

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
имени Д.В. Скобельцына

На правах рукописи

КОНЮХОВА ИРИНА АЛЕКСАНДРОВНА

**УГЛОВЫЕ ЧАСТИЦА–ГАММА-КВАНТ КОРРЕЛЯЦИИ
И ОРИЕНТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯДЕР ^{11}B , ^{12}C , ^{28}Si**

Специальность 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2010

Работа выполнена на кафедре физики атомного ядра и квантовой теории столкновений физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова

Научный руководитель: **Зеленская Наталья Семеновна**
доктор физико-математических наук, профессор
(НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына)

Официальные оппоненты: **Блохинцев Леонид Дмитриевич**
доктор физико-математических наук, профессор
(НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына)

Сакута Станислав Борисович
доктор физико-математических наук
(ФГУ РНЦ «Курчатовский институт»)

Ведущая организация: **Учреждение Российской академии наук
«Институт ядерных исследований РАН»**

Защита диссертации состоится « 8 » апреля 2011 г. в 15 часов на заседании Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 501.001.77 при МГУ имени М.В. Ломоносова по адресу: 119992, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 5 («НИИЯФ МГУ, корпус 19»), аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Автореферат разослан « 25 » февраля 2011 г.

Ученый секретарь
Совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций
доктор физико-математических наук,
профессор

С.И. Страхова

Общая характеристика работы

В диссертации экспериментально определены ориентационные характеристики выстроенных ядер ^{11}B , ^{12}C , ^{28}Si – продуктов ядерных реакций, анализ которых позволил установить роль различных механизмов в исследованных реакциях, параметры ядерного взаимодействия, статическую и динамическую деформацию ядер.

Актуальность темы

Неполяризованные ядерные системы характеризуются равномерной заселенностью спиновых подуровней, т.е. изотропным пространственным распределением спинов частиц. Если изотропия распределения спинов нарушается, ядерная система становится ориентированной. В ядерных реакциях, даже если в начальной системе спиновые состояния заселены равномерно, но ядро-продукт образуется в возбужденном состоянии и угловое распределение продуктов реакции носит анизотропный характер, конечная система может стать ориентированной.

Одним из актуальных направлений ядерной физики умеренных энергий является исследование ориентированных систем. В этих исследованиях важно уметь получать экспериментальные результаты, относящиеся к ориентированным системам, и теоретически интерпретировать их. Например, получать характеристики ориентированного ядра в возбужденном состоянии, время жизни которого относительно мало.

Основной характеристикой ориентированной системы является матрица плотности или ее неприводимые спин-тензоры. Ориентированные системы со спин-тензорами четного ранга называются выстроенными. Традиционные методы частичного восстановления матрицы плотности таких систем – измерение заселенностей ее магнитных подуровней и тензорной поляризации продуктов реакции с помощью весьма трудоемких экспериментов. Альтернативный и менее громоздкий путь исследования выстроенных систем – изучение функции угловых корреляций частиц-продуктов реакции и излучения, снимающего возбуждение ядра.

Как правило, измерения функций угловой корреляции продуктов реакции выполняются только в **одной** плоскости: в основном, в плоскости реакции. Такие эксперименты уже позволяют получать ценный материал о свойствах ядер и ядерных взаимодействиях, однако не позволяют восстановить матрицу плотности выстроенного ядра и определить полный набор его характеристик.

Метод полного восстановления матрицы плотности ориентированного ядра – продукта ядерной реакции в возбужденном состоянии – был впервые предложен, тео-

ретически обоснован и реализован в экспериментах по измерению функций угловой корреляции конечных частиц и излучения, снимающего возбуждение ядра, в **различных** плоскостях относительно плоскости реакции в лаборатории исследования ядерных процессов (ЛИЯП) НИИЯФ МГУ.

Метод позволяет в одном эксперименте, без изменения его методики, восстановить матрицу плотности ориентированного ядра и получить экспериментальную информацию о таких характеристиках выстроенных ядер, которые в принципе не могут быть измерены напрямую. Анализ этих экспериментальных данных в рамках современных методов теории ядерных реакций позволяет получать новые данные о механизме реакции, параметрах ядерных взаимодействий, структуре выстроенных ядер в различных возбужденных состояниях. Указанные обстоятельства обуславливают актуальность поставленных в диссертации задач и проведенных исследований.

Цель работы

Основной целью работы является получение полного набора характеристик выстроенных ядер $^{11}\text{B}(5/2^-)$, $^{12}\text{C}(2^+)$ и $^{28}\text{Si}(2^+, 3^-)$ – продуктов ядерных реакций. Для ее достижения решались следующие задачи:

- экспериментальное измерение угловых зависимостей дифференциальных сечений реакций и функций угловой корреляции (в рамках 4π-геометрии) частиц-продуктов реакции и γ-квантов, снимающих возбуждение ориентированных ядер $^{11}\text{B}(5/2^-)$, $^{12}\text{C}(2^+)$ и $^{28}\text{Si}(2^+, 3^-)$;
- восстановление спин-тензоров четного ранга; определение на их основе ряда физических характеристик изучаемых ядер;
- исследование механизма образования выстроенных ядер путем сравнения экспериментальных величин с теоретическими, рассчитанными в предположении различных моделей ядерных реакций;
- подтверждение и уточнение данных о статической и динамической деформации ядер, о параметрах ядерного взаимодействия.

Основные результаты, полученные в диссертации:

1. Измерены угловые зависимости дифференциального сечения реакций $^{13}\text{C}(d, \alpha)^{11}\text{B}$, $^{12}\text{C}(d, d)^{12}\text{C}$ и $^{28}\text{Si}(\alpha, \alpha)^{28}\text{Si}$ для основного и ряда низколежащих возбужденных состояний конечных ядер. Впервые в рамках 4π-геометрии получены экспериментальные

функции угловой корреляции $\alpha\gamma$ в реакции $^{13}\text{C}(d, \alpha)^{11}\text{B}(5/2^-)$, $d\gamma$ в неупругом рассеянии $^{12}\text{C}(d, d)^{12}\text{C}(2^+)$ и $\alpha\gamma$ в неупругом рассеянии $^{28}\text{Si}(\alpha, \alpha)^{28}\text{Si}$ с возбуждением состояний $2^+(1.78 \text{ МэВ})$ и $3^-(6.879 \text{ МэВ})$ в широкой области углов вылета конечных частиц. Впервые из этих экспериментальных данных восстановлены спин-тензоры четного ранга матрицы плотности исследуемых ядер в возбужденных состояниях. Найденные наборы спин-тензоров позволили получить для этих ядер заселенности магнитных подуровней, компоненты тензоров ориентации различных мультипольных моментов, а также динамическую деформацию исследуемых ядер.

2. Совокупность экспериментальных данных проанализирована в рамках различных моделей ядерных реакций, корректно учитывающих структуру ядер. Расчеты проведены в рамках метода искаженных волн и метода связанных каналов. Учтены вклады механизмов одноступенчатого и двухступенчатого обмена легким и тяжелым кластером. Для расчета матричных элементов указанных механизмов использованы как находящиеся в открытом доступе научные программные комплексы CHUCK, FRESCO, так и оригинальные, разработанные в НИИЯФ – OLYMP, QUADRO.

