

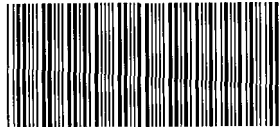
На правах рукописи

Лебедев Виктор Михайлович

**УГЛОВЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ ЧАСТИЦА–ГАММА-КВАНТ
И ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСТРОЕННЫХ ЛЕГКИХ ЯДЕР**

Специальность 01.04.16 – физика атомного ядра и
элементарных частиц

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук



005060589

30 МАЙ 2013

Москва – 2013

Работа выполнена в отделе ядерных и космических исследований Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова".

Официальные оппоненты:

Блохинцев Леонид Дмитриевич
доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела ядерно-спектроскопических методов НИИЯФ МГУ

Гриднев Константин Александрович
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой ядерной физики физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета

Сакута Станислав Борисович
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ФГУ НИЦ «Курчатовский институт»

Ведущая организация:

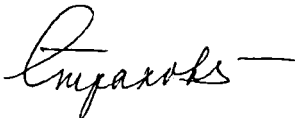
**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований РАН,**
117312, Москва, проспект 60-летия Октября, д. 7а

Защита состоится "21" июня 2013 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.77 на базе Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Ленинские горы, дом.1, стр. 5, НИИЯФ МГУ, "корпус 19", ауд. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Автореферат разослан «14» мая 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 501.001.77
доктор физико-математических наук,
профессор

 С.И. Страхова

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Диссертация посвящена исследованию угловых корреляций частица – гамма-квант в ядерных реакциях на легких ядрах и исследованию ориентационных характеристик конечных ядер в возбужденных состояниях.

Современный этап развития экспериментальной ядерной физики характеризуется стремлением проводить измерения в наиболее полных кинематических условиях. В русле этой тенденции находятся корреляционные эксперименты с тремя частицами (включая выстроенное ядро – продукт реакции) в конечном состоянии. Основной измеряемой характеристикой в таких экспериментах является функция угловой корреляции (ФУК) конечных частиц. Она определяется как вероятность вылета одной из конечных частиц в направлении \mathbf{p}_1 , в то время как другая вылетает в направлении \mathbf{p}_2 . Ядерная реакция при изучении таких процессов может служить анализатором поляризации падающих частиц, если они поляризованы и выявлять степень ориентации конечных ядер.

Измеряя функцию угловой корреляции, мы непосредственно изучаем ориентированные ядра и их характеристики. Ориентированные ядерные системы характеризуются неизотропным распределением проекций спина этой системы. В ядерных реакциях, даже если начальная система не является ориентированной, но угловое распределение продуктов реакции не симметрично относительно 90° или носит анизотропный характер, конечное ядро оказывается ориентированным. Распад этого ядра связан со степенью анизотропии заселенностей его спиновых подсостояний, поэтому измерение функции угловой корреляции (даже если поляризация конечных частиц не регистрируется) позволяет определить ориентационные характеристики ядер.

Ориентированные ядра принято характеризовать матрицей плотности [1] или ее неприводимыми спин-тензорами [1, 2]. При этом спин-тензоры нечетного ранга характеризуют поляризацию, а четного ранга – выстроенность ядра.

В отделе ядерных и космических исследований НИИЯФ МГУ был впервые разработан метод восстановления матрицы плотности ориентированного

ядра – продукта ядерной реакции [3]. Метод позволяет, без проведения измерений в полной кинематике (4π -геометрии), получать результаты, которые соответствуют такой кинематике. В результате в одном эксперименте можно определить физические характеристики ориентированных ядер в возбужденных состояниях. В диссертации этот метод впервые реализован в экспериментах по измерению функции угловой корреляции частица– γ -квант, снимающего возбуждение ядра и регистрируемого в нескольких плоскостях относительно плоскости реакции. Такие эксперименты позволяют получать информацию о характеристиках ориентированных ядер, которые в принципе не могут быть получены в прямых экспериментах. Все это определяет актуальность выполненных в диссертации исследований.

Цель диссертационной работы

Основной целью настоящей работы является экспериментальное восстановление полного набора характеристик выстроенных легких ядер, образованных в различных ядерных реакциях при энергии бомбардирующих частиц до 7.5 МэВ/нуклон. Полученные результаты анализируются в рамках различных моделей этих реакций и структурных особенностей взаимодействующих ядер.

Основные результаты, полученные в диссертации

1. С использованием многоканального измерительно-вычислительного комплекса накопления и обработки экспериментальной информации в режиме *on-line* в диссертации реализованы корреляционные эксперименты, которые позволяют, не проводя измерений в 4π -геометрии, получать результаты, соответствующие такой геометрии. Получены экспериментальные функции угловой корреляции частица– γ -квант в 23 реакциях на легких ядрах от ^9Be до ^{28}Si с образованием выстроенных конечных ядер в различных возбужденных состояниях. Созданы вычислительные программы для обработки измеренных функций угловой корреляции и восстановления различных характеристик этих ядер. Без проведения допол-

нительных экспериментов восстановлены спин-тензоры четного ранга матрицы плотности исследованных ядер. Из спин-тензоров получены заселенности магнитных подуровней и компоненты тензоров ориентации различных мультипольных моментов.

2. Теоретический анализ характеристик корреляционных экспериментов выполнен в рамках современных моделей. Установлено, что основными механизмами образования выстроенных ядер при неупругом рассеянии являются коллективные возбуждения (для реакций – механизм срыва/подхвата с учетом коллективных возбуждений) в передней полусфере углов вылета конечных частиц, а на больших углах – обменный механизм срыва тяжелого кластера. Если частица-снаряд или ядро-мишень имеют небольшую энергию связи по кластерным каналам распада, существенную роль играют двухступенчатые механизмы, связанные с последовательной передачей частиц. При увеличении атомного номера выстроенного ядра вклад механизма срыва (подхвата) тяжелого кластера уменьшается.
3. Универсальность механизма коллективного возбуждения деформированных выстроенных ядер подтверждает установленное в диссертации подобие корреляционных характеристик для одного и того же конечного выстроенного ядра, образующегося в различных реакциях. Такой эффект продемонстрирован на примере ядер $^{12}\text{C}(2^+)$, $^{11}\text{B}(5/2^-)$ и $^{16}\text{O}(3^-)$. Аналогичное подобие обнаружено и для одного типа реакции (неупругого рассеяния α -частиц) на разных ядрах (^{24}Mg и ^{28}Si) с образованием нижних 2^+ состояний.
4. В диссертации впервые установлена заметная чувствительность заселенностей магнитных подуровней возбужденных состояний ядер и тензоров ориентации мультипольных моментов к параметру β_L статической квадрупольной или октупольной деформации выстроенных ядер, причем не только к его абсолютной величине, но и к знаку, что позволило определить величину и знак β_L для 9 конечных ядер и 4 ядер-мишеней.

5. При анализе экспериментальных данных для выстроенного ядра $^{10}\text{Be}(2^+)$, образованного в реакции $^9\text{Be}(d, p\gamma)^{10}\text{Be}(2^+, 3.37 \text{ МэВ})$ впервые обнаружено, что в выстроенном ядре ^{10}Be должна присутствовать кластерная конфигурация $(1p)_{\frac{3}{2}}^4(1p)_{\frac{1}{2}}^2$, соответствующая динейтронной компоненте волновой функции ядра ^{10}Be , т.е. установлено существование гало-ядра $^{10}\text{Be}(2^+)$.
6. Получена динамическая деформация выстроенных ядер, определяемая найденными тензорами ориентации мультипольных моментов. Динамическая деформация выстроенного ядра имеет сложную форму, не сводящуюся к статической, и существенно зависит как от способа его образования, так и от угла вылета конечной частицы.

Научная новизна работы

Научная новизна диссертации обусловлена тем, что все экспериментальные частица–гамма-квант функции угловой корреляции получены впервые. Впервые без дополнительных измерений восстановлены спин-тензоры матрицы плотности и другие корреляционные характеристики выстроенных ядер. Впервые установлено, что основным механизмом образования выстроенных ядер является механизм коллективного возбуждения. Для ряда ядер уточнены параметры квадрупольной и октупольной статической деформации.

Практическая значимость работы

Диссертантом разработан уникальный измерительно-вычислительный комплекс, позволяющий в режиме *on-line* проводить длительные многоканальные корреляционные эксперименты и их первичную обработку. Несомненную практическую ценность представляет уточнение параметров ядро-ядерного взаимодействия, статических мультипольных параметров деформации. Многие результаты диссертации размещены в базе ЦДФЭ.

Полученные в диссертации результаты могут найти свое применение в экспериментальных исследованиях ядерных реакций, которые проводятся в ря-

де научных центров (НИИЯФ МГУ, ФГУ НИЦ «Курчатовский институт», НИИФ С-ПбГУ (г. Санкт-Петербург), ФЭИ (г. Обнинск), ПИЯФ (г. Гатчина), ИЯИ НАН Украины (г. Киев), ИЯФ АН РУз (г. Ташкент, пос. Улукбек), ИЯФ НЯЦ РК (г. Алматы) и др.)

Личный вклад автора

В работах по теме диссертации, выполненных с соавторами, автору диссертации принадлежат постановка тех задач, которые вошли в основные положения диссертации, разработка основных идей измерительно-вычислительного комплекса, разработка и создание основных экспериментальных методик, их программная реализация. Автором разработан и налажен пакет программ обработки полученных экспериментальных данных, а также проведена модификация отдельных программ теоретического анализа экспериментальных результатов. Автор диссертации принимал непосредственное участие в экспериментальном исследовании всех 23 реакций, представленных в работе. При определяющем вкладе автора проведены численные расчеты и теоретический анализ полученных экспериментальных характеристик выстроенных ядер.

