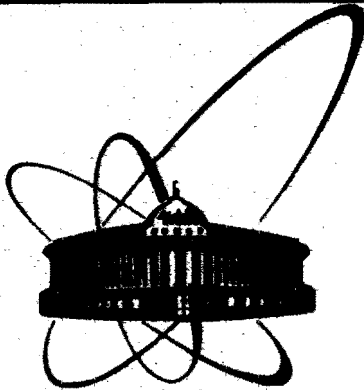


87-862



**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

Б 737

Р3-87-862

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

**ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ  
ВЫХОДА ГАММА-ЛУЧЕЙ ОТ МАССЫ  
И ЗАРЯДА ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ  $^{236}\text{U}$**

**1987**

## ВВЕДЕНИЕ

Как известно, деление ядра сопровождается глубокой перестройкой ядерной материи. Вследствие таких изменений образующиеся фрагменты в момент разрыва ядра находятся в высоковозбужденных состояниях. При делении  $^{236}\text{U}$  полная энергия возбуждения составляет около 24 МэВ. Большая часть энергии возбуждения снимается посредством эмиссии нейтронов. Затем, после перехода на уровни, близкие к энергии сепарации нейтрона в осколке, разрядка продолжается при эмиссии гамма-квантов, уносящих значительную часть углового момента осколков. В результате всех этих процессов возникает широкий набор ядер - от магических до сверхдеформированных. Изучением распада таких ядер, возникающих при спонтанном делении  $^{252}\text{Cf}$ , основательно занимались авторы работ<sup>1,2</sup>. На основе данных об интенсивности гамма-распада возбужденных состояний четно-четных осколков они сделали вывод о пропорциональности между интенсивностью распада первого возбужденного состояния осколка и его независимым выходом при делении.

Гамма-спектроскопией осколков при делении  $^{235}\text{U}$  тепловыми нейтронами занимались авторы работы<sup>3</sup>. Недостаток сведений о ядерной структуре осколков, как и методические трудности, связанные с гамма-спектрометрией на пучке нейтронов, по-видимому, повлияли на точность определения интенсивностей гамма-переходов и на определение массы и заряда осколков.

Высокой точностью определения энергии гамма-излучения при делении  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  отличается работа<sup>4</sup>. Полученные в ней результаты представляют собой суммарную информацию об относительных интенсивностях мгновенных и задержанных распадов осколков деления, а также  $(n, \gamma)$ -реакции в мишенях и накопленных трансурановых элементах. Работа имеет в этом плане только качественный характер в сравнении с метрологической точностью, достигнутой при определении энергии гамма-переходов.

В настоящей работе проведена спектрометрия гамма-квантов из осколков деления  $^{235}\text{U}$  для отдельных резонансов в интервале энергий нейтронов от 0,7 до 36 эВ. Поскольку сечение деления в указанном интервале энергий, как и при делении на тепловых нейтронах, является статистической суммой по отдельным спиновым состояниям компаунд-ядра, интегральные данные по интенсив-

ности гамма-переходов для резонансной области энергий нейтронов могут быть сопоставлены с данными, полученными на тепловых нейтронах, и использованы для определения независимых выходов ряда ядер, а также изучения заселенности их отдельных возбужденных состояний.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Измерение гамма-квантов, возникающих при делении ядер  $^{235}\text{U}$  резонансными нейтронами с энергией от 0,7 до 36 эВ, проводилось на пучке импульсного реактора ИБР-30 с использованием методики времени пролета. Пучок нейтронов пропускался через ионизационную камеру, содержащую 10 г изотопа  $^{235}\text{U}/5/$ .

Для спектрометрии сопутствующего делению гамма-излучения применялся Ge(Li)-детектор объемом  $30\text{ см}^3$ . Энергетическое разрешение спектрометра составляло 2,8 кэВ по линии 1333 кэВ  $^{60}\text{Co}$ . При измерениях детектор работал в режиме совпадений с камерой деления и регистрировал гамма-кванты с энергией от 80 до 1750 кэВ. Длительность окна регистрации составляла 33 нс. В трех сериях измерений было зарегистрировано  $1,5 \cdot 10^9$  делений, из них  $2 \cdot 10^7$  - в совпадении с гамма-квантами. Методика эксперимента, сбора данных и калибровка гамма-спектрометра описаны в работах<sup>/6-8/</sup>.

## ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Спектр гамма-квантов, зарегистрированных в режиме совпадения с делением, нормировался на абсолютную эффективность Ge(Li)-детектора. Часть спектра, полученного после вычитания его сплошной части, показана на рис.1. Площади фотопиков этого спектра, приведенные к одному акту деления, соответствуют интенсивностям мгновенных гамма-переходов. Идентификация осколка с данными Z и A по наблюдаемому переходу осуществлялась с использованием спектрометрических справочников и таблиц<sup>/9-11/</sup>. При этом учитывались ограничения, связанные с особенностями эксперимента, вследствие чего рассматривались только быстрые гамма-переходы с низкой мультипольностью для осколков, независимый выход которых превышал 1%. В случае наложения двух фотопиков распределение интенсивности вычислялось пропорционально независимым выходам осколков, в которых гамма-переходы происходят.

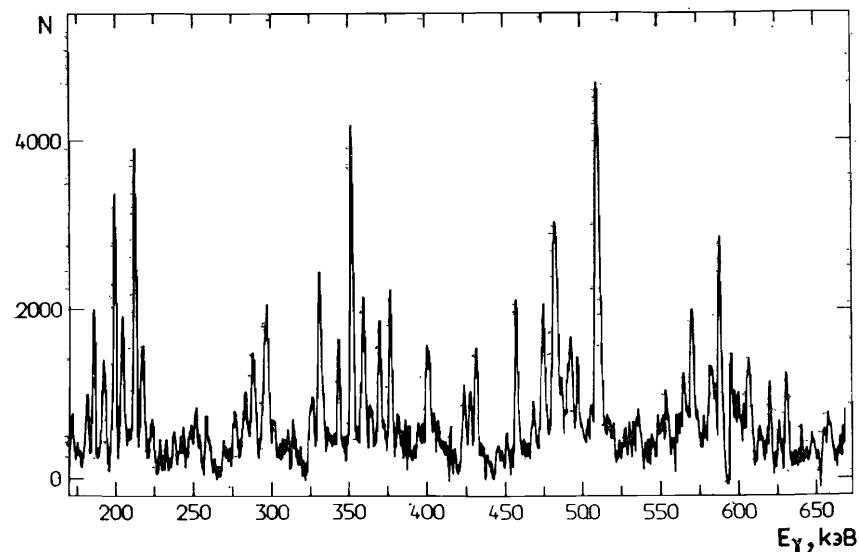


Рис.1. Пример части спектра мгновенных гамма-лучей из осколков деления  $^{235}\text{U}$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В результате обработки экспериментальных данных были определены интенсивности 143 гамма-пиков, из которых 82 приписаны 24 легким и 27 тяжелым осколкам. На рис.2 им соответствует заштрихованная область. В табл.1 и 2 представлены результаты соответственно для легкой и тяжелой групп осколков деления. Наряду со значениями массового числа A и числа нейтронов N даются интенсивности гамма-переходов  $\gamma_{\gamma} I_f$ , приведенные к одному акту деления, определенные в настоящем эксперименте. Интенсивности  $\gamma_{\gamma} I_f$  даются исправленными с учетом внутренней конверсии<sup>/12/</sup>. Возможные поправки, учитывающие анизотропию гамма-излучения, в расчет не принимались из-за их малости. Энергии гамма-переходов  $E_{\gamma}$ , спины и четности уровней, между которыми переходы происходят, взяты из спектрометрических справочников<sup>/9-11/</sup>. В табл.1 и 2 приводятся также значения рекомендованных независимых выходов осколков деления из работы<sup>/13/</sup>.

Из приведенных в таблицах результатов следует, что заселенность первого возбужденного уровня, определенная как отношение интенсивности гамма-перехода к независимому выходу для четно-четных осколков, практически не зависит от значения Z и A и близка к 1.