3. Сравнение экспериментальных и теоретических характеристик для ядер $^{11}\text{B}(5/2^-)$, $^{12}\text{C}(2^+)$ уточнило роль различных механизмов в исследованных реакциях и параметры ядерного взаимодействия. Показано, что доминирующими механизмами протекания реакции $^{13}\text{C}(d, \alpha)^{11}\text{B}$ являются прямой подхват дейтронного кластера с учетом деформации ядра и обмен тяжелым кластером с учетом его виртуального развала. Последний механизм определяет неупругое рассеяние дейтронов ядрами ^{12}C на большие углы.

4. Анализ всей совокупности экспериментальных характеристик по рассеянию α -частиц на ^{28}Si продемонстрировал, что механизм неупругого рассеяния α -частиц ядрами ^{28}Si не сводится к коллективному возбуждению аксиально-симметричного деформированного ядра. Этому противоречат угловые зависимости как заселенностей подуровня 2^+ , так и тензоров ориентации квадрупольного и гексадекупольного моментов. Показано, что для их корректного описания необходимо учитывать отклонение формы ядра ^{28}Si от аксиально-симметричной.

5. Экспериментально определенные динамические деформации ориентированных ядер $^{11}\text{B}(5/2^-)$, $^{12}\text{C}(2^+)$ и $^{28}\text{Si}(2^+, 3^-)$ демонстрируют ее существенную зависимость от угла вылета конечных частиц. В результате деформация ориентированного ядра может кардинально отличаться от статической деформации ядер в невозбужденном состоянии. Более того, ось симметрии ориентированного ядра не совпадает с направлением импульса

ядра отдачи и может прецессировать вокруг него. Показана чувствительность динамической деформации к различным механизмам реакции и структурным характеристикам ядер, в частности, к статической деформации ядер.

Практическая значимость

Практическую ценность диссертации определяет существенное дополнение и уточнение современных представлений о параметрах ядерного взаимодействия и параметрах статической деформации ядер, предсказание зависимости поляризационных характеристик и динамической деформации исследованных ядер от механизма образования ядра и угла вылета частицы-продукта реакции. Это означает, что можно предсказать и получить ядра с заданной формой и степенью поляризации четного ранга.

Личный вклад диссертанта

Диссертант принимала непосредственное участие в подготовке регистрирующей части экспериментальной аппаратуры, экспериментальных измерениях для всех рассмотренных в диссертации реакций, проводила теоретические расчеты спин-тензоров матрицы плотности и других характеристик исследованных ориентированных ядер в рамках известных моделей ядерных реакций и вычислительных программ.

Апробация результатов работы

Материалы диссертации опубликованы в работах [1-5], апробированы на научных семинарах ЛИЯП, на семинаре «Ядерная физика» (руководитель – профессор Б.С. Ишханов) НИИЯФ МГУ, а также на Международных конференциях:

1. Международных конференциях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (2007, 2008, 2009, 2010);
2. Международных конференциях «Ядерная и радиационная физика» (Алма-Ата, 2007, 2009);
3. Всероссийской конференции молодых ученых (2006) и конференции «Ломоносов» (2006, 2008, 2010).

Исследования, результаты которых вошли в настоящую диссертацию, были поддержаны Российским Фондом Фундаментальных Исследований в 2008-2009 гг. (грант № 08-02-00656 «Исследование ориентационных характеристик ядра $^{11}\text{B}(5/2^-, 4.46 \text{ МэВ})$ в реакции $^{13}\text{C}(d, \alpha\gamma)^{11}\text{B}$ при $E_d = 15.3 \text{ МэВ}$ »), а также Федеральным агентством по науке и инновациям (г/к 02.740.11.0242).

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 5 научных работах, перечень которых приведен в конце автореферата.

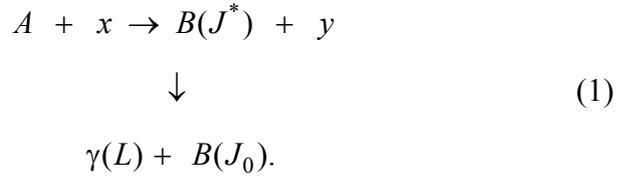
Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, включает в себя 32 рисунка, 14 таблиц и список цитированной литературы из 87 наименований. Общий объем диссертации составляет 134 страницы.

Содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы задачи исследования, дан анализ новизны полученных результатов и их практической ценности.

В первой главе изложен теоретический аппарат расчета характеристик ориентированных ядер. Рассмотрены ядерные реакции следующего типа



Матрица плотности, описывающая спиновые характеристики ядра B^* в состоянии $|J^* M^*\rangle$, определяется соотношением:

$$\begin{aligned} \rho_{J^*}(M^*, M'^*; \Omega_y) = & \sum_{\substack{M_x, M'_x, M_A, M'_A \\ M_y, M'_y}} \rho_{J_x}(M_x, M'_x) \rho_{J_A}(M_A, M'_A) \times \\ & \times T_{M_x M_A M_y M^*}^{J_x J_A J_y J^*}(\Omega_y) T_{M'_x M'_A M'_y M'^*}^{J_x J_A J_y J^*}(\Omega_y), \end{aligned} \quad (2)$$

где $T_{M_x M_A M_y M^*}^{J_x J_A J_y J^*}(\Omega_y)$ – матричный элемент оператора перехода системы $A + x$ к системе $B^* + y$.

Неприводимые спин-тензоры матрицы плотности (2) определены соотношением

$$\begin{aligned} c_{kk}(J^*, \Omega_y) = & \sqrt{2J^* + 1} \sum_{M^* M'^*} (-1)^{J - M'^*} \langle JM^* J - M'^* | k k \rangle \times \\ & \times c_{J^*}(M^*, M'^*; \Omega_y), \quad 0 \leq k \leq 2J^*. \end{aligned} \quad (3)$$

Из определений (2,3) следует, что $c_{00}(J^*, \Omega_y) = d\sigma/d\Omega_y$.

Функция угловой корреляции частица- γ -квант в ядерных реакциях связана со спин-тензорами матрицы плотности соотношением

$$W(\Omega_y, \Omega_\gamma) = \sum_{kk} c_{kk}(J^*, \Omega_y) \varepsilon_{kk}^*(J^*, \Omega_0, \Omega_\gamma), \quad (4)$$

где $\varepsilon_{kk}(J^*, \Omega_0, \Omega_\gamma)$ – неприводимые тензоры регистрации конечной системы. Они определяют вероятность того, что выстроенное ядро после испускания γ -кванта мультипольности L в направлении Ω_γ будет обнаружено детектором в направлении Ω_0 . Если поляризация конечного ядра не регистрируется, тензоры $\varepsilon_{kk}(J^*, \Omega_0, \Omega_\gamma)$ представляют собой произведение алгебраических множителей и тензоров эффективности регистрации неполяризованных γ -квантов. Соотношение (4) устанавливает возможность восстановления матрицы плотности с помощью измерения функции угловой корреляции в различных плоскостях относительно плоскости реакции. Имеется минимальное число плоскостей, в которых необходимо измерять функцию угловой корреляции для восстановления всех ненулевых вещественных компонентов матрицы плотности, в том числе спин-тензора нулевого ранга (что позволяет провести нормировку спин-тензоров любых рангов).

