

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

РЗ-86-197

Н.А.Гундорин, А.Дука-Зойоми, Я.Климан,  
Й.Криштиак

ИЗМЕРЕНИЕ МНОЖЕСТВЕННОСТИ  
И ПОЛНОЙ ЭНЕРГИИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ  
ПРИ ДЕЛЕНИИ U-235  
РЕЗОНАНСНЫМИ НЕЙТРОНАМИ

Направлено в журнал "Ядерная физика"

1986

## Введение

Как известно, деление ядра сопровождается эмиссией нейтронов и гамма-квантов. Спектроскопические исследования этих излучений позволяют получать сведения о распределении энергии в процессе деления, в том числе об энергии возбуждения осколков.

Гамма-кванты, испускаемые на стадии образования компаунд-системы и непосредственно в момент разлёта осколков, а также из нейтронно-избыточных ядер осколков после испарения последнего нейтрона в течение  $\tau < 10^{-9}$  с, принято считать мгновенными. Распад изомерных состояний осколков за время  $\tau \approx (10^{-9} + 10^{-3})$  с приводит к излучению гамма-квантов, называемых запаздывающими  $1/1$ . В интегральной форме мгновенное и запаздывающее гамма-излучения характеризуются полной энергией  $\bar{E}_\gamma$ , полным числом гамма-квантов, т.е. множественностью  $\bar{N}_\gamma$ , отнесенными к одному акту деления, и средней энергией на один испускаемый гамма-квант:  $\bar{E} = \bar{E}_\gamma / \bar{N}_\gamma$ . Эти интегральные характеристики представляют физический интерес как параметры процесса деления. Точные их значения требуются также при проведении расчетов для достижения оптимальных параметров ядерных установок.

Исследования гамма-эмиссии при делении  $U-235$  тепловыми нейтронами проводятся с 1955 года  $1/2$ . Результаты ряда работ показаны в таблице I, где для указанных интервалов энергий и длительностей временного окна  $\tau$  приведены значения множественности, полной и средней энергии. В этих работах погрешность определения интеграль-

Таблица I

$\Delta E_\gamma$ [МэВ]	$\tau$ [нс]	$\bar{N}_\gamma$ γ-квант/деление	$\bar{E}_\gamma$ МэВ/деление	$\bar{E}$ МэВ/γ-квант	ЛИТ.
0,09-10	10	6,51 ± 0,30	6,43 ± 0,30	0,99	14/
0,14-10	20	6,69 ± 0,30	6,51 ± 0,30	0,97	15/
0,14-10	69	7,45 ± 0,32	7,18 ± 0,26	0,96	16/
0,01-10,5	69	8,13 ± 0,35	7,25 ± 0,26	0,89	16/
0,03-10,4	70	8,10 ± 0,80	7,00 ± 0,70	0,90	14/
0,1-2,5	220	7,90 ± 0,10	9,50 ± 0,20	1,20	17/
0,03-10,4	275	8,60 ± 0,80	7,40 ± 0,70	0,86	14/

ных характеристик составляла (4-10)%. В работе /3/ проводился анализ известных данных и рекомендовалось использовать средние значения из трёх лучших измерений, а именно:  $N_{\gamma} = 6,89 \text{ г-кв/дел}$ ,  $E_{\gamma} = 6,71 \text{ МэВ/дел}$ ,  $E = 0,97 \text{ МэВ/г-квант}$ .

Из анализа упомянутых работ следует, что в области энергий (1,5 - 5) МэВ множественность и полная энергия измерены с погрешностью < 2%. Для гамма-квантов с энергией от 0,1 МэВ до 1,5 МэВ, где интенсивность спектра максимальна, а также выше 5 МэВ, погрешность измерений существенно больше, и требуется уточнение экспериментальных данных. Отсутствуют данные о множественности и полной энергии гамма-лучей деления  $U-235$  нейтронами в резонансной области энергий.

В Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ были проведены исследования гамма-лучей деления  $U-235$  при захвате резонансных нейтронов. С помощью  $Ge(Li)$ -спектрометра измерялся спектр гамма-излучения и были получены интегральные параметры в интервале энергий (0,1-1,6) МэВ.