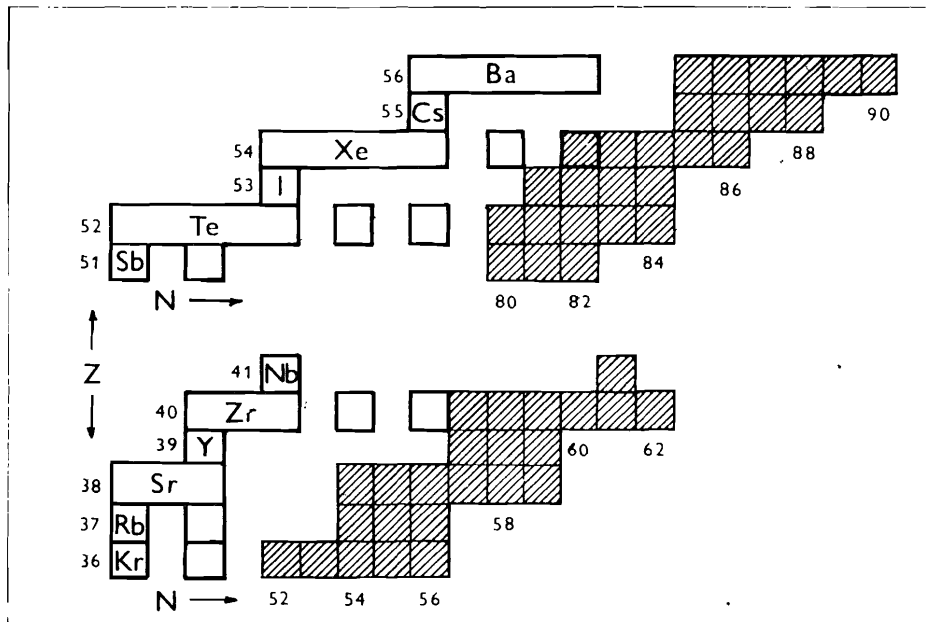


Рис. 2. Карта нейтронно-избыточных нуклидов, наблюдаемых в настоящем эксперименте.

Таблица 1

	A	N	Независимый выход, %	$\Upsilon_{\gamma}$ /дел., %	$E_{\gamma}$ , кэВ	$\Delta J^{\pi}$
$^{36}\text{Kr}$	88	52	$1,61 \pm 0,10$	$1,75 \pm 0,16$ $0,90 \pm 0,21$	775,3 1334,7	$2^{+}-0^{+}$ $4^{+}-2^{+}$
	89	53	$3,43 \pm 0,07$	$2,65 \pm 0,18$	498,1	
	90	54	$4,36 \pm 0,09$	$4,39 \pm 0,36$ $2,13 \pm 0,18$	707,2 1396,2	$2^{+}-0^{+}$ $4^{+}-2^{+}$
	91	55	$3,22 \pm 0,06$	$1,88 \pm 0,17$	953,1	
	92	56	$1,66 \pm 0,07$	$1,67 \pm 0,29$	812,6	$2^{+}-0^{+}$
$^{37}\text{Rb}$	91	54	$2,27 \pm 0,05$	$1,65 \pm 0,17$	551,5	
	92	55	$3,16 \pm 0,10$	$1,78 \pm 0,13$	192,5	$2^{-}-1^{-}$
	93	56	$3,06 \pm 0,06$	$1,80 \pm 0,13$	250,7	