Во второй главе изложена методика проведения экспериментов по измерению дифференциальных сечений, функций угловой корреляции и обработки экспериментальной информации. Представлена схема эксперимента, описана экспериментальная установка (рис. 1) по исследованию угловых корреляций заряженных частиц и γ -квантов, сформулированы основные принципы работы созданного в ЛИЯП измерительно-вычислительного комплекса обработки получаемых экспериментальных спектров (рис. 2). Приведены характеристики регистрирующей аппаратуры и мишеней.

В третьей главе приведены измеренные угловые зависимости дифференциальных сечений реакций $^{13}\text{C}(d, \alpha)^{11}\text{B}$ с образованием ^{11}B в основном и трех нижних возбужденных состояниях; упругого и неупругого рассеяния дейтронов на ядре ^{12}C с возбуждением уровня 2^+ (4.44 МэВ) (рис. 3); упругого и неупругого рассеяния α -частиц на ^{28}Si с возбуждением целой группы уровней ^{28}Si .

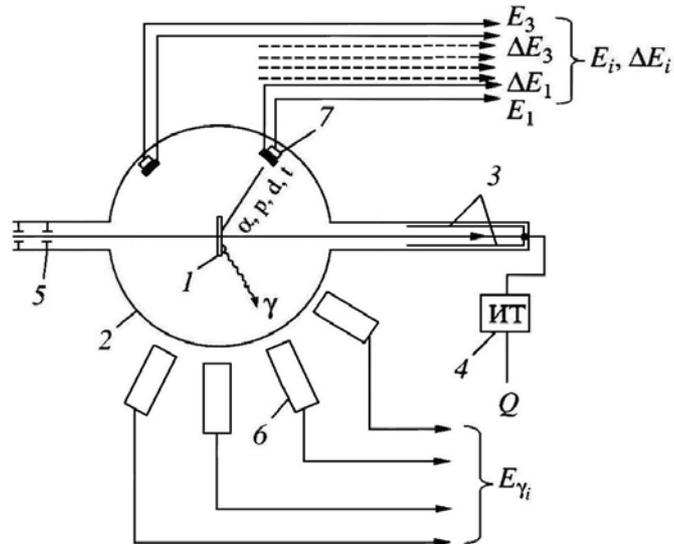


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по измерению функций угловой корреляции: 1 – мишень, 2 – вакуумная камера рассеяния, 3 – цилиндр Фарадея, 4 – интегратор тока, 5 – ионопровод с коллимирующими сменными щелями, 6 – сцинтилляционные счетчики, 7 – детекторы заряженных частиц.

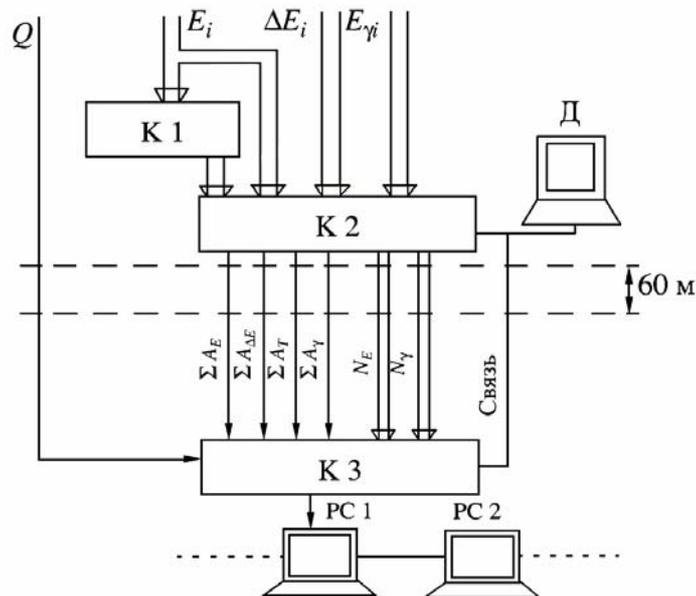


Рис. 2. Блок-схема электроники, использовавшейся в ИВК.

Приведены функции угловой корреляции: $\alpha\gamma$ в реакции $^{13}\text{C}(d, \alpha)^{11}\text{B}(5/2^-)$ (рис. 4), $d\gamma$ в неупругом рассеянии $^{12}\text{C}(d, d)^{12}\text{C}(2^+)$ и $\alpha\gamma$ в неупругом рассеянии $^{28}\text{Si}(\alpha, \alpha)^{28}\text{Si}$ с возбуждением состояний $2^+(1.78 \text{ МэВ})$ и $3^-(6.88 \text{ МэВ})$ в широкой области углов вылета конечных частиц.

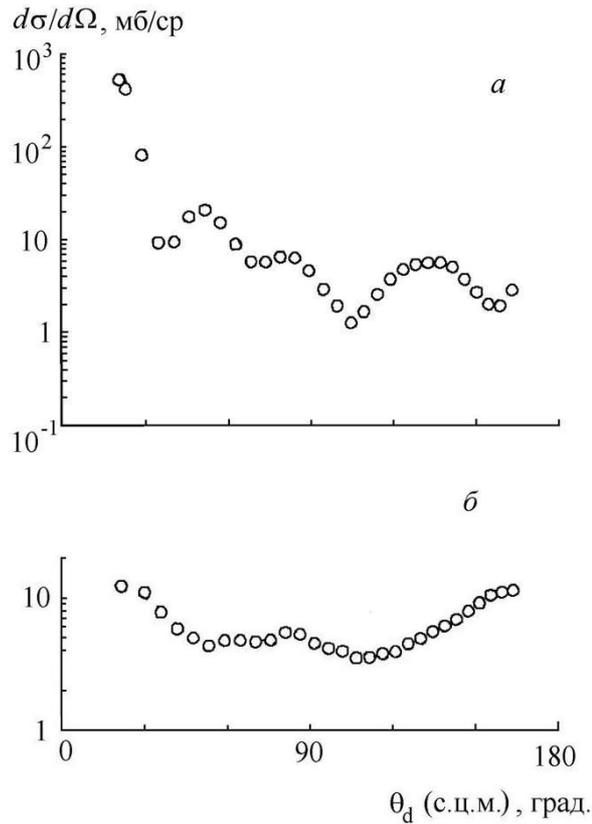


Рис. 3. Угловые зависимости дифференциального сечения упругого (*a*) и неупругого (2^+ , 4.44 МэВ) (*б*) рассеяния дейтронов на ^{12}C при $E_d = 15.3$ МэВ. Кружки – экспериментальные результаты. Статистические погрешности не превышают размера кружков.

Экспериментальные функции угловой корреляции $W(\Omega_y, \Omega_\gamma)$ для каждого θ_y были параметризованы с помощью выражения

$$W(\Omega_y, \Omega_\gamma) = \frac{1}{\sqrt{4\pi}} \cdot \sum_{kk} A_{kk}(\theta_y) \cdot Y_{kk}^*(\Omega_\gamma), \quad (5)$$

где Y_{kk}^* – сопряженные сферические функции, зависящие от углов θ_γ и ϕ_γ вылета γ -кванта. В системе координат, с осью Z , совпадающей с направлением импульса падающих частиц x и плоскостью реакции, совпадающей с плоскостью XZ , величины $A_{kk}(\theta_y)$ вещественны и связаны со спин-тензорами матрицы плотности $\rho_{kk}(\theta_y)$ простыми алгебраическими соотношениями. Величины $A_{kk}(\theta_y)$ и их погрешности определялись на основе уравнений (5) методом линейной регрессии.