#### Описание эксперимента

Измерение спектра гамма-квантов деления ядер резонансными нейтронами проводилось на импульсном реакторе ИБР-30. При работе в бустерном режиме с линейным ускорителем электронов длительность импульса нейтронов составляла 4 мкс, а частота повторения - 100 Гц. Спектрометрия нейтронов осуществлялась в интервале от 0,7 до 36 эВ с помощью техники времени пролёта на пролётной базе 60 м при плотности потока  $2 \cdot 10^3 \cdot E^{-0,9} \text{ н/см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{эВ}$ .

Коллимированный пучок нейтронов пропусклся через ионизационную камеру, содержащую 10 г изотопа  $U-235$  /8/, с эффективностью регистрации осколков  $\epsilon_{\gamma} \approx 70\%$ . Для спектрометрии сопутствующего делению гамма-излучения применялся полупроводниковый  $Ge(Li)$ -детектор объёмом  $\sim 30 \text{ см}^3$  с энергетическим разрешением 2,8 кэВ по линии 1333 кэВ,  $Co-60$ .

Для определения абсолютной эффективности спектрометра наряду со стандартным набором из 11-ти гамма-источников (ОСИ) использовались дополнительные источники с изотопами  $Ta-181$ ,  $Eu-152$ ,  $Ba-133$  и  $Ra-226$ . Использование линий мягкого гамма-излучения урана, содержащегося в камере, позволило оценить корректность учёта реальной геометрии эксперимента и увеличить точность калибровки. Поправка, учитывающая поглощение гамма-квантов в слоях мишени, вычислялась методом Монте-Карло с использованием известных коэффициентов погло-

щения /9/. Величина поправки и зависимость её от энергии показаны на рис. 1. Скачок при энергии 115 кэВ соответствует К-границе поглощения в уране. Рис. 2 характеризует абсолютную эффективность спектрометра с учётом поправки на поглощение.

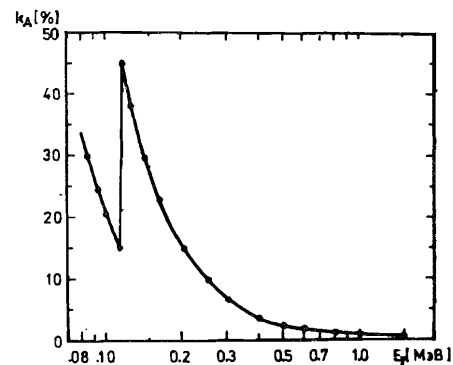


Рис. 1. Зависимость от энергии поправки на поглощение гамма-квантов в камере.

При измерениях детектор работал в режиме совпадений с камерой деления и регистрировал гамма-кванты с энергией от 80 кэВ до 1,75 МэВ. На рис.3 показан временной спектр совпадений для системы камера - гамма-детектор. Временное разрешение системы составляло 15 нс. При длительности окна регистрации 33 нс число совпадений достигало 60 в секунду, а уровень фона случайных совпадений составлял 0,9%.

В эксперименте использовалась методика многомерного анализа /10/. В трёх сериях измерений в указанном выше интервале энергий нейтронов было зарегистрировано  $1,5 \cdot 10^9$  делений, из них  $2 \cdot 10^7$  - в совпадении с гамма-квантами. Каждое событие характеризуется двумя параметрами: временем пролёта нейтрона, вызвавшего деление, и энергией сопутствующего делению гамма-кванта. Двухпараметрическая информация с помощью измерительного модуля на базе ЭВМ СМ-3 записывалась на магнитную ленту.

