

## АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (Ph.D) по специальности 6D060500 – Ядерная физика Ткаченко Алеси Сергеевны на тему: «**Фазовый анализ ядерных процессов со спиновой структурой  $1+1/2$ ,  $1/2+3/2$ ,  $1+1$  и астрофизические приложения**»

**Общая характеристика работы.** Диссертация посвящена разработке формализма фазового анализа процессов с высоким значением спина канала ( $S > 1/2$ ) с целью применения полученных результатов для точного решения широкого спектра задач, таких как низкоэнергетические процессы ядерной астрофизики и физики плазмы, рассеяние адронов и мезонов в физике промежуточных энергий. Представлены аналитические оценки редукции точного метода фазового анализа в рамках модифицированной потенциальной кластерной модели (МПКМ), когда решается обратная задача восстановления потенциалов взаимодействия по экспериментальным наблюдаемым для асимптотических нормировочных коэффициентов (АНК), положений и ширин соответствующих резонансов в непрерывном спектре и энергий связи. В контексте МПКМ в работе рассмотрены реакции  ${}^3\text{He}({}^2\text{H}, \gamma){}^5\text{Li}$  и  ${}^{10}\text{Be}(n, \gamma){}^{11}\text{Be}$  при астрофизических энергиях.

**Актуальность исследования.** Принято считать, что эволюция Вселенной после Большого взрыва началась с цепочки синтеза химических элементов, первым звеном которой была реакция  $p(n, \gamma)d$ . Задача описания процессов синтеза химических элементов в ходе эволюции Вселенной послужила толчком для развития теории нуклон-нуклонного ( $NN$ ) взаимодействия. В настоящее время построено несколько десятков различных  $NN$ -потенциалов, однако универсального, способного описать любые процессы, не существует. Это *a priori* не позволяет построить единой теории атомного ядра более сложного, чем дейтерий.

Исследование последующего синтеза более тяжелых химических элементов опирается на микроскопически обоснованные с точки зрения квантово-механических принципов модели атомного ядра. В современном научном мире одной из общепризнанных является модель, известная как «метод резонирующих групп» (МРГ). Таким образом, для решения практических задач в контексте обсуждения  $NN$ -потенциала неизбежны некоторые приближения.

Один из возможных вариантов заключается в том, чтобы, опираясь на экспериментальные данные по упругому рассеянию, наблюдаемые энергетические спектры и асимптотические константы для связанных состояний, а также геометрические характеристики ядер, такие как зарядовый и массовый радиусы, восстановить потенциал взаимодействия в фиксированном бинарном кластерном канале. Этот подход известен как потенциальная кластерная модель (ПКМ).

В контексте ПКМ существует два способа учета фундаментального принципа Паули. Первый предполагает введение отталкивания в ядерном потенциале на малых расстояниях, то есть симулируется малая вероятность

перекрывания кластеров, или, другими словами, их обособление. Второй способ основан на введении глубокого потенциала притяжения, которое предполагает наличие запрещенных принципом Паули состояний (ЗС) как в дискретных, так и в непрерывных спектрах. ПКМ с использованием ЗС получила название модифицированной потенциальной кластерной модели (МПКМ)

Этот подход ранее уже использовался для описания полных сечений и  $S$ -факторов при астрофизических и тепловых энергиях процессов захвата нуклонов в следующих нуклон-ядерных каналах:  $n^2\text{H}$ ,  $p^2\text{H}$ ,  $p^3\text{H}$ ,  $n^6\text{Li}$ ,  $p^6\text{Li}$ ,  $n^7\text{Li}$ ,  $p^7\text{Li}$ ,  $n^8\text{Li}$ ,  $p^9\text{Be}$ ,  $n^9\text{Be}$ ,  $n^{10}\text{Be}$ ,  $p^{10}\text{B}$ ,  $n^{10}\text{B}$ ,  $p^{11}\text{B}$ ,  $n^{11}\text{B}$ ,  $n^{12}\text{C}$ ,  $p^{12}\text{C}$ ,  $n^{13}\text{C}$ ,  $p^{13}\text{C}$ ,  $n^{14}\text{C}$ ,  $p^{14}\text{C}$ ,  $n^{14}\text{N}$ ,  $n^{15}\text{N}$ ,  $p^{15}\text{N}$ ,  $n^{16}\text{O}$ , и  $p^{16}\text{O}$ . Применение МПКМ позволяет объяснить экспериментальные данные, а в некоторых случаях и *достоверно* предсказать поведение астрофизических  $S$ -факторов при низких и сверхнизких энергиях.

