

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Р-971

7-84-539

УДК 539.172.17

РЮДИГЕР Юрген

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ  
УГЛОВЫХ МОМЕНТОВ ЯДЕР  
В РЕАКЦИЯХ С ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ,  
СОПРОВОЖДАЮЩИХСЯ ВЫЛЕТОМ  
ЛЕГКИХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Специальность: 01.04.16 – физика атомного ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 1984



Цель работы. 1) Создание методики для проведения корреляционных экспериментов на пучках тяжелых ионов, основанной на измерении множественности гамма-квантов, регистрируемых в совпадении с заряженной частицей.

2) Проведение экспериментов по определению угловых моментов остаточных ядер, образующихся после вылета легких заряженных частиц.

Научная новизна. Разработана высокочувствительная методика для одновременного исследования основных каналов реакции, сопряженных с вылетом заряженных частиц, позволяющая в выделенном канале реакции определить величину множественности гамма-квантов в зависимости от энергии заряженной частицы при регистрации ее под углами  $\theta \geq 0^\circ$ .

Впервые измерена множественность гамма-лучей и ее дисперсия в реакции  $Ta+^{22}Ne$  в канале эмиссии высокоэнергетических альфа-частиц до энергий  $E_\alpha \approx 80$  МэВ. Проведены измерения множественности гамма-квантов в зависимости от энергии заряженных частиц в реакциях  $Ta+^{22}Ne$  и  $Ir+^{12}C$ , приводящих к образованию одного и того же по Z составного ядра, с выделением канала реакции по характеристическому рентгеновскому излучению остаточных ядер. Определена анизотропия осколков деления остаточных ядер и измерен выход вторичных заряженных частиц после вылета альфа-частиц под углом  $\theta_\alpha = 0^\circ$  в реакции  $Ta+^{22}Ne$ . Определены значения угловых моментов остаточных ядер, а также значения входных угловых моментов для реакций с вылетом альфа-частиц и ядер лития ( $+^6Li$ ). На основе корреляционных экспериментов для реакции  $Ta+^{22}Ne$  впервые определен вклад отдельных каналов в полный выход эмиссии альфа-частиц.

Практическая ценность работы. Созданная экспериментальная методика может быть использована для проведения корреляционных измерений продуктов реакций с целью изучения механизмов ядерных реакций с тяжелыми ионами. Так, она в настоящее время используется при изучении жесткой компоненты гамма-излучения в реакциях с тяжелыми ионами.

Полученные экспериментальные результаты определения множественности гамма-квантов в совпадении с заряженными частицами могут быть использованы и уже используются для теоретической интерпретации механизма реакций с вылетом легких частиц.

Результаты изучения механизма вылета быстрых легких частиц свидетельствуют о возможности получения в реакциях с тяжелыми ионами ядер с определенными значениями энергии возбуждения и углового момента, что может быть использовано при изучении структуры ядер в этих состояниях.

Апробация работы. Материалы, вошедшие в диссертацию, докладывались на Совещании по экспериментальным установкам У-400 и физической программе первоочередных экспериментов на них (Дрезден, ГДР, 1982 г.), на XI Международном совещании по общим свойствам ядер и ядерным возбуждениям (Хиршегг, Австрия, 1983 г.), на 15-й Летней школе по ядерной физике (Миколайки, ПНР, 1983 г.), на международной школе-семинаре по физике тяжелых ионов (Алушта, 1983 г.) и на XXXIV Совещании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Алма-Ата, 1984 г.).

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1. Созданная высокочувствительная методика для измерения множественности гамма-квантов в выделенном канале реакции является весьма эффективным способом определения угловых моментов ядер, образующихся в реакциях с тяжелыми ионами.

2. Использование этой корреляционной методики позволяет определить значения множественности гамма-квантов и ее дисперсии в канале вылета легких заряженных частиц в широком диапазоне их энергий.

3. Определение множественности гамма-квантов для  $xn$ -канала распада остаточных ядер, образующихся в результате вылета легких заряженных частиц, позволяет получить информацию о входных угловых моментах реакции, связанных с испусканием этих частиц. Идентификация остаточных ядер в области масс  $A \approx 200$  с помощью характеристического рентгеновского излучения существенно повышает чувствительность эксперимента по сравнению с их регистрацией по низколежащим гамма-переходам.

4. Сумма вкладов отдельных каналов, соответствующих двухтельному процессу взаимодействия, показывает, что этому типу реакции отвечает больше 50% всех альфа-частиц, испущенных в реакции  $Ta+^{22}Ne$  (155 МэВ) под углом  $\theta_\alpha = 0^\circ$ .

5. Величины входных угловых моментов, связанных с вылетом легких частиц под углом  $\theta = 0^\circ$ , не зависят от энергии вылетающих частиц и не зависят от выбора комбинации ядер мишени и иона, приводящей к образованию одних и тех же остаточных ядер после вылета альфа-частиц.