Апробация результатов работы

Материалы диссертации доложены на научных семинарах НИИЯФ МГУ, а также на следующих специализированных конференциях и совещаниях по ядерной физике:

1. 5 th International Conference on nuclear reaction mechanisms, Varenna, Italy, 1988;
2. Международная конференция по избранным вопросам структуры ядра. ОИ-ЯИ, Дубна, Россия. 1989;
3. International Nuclear Physics Conference, Wiesbaden, Germany, 1992;
4. 5-ая Международная школа-семинар "Автоматизация исследования в ядерной физике и астрофизике", Россия, Сочи, 16-23 октября, 1992;
5. North-West Europe Nuclear Physics Conference, Amsterdam, 1996;

6. International Conference “Nuclear structure and related topics”, Dubna, Russia, September 9-14, 1997;
7. Международная конференция “Ядерная и радиационная физика”, Алматы (1-ая – 1997г., 2-ая – 1999г., 3-я – 2001г., 4-ая – 2003г., 5-ая -2005г., 6-ая -2007г., 7-ая – 2009г., 8-ая – 2011 г.);
8. Всероссийская конференция “Университеты России – фундаментальные исследования. “Физика элементарных частиц и атомного ядра, (2-ая – 2001г., 3-я – 2002г., 4-ая – 2003г.);
9. Международные совещания по спектроскопии и структуре атомного ядра (1983 – 2012).

Исследования, результаты которых вошли в настоящую диссертацию, были поддержаны Российским Фондом Фундаментальных исследований в 1993-1995 гг. (грант № 93-02-16676-а «Исследование динамических характеристик нижних состояний ядра ^{16}O в различных ядерных реакциях», грант № 93-02-17383-а «Угловые корреляции продуктов ядерных реакций как инструмент изучения свойств ядер при больших значениях энергии возбуждения, углового момента и деформации»), в 1997-1999 гг. (грант № 97-02-16329-а «Экспериментальное исследование динамических характеристик состояния $2^+(4,44 \text{ МэВ})$ ядра ^{12}C в реакциях передачи сложных частиц»), в 2001-2003 гг. (грант № 01-02-16196-а «Экспериментальное и теоретическое исследование роли механизмов запаздывания в формировании матрицы плотности ядер - продуктов реакций»), в 2008-2009 гг. (грант № 08-02-00656-а «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 грантами поддержки научных школ НШ-1619.2003.2 (2003-2005гг.), НШ-5365.2006.2 (2006-2007 г.), НШ-485. 2008.2 (2008-2009г.) и г/к Минобрнауки 02.740.11.0242 (2009-2011гг.).

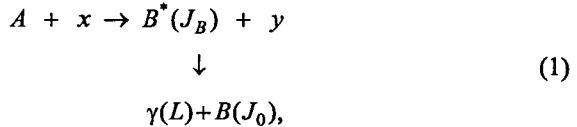
Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации – 319 страниц, включающих 47 таблиц, 129 рисунков и 240 ссылок на цитируемую литературу.

Содержание работы

Во Введении содержится краткое изложение истории проблемы, описан круг рассматриваемых физических вопросов, дан краткий обзор методов измерения функций угловых корреляций различного типа, обсуждаются области их применения, а также основные достоинства и недостатки каждого из методов. Сформулированы тема и цели диссертации, обосновывается их актуальность, схематично изложено содержание диссертации и распределение материала по главам, а также перечислены этапы апробации результатов диссертации и указаны ссылки на основные работы по ее теме.

В первой главе даны определения матрицы плотности ядра – продукта ядерной реакции – и ее спин-тензоров. В диссертации рассматриваются ядерные реакции следующего типа



где A и x – ядро-мишень и падающая частица, y – конечная частица, B^* – конечное ядро в возбужденном состоянии со спином J_B , переходящее в состояние J_0 путем испускания γ -кванта мультипольности L .

Спин-тензоры $\rho_{k\kappa}(J_B; \Omega_y)$ матрицы плотности $\rho_{J_B}(M_B, M'_B; \theta_y)$ ядра $B^*(J_B, M_B)$ в состоянии $|J_B M_B\rangle |J_y M_y\rangle$, образованного в реакции $A(x, y)B^*$, согласно [3] определяются через матричный элемент реакции $M_{BA}(M_B; \Omega_y)$ следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \rho_{k\kappa}(J_B; \Omega_y) &= \frac{\mu_{xA}\mu_{yB}}{4\pi^2\hbar^4} \cdot \frac{k_x}{k_y} \cdot \frac{\sqrt{2J_B+1}}{(2J_x+1)(2J_A+1)} \times \\
 &\times \sum_{M_B M'_B} (-1)^{J_B-M'_B} \langle J_B M'_B J_B - M_B | k\kappa \rangle \sum_{M_x M_y} M_{BA}(M_B; \Omega_y) \cdot M_{BA}^*(M'_B; \Omega_y).
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Нормировка в (2) выбрана так, что спин-тензор нулевого ранга нормирован на дифференциальное сечение $d\sigma/d\Omega(\Omega_y)$ реакции $A(x, y)B^*$

$$\rho_{00}(J_B; \Omega_y) = \frac{d\sigma}{d\Omega}(\Omega_y). \quad (3)$$

В диссертации рассматриваются реакции $A(x, y)B^*$, в которых начальные частицы не поляризованы, а поляризация конечных частиц не регистрируется. В результате ядро B^* – выстроено, а ранг спин-тензоров $\rho_{kk}(J_B; \Omega_y)$ является четным числом. Из (2) следует, что его максимальное значение равно $2J_B$ для четных, и $2J_B - 1$ для нечетных J_B . Для выстроенных ядер компоненты спин-тензоров $\rho_{kk}(J_B; \Omega_y)$ с положительными и отрицательными значениями проекций равны, так что для каждого k имеется $k+1$ независимых компонент $\rho_{kk}(J_B; \Omega_y)$. В результате полное число независимых параметров матрицы плотности выстроенного ядра определяется выражениями [3]:

целые J :

$$N_\rho = \sum_{k=0,2,4,\dots}^{2J_B} k+1 = (J_B + 1)^2, \quad (4)$$

полуцелые J :

$$N_\rho = \sum_{k=0,2,4,\dots}^{2J_B-1} k+1 = (J_B + 1/2)^2. \quad (5)$$

Функция угловой $y\gamma$ -корреляции имеет вид

$$W(\Omega_y, \Omega_\gamma) = \sum_{kk} \frac{1}{\sqrt{4\pi(2k+1)}} A_{kk}(J_B, \Omega_y) \cdot Y_{kk}^*(\Omega_\gamma). \quad (6)$$

Коэффициенты $A_{kk}(J_B, \Omega_y)$ связаны со спин-тензорами матрицы плотности $\rho_{kk}(J_B, \Omega_y)$ соотношением:

$$A_{kk}(\Omega_y) = R_k(L L' J_B J_0) \cdot \rho_{kk}(J_B; \Omega_y), \quad (7)$$

где значения $R_k(LL'J_B J_0)$ определяются мультипольностями (L, L') γ -переходов $E2$ и $M1$, коэффициентом их смешивания и алгебраическими коэффициентами [4].

В диссертации в основном рассматриваются выстроенные ядра в состоянии 2^+ , так что параметризация (6) согласно (4) позволяет определить 9 независимых величин $A_{k\kappa}(\Omega_y)$ (спин-тензоров $\rho_{k\kappa}(J_B; \Omega_y)$ матрицы плотности). Если выстроенное ядро в состоянии 2^+ образуется в неупругом рассеянии бесспиновых частиц, а спин-орбитальным взаимодействием в конечном канале пренебрегается, число величин $A_{k\kappa}(\Omega_y)$ сокращается до 6-ти. Если выстроенное ядро в состоянии 2^+ образуется за счет механизма срыва (подхвата) нуклона с $l = 1$, максимальный ранг $\rho_{k\kappa}(J_B; \Omega_y)$ равен 2, так что выражение (6) включает только $A_{k\kappa}(\Omega_y)$ с $k = 0, 2$, т.е. является четырехпараметрическим.

С учетом условий непрерывности $W(\theta_y; \theta_\gamma, \phi_\gamma)$ в полюсах, минимальное число плоскостей, в которых необходимо измерить $W(\theta_y; \theta_\gamma, \phi_\gamma)$ для полного восстановления матрицы плотности выстроенного ядра определяется выражениями:

целые J_B

$$n_{\min} \geq \left[(J_B + 1)^2 - 2 \right] / (2J_B - 1), \quad (8a)$$

полуцелые J_B

$$n_{\min} \geq \left[(J_B + 1/2)^2 - 2 \right] / (2J_B - 1). \quad (8b)$$

Для упрощенных вариантов параметризации n_{\min} уменьшается. Измерение функции угловой корреляции в n_{\min} плоскостях по информативности эквивалентно эксперименту, выполняемому в 4π -геометрии.

Для конкретного представления параметризации (6) необходимо выбрать определенную систему координат. На рис. 1 изображены две системы координат, которые используются в диссертации в качестве базисных. Рис. 1a соответствует системе координат, ось Z которой направлена по пучку падающих частиц, а плоскость реакции совпадает с плоскостью XZ . В этой системе координат

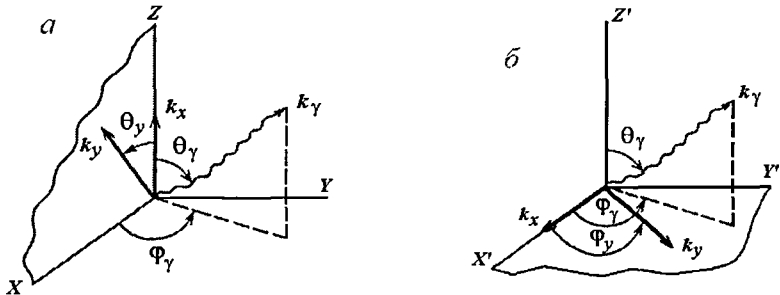


Рис. 1. Координатная система для реакции $A(x, \gamma)B$: а- ось Z направлена вдоль пучка падающих частиц x , б- ось Z перпендикулярна плоскости реакции.

полярный угол θ_γ определяет угловое распределение частиц γ , в то время как функция угловой корреляции для данной плоскости γ -детектора (ее направление задается азимутальным углом ϕ_γ) зависит от полярного угла θ_γ . Эта система координат используется в диссертации при определении обычных и двойных дифференциальных сечений, а также при получении явной зависимости ФУК от θ_γ . В системе координат, изображенной на рис. 1б, ось Z перпендикулярна плоскости реакции $X'Y'$. В этой системе координат по оси Z направлен спин ядра, а матрица плотности $\rho_{J_B}(M_B, M'_B; \theta_\gamma)$ определяет заселенности его магнитных подсостояний и поляризационные характеристики ядра.

