

К-886

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 539.172.1

15-89-142

КУГЛЕР Андрей

**ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭМИССИИ
ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ГАММА-КВАНТОВ
В ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ С ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ
ПРИ ЭНЕРГИЯХ ДО 10 МэВ/А**

**Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра
и элементарных частиц**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Дубна, 1989

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций
Объединенного института ядерных исследований, Дубна.

Научные руководители:
доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник ПЕНИОНЖЕВИЧ Ю. Э.
кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник КАМАНИН В. В.

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник ДЖОЛОС Р. В.
кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник МИХАИЛОВ Л. Д.

Ведущее предприятие:
НИИ ядерной физики МГУ, Москва

Защита диссертации состоится " " 1989 года
в " " час на заседании специализированного совета
Д. 047.01.05 при Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории
ядерных реакций ОИЯИ (Дубна Московской области).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.
Автореферат разослан " " 1989 года.

Ученый секретарь специализированного совета
ТАРАН Ю. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

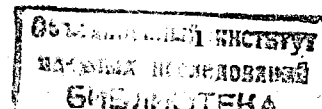
Процесс взаимодействия двух сложных ядер может привести к формированию сложных ядерных систем и впоследствии – к образованию как составных ядер, так и высоковозбужденных фрагментов, испускающих различные частицы: нуклоны, легкие ядра, тяжелые фрагменты, а также фотоны. Известно, что в диссипативных процессах в реакциях с тяжелыми ионами особую роль играют возбуждения гигантских резонансов. В рамках теоретических моделей параметры гигантских резонансов связываются с параметрами соответствующих ядерных систем (ядер), например с деформацией последних, их энергией возбуждения и т.д. Распад разных компонент резонанса приводит, в частности, к испусканию электромагнитного излучения, характеристики которого, например угловая анизотропия вылета, средняя энергия и т.д., отражают характеристики данной компоненты резонанса и резонанса в целом. Поэтому экспериментальное исследование высокоэнергетических гамма-квантов с $E_\gamma > 8$ МэВ (ВЭГЮ), испускаемых при взаимодействии тяжелых ионов с ядрами, позволяет получать важную информацию о свойствах формирующихся в реакции сложных ядерных систем составных ядер и фрагментов и представляет значительный интерес.

Канал реакции, приводящий к образованию составных ядер, является основным каналом, используемым для синтеза новых трансформированных элементов. Между тем с увеличением массы бомбардирующей частицы вероятность канала слияния резко уменьшается. В этом плане следует отметить, что исследование характеристик конечных продуктов реакций с тяжелыми ионами в зависимости от энергии ВЭГК может дать также информацию о времени жизни промежуточных сложных ядерных систем.

Несмотря на важность информации, получаемой на основе исследований ВЭГК в реакциях с тяжелыми ионами, экспериментальная информация в этой области явно недостаточна, чтобы сделать некоторые выводы об особенностях образования и распада составных систем при взаимодействии сложных ядер.

Целью настоящей работы является:

- а/ создание экспериментальной установки и разработка методики, позволяющей проводить сложные корреляционные эксперименты с выделением каналов: образования остаточных ядер, деления составных ядер, многонуклонных передач и т.д.;
- б/ проведение экспериментальных исследований особенностей испускания



ВЭГК в отдельных выходных каналах реакций с тяжелыми ионами с массовым числом $A \leq 60$ и с энергией ниже $10 \text{ МэВ}/A$; в/ исследование выхода ВЭГК в зависимости от параметров входного канала реакции.

Научная новизна и практическая ценность работы

Показана необходимость выделять канал реакции при изучении эмиссии ВЭГК. Например, в рамках исследований испускания ВЭГК в двух реакциях, $^{20}\text{Ne}(110 \text{ МэВ}) + ^{112}\text{Sn}$ и $^{64}\text{Zn}(290 \text{ МэВ}) + ^{68}\text{Zn}$, приводящих к образованию составных ядер с близкими параметрами, показано, что экспериментальные значения выходов ВЭГК в канале слияния, выделяемом с помощью характеристического рентгеновского излучения, отличаются от результатов, получаемых с использованием традиционной методики γ -старта.

Использованные в настоящей работе методы для выделения канала реакции, а именно: регистрация КХ-излучения атомов остаточных ядер (Х-старт) или регистрация осколков деления составных ядер, позволили наблюдать ВЭГК вплоть до энергий $E_{\gamma} \sim 8 \text{ МэВ}$.

В рамках исследований, проведенных в настоящей работе, впервые систематически изучено испускание ВЭГК с энергией $E_{\gamma} > 8 \text{ МэВ}$ в реакциях слияния тяжелых ионов с ядрами, приводящих к образованию составных ядер в широком диапазоне комбинаций ядра мишени и налетающего иона, массы составных ядер, их энергий возбуждения и углового момента. Экспериментально установлен рост выхода ВЭГК в канале слияния ядер с тяжелыми ионами с ростом значения отношения масс налетающего иона и ядра мишени.

Впервые выявлен существенный вклад канала, приводящего к образованию ядер, близких к ядру мишени, в испускание ВЭГК в реакции $^{40}\text{Ar}(300 \text{ МэВ}) + ^{68}\text{Sn}$. Наблюдалась резкая разница в поведении множественности "мягких" γ -квантов в зависимости от энергии ВЭГК в реакциях $^{20}\text{Ne}(110 \text{ МэВ}) + ^{112}\text{Sn}$ и $^{64}\text{Zn}(290 \text{ МэВ}) + ^{68}\text{Zn}$.