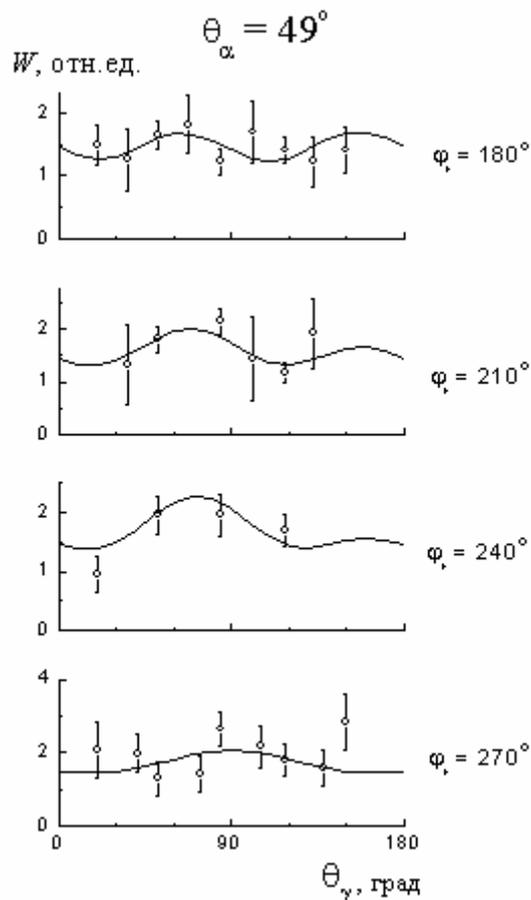


Рис. 4. Функции угловой корреляции в реакции $^{13}\text{C}(d, \alpha\gamma)^{11}\text{B}$ для угла $\theta_\alpha = 49^\circ$ (л.с.к.) в четырех плоскостях регистрации γ -квантов φ_γ . Кривые – результат девятипараметрической подгонки.

В четвертой главе дается краткий обзор характеристик используемых для анализа теоретических моделей ядра и ядерных реакций и реализующих их программных комплексов. Рассматриваются следующие модели:

1. Метод искаженных волн (МИВОКОР) с учетом конечного радиуса взаимодействия частиц.
2. Метод связанных каналов (МСК), используемый и с нулевым, и с конечным радиусом взаимодействия.
3. Модели, описывающие структуру ядер: многочастичная модель оболочек, модель Нильссона, модель составного ядра.

Приводится краткая характеристика реализующих эти модели программных комплексов: OLYMP, CHUCK, FRESCO, QUADRO.

Изложен аппарат расчета основных характеристик ориентированных ядер с помощью спин-тензоров матрицы плотности: заселенностей магнитных подуровней ядер, тензоров ориентации мультипольных моментов и динамической деформации ориентированных ядер в возбужденных состояниях.

В пятой главе проведено сравнение экспериментальных и расчетных характеристик всех исследуемых реакций.

Для реакции $^{13}\text{C}(d, \alpha)^{11}\text{B}$ учитывались четыре основных механизма, диаграммы которых представлены на рис. 5.

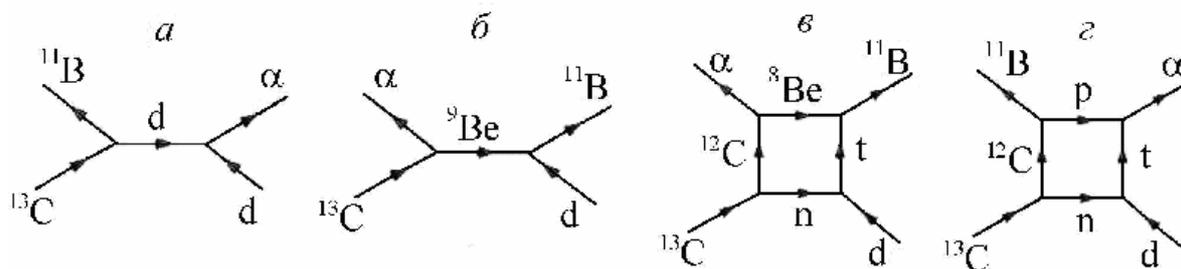


Рис. 5. Диаграммы различных механизмов реакции $^{13}\text{C}(d, \alpha)^{11}\text{B}$:
a – подхват дейтрона; *б* – обмен тяжелым кластером; *в* – последовательная передача кластеров, *z* – последовательная передача легких частиц.

На рис. 6 показаны дифференциальные сечения реакции $^{13}\text{C}(d, \alpha)^{11}\text{B}$ для всех исследованных состояний ^{11}B . Как следует из рисунка, механизм подхвата дейтронного кластера для реакций с образованием ядра ^{11}B в состояниях $3/2^-$ (осн.) и $1/2^-$ (2.125 МэВ) является основным в передней полусфере, а для состояния $5/2^-$ оказался определяющим во всем угловом диапазоне. Для состояния $3/2^-$ (5.02 МэВ) этот механизм является основным в области углов передней полусферы наравне с механизмом срыва тяжелой частицы. Вклад механизма последовательной передачи протона и нейтрона оказался малым. Это можно объяснить большой величиной энергии связи в двух вершинах развала $^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{B} + p$ и $\alpha \rightarrow p + t$.

Для всех состояний ^{11}B механизм срыва тяжелой частицы дает существенный вклад в области углов задней полусферы. Процесс последовательной передачи кластера ^{8}Be и нейтрона заметен только при $\theta_\alpha > 60^\circ$. Наблюдается интерференция механизмов тяжелого срыва и последовательной передачи частиц, изменяющая структуру расчет-