С помощью восстановленных экспериментальных компонентов спин-тензоров $\rho_{k\kappa}(\theta_\gamma)$ (или эквивалентных им величин $A_{k\kappa}(\theta_\gamma)$) без проведения дополнительных экспериментов могут быть определены физические характеристики выстроенных ядер, образованных в различных реакциях. Прежде всего, это относится к диагональным элементам самой матрицы плотности выстроенного ядра, которые определяют заселенности $P_M(J_B, \theta_\gamma)$ магнитных подсостояний (подуровней) с проекцией M спина J_B :

$$P_{M_B}(J_B, \theta_\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2J_B+1}} \frac{1}{\rho_{00}(J_B, \theta_\gamma)} \times$$

$$\times \sum_{k\kappa} (-1)^{J_B+M_B} \langle J_B M_B J_B - M_B | k0 \rangle \exp\left(-i\frac{\pi}{2}\kappa\right) d_{0\kappa}^k\left(\frac{\pi}{2}\right) \rho_{k\kappa}(J_B, \theta_\gamma), \quad (9)$$

где $d_{0k}^k(\theta)$ – приведенная D -функция Вигнера.

Знание $\rho_{kk}(\theta_y)$ позволяет найти другие ориентационные характеристики данной системы. В частности, тензоры ориентации мультипольных моментов ранга $k \leq 2J_B$ в системе координат рис. 1а определяются выражением [3]

$$t_{kk}(J_B, \tilde{\theta}_y) = \frac{1}{\sqrt{(2k+1)(2J_B+1)}} \frac{\rho_{kk}(J_B, \tilde{\theta}_y)}{\rho_{00}(J_B, \tilde{\theta}_y)}, \quad (10)$$

где $\tilde{\theta}_y = \pi - \theta_y$ – направление импульса ядра отдачи выстроенного ядра в с.ц.м.

В диссертации по аналогии со статической деформацией ядра используется понятие его динамической деформации:

$$R(\theta, \varphi; \tilde{\theta}_y) = R_0 \left\{ 1 + \sum_{kk} N_k t_{kk}(\tilde{\theta}_y) Y_{kk}(\theta, \varphi) \right\}, \quad (11)$$

где $t_{kk}(J_B, \tilde{\theta}_y)$ – тензоры ориентации мультипольных моментов – определены выражением (10). Нормировочная константа N_k в (11) определяется из условия, что при $\theta_y = 0$ динамическая деформация ядра совпадает с его статической, т.е.

$N_k = \beta_k / t_{k0}(\theta_y = 0^\circ)$, где β_k – параметр статической деформации.

Во второй главе диссертации изложены методические особенности проведения экспериментов по измерению дифференциальных сечений и функций угловой корреляции. Приведена общая схема экспериментальной установки и обсуждены особенности ее использования в корреляционных экспериментах.

Описаны методики измерения абсолютных значений дифференциальных сечений реакции, калибровки углового лимба камеры рассеяния и определения параметров пучка ускоренных частиц циклотрона. Обсуждаются характеристики детекторов заряженных частиц и использованных мишеней. Приведены оценки учета влияния эффекта Доплера на энергию γ -квантов и поправки на конечные размеры сцинтилляционных γ -детекторов.

Наконец, рассмотрены задачи, связанные с планированием корреляционных экспериментов: выбор плоскостей регистрации γ -квантов относительно

плоскости реакции с точки зрения информативности получаемых результатов и предсказание поведения функции угловой корреляции, измеренной в нескольких плоскостях, для любых θ_γ и φ_γ .

В третьей главе рассмотрены принципиальные сложности корреляционных экспериментов, связанные с малым значением двойного дифференциального сечения реакции, что приводит к необходимости длительных экспозиций, предъявляющих повышенные требования к стабильности аппаратуры. В диссертации эти сложности преодолены путем введения многоканальной методики измерений.

Основное внимание уделено описанию созданного при непосредственном участии диссертанта измерительно-вычислительного комплекса накопления и обработки экспериментальной информации, начиная от первых его вариантов и кончая современной модификацией (рис. 2), позволяющей получать экспериментальную информацию о спектрах конечных частиц (рис. 3) в режиме *on-line* с использованием современных компьютеров.

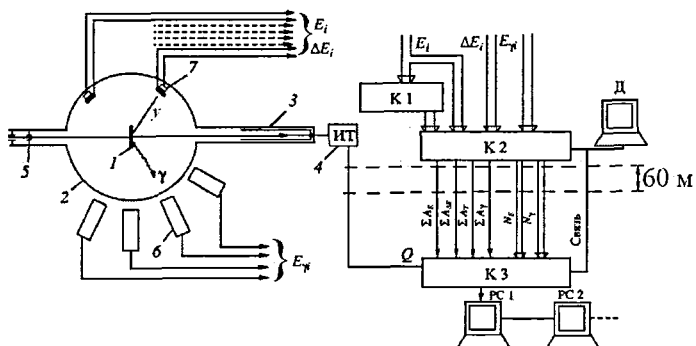


Рис. 2. Схема детектирующей части экспериментальной установки и блок-схема основной электроники ИВК: 1 – мишень, 2 – камера рассеяния, 3 – цилиндр Фарадея, 4 – интегратор тока пучка, 5 – ионопровод с коллимирующими щелями, 6 – сцинтилляционные детекторы, 7 – детекторы заряженных частиц, К1–К3 – крейты КАМАК, Д – монитор установки и контроля параметров эксперимента, РС1–РС2 – компьютеры. Указаны виды сигналов, поступающих на крейты.

Измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) обеспечивает одновременную работу 6 каналов регистрации заряженных частиц и 4 каналов регистрации гамма-квантов. Созданы и отлажены программы, обеспечивающие работу ИВК и программы для обработки измеренных функций угловой корреляции и восстановления различных характеристик выстроенных ядер.

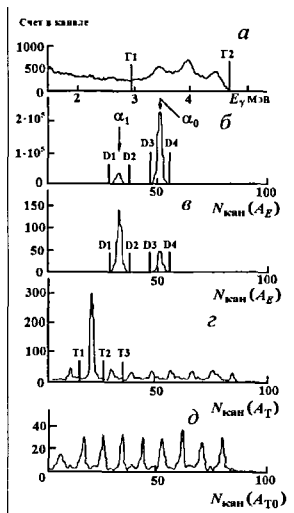


Рис. 3. Типичные спектры из реакции $^{12}\text{C}(\alpha, \alpha)^{12}\text{C}$ при $E_\alpha = 25$ МэВ, $\theta_\alpha = 25^\circ$, $\theta_\gamma = 20^\circ$, $\varphi_\gamma = 180^\circ$: а – сумма γ -фона и γ -спектра от распада $^{12}\text{C}(2^+, 4.44 \text{ МэВ}) \rightarrow ^{12}\text{C}(\text{осн.}) + \gamma$, б – прямой спектр рассеянных α -частиц, в – спектр α -частиц после совпадений группы α_1 с γ -квантами из окна Г1 – Г2, г – временной спектр A_T совпадений γ -квантов с группой α_1 , д – контрольный спектр A_{T0} случайных совпадений группы α_0 с γ -квантами из окна Г1 – Г2. На спектрах указаны группы частиц и цифровые окна Г1, D1.

В четвертой главе диссертации приведены наиболее значимые примеры из полного набора полученных экспериментальных функций угловой корреляции и параметризующих их спин-тензоров матрицы плотности как для неупругого рассеяния частиц, так и для различных реакций.

Представленные примеры ФУК (рис. 4) в неупругом рассеянии различных частиц демонстрируют надежную 9-ти и 16-ти (для ^{16}O) параметрическую подгонку измеренных ФУК. Как видно из рис. 4а, только в рассеянии α -частиц в плоскости реакции ФУК имеет практически симметричную синусоидальную форму с периодом $\approx 90^\circ$ и может быть параметризована как 9-ю, так и 6-ю величинами A_{kk} .

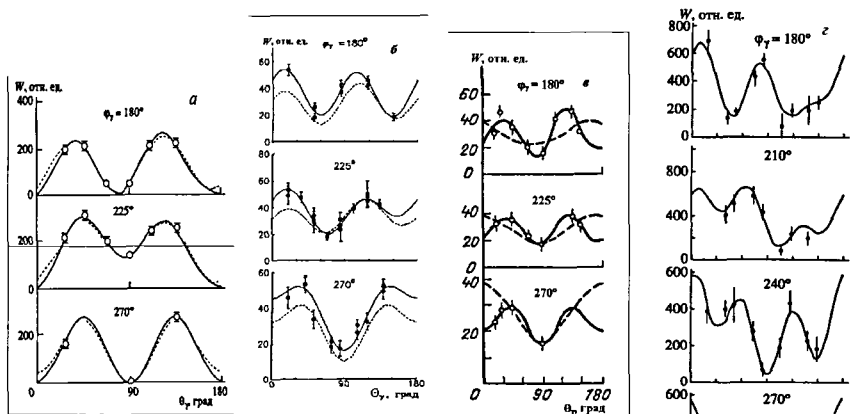


Рис. 4. Экспериментальные ФУК $W(\theta_\gamma; \theta_\alpha, \phi_\gamma)$ (точки) из реакций: *a* – $^{12}\text{C}(\alpha, \alpha_1\gamma)^{12}\text{C}$ при $E_\alpha = 25$ МэВ и $\theta_\alpha = 24^\circ$ (лаб.), *б* – $^{12}\text{C}(d, d_1\gamma)^{12}\text{C}$ при $E_d = 15.3$ МэВ и $\theta_d = 48^\circ$ (лаб.), *в* – $^{13}\text{C}(^3\text{He}, \alpha_1\gamma)^{12}\text{C}$ при $E_\alpha = 22.5$ МэВ и $\theta_\alpha = 20^\circ$ (лаб.), *г* – $^{16}\text{O}(\alpha, \alpha_2\gamma)^{16}\text{O}$ при $E_\alpha = 30.3$ МэВ и $\theta_\alpha = 20^\circ$ (лаб.). На рис. указаны углы ϕ_γ плоскости регистрации γ -квантов относительно плоскости реакции. Сплошные кривые на рис. *a, б, в* – 9-ти параметрическая, а на рис. *г* – 16-ти параметрическая подгонка ФУК по (6). Пунктир на рис. *a* – 6-ти параметрическое описание ФУК, на рис. *б* – расчетная ФУК как сумма механизмов срыва тяжелой частицы, последовательной передачи нуклонов и коллективного механизма с $\beta_2 = -0.5$, на рис. *в* – 4-х параметрическая подгонка по (6).