Впервые проведено сравнение результатов теоретических расчетов, основанных на предположении об испускании ВЭГК из нагретых деформированных быстровращающихся составных ядер, с экспериментом. Существенными в этом плане являются впервые экспериментально полученные сведения об угловой анизотропии вылета ВЭГК в канале деления, образованных в реакции составных ядер.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на Совещании по экспериментам на пучках тяжелых ионов (Варна, НРБ, 1984), Международной конференции по механизму ядерных реакций (Варена,

Италия, 1985), Международной конференции по структуре ядра, ядерным реакциям и симметриям (Дубровник, СФРЮ, 1986), Международной школе-семинаре по физике тяжелых ионов (Дубна, 1986), xxxvii Совещании по ядерной спектроскопии и структуре ядра (Ирмала, 1987), xxxviii Совещании по ядерной спектроскопии и структуре ядра (Баку, 1988).

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1. Создана многодетекторная установка ("Еж"), которая включает в себя 12 сцинтилляционных γ -детекторов, несколько полупроводниковых спектрометров для регистрации γ -излучения, легких заряженных частиц или тяжелых фрагментов. Разработано оригинальное программное обеспечение для сбора и обработки экспериментальной информации при проведении многопараметровых корреляционных экспериментов в режиме "на линии" с мини-ЭВМ СМ-3 и СМ-4.

2. Определены экспериментально γ -эффективности, функции отклика на моноэнергетическое γ -излучение и чувствительность к быстрым нейтронам для сцинтилляционных спектрометров, построенных на сцинтилляторе NaI(Tl) , а также на новом и перспективном сцинтилляторе $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ -германате висмута (BGO). Также проведены расчеты функции отклика на моноэнергетическое γ -излучение в диапазоне энергий $E_{\gamma} = 4+25 \text{ МэВ}$ для сцинтилляционных γ -спектрометров на мини-ЭВМ СМ-4 по разработанному алгоритму.

3. Разработаны высокоэффективные методики выделения конечного канала реакции в многопараметровых корреляционных экспериментах по рентгеновскому излучению конечных продуктов и по регистрации осколков деления составных ядер.

4. Исследования высокоэнергетических гамма-квантов с $E_{\gamma} > 8 \text{ МэВ}$ (ВЭГК) с выделением каналов реакции $^{40}\text{Ar}(300 \text{ МэВ}) + ^{68}\text{Sn}$ по рентгеновскому излучению, анализ измеренной множественности γ -квантов в реакциях $^{64}\text{Zn}(290 \text{ МэВ}) + ^{68}\text{Zn}$ и $^{20}\text{Ne}(110 \text{ МэВ}) + ^{112}\text{Sn}$ свидетельствуют о том, что ВЭГК состоит из нескольких компонент, принадлежащих различным каналам реакции (распад составного ядра, образование ядер, близких к ядру-мишени, и др.). Экспериментально установлено, что их вклад разный в различных участках энергетических спектров γ -излучения.

5. Изученная зависимость анизотропии выхода γ -излучения как относительно направления пучка тяжелых ионов для разных энергий γ -квантов в реакциях $^{40}\text{Ar}(300 \text{ МэВ}) + ^{68}\text{Sn}$ и $^{22}\text{Ne}(178 \text{ МэВ}) + ^{68}\text{Sn}$, так и относительно плоскости разлета осколков деления составных ядер Bi^*

в реакциях $^{40}\text{Ar}(220 \text{ МэВ}) + ^{159}\text{Tb}$ и $^{40}\text{Ar}(300 \text{ МэВ}) + ^{159}\text{Tb}$ указывает на то, что имеется преимущественный вылет ВЭГК с энергией $E_{\gamma} = 10+16 \text{ МэВ}$ по направлению углового момента взаимодействующей ядерной системы (составного ядра). Полученные экспериментальные данные находятся в качественном согласии с моделью испускания ВЭГК при распаде расщепленного ГДР* во вращающемся возбужденном составном ядре.

6. В исследованных нами реакциях $^{15}\text{N}(147 \text{ МэВ}) + ^{192}\text{Os}$, $^{22}\text{Ne}(155 \text{ МэВ}) + ^{181}\text{Ta}$, $^{40}\text{Ar}(220 \text{ МэВ}) + ^{159}\text{Tb}$, $^{40}\text{Ar}(300 \text{ МэВ}) + ^{159}\text{Tb}$, $^{20}\text{Ne}(110 \text{ МэВ}) + ^{112}\text{Sn}$ и $^{64}\text{Zn}(290 \text{ МэВ}) + ^{68}\text{Zn}$ обнаружено увеличение выхода ВЭГК в канале слияния тяжелых ядер с ростом значения отношения масс налетающего иона и ядра мишени. Проведенный анализ полученных экспериментальных данных в рамках представлений об испускании ВЭГК при распаде ГДР*, основанных на возбужденных состояниях составных ядер, не дает ни количественного, ни качественного согласия результатов расчетов с экспериментом, что свидетельствует о возможном вкладе других механизмов в испускание ВЭГК (например, γ -распада ГДР, возбуждаемых непосредственно на начальном этапе взаимодействия сложных ядер).

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений. Она содержит 169 страниц текста (включая рисунки), 44 рисунка, 7 таблиц и список литературы из 92 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность и важность исследуемых в диссертации проблем. Кратко изложено основное содержание отдельных глав и приведены основные результаты, полученные автором в данной работе.

В первой главе рассмотрены некоторые особенности девозбуждения продуктов реакций с тяжелыми ионами. Приводятся известные из литературы данные об испускании γ -излучения в разных каналах реакций с тяжелыми ионами.