Таблица 1 /продолжение/

	A	N	Независимый выход, %	$\Upsilon_{\gamma}$ /дел., %	$E_{\gamma}$ , кэВ	$\Delta J^{\pi}$
$^{38}\text{Sr}$	92	54	$1,81 \pm 0,35$	$1,63 \pm 0,30$	814,2	$2^{+}-0^{+}$
	93	55	$2,57 \pm 0,64$	$1,04 \pm 0,10$	219,4	$3/2^{+}-5/2^{+}$
	94	56	$4,43 \pm 1,10$	$4,40 \pm 0,42$ $2,82 \pm 0,22$	836,5 1307,1	$2^{+}-0^{+}$ $4^{+}-2^{+}$
	95	57	$4,47 \pm 1,20$	$2,20 \pm 0,25$ $5,78 \pm 0,15$ $2,22 \pm 0,18$	351,9 204,0 680,7	$3/2^{+}-1/2^{+}$ $7/2^{+}-3/2^{+}$ $3/2^{+}-1/2^{+}$
	96	58	$3,56 \pm 0,90$	$3,40 \pm 0,36$ $2,21 \pm 0,18$	814,8 977,7	$2^{+}-0^{+}$ $4^{+}-2^{+}$
$^{39}\text{Y}$	97	59	$2,10 \pm 0,08$	$1,17 \pm 0,13$	167,2	$3/2^{+}-1/2^{+}$
	96	57	$2,22 \pm 0,89$	$1,18 \pm 0,14$	931,8	$1^{+}-0^{-}$
	97	58	$2,65 \pm 1,06$	$1,52 \pm 0,20$	697,3	$3/2^{+}-1/2^{-}$
$^{40}\text{Zr}$	98	59	$2,40 \pm 1,08$	$1,83 \pm 0,12$	170,2	$1^{-}-0$
	97	57	$1,14 \pm 0,13$	$0,50 \pm 0,06$	1103,1	$3/2^{+}-1/2^{+}$
	98	58	$2,48 \pm 1,11$	$2,69 \pm 0,25$ $1,56 \pm 0,23$	1221,8 824,2	$2^{+}-0^{+}$ $4^{+}-2^{+}$
	99	59	$3,65 \pm 0,22$	$2,47 \pm 0,34$ $1,81 \pm 0,13$	121,8	$3/2^{+}-1/2^{+}$
	100	60	$4,99 \pm 2,00$	$5,18 \pm 0,20$ $3,61 \pm 0,18$ $2,45 \pm 0,17$	212,7 352,1 497,9	$2^{+}-0^{+}$ $4^{+}-2^{+}$ $6^{+}-4^{+}$
$^{41}\text{Nb}$	101	61	$2,87 \pm 0,17$	$2,29 \pm 0,14$ $1,91 \pm 0,12$	216,7 130,8	$5/2^{+}-3/2^{+}$ $7/2^{+}-5/2^{+}$
	102	62	$2,02 \pm 0,16$	$1,95 \pm 0,43$	151,6	$2^{+}-0^{+}$
	102	61	$1,59 \pm 0,80$	$1,45 \pm 0,22$	504,3	

Таблица 2

	A	N	Независимый выход, %	$Y_{\gamma}$ /дел., %	$E_{\gamma}$ , кэВ	$\Delta J^{\pi}$
$^{51}\text{Sb}$	131	80	1,65±0,10	1,49±0,21 1,22±0,15	798,4 1143,3	9/2 <sup>+</sup> -7/2 <sup>+</sup>
	132	81	2,22±0,13	1,67±0,17 1,11±0,10	898,9 247,3	1 <sup>+</sup> -3 <sup>+</sup> 3 <sup>+</sup> -4 <sup>+</sup>
	133	82	2,18±0,32	1,74±0,24	962,3	5/2 <sup>+</sup> -7/2 <sup>+</sup>
$^{52}\text{Te}$	132	80	1,56±0,09	1,79±0,18 1,63±0,35	937,9 989,6	2 <sup>+</sup> -0 <sup>+</sup> 4 <sup>+</sup> -2 <sup>+</sup>
	133	81	5,04±0,50	1,87±0,18 0,87±0,13	912,3 1704,2	11/2 <sup>+</sup> -7/2 <sup>+</sup> 1/2 <sup>+</sup> -3/2 <sup>+</sup>
	134	82	6,51±1,95	5,91±0,50 4,61±0,28	1279,8 295,7	2 <sup>+</sup> -0 <sup>+</sup> 4 <sup>+</sup> -2 <sup>+</sup>
	135	83	3,12±0,25	2,26±0,19	1131,5	
	136	84	2,48±0,98	2,44±0,23 1,65±0,25	1178,4 325,8	2 <sup>+</sup> -0 <sup>+</sup> 4 <sup>+</sup> -2 <sup>+</sup>
$^{53}\text{I}$	134	81	0,87±0,05	0,55±0,20	180,1	3 <sup>+</sup> -4 <sup>+</sup>
	135	82	3,09±0,10	1,20±0,15	603,7	5/2 <sup>+</sup> -7/2 <sup>+</sup>
	136	83	3,32±1,00	1,81±0,28	333,9	3 <sup>+</sup> -2 <sup>-</sup>
	137	84	2,46±0,39	1,16±0,09	243,3	5/2 <sup>+</sup> -7/2 <sup>+</sup>
$^{54}\text{Xe}$	136	82	1,51±0,60	1,38±0,14 1,01±0,08	1313,9 381,5	2 <sup>+</sup> -0 <sup>+</sup> 4 <sup>+</sup> -2 <sup>+</sup>
	137	83	2,99±0,60	1,38±0,16 1,36±0,14	601,1 1218,6	3/2 <sup>-</sup> -7/2 <sup>-</sup> 9/2 <sup>-</sup> -7/2 <sup>-</sup>
	138	84	4,80±0,48	5,30±0,40	588,8	2 <sup>+</sup> -0 <sup>+</sup>
				4,62±0,30 1,50±0,20	484,3 481,1	4 <sup>+</sup> -2 <sup>+</sup> 6 <sup>+</sup> -4 <sup>+</sup>
	139	85	4,15±0,33	2,86±0,21 1,05±0,05	571,2 537,0	11/2 <sup>-</sup> -7/2 <sup>-</sup> 9/2 <sup>-</sup> -7/2 <sup>-</sup>
140	86	3,73±0,22	3,48±0,23 2,73±0,31	376,9 457,6	2 <sup>+</sup> -0 <sup>+</sup> 4 <sup>+</sup> -2 <sup>+</sup>	

