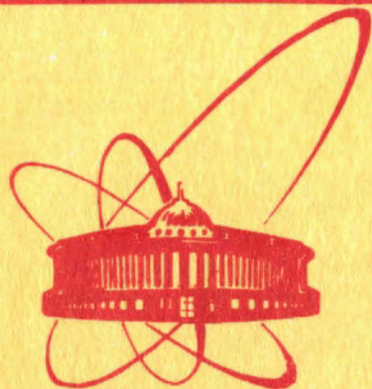


2717/2-80

23/vi-80



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P6-80-153

Ю.П.Гангровский, М.Б.Миллер, Л.В.Михайлов,
И.Ф.Харисов

ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР, ЭМИССИЯ НЕЙТРОНОВ
И ВОЗБУЖДЕНИЕ ИЗОМЕРНЫХ СОСТОЯНИЙ
ПОД ДЕЙСТВИЕМ β - и γ -ИЗЛУЧЕНИЯ,
ИСПУСКАЕМОГО ПРИ РАДИОАКТИВНОМ РАСПАДЕ

*Направлено на XXX Собрание по ядерной
спектроскопии и структуре атомного ядра
и в Известия АН СССР /серия физическая/.*

1980

При исследовании редких процессов (например, возбуждение изомерных состояний необычной природы, деление ядер после β -распада и т.д.) требуется тщательный анализ явлений, имитирующих исследуемый эффект. Одно из таких явлений отмечалось в работе [1] при изучении запаздывающего деления нейтронодефицитных изотопов актиноидных элементов. Наблюдалось деление ядер урана под действием β - и γ -излучения, испускаемого при радиоактивном распаде изотопов, образующихся в реакциях с тяжелыми ионами наряду с исследуемыми ядрами. В данной работе это явление, а также подобные ему (эмиссия нейтронов и возбуждение изомерных состояний), исследованы более подробно. Целью работы было измерение сечений указанных процессов при использовании ряда радиоактивных источников с разными энергиями β - и γ -излучения.

В опытах использовались изотопы ^{60}Cu , ^{62}Cu , ^{66}Ga и ^{74}Br , получаемые в реакциях с α -частицами и тяжелыми ионами на изохронном циклотроне У-200, а также с γ -квантами на микротроне МТ-17. Все эти изотопы распадаются путем испускания позитронов или захвата орбитальных электронов и имеют сложный спектр β - и γ -излучения (несколько десятков γ -линий с энергиями вплоть до 5 МэВ). Реакции получения этих изотопов и характеристики их распада - периоды полураспада ($T_{1/2}$), полные энергии β -распада (Q_{β}), энергии и интенсивности наиболее жестких ветвей β -излучения (E_{β}, I_{β}) и γ -линий (E_{γ}, I_{γ}) - представлены в таблице 1. При облучениях использовались толстые мишени; выход указанных изотопов определялся по интенсивности известных γ -линий. Активности полученных источников составляли 1-10 мКюри.

Под действием β - и γ -излучения из этих источников исследовались деление ^{238}U , эмиссия нейтронов из ^9Be

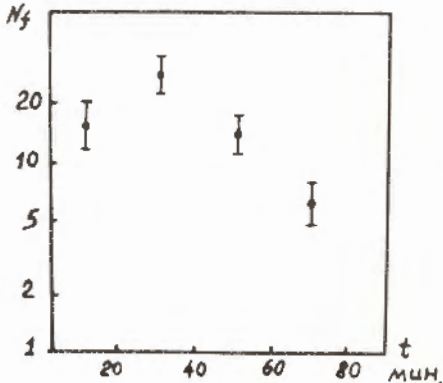
Таблица 1

Реакции получения и характеристики распада изотопов

Изотоп	Реакция получения	$T_{1/2}$	Q_{β} МэВ	E_{β} МэВ	I_{β} %	E_{γ} МэВ	I_{γ} %
^{60}Cu	$^{58}\text{Ni}(\alpha, 2n)$	23 мин.	6,128	3,796 2,969	5,2 15	5,048 4,843	0,002 0,10
^{62}Cu	$^{63}\text{Cu}(\gamma, n)$	10 мин.	3,910	2,910	98	3,860 3,370	0,0003 0,008
^{66}Ga	$^{63}\text{Cu}(\alpha, n)$	9,4 ч	5,175	4,153	50	4,807	1,5
	$^{65}\text{Cu}(\alpha, 3n)$					4,462	0,7
^{74}Br	$^{65}\text{Cu}(^{14}\text{N}, 5n)^{74}\text{Kr}$	25 мин.	6,918	5,084	3,2	4,649	0,6
	$^{74}\text{Kr} \xrightarrow{\beta^+} ^{74}\text{Br}$			4,649	7,7	4,379	6,5

и возбуждение изомерного состояния в ^{115}In ($T_{1/2} = 4,5$ час, $E = 335$ кэВ, $I^{\pi} = 9/2^+$). Для этого образцы указанных изотопов располагались в непосредственной близости к источникам и измерялось исследуемое излучение образцов.