В канале рассеяния тяжелых ионов экспериментально обнаружено девозбуждение гигантских квадрупольных резонансов за счет непосредственной эмиссии γ -квантов^{a)}. Вероятность испускания таких γ -квантов с $E_{\gamma} > 10 \text{ МэВ}$ была установлена на уровне порядка 10^{-4} . Один из возможных механизмов диссипации кинетической энергии в канале глубоконеупругих взаимодействий и в канале слияния в реакциях с

тяжелыми ионами могут представлять коллективные возбуждения -гигантские резонансы. Результаты оценочных расчетов вероятности испускания соответствующего γ -излучения с $E_{\gamma} = 10+25 \text{ МэВ}$ дали величину около 10^{-6} на один акт образования двойной ядерной системы^{b)}. Так как в сечении фотопоглощения на основном состоянии ядер в области $E_{\gamma} = 10+20 \text{ МэВ}$ доминирует возбуждение изовекторных гигантских дипольных резонансов (ГДР), то испускание ВЭГК из высоковозбужденных ядер, продуктов взаимодействия тяжелых ионов, принято описывать как γ -распад ГДР*, построенных на состояниях последних. В рамках "стандартной" модели также предполагается независимость параметров ГДР* от энергии возбуждения и спина ядра, что приводит к ожиданию увеличения выхода ВЭГК с увеличением энергии возбуждения составных ядер, и для расчетных γ -спектров характерно появление широкого "бампа" в области $E_{\gamma} \approx E_0$ (средняя энергия резонанса)^{c)}.

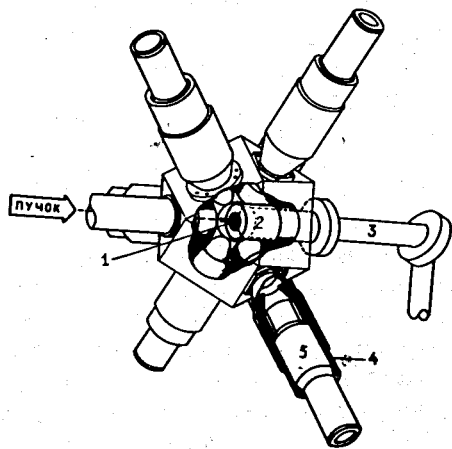
В первой главе далее приводится компиляция данных о выходах и других характеристиках рентгеновского излучения в реакциях с тяжелыми ионами^{d, e)}. В частности, показано, что множественность КХ-квантов слабо зависит от энергии возбуждения составных ядер.

Во второй главе представлены проведенные в настоящей работе некоторые методические исследования и дано описание созданной многодетекторной установки "Еж", конструкция которой позволяет регистрировать γ -кванты с помощью двенадцати γ -детекторов, ориентированных подобно иглам ежа в разных направлениях пространства, и также одновременно позволяет поместить детектор КХ-излучения вплотную к мишени, см. рис.1. Внутри камеры рассеяния, рядом с мишенью, помещались кремниевые детекторы осколков деления составных ядер. Для регистрации "мягких" γ -квантов использовались промышленно выпускаемые детекторы ВДЭГ2-23, изготовленные из сцинтиллятора NaI(Tl) $\varnothing 63 \times 63 \text{ мм}$ и ФЭУ-82. Эффективность регистрации γ -квантов была практически постоянна в диапазоне энергий E_{γ} от 200 кэВ до 2000 кэВ и равна $\epsilon = (3,0 \pm 0,5) \times 10^{-3}$. Показано, что одновременное увеличение числа счетчиков и уменьшение эффективности регистрации γ -квантов каждым счетчиком в отдельности позволило повысить точность спектрометра по определению второго момента (дисперсии) распределения по множественности γ -квантов, кроме того, стало возможным поднять загрузочные характеристики установки.

ВЭГК регистрировались γ -спектрометрами на основе сцинтилляторов NaI(Tl) и $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ -германата висмута (ВГО), один из них производства СССР. Для уменьшения вклада быстрых нейтронов, основная доля которых вылетает вперед, γ -спектрометры располагались под

Рис. 1. Конструкция установки "Еж":

- 1-мишенный узел;
- 2-опорный стакан;
- 3-криостат с Ge-детектором;
- 4-свинцовая защита γ -детекторов;
- 5-сцинтилляционные γ -детекторы.



задними углами по отношению к направлению пучка и защищались слоем парафина с 3% примесью бора толщиной около 100 мм. В таблице 1 обобщены основные характеристики использованных в настоящей работе γ -спектрометров. Соответствующие данные получены нами в рамках методических исследований функции отклика на моноэнергетические γ -кванты использованных спектрометров в резонансных (p, γ)-реакциях.

Были исследованы также чувствительность спектрометров к фоновому излучению, в частности, исследовались эффективности регистрации быстрых нейтронов от Pu(Be)-нейтронного источника. В этих исследованиях проводилось отделение нейтронов от γ -квантов по времяпролетной методике. Экспериментальное значение вероятности регистрации нейтрона, попавшего в γ -спектрометр, равно $(16 \pm 2)\%$ для кристалла NaI(Tl), а для vgo $\varnothing 46 \times 60$ мм и vgo $\varnothing 75 \times 25$ мм равно $(11 \pm 2)\%$ и $(4 \pm 1)\%$ соответственно. Подробно был исследован и учитывался при обработке данных вклад фоновых процессов в экспериментальные спектры, см. рис. 2.

Описана модификация традиционного подхода к измерению

ТАБЛИЦА 1

Эффективности регистрации γ -квантов и энергетическое разрешение детекторов в зависимости от энергии E_0

Энергия E_0 , МэВ	Эффективность регистр. $\varepsilon(E_0)$, %			Энергетическое разрешение, %		
	а	б	в	а	б	в
4,43	38 \pm 2	43 \pm 2	28 \pm 3	7,0 \pm 0,1	9,2 \pm 0,1	12,6 \pm 0,2
6,13	36 \pm 3	38 \pm 2	23 \pm 4	6,6 \pm 0,1	7,4 \pm 0,1	11,1 \pm 0,2
10,8	30 \pm 3	30 \pm 3	18 \pm 4	5,9 \pm 0,2	5,9 \pm 0,2	9,6 \pm 0,2
17,23	26 \pm 4	21 \pm 5	15 \pm 5	4,7 \pm 0,3	3,0 \pm 0,5	6,1 \pm 0,2

Размеры спектрометров и вид сцинтиллятора:

а/ NaI(Tl) $\varnothing 150 \times 100$ мм с ФЭУ-49Б,

б/ vgo $\varnothing 46 \times 60$ мм с ФЭУ-143,

в/ vgo $\varnothing 75 \times 25$ мм с ФЭУ ЕМ1-9856.

