ с ^{260}Ku) активности: ^{242}Am и ^{256}Fm ($T_{1/2} = 13,7$ мс и 2,7 ч соответственно). Сечения их образования сравнимы или даже превосходят сечение реакции синтеза 104-го элемента.

Априори можно было ожидать, что при переходе от ^{246}Cm к ^{249}Vk сечение реакции передачи, приводящей к образованию ^{256}Fm — наиболее опасной фоновой активности, в комбинации $^{249}\text{Vk} + ^{15}\text{N}$ будет больше, чем в случае $^{246}\text{Cm} + ^{18}\text{O}$. Ранее отмечалось [5], что работа с кюриевой мишенью потребовала существенного изменения методики по сравнению с использованной в опытах с плутонием. Это связано, в первую очередь, с ростом сечения образования ^{256}Fm на кюрию.

Замена 8-метровой ленты-транспортера, использованной в опытах с плутонием [3], на 300—800-метровую ленту позволила в реакции $^{246}\text{Cm} + ^{18}\text{O}$ надежно выделить активность ^{260}Ku с периодом полураспада $\sim 0,1$ с при наличии значительного долгоживущего фона [5].

Тем не менее в первой серии опытов по облучению ^{249}Vk азотом в Беркли использовалась установка с длиной сборника всего лишь 0,8 м [10], а в последующем — 30 м [11], что представляется совершенно неудовлетворительным с точки зрения уровня фона и возможности анализа кривых распада.

Установка. Оценки показывали, что ленточный транспортер длиной 300 м удовлетворяет требованиям детектирования ^{260}Ku в комбинации $^{249}\text{Vk} + ^{15}\text{N}$ на фоне спонтанно делящихся продуктов реакций передачи ^{242}Am и ^{256}Fm .

Схема экспериментальной установки, с помощью которой в наших опытах осуществлялся синтез ^{260}Ku в реакции $^{249}\text{Vk} + ^{15}\text{N}$, показана на рис. 1. В качестве сборника ядер отдачи использовалась никелевая лента толщиной от 15 до 25 мкм, шириной 25 мм и длиной 350—600 м. Мишень располагалась на расстоянии 40 мм от ленты-сборника. Ядра отдачи, выбитые из мишени, внедрялись в сборник и переносились к стеклянным или пластиковым детекторам осколков деления, расположенным вдоль ленты на длине 80 см симметрично относительно мишени, справа и слева от нее. Скорость ленты можно было изменять в широких пределах (максимальная скорость 70 см/с) с помощью редуктора на валу синхронного двигателя. Камера мишени изолировалась от камер детекторов тефлоновыми вставками с уз-

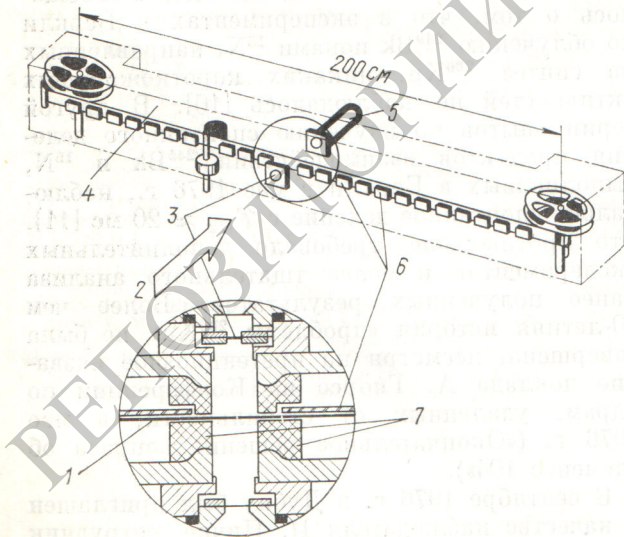


Рис. 1. Схема экспериментальной установки «Магнитофон»:

1 — никелевая лента; 2 — пучок ионов ^{15}N ; 3 — мишень ^{249}Vk ; 4 — гелий при давлении 20 мм рт. ст.; 5 — цилиндр Фарадея; 6 — детекторы осколков деления; 7 — тефлоновые вставки

кой (1 мм) прорезью для ленты-сборника, чтобы предотвратить попадание на детекторы рассеянных ионов и осколков вынужденного деления.