Таблица 2 /продолжение/

	A	N	Независимый выход, %	$Y_{\gamma}$ /дел., %	$E_{\gamma}$ , кэВ	$\Delta J^{\pi}$
$^{55}\text{Cs}$	140	85	2,20±0,23	1,47±0,12	621,1	2 <sup>-</sup> -1 <sup>-</sup>
	141	86	3,09±0,10	1,94±0,15	468	
				1,26±0,14	909	
	142	87	2,48±0,14	1,87±0,16 1,08±0,13	571,7 250,7	
143	88	1,45±0,09	1,09±0,13	232,4		
$^{56}\text{Ba}$	141	85	1,50±0,30	0,94±0,11	561,5	
	142	86	3,42±1,02	3,79±0,28	359,3	2 <sup>+</sup> -0 <sup>+</sup>
				1,83±0,19	473,4 632	4 <sup>+</sup> -2 <sup>+</sup> 6 <sup>+</sup> -4 <sup>+</sup>
	143	87	3,80±0,40	2,20±0,24	306,4	
	144	88	4,02±0,36	4,72±0,33	199,1	2 <sup>+</sup> -0 <sup>+</sup>
				3,61±0,25 1,28±0,20	331 431,7	4 <sup>+</sup> -2 <sup>+</sup> 6 <sup>+</sup> -4 <sup>+</sup>
145	89	2,02±0,65	1,01±0,06 1,14±0,08	175,6 297,8		
146	90	0,84±0,50	1,69±0,64	180,9	2 <sup>+</sup> -0 <sup>+</sup>	

Следовательно, для четно-четных осколков распад высоковозбужденных состояний, возникающих в процессе разрыва, идет через ротационную полосу прямым путем и полностью насыщает переход из первого возбужденного уровня в основное состояние. Этот результат согласуется с выводами работы /14/.

Некоторые отклонения заселенности от единицы можно отнести на счет погрешности в определении коэффициентов внутренней конверсии и независимых выходов осколков, а также погрешностей эксперимента. Другая причина наблюдаемых отклонений - наличие октупольной деформации у некоторых осколков деления /15,16/. В этом случае распад возбужденных состояний разветвляется между квадрупольной и октупольной полосами. При этом, однако, изменение заселенности уровня 2<sup>+</sup> за счет октупольной полосы оказывается незначительным и не превышает нескольких процентов.

Из данных, приведенных в таблицах, следует также, что заселенность уровней ротационной полосы основного состояния для легких и тяжелых осколков можно представить соотношением

$$I_{2+_{-0}^{+}} : I_{4+_{-2}^{+}} : I_{6+_{-4}^{+}} \approx 1:0,7:0,4.$$

Это согласуется с результатами расчета<sup>[2]</sup>, проведенного на основе статистической модели в предположении, что величина первичного углового момента осколков в момент разрыва составляет  $(5 \div 9)\hbar$ . Незначительная разница в заселенности уровней обнаруживается при сравнении приведенных данных с результатами, полученными для спонтанно делящихся изотопов  $^{252}\text{Cf}$  и  $^{254}\text{Cf}$ <sup>[14]</sup>.

