

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук Лютостанского Ю. С., о диссертации **Науменко Михаила Алексеевича** на тему «Исследование особенностей ядерных реакций с участием легких ядер в нестационарном подходе» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц, представленной в диссертационный совет Д 720.001.01 при Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова (ЛТФ) Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ), г. Дубна.

Активное изучение ядерных реакций с участием изотопов легких ядер в настоящее время обусловлено развитием ускорительной техники и возможностью получения высокоинтенсивных пучков радиоактивных ядер. Это делает актуальной задачу развития теоретических моделей для описания ядерных реакций с такими ядрами как изотопы гелия, лития и др. Рассматриваемая диссертация представляет собой пример теоретического исследования важных физических задач, проведенного на достаточно высоком научном уровне. Объектом исследования были выбраны процессы передачи и перераспределения нейтронов. Первой целью работы являлось проведение теоретического описания процессов передачи нейтронов в низкоэнергетических ядерных реакциях с участием легких ядер-снарядов ${}^3,6\text{He}$ и представительным набором тяжелых ядер-мишеней на основе численного решения нестационарного уравнения Шредингера. Вторая цель работы заключалась в объяснении различий в энергетических зависимостях полных сечений реакций ${}^6\text{He} + {}^{28}\text{Si}$ и ${}^4\text{He} + {}^{28}\text{Si}$, а также ${}^9\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$ и ${}^{6,7}\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$ на основе нестационарного описания перераспределения внешних нейтронов ядер ${}^6\text{He}$ и ${}^9\text{Li}$. Указанные задачи были успешно решены. Эти результаты важны и актуальны в связи с тем, что недавние эксперименты выявили необычные особенности реакций с рядом легких слабосвязанных ядер. **Актуальность** и значимость темы диссертационной работы не вызывает сомнений.

Научная и практическая ценность проведенных автором диссертации исследований несомненна. В диссертации подробно представлено завершенное научное исследование, давшее значительные результаты для ядерной физики. Результаты диссертации могут быть использованы при проведении дальнейших теоретических и экспериментальных исследований в области ядерной физики,

проводимых ЛЯР ОИЯИ (Дубна) и других российских и зарубежных научных центрах. **Новизна результатов** диссертации очевидна. Проведено теоретическое описание процессов передачи нейтронов в низкоэнергетических ядерных реакциях для большого набора комбинаций легких ядер-снарядов и тяжелых ядер-мишеней, а также дано наглядное объяснение различий в энергетических зависимостях полных сечений реакций ${}^6\text{He} + {}^{28}\text{Si}$ и ${}^4\text{He} + {}^{28}\text{Si}$, а также ${}^9\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$ и ${}^{6,7}\text{Li} + {}^{28}\text{Si}$, получено согласие с экспериментальными данными. Значимость и новизна результатов подтверждается значительным числом статей, опубликованных по материалам диссертации, а также большим числом докладов на конференциях.

Обоснованность полученных результатов обусловлена тем, что при выполнении программы исследований получено согласие с экспериментальными данными. В то же время диссертацию можно рассматривать как некоторый шаг в развитии и совершенствовании использованных теоретических методов. Решалась сложная комплексная задача по одновременному учету, как процессов передачи нейтрона, так и процессов слияния-испарения, каждый из которых оказывал влияние на конечный результат. **Достоверность** полученных результатов обусловлена применением нескольких взаимно дополняющих теоретических подходов (нестационарного уравнения Шредингера, оптической модели, континуальных интегралов Фейнмана) и не вызывает сомнений. Необходимо отметить значительный **личный вклад** М.А. Науменко в исследованиях, отраженных в диссертации.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

Во введении обсуждается актуальность работы и мотивация проводимых исследований, дается краткий обзор по теме диссертации. Здесь также приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе предложен и реализован алгоритм параллельных вычислений энергий и плотностей вероятности для основных состояний малонуклонных систем методом континуальных интегралов Фейнмана. Использование параллельных вычислений позволило достичь ускорения времени расчетов более чем в 100 раз по сравнению с последовательными вычислениями. Были выполнены расчеты для ядер ${}^3\text{H}$, ${}^{3,4,6}\text{He}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$ и получено хорошее согласие с экспериментальными данными по энергиям связи этих ядер и по зарядовому распределению для ядра ${}^3\text{He}$. Эти результаты были использованы для последующего теоретического описания реакций передачи нейтронов с участием ядер ${}^{3,6}\text{He}$.

