

Г-19

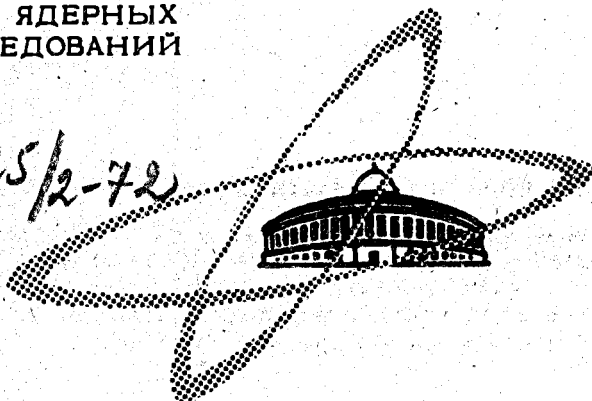
ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

1025/2-72

3/iv-72

Ат. энергия, 1972, т. 33, в. 4, с. 829-833



P7 - 6286

Ю.П.Гангрский, Нгуен Конг Кхань,
Д.Д.Пулатов

ПОЛУЧЕНИЕ
СПОНТАННО ДЕЛЯЩИХСЯ ИЗОМЕРОВ
С НАНОСЕКУНДНЫМИ ВРЕМЕНАМИ ЖИЗНИ
В РЕАКЦИЯХ С α -ЧАСТИЦАМИ

1972

ИЗДАТЕЛЬСТВО АТОМЭНЕРГЕТИКИ

P7 - 6286

Ю.П.Гангрский, Нгуен Конг Кхань,

Д.Д.Пулатов

**ПОЛУЧЕНИЕ
СПОНТАННО ДЕЛЯЩИХСЯ ИЗОМЕРОВ
С НАНОСЕКУНДНЫМИ ВРЕМЕНАМИ ЖИЗНИ
В РЕАКЦИЯХ С α -ЧАСТИЦАМИ**

Направлено в АЭ

СОБОЛЕВСКИЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БИБЛИОТЕКА

В в е д е н и е

В ряде ядер актиноидных элементов наблюдаются изомерные состояния с периодами полураспада 10^{-9} - 10^{-2} сек, распадающиеся в основном путем спонтанного деления /1-4/. Необычные свойства этих состояний (малый спин и высокая энергия возбуждения, резкое увеличение вероятности спонтанного деления, корреляция процессов образования изомеров и вынужденного деления) указывают на их связь со сложной структурой барьера деления.

Из проведенных в последнее время расчетов /5,6/ следует, что зависимость потенциальной энергии ядра от деформации не описывается простой параболой, и реальный барьер деления имеет минимум в районе седловой точки. В ряде ядер этот минимум достаточно глубокий, и в нем имеется целая система уровней, нижний из которых является изомерным (барьер, разделяющий первую и вторую потенциальные ямы, является причиной запрета для γ -излучения с изомерного уровня). Поэтому исследование спонтанно делящихся изомеров позволяет получить ряд сведений о форме барьера деления и свойствах ядер при аномально больших деформациях.

Целью данной работы является определение области распространения спонтанно делящихся изомеров и измерение сечений образования

Глигрский Ю.П., Нгуен Конг Кхань, Пулатов Д.Д.

P7-6286

Получение спонтанно делящихся изомеров с наносекундными временами жизни в реакциях с α - частицами

Облучались мишени из изомеров тория, урана и америция α - частицами. Получены спонтанно делящиеся изомеры плутония, кюрия и берклия с временами жизни 10^{-9} - 10^{-7} сек. Использовалась методика измерения времени пролета ядер отдачи. Полученные результаты обсуждаются на основе модели двугорбого барьера деления.

Препринт Объединенного института ядерных исследований.
Дубна, 1972

Gangrsky Yu.P., Nguyen Cong Khanh, Pulatov.D.D.