Зависимость интенсивности перехода с первого возбужденного уровня в основное состояние от ядерного заряда  $Z$  и массы осколка показана на рис. 3 и 4. Вертикальными линиями на них обозначены рекомендованные величины независимых выходов с соответствующими погрешностями. Видно, что существует хорошее согласие между интенсивностью  $\gamma$ -перехода и независимым выходом осколков только для четно-четных ядер. Для остальных  $Y_{\gamma}$  заметно ниже. Механизм этого явления, по-видимому, связан со спариванием

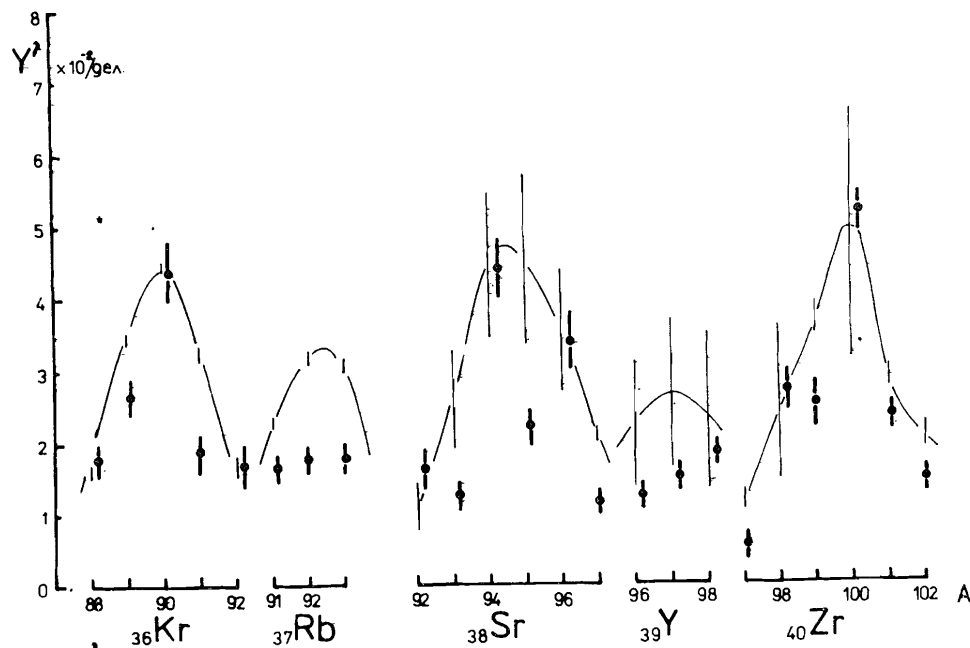


Рис. 3. Зависимость интенсивности распада низших возбужденных состояний от ядерного заряда  $Z$  и массы  $A$  для легкой группы осколков.

