

3595/2-76

с 341.35
Б-435

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



13/ix-76

P15 - 9795

А.Г.Белов, Ю.П.Гангрский, А.М.Кучер,
Г.М.Маринеску, М.Б.Миллер, И.Ф.Харисов

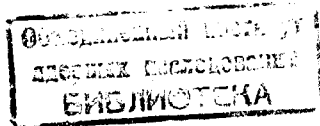
ЗАПАЗДЫВАЮЩЕЕ ДЕЛЕНИЕ ^{238}Pa

1976

P15 - 9795

А.Г.Белов, Ю.П.Гангрский, А.М.Кучер,
Г.М.Маринеску, М.Б.Миллер, И.Ф.Харисов

ЗАПАЗДЫВАЮЩЕЕ ДЕЛЕНИЕ 238 Pa



Ядра, удаленные от области β -стабильности, характеризуются целым рядом новых явлений. Одно из таких явлений - запаздывающее деление, когда ядро делится, находясь в возбужденном состоянии, причем эти состояния заселяются при β -распаде. Это явление было открыто в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ в 1966 году^{/1,2/}. В реакциях с тяжелыми ионами были получены изотопы ^{234}Am , ^{232}Am , ^{230}Am , ^{228}Np с периодами полураспада $1 \div 3$ мин, испытывающие деление после К-захвата. Из систематики энергий β -распада и высот барьера деления следует, что запаздывающее деление должно быть распространенным явлением как среди нейтронодефицитных, так и нейтроноизбыточных ядер. В первую очередь запаздывающее деление будут испытывать нечетно-нечетные ядра, т.к. они имеют наибольшую энергию β -распада, а дочерние четно-четные ядра характеризуются большей делимостью.

Исследование запаздывающего деления представляет большой интерес, т.к. оно позволяет получить целый ряд сведений о свойствах ядер /силовой функции β -распада, форме барьера ядер, удаленных от области β -стабильности и т.д./. В данной работе описываются результаты исследования запаздывающего деления нейтроноизбыточного ядра ^{238}Pa . Этот изотоп имеет период полураспада 2,3 мин, энергию β -распада 4,1 МэВ и может быть получен в сравнительно простой реакции $^{238}\text{U}(n,p)$ ^{/7/}.

Для получения изотопа ^{238}Pa использовались нейтроны с энергией 14,7 МэВ, образующиеся в реакции $T+d$ на нейтронном генераторе, а также нейтроны широкого спектра из реакции $^9\text{Be} + d$ на изохронном цик-

лотроне ЛЯР при энергии дейтронов 18 МэВ. Используемая в опытах установка позволяла одновременно облучать до 20 мишеней из урана общим весом до 100 мг/см² /рис. 1/. Во время облучения мишени сдвигались вплотную друг к другу и находились на расстоянии 4 мм от тритиевой или бериллиевой мишени /источника нейтронов/. По окончании облучения мишени раздвигались и между ними вводились диэлектрические детекторы

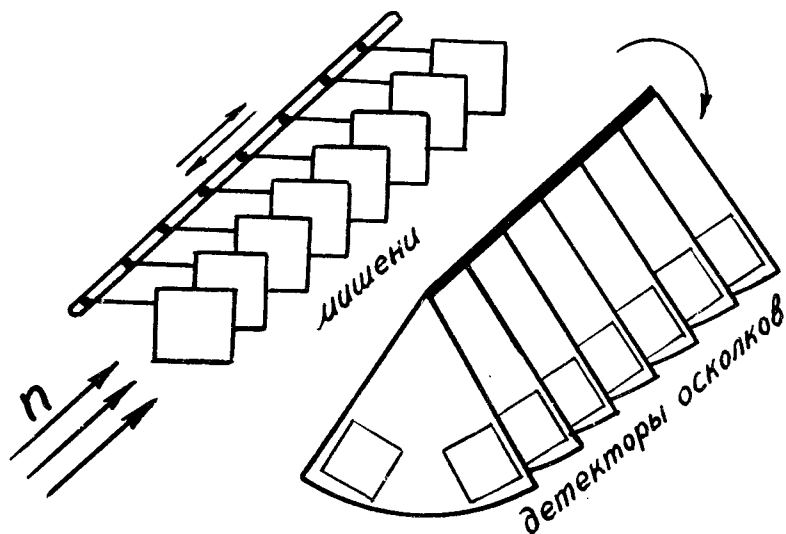


Рис. 1. Блок-схема установки.