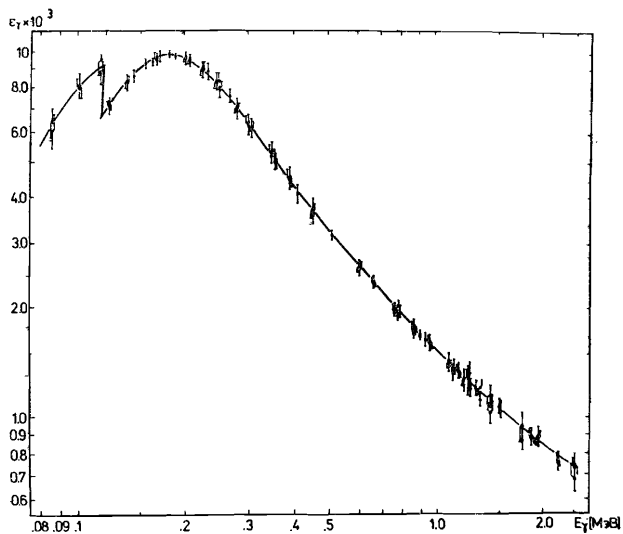


Рис. 2. Абсолютная эффективность гамма-спектрометра с учётом поправки на поглощение.

### Обработка экспериментальных данных

#### 1. Реконструкция гамма-спектра и вычисление интегральных параметров

По окончании эксперимента сортировка и математическая обработка данных проводилась на вычислительных машинах CDC-6500 и PDP-II/70. На рис. 4 показан аппаратный гамма-спектр, полученный в результате суммирования по всему интервалу энергий нейтронов (0,7 - 36) эВ. Видно, что спектр отличается высокой плотностью пиков и значительной величиной подложки. Последнее обстоятельство обусловлено неполным поглощением  $\gamma$ -квантов в детекторе, недостаточной разрешающей способностью детектора, не позволяющей разделить все гамма-линии, а также регистрацией гамма-квантов, рассеянных на конструкционных материалах. С целью получения искомым усреднённых параметров использовался метод взвешивания амплитуд импульсов, предложенный Майер-Лейбницем [11]. Весь энергетический интервал разбивался на 13 групп: от 0,1 МэВ до 0,2 МэВ - на 2 группы по 50 кэВ; от 0,2 МэВ до 1 МэВ - на 8 групп по 100 кэВ и от 1 МэВ до 1,6 МэВ - на 3 группы по 200 кэВ. С помощью моноэнергетических калибровочных источников и данных

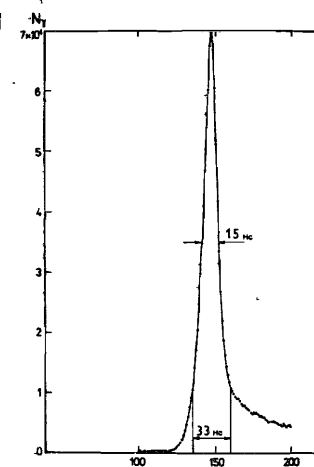


Рис. 3. Временной спектр совпадений для системы камера деления-гамма-детектор.

об абсолютной эффективности спектрометра определялись весовые коэффициенты  $g_N$  и  $g_E$ , соответственно, для множественности и полной энергии в каждой группе. Их зависимость от энергии показана на рис. 5. Эти коэффициенты позволяют перейти от экспериментальных данных к абсолютным значениям множественности  $\bar{N}_\gamma$ , полной энергии  $\bar{E}_\gamma$  и средней энергии на один квант  $\bar{E}$ , согласно выражениям

$$\bar{N}_\gamma = \sum_{i=1}^{13} N_i g_N^i / N_f; \bar{E}_\gamma = \sum_{i=1}^{13} N_i g_E^i / N_f; \bar{E} = \bar{E}_\gamma / \bar{N}_\gamma$$

Здесь  $N_i$  - число отсчётов в данной энергетической группе гамма-спектра, а  $N_f$  - число зарегистрированных делений.

#### 2. Анализ погрешностей

Статистическая обработка данных и анализ ошибок проводились с использованием метода максимального правдоподобия.

При вычислении множественности и полной энергии в суммарную ошибку, наряду со статистической погрешностью групповых сумм  $N_i$ , вносят вклад ошибки в определении весовых коэффициентов  $g_N^i, g_E^i$  и числа делений  $N_f$ . Поскольку численные значения групповых сумм превышают  $5 \cdot 10^4$ , их статистические погрешности не более 0,5% для всех трёх серий измерений.