Интенсивность пучка и интегральный поток ионов, прошедших через мишень, измерялись при помощи вакуумного цилиндра Фарадея.

Энергия пучка и интенсивность (при использовании наиболее толстой ленты) контролировались по упругому рассеянию ионов на тонкой (40 мкг/см^2) золотой мишени, установленной вблизи входного окна. Рассеянные ионы регистрировались $\text{Si}(\text{Au})$ -детектором.

Дополнительный контроль за интегральным потоком ионов ^{15}N , прошедших через мишень, проводился по измерению наведенной активности в 15-мкм алюминиевой фольге, располагавшейся в начале стопки поглотителей сразу после медного входного окна (всегда при одной и той же энергии). С помощью германиевого гамма-детектора регистрировалась 64-часовая активность $^{71}\text{As}(E_\gamma = 175 \text{ кэВ})$ с известным выходом.

Мишень. Изотоп ^{249}Bk является сравнительно короткоживущим β -излучателем с периодом полураспада 314 сут. Быстрое накопление дочернего ^{249}Cf налагает особые требования на очистку мишенного вещества и срок проведения экспериментов после изготовления мишени.

Перед началом опытов мишенное вещество (^{249}Bk) было очищено от ^{249}Cf и балластных примесей. Мишень диаметром 9 мм ($\sim 0,6 \text{ см}^2$) с плотностью вещества 180 мкг/см^2 была изготовлена в момент, когда количество ^{249}Cf в берклии не превышало 1%. Количество вещества и толщина рабочего слоя мишени определялись по $L - X$ -излучению ^{249}Cf (после β -распада ^{249}Bk) и спектру α -частиц ^{249}Bk и ^{249}Cf на полупроводниковых детекторах с известной геометрией. Результаты измерений находились в хорошем согласии между собой.

Результаты. Было проведено две серии экспериментов (в апреле и сентябре — ноябре 1976 г.), результаты которых в пределах погрешностей согласуются между собой. Приведем здесь суммарные данные обеих серий.

Облучения ^{249}Bk проводились при следующих энергиях ионов ^{15}N : 78, 84, 93 МэВ (апрель) и 75, 82 и 90 МэВ (сентябрь — ноябрь), причем расчетный максимум сечения ядерной реакции $^{249}\text{Bk}(^{15}\text{N}, 4n)^{260}\text{Ku}$ приходится на энергию 82 МэВ. Исходная энергия ионов ^{15}N была измерена с помощью магнитного анализатора

и оказалась равной $148 \pm 1 \text{ МэВ}$ *. Для изменения энергии использовались алюминиевые поглотители, помещавшиеся между входным окном и мишенью. Максимум энергетического спектра ионов ^{15}N , измеренного магнитным анализатором после прохождения стопки поглотителей, выбранных из расчета получения на слое ^{249}Bk энергии ^{15}N 82 МэВ, соответствовал энергии 81,8 МэВ, а ширина на полувысоте 3,3 МэВ удовлетворяла условиям проведения опытов по измерению функции возбуждения реакции испарения нейтронов (как известно, ширина функций возбуждения на полувысоте составляет примерно 10 МэВ).

Эксперименты проводились на установке «Магнитофон» при скорости движения ленты-сборника 40 и 70 см/с (первая и вторая серии опытов). Регистрация распада атомов отдачи началась через 75 и 40 мс соответственно. В качестве детекторов осколков использовались фосфатные стекла с эффективностью 90%, отличающиеся низким содержанием тяжелых элементов (U, Th). Концентрация делящихся примесей в стеклянных детекторах и на никелевой ленте-сборнике проверялась методом нейтронного активационного анализа и составляла $\leq 10^{-7}$ г/г. Кроме того, был проведен контрольный опыт на пучке ионов ^{15}N с установкой «Магнитофон», но без движения ленты-сборника. Было показано, что величиной фона от вынужденного деления нейтронами примесей урана и тория в детекторах и никелевом сборнике можно пренебречь.