В неупругом рассеянии дейтронов (рис. 4б) такая форма ФУК несколько искажается. Особенно сильно различается поведение ФУК в плоскости, перпендикулярной к плоскости реакции: если в неупругом рассеянии α -частиц при $\theta_\gamma = 90^\circ$ ФУК обращается в нуль, то в случае рассеяния дейтронов, а также в реакции $^{13}\text{C}(^3\text{He}, \alpha_1\gamma)^{12}\text{C}$ (рис. 4в) и в рассеянии α -частиц на ^{16}O (рис. 4г) ФУК при этом угле θ_γ заметно отличается от нуля. Более того, 4-х параметрическая подгонка ФУК в реакции $^{13}\text{C}(^3\text{He}, \alpha_1\gamma)^{12}\text{C}$ (рис. 4в) вообще оказывается несостоятельной.

Особенности ФУК в реакции $^{13}\text{C}(^3\text{He}, \alpha_1\gamma)^{12}\text{C}$ (рис. 4в) показывают, что механизмы реакции не исчерпываются механизмом подхвата $1p$ - нуклона и могут быть связаны с вкладом более сложных процессов. Наличие обменных механизмов в неупругом рассеянии $^{12}\text{C}(d, d_1\gamma)^{12}\text{C}$ демонстрирует и пунктирная кривая на рис. 4б. Таким образом, угловые зависимости ФУК позволяют сде-

лать определенные заключения о механизме реакции. Сравнение ФУК на рис. 4а и 4б показывает, что свойства выстроенного ядра $^{12}\text{C}(2^+)$ существенно зависят от способа его образования.

Восстановленные спин-тензоры матрицы плотности выстроенного ядра, образованного в различных реакциях, также оказались чувствительными к механизму реакции, причем не только при исследовании их угловой, но и энергетической зависимости.

В пятой главе дается краткий обзор характеристик теоретических моделей ядерных реакций и структуры ядер, в рамках которых производится расчет спин-тензоров матрицы плотности. Наиболее детально рассматриваются следующие модели. 1. Метод связанных каналов [5]. 2. Метод искаженных волн (МИВОКОР) [3], точно учитывающий конечный радиус взаимодействия частиц и их отдачу. 3. Модели, описывающие структуру легких ядер: многочастичная модель оболочек [6], модель составного ядра [7]. В диссертации приводится краткая характеристика реализующих эти модели программных комплексов: CHUCK [8], OLYMP [9], CNDENSI [10].

Основной теоретической моделью ядерных реакций, используемой в диссертации для обработки экспериментальных результатов, является метод связанных каналов (МСК). Основы этого метода изложены в работе [5] и состоят в том, что потенциал, определяющий искажения плоских волн начальной и конечной частиц в реакции $A(x, y)B$, учитывает деформацию ядер A и B .

В МСК уравнения для матричного элемента реакции могут быть получены заменой сферической формы $V(R)$ потенциалов Вудса–Саксона на эллипсоидальную, включающую зависимость от параметров деформации и от угла между направлением движения частицы и осью симметрии ядра. Для таких потенциалов радиус ядра имеет вид:

$$R(\theta) = R_0 \left\{ 1 + \sum_c \beta_c \cdot Y_{c0}(\theta) \right\}, \quad (12)$$

где s – число возможных каналов рассеяния (в частности, число уровней вращательной полосы, к которой принадлежат состояния $A(J_A), B^*(J_B)$ начального и конечного ядер), угол θ' отсчитывается от оси симметрии ядра; $R_0 = r_0 A^{1/3}$, A – массовое число ядра, а параметр r_0 для ядер, не тяжелее кремния, обычно полагают равным 1.25 Фм. Диагональный член потенциала V_{cc} – потенциал обычной оптической модели, а недиагональные члены $V_{cc'}$ задают связь различных каналов рассеяния. В диссертации учитывались связи между различными уровнями ротационных полос начальных и конечных ядер, участвующих в реакции. Примеры таких связей показаны на рис. 5.

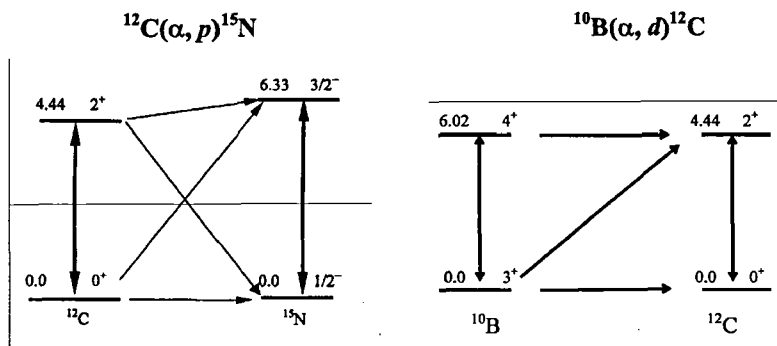


Рис. 5. Схема расчета по МСК (ротационная модель – программа CHUCK) характеристик различных реакций. Приведены значения энергии и спинов уровней вращательных полос в начальном и конечном ядрах. Вертикальными стрелками показана связь уровней в этих ядрах, остальными – переходы с передачей частиц.

В рамках МСК с учетом коллективных возбуждений в диссертации рассчитаны матричные элементы неупругого рассеяния и механизма срыва (подхвата) нуклонов или нуклонных кластеров, как правило, в передней полусфере углов вылета конечных частиц.

В рамках метода искаженных волн (МИВОКОР) [3] рассчитывался матричный элемент срыва тяжелого кластера, а если частица-снаряд или ядро мишень имеют небольшую энергию связи для какой либо виртуальной частицы, учитывались двухступенчатые механизмы, связанные с независимой передачей частиц. В качестве примера такой схемы расчета на рис. 6 показаны диаграммы,

иллюстрирующие механизм срыва тяжелого кластера и поправки к нему в неупругом рассеянии дейтронов на ^{12}C .

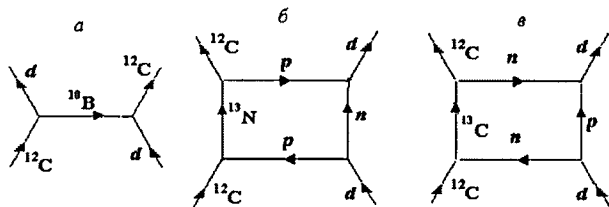


Рис. 6. Диаграммы, соответствующие механизму срыва тяжелого кластера (а) и поэтапному обмену частиц (б, в) в неупругом рассеянии $^{12}\text{C}(d, d)^{12}\text{C}(2^+, 4.44 \text{ МэВ})$.

Таким образом, в диссертации спин-тензоры матрицы плотности определяются некогерентной суммой $\rho_{kk}^{\text{колл}}(J_B, \theta_y)$, рассчитанных в МСК для механизмов срыва или подхвата и $\rho_{kk}^{\text{стк}}(J_B, \theta_y)$, рассчитанных в МИВОКОР. Именно по такой схеме вычислены ФУК на рис. 4б (пунктирная кривая).

В этой главе диссертации из измеренных функций угловых корреляций определены спин-тензоры матрицы плотности выстроенного ядра $^{12}\text{C}(2^+)$, образованного в неупругом рассеянии различных частиц и в различных реакциях с легкими частицами.

Теоретический анализ экспериментальных величин, выполненный в рамках МСК и МИВОКОР, позволил определить различные механизмы реакций с образованием конечного ядра $^{12}\text{C}(2^+)$.

На рис. 7 представлены величины $A_{kk}(\theta)$ матрицы плотности ядра $^{12}\text{C}(2^+, 4.44 \text{ МэВ})$, образованного в реакциях $^{12}\text{C}(\alpha, \alpha_1\gamma)^{12}\text{C}$ при $E_\alpha = 30 \text{ МэВ}$ и $^{12}\text{C}(^3\text{He}, ^3\text{He}_1\gamma)^{12}\text{C}$ при $E_\gamma = 22.4 \text{ МэВ}$.

Показано, что основными механизмами образования $^{12}\text{C}(2^+)$ являются коллективные возбуждения в передней полусфере углов вылета конечных частиц, а на больших углах – обменный механизм срыва тяжелого кластера. В случае рассеяния ^3He учтено спин-орбитальное взаимодействие. Как видно из ри-

сунка, теоретические кривые вполне удовлетворительно описывают экспериментальные данные.

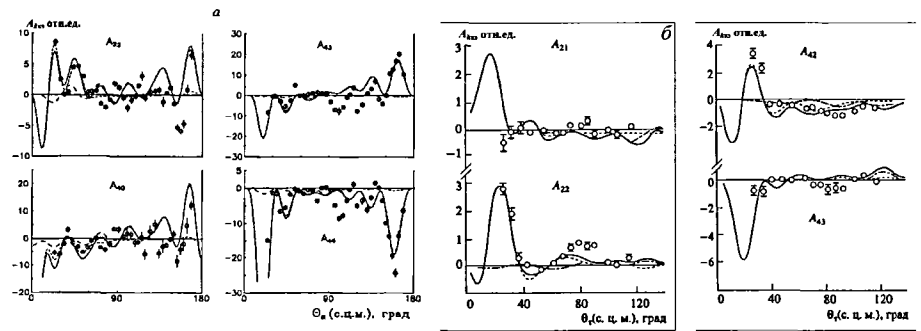


Рис. 7. Угловые зависимости некоторых компонентов спин-тензоров A_{kk} матрицы плотности ядра ^{12}C ($2^+, 4.44$ МэВ), образованного в реакциях $^{12}\text{C}(\alpha, \alpha_1\gamma)^{12}\text{C}$ при $E_\alpha = 30$ МэВ (а) и $^{12}\text{C}(^3\text{He}, ^3\text{He}_1\gamma)^{12}\text{C}$ при $E_\alpha = 22.4$ МэВ (б). Кривые – расчет по МСК с $\beta_2 = -0.5$ (пунктир) (а) и $\beta_2 = -0.35$ (пунктир) (б), расчет для механизма срыва тяжелого кластера ^8Be – длинный штрих (а) и штрих-пунктир (б). Сплошная кривая соответствует сумме этих механизмов.