осколков /слюда или лавсан/ на заданное время. Обычно время облучения выбиралось равным 7 мин, а время измерения 2х2,5 мин. Поток нейтронов через мишени определялся по интенсивности γ -излучения ¹⁴⁰Ba - одного из осколков деления, выход которого составлял 4,5% от числа актов деления. Число треков на диэлектрических детекторах позволяло судить о выходе осколков запаздывающего деления изотопа ²³⁸Pa, образующегося в реакции (n, p). Проведенные измерения показали, что число треков составляет 10⁻⁹ - 10⁻¹⁰ от числа осколков

ков мгновенного деления урана нейтронами. Чтобы определить, какую долю от этого числа составляют осколки запаздывающего деления ²³⁸Pa, необходимо было знать уровень фона. Для этого были проанализированы возможные источники фона и проведены контрольные опыты, позволившие количественно оценить выход осколков от этих источников.

1. Деление урана под действием запаздывающих нейтронов и γ -квантов высокой энергии. Этот эффект имел место непосредственно после окончания облучения, и вклад его быстро падал со временем, т.к. изотопы, испускающие запаздывающие нейтроны и γ -кванты высокой энергии, имеют секундные периоды полураспада.

2. Деление нейтронами микропримесей урана в диэлектрических детекторах и окружающих детекторы материалах. Этот эффект также имел место, т.к. интенсивный пучок нейтронов попадал на детекторы осколков. Несмотря на использование материалов с очень низким содержанием урана /<10⁻⁹ г/г/, во время опыта происходило загрязнение детекторов ураном из облучаемых мишеней.

3. Спонтанное деление урана, а также деление урана под действием космических лучей.

Проведенные опыты показали, что большая часть обнаруженных треков на диэлектрических детекторах была связана с отмеченными выше источниками фона. Поэтому был предпринят ряд мер для снижения уровня фона: измерения начинались спустя 1 мин после окончания облучения, когда существенно снижалась интенсивность запаздывающих нейтронов и жестких γ -квантов; использовались мишени, обедненные изотопом ²³⁵U, имеющим большое сечение деления; на время облучения детекторы осколков удалялись от источника нейтронов на такое расстояние, что фон от деления микропримесей урана становился пренебрежимо малым; в той же геометрии опыта при отсутствии пучка нейтронов был тщательно измерен фон от спонтанного деления урана. Результаты измерений /зависимость числа треков от времени/, проведенных в этих условиях, представлены на рис. 2.