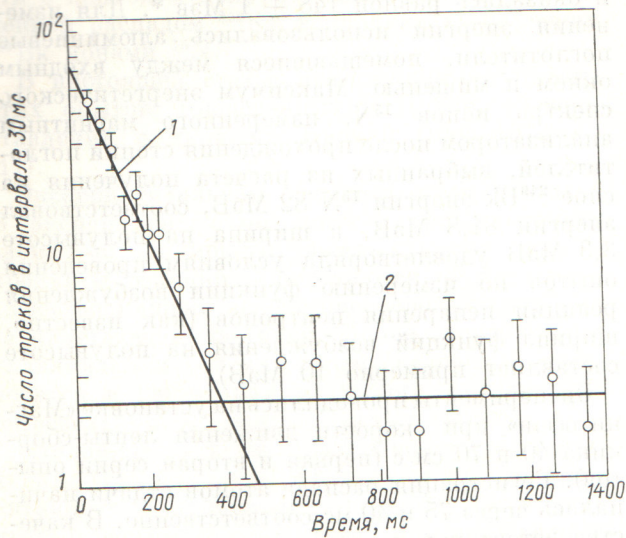
На рис. 2 представлено распределение треков на детекторах от осколков спонтанного деления продуктов ядерной реакции $^{249}\text{Bk} + ^{15}\text{N}$ при энергии ионов ^{15}N 82 МэВ в лабораторной системе координат (л. с. к.). Анализ экспериментальных данных проводился в предположении независимого образования спонтанно делящихся продуктов. В этом случае для описания наблюдаемых распределений используется следующая система нелинейных уравнений экспоненциального типа:

$$A_0 + \sum_{i=1}^n A_i \exp(-t_j \ln 2/T_{1/2i}) = Y_j$$

$$(j = 1, 2, \dots, n),$$

где A_i — амплитуда; $T_{1/2i}$ — период полураспада i -й активности; A_0 — амплитуда фона; t_j — временная координата; Y_j — число треков

* Авторы признательны В. В. Волкову и В. Л. Михееву за проведение этих измерений.



Р и с. 2. Временное распределение треков осколков спонтанного деления при взаимодействии ионов ^{15}N с ^{249}Bk на установке «Магнитофон» с потоком ионов $1,2 \cdot 10^{17}$ част.:

— результат анализа с помощью ЭВМ; 1 — $T_{1/2} = 76 \pm 8$ мс; 2 — фон ^{256}Fm ; \circ — экспериментальные значения

во временном интервале Δt_i ; n — число экспериментальных значений.

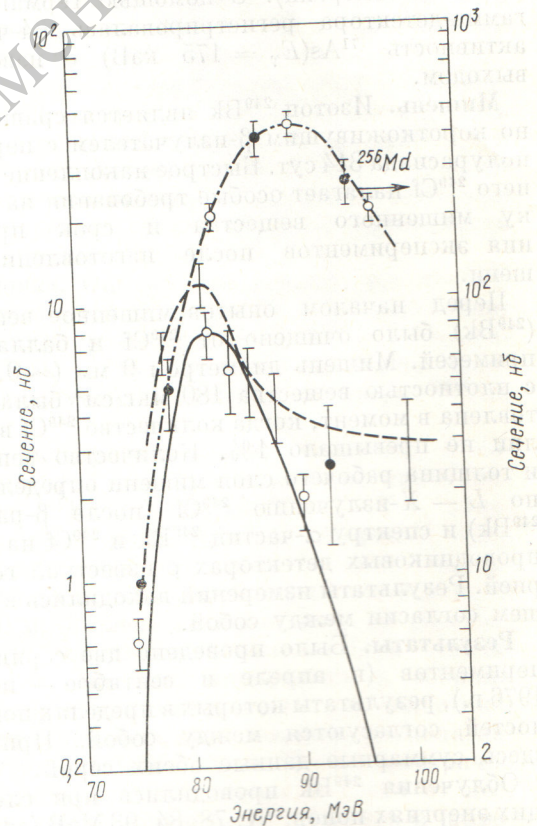
Эта система уравнений решалась относительно неизвестных $\{T_i\}$, $\{A_i\}$ и A_0 для $k = 1, 2, 3$ на основе регуляризованных итерационных процессов Гаусса — Ньютона [12] с применением для матрицы взвешивания квадратов стандартных отклонений. Достоверность решения оценивалась по χ^2 , χ^2/ν (ν — степень свободы системы уравнений) и норме функционала RO [12].