В диссертации определены заселенности магнитных подуровней $P_{\pm M}(\theta_y)$ нижнего состояния 2^+ ядра ^{12}C и тензоры ориентации $t_{kk}(\theta_y)$ мультипольных моментов. Обнаружена заметная чувствительность $P_{\pm M}(\theta_y)$ и $t_{kk}(\theta_y)$

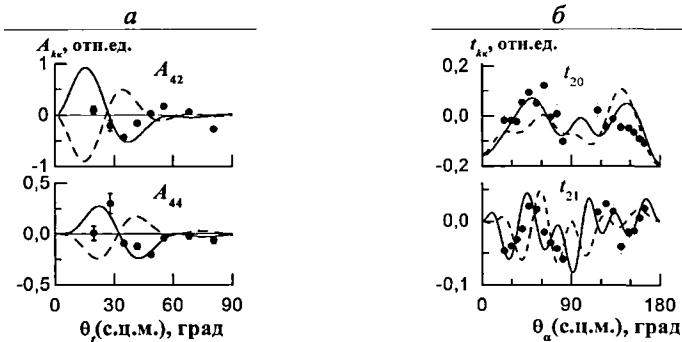


Рис. 8. Угловые зависимости некоторых компонентов $A_{kk}(\theta_\alpha)$ матрицы плотности ядра $^{12}\text{C}(2^+)$, образованного в реакции $^{11}\text{B}(\alpha, t_1)^{12}\text{C}(2^+)$ при $E_\alpha = 25$ МэВ (а) и тензоров $t_{kk}(\theta_\alpha)$ ориентации мультипольных моментов этого же ядра, образованного в реакции $^{15}\text{N}(p, \alpha_1)^{12}\text{C}(2^+)$ при $E_p = 7.5$ МэВ (б). Точки – эксперимент, кривые – расчет по МСК: а- $\beta_2(^{12}\text{C}) = -0.5$ (сплошная), $\beta_2(^{12}\text{C}) = +0.5$ (штриховая); б- $\beta_2(^{15}\text{N}) = 0.3$ (сплошная), $\beta_2(^{15}\text{N}) = -0.3$ (штриховая)

к параметрам расчета, в первую очередь к параметру β_2 статической квадрупольной деформации ядра ^{12}C , причем не только к его абсолютной величине, но и к знаку. На рис. 8 показана чувствительность к параметру β_2 ядра $^{12}\text{C}(2^+)$ и ядра-мишени ^{15}N угловых зависимостей $A_{kk}(\theta_\alpha)$ и $t_{kk}(\theta_\alpha)$. Как видно из рисунка, корреляционные характеристики позволяют определить величину и знак параметра квадрупольной деформации не только для выстроенных ядер, но и для ядра-мишеней.

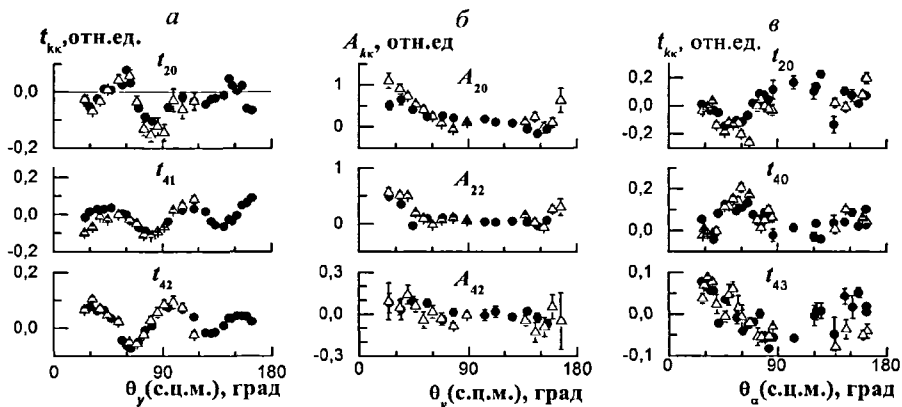


Рис. 9. Экспериментальные угловые зависимости некоторых компонентов t_{kk} и A_{kk} выстроенных конечных ядер, образованных в различных ядерных реакциях: а- $^{12}\text{C}(d, d_1)^{12}\text{C}(2^+)$ при $E_d = 15.3$ МэВ (точки) и $^{12}\text{C}(^3\text{He}, ^3\text{He}_1)^{12}\text{C}(2^+)$ при $E_r = 22.4$ МэВ (треугольники); б- $^{14}\text{N}(\alpha, d_1)^{16}\text{O}(3^-)$ (точки) и $^{15}\text{N}(\alpha, t_1)^{16}\text{O}(3^-)$ (треугольники) при $E_\alpha = 30.3$ МэВ; в- $^{28}\text{Si}(\alpha, \alpha_1)^{28}\text{Si}(2^+)$ (точки) и $^{24}\text{Mg}(\alpha, \alpha_1)^{24}\text{Mg}(2^+)$ (треугольники) при $E_\alpha = 30.3$ МэВ.

Универсальность механизма коллективного возбуждения деформированных выстроенных ядер подтверждает найденное в диссертации подобие корреляционных характеристик для одного и того же конечного выстроенного ядра, образующегося в различных реакциях. Сопоставление угловых зависимостей тензоров ориентации мультипольных моментов выстроенного ядра $^{12}\text{C}(2^+)$, образованного в неупругом рассеянии дейтронов и ионов ^3He (рис. 9а), показывает их явное подобие (несмотря на различие спинов падающих частиц), которое объясняется, по-видимому, схожестью механизмов образования конечного выстроенного ядра.

В шестой главе диссертации определены корреляционные характеристики (спин-тензоры матрицы плотности, заселенности магнитных подуровней $P_{\pm M}(\theta_y)$ и тензоры ориентации $t_{kk}(\theta_y)$) большой группы выстроенных ядер ($^{10}\text{Be}(2^+)$, $^{11}\text{B}(5/2^-)$, $^{14}\text{C}(3^-)$, $^{15}\text{N}(3/2^-)$, $^{16}\text{O}(3^-)$, $^{20}\text{Ne}(2^+)$, $^{24}\text{Mg}(2^+)$ и $^{28}\text{Si}(2^+)$). В диссертации продемонстрирована возможность восстановления ряда компонентов спин-тензоров матрицы плотности выстроенных ядер ^{14}C , ^{16}O даже для тех состояний, которые экспериментально не разделяются с близко расположенными по энергии уровнями с другими моментами и четностью.

Проведенный анализ корреляционных характеристик указанной группы выстроенных ядер показал, что (как и для ядра $^{12}\text{C}(2^+)$) основными механизмами их образования при неупругом рассеянии являются механизм коллективного возбуждения в передней полусфере углов вылета конечных частиц, а на больших углах возрастает роль обменного механизма срыва тяжелого кластера.

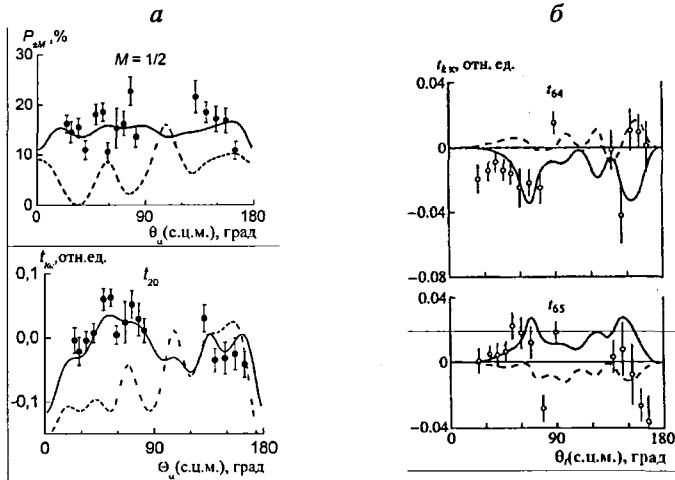


Рис. 10. Угловые зависимости некоторых компонентов $P_{\pm M}$ и t_{kk} выстроенных ядер (точки – экспериментальные данные) в зависимости от знака β_L : а – $^{11}\text{B}(5/2^-)$, образованного в реакции $^{13}\text{C}(d, \alpha_2)^{11}\text{B}(5/2^-)$, кривые – расчет для суммы механизмов срыва по МСК, механизма двухступенчатой передачи кластеров и срыва тяжелого кластера при $\beta_2 = +0.4$ (сплошная), $\beta_2 = -0.4$ (штриховая); б – $^{16}\text{O}(3^-)$, образованного в реакции $^{15}\text{N}(\alpha, t_2)^{16}\text{O}(3^-)$, кривые – расчет по МСК при $\beta_3 = +0.35$ (сплошная), $\beta_3 = -0.35$ (штриховая).

В реакциях срыва/подхвата учет этих процессов также существенен, хотя для ядра ^{16}O вклад коллективного возбуждения в реакциях $^{14}\text{N}(\alpha, d)^{16}\text{O}$, $^{15}\text{N}(\alpha, t)^{16}\text{O}$, $^{19}\text{F}(p, \alpha)^{16}\text{O}$ оказался менее важен, чем в неупругом рассеянии α -частиц на этом же ядре. В случае рассеяния (реакций) частиц со спином учитывалось спин-орбитальное взаимодействие. В реакциях $^9\text{Be}(d, p)^{10}\text{Be}(2^+)$ и $^{13}\text{C}(d, \alpha)^{11}\text{B}(5/2^-)$ учитывался вклад двухступенчатых механизмов, связанных с независимой передачей частиц. При увеличении атомного номера выстроенного ядра вклад механизма срыва тяжелого кластера резко уменьшается, но возрастает вклад механизма образования составного ядра.

Чувствительность корреляционных характеристик $P_{\pm M}(\theta_y)$ и $t_{kk}(\theta_y)$ к параметрам расчета для большинства исследованных выстроенных ядер оказалась высокой. Наибольшая чувствительность обнаружилась к параметру β_2 статической квадрупольной деформации, причем не только к его абсолютной величине, но и к знаку. Для некоторых выстроенных ядер при изменении знака β_2 угловая зависимость тензоров ориентации квадрупольного момента меняется на противофазную и качественно отличается от экспериментальной (рис. 10). Для ядра $^{16}\text{O}(3^-)$ из реакции $^{19}\text{F}(p, \alpha_2)^{16}\text{O}$ корреляционные характеристики зависят не только от параметра его октупольной деформации, но и квадрупольной деформации ^{19}F (рис. 11), что позволяет определить их величину и знак.