P7-6286

Production of Spontaneously Fissioning Isomers,
with Nanosecond Half-Life, in the α -Particle
Reactions

The targets of thorium, uranium, plutonium and americium were irradiated with α -particles on the isochronous cyclotron of the Laboratory of Nuclear Reactions of the Joint Institute for Nuclear Research. The spontaneously fissioning isomers of plutonium, curium and berkelium with a half-life of 10^{-9} - 10^{-7} sec. were produced. The time-of-flight method was used. The obtained data are discussed on the basis of the model of the two-humped fission barrier.

Preprint. Joint Institute for Nuclear Research.

Dubna, 1972

этих состояний в реакциях с α -частицами в широкой области A и Z . Реакции с α -частицами протекают преимущественно через образование составного ядра, что существенно упрощает идентификацию продуктов реакции и интерпретацию полученных результатов.

Методика эксперимента

Опыты были проведены на изохронном циклотроне У-200 Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. Энергия ускоренных в циклотроне α -частиц составила 36 Мэв. Снижение ее производилось с помощью алюминиевых поглотителей.

Для определения периодов полураспада спонтанно делящихся изомеров использовалась методика измерения времени пролета ядер отдачи /7/. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Коллимированный пучок α -частиц попадает на мишень, выбитые ядра отдачи, пролетев некоторое расстояние, зависящее от времени жизни изомерного состояния, распадаются на два осколка, один из которых регистрируется диэлектрическим детектором. Взаимное расположение мишени и детектора было таким, чтобы исключить попадание на детектор осколков вынужденного деления из мишени. В качестве диэлектрического детектора использовалась слюда-мусковит. После облучения она протравливалась в концентрированной кислоте (плавиковой) в течение 2-3 часов при температуре 18°C и просматривалась при помощи оптического микроскопа. Из радиального распределения треков на слюде можно оценить период полураспада образующегося в реакции спонтанно делящегося изомера. На рис. 2 представлены радиальные распределения треков, рассчитанные для различных периодов полураспада и измеренные на опыте для изомеров ^{240}Pu и ^{243}Cm . Видно, что точность измерений невелика, особенно для периодов полураспада более 50 нсек. Для более точного измерения периода полураспада (это делалось обычно в слу-

чае не известных ранее изомеров) измерялись также углы падения осколков на слюду. По величине угла и координате трека можно определить расстояние, а, следовательно, и время, которое пролетает ядро отдачи до распада.

Осколки деления оставляли треки на слюде, если ядро отдачи делилось на расстоянии более 1 мм от мишени. Это позволило измерять периоды полураспада до 0,5 нсек с достаточно высокой эффективностью (более 5%). Данная методика особенно удобна для наблюдения короткоживущих спонтанно делящихся изомеров, т.к. фон от долгоживущих излучателей осколков практически отсутствует (распад ядер отдачи происходил достаточно далеко от детекторов).

Основным источником фона было деление содержащегося в слюде урана под действием нейтронов, которые возникали при взаимодействии α -частиц с коллиматором, поглотителями и мишенью. При выборе слюды с низким содержанием урана ($< 10^{-6}\%$) можно было измерять сечения реакций до 10^{-33} см².

Интенсивность пучка α -частиц определялась цилиндром Фарадея. Кроме того, измерялся выход осколков мгновенного деления из мишени при помощи диэлектрического детектора (силикатного стекла), находящегося вблизи цилиндра Фарадея.

Определение сечений реакций

На опыте измерялось отношение числа осколков на детекторах запаздывающего и мгновенного деления. Чтобы из этого отношения получить отношение сечений образования изомера (σ_i) и мгновенного деления (σ_f), необходимо учесть эффективность регистрации осколков и эффективную толщину мишени.