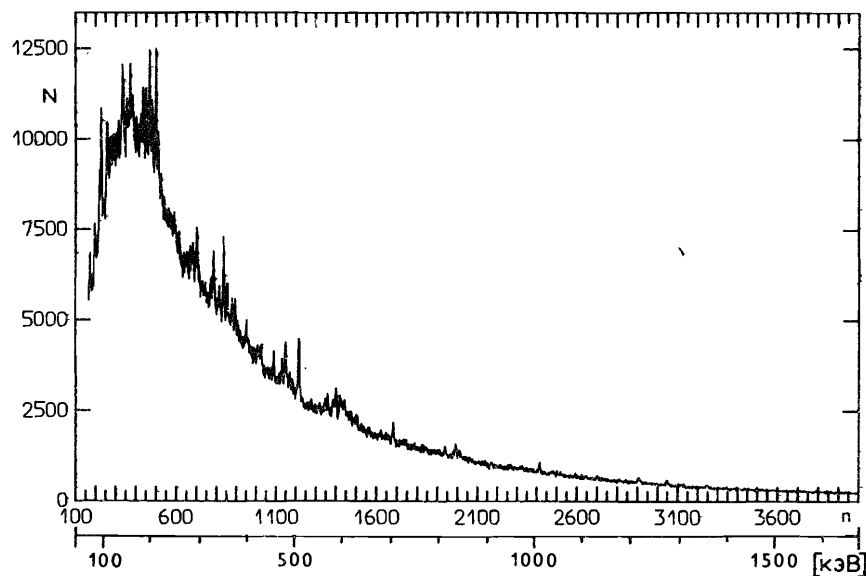


Рис. 4. Аппаратурный гамма-спектр.

При вычислении весовых коэффициентов определяющую роль играет вероятность регистрации гамма-квантов в соответствующих энергетических интервалах спектра. Поэтому ошибки весовых коэффициентов определяются в основном погрешностью абсолютной эффективности спектрометра, усреднённой по каждой из 13 групп, и составляют  $\sim 0,3\%$ .

Статистическая погрешность для числа делений, зарегистрированных камерой, пренебрежимо мала. Из анализа отношения числа делений к числу совпадений с регистрацией гамма-квантов в отдельных замерах следует его нормальное распределение. Исходя из дисперсии этого распределения была сделана оценка дополнительной ошибки, которая составляет  $\sim 0,7\%$ .

Основная часть фона случайных совпадений (0,75% из 0,9%) связана с естественной активностью урана и учитывалась при обработке спектра. Оставшаяся неучтённой часть ( $\sim 0,15\%$ ) вносит незначительный вклад в суммарную ошибку. Погрешности определения средних энергий для отдельных интервалов, поправок на поглощение гамма-квантов в ионизационной камере, вклад неупругого рассеяния нейтронов деления

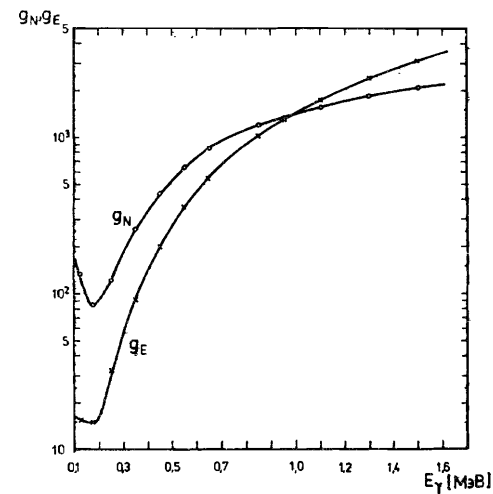


Рис. 5. Зависимость весовых коэффициентов  $g_N$  и  $g_E$  от энергии гамма-квантов.

на германии и конструкционных материалах в гамма-спектр не внесли существенной добавки в суммарную ошибку.