Угловые зависимости тензоров $t_{kk}(\theta_y)$ ориентации мультипольных моментов различного ранга носят осциллирующий характер для всех исследованных выстроенных ядер (т.е. $t_{kk}(\theta_y)$ прецессируют относительно оси симметрии выстроенного ядра), причем степень осцилляции максимальна в случае неупругого рассеяния.

Важный вывод сделан в диссертации при анализе экспериментальных данных для выстроенного ядра $^{10}\text{Be}(2^+)$, образованного в реакции $^9\text{Be}(d, p)^{10}\text{Be}(2^+, 3.37 \text{ МэВ})$. На рис.12а, б приведены угловые зависимости компонентов $P_{\pm M}(\theta_p)$ и $A_{kk}(\theta_p)$ ядра $^{10}\text{Be}(2^+, 3.37 \text{ МэВ})$ для различных значений параметра квадрупольной деформации.

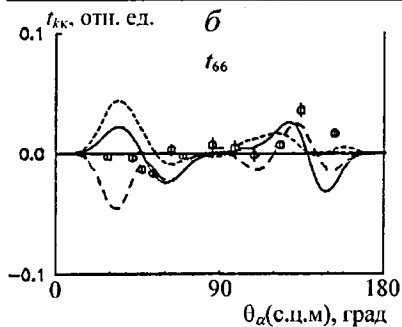
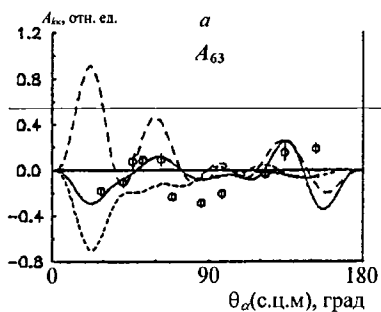


Рис. 11. Угловые зависимости компонента A_{63} спин-тензоров матрицы плотности (а) и компонента t_{66} тензоров ориентации моментов (б) ядра $^{16}\text{O}(3^-)$, образованного в реакции $^{19}\text{F}(p, \alpha_2)^{16}\text{O}$ при $E_p = 7.5$ МэВ. Кривые – расчет для механизма подхвата тритонного кластера в МСК со следующими вариантами параметров деформации $\beta_2(^{19}\text{F})$ и $\beta_3(^{16}\text{O})$: сплошная – $\beta_2 = 0.35$, штрих – $\beta_2 = 0.35$, $\beta_3 = -0.35$, длинный штрих – $\beta_2 = -0.35$, $\beta_3 = 0.35$.

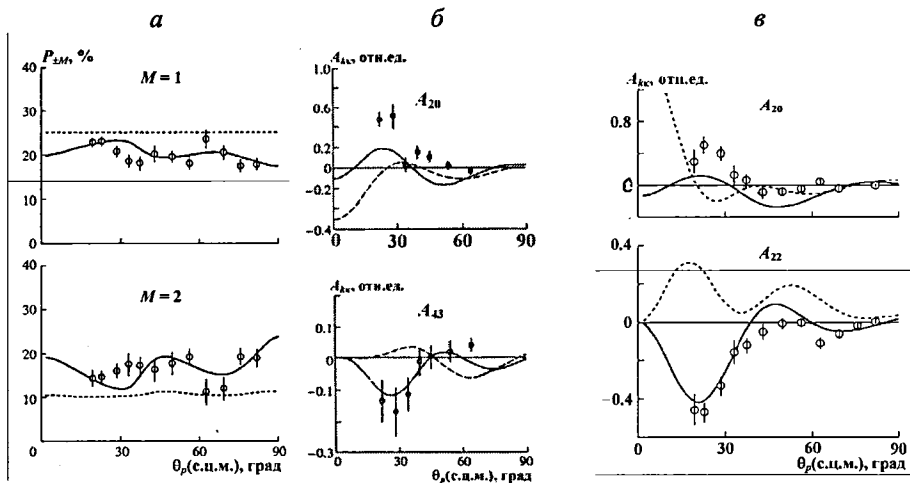


Рис. 12. Угловые зависимости некоторых компонентов $P_{2M}(\theta_p)$ и $A_{K\kappa}(\theta_p)$ ядра $^{10}\text{Be}(2^+, 3.37$ МэВ), образованного в реакции $^9\text{Be}(d, p_1)^{10}\text{Be}$ при $E_d = 12.5$ МэВ (а, б) и 15.3 МэВ (в). Кружки – эксперимент, кривые – расчеты по МСК для механизма срыва нейтрона: а – с учетом ($\beta_2(^9\text{Be}) = 0.5$, $\beta_2(^{10}\text{Be}) = 1$) (сплошная) и без учета (штрих) деформации ядер, б – с $\beta_2(^{10}\text{Be}) = 1$ (сплошная) и $\beta_2(^{10}\text{Be}) = -1$ (штрих), в- с учетом (штрих) и без учета (сплошная) полного переданного момента $j = 1/2$.

Как видно из рисунка, для описания экспериментальных корреляционных характеристик ядро $^{10}\text{Be}(2^+)$ должно иметь большую деформацию. С другой

стороны (рис. 12е), структура его должна быть такова, чтобы в реакции ${}^9\text{Be}(d, p_1){}^{10}\text{Be}$ было разрешено только одно значение полного переданного момента $j = 3/2$. Вклад полного момента $j = 1/2$ в спектроскопический множитель S , рассчитанный в оболочечной модели, составляет около 20%. В модели jj -связи основное состояние ядра ${}^9\text{Be}$ содержит как практически сферически симметричную конфигурацию $(1p)^{5}_{3/2}$, так и дырочную деформированную конфигурацию $(1p)^3_{3/2}(1p)^2_{1/2}$. Очевидно, что только передача нуклона с $j = 3/2$ в реакции ${}^9\text{Be}(d, p_1){}^{10}\text{Be}(2^+)$ приводит к образованию ${}^{10}\text{Be}(2^+)$ с конфигурацией $(1p)^4_{3/2}(1p)^2_{1/2}$, которая, в принципе, может обладать большой квадрупольной деформацией.

Иначе говоря, в диссертации впервые установлено, что в выстроенном ядре ${}^{10}\text{Be}$ должна присутствовать кластерная конфигурация $(1p)^4_{3/2}(1p)^2_{1/2}$, соответствующая динейтронной компоненте волновой функции ядра ${}^{10}\text{Be}$, т.е. ${}^{10}\text{Be}(2^+)$ является гало-ядром.

Подобие корреляционных характеристик установлено для реакций с образованием ${}^{16}\text{O}(3^-)$ в различных реакциях (рис. 9б). Аналогичное подобие обнаружено и для неупругого рассеяния α -частиц на ядрах ${}^{24}\text{Mg}$ и ${}^{28}\text{Si}$ с образованием нижних 2^+ состояний (рис. 9е).

В диссертации рассматривается еще одна характеристика выстроенных ядер – их динамическая деформация, определяемая тензорами $t_{kk}(\theta_y)$ (см. выражение (11), где значение R_0 принято равным 1)). Для вычисления нормировочной константы N_k необходимо знать значение соответствующего тензора ориентации ядра при углах вылета частиц, близких к нулю. В диссертации рассчитаны некоторые $t_{k0}(0^\circ)$. Вместе с параметрами статической деформации β_k они сведены в таблицу.

В диссертации показано, что динамическая деформация любого выстроенного ядра достаточно сложна, ее форма заранее неочевидна и не сводится к статической деформации (как правило, эллипсоиду вращения). Динамическая деформация ядра зависит как от способа его образования, так и от угла вылета конечной частицы. Более того, поскольку $t_{kk}(\theta_y)$ периодически меняют знак

Таблица. Тензоры ориентации $t_{20}(0^\circ)$ и параметры β_L , определенные в диссертации для выстроенных ядер – продуктов различных реакций. Значения $\beta_2(B(E2)\uparrow)$ и $\beta_2(Q_{\text{мом}})$ приведены из базы ядерных данных ЦДФЭ [11]