В данной работе впервые исследованы реакции  $^3\text{He}(^2\text{H}, \gamma)^5\text{Li}$  и  $^{10}\text{Be}(n, \gamma)^{11}\text{Be}$  при низких и астрофизических энергиях. Интерес к реакциям радиационного захвата в изобарно-аналоговых каналах  $^3\text{He}(^2\text{H}, \gamma)^5\text{Li}$  и  $^3\text{H}(^2\text{H}, \gamma)^5\text{He}$  обусловлен следующими причинами: эти реакции являются звеньями цепочки процессов нуклеосинтеза, происходящих на ранних стадиях звездообразования, а также являются возможными кандидатами для решения известной проблемы синтеза легких элементов в первичной Вселенной. Помимо этого, был рассмотрен возможный сценарий образования  $^6\text{Li}$  в астрофизических процессах с участием короткоживущего изотопа  $^5\text{Li}$ . Двухступенчатый процесс  $^2\text{H} + ^3\text{He} \rightarrow ^5\text{Li} + \gamma$  и  $n + ^5\text{Li} + \gamma \rightarrow ^6\text{Li} + \gamma$  предлагается в качестве альтернативного способа образования  $^6\text{Li}$  в нуклеосинтезе Большого Взрыва.

Исследования звездной динамики по синтезу нейтроноизбыточных изотопов бериллия на сегодняшний день опираются на единственные безмодельные расчеты для скорости реакции  $\langle \sigma v \rangle$  радиационного захвата нейтронов на  $^{10}\text{Be}$ , полученные Раушером в 1993. Полученные в настоящей работе оценки скорости реакции  $^{10}\text{Be}(n, \gamma)^{11}\text{Be}$  в рамках современных данных по спектрам ядра  $^{10}\text{Be}$ , а также его спектроскопическим характеристикам показывают кардинально иную энергетическую зависимость  $\langle \sigma v \rangle$ . Как следствие, требуются новые оценки цепочек эволюции ранней Вселенной по «бериллиевому» или «борному» сценариям.

**Цель работы:** разработка формализма фазового анализа высокоспиновых процессов рассеяния, а также апробация и аналитическая оценка методов построения потенциалов взаимодействия в бинарных кластерных каналах, применимых для решения астрофизических задач.

**Задачи исследования:**

1. Разработать формализм фазового анализа для систем со спиновой структурой  $1+1/2$ ,  $1+3/2$  и  $1+1$ . Разработать компьютерную программу для расчёта фаз рассеяния;

2. Проанализировать альтернативные методы нахождения фаз рассеяния и построения потенциалов взаимодействия в бинарных кластерных каналах;

3. Построить бинарные потенциалы взаимодействия при низких и астрофизических энергиях в рамках модифицированной потенциальной кластерной модели для реакций  ${}^3\text{He}({}^2\text{H}, \gamma){}^5\text{Li}$  и  ${}^{10}\text{Be}(n, \gamma){}^{11}\text{Be}$ ;

4. Рассчитать полные сечения рассеяния, астрофизические  $S$ -факторы и скорости реакций  ${}^3\text{He}({}^2\text{H}, \gamma){}^5\text{Li}$  и  ${}^{10}\text{Be}(n, \gamma){}^{11}\text{Be}$ .

**Объект исследования:** кластерные системы легких ядер.

**Предмет исследования:** процессы рассеяния спиновых частиц в бинарных каналах, а также реакции радиационного захвата при астрофизических энергиях.

**Методы исследования:** квантовая теория углового момента, метод парциальных волн, численные методы для решения дифференциальных уравнений и систем алгебраических уравнений, численные методы решения уравнения Шредингера.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Дифференциальные сечения рассеяния для процессов со спином канала  $S > 1/2$  являются универсальными в рамках квантовой теории столкновений с учетом спин-орбитального и спин-спинового взаимодействия без ограничений по числу парциальных волн и спину канала.