Анализ численных расчетов решений на ЭВМ СДС-6500 показал, что во всех наблюдаемых распределениях треков присутствует активность с периодом полураспада ~ 80 мс. На рис. 2 прямыми линиями показаны решения приведенной системы уравнений для одной компоненты ($k = 1$) и постоянной составляющей. Численный расчет дает $T_{1/2} = 76,0 \pm 8,4$ мс, $A = 68,2 \pm 8,5$ и $A_0 = 2,14 \pm 0,36$. Эти оценки получены применением теории погрешностей метода наименьших квадратов к наилучшей итерации. Сечение образования 80-мс активности, определенное из соотношения $\sigma = AT_{1/2}/\ln 2Id\Delta t\varepsilon$, где I — поток ионов; d — толщина мишени; ε — эффективность регистрации, в этом случае составляет 8 ± 2 нб (указана только статистическая погрешность).

Результаты измерений энергетической зависимости выхода 80-мс активности (функция возбуждения) приведены на рис. 3. В отдель-

ном опыте измерялись кривые распада и функция возбуждения для долгоживущей компоненты, регистрируемой как постоянный фон. С этой целью проводились трехчасовые экспозиции с неподвижным сборником, а затем активность сборника измерялась либо с помощью пластиковых детекторов, либо в ионизационной камере. Вид кривой распада соответствовал гипотезе образования ^{256}Md в качестве первичного продукта с последующим его распадом в ^{256}Fm , который спонтанно делится с $T_{1/2} = 2,7$ ч. Максимум функции возбуждения приходится на 90 МэВ ^{15}N , а оценка сечения в максимуме дает 450 нб.

Вид функции возбуждения 80-мс активности (положение максимума при 82 МэВ и полуширина ~ 10 МэВ) соответствует реакции полного слияния ядер мишени и налетающих ионов с последующим испарением четырех нейтронов. Экспериментальные значения функции



Р и с. 3. Функции возбуждения короткоживущей и долгоживущей активностей:

\circ, \bullet — экспериментальные данные настоящей работы; — — — — — функция возбуждения для ^{256}Md ; — — — — — функция возбуждения для 20-мс и 13-мс активностей [11]; — — — — — теоретический расчет для реакции $^{15}\text{N}, 4n \rightarrow ^{260}\text{Ku}$ [13] (указаны только статистические погрешности)

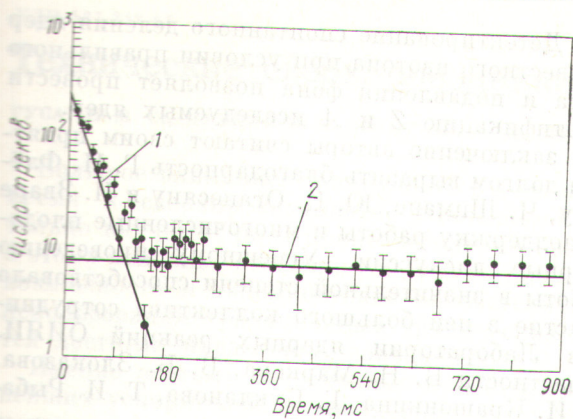


Рис. 4. Распад спонтанно делящихся продуктов взаимодействия ионов ^{15}N с ^{249}Bk [11] при энергии 51,6 МэВ и потоке ионов $47,1 \text{ мкА} \cdot \text{ч}$: — результат анализа с помощью ЭВМ; 1 — $T_{1/2} = 20,1 \pm 1,7 \text{ мс}$; 2 — фон ^{256}Fm

возбуждения удовлетворительно описываются теоретической кривой, вычисленной для реакции $^{249}\text{Bk} (^{15}\text{N}, 4n) ^{260}\text{Ku}$ по модели Джексона — Сиккеланда [13]. Таким образом, наблюдаемая 80-мс активность должна быть отнесена к ^{260}Ku . Соотношение максимальных сечений образования ^{260}Ku на ^{242}Pu (0,5 нб), ^{246}Cm (1,5 нб) и ^{249}Bk (8 нб), полученных из экспериментов в Дубне [3, 5], также находится в удовлетворительном согласии с расчетами [13].

Обсуждение результатов. Главный итог наших опытов по облучению ^{249}Bk ионами ^{15}N сводится к получению спонтанно делящегося изотопа с периодом полураспада около 0,1 с, который идентифицирован как ^{260}Ku в полном согласии с ранее сделанными основными выводами [1, 3, 5].