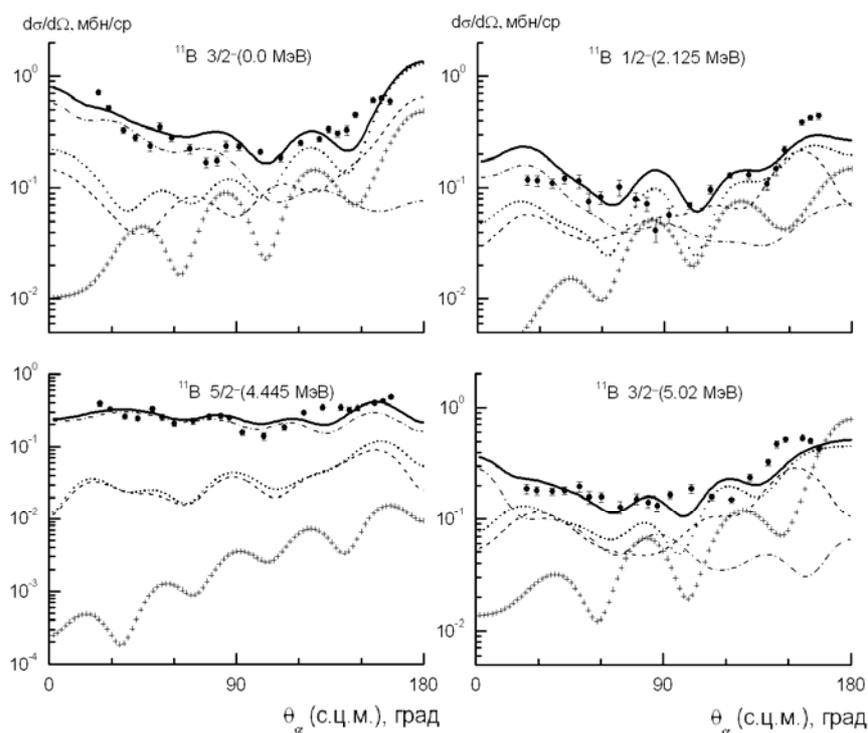


Рис. 6. Дифференциальные сечения реакции $^{13}\text{C}(d, \alpha)^{11}\text{B}$ при $E_d = 15.3$ МэВ. Кружки – экспериментальные результаты. Кривые – расчеты в предположении различных механизмов: штрих-пунктир – подхват дейтронного кластера, штрих – срыв тяжелой частицы, крестики – последовательная передача кластеров, точечная – когерентная сумма этих механизмов, сплошная – суммарная кривая.

ных кривых. Суммарные теоретические угловые распределения достаточно хорошо согласуются с экспериментальными во всем угловом диапазоне без введения дополнительных нормировочных множителей.

В диссертации впервые проведен комплексный анализ экспериментальных дифференциальных сечений упругого и неупругого рассеяния α -частиц на ядре ^{28}Si с возбуждением уровней 2^+ , 4^+ , 0^+ , 3^- в рамках МСК, включающего связь между каналами различных типов возбуждения (FRESCO), и со связью каналов в пределах одной вращательной полосы (CHUCK).

В расчетах предполагалось, что уровни 0^+ , $2^+(1.78 \text{ МэВ})$, $4^+(4.62 \text{ МэВ})$ относятся к вращательной полосе, связанной с основным состоянием ^{28}Si . Коэффициенты связи (КС) между уровнями этой полосы задавались параметрами квадрупольной $\beta_2 = -0.35$ и гексадекупольной $\beta_4 = 0.1$ деформации. Недостающие КС между другими уровнями

оценивались по соответствующим экспериментальным временам жизни и интенсивностям распада. Кроме того, КС рассчитывались в модели Нильссона.

На рис. 7 представлены угловые зависимости сечений рассеяния α -частиц на ^{28}Si . Как видно из рисунков, МСК, реализованный в программе FRESKO, позволяет достаточно хорошо согласовать экспериментальные и теоретические сечения для всех пяти измеренных уровней. Теоретические угловые распределения воспроизводят как глубокие осцилляции сечения в зависимости от θ_α для низших уровней 0^+ и 2^+ (рис. 7а, б), так и сравнительно плавную угловую зависимость сечений остальных уровней.

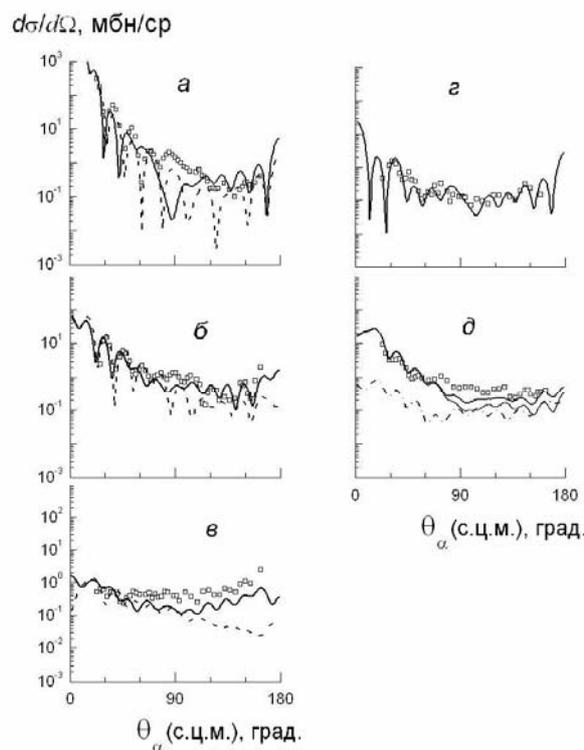


Рис. 7. Дифференциальные сечения рассеяния α -частиц на ^{28}Si при $E_\alpha = 30.3$ МэВ: а – упругое рассеяние; б, в, г, д – неупругое рассеяние на уровни $2^+(1.78$ МэВ), $4^+(4.62$ МэВ), $0^+(4.96$ МэВ) и $3^-(6.88$ МэВ) + $4^+(6.89$ МэВ) соответственно. Квадраты – эксперимент. Кривые – расчет в МСК: пунктир – CHUCK, сплошные – FRESKO. д – тонкая кривая – сечение рассеяния на уровень $3^-(6.88$ МэВ), штрихпунктирная – на уровень $4^+(6.89$ МэВ), сплошная жирная – их сумма.

Расчеты также объяснили поведение дифференциального сечения с возбуждением уровня $4^+(4.62$ МэВ) (рис. 7в), для которого ротационный вариант МСК дает значительное расхождение с экспериментом в области больших углов. Получены угловые за-

висимости сечений для уровней 0^+ (4.96 МэВ), 3^- (6.88 МэВ) (рис. 7г, д), которые в принципе нельзя рассчитать в ротационном варианте МСК.

Для ядер $^{11}\text{B}(5/2^-)$, $^{12}\text{C}(2^+)$ и $^{28}\text{Si}(2^+, 3^-)$ рассчитаны и сопоставлены с экспериментальными (полученными в **третьей главе**) спин-тензоры $A_{kk}(\theta_y)$.

На рис. 8 показаны некоторые из величин $A_{kk}(\theta_d)$ ядра $^{12}\text{C}(2^+)$, образованного в неупругом рассеянии дейтронов на ^{12}C . Теоретические кривые передают общий характер угловых зависимостей компонентов $A_{kk}(\theta_d)$ различных рангов.