6. Величины угловых моментов остаточных ядер в канале деления реакции  $Ta+^{22}Ne$ , сопровождающейся вылетом альфа-частиц с энергиями  $20 \text{ МэВ} \leq E_{\alpha}^{Ц.М.} \leq 50 \text{ МэВ}$ , в сравнении с величинами угловых моментов в  $xn$ -канале этой реакции свидетельствуют о широком распределении углов вылета альфа-частиц с поверхности ядра. В связи с этим при наблюдении альфа-частиц под углом  $\theta_\alpha = 0^\circ$  в  $\alpha f$ -канале реакции можно сделать вывод об относительно больших временах взаимодействия (порядка половины времени оборота составной системы) до испускания альфа-частиц в обла-

сти  $20 \text{ МэВ} \leq E_{\alpha}^{Ч.М.} \leq 50 \text{ МэВ}$  в реакции  $\text{Ta} + {}^{22}\text{Ne}$  при энергии ионов  $E = 155 \text{ МэВ}$ .

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Она содержит 104 страницы машинописного текста, 42 страницы с 42 рисунками и 2 таблицами и список литературы из 145 наименований, всего 160 страниц.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследований и кратко изложено основное содержание отдельных глав. Приведены основные результаты, полученные автором в данной работе.

В **первой главе** рассматриваются преимущества реакций с тяжелыми ионами для получения ядер с высоким угловым моментом. Рассмотрены некоторые методы экспериментального определения угловых моментов ядер: по сечениям продуктов реакций полного слияния, по угловому распределению продуктов распада составных ядер (испарительных частиц и осколков деления), по измерению множественности и полной энергии гамма-квантов. Показаны преимущества метода измерения множественности гамма-квантов для определения угловых моментов ядер.

Рассмотрено современное состояние исследований реакций с вылетом быстрых легких частиц при энергиях ионов до 20 МэВ/нуклон. Дан анализ результатов определения угловых моментов, полученных разными авторами, и сделан вывод о необходимости проведения систематических исследований механизма вылета быстрых легких частиц в реакциях с тяжелыми ионами. Показано, что вопрос об угловых моментах остаточных ядер после вылета быстрой легкой частицы является чрезвычайно важным при изучении механизма этих реакций.

Вторая глава посвящена вопросам методики эксперимента. Рассмотрены условия, которым должна отвечать высокочувствительная корреляционная методика для измерения множественности гамма-квантов и дано обоснование для параметров установки "ДЭМАС-МУЛЬТИ", созданной в ЛЯР ОИЯИ для проведения корреляционных измерений по исследованию механизма ядерных реакций. На **рис. 1** показан схематический вид камеры рассеяния установки. У входа в камеру находилась диафрагма, закрытая тонкой фольгой из золота для измерения энергии и числа частиц пучка по

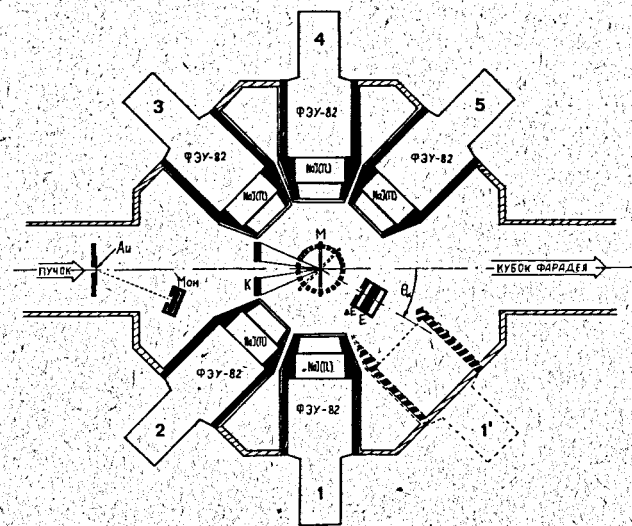


Рис. 1. Схематический вид камеры рассеяния.

упруго рассеянному иону, регистрированному в кремниевом детекторе. В центре камеры находилась мишень, вокруг которой располагалось пять сцинтилляционных гамма-детекторов. Как видно из **рис. 2**, эффективность регистрации гамма-квантов этими детекторами была практически постоянной в широком интервале энергий гамма-квантов  $E_{\gamma} = 200 - 2000 \text{ кэВ}$ , что имеет большое значение для обработки экспериментальных данных. Для уменьшения фона и вероятности перерассеяния гамма-квантов из одного в другой детектор каждый сцинтиллок находился в защите из свинца

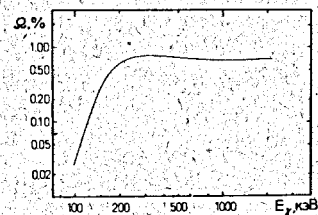


Рис. 2. Полная эффективность регистрации гамма-излучения для  $\text{NaJ(Tl)}$ -детекторов в зависимости от энергии  $E_{\gamma}$ .

со средней толщиной стенок 1 см. Заряженные частицы регистрировались вращаемым вокруг мишени телескопом из тонкого ( $\Delta E$ ) и толстого ( $E$ ) кремниевых детекторов, а также (под большими углами) кольцевым кремниевым детектором (К). Перпендикулярно к плоскости чертежа (**рис. 1**) располагались детектор рентгеновского излучения из сверхчистого германия или дополнительные  $\text{NaJ(Tl)}$ -детекторы.