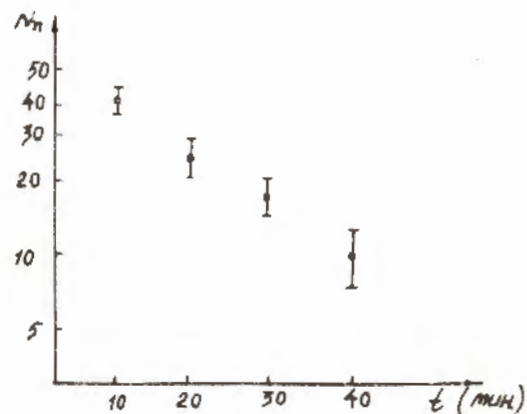
В случае деления ^{238}U использовался набор фольг (толщиной 20 мкм) из урана естественного изотопного состава, переложенных пленками из лавсана (толщиной 15 мкм), которые служили детекторами осколков. После стандартной обработки пленки визуально просматривались с помощью оптического микроскопа. Зависимость от времени измеренного таким образом числа треков на пленках для источника ^{74}Br представлена на рис. 1. Видно, что эта зависимость соответствует накоплению и распаду изотопа ^{74}Br и объясняет причину появления осколков деления. Опыты со слоями урана, обогащенными изотопом ^{235}U , показали, что в образцах естественного изотопного состава деление под действием γ - и β -излучения испытывает изотоп ^{238}U . Эти опыты также исключают деление под действием нейтронов, которые могли бы возникать при расщеплении дейтерия γ -квантами

Рис. 1. Зависимость числа N_f осколков деления (N_f) ^{238}U от времени (t) для источника ^{74}Br .

сравнительно низких энергий (дейтерий содержался в следах воды, используемой для охлаждения мишеней во время облучений).

Нейтроны, испускаемые при облучении γ - и β -излучением ^9Be (пластина толщиной 1 см), регистрировались борным счетчиком типа СМ-14, помещенным в блок из парафина. На рис. 2 представлена зависимость выхода нейтронов от времени для источника ^{62}Cu . Падение выхода с изменением времени соответствует периоду полураспада изотопа ^{62}Cu .

Выход ядер ^{115}In в изомерном состоянии определялся по интенсивности γ -линии с энергией 335 кэВ, испускаемой при распаде изомера. Для этого измерялся спектр

Рис. 2. Зависимость числа нейтронов (N_n) от времени (t) для источника ^{62}Cu .

γ -излучения образца индия толщиной 1 мм после облучения его β - и γ -излучением источника. В спектре γ -излучения наблюдалась γ -линия с энергией 335 кэВ, и изменение ее интенсивности соответствовало периоду полураспада изомера ^{115}In .

Измеренные выходы исследуемого излучения (осколков деления, нейтронов или γ -лучей) и интенсивности используемых источников позволяют определить сечения рассмотренных выше процессов взаимодействия β - и γ -излучения с ядрами. Эти сечения представлены в табл. 2. Они отнесены к полному числу распадов источника и поэтому имеют формальное значение, т.к. лишь небольшая часть спектра β - или γ -излучения вызывает наблюдаемый эффект. Полученные таким образом значения сечений могут использоваться для сравнения между собой, а также с другими данными [2-4], обработанными подобным же образом.

Из представленных в табл. 2 данных видно, что сечения наблюдаемых процессов растут с увеличением полной энергии β -распада, используемого для облучения изотопа. Известные ранее случаи возбуждения изомерных состояний β - и γ -излучением более низких энергий (при использовании источников ^{60}Co , ^{64}Cu , ^{22}Na) характеризуются значительно меньшими сечениями (как правило, не более 10^{-31} см²) [2-6].

Таблица 2
Сечения наблюдаемых явлений

Изотоп	Сечение, см ²		
	Деление ^{238}U	Возбуждение изомера ^{115}In	Эмиссия нейтрона из ^9Be
^{60}Cu	10^{-32}		
^{62}Cu	$< 10^{-35}$	$< 6 \cdot 10^{-30}$	$3 \cdot 10^{-30}$
^{66}Ga	10^{-34}	10^{-28}	
^{74}Br	$2 \cdot 10^{-31}$		

Наблюдаемые эффекты могут быть связаны с возбуждением ядра при поглощении γ -квантов, а также при передаче энергии ядру в результате бесфотонной аннигиляции позитронов на k -электронах атома [7,8]. Источником γ -излучения является радиоактивный распад ядер и взаимодействие позитронов с веществом (их торможение и аннигиляция). В последнем случае из-за непрерывного спектра позитронов γ -излучение также имеет непрерывный спектр с граничной энергией, определяемой процессом аннигиляции позитронов на лету:

$$E_{\gamma \text{ max}} = E_n + 2m_0 c^2 - E_{\text{св}}, \quad (1)$$

где E_n - кинетическая энергия позитрона, m_0 - масса покоя электрона (или позитрона), c - скорость света, $E_{\text{св}}$ - энергия связи электрона в атоме.