2. Двухступенчатый механизм синтеза ядер  ${}^6\text{Li}$  при Большом Взрыве, состоящий из реакций  ${}^2\text{H} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^5\text{Li} + \gamma$  и  $n + {}^5\text{Li} + \gamma \rightarrow {}^6\text{Li} + \gamma$  и рассчитанный для энергий до 5 МэВ на основе полных сечений, астрофизического  $S$ -фактора и скорости реакции  ${}^3\text{He}({}^2\text{H}, \gamma){}^5\text{Li}$  в рамках модифицированной потенциальной кластерной модели, объясняет соотношение  ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$  во Вселенной.

3. Модифицированная потенциальная кластерная модель воспроизводит имеющиеся экспериментальные данные по полным сечениям радиационного захвата нейтронов на ядре  ${}^{10}\text{Be}$  в диапазоне энергий от 25,3 мэВ до 10,0 МэВ.

**Научная новизна исследования:**

1. Развита универсальная математическая формализация построения сечений упругого рассеяния для мультиплетных состояний (от синглетных с  $2S+1=1$  до секстетных с  $2S+1=6$ ), который учитывает спин-орбитальное и спин-спиновое взаимодействие и позволяет проводить фазовый анализ с учетом любого количества парциальных волн.

2. В рамках модифицированной потенциальной кластерной модели с использованием запрещенных состояний воспроизведены экспериментальные полные сечения процесса  ${}^3\text{He}({}^2\text{H}, \gamma){}^5\text{Li}$  при энергиях до 5 МэВ. Установлена роль этого процесса в образовании  ${}^6\text{Li}$  в нуклеосинтезе Большого Взрыва через его участие в двухступенчатом механизме, состоящем из реакций  ${}^2\text{H} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^5\text{Li} + \gamma$  и  $n + {}^5\text{Li} + \gamma \rightarrow {}^6\text{Li} + \gamma$ .

3. Экспериментальные значения полных сечений процесса радиационного захвата нейтронов на ядре  ${}^{10}\text{Be}$  воспроизведены в рамках модифицированной потенциальной кластерной модели, учитывающей запрещенные состояния, а также рассчитаны скорости данной реакции в диапазоне энергий от 25,3 мэВ до 10,0 МэВ.

**Теоретическая и практическая значимость**

Математический формализм, представленный для матрицы рассеяния со спиновой структурой  $\vec{s}_1 + \vec{s}_2 = \vec{1} + \vec{1} / 2$ ,  $\vec{s}_1 + \vec{s}_2 = \vec{1} / 2 + \vec{3} / 2$  и  $\vec{s}_1 + \vec{s}_2 = \vec{1} + \vec{1}$  в виде разложения по парциальным амплитудам, позволяет на основе экспериментальных данных по дифференциальным сечениям рассеяния провести последовательный фазовый анализ как для упругих, так и для неупругих процессов. Эти же амплитуды являются структурными элементами для расчета поляризационных характеристик, таких как асимметрия углового распределения, векторная и тензорная поляризация и коэффициенты передачи поляризации.

Область применения полученного математического формализма не ограничивается только астрофизическими задачами; он может быть использован, к примеру, при изучении низкоэнергетических процессов физики плазмы, в частности, для учета квантовомеханических эффектов, а также в задачах рассеяния адронов и мезонов в физике промежуточных энергий.

Детальный фазовый анализ также позволяет строить бинарные потенциалы взаимодействия различной сложности – центральные, спин-спиновые, тензорные и т.д. В будущем, на основе представленной аналитики возможно создать программные коды и программное обеспечение для последовательного фазового анализа на основе современных экспериментальных данных.

Кроме того, в рамках модифицированной потенциальной кластерной модели была продемонстрирована возможность получения фаз рассеяния косвенным образом, а именно из экспериментальных данных о спектрах легких ядер: энергии возбуждения  $E_{cm}$ , ширины уровней  $\Gamma$ , квантовых характеристик  $J^\pi$ , а также асимптотических нормировочных коэффициентов.