Реакция	E_x , МэВ	$t_{20}(0^\circ)$	$\beta_2(B(E2)\uparrow)$	$\beta_2(Q_{\text{мом}})$	β_2	β_3
${}^9\text{Be}(d, p\gamma){}^{10}\text{Be}(2^-)$	12.5		1.13±0.06		1.0	
${}^{10}\text{B}(d, p\gamma){}^{11}\text{B}(5/2^-)$	15.3			0.498±0.29	0.4	
${}^{13}\text{C}(d, \alpha\gamma){}^{11}\text{B}(5/2^-)$	15.3			0.498±0.29	0.4	
${}^{10}\text{B}(\alpha, d\gamma){}^{12}\text{C}(2^+)$	25.0		0.592±0.036	-0.411±0.226	-0.5	
${}^{11}\text{B}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}(2^+)$	25.0	-0.072	0.592±0.036	-0.411±0.226	-0.5±0.2	
${}^{12}\text{C}(p, p\gamma){}^{12}\text{C}(2^+)$	7.5	-0.239	0.592±0.036	-0.411±0.226	-0.55	
${}^{12}\text{C}(d, d\gamma){}^{12}\text{C}(2^+)$	15.3	-0.239	0.592±0.036	-0.411±0.226	-0.5	
${}^{12}\text{C}(\tau, \tau\gamma){}^{12}\text{C}(2^+)$	22.4	-0.239	0.592±0.036	-0.411±0.226	-0.35	
${}^{12}\text{C}(\alpha, \alpha\gamma){}^{12}\text{C}(2^+)$	30.3	-0.239	0.592±0.036	-0.411±0.226	-0.55±0.05	
${}^{13}\text{C}(\tau, \alpha\gamma){}^{12}\text{C}(2^+)$	22.5	-0.167	0.592±0.036	-0.411±0.226	-0.5±0.1	
${}^{14}\text{N}(d, \alpha\gamma){}^{12}\text{C}(2^+)$	15.4		0.592±0.036	-0.411±0.226	-0.5	
${}^{15}\text{N}(p, \alpha\gamma){}^{12}\text{C}(2^+)$	7.5		0.592±0.036	-0.411±0.226	-0.5	
${}^{11}\text{B}(\alpha, p\gamma){}^{14}\text{C}(3^-)$	30.3		0.361± 0.024			0.35
${}^{12}\text{C}(\alpha, p\gamma){}^{15}\text{N}(3/2^-)$	30.3				0.35	
${}^{14}\text{N}(\alpha, d\gamma){}^{16}\text{O}(3^-)$	30.3		0.362±0.018			0.4
${}^{15}\text{N}(\alpha, n\gamma){}^{16}\text{O}(3^-)$	30.3	-0.046	0.362±0.018			0.35
${}^{16}\text{O}(\alpha, \alpha\gamma){}^{16}\text{O}(3^-)$	25.2; 30.3	-0.195				0.4
${}^{16}\text{O}(\alpha, \alpha\gamma){}^{16}\text{O}(2^+)$	30.3	-0.239	0.362±0.018		0.3	
${}^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma){}^{16}\text{O}(3^-)$	7.5		0.362±0.018			0.35
${}^{19}\text{F}(\alpha, n\gamma){}^{20}\text{Ne}(2^+)$	30.3		0.728±0.032	0.741±0.134	0.35	
${}^{24}\text{Mg}(\alpha, \alpha\gamma){}^{24}\text{Mg}(2^+)$	30.3	-0.239	0.606±0.008	0.172 ± 0.082 0.438 ± 0.054 0.443 ± 0.071 0.713 ± 0.109	0.4	
${}^{27}\text{Al}(\alpha, n\gamma){}^{28}\text{Si}(2^+)$	25.0		0.407± 0.007	-0.352 ± 0.076 -0.313 ± 0.074	-0.35	
${}^{28}\text{Si}(\alpha, \alpha\gamma){}^{28}\text{Si}(2^+)$	30.3	-0.239	0.407± 0.007	-0.352 ± 0.076 -0.313 ± 0.074	-0.35	

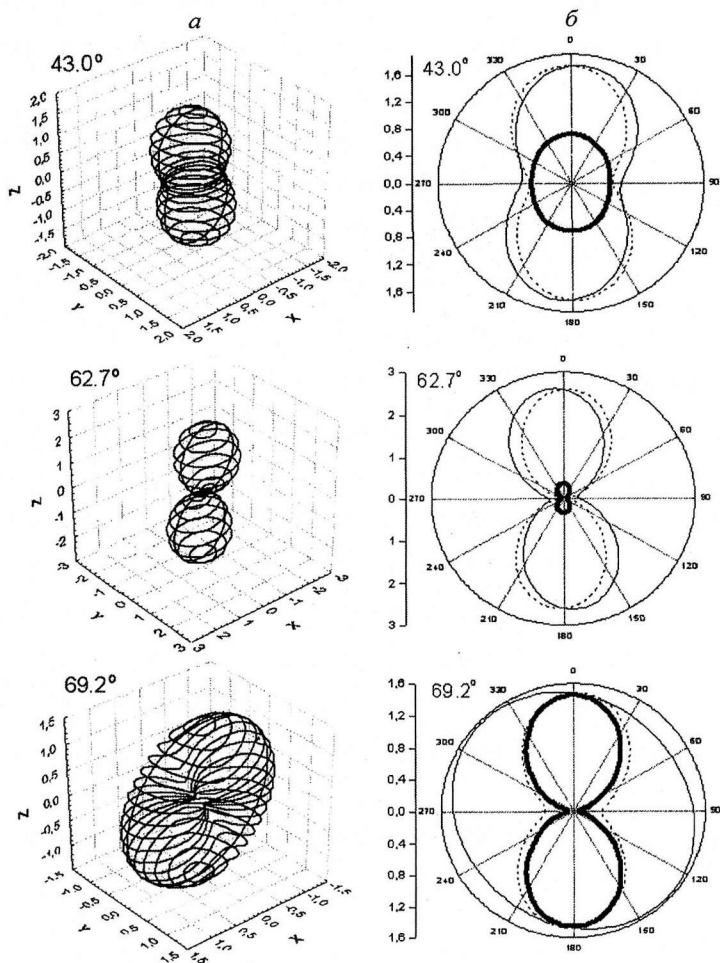


Рис. 13. Динамическая деформация (а) ядра $^{10}\text{Be} (2^+)$, образованном в реакции $^9\text{Be}(d, p_1)^{10}\text{Be}(2^+)$ при $E_d = 15.3$ МэВ. Ось Z направлена по импульсу ядра отдачи. Указаны углы θ_p (с.с.м.). На панели б показаны сечения сфероида динамической деформации плоскостями XZ (тонкие линии), YZ (пунктир) и XY (толстые линии).

относительно оси симметрии ядра, выстроенное ядро при некоторых углах может принимать почти сферическую форму, а при других – параметр динамической деформации может изменять знак по сравнению со статической. В частно-

сти, динамическая деформация ядра $^{12}\text{C}(2^+)$, образованного в неупругом рассеянии α -частиц в области относительно малых углов, имеет сложную аксиально-симметричную форму. Для больших θ_α она становится аксиально-несимметричной, слабо вытянутой или сплюснутой.

На рис. 13 представлена динамическая деформация ядра $^{10}\text{Be}(2^+)$, образованного в реакции $^9\text{Be}(d, p_1)^{10}\text{Be}$ при различных углах вылета протонов. Это ядро, как показано выше, имеет два избыточных нейтрона над четно-четным остовом $\langle 1p^4 \rangle$ и вопрос о том, сказывается ли такая структура на его динамической деформации, вызывает несомненный интерес.

Как видно из рисунка, при $\theta_p = 43^\circ$ сечения динамической деформации ^{10}Be в плоскости реакции XZ , так же как и в плоскости YZ , имеют эллипсоидальную форму, а в плоскости XU – почти окружность внутри сечений другими плоскостями. При $\theta_p = 62.7^\circ$ сечение в плоскости XU практически вырождается в точку, а сечения в остальных плоскостях – в форму, подобную лемнискатам, максимальные радиусы которых почти в 1.5 раза больше соответствующих радиусов эллипсоидальных сечений при $\theta_p = 43^\circ$.

Это может означать, что в ядре ^{10}Be существует пространственная периферия и достаточно четко сформированная центральная часть.

В **Заключении** перечислены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Список публикаций, отражающих основное содержание диссертационной работы:

1. Гуревич Г.С., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В., Теплов И.Б., Фатеева Л.Н., Местре Л. Исследование механизма реакции ($^3\text{He}, \alpha$) на ядре ^{13}C . // Изв. АН СССР. 1982. Т.46. С.897–902.
2. Гуревич Г.С., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В., Теплов И.Б., Шахворостова Г.В., Белкина М.Р. Восстановление спин тензора матрицы

- плотности состояния 4.43 МэВ ядра ^{12}C в реакции $^{12}\text{C}(\alpha, \alpha\gamma_{4.43})^{12}\text{C}$ при $E_\alpha = 25$ МэВ. // Известия АН СССР. Сер. физ. 1984. Т. 48. С. 119–122.
3. Гуревич Г.С., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В., Теплов И.Б., Фатеева Л.Н., Шахворостова Г.В. Экспериментальное определение угловой зависимости безмодельных характеристик неупругого рассеяния $^{12}\text{C}(\alpha, \alpha\gamma)^{12}\text{C}_{4.43}$ с помощью угловых α - γ -корреляций. // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 39. вып.1. С. 31–33.
 4. Васильева О.И., Гуревич Г.С., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В., Теплов И.Б., Фатеева Л.Н., Шахворостова Г.В., Лейва А. Определение спин-тензоров матрицы плотности состояния 4,43 МэВ (2^+) ядра ^{12}C в реакции ($^3\text{He}, \alpha\gamma$). // Известия АН СССР. Сер. физ. 1984. Т. 48. С. 1959–1964.
 5. Гуревич Г.С., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В., Теплов И.Б., Фатеева Л.Н., Шахворостова Г.В., Игнатенко А.В. Определение безмодельных характеристик неупругого рассеяния α -частиц на ^{12}C при $E_\alpha = 30$ МэВ. // Известия АН СССР. Сер. физ. 1986. Т. 50. С. 95–99.
 6. Зеленская Н.С., Лебедев В.М., Спасский А.В., Теплов И.Б. Определение ориентации различных тензорных характеристик возбужденных состояний ядер путем исследования функций угловой корреляции конечных частиц и γ -квантов. // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 1986. Т. 27. С. 38–43.
 7. Васильева О.И., Гуревич Г.С., Игнатенко А.В., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В., Теплов И.Б., Фатеева Л.Н., Шахворостова Г.В., Эль-Камхави А.Х. О механизме реакции $^9\text{Be}(d, p)^{10}\text{Be}$ при $E_d = 12,5$ МэВ. // ЯФ. 1987. Т. 45. вып. 2. С. 312–318.
 8. Васильева О.И., Гуревич Г.С., Игнатенко А.В., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В., Теплов И.Б., Фатеева Л.Н., Шахворостова Г.В., Эль-Камхави А.Х. Восстановление спин-тензоров матрицы плотности состояния 2^+ ; 4.43 МэВ ядра ^{12}C в реакциях $^{10}\text{B}(\alpha, d\gamma)^{12}\text{C}$ и $^{11}\text{B}(\alpha, \gamma)^{12}\text{C}$ при $E_d = 30$ МэВ. // Известия АН СССР. Сер. физ. 1987. Т. 51. С. 88–96.