Вместе с тем при изучении той же реакции в Беркли делались выводы сначала о ненаблюдении какой-либо короткоживущей активности [10], а затем о наблюдении активности с $T_{1/2} \approx 20 \text{ мс}$ [11], при этом граничное сечение для образования 80-мс изотопа ^{260}Ku составляло 0,3 нб, что в 26 раз меньше измеренного в Дубне.

Попытаемся проанализировать, в чем причина расхождения результатов (и их интерпретации) при изучении одной и той же реакции. Рассмотрим более детально результаты последних опытов в Беркли, опубликованные в докладе А. Гиорсо [11]. На рис. 4 показан распад продуктов реакции $^{249}\text{Bk} + ^{15}\text{N}$ при энергии ^{15}N 82 МэВ в л. с. к., а на рис. 3 пунктиром обозначена функция возбуждения для короткоживущих продуктов, измеренная в Беркли. Обращает на себя внимание тот факт, что при

больших энергиях ^{15}N эффективный период полураспада становится 13 мс (а не 20 мс, как в максимуме функции возбуждения). Такой период полураспада имеет делящийся изомер ^{242}Am .

Как уже отмечалось, этот изомер должен образовываться в относительно простой реакции передачи при взаимодействии ^{249}Bk с ^{15}N . Функции возбуждения реакций передачи такого типа имеют вид кривых с максимумом, но они более широки по сравнению с функциями возбуждения реакций испарения нейтронов. Появление 13-мс активности при больших энергиях ^{15}N в чистом виде, очевидно, просто означает, что 20-мс активность в максимуме функции возбуждения складывается из двух компонент: 13-мс и более долгоживущей.

Представляет интерес из экспериментальных данных Беркли получить сечения образования активностей с периодами полураспада 13 и 80 мс. Для этой цели решалась приведенная система относительно амплитуд A_{13} , A_{80} и A_0 с входными данными $\{Y_j\}$ из работы [11] (см. рис. 4). Найденные таким образом значения $A_{13} = 411 \pm 43$, $A_{80} = 13,9 \pm 6,7$ и $A_0 = 6,4 \pm 1,3$ соответствуют сечениям $4,9 \pm 0,5$ и $1,0 \pm 0,5 \text{ нб}$.

И, наконец, было проведено облучение $^{249}\text{Bk} + ^{15}\text{N}$ на установке с 8-метровым ленточным транспортером («мертвое» время 16 мс), т. е. в условиях высокого уровня долгоживущего фона и с повышенным быстродействием. На рис. 5 представлен результат этого эксперимента. Обработка распределения треков проводилась решением приведенной системы для $k = 1$. В этом случае усредненное значение периода

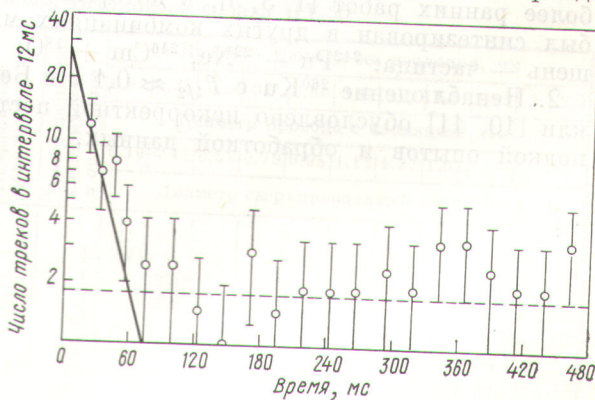


Рис. 5. Временное распределение треков осколков спонтанного деления, наблюдаемое при взаимодействии ионов ^{15}N (поток ионов $1,9 \cdot 10^{16} \text{ част.}$; $E^{15}\text{N} = 82 \text{ МэВ}$ в л. с. к.) с ^{249}Bk : ○ — экспериментальные значения; — — — результат анализа на ЭВМ ($T_{1/2} = 15 \pm 4 \text{ мс}$); - - - - фон ^{256}Fm

полураспада составило $14,6 \pm 3,6$ мс; амплитуда эффекта $18,4 \pm 7,0$, что соответствует сечению 10 ± 6 нб. Эти значения σ и $T_{1/2}$ близки к полученным в берклиевской постановке опытов. Те же экспериментальные данные (см. рис. 5) обрабатывались в предположении о существовании двух активностей с $T_{1/2} = 13$ и 80 мс. Полученные сечения 10 ± 2 и $1,3 \pm 0,6$ нб находятся в хорошем согласии с проведенными расчетами для 20-мс активности [11].