Исследован процесс радиационного захвата нейтронов  $^{10}\text{Be}(n, \gamma)^{11}\text{Be}$  в области энергий  $25.3 \text{ meV} \leq E \leq 10.0 \text{ MeV}$ . Полученные расчеты полных сечений реакции хорошо согласуются с экспериментальными значениями, восстановленными по измерениям кулоновской диссоциации. На сегодняшний день исследования звездной динамики опираются на единственные безмодельные расчеты Раушера (1993) для скорости реакции. Наши расчеты  $\langle \sigma v \rangle$  реакции  $^{10}\text{Be}(n, \gamma)^{11}\text{Be}$  отличаются от данных Раушера и, таким образом, могут существенно изменить представление о роли бериллиевой цепочки в общей макроскопической картине массовых долей содержания легких элементов на ранней стадии эволюции Вселенной.

На основе модифицированной потенциальной кластерной модели рассчитаны сечения процессов радиационного захвата  $^3\text{H}^3\text{He}$  и  $n^5\text{Li}$  и выполнена их аналитическая параметризация, были рассчитаны скорости этих реакций.

На основании сравнения скоростей реакций захвата  $^2\text{H}^3\text{He}$  и  $^2\text{H}^4\text{He}$  и распространенности легких элементов было сделано предположение о том, что двухступенчатый процесс  $^2\text{H} + ^3\text{He} \rightarrow ^5\text{Li} + \gamma$  и  $n + ^5\text{Li} + \gamma \rightarrow ^6\text{Li} + \gamma$  вносит вклад в образование  $^6\text{Li}$ , особенно при температурах  $T_9$  порядка единицы. В этом интервале температур число нейтронов еще не начало уменьшаться, а количество ядер дейтерия  $^2\text{H}$  и изотопа  $^3\text{He}$  уже достигает своего максимума, что

приводит к увеличению выхода реакции  ${}^2\text{H} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^5\text{Li} + \gamma$ . Таким образом, необходимы дополнительные количественные расчеты для более точной оценки вклада этих реакций в накопление ядер  ${}^6\text{Li}$  в процессах нуклеосинтеза Большого Взрыва, звездах и других астрофизических процессах.

**Личный вклад автора.** Ткаченко Алеся принимала участие во всех этапах исследовательской работы, включая разработку формализма для проведения фазового анализа и применение МПКМ для исследования астрофизических процессов  ${}^3\text{He}({}^2\text{H}, \gamma){}^5\text{Li}$  и  ${}^{10}\text{Be}(n, \gamma){}^{11}\text{Be}$ . Исследовательские работы проводились в Казахском Национальном Университете им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан), а также во время зарубежной стажировки, проходившей на базе Городского университета Нью-Йорка (CUNY, Нью-Йорк, США).

**Апробация работы и научные публикации.** Результаты, полученные в данной диссертации, были опубликованы в казахстанских и российских научных журналах: *International Journal of Mathematics and Physics* (1 статья), *Известия вузов* (2 статьи), *Известия НАН РК* (1 статья); в зарубежных научных журналах с импакт-фактором: *Nuclear Physics A* (2 статьи) и *Astroparticle Physics* (1 статья). Также результаты исследовательской работы были представлены на международных конференциях: 9<sup>th</sup> International Scientific Conference “*Modern Achievements of Physics and Fundamental Physical Education*” (12-14 октября, 2016, Казахстан, Алматы), International Conference of Students and Young Scientists “*Farabi Aelmy*” (10-13 апреля, 2017 и 9-12 апреля, 2018, Казахстан, Алматы), International Scientific Forum “*Nuclear Science and Technology*” (12-15 сентября, 2017, Казахстан, Алматы), *International Conference on Few-Body Problems in Physics* (FB22) (9-13 июля, 2018, Франция, Кон).

**Достоверность и обоснованность результатов** работы связаны с тем, что в расчетах используются алгебраические методы квантовой теории углового момента, а построение потенциалов взаимодействия и расчеты характеристик реакций радиационного захвата основаны на современных экспериментальных данных по спектрам уровней, их ширине, асимптотическим константам, сечениям и астрофизическим *S*-факторам. Достоверность и обоснованность результатов, полученных в данной работе, подтверждаются публикациями в изданиях, рекомендованных ККСОН МОН РК и ВАК РФ, в международных рецензируемых научных журналах, а также в трудах различных международных научных конференций.