Далее в этой главе описана система регистрации и набора экспериментальной информации, построенная на основе блоков в стандарте КАМАК и работающая "в линию" с ЭВМ СМ-3. Расположение всей электроники, включая крейт КАМАК, в непосредственной близости от экспериментальной аппаратуры имело некоторые преимущества, основными из которых являлись уменьшение вероятности электромагнитных наводок на аналоговые сигналы и хорошая помехозащищенность при передаче цифровой информации на большое расстояние кабелем из скрученных пар проводов.

Описаны методы обработки экспериментальной информации, использованные в настоящей работе. Множественность гамма-квантов определялась из спектров различной кратности совпадений с гамма-квантами по стандартной методике [1]. Показана необходимость учета случайных совпадений между гамма-детекторами и детекторами для выделения канала реакции. Впервые получены выражения для всех порядков случайных совпадений, которые приводят к искажению распределения спектров выделенного канала по различным кратностям совпадений с гамма-детекторами. Обозначив истинные средние вероятности  $k$ -кратных совпадений  $\langle P_k \rangle$  и случайных совпадений  $\langle R_k \rangle$ , получим, что экспериментально наблюдаемые средние вероятности  $k$ -кратных совпадений

$$\langle P_k \rangle_{\text{экс}} = \langle P_k \rangle \left[ 1 - \sum_{n=1}^{k_{\text{max}}-k} \langle R_n \rangle \right] + \sum_{l=0}^{k-1} [\langle P_l \rangle \cdot \langle R_{k-l} \rangle],$$

$$\sum_{k=0}^{k_{\text{max}}} \langle R_k \rangle = 1 \quad \text{для всех } n = 1, \dots, N, \quad k_{\text{max}} = k_{\text{max}} - (N-n) \quad (1)$$

Здесь  $\langle R_k \rangle$  - распределение случайных импульсов по кратностям  $k$  в случае  $n$  гамма-детекторов,  $N$  - число гамма-детекторов установки. Связь измеренного распределения  $\langle R_k \rangle$  с распределением  $\langle P_k \rangle$  определяется рекурсивными формулами:

$$\langle R_k \rangle = \langle P_k \rangle \quad \text{для всех } k,$$

$$\langle R_k \rangle = \langle R_k \rangle \frac{n-k}{n} + \langle R_{k+1} \rangle \frac{k+1}{n}. \quad (2)$$

После получения истинных величин  $\langle P_k \rangle$  определялись значения гамма-множественности и ее дисперсии. Анализ влияния случайных совпадений показал, что пренебрежение этим эффектом может привести к существенным искажениям результатов.

Разработан и успешно применен в экспериментах с углом регистрации  $\Theta = 0^\circ$  "разностный метод" измерений на тонком рабочем слое толстой мишени.

В третьей главе содержится описание основных экспериментов и полученных в них результатов. Измерены множественность гамма-квантов и ее дисперсия для канала эмиссии альфа-частиц в реакции  $\text{Ta} + {}^{22}\text{Ne}$  в зависимости от угла вылета альфа-частиц при энергиях ионов неона-22

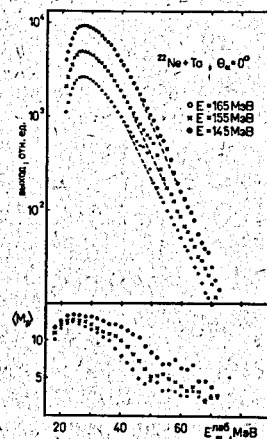


Рис. 3. Инклюзивные спектры альфа-частиц в реакции  $\text{Ta} + {}^{22}\text{Ne}$  и зависимость множественности гамма-квантов  $\langle M \rangle$  от энергии альфа-частиц  $E_\alpha$  для угла  $\Theta = 0^\circ$  при трех энергиях ионов.

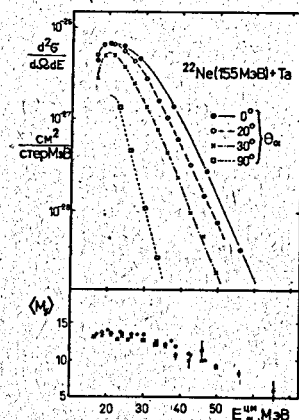


Рис. 4. Спектры альфа-частиц и зависимость множественности гамма-квантов  $\langle M \rangle$  от энергии альфа-частиц  $E_\alpha$  для различных углов регистрации альфа-частиц. Данные для  $\Theta_\alpha = 0^\circ$  получены "разностным методом" из результатов для толстой мишени (рис.3).