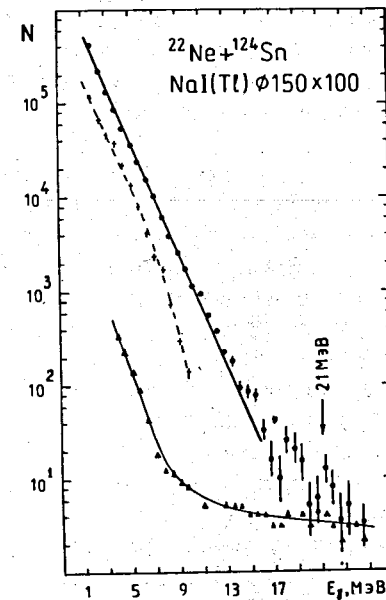


Рис. 2

Результаты измерений БЭГК в реакции с ионами ^{22}Ne (178 МэВ) на мишени ^{124}Sn (точки), без мишени (крестики), в отсутствие пучка (треугольники).

"инклюзивных" спектров ВЭГК, метода "γ-старта", которая позволила сильно подавить вклад регистрации "космических" ливней в экспериментальные спектры ВЭГК, см. треугольники на рис. 2.

Описан использованный в работе метод сравнения измеренных спектров ВЭГК с расчетными на основе знания функций отклика сцинтилляционных γ-спектрометров. Ввиду использования часто меняющейся геометрической конфигурации спектрометра-мишени автором диссертации разработан оригинальный алгоритм расчета функций отклика, который позволил быстро проводить расчеты на мини-ЭВМ СМ-4 для конкретных условий проводимых экспериментов по исследованию ВЭГК. Для проверки правильности расчета проведено сравнение с экспериментальными данными, полученными нами в резонансных (p, γ)-реакциях, а также с данными из литературы.

Во второй главе приведен также сравнительный анализ характеристик традиционных сцинтилляторов: NaI(Tl), CsI(Tl) и свинцового стекла SF₅, а также двух новых сцинтилляторов: VGO и BaF₂-фторид бария, технология производства которых в виде больших кристаллов освоена только недавно.

Разработана электронная схема сбора экспериментальных данных установки "Еж", которая составлена как из промышленно выпускаемых блоков, так и из специальных блоков, разработанных в ЛЯР ОИЯИ. Кратко описана структура оригинального программного обеспечения сбора данных для сложных корреляционных экспериментов в режиме "в линию". Оно было разработано автором диссертации и использовалось на мини-ЭВМ типа СМ-3 и СМ-4.

В третьей главе описана серия экспериментов по изучению выхода ВЭГК, сопровождающих деление высоковозбужденных ядер V_1^{*} и образование испарительных остаточных ядер, близких к ядру $^{132}\text{Nd}^{*}$.

Известно, что в реакциях слияния тяжелых ядер существенную роль играет деление составных ядер на два фрагмента. Оказалось, что можно достаточно четко выделить канал деления на основе определения энергии зарегистрированного в поверхностно-барьерном кремниевом детекторе одного из осколков. Схема эксперимента показана на рис. 3, а параметры реакций приведены в таблице 2. Проведенные оценки значения угла между направлением спина и плоскостью деления составных ядер в реакциях Ag+Tb показали, что с вероятностью около 99% спин лежит в конусе, образующая которого составляет угол $\pi/10$ с осью, перпендикулярной плоскости разлета осколков ядра V_1^{*} . Таким образом, ВЭГК, зарегистрированные в совпадении с детектором d_{f2} или d_{f1} , вылетали по направлению или перпендикулярно спину составного ядра. Отношение их

Таблица 2

Параметры реакций и образованного составного ядра V_1^{*}

реакция	$E_{\text{иона}}$ [МэВ]	$l_{\text{гр}}$ [ħ]	сост. ядро	$E_{\text{ся}}^{*}$ [МэВ]	$l_{\text{ср}}$ [ħ]
$^{15}\text{N} + ^{192}\text{Os}$	147	86	$^{207}\text{V}_1$	120	72
$^{22}\text{Ne} + ^{181}\text{Ta}$	155	85	$^{203}\text{V}_1$	100	72
$^{40}\text{Ar} + ^{159}\text{Tb}$	220	114	$^{209}\text{V}_1$	90	80
$^{40}\text{Ar} + ^{159}\text{Tb}$	300	161	$^{209}\text{V}_1$	156	123

$l_{\text{гр}}$ - максимальный угловой момент для ядерной реакции,

$l_{\text{ср}}$ - оценка максимального углового момента составного ядра,

$E_{\text{ся}}^{*}$ - энергия возбуждения составного ядра.