#### Усреднённые параметры гамма-спектра

В результате проведенного эксперимента был измерен спектр гамма-излучения в интервале от 0,1 МэВ до 1,6 МэВ, сопутствующего делению ядер  $U-235$  нейтронами с энергией от 0,7 эВ до 36 эВ. На рис. 6 представлена гистограмма, полученная после реконструкции спектра. Интегральные характеристики, вычисленные для каждой из трёх серий измерений, и средневзвешенные значения приведены в таблице 2. Из сравнения этих данных с приведенными в таблице 1 следует, что основная часть гамма-квантов и полной энергии приходится на энергетический диапазон  $0,1 \leq E_\gamma \leq 1,6$  МэВ. Поскольку нет оснований ожидать значительного различия гамма-спектров для нейтронов тепловой и резонансной области энергий, была проведена экстраполяция измеренного спектра в область больших энергий с использованием результатов работы <sup>15/</sup> для тепловой точки и вычислены интегральные характеристики в интервале энергий  $0,1 \leq E_\gamma \leq 10$  МэВ. Их значения приведены в таблице 2. Интересно отметить, что полученные таким образом значения

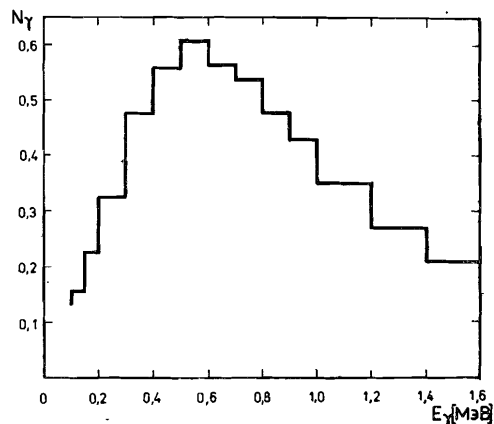


Рис. 6. Гистограмма множественности  $N_\gamma$  гамма-квантов, полученная после реконструкции аппаратного спектра.

Таблица 2

$\Delta E_\gamma = (0,1 - 1,6) \text{ МэВ}; \Delta E_n = (0,7 - 36) \text{ эВ}$			
№ серии	$\bar{N}_\gamma$ γ-квант/деление	$\bar{E}_\gamma$ МэВ/деление	$\bar{\epsilon}$ МэВ/γ-квант
1.	$6,100 \pm 0,060$	$4,587 \pm 0,054$	$0,752 \pm 0,012$
2.	$5,960 \pm 0,057$	$4,620 \pm 0,054$	$0,775 \pm 0,012$
3.	$6,176 \pm 0,061$	$4,727 \pm 0,055$	$0,765 \pm 0,012$
среднее	$6,079 \pm 0,063$	$4,643 \pm 0,031$	$0,764 \pm 0,007$
$\Delta E_\gamma = (0,1 - 10) \text{ МэВ}; \Delta E_n = (0,7 - 36) \text{ эВ}$			
$\bar{N}_\gamma = 6,890 \pm 0,100; \bar{E}_\gamma = 6,704 \pm 0,100; \bar{\epsilon} = 0,973 \pm 0,015$			

$\bar{N}_\gamma$  и  $\bar{E}_\gamma$  для указанного интервала энергий гамма-квантов совпадают с рекомендованными в [3], хотя в этой работе не учитывалась зависимость исследуемых величин от длительности временного окна  $\tau$ .

Рис. 7 и 8, представляя графически полученные результаты и литературные данные из табл. I, демонстрируют существование единой зависимости множественности и полной энергии от длительности временного окна, в котором проводилось измерение. Анализ этой зависимости позволил определить множественность и полную энергию гамма-квантов распада изомерных состояний ядер-осколков для временного интервала от 10 нс до 300 нс:  $\bar{N}_\gamma = (2,2 \pm 0,2) \gamma$ -квант/дел.,  $\bar{E}_\gamma = (1,1 \pm 0,1) \text{ МэВ/дел.}$