$E = 145, 155, 165$  МэВ. Спектры альфа-частиц, зарегистрированных под углом  $\Theta_\alpha = 0^\circ$  при использовании толстой мишени, показаны вместе с зависимостью средней величины множественности гамма-квантов  $\langle M \rangle$  от энергии альфа-частиц  $E_\alpha$  на рис.3 для трех энергий ионов. На рис.4 приведены спектры альфа-частиц и зависимость  $\langle M \rangle$  от  $E_\alpha$  для разных углов регистрации альфа-частиц. Видно, что в пределах экспериментальной погрешности величина  $\langle M \rangle$  не зависит от угла вылета альфа-частиц, а максимальный их выход наблюдается под углом  $\Theta_\alpha = 0^\circ$ . Поэтому основное число экспериментов в настоящей работе было проведено при угле регистрации легких частиц  $\Theta = 0^\circ$ .

Исследовался эффект от примеси, связанной с загрязнением поверхности мишени углеродом и кислородом. Вклад от этой примеси учитывался при определении в реакции  $\text{Ta}({}^{22}\text{Ne}, \alpha)$  величин множественности гамма-квантов (см. сплошные точки на нижней части рис.4, а также открытые точки на рис.7) и ее дисперсии, найденной практически постоянной

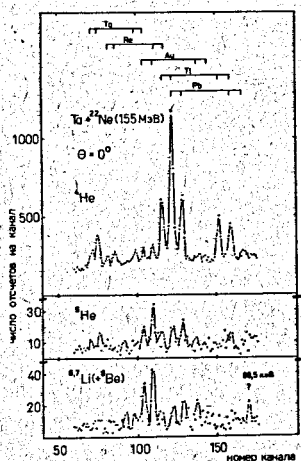


Рис. 5. Спектры рентгеновского излучения в совпадении с альфа-частицами, ядрами  ${}^6\text{He}$  и  ${}^{6,7}\text{Li}$  ( ${}^8\text{Be}$ ) в реакции  $\text{Ta} + {}^{22}\text{Ne}$  (155 МэВ) при регистрации этих частиц под углом  $0^\circ$ .

Спектр рентгеновских лучей в совпадении с альфа-частицами, ядрами  ${}^6\text{He}$  и  ${}^{6,7}\text{Li}$  ( ${}^8\text{Be}$ ) показаны на рис. 5 для реакции  $\text{Ta} + {}^{22}\text{Ne}$  (155 МэВ) при регистрации частиц под углом  $\theta = 0^\circ$  (поглотителем пучка служила фольга из свинца, КХ-лучи от которой поэтому видны в этих спектрах). Спектр КХ-лучей в совпадении с альфа-частицами свидетельствует о преобладающей роли двухтельного процесса с образованием ядер  $\text{Tl}$  в результате вылета альфа-частиц ( $\alpha\text{xn}$ -канал). Спектр альфа-частиц в совпадении с КХ-излучением  $\text{Tl}$  показан на рис. 6 (штрихованная линия), а зависимость множественности гамма-квантов от энергии альфа-частиц — на рис. 7 (сплошные точки). Этим же методом исследовался, кроме того,  $\alpha\text{xn}$ -канал реакции  $\text{Ir} + {}^{12}\text{C}$  (100 МэВ), зависимость  $\langle M_\gamma \rangle$  от  $E_\alpha$  для которого показана крестиками на рис. 7. В  $\alpha\text{xn}$ -канале обеих реакций ( $\text{Ta} + {}^{22}\text{Ne}$ ,  $\text{Ir} + {}^{12}\text{C}$ ) было измерено угловое распределение гамма-излучения, на основании которого определялось значение средней мультипольности гамма-переходов в ядрах  $\text{Tl}$ , лежащее в пределах  $1,0 \leq \bar{l}_\gamma \leq 1,5$ . Это значение мультипольности использовалось в дальнейшем при определении углового момента  $l_\gamma$ , уносимого гамма-квантами.

С целью определения сечения всех каналов, соответствующих двухтельному процессу взаимодействия с вылетом альфа-частицы под углом  $\Theta_\alpha = 0^\circ$  в реакции  $\text{Ta} + {}^{22}\text{Ne}$ , спектры альфа-частиц измерялись также в совпадении с другими модами распада остаточных ядер: с осколками деления и с вторичными заряженными частицами.

и равной  $\bar{G}_M = 4,0 \pm 1,5$  в диапазоне  $E_\alpha = 20 - 80$  МэВ. Была также определена величина множественности гамма-квантов в канале вылета ядер лития ( ${}^8\text{Be}$ ), см. вставку на рис. 7.