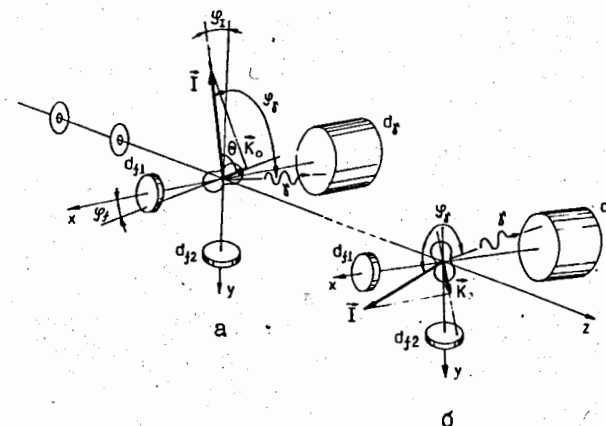
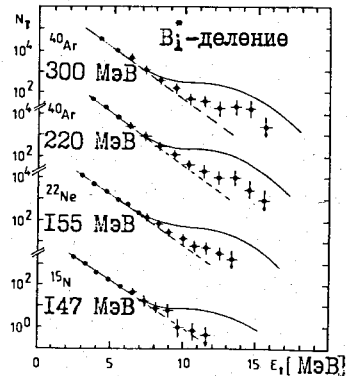


Рис. 3

Конфигурация детекторов для γ-квантов, наблюдаемых в γ-спектрометре d_{γ} , в совпадении с осколком деления составного ядра, регистрируемым: а/ - детектором d_{f1} , б/ - детектором d_{f2} . На рисунке также показаны ориентация спина I делящегося ядра, проекция спина I на его ось симметрии K_0 и т. д.

выходов в области $E_{\gamma} = 10-16$ МэВ определено экспериментально для обеих энергий ионов аргона и равно $R = (2,0 \pm 0,8)$, т.е. ВЭГК испускаются преимущественно по направлению спина составного ядра. Следует отметить, что для γ -квантов, соответствующих распаду однокомпонентного ГДР, характерно изотропное распределение выхода. Поэтому результат эксперимента свидетельствует о расщеплении ГДР хотя бы на две компоненты. Поэтому нами была разработана оригинальная модификация "стандартной" модели испускания ВЭГК из составных ядер, которая учитывает расщепление ГДР* в быстровращающихся возбужденных составных ядрах в зависимости от значения их углового момента. В рамках этого подхода удалось количественно объяснить наблюдаемое значение анизотропии R.

Рис. 4
Спектры γ -квантов, наблюдаемых в совпадении с осколком деления составного ядра v_1^* , точки - эксперимент, сплошные линии - результаты теоретических расчетов, см. текст.



Полученные спектры γ -квантов, наблюдаемые в совпадении с осколком деления v_1^* , для исследуемых реакций показаны на рис. 4. Расчетные спектры ВЭГК, которые являются суммой вкладов γ -квантов, испущенных из составного ядра до деления и испускаемых непосредственно из осколков деления, получены для параметров ГДР*, равных параметрам ГДР на основных состояниях возбужденных ядер. Расчет проводился с помощью модифицированной программы CASCADE¹⁾, проверялось соответствие расчетных и экспериментальных значений сечений деления и испарительных продуктов для подобных реакций. Однако предсказываемое увеличение выхода ВЭГК с ростом энергии возбуждения составного ядра, см. гл. I, в эксперименте не наблюдается. С другой стороны, проведенный анализ экспериментальных

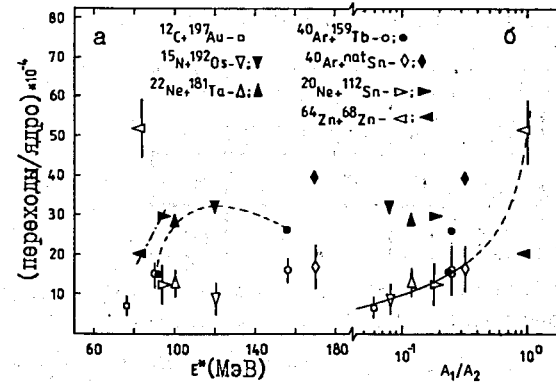


Рис. 5
Выходы ВЭГК в области энергий 12-14 МэВ, пересчитанные на одно образованное составное ядро в исследуемых реакциях, $Y_{\gamma}^{расч}$ - закрытые символы, $Y_{\gamma}^{эксп}$ - открытые символы, см. текст, в зависимости: а/ от энергии возбуждения составного ядра, б/ от отношения масс налетающего иона и ядра мишени, $A_{ион}/A_{миш}$

данных показывает, что имеется корреляция между выходом ВЭГК и параметром входного канала реакции, отношением масс налетающего иона и ядра мишени, см. рис. 5. Сильно различаются значения этого параметра в изучаемых нами реакциях Ne+Sn и Zn+Zn, в канале слияния которых образуются составные ядра с близкой по величине энергией возбуждения, см. таблицу 3. Так как значения 1_{ev}^* близки для обеих реакций, ВЭГК, наблюдаемые в выделенном канале образования остаточных ядер, в обеих реакциях должны соответствовать наборам составных ядер, которые минимально отличаются по параметрам, и, следовательно, если ВЭГК испускаются в основном из составных ядер, их спектры в обоих случаях должны быть одинаковыми. В проведенных экспериментах для выделения канала образования остаточных ядер использовалась оригинальная, разработанная нами методика, метод "X-старта". Ее суть состоит в регистрации характеристического рентгеновского излучения остаточных ядер.

Таблица 3

Характеристики двух реакций, идущих с образованием составного ядра $^{132}\text{Nd}^*$

реакция	$E_{\text{иона}}$ [МэВ]	l_{gr} [h]	$E_{\text{с\ddot{y}}}$ [МэВ]	l_{cr} [h]	l_{ev} [h]
$^{64}\text{Zn} + ^{68}\text{Zn}$	290	97	84	76	66
$^{20}\text{Ne} + ^{112}\text{Sn}$	110	61	68	48	48

- l_{gr} — максимальный угловой момент для ядерной реакции,
- l_{cr} — оценка максимального углового момента составного ядра,
- l_{ev} — оценка максимального углового момента остаточного ядра,
- $E_{\text{с\ddot{y}}}$ — энергия возбуждения составного ядра.

Схема эксперимента показана на рис. 1. Была достигнута высокая геометрическая эффективность рентгеновского детектора, значение телесного угла составило $\approx 3,47$ ср.