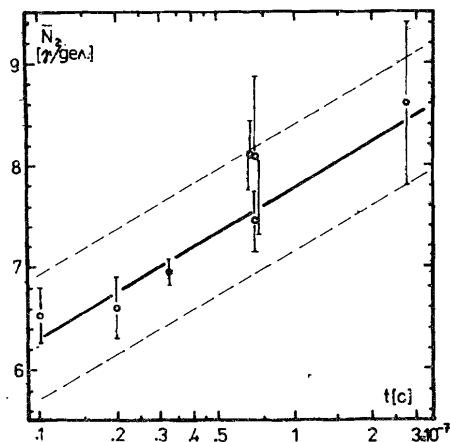


Рис. 7. Зависимость множественности  $\bar{N}_\gamma$ , полученной в разных экспериментах, от длительности временного окна.

#### Спиновая зависимость усреднённых характеристик

Вопрос о зависимости гамма-излучения при делении ядер от спина компаунд-состояния представляет самостоятельный интерес.

Использованный в настоящей работе метод спектрометрии нейтронов по времени пролёта позволяет выделить 33 делительных резонанса в интервале энергий от 0,7 эВ до 36 эВ. В сочетании с многомерным анали-

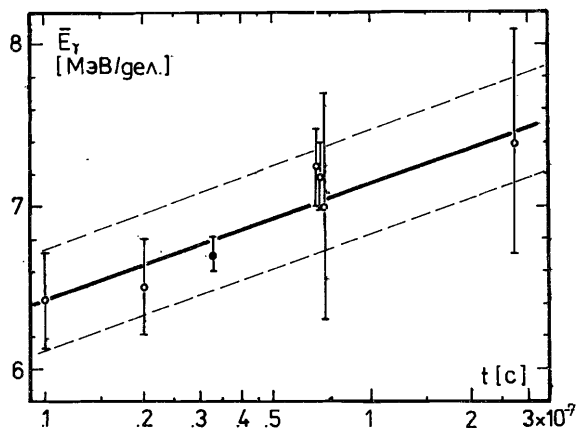


Рис. 8. Зависимость полной энергии  $\bar{E}_\gamma$ , полученной в разных экспериментах, от длительности временного окна.

зом экспериментальных данных это даёт возможность отдельно исследовать гамма-спектры для двух групп резонансов со спинами  $J^\pi = 3^-$  и  $J^\pi = 4^-$ . Гамма-спектры для каждой из этих групп обрабатывались по описанной выше методике. В связи с невозможностью независимой нормировки данных, для них не вычислялись абсолютные значения множественности и полной энергии, а были определены лишь средние энергии гамма-квантов, характеризующие жёсткость спектра в каждой группе. Полученные таким образом значения для трёх серий измерений представлены в таблице 3. Там же приведены средневзвешенные значения, из

Таблица 3

$\Delta E_\gamma = (0,1 - 1,6) \text{ МэВ}$ $\Delta E_n = (0,7 - 36) \text{ эВ}$				
$J^\pi$	$N^\circ$ серии			средне- взвешенное значение
	1.	2.	3.	
$3^-$	$0,771 \pm 0,012$	$0,788 \pm 0,012$	$0,767 \pm 0,012$	$0,775 \pm 0,007$
$4^-$	$0,747 \pm 0,012$	$0,767 \pm 0,017$	$0,764 \pm 0,009$	$0,759 \pm 0,007$

сравнения которых вытекает, что для резонансов  $3^-$  средняя энергия несколько выше, чем для  $4^-$ , а разница составляет

$$\Delta \bar{E} (J^\pi) = (16 \pm 10) \text{ кэВ}/\gamma\text{-квант.}$$

Из этого результата следует, что при делении  $U-235$  резонансными нейтронами в сопутствующем гамма-излучении средние энергии гамма-квантов для резонансов  $3^-$  и  $4^-$  существенно не отличаются.

Авторы работы признательны Л.Б.Пикельнеру, Ю.С.Замятину и А.Б.Попову за внимание к работе, полезные обсуждения и ценные замечания.