Для более детального изучения различных процессов, дающих вклад в полный спектр альфа-частиц, производилось выделение канала реакции с помощью регистрации характеристического рентгеновского излучения остаточных ядер. Спектры рентгеновских лучей в совпадении с альфа-частицами, ядрами  ${}^6\text{He}$  и  ${}^{6,7}\text{Li}$  ( ${}^8\text{Be}$ ) показаны на рис. 5

для реакции  $\text{Ta} + {}^{22}\text{Ne}$  (155 МэВ) при регистрации частиц под углом  $\theta = 0^\circ$  (поглотителем пучка служила фольга из свинца, КХ-лучи от которой поэтому видны в этих спектрах). Спектр КХ-лучей в совпадении с альфа-

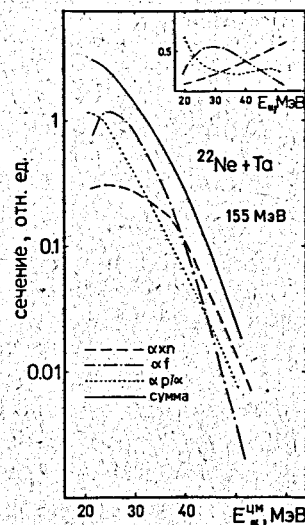


Рис. 6. Спектры альфа-частиц в совпадении с указанными продуктами реакции  $\text{Ta} + {}^{22}\text{Ne}$  (155 МэВ). На вставке показан относительный вклад трех процессов в выход реакции неполного слияния в зависимости от энергии альфа-частиц.

В четвертой главе проведены анализ и обсуждение полученных экспериментальных результатов. Определен вклад отдельных каналов (см. рис. 6) реакции неполного слияния  $\text{Ta} + {}^{22}\text{Ne}$  ( $\alpha\text{xn}$ ,  $\alpha\text{f}$ ,  $\alpha\text{p}/\alpha$ ) при энергии ионов  $E = 155$  МэВ в полное сечение образования альфа-частиц, регистрируемых под углом  $\Theta_\alpha = 0^\circ$ . Показано, что сечение этих каналов реакции составляет около 50% полного сечения альфа-частиц под этим углом. Показано также (см. рис. 6), что при энергиях  $E_\alpha \geq 40$  МэВ  $\alpha\text{xn}$ -канал является доминирующим среди всех каналов реакции неполного слияния.

На основе полученных данных о множественности гамма-квантов  $\langle M_\gamma \rangle$  (рис. 7) с помощью общепринятых соотношений  $^{1/3}$  определялись входные угловые моменты реакции  $l_i$  с вылетом частицы  $j$ :

$$l_i = l_\gamma + l_n + l_j + \Delta I_0, \quad (3)$$

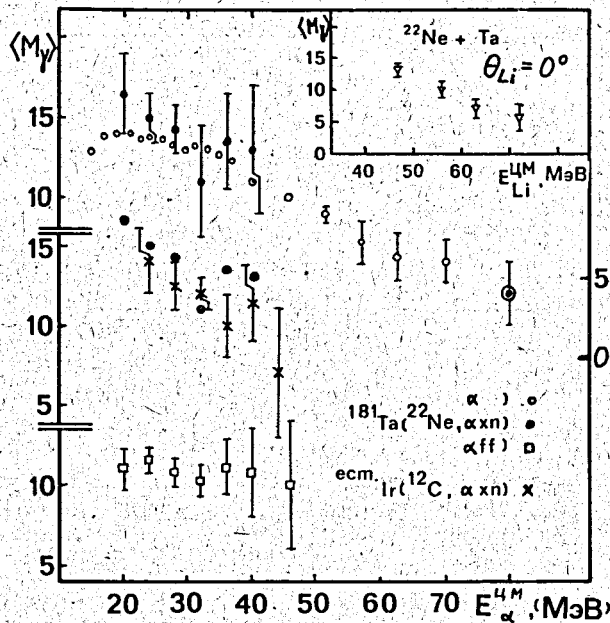


Рис. 7. Зависимость множественности гамма-квантов от энергии частиц для различных каналов реакций  $\text{Ta} + ^{22}\text{Ne}$  и  $\text{Ir} + ^{12}\text{C}$  под углом регистрации  $\Theta = 0^\circ$ .

$$l_j = \langle M_\gamma \rangle \cdot \bar{\lambda}_\gamma, \quad l_n = 2\hbar \cdot x,$$

$$l_j = \frac{r_0}{\hbar} \sqrt{2\mu(E_j - V_c^j)}, \quad r_0 = 1.07(A_j^{1/3} + A_{r.n.}^{1/3}) + 3.0 \text{ фм},$$

где  $l_n, l_j$  - угловой момент, уносимый нейтронами и частицей  $j$ , соответственно,  $\Delta I_0$  - разность спинов конечных и начальных ядер,  $x$  - число испарительных нейтронов, определенное на основе энергетического баланса,  $V_c^j$  - выходной кулоновской барьер для частицы  $j$  и остаточного ядра ("r.n."). Таким образом, в предположении о тангенциальном вылете частиц с поверхности составной системы (см. выражение для  $l_j$  в (3)) и с использованием значения  $\bar{\lambda}_\gamma = 1,5$  были определены входные угловые моменты для  $\alpha xn$ -канала реакций  $\text{Ta} + ^{22}\text{Ne}$  и  $\text{Ir} + ^{12}\text{C}$ , а также для  $\text{Li} + ^8\text{Be} + xn$ -канала реакции  $\text{Ta} + ^{22}\text{Ne}$  (см. рис.8). Из полученных данных о величинах средних входных угловых моментов (рис.8) были сделаны следующие выводы:

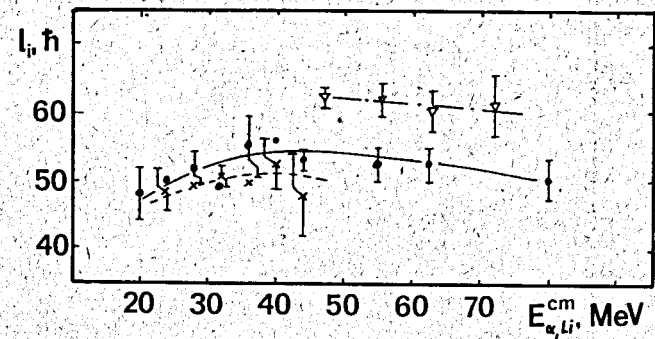


Рис. 8. Зависимость входных угловых моментов от энергии заряженных частиц для реакций:  $\text{Ta} + ^{22}\text{Ne}, \alpha xn$  ( $\bullet$ );  $\text{Ir} + ^{12}\text{C}, \alpha xn$  ( $\times$ );  $\text{Ta} + ^{22}\text{Ne}, \text{Li}, ^8\text{Be}, xn$  ( $\nabla$ ). Использовано значение  $\bar{\lambda}_\gamma = 1,5$ .

- величина входных угловых моментов для определенного канала реакции постоянна в широких пределах энергии частиц;
- величина входных угловых моментов выше для вылета ядер лития ( $+^8\text{Be}$ ), чем для вылета альфа-частиц;
- среднее значение входных угловых моментов в случае вылета альфа-частиц в пределах погрешности эксперимента не зависит от комбинации ядер мишени и иона, приводящей к одним и тем же остаточным ядрам.

Среднее значение входных угловых моментов для  $\alpha xn$ -канала обеих изученных реакций лежит в районе  $l_i \approx 50-55 \hbar$ . Это обстоятельство находится в противоречии с предсказаниями "модели массивной передачи" /6/, являющейся наиболее популярной концепцией для описания реакций неполного слияния и предсказывающей "окна" по входному угловому моменту  $62 \hbar \leq l_{\alpha xn}^i \leq 66 \hbar$  для реакции  $\text{Ta} + ^{22}\text{Ne}$  и  $40 \hbar \leq l_{\alpha xn}^i \leq 44 \hbar$  для реакции  $\text{Ir} + ^{12}\text{C}$ . Наши же результаты указывают на то, что величины входных угловых моментов, связанных с каналом неполного слияния, в основном определяются свойствами системы в выходном канале реакции.

Результаты работы /е/ позволяют принять, что распределение угловых моментов в случае реакции  $\text{Ta} + ^{22}\text{Ne}$  примерно одно и то же для  $\alpha xn$ - и  $\alpha f$ -каналов реакции. Для проверки этого положения на основе результатов измерения анизотропии осколков деления были определены угловые моменты делящихся остаточных ядер, образующихся после вылета альфа-

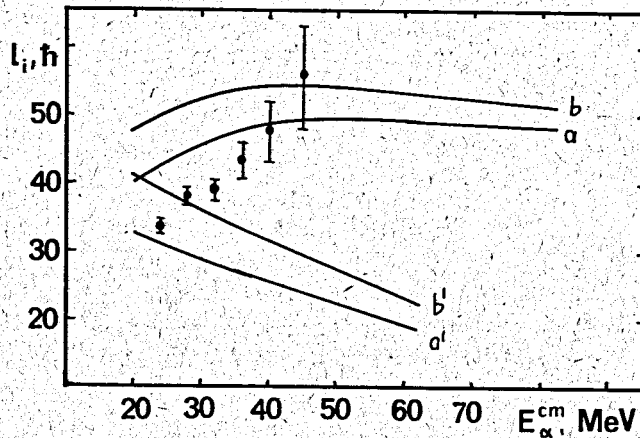


Рис. 9. Зависимость входных угловых моментов (кривые а и б, полученные для значений  $\bar{\lambda}_y = 1,0$  и  $\bar{\lambda}_y = 1,5$ , соответственно) и угловых моментов остаточных ядер после вылета альфа-частиц (кривые а' и б') в  $\alpha xn$ -канале реакции  $Ta + {}^{22}Ne$ , а также угловых моментов делющихся остаточных ядер (экспериментальные точки) в той же реакции, от энергии альфа-частиц.

частиц с энергиями  $20 \text{ МэВ} \leq E_{\alpha}^{\text{Ц.М.}} \leq 50 \text{ МэВ}$  под углом  $\Theta_{\alpha} = 0^{\circ}$ . Для этого в предположении об узком распределении входных угловых моментов, а также для  $\alpha f$ -канала было использовано соотношение  $1/D$

$$W_f(\Theta_f) \sim \exp\left(-\frac{I^2 \sin^2 \Theta_f}{4K_0^2}\right) I_0 \left(\frac{I^2 \sin^2 \Theta_f}{4K_0^2}\right), \quad (4)$$

$$K_0^2 = \frac{1}{\hbar^2} T J_{\text{эф}}$$

Из данных, представленных на рис.9, видно, что угловые моменты  $l_{\alpha f}$  делющихся остаточных ядер соответствуют угловым моментам остаточных ядер в  $\alpha xn$ -канале (кривые а' и б') реакции только для области  $20 \text{ МэВ} \leq E_{\alpha}^{\text{Ц.М.}} \leq 30 \text{ МэВ}$ , где  $\alpha f$ -канал является доминирующим (см. рис.6). Для больших значений  $E_{\alpha}$  с относительным уменьшением веса  $\alpha f$ -канала величины  $l_{\alpha f}$  значительно превышают ожидаемые значения и становятся равными величинам входных угловых моментов (кривые а и б).