В отличие от приведенных выше теоретических рассуждений экспериментально наблюдалось существенное увеличение выхода ВЭГК в реакции $\text{Zn} + \text{Zn}$ по сравнению с реакцией $\text{Ne} + \text{Sn}$, см. рис. 5. В реакции $\text{Zn} + \text{Zn}$ также наблюдалось смещение центра пиков, соответствующей КК-переходам для ядер, близких по z , к составному ядру, т.е. уменьшение среднего значения z остаточных ядер с ростом энергии ВЭГК, см. рис. 6.

В четвертой главе

приведены результаты исследований характеристик эмиссии ВЭГК в реакциях с тяжелыми ионами и их анализ. Проведены исследования среднего углового

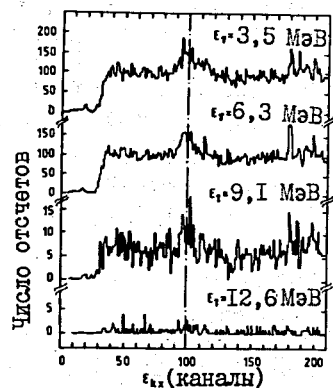


Рис. 6

Спектры рентгеновского детектора, измеренные в совпадении с γ -квантами указанных на рисунке энергий в реакции $\text{Zn} + \text{Zn}$.

момента $\langle l \rangle$, соответствующего испусканию ВЭГК в реакциях $^{64}\text{Zn}(290 \text{ МэВ}) + ^{68}\text{Zn}$ и $^{20}\text{Ne}(110 \text{ МэВ}) + ^{112}\text{Sn}$ на основе определения множественности мягких γ -квантов, см. рис. 7. Видно, что ход

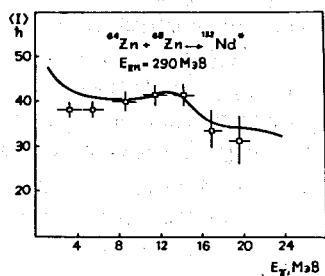
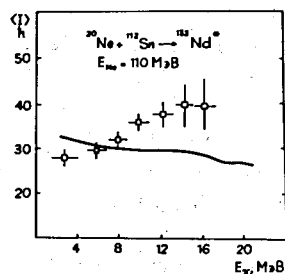


Рис. 7

Зависимость среднего углового момента $\langle l \rangle$ от энергии γ -квантов в указанных на рисунке реакциях, точки — эксперимент, сплошная линия — расчет.

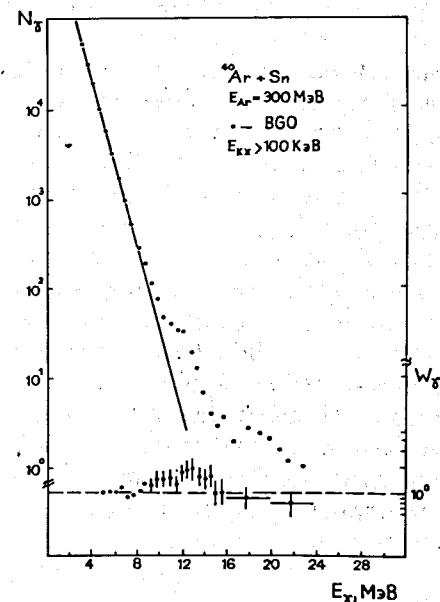


Рис. 8

Верхняя часть: γ -спектр для реакции $^{40}\text{Ar}(300 \text{ МэВ}) + ^{132}\text{Sn}$, наблюдаемый в совпадении с "мягкими" γ -квантами, сплошная линия — продолжение низкоэнергетической части спектра; нижняя часть: зависимость отношения выходов γ -квантов $W_{\gamma} = Y_{\gamma}(90^{\circ}) / Y_{\gamma}(0^{\circ})$ в реакции $^{40}\text{Ar}(300 \text{ МэВ}) + ^{132}\text{Sn}$.

экспериментальных данных согласуется с расчетом, основанным на предположении об эмиссии ВЭГК из расщепленных ГДР* (смотри выше), только в случае реакции $Zn+Zn$. Показано, что увеличение значения $\langle I \rangle$ с ростом энергии E_γ , наблюдаемое в реакции $Ne+Sn$, можно объяснить, предполагая вклад неупругих каналов реакции в эмиссию ВЭГК, для которых характерны большие значения углового момента $\langle I \rangle$.

В реакции $^{40}Ar(300 \text{ МэВ}) + ^{82}TlSn$ проведены исследования вклада разных каналов реакций в "инклюзивные" γ -спектры, т.е. спектры, полученные с использованием методики " γ -старта", см. рис. 8. Основной отличительной особенностью показанного спектра является наличие двух изломов при энергии около 10 МэВ и 16 МэВ. Следует напомнить, что в этой реакции, помимо составных ядер эрбия, образуются также возбужденные ядра в канале глубоконеупругих взаимодействий. Результаты исследования рентгеновского спектра, соответствующего испусканию ВЭГК, представлены на рис. 9. Видно, что для $E_\gamma < 4 \text{ МэВ}$ в КХ-спектре в случае истинных совпадений наблюдается на сплошном фоне от γ -квантов с $E_\gamma > 100 \text{ кэВ}$ группа КХ-переходов, соответствующих остаточным ядрам европия, диспрозия и др. Одновременно группа КХ-переходов, соответствующих ядрам олова и др., наблюдается с одинаковой интенсивностью в КХ-спектре как в случае истинных, так и в случае случайных совпадений, что свидетельствует о малом вкладе соответствующего канала реакции.