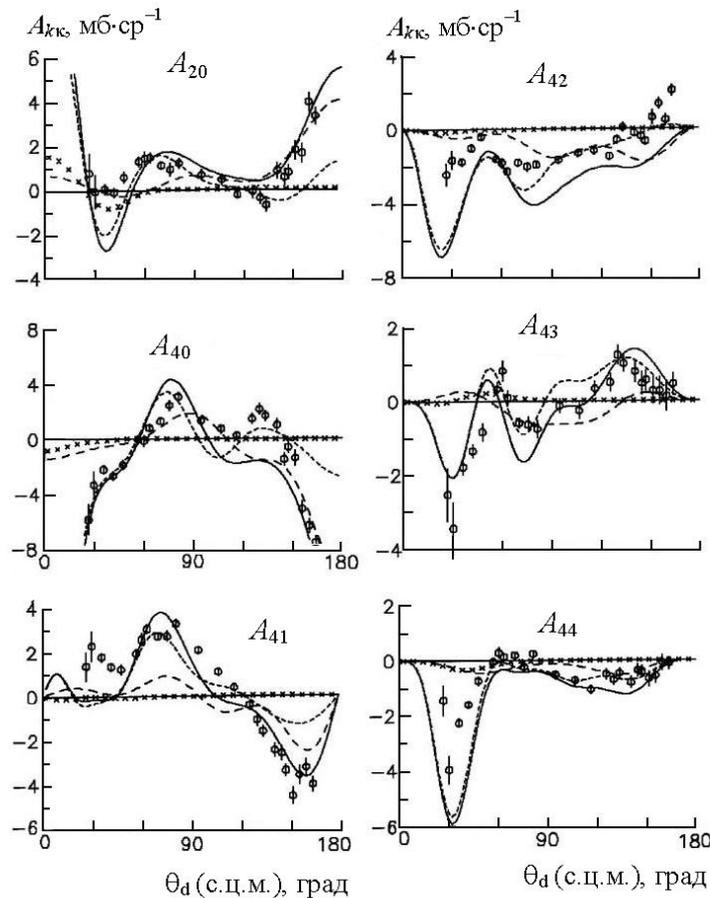


Рис. 8. Угловые зависимости компонентов A_{kk} для ядра $^{12}\text{C}(2^+, 4.44 \text{ МэВ})$, образованного в неупругом рассеянии дейтронов при $E_d = 15.3 \text{ МэВ}$. Кривые соответствуют расчетам в предположении следующих механизмов реакции: штриховая – МСК, кривая с крестами – срыв тяжелой частицы, точечная – когерентная сумма последовательной передачи частиц и срыва тяжелой частицы, сплошная – сумма всех механизмов.

На рис. 9 показаны спин-тензоры с $k = 6$ для состояния $3^-(6.88 \text{ МэВ})$ ядра ^{28}Si , рассчитанные в МСК (программа FRESKO). Видно, что и в этом случае расчет качественно описывает экспериментальное поведение спин-тензоров во всей области углов вылета α -частиц.

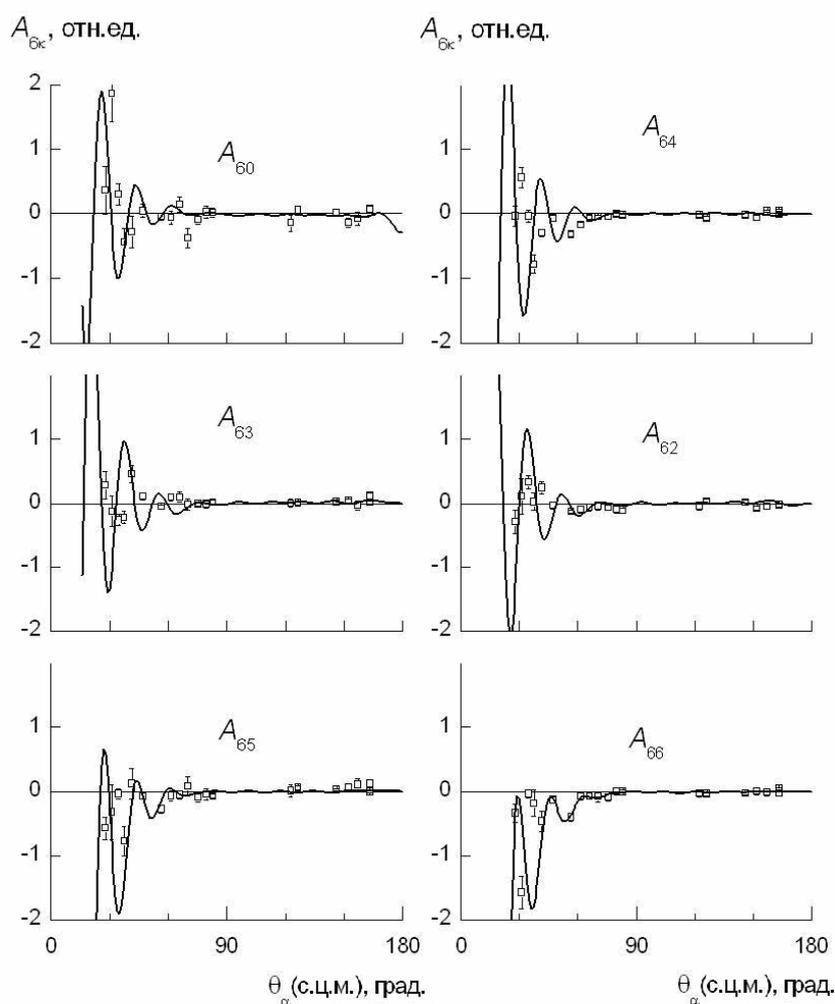


Рис. 9. Угловые зависимости компонентов A_{6k} состояния $3^-(6.88 \text{ МэВ})$ ядра ^{28}Si . Квадраты – эксперимент. Кривые – расчет в МСК по программе FRESKO.

На основе восстановленных в 4π -экспериментах спин-тензоров матрицы плотности определены физические характеристики ориентированных ядер $^{11}\text{B}(5/2^-)$, $^{12}\text{C}(2^+)$ и $^{28}\text{Si}(2^+)$. К таким характеристикам относятся заселенности $P_{\pm M}(\theta_y)$ магнитных подуровней, тензоры ориентации $t_{kk}(\theta_y)$ мультипольных моментов четного ранга и динамическая деформация ядра. Показано, что все эти характеристики существенно зависят от механизма протекания реакции, структурных особенностей ядер и угла вылета конечных частиц. Тензоры ориентации мультипольных моментов оказались чувствительными не только к величине статической деформации, но и к ее знаку.

На рис. 10а приведены заселенности магнитных подуровней ориентированного ядра ^{11}B . Отметим ряд качественных особенностей полученных экспериментальных зависимостей.