Сечение фотовозбуждения уровня ядра с энергией E_0 , полной шириной Γ_0 и парциальной для перехода в основное состояние Γ_1 γ -квантом с энергией E_γ определяется выражением:

$$\sigma = \frac{2I_f + 1}{2I_i + 1} \frac{\lambda^2}{8\pi} \frac{\Gamma_1}{(E_0 - E_\gamma)^2 + (\Gamma/2)^2}, \quad (2)$$

где I_i и I_f - спины основного и возбужденного состояний, λ - длина волны γ -излучения. В непрерывном спектре γ -излучения всегда имеются γ -кванты, энергия которых совпадает с энергией любого из уровней возбуждаемого ядра. Поэтому для целого ряда уровней сечения могут достигать больших величин. Однако из-за малого числа γ -квантов с энергией, близкой к энергии уровня, сечения, отнесенные к полному числу γ -квантов, оказываются во много раз меньше (того же порядка величины, что и приведенные в табл. 2 или в работах [2-4]).

В случае дискретного γ -излучения, испускаемого при радиоактивном распаде, сечение фотопоглощения имеет заметную величину лишь для резонанса (при случайном совпадении энергий γ -кванта и одного из уровней ядра). Вероятность такого совпадения, как правило, очень мала. Однако она может иметь заметную величину при большой

энергии β -распада. При испускании из ядра (с А=50-70) позитрона и нейтрино с энергией в несколько МэВ, последнее имеет энергию отдачи в несколько десятков эВ. Такой же разброс по энергии имеют и γ -кванты, испускаемые с уровней, у которых время жизни меньше времени торможения ядра отдачи ($\sim 10^{-12}$ с). Эта величина сравнима со средним расстоянием между уровнями тяжелого ядра, которое составляет 10^2-10^3 эВ при энергии возбуждения 4-5 МэВ. Таким образом, энергетический разброс дискретных γ -квантов делает возможным резонансное поглощение, хотя и приводит к заметному уменьшению его сечения (в отношении ширины возбуждаемого уровня к энергетическому разбросу).

Необходимо отметить, что рассеяние дискретных γ -квантов (в мишени, подложке, облучаемом материале) вносит значительный вклад в непрерывный спектр и увеличивает эффективное сечение возбуждения уровней ядра.

Процесс бесфотонной аннигиляции позитронов также имеет резонансный характер. Однако из-за непрерывного спектра позитронов он приводит к возбуждению широкого спектра уровней облучаемого ядра.

Увеличение числа возбуждаемых уровней, по-видимому, является основной причиной роста сечений наблюдаемых явлений (деления, возбуждения изомеров) с повышением энергии β -распада. Дальнейшее исследование этих явлений позволит получить сведения о ширинах возбуждаемых уровней.

В заключение авторы выражают благодарность Г.Н.Флерову и Ю.И.Оганесяну за постоянный интерес к работе, С.П.Третьяковой и сотрудникам ее группы за просмотр диэлектрических детекторов, Ю.Б.Буряченко - за помощь в измерениях, а также эксплуатационной группе циклотрона У-200 - за обеспечение бесперебойной работы ускорителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гангрский Ю.П. и др. ОИЯИ, Р7-12584, Дубна, 1979.
2. Вереш Л., Ождын М., ЯФ, 1966, т.3, с.788.
3. Booth E.C., Brownson J. Nucl.Phys., 1967, А98, p.529.

4. Запаров Э.А., Мазитов Б.С., Хусайнов Ю.А. В кн. "Исследования по ядерной и теоретической физике", Изд. ФАН, Ташкент, 1969, с. 35.
5. Watanaba Y., Mukoyama T., Shimuzu S. Phys.Rev., 1979, v. C19, p.32.
6. Вишневский И.Н. и др. Изв. АН СССР, сер.физ., 1979, т.43, с.2142.
7. Present R.D., Chen S.C. Phys. Rev., 1952, v.85, p.44.
8. Гречухин Д.П., Солдатов А.А. ЖЭТФ, 1978, т.74,с.13.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 февраля 1980 года.