#### Литература

- Горбачёв В.М., Замятин Ю.С., Лбов А.А. Взаимодействие излучений с ядрами тяжёлых элементов и деление ядер. Москва, Атомиздат, 1976.
- Francis I.E. and Gramble R.L. Report ORNL-1879 (1955).
- Hoffman D.C. and Hoffman M.M. Annual Rev. of Nucl.Sci., 24 (1974), p.151.
- Plesonton F., Ferguson R.L., Schmitt H.W. Phys.Rev. C.6 (1972), 1023-1039.
- Verbinski V.V., Weber H., Sund R.E. Phys.Rev. C 7 (1973), 1173-1185.
- Peelle R.W., Maienschein F.C. Phys.Rev. C 3 (1971).
- Rau V.F.E.W., Annual Phys. 10 (1963), 252-264.
- Bogdzal A.A., Duka Zolyomi A., Kliman J., Presperin V., Avdeev S.P., Kuznetsov V.D. and Dlouhy Z., Nucl.Instr.and Meth. 200 (1982), 407-410.
- Nuclear Data Tables, A7, No.6 (1970), 565.
- Антонов С.А., Богдзель А.А., Гундорин Н.А., Дuka-Зойоми А., Климан Я., Кржистек Д., Островной А.И., Островная Т.М., Попов А.Б., Пресперин В., Тишин В.Г., Ширикова Н.Ю. ОИЯИ, II-85-701, Дубна, 1985.
- Meier-Leibnitz H., Schmitt H.W. and Ambruster P. Proc.of the Symp. on Phys. and Chem. of Fission, Salzburg 1965, IAEA Vienna 1965, vol.II, 143.

Рукопись поступила в издательский отдел  
3 апреля 1986 года.

## НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

Д17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
Р18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.
Д2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
Д9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
Д3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.
Д11-83-511	Труды совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1982.	2 р. 50 к.
Д7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р. 55 к.
Д2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р. 00 к.
Д13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
Д2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30
Д1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р. 50
Д17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/	7 р. 75
Д10,11-84-818	Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программированию и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983	3 р. 50
	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984 /2 тома/	13 р. 50
Д4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра, Алушта, 1985.	3 р. 75

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:  
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79  
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Гундорин Н.А., и др.

P3-86-197

Измерение множественности и полной энергии гамма-излучения при делении U-235 резонансными нейтронами

На импульсном источнике ИБР-30 проведены спектроскопические исследования гамма-излучения, сопутствующего делению U-235 резонансными нейтронами с энергией от 0,7 эВ до 36 эВ. Ионизационная камера, содержащая 10 г урана, обогащенного до 90% изотопом U-235, и Ge(Li) гамма-детектор с объемом ~30 см<sup>3</sup> и энергетическим разрешением 2,8 кэВ для энергии 1333 кэВ работали в режиме совпадений. Применялась методика многомерного анализа. В результате реконструкции аппаратного спектра получен гамма-спектр в интервале энергий /0,1-1,6/ МэВ. Вычислены интегральные характеристики гамма-излучения: множественность, полная и средняя энергия. Приводятся значения средних энергий для резонансов 3<sup>-</sup> и 4<sup>-</sup>.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод О.С.Виноградовой

Gundorin N.A. et al.

P3-86-197

Measurement of Multiplicity and Total Energy of  $\gamma$ -Quanta Following the Fission of U-235 Induced by Resonance Neutrons

The spectroscopy of  $\gamma$ -radiation following the fission of U-235 induced by resonance neutrons with energies from 0.7 eV to 36 eV from the IBR-30 pulsed source was studied. The ionization chamber containing 10 g of uranium enriched to 90% with U-235 and the Ge(Li) detector about 30 cm<sup>3</sup> in volume having an energy resolution of 2.8 keV at 1333 keV energy were operating in coincidence. The results were analysed within the multidimensional procedure. After reconstructing the measured spectrum the  $\gamma$ -spectrum in the energy range from 0.1 to 1.6 MeV has been obtained. The following integral characteristics were calculated: multiplicity, total and average energies. The average energies for the resonances 3<sup>-</sup> and 4<sup>-</sup> are reported.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986