Это может быть понято, если предположить, что альфа-частицы вы-

летают под различными углами к поверхности составной системы. В этом случае тангенциально испущенные частицы уносят максимально возможный угловой момент, а радиально испущенные уносят значительно меньший угловой момент. Таким образом, для остаточного ядра отношение между вероятностями деления и испарения нейтронов или вторичных заряженных частиц изменяется в зависимости от угла эмиссии частицы и ее энергии. Поэтому, по-видимому, в случае вылета альфа-частиц с энергиями  $E_{\alpha} \approx 45 \text{ МэВ}$  должны делиться практически только ядра, образовавшиеся после радиального вылета альфа-частиц. Из этого рассмотрения следует, что для  $\alpha f$ -канала время жизни системы перед эмиссией альфа-частицы, детектируемой под углом  $\Theta_{\alpha} = 0^{\circ}$ , должно составлять заметную долю от периода оборота составной системы при  $l_1 \sim 50 \hbar$ :  $\tau \sim 10^{-20} \text{ с}$ , что значительно превышает типичное время прямых ядерных взаимодействий -  $10^{-22} \text{ с}$ . Поэтому, с учетом также зависимости величин входных угловых моментов от свойств системы в выходном канале реакции неполного слияния (см. выше), полученные данные делают предпочтительным выбор из развитых моделей для эмиссии легких частиц в двухтельной реакции тех, которые основываются на предположении о хотя бы "частичном" статистическом равновесии.

Кроме того, из постоянства и небольшой ширины распределения входных угловых моментов следует возможность получения в реакциях неполного слияния ядер с определенными значениями энергии возбуждения и углового момента.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В заключении кратко сформулированы основные результаты, полученные автором в диссертационной работе:

1. Создана высокоэффективная установка для изучения механизма ядерных реакций с тяжелыми ионами "ДЭМАС-МУЛЬТИ", позволяющая измерить множественность гамма-лучей в различных каналах реакций.
2. Впервые измерена множественность гамма-лучей и ее дисперсия в реакции  $Ta + {}^{22}Ne$  в канале эмиссии высокоэнергетических альфа-частиц до энергий  $E_{\alpha} \approx 80 \text{ МэВ}$ .
3. Определена величина множественности гамма-лучей с выделением канала реакции по характеристическому рентгеновскому излучению остаточных ядер в реакциях  $Ta + {}^{22}Ne$  и  $Ir + {}^{12}C$ , приводящих к образованию одного и того же составного ядра.



