

Гин Дмитрий Борисович

ПРИМЕНЕНИЕ ЯДЕРНЫХ МЕТОДОВ ГАММА СПЕКТРОМЕТРИИ
ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

Специальность 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Физико-Техническом Институте им. А.Ф. Иоффе Российской Академии Наук

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
Пастернак Александр Абрамович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических,
Явшиц Сергей Георгиевич,
Радиевый институт им. В.Г. Хлопина,
Санкт-Петербург

доктор физико-математических,
Исаков Вадим Иванович
Петербургский Институт Ядерной Физики
им. Б.П. Константинова
Санкт-Петербург

Ведущая организация: Санкт-Петербургский Государственный
Политехнический Университет,
Санкт-Петербург

Защита состоится « 15 » марта 2012 г. в 12⁴⁵ на заседании диссертационного совета Д 212.232.16 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 199004, Санкт-Петербург, Средний проспект д. 41, межфакультетский учебный центр, ауд. 304.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке СПбГУ.

Автореферат разослан « 10 » февраля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Власников А.К.

Общая характеристика работы.

Актуальность темы.

Одним из основных объектов исследования диссертации является реакция ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$, широко известная как экспериментаторам, так и теоретикам. В первую очередь это обусловлено возможностью использования её в качестве генератора нескольких групп моноэнергетичных нейтронов, особенно для исследований в области 6-12 МэВ, где традиционные DD- и DT- генераторы неприменимы. Особый интерес эта реакция представляет собой для астрофизических исследований, в частности в литературе рассматривается её роль в процессе нуклеосинтеза красных гигантов, а также в g -процессе. С точки зрения ядерной теории, интересен механизм реакции, который представляет собой сложную комбинацию компаунд- и прямых процессов. С этим связан первый из трех основных аспектов актуальности темы диссертации, каждый из которых, в свою очередь, связан с решаемыми в работе задачами. Основным же стимулом для изучения этой реакции в данной работе явилась возможность использовать её для диагностики быстрых α - частиц в высокотемпературной плазме, ставшая особенно актуальной в рамках работ по реализации международного проекта ИТЕР (реализация которого началась в 2008 г. в г. Кадараш, Франция), а также в связи с проведением в 2008-2009 г.г. гамма-спектрометрических измерений с HrGe детектором высокого разрешения на крупнейшем европейском токамаке JET. Диагностика α - частиц в высокотемпературной плазме необходима для обеспечения её эффективного нагрева и оптимизации режимов работы больших токамаков. Рассматриваемый в работе анализ доплеровски уширенных линий ядерных переходов позволяет получать уникальную информацию о функциях распределений быстрых частиц в пространстве скоростей (второй аспект актуальности). При этом для реализации соответствующих расчётов необходимы связанные с первым аспектом данные о кинематике реакций, которые в случае линии 4.44 МэВ реакции ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$ определяются функцией угловой корреляции (ФУК) n - γ . ФУК зависит от относительной энергии реагирующих частиц и несет информацию о механизме реакции. Сложностью при реализации гамма- спектроскопии в термоядерной плазме является обеспечение хорошего отношения пика к фону, который во многих случаях определяется потоками нейтронов, а применение полупроводниковых спектрометров делает задачу защиты от этого вида излучения особенно важной. Одним из основных вопросов данной работы является обоснование такой защиты проведенное на базе экспериментальных данных и MCNP расчётов (третий аспект актуальности).

Цели работы.