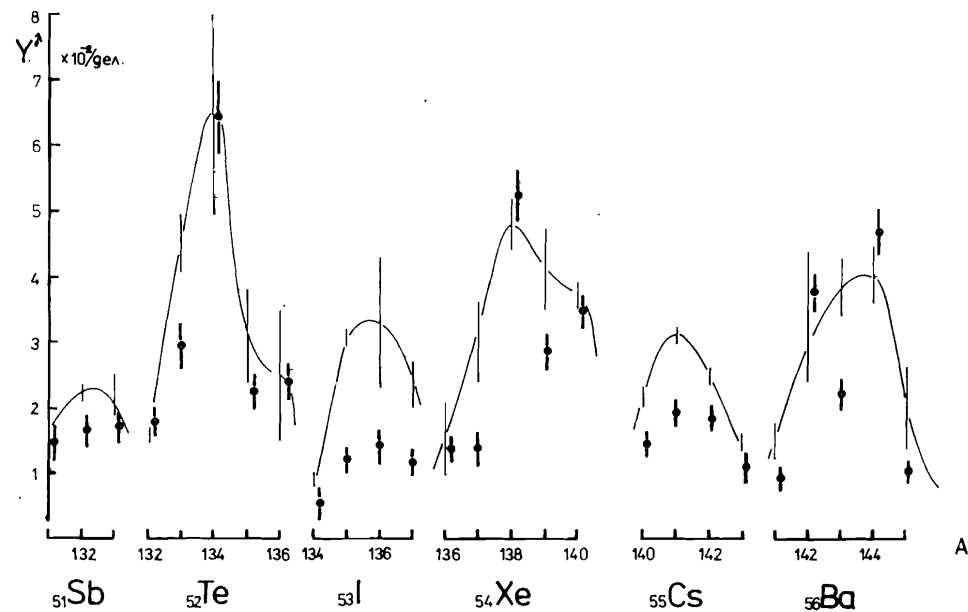


Рис. 4. Зависимость интенсивности распада низших возбужденных состояний от ядерного заряда  $Z$  и массы  $A$  для тяжелой группы осколков.

нуклонов и требует более детального рассмотрения. Существенную роль должно играть более сложное ветвление путей распада возбужденных состояний. Любопытную особенность можно наблюдать при рассмотрении зависимости выхода гамма-квантов от нейтронного числа осколков.

На рис. 5 приведена зависимость заселенности первого возбужденного уровня от числа нейтронов  $N$  всех осколков, кроме четно-четных. В легкой группе наблюдается минимум при полумагическом числе нейтронов  $N = 56$ , при котором заполняется подоболочка  $2d_{5/2}$ . В группе тяжелых осколков существенно больше дисперсия значений, тем не менее и здесь обозначился минимум в зависимости для изотопов  $I$  и  $Xe$  в области магического числа  $N = 82$ , известной наличием большого числа изомеров. Существование наблюдаемого минимума в заселенности для представленных ядер согласуется с ходом изменения энергии Ферми и указывает на изменение их постоянной деформации в основном состоянии<sup>[17]</sup>.

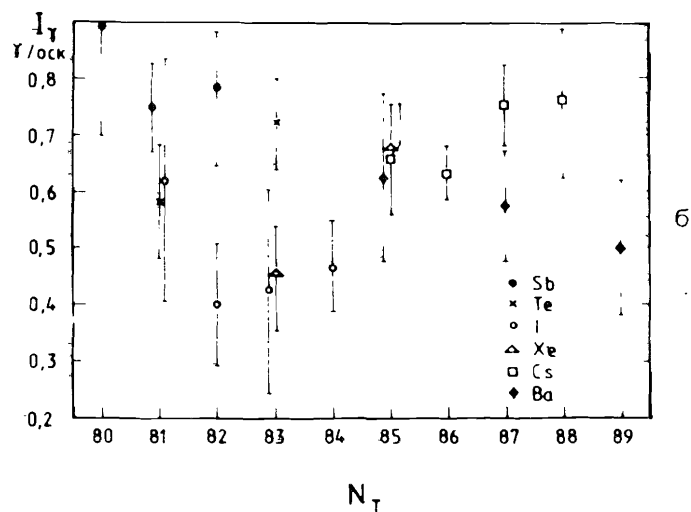
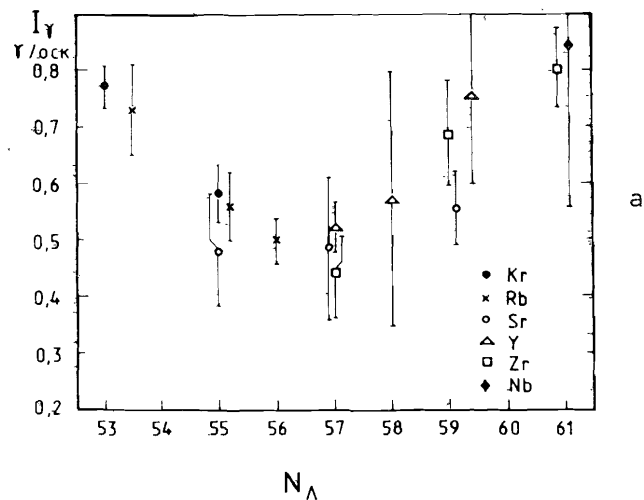


Рис.5. Зависимость заселенности низших возбужденных уровней от нейтронного числа  $N$  четно-нечетных и нечетно-нечетных для легкой /а/ и тяжелой /б/ групп осколков деления.