Эффективность регистрации осколков мгновенного деления рассчитывалась из геометрии опыта. Вводилась поправка на анизотропию углового распределения. При запаздывающем делении эффективность регистрации зависит от периода полураспада. Эта зависимость, рассчитанная для использованных в данной работе диэлектрических детекторов (кольцо из слюды с внешним диаметром 60 мм и внутренним - 12 мм), представлена на рис. 3. Измеренное угловое распределение осколков запаздывающего деления оказалось изотропным в пределах ошибок эксперимента (15%), поэтому поправок на анизотропию в этом случае не вводилось.

В опытах использовались мишени толщиной $0,2 - 0,4 \frac{\text{мг}}{\text{см}^2}$, что меньше пробега осколков и больше пробега ядер отдачи. Поэтому осколки мгновенного деления вылетали со всей толщины мишени, а ядра отдачи - лишь с поверхностного слоя. Толщину этого слоя можно получить из расчетов пробега тяжелых ядер в веществе /8/. Однако реальная толщина слоя, из которого вылетают ядра отдачи, как правило, меньше расчетной из-за загрязнений поверхности мишени. Для определения эффективной толщины слоя измерялся выход ядер отдачи ^{236}Pu и ^{240}Cm в реакциях $^{235}\text{U}(a, 3n)$ и $^{239}\text{Pu}(a, 3n)$, сечения которых известны /9,12/. Измерения показали, что реальная толщина слоя, из которого вылетают ядра отдачи ^{236}Pu и ^{240}Cm , составляет 30% от расчетной. Эта полученная на опыте эффективная толщина мишени использовалась для определения отношения σ_i / σ_j . Ошибка в измерении отношения сечений составляла 50% и была в основном связана с неопределенностью эффективной толщины мишени.

Поскольку в реакциях с α -частицами сечение мгновенного деления практически совпадает с сечением образования составного ядра, то отношение σ_i / σ_j представляет собой вероятность реакции с испарением данного числа нейтронов. В статистической теории ядра эта вероятность описывается выражением /10/:

$$P(E, n) = I(\Delta_n, 2n - 3) - I(\Delta_{n+1}, 2n - 1)$$

$$\Delta_n = \frac{E - \sum_i B_i}{T}, \quad (1)$$

где $I(\Delta_n, 2n - 3)$ - неполная Γ -функция, E - энергия возбуждения, n - число испущенных нейтронов, B_i - энергия связи нейтрона, T - ядерная температура. Рассчитанная по этой формуле зависимость вероятности реакции от энергии имеет вид кривой Гаусса, положение максимума которой зависит от числа испущенных нейтронов. На опыте нередко наблюдаются отклонения от теоретической кривой. Однако эти отклонения не столь велики, чтобы помешать идентификации продуктов реакции, если число испущенных нейтронов мало (2-3). Поэтому через экспериментальные точки проводилась рассчитанная по формуле (1) кривая, и положение максимума позволяло определить число испущенных нейтронов, а, следовательно, и полученный в реакции изотоп.

Результаты эксперимента

Изотопы урана. Известны лишь два спонтанно делящихся изомера урана - ^{236}U и ^{238}U с периодами полураспада соответственно 100 и 250 нсек /4/. При облучении мишени ^{232}Th α -частицами с энергиями 22-36 Мэв могут получаться спонтанно делящиеся изомеры в изотопах урана с массовыми числами 232-234. Отсутствие треков на детекторах осколков запаздывающего деления соответствует верхней границе сечения образования этих изомеров урана 10^{-32} см², что в 1000 раз ниже сечений реакций, приводящих к известным изомерам ^{236}U и ^{238}U . Это может означать, что в изотопах урана с $A = 232-234$ либо времена жизни изомерных состояний меньше 0,5 нсек, либо эти состояния распадаются путем γ -излучения.