Целью диссертационной работы является разработка методов диагностики быстрых частиц с помощью анализа зарегистрированных детекторами высокого разрешения доплеровски уширенных форм линий (ФЛ) разрядки дискретных уровней ядер, возбуждаемых в реакциях высокотемпературной плазмы. В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие задачи:

- Разработка методов определения параметров кинематики реакций, в том числе с нахождением коэффициентов, определяющих ФУК. Это включает в себя разработку алгоритмов и кодов расчета таких наблюдаемых величин как ФЛ и угловые распределения (УР) по заданным параметрам кинематики (далее называемой «первой прямой задачей», связанной с первым аспектом актуальности) и определения искомым параметров по данным измерений на ускорителях (далее называемой «первой обратной задачей»).
- Разработка алгоритмов и кодов расчета для наблюдаемых из плазмы величин. Включает задачу (вторую «прямую») расчета по заданной модели сценариев плазменного разряда (функциям распределения частиц в пространствах координат и скоростей) ожидаемых ФЛ и сравнение их с результатами наблюдений, а также задачу (вторую «обратную») определения параметров плазмы по наблюдаемым данным.
- Демонстрация возможностей разрабатываемой методики на примере оценки параметров функций распределения (ФР) частиц по наблюдаемым ФЛ и их интенсивностям в конкретных экспериментах с высокотемпературной плазмой.
- Как для нахождения кинематики, так и для плазменных расчетов определение множества эффектов, необходимых к учёту при расчётах и анализе наблюдаемых величин. Такими эффектами могут быть релятивистские поправки, угловые размеры и энергетическое разрешение детектора, торможение частиц и т.д.
- Анализ различных источников фонового излучения при плазменных измерениях.
- Выбор и обоснование параметров нейтронной защиты, в том числе основного поглощающего материала.

Научная новизна работы.

Ниже отмечены основные аспекты новизны работы с точки зрения ядерной физики.

- Впервые получены данные кинематики реакции ${}^7\text{Li}(n, n'\gamma){}^7\text{Li}^*$.
- Впервые в широком диапазоне энергий налетающих α - частиц восстановлена кинематика реакции ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$. Для этого впервые разработана и применена модель многопараметрической ФУК, для нахождения поведения которой одновременно использовались большой объём данных ФЛ для различных положений детектора и УР вылетающих частиц и γ - квантов.
- Впервые получены и параметризованы сечение и функция возбуждения реакции ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$ с ядерным переходом 4.44 МэВ.

Далее приведены аспекты новизны для плазменного эксперимента.

- Впервые проведены измерения ФЛ, зарегистрированных детектором высокого разрешения в плазменном эксперименте.
- Впервые проведен прецизионный анализ ФЛ из плазменного эксперимента (анализ упомянутых выше данных). В этих экспериментах впервые по ФЛ идентифицированы

реакции, а также впервые оценены температуры хвостов ФР быстрых частиц. Таким образом впервые продемонстрированы возможности гамма- спектрометрии высокого разрешения для диагностики плазмы.

- ${}^6\text{LiH}$ нейтронный attenuator впервые успешно применен в плазменном эксперименте. Проведенные в работе расчёты являются первыми, сопоставленными с экспериментальными данными из разрядов в высокотемпературной плазме и использованными таким образом при обосновании нейтронной защиты детекторов в токамаках.

Практическая значимость результатов работы.

Разработанные коды по восстановлению параметров реакции на основе форм и интенсивностей гамма линий учитывают множество разнообразных физических явлений, таких как торможение частиц, релятивистские поправки, угловые корреляции (УК), и могут быть использованы для восстановления данных широкого класса реакций с лёгкими ядрами. Практически без адаптации они могут быть применены к любой реакции с двумя частицами во входном и выходном каналах, позволяя анализируя ФЛ и УР извлекать параметры кинематики. Такие исследования оказываются более эффективными по сравнению с организацией методики совпадений, не столь дорогими, как эксперименты на многодетекторных системах, также применимы в случае, когда сложно или невозможно регистрировать частицы в выходном канале, и, наконец, позволяют легко различать различные ветви реакции при исследованиях УР частиц выходного канала и дифференциальных сечений.

Применение гамма-диагностики высокого разрешения является уникальной методикой получения данных о быстрых частицах в высокотемпературной плазме, позволяя восстанавливать их ФР. Найденные параметры реакции ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$ необходимы для корректной реализации диагностики высокоэнергетической компоненты α - частиц. Разработанные коды этого этапа работы также могут быть использованы для множества различных реакций в плазме токамака (в данном исследовании непосредственно применялись для трёх различных реакций: ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$, ${}^{12}\text{C}(p, p\gamma){}^{12}\text{C}$ и ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, p\gamma){}^{11}\text{B}$).