Во второй главе сформулирована модель для расчетов перераспределения и сечений передачи нейтронов при столкновениях с участием легких ядер на основе решения нестационарного уравнения Шредингера для двухкомпонентной спинорной волновой функции нейтрона. Начальные волновые функции нейтронов были вычислены в рамках оболочечной модели, причем для изотопов гелия была использована новая форма среднего поля, учитывающая отталкивательный кор нуклон-нуклонного взаимодействия и свойства точных волновых функций основных состояний малонуклонных систем, найденных в главе 1. Расчеты вероятностей срыва и подхвата нейтрона на основе эволюции волновой функции нейтрона представляются более точными по сравнению с методами, основанными на теории возмущений. Интегрирование вероятности передачи нейтрона по прицельным параметрам было использовано для расчетов сечений передачи нейтрона. При анализе экспериментальных сечений образования изотопов была учтена возможность их образования путем слияния сталкивающихся ядер с последующим испарением нуклонов и α -частиц. С этой целью использовались вычислительные коды для расчетов сечения слияния и образования испарительных остатков в статистической модели. Было получено хорошее согласие с экспериментальными данными по сечениям образования изотопов $^{44,46}\text{Sc}$ в реакции $^3\text{He} + ^{45}\text{Sc}$, $^{196,198}\text{Au}$ в реакции $^3\text{He} + ^{197}\text{Au}$, в ^{46}Sc в реакции $^6\text{He} + ^{45}\text{Sc}$, ^{65}Zn в реакции $^6\text{He} + ^{64}\text{Zn}$ и $^{196,198}\text{Au}$ в реакции $^6\text{He} + ^{197}\text{Au}$.

В третьей главе проведено теоретическое исследование влияния процессов перераспределения нейтронов на полные сечения реакций с легкими слабосвязанными ядрами ^6He и ^9Li при энергиях столкновения в диапазоне 5–60 А МэВ. На основе решения нестационарного уравнения Шредингера, описанного в главе 2, был проведен расчет эволюции волновых функций внешних нейтронов ядер-снарядов в процессе столкновения с ядрами ^{28}Si в широком диапазоне энергий от кулоновского барьера до 60 А МэВ. Установлено, что поведение данных волновых функций заметно отличается при различных энергиях – при низких энергиях образуются «молекулярные» состояния, охватывающие оба ядра, при промежуточных энергиях плотность вероятности в значительной мере концентрируется в области между двумя ядрами по сравнению с «замороженными» нейтронами, а при больших энергиях нейтроны не успевают перераспределиться. На основе численного решения нестационарного уравнения Шредингера рассчитана поправка к оптическому потенциалу, зависящая от энергии и учитывающая перераспределение нейтронов ядер-снарядов в процессе столкновения с

ядрами-мишенями. Таким образом, предложено физическое обоснование выбора параметров оптического потенциала взаимодействия, зависящих от энергии. Введение указанной поправки в расчеты в рамках оптической модели впервые позволило получить хорошее согласие расчетов с экспериментальными данными по полным сечениям изученных реакций.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы. Они соответствуют положениям, выносимым на защиту.

Диссертация написана хорошим языком, практически без опечаток и с приведением всех необходимых формул. Численные результаты представлены в виде таблиц и графиков. Проведенные исследования описаны подробно, с обоснованием основных положений и аккуратным цитированием использованной литературы. Показано хорошее знание современного состояния исследований в данной области, и на данном фоне ясно видна новизна и значимость проведенных исследований.

По содержанию диссертации есть следующие **замечания**.

1. Почему в число публикаций не входит работа Загребаяев В.И., Науменко М.А., Грайнер В. Нуклонные передачи в процессах глубоко неупругого рассеяния, квазиделения и слияния тяжелых ионов // Изв. РАН Сер. физ. 2005. Vol. 69, № 11. P. 1585–1592?
2. На стр. 29 сказано «использование технологии CUDA ... в некоторых случаях оно даже может позволить провести вычисления, невозможные ранее.» Следовало бы привести пример.
3. На стр. 75 сказано «Приближение (2.25) соответствует пренебрежению остаточным взаимодействием передаваемого нейтрона с нуклонами ядра-мишени.» Похоже, что остаточным взаимодействием пренебрегается. Но поскольку оно дает/может дать резонансную картину, требуется подробное пояснение.
4. Известно, что ядра изотопов золота деформированные. В диссертационной работе все расчеты проводились для сферических потенциалов. Нужно было бы пояснить, какие изменения результатов расчетов возможны при учете деформации ядер?
5. На стр. 125 сказано «Меньшее проявление локального максимума в энергетической зависимости полного сечения для ядра ${}^6\text{He}$ по сравнению с ${}^9\text{Li}$ может быть объяснено большей протяженностью и разреженностью нейтронного гало ядра ${}^6\text{He}$ по сравнению с более компактным

нейтронным слоем («скином» от английского слова «skin») ядра ${}^9\text{Li}$.» Не очень понятное объяснение, стоило бы пояснить подробнее.

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертации.

В целом, диссертация представляет собой законченное научное исследование – научно-квалификационную работу, в которой содержится решение задачи, имеющей существенное значение для ядерной физики. Основные результаты диссертации докладывались на международных конференциях и опубликованы в ведущих российских научных журналах.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Могу с уверенностью утверждать, что рассматриваемая работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК и Минобрнауки РФ к кандидатским диссертациям, а ее автор, Науменко Михаил Алексеевич, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Официальный оппонент:

Лютостанский Юрий Степанович

19.04.2018

начальник отдела Национального
исследовательского центра «Курчатовский институт»,
доктор физико-математических наук
адрес: 123182 Москва, пл. Курчатова 1
тел.: раб. 8-499-196-98-12, моб. +7-915-298-52-45
e-mail: lutostansky@yandex.ru

Даю согласие на обработку моих персональных данных любым законодательно разрешенным способом.

Подпись официального оппонента Ю. С. Лютостанского заверяю:

Главный ученый секретарь
НИЦ «Курчатовский институт»



С. Ю. Стремоухов