Изотопы плутония. Для получения спонтанно делящихся изомеров плутония облучались мишени из изотопов ^{233}U , ^{235}U и ^{238}U . Для всех трех мишеней наблюдались спонтанно делящиеся изомеры с периодами полураспада соответственно 30, 70 и 5 нсек. Из положений максимумов функций возбуждения (рис. 4) можно видеть, что для всех мишеней имеет место реакция $(\alpha, 2n)$, и, следовательно, образуются известные спонтанно делящиеся изомеры ^{235}Pu , ^{237}Pu и ^{240}Pu /2,11/. В области больших энергий α -частиц (выше 30 Мэв) наблюдается заметное превышение измеренных отношений над рассчитанными по формуле (1). Это связано либо с вкладом прямых реакций, либо с образованием спонтанно делящихся изомеров в реакциях $(\alpha, 3n)$ или $(\alpha, 4n)$ с близкими периодами полураспада.

Изотопы кюрия. Спонтанно делящиеся изомеры кюрия с периодами полураспада 20 и 80 нсек были получены при облучении мишеней ^{239}Pu и ^{242}Pu . Измерение функции возбуждения позволило установить, что эти периоды полураспада относятся к известным спонтанно делящимся изомерам ^{241}Cm (20 нсек) и ^{243}Cm (80 нсек) /4,11/.

Изотопы берклия. Спонтанно делящиеся изомеры берклия практически еще не изучены. Известен лишь изомер ^{245}Bk ($T_{1/2} = 2$ нсек) и имеются указания на существование изомера с периодом полураспада ≈ 100 нсек /13/. При облучении мишеней из изотопов ^{241}Am и ^{243}Am при малых энергиях α -частиц (ниже 30 Мэв) наблюдались спонтанно делящиеся изомеры с периодами полураспада соответственно 5 нсек и 2 нсек. Если энергия α -частиц превышает 30 Мэв, то появляются более долгоживущие изомеры с периодами полураспада, превышающими 50 нсек. Из формы функций возбуждения (рис. 5) можно предполагать, что короткоживущие изомеры относятся к ^{243}Bk (5 нсек) и ^{245}Bk (2 нсек), а долгоживущие - к ^{242}Bk (≈ 50 нсек) и ^{244}Bk (≈ 100 нсек). По-видимому, для периодов полураспада спонтанно делящихся

ся изомеров берклия имеет место такая же систематика, как и для изомеров америция - нечетно-четные ядра имеют большие периоды полураспада /3/.

В таблице представлены измеренные отношения сечений образования изомера и мгновенного деления (σ_i / σ_f) для всех полученных в данной работе изомеров при энергии α -частиц, соответствующей максимуму функций возбуждения (E_α). Для изомеров плутония измеренные в данной работе отношения сечений в пределах ошибок совпадают с полученными в работе /11/. Поскольку сечения мгновенного деления известны, то из измеренных отношений можно получить сечения образования спонтанно делящихся изомеров. Для сравнения в таблице приведены также сечения образования основных состояний тех же ядер. Для большинства ядер эти сечения измерены /8, 12, 15/, для остальных были рассчитаны на основе известных сечений образования составного ядра и отношений нейтронных и делительных ширин.

Обсуждение результатов

В таблице приводятся также изомерные отношения (отношения сечений образования ядра в изомерном и основном состоянии). У изомеров плутония эти отношения практически такие же, как у известных долгоживущих изомеров америция /14/, у изотопов кюрия несколько меньше, а у изомеров берклия на порядок меньше. В то же время у изотопов одного и того же элемента изомерные отношения близки по величине.