#### ВЫВОДЫ

В работе представлены новые данные об интенсивности гамма-переходов при распаде возбужденных уровней ряда нейтронно-избыточных ядер, возникших при делении  $^{235}\text{U}$  резонансными нейтронами.

Полученные данные о заселенности уровней говорят о полном насыщении заселенности уровней  $2^+$  у четно-четных осколков. Заселенность высших уровней указывает на статистический механизм их распада при наличии первичного углового момента в точке разрыва  $5 \div 9 \text{ ф}$ . Для осколков, у которых хотя бы одна из величин  $Z$  или  $N$  нечетна, наблюдается влияние нейтронной оболочки на заселенность нижнего уровня в ядре.

Результаты работы подтверждают возможность применения мгновенной гамма-спектрометрии для определения независимого выхода четно-четных осколков деления. Полученная информация ограничена сравнительно небольшим количеством ядер, однако методические трудности при ее получении весьма велики, и существенного расширения числа изученных ядер в ближайшее время трудно ожидать.

Авторы работы благодарны Л.Б.Пикельнеру, В.И.Фурману и А.Б.Попову за обсуждения и полезные замечания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Cheifetz E. et al. - Phys.Rev., 1971, C4, p.1913.
2. Wilhelmy J.B. et al. - Phys.Rev., 1972, C5, p.2041.
3. Khan T.A., Hofmann D., Horch F. - Nucl.Phys., 1973, A205, p.488.
4. Börner H.G. et al. - Nucl. Instr.Meth., 1979, 164, p.579.
5. Bogdzel' A.A. et al. - Nucl.Instr.Meth., 1982, V 200, p.407.
6. Богдзель А.А. и др. - В кн.: Международный симпозиум по ядерной электронике, Братислава, 1983. ОИЯИ, Д13-84-53, Дубна, 1984, с.285.
7. Антонов С.А. и др. Препринт ОИЯИ 13-85-701, Дубна, 1985.
8. Kliman J. et al. - Acta Physics Slovaca, 1986, v.36, p.245.
9. Reus U., Westmeier W. - Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1983, v.29, No.1,2.
10. Lederer C.M. et al. - Table of Isotopes, 7th edition, Willey Interscience Pub., 1978.
11. Blachot J., Fiche C. - Annales de Physique, 1981, Supplément 6, p.3.
12. Hager R.S., Saltzer E.C. - Nucl.Data, 1968, v.A4, p.1.
13. Riger B.F., Meek M.E. Fission Yields, NEDO 292, IAEA, Viena, 1981.
14. Cheifetz E. et al. - Nucl.Spectroscopy of Fission Fragments, ed.T.von Egidy, Grenoble, 1979, p.173; Conference Series № 51. The Institute of Physics, Bristol and London, 1980.
15. Wohn F.K., Hill J.C. - Phys.Rev.Lett., 1983, v.51, p.873.

16. Phillips W.R. et al. - Phys.Rev. Lett., 1986, v.57, p.3257.  
17. Bengston R. et al. - Phys.Scripta, 1984, v.29, p.402.

Богдзель А.А. и др.

P3-87-862

Изучение зависимости выхода гамма-лучей  
от массы и заряда осколков деления  $^{236}\text{U}$

Представлены новые экспериментальные результаты по определению выхода мгновенного гамма-излучения из распада возбужденных состояний осколков деления. 80 наблюдаемых гамма-переходов были приписаны 51 осколку деления. Измерение проводилось Ge(Li)-спектрометром в режиме совпадений с быстрой ионизационной камерой /10 г  $^{235}\text{U}$ / в пучке резонансных нейтронов с энергией от 0,7 до 36 эВ.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С.Виноградовой

Bogdzel' A.A. et al.

P3-87-862

Investigation of Prompt Gamma-Ray Yields  
as a Function of Mass and Charge of  $^{236}\text{U}$   
Fission Fragments

New experimental results determining yields of the prompt gamma-rays from the excited states decay of fission fragments are presented. 80 gamma-transitions were observed in 51 fission fragments. The measurements were performed by Ge(Li)-spectrometry in coincidence with fast ionisation chamber (10 g  $^{235}\text{U}$ ). The beam of the resonance neutrons with energy range from 0,7 to 36 eV was used.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987

Рукопись поступила в издательский отдел  
10 декабря 1987 года.