Личное участие автора.

Все представленные в диссертации результаты получены непосредственно автором или при его активном участии.

Ниже перечислены работы, лично выполненные автором.

- Разработаны коды вычисления параметров кинематики реакции по данным измерений ФЛ и УР регистрируемых продуктов. Коды применены к реакциям ${}^7\text{Li}(n, n'\gamma){}^7\text{Li}^*$ и ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$. Далее полученные данные использовались при анализе ФЛ измеренных в плазме JET.
- Детально исследована реакция ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$ с возбуждением уровня 4.44 МэВ, включая нахождение и параметризацию сечения в широком диапазоне энергий; также вычисление и

параметризацию удельной функции возбуждения уровня для изотропного и одного предельного анизотропного случаев распределения α - частиц.

- Проведен анализ данных в первом эксперименте на JET гамма- спектра с HfGe детектором высокого разрешения (2008 г.) – сценарий эксперимента с дейтериевой плазмой и ионциклотронным (ИЦ) нагревом малой добавки ^3He . Анализ включал в себя расчеты форм линий 4.44 МэВ (реакции $^9\text{Be}(\alpha, n\gamma)^{12}\text{C}$, $^{12}\text{C}(p, p\gamma)^{12}\text{C}$ и $^9\text{Be}(^3\text{He}, p\gamma)^{11}\text{B}$) с целью идентификации доминирующей реакции. Рассчитаны формы линии 4.44 МэВ реакции $^9\text{Be}(\alpha, n\gamma)^{12}\text{C}$ впервые зарегистрированной на JET детектором высокого разрешения (2009 г.)– в режимах с ИЦ нагревом ^4He (на третьей гармонике) в ^4He плазме – и оценка температуры высокоэнергичного хвоста α - частиц в этих экспериментах.
- Произведены MCNP расчеты вероятности регистрации γ - кванта в реальной геометрии JET. Исходя из этих расчетов проведено сопоставление абсолютной скорости счета (сильно зависящей от искомой температуры) с ожидаемым её значением.
- Оценены параметры – коэффициенты прозрачности для измеряемого гамма излучения и «паразитного» фонового нейтронного излучения – различных материалов защитных фильтров в различных геометриях. Для получения общей оценки возможностей защиты, результаты для ^6LiH фильтров сопоставлены с измерениями параметров ранее изготовленных в ФТИ им. А.Ф. Иоффе фильтров (используя данные испытаний на нейтронных генераторах в г. Сарове, а также данные плазменных измерений на JET).

Автор принимал непосредственное участие в испытаниях нейтронного attenuатора на токамаке JET; в упомянутых первых измерениях на JET с высоким разрешением гамма- излучения, а также приведенных выше первых исследованиях быстрых α - частиц на JET с использованием HfGe детектора (2009 г).

Основные положения, выносимые на защиту.

- Методы расчёта кинематики ядерных реакций на основе прецизионного анализа форм доплеровски уширенных гамма-линий.
- Исследования УР нейтронов в реакции $^7\text{Li}(n, n'\gamma)^7\text{Li}$ при $E_n = 14.9$ МэВ с возбуждением уровня $1/2^-$ с энергией 0.478 МэВ. Анализ вклада различных механизмов реакции.
- Исследования функции угловой корреляции нейтронов и гамма-квантов, испускаемых в реакции $^9\text{Be}(\alpha, n\gamma)^{12}\text{C}$ с заселением уровня 4.44 МэВ в выходном канале.
- Обоснование возможностей спектроскопии высокого разрешения для диагностики высокотемпературной плазмы, включая анализ данных соответствующих измерений на токамаке JET.
- Расчетное и экспериментальное обоснование необходимой защиты детекторов от нейтронных полей с использованием ^6LiH attenuаторов. Включает MCNP расчёты и измерения спектров.

Апробация работы.