В рамках модели двугорбого барьера из поведения изомерных отношений можно сделать ряд заключений о том, как меняется форма барьера деления с ростом Z . В этой модели предполагается двухступенчатый механизм заселения изомерного состояния (сначала достижение деформации, соответствующей седловой точке, а затем испускание

нейтрона) и сильное взаимодействие между коллективным и одно-
частичным движением нуклонов. Поэтому образование спонтанно деля-
щихся изомеров происходит при распаде составного ядра, находившегося
во второй потенциальной яме, т.е. имеющего деформацию седловой точ-
ки и энергию возбуждения, уменьшенную на энергию деформации. В этом
случае вероятность образования изомера будет пропорциональна времени
нахождения ядра при деформации, соответствующей второй яме, и плот-
ности уровней во второй яме ^{/16/}. Первая величина зависит от соотно-
шения высот внешнего и внутреннего барьеров (чем ниже внешний барь-
ер, тем быстрее проходит ядро через вторую потенциальную яму на пу-
ти к делению). Вторая величина определяется глубиной второй ямы.
Следовательно, наблюдаемое в данной работе уменьшение изомерных от-
ношений с ростом Z связано, по-видимому, с тем, что вторая потенци-
альная яма становится менее глубокой. Это может означать либо увели-
чение энергии изомерного состояния, либо уменьшение высоты второго
барьера.

В заключение авторы выражают благодарность Г.Н.Флерову за по-
стоянный интерес к работе, В.С.Алфееву за обеспечение бесперебойной
работы циклотрона У-200, К.И.Меркиной и А.И.Сергеевой - за просмотр
диэлектрических детекторов.

Литература

1. С.М.Поликанов, В.А.Друин и др. - ЖЭТФ 42, 1464 (1962).
2. V.Metag, R.Repov, P. von Brentano, J.D. Fox -
Zeitschrift für Physik, 226, 1 (1969).
3. N.L.Lark, G.Sletten, J.Pedersen, S.Bjørnholm. Nucl.
Phys. A139, 481 (1969).
4. S.M.Polikanov, G. Sletten. Nucl.Phys., A151, 656 (1970).
5. V.M.Strutinsky. Nucl.Phys., A95, 429 (1967).

6. Chin Fu Tsang, S.G.Nilsson. Nucl.Phys., A140, 275 (1970).
7. Ю.П.Гангрский, Б.Н.Марков и др. Письма в ЖЭТФ, IV ,429 (1966).
8. L.C.Northcliffe, R.F.Schilling. Nuclear Data Tables, A7, 233 (1970).
9. R.Vandenbosch, T.D.Thomas a.a. Phys.Rev., III, 1358 (1958).
10. J.D.Jackson. Can. Journ. Phys., 34, 767 (1956).
11. H.C.Britt, S.C.Burnett a.a. Phys.Rev. in press.
12. R.Glass, G.Seaborg a.a. Phys.Rev., 104, 434 (1956).
13. V.Metag, R.Repnow, P. von Brentano. Nucl.Phys., A165, 289 (1971).
14. J.Borggreen, Yu.P.Gangsky, G.Sletten, S.Bjørnholm. Phys.Lett., 25B, 402 (1967).
15. A.Chetham-Strode-UCRL-3322 (1956).
16. Х.Юнгклауссен. ЯФ 6, 83 (1968).

Рукопись поступила в издательский отдел
14 февраля 1972 года.

Т А Б Л И Ц А

сечения образования спонтанно делящихся изомеров в
реакциях с α -частицами

Изомер	$T_{1/2}$ нсек	Реакция	E_{α} МэВ	$\frac{\sigma}{\sigma_f} \times 10^{-6}$	σ_i мкбарн	σ_g мбарн	$\frac{\sigma_i}{\sigma_g} \times 10^{-4}$
^{235}Pu	30	$^{233}\text{U}(\alpha, 2n)$	26	3,2	1,6	7	2,3
^{237}Pu	70	$^{235}\text{U}(\alpha, 2n)$	25	6,5	2,9	15	1,9
^{240}Pu	5	$^{238}\text{U}(\alpha, 2n)$	24	65	20	48	4,2
^{241}Cm	20	$^{239}\text{Pu}(\alpha, 2n)$	26	2,5	0,8	12	0,67
^{243}Cm	80	$^{242}\text{Pu}(\alpha, 3n)$	32	2,5	1,5	20 ^x	0,75
^{243}Bk	5	$^{241}\text{Am}(\alpha, 2n)$	25	1,6	0,48	33 ^x	0,14
^{242}Bk	> 50	$^{241}\text{Am}(\alpha, 3n)$	35	0,2	0,16	6 ^x	0,27
^{245}Bk	2	$^{243}\text{Am}(\alpha, 2n)$	24	1,0	0,25	50	0,05
^{244}Bk	> 100	$^{243}\text{Am}(\alpha, 3n)$	34	0,25	0,20	18	0,11

x) Рассчитанные значения σ_g .