**Связь темы диссертации с планами научных работ.** Диссертационная работа выполнена в рамках следующих научных проектов:

1. «Исследование термоядерных процессов во Вселенной» (0073-8/ПЦФ-15-МОН/1-16-ОТ, 2015-2017);

2. «Изучение термоядерных процессов в звездах и первичном нуклеосинтезе вселенной» (IRN: BR05236322-ОТ-19, 2018-2020).

**Объем и структура диссертации.** Объем диссертации составляет 129 печатных страниц. Работа состоит из Введения, 4 разделов, Заключения, Списка использованных источников и двух Приложений; включает 19 рисунков и 14 таблиц. Список использованных источников состоит из 147 наименований.

**Выводы.** В данной диссертации предпринята успешная попытка разработки математического формализма фазового анализа для высокоспиновых ядерных процессов, применимого, в том числе, и к астрофизическим задачам.

Также в рамках МПКМ была продемонстрирована возможность получения фаз рассеяния для исследуемых процессов косвенным образом, основываясь на экспериментальных данных (энергии возбуждения  $E_{cm}$ , ширины уровней  $\Gamma$ , квантовых характеристик  $J^\pi$ , АНК).

На основании полученных фаз рассеяния были построены бинарные потенциалы взаимодействия в рамках МПКМ и рассчитаны характеристики реакций радиационного захвата  ${}^3\text{He}({}^2\text{H}, \gamma){}^5\text{Li}$  и  ${}^{10}\text{Be}(n, \gamma){}^{11}\text{Be}$ .

В результате проведенного исследования были сформулированы следующие выводы:

1. Полученные аналитические выражения для дифференциальных сечений упругого рассеяния с учетом спин-орбитального и спин-спинового взаимодействия применимы для изучения каналов с целочисленным и полуцелым значением спина. Полные дифференциальные сечения для каждого спина канала  $S$  выражаются через соответствующие независимые парциальные амплитуды, параметризованные относительно орбитального момента  $\ell$ , благодаря чему эти выражения позволяют учитывать любое число парциальных волн.

2. Применение МПКМ позволило получить теоретические результаты, согласующиеся в целом с имеющимися экспериментальными данными, для  $S$ -фактора или полного сечения радиационного захвата  ${}^3\text{He}({}^2\text{H}, \gamma){}^5\text{Li}$  при астрофизических энергиях. Получены простые параметризации сечений и скоростей реакций радиационного захвата  ${}^5\text{Li}(n, \gamma){}^6\text{Li}$  и  ${}^3\text{H}({}^3\text{He}, \gamma){}^6\text{Li}$ , а также проведено сравнение скоростей этих двух процессов и скорости реакции захвата  ${}^3\text{He}({}^2\text{H}, \gamma){}^5\text{Li}$ , рассмотрен возможный вклад захвата нейтронов на ядре  ${}^5\text{Li}$  в образование стабильного  ${}^6\text{Li}$ .

Качественно показано, что захват нейтронов на  ${}^5\text{Li}$ , который образуется при захвате  ${}^3\text{He}({}^2\text{H}, \gamma){}^5\text{Li}$  в области температур порядка  $1,0 T_9$  в нуклеосинтезе Большого Взрыва, вносит существенный вклад в процессы первичного накопления стабильного  ${}^6\text{Li}$ .

3. В рамках МПКМ были построены потенциалы взаимодействия  $n{}^{10}\text{Be}$ . Эти потенциалы в целом правильно воспроизводят экспериментальные данные для полных сечений радиационного захвата нейтронов на ядре  ${}^{10}\text{Be}$  при низких и сверхнизких энергиях в диапазоне от 25,3 мэВ до 10,0 МэВ.

Теоретические сечения были рассчитаны при энергии от 10,0 мэВ до 10,0 МэВ и аппроксимированы простой функцией энергии, которую можно использовать для расчета сечений при энергиях менее 10 эВ.