9. Игнатенко А.В., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В., Шахворостова Г.В., Хоа Б. Исследование механизма реакции $^{11}\text{B}(^3\text{He}, d)^{12}\text{C}$ при $E_{\text{He}} = 18$ и 22 МэВ. // Известия АН СССР. Сер. физ. 1988. Т. 52. С. 996–1003.
10. Игнатенко А.В., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В., Теплов И.Б., Фатеева Л.Н. Энергетическая зависимость функций угловой корреляции в реакциях $^{10}\text{B}(\alpha, d\gamma)$ и $^{11}\text{B}(\alpha, t\gamma)^{12}\text{C}$ в области $E_{\alpha} = 21$ – 25 МэВ. // ЯФ. 1988. Т. 48. вып.4 (10). С. 929–934.
11. Zelenskaya N. S., Lebedev V.M., Spassky A.V., Teplov I.B Angular correlation function of final particles and gamma-quanta in the direct cluster transfer reactions. Proc. 5 Int. Conf. on Nuclear Reaction Mechanizm. / Ed. E. Gadolini. // Milan: Univer. di Milano-press, 1988. P. 280–288.
12. Васильева О.И., Гуревич Г.С., Игнатенко А.В., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В., Теплов И.Б., Шахворостова Г.В., Шестакова И.К. Угловая зависимость спин тензоров матрицы плотности состояния 4.44 МэВ ядра ^{12}C в реакциях (α, d) , и (α, t) на ядрах бора при $E_{\alpha} = 25$ МэВ. // ЯФ. 1989. Т. 49. вып.3. С. 625–631.
13. Игнатенко А.В., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В., Теплов И.Б., Шахворостова Г.В.. Исследование механизма рассеяния α -частиц ядрами ^{28}Si методом угловых α - γ корреляций при $E_{\alpha} = 25$ МэВ. // ЯФ. 1992. Т. 55. С. 597–607.
14. Игнатенко А.В., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В., Перес-Лопес Г.Э. Исследование механизма неупругого рассеяния ядер ^3He и ^4He на ^{12}C при $E_{\text{He}} = 6.3$ – 7.5 МэВ/нукл. методом угловых He- γ -корреляций. // ЯФ. 1994. Т. 57. С. 195–203.
15. Игнатенко А.В., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В. Исследование функции угловой корреляции в реакции $^{14}\text{N}(\alpha, d\gamma)^{16}\text{O}$ при $E_{\alpha} = 30.5$ МэВ. // Известия РАН. Сер. физ. 1994. Т. 58. № 11. С. 188–195.
16. Игнатенко А.В., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В. Исследование механизма реакции $^{19}\text{F}(\alpha, t)^{20}\text{Ne}$ при $E_{\alpha} = 30.3$ МэВ. // ЯФ 1995. Т. 58. С. 208–214.

17. Игнатенко А.В., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В. Исследование неупругого рассеяния α -частиц ядрами ^{16}O с помощью угловых $\alpha\gamma$ -корреляций. // ЯФ 1996. Т. 59. С. 597–606.
18. Игнатенко А.В., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В. Исследование динамических характеристик нижнего 3^- -состояния ядра ^{16}O в реакции $^{16}\text{O}(\alpha, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$ при $E_\alpha=30.3$ МэВ. // Известия РАН. Сер. физ. 1996. Т. 60. С. 189–192.
19. Игнатенко А.В., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В. Использование метода угловых $t\gamma$ -корреляций для исследования механизма реакции $^{27}\text{Al}(\alpha, t\gamma)^{28}\text{Si}$ при $E_\alpha = 30.3$ МэВ. // Известия РАН. Сер. физ. 1997. Т. 61. С. 2102–2110.
20. Игнатенко А.В., Лебедев В.М., Кордюкевич В.О., Орлова Н.В., Спасский А.В. Исследование механизма реакции $^{15}\text{N}(\alpha, t)^{16}\text{O}$ при $E_\alpha=30.3$ МэВ методом угловых $t\gamma$ -корреляций. // ЯФ. 1998. Т. 61. С. 5–12.
21. Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В. Многоступенчатые процессы в реакции $^9\text{Be}(d, p\gamma)^{10}\text{Be}$ при $E_d = 12.5$ МэВ. // ЯФ. 1998. Т. 61. № 9. С. 1604–1609.
22. Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В., Орлов П.В. Исследование динамических спиновых характеристик состояния $3^-(6.73$ МэВ) ядра ^{14}C с помощью реакции $^{11}\text{B}(\alpha, p\gamma)^{14}\text{C}$ при $E_\alpha = 30.3$ МэВ. // Известия РАН. Сер. физ. 1998. Т. 62. С. 2203–2208.
23. Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В. Определение деформации ядра ^{12}C с помощью угловых корреляций в реакциях $^{11}\text{B}(\alpha, t\gamma)^{12}\text{C}$ и $^{13}\text{C}(^3\text{He}, \alpha\gamma)^{12}\text{C}$. // ЯФ. 1999. Т. 62. С. 1546–1550.
24. Игнатенко А.В., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В. Исследование механизма реакции $^{14}\text{N}(d, \alpha\gamma)^{12}\text{C}$ методом угловых $\alpha\gamma$ -корреляций. // Известия РАН. Сер. физ. 1999. Т. 63. С. 1037–1043.

25. Игнатенко А.В., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В. Изучение динамических характеристик ядра ^{12}C в неупругом рассеянии α -частиц при $E_\alpha = 30$ МэВ. // Известия РАН. Сер. физ. 1999. Т. 63. С. 70–75.
26. Игнатенко А.В., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В. Исследование угловых $\alpha\gamma$ -корреляций в реакции $^{15}\text{N}(p, \alpha\gamma)^{12}\text{C}$ при $E_p = 7.5$ МэВ. // ЯФ. 2000. Т. 63. С. 1573–1580.
27. Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В. Изучение динамических характеристик ядра ^{12}C в реакции $^{10}\text{B}(\alpha, d\gamma)^{12}\text{C}$ при $E_\alpha = 25$ МэВ. // Известия РАН. Сер. физ. 2001. Т. 65. С. 724–728.
28. Зеленская Н.С., Игнатенко А.В., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В. Корреляционные характеристики реакции $^9\text{Be}(d, p\gamma)^{10}\text{Be}$ при $E_d = 15.3$ МэВ и структура ядра ^{10}Be . // ЯФ. 2001. Т. 64. С. 1995–2002.
29. Игнатенко А.В., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В., Сериков О.И. Исследование корреляционных характеристик реакции $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$ при $E_p = 7.5$ МэВ. // Известия РАН. Сер. физ. 2002. Т. 66. С. 1507–1513.
30. Галанина Л.И., Зеленская Н.С., Игнатенко А.В., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В., Сериков О.И. Исследование угловых корреляций в реакции $^{12}\text{C}(\alpha, p\gamma)^{15}\text{N}$ при $E_\alpha = 30.3$ МэВ. // Вестник Московского Университета, Серия 3. Физика. Астрономия. №4. 2003. С. 24–27.
31. Зеленская Н.С., Лебедев В.М., Спасский А.В. Исследование ориентированных ядерных систем методом угловых корреляций. // Научные технологии. 2003. Т. 4. С. 19–26.
32. Галанина Л.И., Зеленская Н.С., Игнатенко А.В., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Сериков О.И., Спасский А.В. Исследование механизма $^{10}\text{B}(d, p\gamma)^{11}\text{B}$ при $E_d = 15.3$ МэВ методом угловых $p\gamma$ -корреляций. // ЯФ. 2005. Т. 68. С. 2019–2029.
33. Лебедев В.М., Орлова Н.В., Сериков О.И., Спасский А.В. Исследование угловых $p\gamma$ -корреляций в неупругом рассеянии протонов на ^{12}C при $E_p = 7.5$ МэВ. // Известия РАН. Сер. физ. 2006. Т.70. С. 1645–1650.

34. Галанина Л. И., Зеленская Н. С., Лебедев В. М., Орлова Н. В., Сериков О.И., Спасский А.В., Колюхова 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. С. 297–307.
35. Галанина Л.И., Зеленская Н.С., Колюхова 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. С. 853–856.
36. Галанина Л.И., Зеленская Н.С., Колюхова 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. С. 1382–1393.
37. Галанина Л.И., Зеленская Н.С., Колюхова И.А., Лебедев В.М., Орлова Н.В., Спасский А.В., Артемов С.В. Угловые $\alpha\gamma$ -корреляции в неупругом рассеянии α -частиц на ^{24}Mg при $E_\alpha = 30.3$ МэВ. // Известия РАН, Сер. физ. 2011. Т. 75. С. 588–593.

Список цитированной литературы

1. Блум К. Теория матрицы плотности и ее приложений: Пер. с англ. Гос. Изд-во физ.-мат. лит. Москва, 1959.
2. Гольдфарб Л. Угловая корреляция и поляризация. Пер. с англ. Т. 1. Ядерные реакции. / Под ред. Эндта П.М. и Демера. // М. Изд-во иностр. лит. Москва, 1962. С. 154–207.
3. Зеленская Н.С., Теплов И.Б. Характеристики возбужденных состояний ядер и угловые корреляции в ядерных реакциях. // Энергоатомиздат. Москва, 1995.
4. Rubucki F, Tamura T., Satchler G.R. Particle-gamma angular correlations, following nuclear reactions. // Nucl. Phys. A. 1970. V. 146. P. 659–676.
5. Tamura T. Analyses of the scattering of nuclear particles by collective nuclei in terms of coupled-channel calculations. // Rev. Mod. Phys. 1965. V. 37. № 4. P. 679–708.

6. Неудачин В.Г., Смирнов Ю.Ф. Нуклонные ассоциации в легких ядрах. // М.: Наука, 1969.
7. Feshbach H., Weisskopf V.F. A Schematic Theory of Nuclear Cross Sections. // Phys. Rev. 1949. V. 76. P. 1550–1560.
8. Kunz P.D., Rost E. Comp. Nucl. Phys. Eds: Langanke K. et al. // Springer Verlag. 1993. V. 2. P. 88; Kunz P.D. <http://spot.colorado.edu/~kunz/Home.html>.
9. Беляева Т.Л., Заикин П.Н., Зеленская Н.С., Соколов А.М., Теплов И.Б. Программа OLYMP для расчета сечений реакции со сложными частицами методом искаженных волн с конечным радиусом взаимодействия. // М.: Изд-во Московского университета. 1981.
10. Belyaeva T.L., Zelenskaya N.S., Odintsov N.V. Computation of correlation characteristics of nuclear reactions induced by semi-heavy ions. // Comp. Phys. Comm. 1992. V. 73. P. 161–169.
11. База ядерных данных ЦДФЭ. <http://cdfc.sinp.msu.ru/>

Типография МГУ
119991, ГСП-1, г. Москва,
Ленинские Горы, д.1, стр.15
Заказ № 0445. Тираж 100 экз.