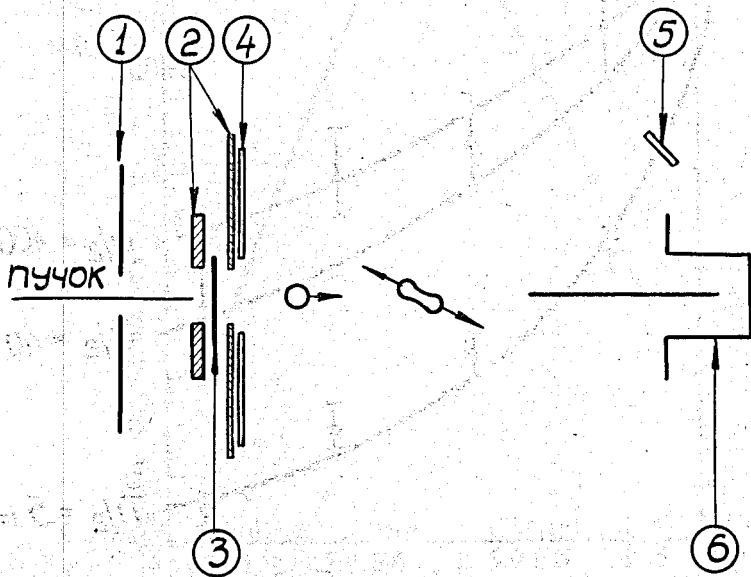


Рис. 1. Экспериментальная установка. 1 - коллиматор пучка α -частиц, 2 - держатель мишени, 3 - мишень, 4 - детектор осколков запаздывающего деления, 5 - детектор осколков мгновенного деления, 6 - цилиндр Фарадея.