Основные результаты были получены в период с 2006 по 2010 г.г. По теме исследования автором делались доклады на российских и международных совещаниях и конференциях [1-8]. Опубликовано 6 статей в журналах из списка ВАК [9-14]. Результаты вошли в состав цикла работ научной группы, занявшего первое место в конкурсе работ и удостоенного премии РАН им Л.А. Арцимовича в том же году. Также представленная в виде самостоятельного исследования работа содержащая последние из результатов полученных в диссертации получила второе место на конкурсе молодых ученых ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН в 2011 г.

Структура и объём диссертации.

Диссертация состоит из раздела с общими сведениями, трёх глав и заключения, содержит 102 страницы, 11 таблиц и 36 рисунков. Приведенный в конце список литературы включает 116 наименований.

Содержание работы.

В разделе **общие сведения** сформулированы цели и задачи работы, обосновывается актуальность исследований, отмечены научная новизна и практическая ценности результатов, выделено личное участие автора, перечислены основные положения выносимые на защиту и кратко излагается содержание отдельных глав. Также приведен список конференций и публикаций, в которых докладывались материалы диссертации.

В **главе 1** кратко приведены исходные положения теории, а также проведен обзор литературы по рассматриваемым проблемам на момент проведения исследований и кратко рассмотрена история возникновения методов. В главе рассмотрены основы методов ядерной спектроскопии и проанализированы используемые для их реализации детекторы. Далее в главе обсуждаются физические основы гамма диагностики плазмы и потребность в ней для сбора данных об изотопном соотношении быстрых компонент и их ФР. Приводится список используемых для этого реакций, рассмотрены системы, реализующие измерения на различных токамаках и результаты с их помощью полученные, проведено сопоставление с другими методиками, разрабатываемыми для диагностики тех же плазменных параметров. Особое внимание в главе уделено рассмотрению методов высокого разрешения как в рамках исследований механизмов ядерных реакций, так и развиваемых с целью диагностики плазмы. В том числе, рассмотрены эксперименты на ускорителях элементарных частиц: для ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$ – на циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, а для ${}^7\text{Li}(n, n'\gamma){}^7\text{Li}^*$ – на генераторе Кокрофта-Уолтона в Пекине, в которых измерены ФЛ и УР реакций, используемы далее для изучения кинематик этих реакций. Также рассматривается плазменный эксперимент с применением методов анализа гамма- спектров высокого разрешения. Наконец, рассмотрены компоненты излучения, регистрируемого на токамаках, приведено описание изготовленного в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН ${}^6\text{Li}n$ нейтронного attenuатора, рассмотрены факторы, определяющие его

эффективность и некоторые данные тестирования с использованием генератора нейтронов, а также в рамках МНТЦ проекта на токамаке JT-60 (Япония).

В главе 2 рассматриваются теоретические аспекты рассматриваемой методики: приведены и обоснованы используемые и разрабатываемые модели вместе с проводимыми по ним расчётами.

В главе подробно анализируется парциальное (с излучением γ -квантов 4.44 МэВ) сечение реакции ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$, в соответствии со стандартным подходом параметризуемое выражением

$$\sigma(E_\alpha) = \frac{\exp\left(\frac{2\pi Z_1 Z_2 e^2}{\hbar} \cdot \sqrt{\frac{m_\alpha}{2E_\alpha}}\right)}{E_\alpha} \cdot \sum_{i=1}^{15} S_j \cdot \frac{(\Gamma_j / 2)^2}{(E_\alpha - E_{0i})^2 + (\Gamma_j / 2)^2}, \quad \text{где } E_\alpha \text{ - энергия налетающей}$$