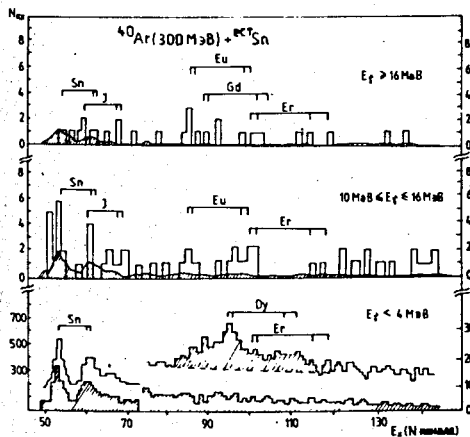


Рис. 9
КХ-спектры для реакции $^{40}Ar(300 \text{ МэВ}) + ^{82}TlSn$, наблюдаемые в истинном совпадении (верхняя кривая) и в случайном совпадении (нижняя кривая) с γ -квантами для трех диапазонов энергий γ -излучения.

В соответствии с предположением об испускании ВЭГК в основном из составных ядер в КХ-спектре, соответствующем энергиям γ -квантов $10 \text{ МэВ} \leq E_\gamma \leq 16 \text{ МэВ}$, должны доминировать КХ-переходы, характеристические для продуктов канала полного слияния реакции $Ar+Sn$. Однако это не так, и в эксперименте наблюдаются также КХ-переходы, характеристические для мишенеподобных продуктов. Итак, превышение выхода γ -квантов, связанных с распадом составного ядра, над экспоненциальным спадом наблюдается во всей области энергий $E_\gamma > 10 \text{ МэВ}$, см. рис. 9. В то же время соответствующее превышение для ядер, близких к ядру мишени, наблюдается в основном только в области $E_\gamma = 10-16 \text{ МэВ}$.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные автором в диссертационной работе.

1. Создана многодетекторная установка "Еж" для измерения характеристик ВЭГК, множественности соответствующих "мягких" γ -квантов в выделенном канале реакций с тяжелыми ионами. Созданное программное обеспечение сбора многопараметровой информации позволило проводить с высокой эффективностью сложные корреляционные эксперименты на пучках тяжелых ионов ускорителей ЛЯР ОИЯИ.

2. Изучены характеристики γ -спектрометров на основе нового сцинтиллятора $V_4Ge_3O_{12}$ -германата висмута (ВГО). Показано их преимущество для проведения экспериментов по изучению эмиссии ВЭГК в присутствии сильного фона по сравнению со спектрометрами, построенными на традиционных $NaI(Tl)$ -сцинтилляторах.

3. Измерены функции отклика используемых γ -спектрометров для нескольких высокоэнергетических переходов в резонансных (p, γ)-реакциях. Разработан оригинальный алгоритм, который позволил с достаточной точностью рассчитывать функции отклика для сцинтилляционных γ -спектрометров на мини-ЭВМ.

4. Разработаны оригинальные методики идентификации конечных продуктов реакций тяжелых ионов по их характеристическому рентгеновскому излучению и на основе регистрации осколков деления составного ядра, позволившие проводить измерения спектров ВЭГК в канале образования составных ядер.

5. Предложена методика определения анизотропии вылета ВЭГК, $R = Y_2/Y_1$, относительно плоскости разлета осколков деления составного ядра. С ее помощью в реакциях $^{40}Ar(220 \text{ МэВ}) + ^{159}Tb$ и $^{40}Ar(300 \text{ МэВ}) + ^{159}Tb$ получено значение R , свидетельствующее о преимущественном вылете ВЭГК с $E_\gamma = 10-16 \text{ МэВ}$ по направлению углового момента составного ядра.

6. Проведен анализ экспериментальных данных по анизотропии выхода ВЭГК в рамках общепринятых представлений о γ -распаде изовекторных гигантских дипольных резонансов (ГДР*), основанных на возбужденных состояниях составных ядер. Согласие с экспериментом получается, если только предположить расщепление ГДР*, например, как следствие деформации быстровращающихся высоковозбужденных составных ядер.

7. На основе экспериментальных данных получена систематика выходов ВЭГК, соответствующих образованию составных ядер $^{68}\text{Zn}^*$ и $^{132}\text{Nd}^*$ в широком диапазоне энергий возбуждения и угловых моментов для реакций $^{15}\text{N}(147 \text{ МэВ}) + ^{192}\text{Os}$, $^{22}\text{Ne}(155 \text{ МэВ}) + ^{181}\text{Ta}$, $^{40}\text{Ar}(220 \text{ МэВ}) + ^{159}\text{Tb}$, $^{40}\text{Ar}(300 \text{ МэВ}) + ^{159}\text{Tb}$, $^{20}\text{Ne}(110 \text{ МэВ}) + ^{112}\text{Sn}$ и $^{64}\text{Zn}(290 \text{ МэВ}) + ^{68}\text{Zn}$. Расчет, основанный на предположении о статистической природе испускания ВЭГК из нагретых составных ядер (смотри выше), привел к теоретическим значениям выходов, находящимся в явной зависимости от энергии возбуждения составных ядер, т.е. к результатам, качественно отличающимся от полученных нами экспериментальных данных. Одновременно экспериментально обнаружено увеличение выхода ВЭГК с ростом параметра входного канала реакции A_1/A_2 - отношением масс налетающего иона и ядра мишени, что свидетельствует о возможном вкладе в испускание ВЭГК других механизмов, соответствующих процессам, ведущим к образованию составных ядер.

8. Выделение конечного канала в реакции $^{40}\text{Ar}(300 \text{ МэВ}) + \text{ест}\text{Sn}$ показало, что "бамп", который наблюдается в случае применения методики " γ -старта", состоит из нескольких компонент, соответствующих различным выходным каналам реакции. Обнаружен существенный вклад каналов реакции, связанных с образованием ядер, близких к ядру-мишени, в области энергий γ -излучения $E_\gamma = 10+16 \text{ МэВ}$.