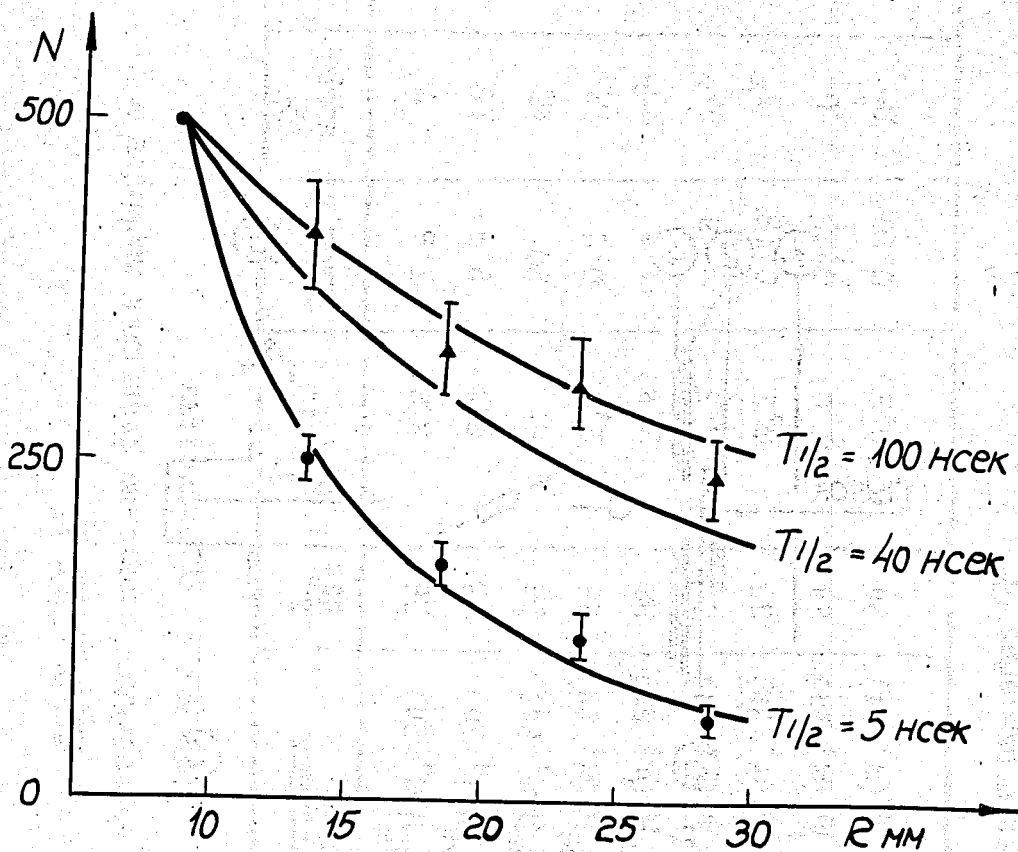


Рис. 2. Радиальное распределение треков на слюде. \blacktriangle - в реакции $^{242}\text{Pu}(\alpha, 3n)^{243}\text{Sm}$ \bullet - в реакции $^{238}\text{U}(\alpha, 2n)^{240}\text{Pu}$. Сплошные кривые рассчитаны из геометрии опыта для различных периодов полураспада.

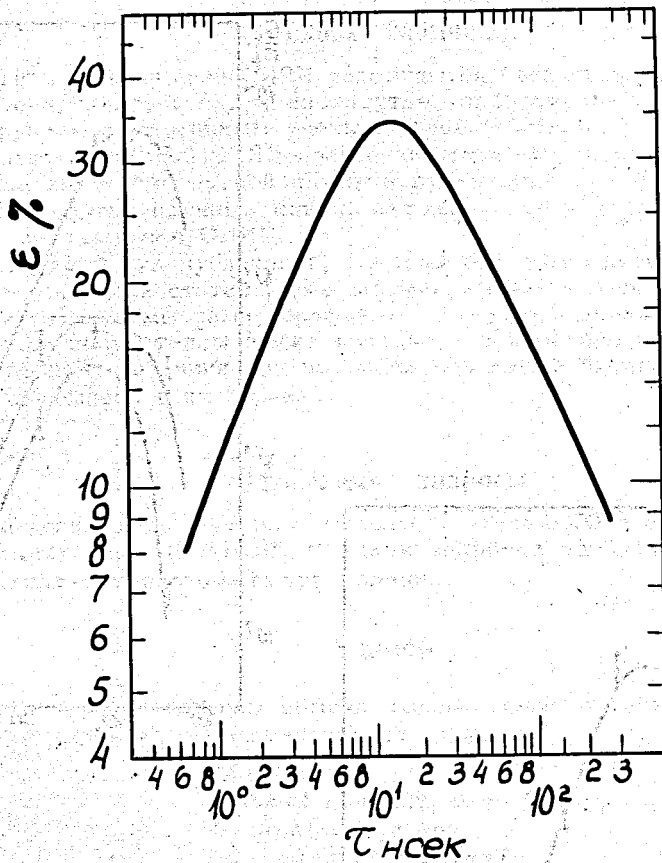


Рис. 3. Зависимость эффективности регистрации осколков запаздывающего деления (ϵ) от периода полураспада спонтанно делящегося изотопа (τ).

Рис. 4. Зависимость отношения сечений образования изомера (σ_i) и мгновенного деления (σ_f) от энергии α -частиц (E_α) в реакциях:
 • - $^{238}\text{U} + \alpha$, \blacktriangle - $^{235}\text{U} + \alpha$, \blacksquare - $^{233}\text{U} + \alpha$.