Таким образом, и экспериментально было показано, как в плохих фоновых условиях можно потерять эффект 80-мс активности и прийти к ошибочной интерпретации экспериментальных данных.

Основная причина разногласий в интерпретации результатов исследования одной и той же реакции в Дубне и Беркли заключается, по нашему мнению, в различных возможностях аппаратуры. В Дубне методика нацелена на максимальное подавление долгоживущего фона («Магнитофон» с длинной лентой), что позволяет изучать (регистривать) даже малые эффекты, в то время как на установке «Барабан» в Беркли уровень фона по крайней мере в 10 раз превосходит фон «Магнитофона». Вследствие более высокого уровня фона «хвост» 80-мс экспоненты «тонет» в долгоживущем фоне, а наличие ^{242}Am приводит к тому, что усредненная «экспонента» выглядит как 20-мс активность.

Можно сделать следующие выводы.

1. В ядерной реакции $^{249}\text{Bk} (^{15}\text{N}, 4n) ^{260}\text{Ku}$ получен изотоп курчатовия (элемента 104), распадающийся путем спонтанного деления с периодом полураспада около 0,4 с. Этот результат находится в полном согласии с выводами более ранних работ [1, 3, 5], в которых ^{260}Ku был синтезирован в других комбинациях мишень — частица: $^{242}\text{Pu} + ^{22}\text{Ne}$, $^{246}\text{Cm} + ^{18}\text{O}$.

2. Ненаблюдение ^{260}Ku с $T_{1/2} \approx 0,1$ с в Беркли [10, 11] обусловлено некорректной постановкой опытов и обработкой данных.

3. Детектирование спонтанного деления ядер неизвестного изотопа при условии правильного учета и подавления фона позволяет провести идентификацию Z и A исследуемых ядер.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность Г. Н. Флёрову, Ч. Шимане, Ю. Ц. Оганесяну и И. Зваре за поддержку работы и многочисленные плодотворные дискуссии. Успешному проведению работы в значительной степени способствовало участие в ней большого коллектива сотрудников Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ, в частности Б. Н. Маркова, В. Б. Злоказова, В. И. Крашонкина, Г. Букланова, Т. И. Рыбаковой, К. И. Меркиной.

Поступила в Редакцию 8/IV 1977 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Флёров Г. Н. и др. «Атомная энергия», 1964, т. 17, вып. 4, с. 310.
2. Оганесян Ю. Ц. В кн.: Труды Междунар. школы-семинара по взаимодействию тяжелых ионов и синтезу новых элементов. Дубна, изд. ОИЯИ, 1976, Д7-9734, с. 9.
3. Оганесян Ю. Ц. и др. «Атомная энергия», 1970, т. 28, вып. 5, с. 393 (1970).
4. Флёров Г. Н. и др. В кн.: Труды Междунар. конф. по физике тяжелых ионов. Дубна, 11—17 февр. 1971, Д7-5769, с. 125.
5. Друин В. А. и др. «Ядерная физика», 1976, т. 24, с. 254. Препринт ОИЯИ Е7-9546. Дубна, 1976.
6. Ghiorso A., Sikkeland T. «Phys. Today», 1967, v. 20, p. 25.
7. Ghiorso A. In: Proc. R. A. Welch Found. Conf. on Chemistry Res. XIII. Houston, 17—19 Nov. 1969, p. 107.
8. Ghiorso A. Rep. UC RL-18714, 1969.
9. Ghiorso A. e.a. «Phys. Rev. Lett.», 1969, v. 22, p. 1317.
10. Ghiorso A. [2], p. 33.
11. Ghiorso A. In: Proc. 3rd Intern. Conf. on Nuclei far from Stability. Corsica, 26 May 1976.
12. Александров Л. Сообщения ОИЯИ P5-7258; P5-7259. Дубна, 1973; B1-5-9969. Дубна, 1976.
13. Ильинов А. С. Препринт ОИЯИ P7-7108. Дубна, 1973.