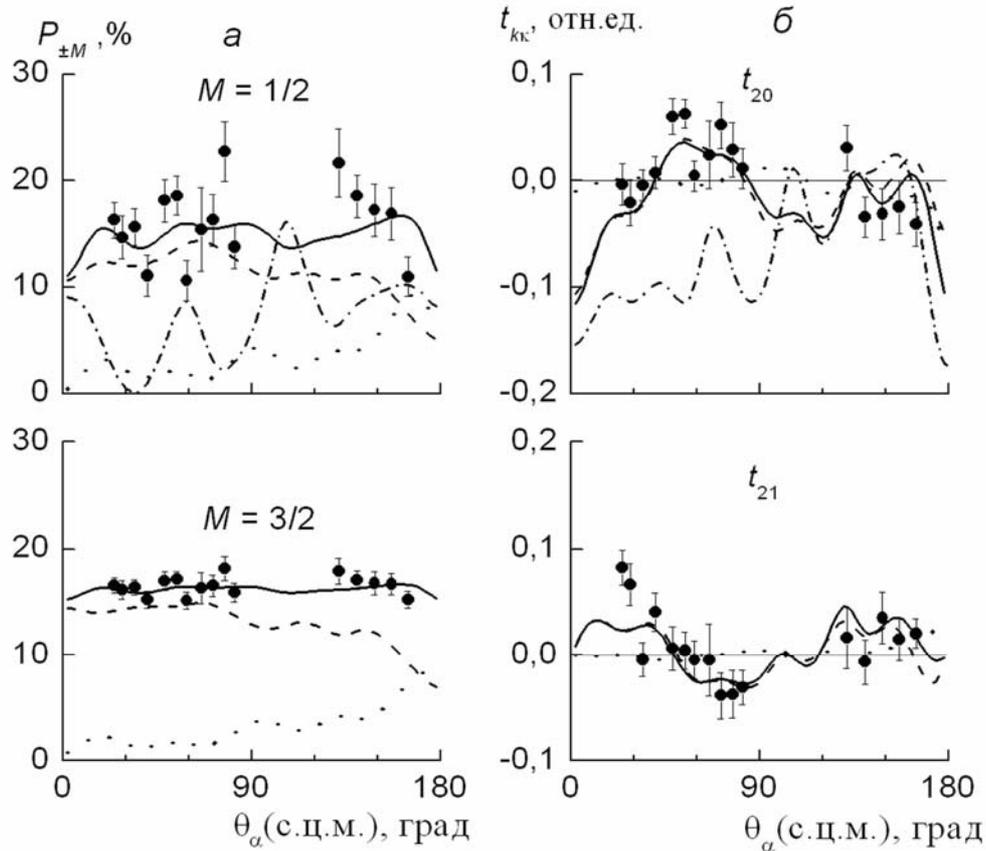


Рис. 10. *a* – Заселенности магнитных подуровней ядра и *б* – тензоры ориентации квадрупольного и гексадекупольного моментов ядра ^{11}B ($5/2^-$, 4.445 МэВ). Кружки – эксперимент. Штриховая кривая – расчет по МСК с $\beta_2=0.4$, точечная – когерентная сумма механизмов последовательной передачи кластеров и срыва тяжелой частицы, сплошная – суммарное сечение. Штрих-пунктир – суммарное сечение для $\beta_2=-0.4$.

Заселенности $P_{\pm M}(\theta_\alpha)$ с проекцией $M=1/2$ и $M=3/2$ близки по абсолютной величине, хотя в первом случае осцилляции заметно больше. Расчетные угловые зависимости заселенностей $P_{\pm M}(\theta_\alpha)$ также демонстрируют превалирование вклада механизма подхвата дейтрона, однако на самых больших углах он сравним по величине с вкладом обменных процессов.

Угловые зависимости компонентов $t_{kk}(\theta_\alpha)$ тензора ориентации имеют слабо осциллирующий знакопеременный вид с амплитудой осцилляций. Рассчитанные компоненты тензоров ориентации $t_{kk}(\theta_\alpha)$ (рис.10б) удовлетворительно описывают общий

ход экспериментальной угловой зависимости, хотя детального согласия и здесь не наблюдается.

Чувствительность расчетных результатов к параметру статической деформации β_2 конечного ядра позволила уточнить не только его величину, но и знак для ядра ^{11}B . Рис. 10б показывает предпочтительность положительного знака квадрупольной деформации, что не следует из анализа только угловой зависимости сечения.

Еще одна характеристика ориентированного ядра, которую нельзя измерить в прямых экспериментах – его динамическая деформация. Она определена по аналогии с обычной деформацией ядра

$$R(\theta, \varphi; \tilde{\theta}_y) = R_0 \left\{ 1 + \sum_{kk} N_k t_{kk}(\tilde{\theta}_y) X_{kk}(\theta, \varphi) \right\}, \quad (6)$$

где $t_{kk}(\tilde{\theta}_y)$ – тензоры ориентации мультипольных моментов, углы θ , φ , $\tilde{\theta}_y$ задаются в системе координат, ось Z которой направлена по оси симметрии ядра: $\tilde{\theta}_y = \theta_y + \pi$. На малых углах ($\theta_y \cong 0^\circ$) при минимальном переданном импульсе поверхность (6) должна быть подобна обычной форме деформированного ядра (статическая деформация). Нормировочная константа N_k в (6) определяется соотношением

$$N_k = \beta_k / t_{k0}^{(0)}. \quad (7)$$

где β_k – параметр деформации. В диссертации из экспериментальных $t_{kk}(\theta_y)$ и параметров β_k восстановлена динамическая деформация ориентированных ядер $^{11}\text{B}(5/2^-)$, $^{12}\text{C}(2^+)$ и $^{28}\text{Si}(2^+)$.

На рис. 11 представлена динамическая деформация ядра $^{11}\text{B}(5/2^-)$ для нескольких значений угла вылета α -частиц θ_α (с.ц.м). Видно, что эта деформация существенно отличается от статической, когда ядро представляет собой вытянутый эллипсоид вращения. Динамическая деформация существенно меняется в зависимости от угла θ_α , при этом наблюдается как большая прецессия (отклонение максимального радиус-вектора от оси Z), так и изменение формы поверхности.

На рис. 12 показана динамическая деформация ядра $^{12}\text{C}(2^+)$ для двух значений угла вылета дейтронов. Эта деформация также отличается от статической (сплюснутый эллипсоид вращения). Динамическая деформация в плоскости реакции (на рис. 12 она показана меридиональными разрезами) меняется в зависимости от угла θ_d : эллипс с бо-

ковыми выступами для $\theta_d = 81^\circ$ и вытянутый неправильный эллипс для $\theta_d = 160^\circ$. Эти изменения наиболее заметны при тех θ_d , для которых значения $t_{4\kappa}(\theta_d)$ максимальны, в частности, в области больших углов рассеяния, где важную роль играют обменные механизмы.

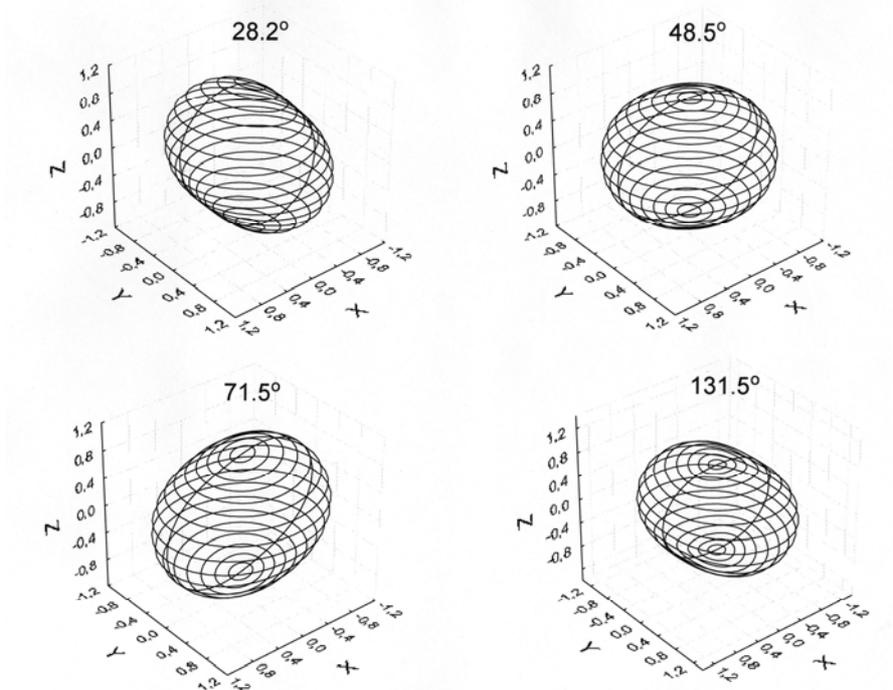


Рис. 11. Форма динамической деформации ядра ^{11}B в состоянии $5/2^-$ (4.445 МэВ), образованном в реакции $^{13}\text{C}(d, \alpha\gamma)^{11}\text{B}$ при $E_d = 15.3$ МэВ. Указаны углы регистрации α -частиц в с.ц.м.