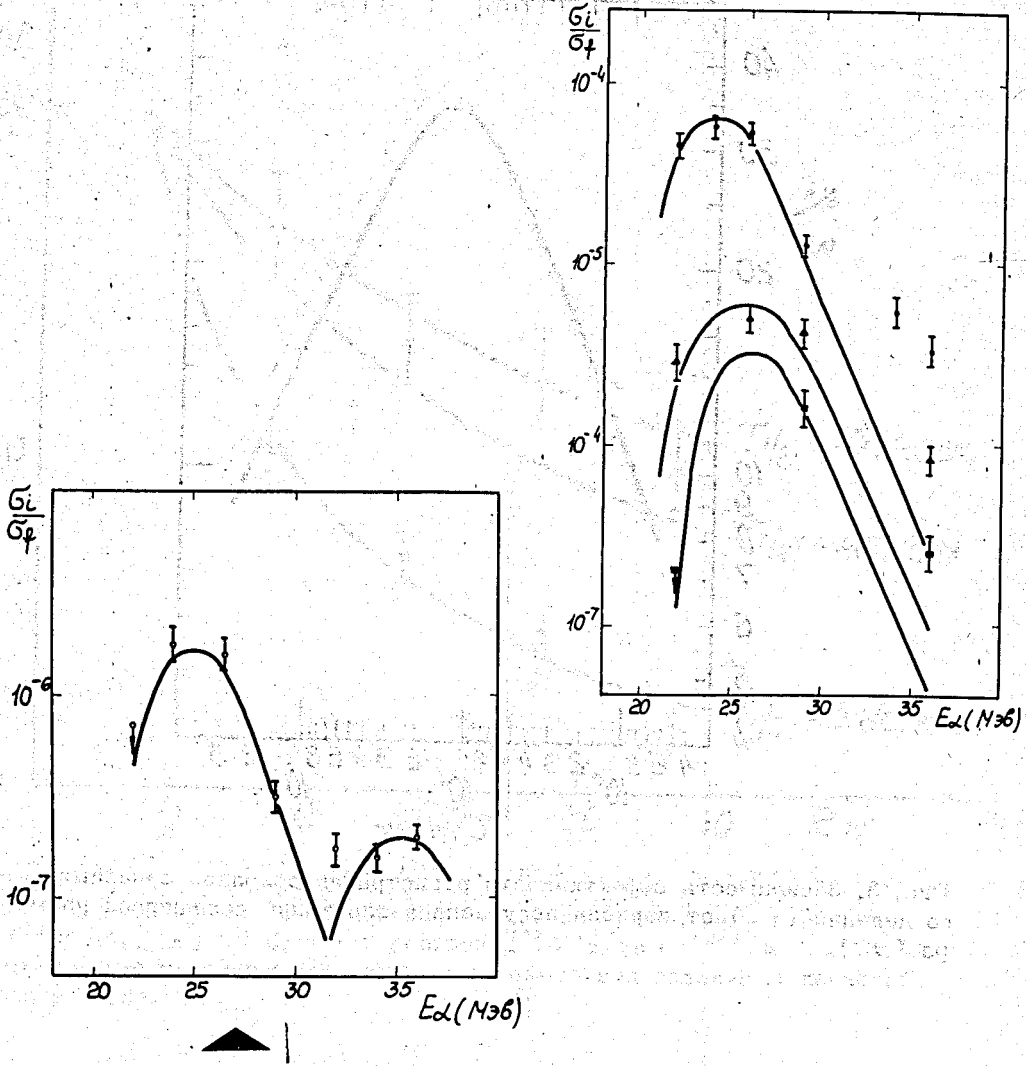


Рис. 5. Зависимость отношения сечений образования изомера и мгновенного деления от энергии α -частиц в реакции $^{241}\text{Am} + \alpha$.