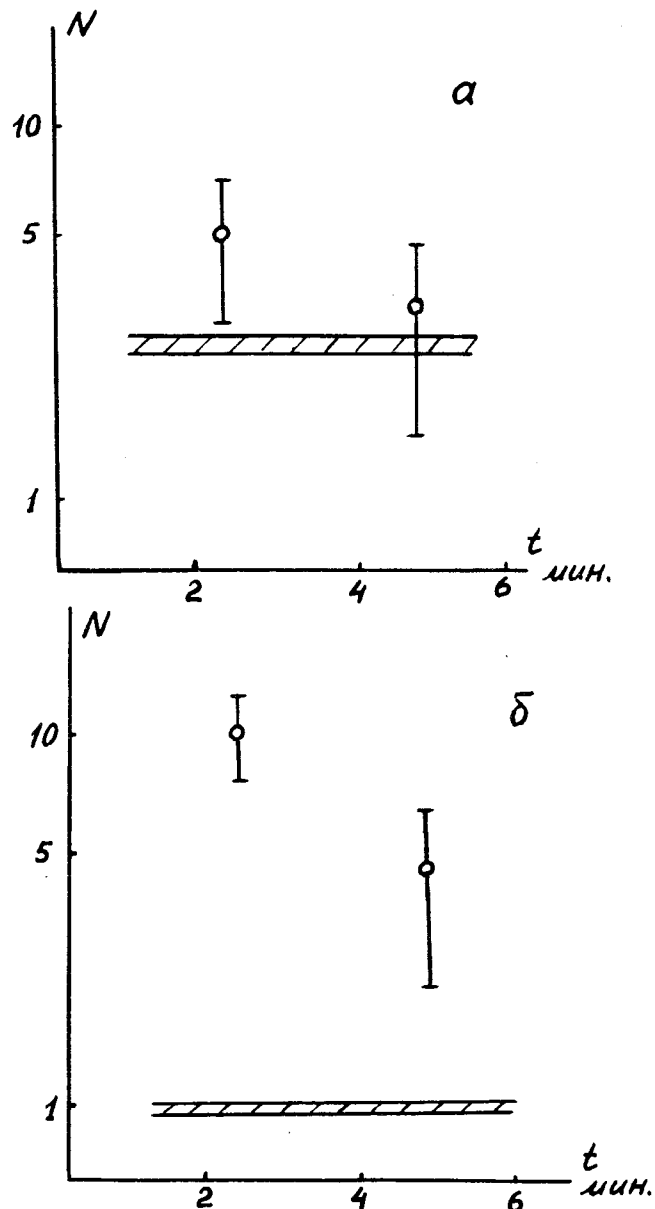


Рис. 2. Зависимость числа треков от времени при облучении ^{238}U нейтронами: а/ с энергией 14,7 МэВ; б/ из реакции $^9\text{Be} + d$, ширина горизонтальной линии означает ошибку в определении фона.

Видно, что при облучении нейтронами с энергией 14,7 МэВ /интенсивность нейтронов, падающих на урановую мишень, составляла $2 \cdot 10^9 \text{ н/сек.см}^2$ / наблюдаемый выход осколков в пределах ошибок совпадает с уровнем фона. В то же время в случае нейтронов из реакции $^9\text{Be} + d$, имеющих большую энергию /до 23 МэВ/ и большую интенсивность / $2 \cdot 10^{11} \text{ н/сек.см}^2$ с энергией выше 6 МэВ/, наблюдается заметное превышение над фоном, причем распределение осколков по времени соответствует периоду полураспада $1,8 \pm 0,6 \text{ мин}$, что согласуется с известным значением для изотопа ^{238}Pa /2,3 мин/. Отношение числа осколков запаздывающего и мгновенного деления /с учетом эффективности регистрации, а также накопления и распада активности ^{238}Pa / $- N_{\beta f} / N_f$, полученное из этого отношения сечение, связанное с запаздывающим делением $^{238}\text{Pa} - \sigma_{\beta f}$, вероятность запаздывающего деления /отношение этого сечения к сечению образования ^{238}Pa / - P_f представлены в таблице.

Таблица

Энергия нейтронов	$\frac{N_{\beta f}}{N_f}$	$\sigma_{\beta f}$	P_f
14,7 МэВ	$< 10^{-9}$	$< 10^{-33} \text{ см}^2$	$< 6 \cdot 10^{-7}$
6-23 МэВ	10^{-10}	$1,5 \cdot 10^{-34} \text{ см}^2$	$5 \cdot 10^{-8}$

Сечение реакции $^{238}\text{U}(n,p)^{238}\text{Pa}$ при энергии нейтронов 14,7 МэВ известно из опыта /7/ и составляет $1,5 \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$. Для нейтронов в диапазоне энергий 6-23 МэВ среднее сечение указанной реакции / $3 \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$ / было оценено из формы спектра нейтронов в реакции $^9\text{Be} + d$ и из известной зависимости от энергии нейтронов сечения реакции (n, p) на тяжелых ядрах /3/.

Вероятность запаздывающего деления определяется двумя факторами: вероятностью заселения при β -распаде высоколежащих уровней дочернего ядра и делительной шириной этих уровней:

$$P_f = \frac{\int_0^{E_0} w_\beta(E_0 - E) \frac{\Gamma_f(E)}{\Gamma_t(E)} dE}{\int_0^{E_0} w_\beta(E_0 - E) dE}, \quad /1/$$

где $w_\beta(E_0 - E)$ - вероятность β -перехода с энергией $E_0 - E$; E_0 - полная энергия β -распада /разность масс начального и конечного ядер/; E - энергия возбуждения дочернего ядра, $\Gamma_f(E)$ и $\Gamma_t(E)$ - соответственно делительная и полная ширины дочернего ядра при энергии возбуждения E .

Вероятность заселения уровней с энергией возбуждения E в интервале энергий dE в случае разрешенных β -переходов определяется выражением:

$$w_\beta(E_0 - E) dE = \frac{G^2}{2\pi^3} |M|^2 \rho(E) F(Z, E_0 - E) dE, \quad /2/$$

где G - универсальная постоянная β -распада, M - матричный элемент β -перехода, $\rho(E)$ - плотность уровней при энергии возбуждения E , $F(Z, E_0 - E)$ - функция β -распада, определяющая зависимость вероятности β -перехода от его энергии и атомного номера ядра.