9. На основании данных, полученных из экспериментов по определению зависимости множественности "мягких" γ -квантов от энергии ВЭГК в реакциях $^{64}\text{Zn}(290 \text{ МэВ}) + ^{68}\text{Zn}$ и $^{20}\text{Ne}(110 \text{ МэВ}) + ^{112}\text{Sn}$, сделан вывод о перераспределении вклада различных каналов реакции в спектр ВЭГК в зависимости от параметра A_1/A_2 .

10. Получена зависимость анизотропии выхода ВЭГК от их энергии для реакций $^{40}\text{Ar}(300 \text{ МэВ}) + \text{ест}\text{Sn}$ и $^{22}\text{Ne}(178 \text{ МэВ}) + \text{ест}\text{Sn}$, на основании которой сделан вывод, что в области энергии $E_\gamma = 10+16 \text{ МэВ}$ существенный вклад может дать γ -излучение из когерентных состояний ГДР, образованных на начальных этапах реакции.

Основные результаты, представленные в диссертации, опубликованы в следующих работах:

1. V.V.Kamanin, A.Kugler, T.I.Mikhailova, Yu.E.Penionzhkevich, Yu.G.Sobolev and N.V.Yeremin. Study of high energy gamma-rays in heavy ion reactions. - JINR Rapid Communications N 8-85, Dubna, 1985, p.18-28.
2. В.В.Каманин, А.Кутлер, Ю.Г.Соболев, В.Ф.Стрижов и А.С.Фомичев. Сравнительный анализ характеристик кристаллов NaI(Tl) и $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ при регистрации нейтронов и гамма-квантов. - ПТЭ, 1988, №6, с.61-64.
3. Каманин В.В., Кутлер А., Пенионжкевич Ю.Э. и Соболев Ю.Г. Вклад различных каналов в эмиссию γ -квантов с $E_\gamma \geq 10 \text{ МэВ}$ в реакции $\text{ест}\text{Sn} + ^{40}\text{Ar}$ при энергии ионов 300 МэВ. - Изв. АН СССР, 1986, т.50, №10, с.1929-1935.
4. V.V.Kamanin, A.Kugler, Yu.E.Penionzhkevich, Yu.G.Sobolev, A.S.Fomichev and I.David. Comparison of the yields of high energy gamma-rays with $E_\gamma \geq 10 \text{ MeV}$ measured in the reactions $\text{nat}\text{Sn} + ^{40}\text{Ar}$ and $^{68}\text{Zn} + ^{64}\text{Zn}$. - Zeitschrift für Phys. A, 1987, v.327, p.109-113.
5. В.В.Каманин, А.Кутлер, Ю.Г.Соболев, А.С.Фомичев. Выделение канала реакции с помощью КХ-детектора в экспериментах по изучению жесткой компоненты γ -излучения. - Дубна, 1987. -13с. (Сообщение /Объед. ин-т ядер. исслед.: P15-87-783).
6. В.В.Каманин, А.Кутлер, Ю.Э.Пенионжкевич, Ю.Г.Соболев и А.С.Фомичев. Влияние массовой асимметрии во входном канале реакций с тяжелыми ионами на эмиссию высокоэнергетических гамма-квантов. - В кн.: Международная школа-семинар по физике тяжелых ионов. - Дубна, 1987. - с.489-495. (Объед. ин-т ядер. исслед.: Д7-87-68).
7. Каманин В.В., Кутлер А., Пенионжкевич Ю.Э., Соболев Ю.Г., А.С.Фомичев, И.С.Баткин, С.Н.Ершов, С.П.Иванова, И.В.Копытин. Исследование спектров высокоэнергетических γ -квантов в реакциях с ионами ^{22}Ne (178 МэВ). - В кн.: Тез. док. xxxviii Совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Баку, 1988. Л.: Наука, 1988, с.373.
8. Кутлер А. Программное обеспечение многопараметровых экспериментов на установке ДЭМАС-МУЛЬТИ с использованием ЭВМ типа СМ-3. - Дубна, 1984. -12 с. (Сообщение /Объед. ин-т ядер. исслед.: 10-84-420).
9. А.Кутлер, Т.И.Михайлова. Угловое распределение жестких гамма-квантов, испущенных в реакциях тяжелых ионов. - Дубна, 1986. -12с. (Сообщение /Объед. ин-т ядер. исслед.: P7-86-306).

Цитированные работы:

- a) F.E.Bertrand, J.R.Beene and T.P.Sjoereen. Heavy Ion excitation and photon decay of giant resonances. -Journ. de Phys.C4, 1984, Tom 45, p.99-114.
- b) A.Lukasiak and W.Norenberg. Precompound giant quadrupole gamma rays in heavy-ion fusion reactions. In: Ges. f. Schwerionenfor. Scientific Report 1982. Darmstadt, 1985. p.134.
- c) Newton J.O., Herskind B., Diamond R.M., Dines E.L., Draper J.E., Lindenberg K.H., Schuck C., Shih S. and Stephens F.S. Observation of Giant Dipole Resonances Built on States of High Energy and Spin. Phys.Rev.Lett., 1981, v.46, p.1383-1386.
- d) Szoghy I.M. Emission of Prompt X-Rays Following the Fusion of Heavy Ions. -In: Proc. of International Symposium on In-Beam Nuclear Spectroscopy, Debrecen, 1984, p.100-108.
- e) Sujkowski Z., Balster G.J., Chmielewska D., Wilschut H.W. KX -Ray Multiplicities for Rare Earth Atoms Produced in (H.I., xn). Nuclear Reaction. -Phys.Lett.B, 1983, v.133, p.53-56.
- f) F.Puhlhofer. On the Interpretation of Evaporation Residua Mass Distributions in Heavy -Ion Induced Fusion Reactions. -Nucl.Phys.A, 1977, v.280, p.267-284.

Рукопись поступила в издательский отдел
3 марта 1989 года.