4. Измерена множественность гамма-лучей для осколков деления ядер, образующихся после вылета альфа-частиц в реакции  $Ta + {}^{22}Ne$ .
5. Корреляционные измерения альфа-частиц в совпадении с характеристическим рентгеновским излучением, осколками деления и вторичными заряженными частицами показали, что эмиссия альфа-частиц под углом  $\theta_{\alpha} = 0^{\circ}$  соответствует в основном двухтелному процессу взаимодействия  $Ta$  с ионами  ${}^{22}Ne$  при энергии 155 МэВ. Показано, что с увеличением энергии альфа-частиц выход продуктов в  $xn$ -канале распада остаточного ядра растет по отношению к выходу продуктов в канале деления и испускания вторичных заряженных частиц.
6. Определены входные угловые моменты для реакций  $Ta({}^{22}Ne, \alpha xn)$ ,  $Ta({}^{22}Ne, Lixn)$ ,  $Ir({}^{12}C, \alpha xn)$ . Показано, что средние значения входных угловых моментов для вылета высокоэнергетических альфа-частиц лежат вблизи критических угловых моментов для канала полного слияния. Показано также, что средние значения входных угловых моментов для канала эмиссии ядер лития лежат выше, чем для канала эмиссии альфа-частиц в реакции  $Ta + {}^{22}Ne$ .
7. Впервые для реакций неполного слияния изучено влияние параметров входного канала реакции на характеристики этого процесса в тяжелой области ядер. Сравнение величин входных угловых моментов для  $\alpha f$ -канала в реакциях  $Ta + {}^{22}Ne$  и  $Ir + {}^{12}C$  показало, что в пределах экспериментальной погрешности входные угловые моменты не зависят от комбинации ядер мишени и налетающего иона, приводящей к одному и тому же составному ядру.
8. Было найдено, что угловые моменты делящихся ядер после вылета альфа-частиц в реакции  $Ta + {}^{22}Ne$  (155 МэВ) по тенденции роста с увеличением  $E_{\alpha}$  и по абсолютным значениям в пределах погрешности измерения совпадают с величинами входных угловых моментов для  $\alpha xn$ -канала реакции, полученными из измерений множественности гамма-лучей. Показано, что этот результат может свидетельствовать о широком угловом распределении вылета альфа-частиц с поверхности ядра. В связи с этим сделан вывод об относительно больших временах взаимодействия (порядка половины времени оборота системы на данном угловом моменте) для канала вылета альфа-частиц в изученных реакциях.
9. Показана возможность использования реакций с вылетом быстрых заряженных частиц для получения ядер в относительно хорошо определенных состояниях по энергии возбуждения и по угловому моменту.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Каманин В.В., Оганесян Ю.Ц., Пенионжкевич Ю.Э., Петров В.Ф., Рюдигер Ю. Множественность  $\gamma$ -лучей при вылете быстрых  $\alpha$ -частиц в реакции  ${}^{22}Ne + Ta$ . - Дубна, 1981. - II с. (Сообщение/Объед. ин-т ядер. исслед.: 7-81-726).
2. Каманин В.В., Кирхбах Р., Куглер А., Оганесян Ю.Ц., Пенионжкевич Ю.Э., Рюдигер Ю. Установка для измерения гамма-множественности в совпадении с заряженной частицей. - В кн.: Сопещение по экспериментальным установкам У-400 и физической программе первоочередных экспериментов на них Дрезден, 1982, Сборник аннотаций, с.14-15 (объед. ин-т ядер. исслед.: Д7-82-891).
3. Kamantin V.V., Kugler A., Oganessian Yu.Ts., Penionzhkevich Yu.E., Rüdiger J. The angular momentum of the residual nucleus after the emission of very fast alpha particles in heavy-ion reactions. - In: Proc. XI Int. Workshop on Gross Properties of Nuclei and Nuclear Excitations Hirschegg, 1983, p.159-163.
4. Каманин В.В., Куглер А., Кузнецов А.Н., Оганесян Ю.Ц., Пенионжкевич Ю.Э., Рюдигер Ю. Измерение множественности гамма-квантов в реакции  ${}^{181}Ta({}^{22}Ne, \alpha, Li, xn)$ . - В кн.: Международная школа-семинар по физике тяжелых ионов Алушта, 1983, Сборник аннотаций, с.23-24. (Объед. ин-т ядер. исслед.: Д7-83-147).
5. Каманин В.В., Кирхбах Р., Куглер А., Кузнецов А.Н., Рюдигер Ю. Методика определения гамма-множественности (установка "ДЭМАС-МУЛЬТИ"). - Дубна, 1984. - 15 с. (Препринт/Объед. ин-т ядер. исслед.: 7-84-31).
6. Kamantin V.V., Kugler A., Penionzhkevich Yu.E., Rüdiger J. Determination of Angular Momenta in the Incomplete-Fusion Channels of the reactions  $Ta + {}^{22}Ne$  and  $Ir + {}^{12}C$ . - Dubna, 1984. - II p. (Preprint/Joint Inst. Nucl. Res.: E7-84-130).
7. Каманин В.В., Куглер А., Кузнецов А.Н., Рюдигер Ю., Субботин В.Г. Система регистрации экспериментальной информации установки "ДЭМАС-МУЛЬТИ". - Дубна, 1984. - 6 с. (Сообщение/Объед. ин-т ядер. исслед.: 10-84-204).
8. Каманин В.В., Куглер А., Оганесян Ю.Ц., Пенионжкевич Ю.Э., Рюдигер Ю. Исследование механизма неполного слияния с выделением канала реакции по рентгеновскому излучению остаточных ядер. - В кн.: Тезисы докладов XXXIV Сопещения по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра Алма-Ата, 1984, с.380.

Цитированная литература:

- /а/ Ворсца С., Гьерлик Е., Калпакчиева Р., Nguyen Hoai Chau, Oganessian Yu.Ts., Pawlat T., Penionzhkevich Yu.E. - Nucl.Phys., 1984, v.A415, N<sup>o</sup> 1, p.169-188.
- /б/ Wilczyński J., Siwek-Wilczyńska K., van Driel J., Gonggrijp S., Hageman D.C.J.M., Janssens R.V.F., Lukasiak L., Siemssen R.H., van der Werf S.Y. - Nucl.Phys., 1982, v.A373, N<sup>o</sup>1, p.109-140.
- /в/ Gerschel C. - Proc.Int.Conf. on Selected Aspects of Heavy Ion Reactions Saclay, 1982; Nucl.Phys., v.A387, p.297c-312c, 1982.
- /г/ Ockels W.J. - Z.Phys., 1978, v.A286, p.181.
- /д/ Vandenbosch R., Huizenga J.R. Nuclear Fission.- N.Y.-L., 1973.
- /е/ Utsunomiya H., Nomura T., Ishihara M., Sugitate T., Ieki K., Kohmoto S. - Phys.Lett., 1981, v.105B, N<sup>o</sup>2,3, p.135.

Рукопись поступила в издательский отдел  
23 июля 1984 года.