Чтобы из измеренной на опыте вероятности запаздывающего деления получить значения делительных ширин для уровней, заселяемых при β -распаде, нужно знать зависимость w_β от энергии β -перехода. Можно предполагать, что для энергий возбуждения 2,5-4,0 МэВ, как и в более легких ядрах, выполняется условие:

$$|M|^2 \rho(E) = \text{const}. \quad /3/$$

В этом случае зависимость w_β от энергии определяется поведением функции β -распада $F(Z, E_0 - E)$. Функция $F(Z, E_0 - E)$ быстро падает с ростом энергии возбуждения /как $(E_0 - E)^{5/7}$ /, в то время как делительная ширина обнаруживает обратную зависимость:

$$\Gamma_f = \frac{\exp\left\{-\frac{(E - E_f)2\pi}{\hbar\omega}\right\}}{2\pi\rho(E)}. \quad /4/$$

Поэтому запаздывающее деление связано с узкой областью энергий возбуждения дочернего ядра /для высоких уровней мала вероятность заселения при β -распаде, а низкие уровни имеют малую делительную ширину/. В случае β -распада ^{238}Pa эта область энергий возбуждения в дочернем ядре ^{238}U расположена при энергии 3,0-3,5 МэВ и характеризуется значением $P_f = 10^{-5} - 10^{-6}$.

В этой области энергий измерена вероятность деления ^{238}U при поглощении γ -квантов^{/5,6/}. Полученные значения P_f близки к приведенным выше. Предполагается, что при такой низкой энергии возбуждения более вероятным оказывается не мгновенное, а изомерное деление^{/4/} /рис. 3/. В результате перехода через внутренний барьер и каскада γ -квантов ядро оказывается в изомерном состоянии /на дне второго минимума/, откуда и испытывает спонтанное деление.

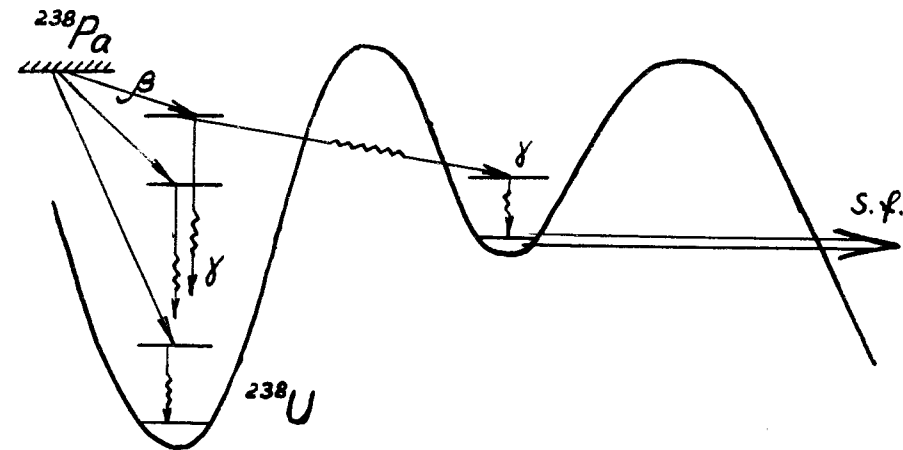


Рис. 3. Схема β - и γ -переходов, приводящих к запаздывающему делению.

В заключение авторы благодарят академика Г.Н.Флорова за постоянный интерес к работе, Ю.Ц.Оганесяна за полезные обсуждения, С.П.Третьякову и сотрудников ее группы за просмотр диэлектрических детекторов,

эксплуатационную группу циклотрона У-200, обеспечившую бесперебойную работу ускорителя, и Ю.А.Лазарева, принимавшего участие в начальном этапе работы.

Литература

1. В.И.Кузнецов, Н.К.Скобелев, Г.Н.Флеров. *ЯФ*, 5, 221 /1967/.
2. Н.К.Скобелев. *ЯФ*, 15, 444 /1972/.
3. А.И.Алиев, В.И.Дрынкин, Д.И.Лейпунская, В.А.Касаткин. *Ядерно-физические константы для нейтронного активационного анализа*. М., Атомиздат, 1969.
4. С.Д. Bowman. *Phys.Rev.*, C12, 855 /1975/.
5. С.Д. Bowman, I.G.Schroder, С.Е. Dick, Н.Е. Jackson. *Phys.Rev.*, C12, 863 /1975/.
6. В.Е.Жучко, Л.В.Игнатюк и др. *Письма в ЖЭТФ*, 22, 255 /1975/.
7. N.Trautman, E.Denig, N.Kaffrell, G.Herrmann. *Z.Naturforsch.*, 23a, 2127 /1968/.

*Рукопись поступила в издательский отдел
19 мая 1976 года.*