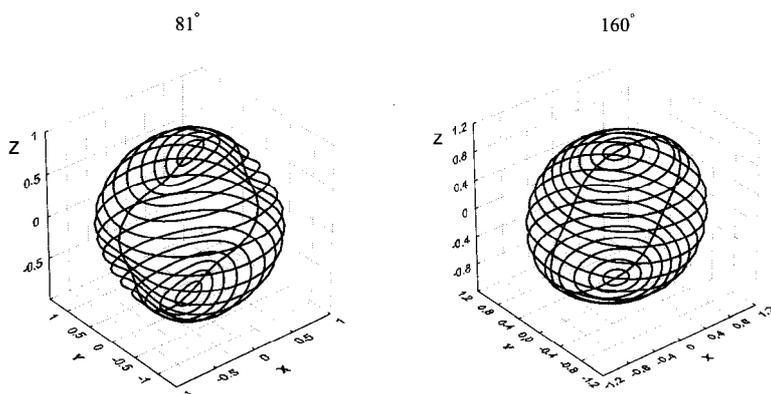


Рис. 12. Форма динамической деформации ядра ^{12}C в состоянии 2^+ (4.44 МэВ), образованном в неупругом рассеянии дейтронов при $E_d = 15.3$ МэВ. Указаны углы регистрации дейтронов в л.с.к.

На рис. 13 показана форма динамической деформации ядра $^{28}\text{Si}(2^+)$, образованного в неупругом рассеянии α -частиц. При $\theta_\alpha = 27.4^\circ$ сплюснутая форма сохраняется. При $\theta_\alpha = 46.6^\circ$ образуется сфероид, который растягивается вдоль оси Y , перпендикулярной плоскости реакции. При $\theta_\alpha = 82.2^\circ$ сфероид начинает опрокидываться, а при $\theta_\alpha = 125.5^\circ$ его форма приближается к вытянутому эллипсоиду вращения. Т.е. при этих углах сфероид, вытянут вдоль оси симметрии ядра, поэтому параметр динамической деформации должен иметь другой знак по сравнению со статической. Т.о., динамическая деформация ядра ^{28}Si определяется не статической деформацией, а динамикой процесса неупругого рассеяния α -частиц.

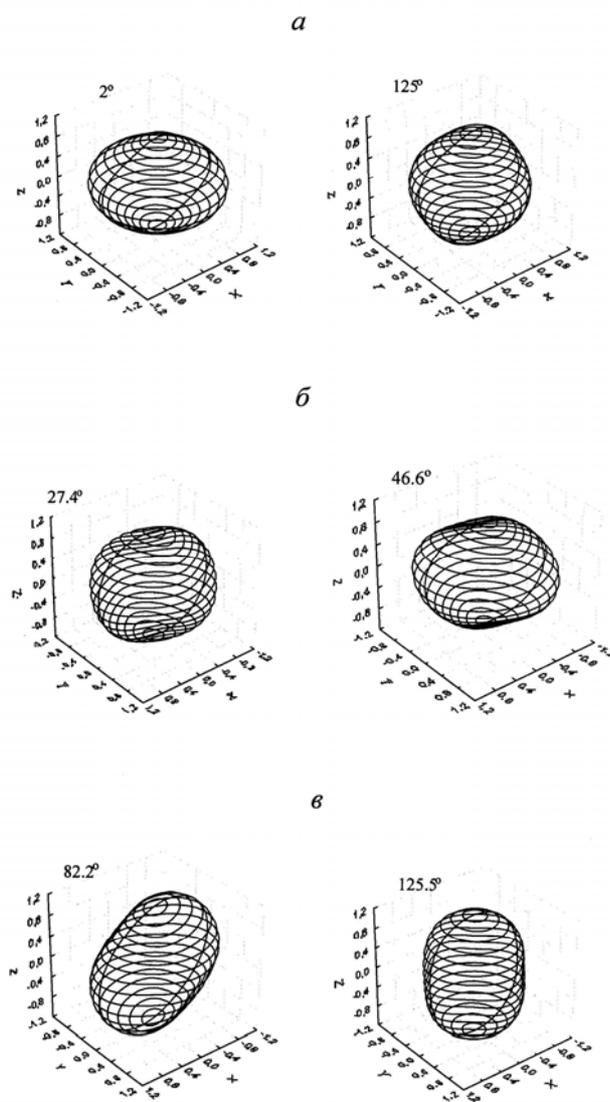


Рис. 13. Форма динамической деформации ядра ^{28}Si в состоянии $2^+(1.78 \text{ МэВ})$: *a* – расчетная, *б*, *в* – экспериментальная. Указаны углы регистрации α -частиц в с.ц.м.

В заключении сформулированы основные выводы диссертации.

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

1. Галанина Л.И., Зеленская Н.С., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Сериков О.И., Спасский А.В., Конюхова И.А. Исследование механизма неупругого рассеяния дейтронов на ^{12}C при $E_d = 15.3$ МэВ методом угловых $d\gamma$ -корреляций. ЯФ. 2007. Т. 70. № 2. С. 1-10.
2. Галанина Л.И., Зеленская Н.С., Конюхова И.А., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В. Динамическая деформация легких ядер. В книге: Игорь Борисович Теплов. К 80-летию со дня рождения. Москва. Изд-во «Университетская книга». 2008. С. 95-115.
3. Галанина Л.И., Зеленская Н.С., Конюхова И.А., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В. Исследование механизма реакции $^{13}\text{C}(d, \alpha)^{11}\text{B}$ при $E_d = 15.3$ МэВ. Известия РАН. Сер. Физ. 2009. Т. 73. №6. С. 855-858.
4. Галанина Л.И., Зеленская Н.С., Конюхова И.А., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В. Исследование ориентационных характеристик ядра $^{11}\text{B}(5/2^-, 4.445 \text{ МэВ})$ в реакции $^{13}\text{C}(d, \alpha\gamma)^{11}\text{B}$ при $E_d = 15.3$ МэВ. Известия РАН. Сер. Физ. 2010, Т. 74. № 4. С. 483-488.
5. Галанина Л.И., Зеленская Н.С., Конюхова И.А., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В. Исследование механизма неупругого рассеяния α -частиц на ^{28}Si методом угловых $\alpha\gamma$ -корреляций при $E_\alpha = 30.3$ МэВ. ЯФ. 2010. Т. 73. №8. С. 1382-1393.

КОНЮХОВА Ирина Александровна

УГЛОВЫЕ ЧАСТИЦА–ГАММА-КВАНТ КОРРЕЛЯЦИИ
И ОРИЕНТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯДЕР ^{11}B , ^{12}C , ^{28}Si

Автореферат

Подписано в печать

Тираж 100 экз. Заказ № Т-275

Отпечатано в типографии КДУ

Тел/факс (495) 939-44-91, 939-57-32 www.kdu.ru