α -частицы, Z_1 и Z_2 - заряды α -частицы и ${}^9\text{Be}$, m_α - масса α -частицы, а S_j , E_{0j} , Γ_j - параметры (амплитуда, положение и ширина) резонансов, найденные подгонкой и приведенные в работе в таблице. Вследствие кулоновского барьера, влияние которого учитывается выражением перед суммой в приведенной формуле, сечение быстро падает при уменьшении E_α ниже ~ 1.7 МэВ. Ошибка в найденном описании сечения в надбарьерной области в целом не превышает 5%, а подбарьерной - находится в пределах погрешности исходных данных. Проведенные далее расчёты функции возбуждения реакции для ДР и ИР продемонстрировали предпосылки необходимости учёта подбарьерного реагирования (подробно рассматриваемого в работе) при ФР α -частиц, с $T_\alpha < \sim 200$ кэВ (что актуально для плазменных расчётов). Следующим шагом рассмотрена зависящая от T_α «удельная» скорость реакции для этих ФР α -частиц, также параметризованная в работе:

$$S(x) = a \cdot (1 - e^{-bx})^c \cdot (\text{Pls}_{x30, A3, t31, p3, p32} + \text{B}_{A_1 A_2 x_0 dx}(x)), \quad \text{где } \text{Pls}_{x30, A3, t31, p3, p32}(x) = A3 \cdot \left(1 + e^{-\frac{x-x30}{t31}}\right)^{p3} e^{-\frac{x-x30}{t32}}, \quad \text{а}$$

$$\text{B}_{A_1 A_2 x_0 dx}(x) = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{-\frac{x-x_0}{dx}}}. \quad \text{Ошибка параметризации, соответствующая найденным в работе значениям}$$

параметров не превышает 3% для T_α от 25 до, по крайней мере, ~ 700 кэВ. Эта функция уже непосредственно отражает необходимость учёта подбарьерного реагирования. В частности, ошибка более чем в 1.5 раза в скорости реакции при игнорировании резонансов ниже 1.7 МэВ имеет место при $T_\alpha < 220$ и 235 кэВ для ДР и ИР соответственно. Среди возможных использований найденной зависимости рассматривается оценка скорости счёта детекторов JET. Для простого проведения оценки можно использовать среднюю вероятность регистрации отдельного γ -кванта в установке. Для нахождения связи общей интенсивности реакции с регистрируемым детектором излучением были проведены MCNP расчёты (поскольку данные «абсолютной» калибровки - единственной практически возможной альтернативы - отсутствуют). Входными данными была геометрия, моделирующая основные элементы конструкции JET и схемы расположения HPGe детектора, включая элементы защиты, а также источник γ -излучения, соответствующий томографическим данным одного из типичных разрядов. Полученная в расчетах вероятность регистрации имеет

значение порядка $P_{\text{рег}}=10^{-11}$. Исходя из требований к набору статистики ~ 200 отсчетов в сумме 6 разрядов, согласно проведенной оценке, регистрация возможна при T_α выше ~ 115 кэВ и ~ 136 кэВ для ИР и ДР соответственно. Сечение для энергий ниже 250 кэВ не определено достоверно, однако, как показывают расчёты, оно настолько мало в этой области, что пренебрежение его значением не может как либо отразиться на измеряемых величинах.

В рамках исследования механизмов ядерных реакций и разработки методики определения параметров их кинематик на основе анализа ФЛ, измеряемых детекторами высокого разрешения, в главе рассмотрена реакция ${}^7\text{Li}(n, n'\gamma){}^7\text{Li}^*$ с возбуждением уровня $I^\pi=1/2^-$. Для этой реакции отсутствует УК нейтрона и γ - кванта в выходном канале, однако необходимо учитывать торможение возбужденных ядер ${}^7\text{Li}$ в мишени. При рассматриваемой энергии бомбардирующих нейтронов (14.9 МэВ) существенна роль процессов, приводящих к преимущественному вылету вперед результирующих нейтронов, адекватное описание которых в УР можно получить добавлением экспоненциальной добавки $\rho_{\text{exp}}(x) = Ne^{\frac{x-1}{c}}$ к «исходному» набору полиномов Лежандра (ПЛ). Такая добавка, по-видимому, связана со вкладом прямого механизма реакции – выбивания из ${}^7\text{Li}$ слабосвязанного нейтрона.

Поскольку прямые расчёты ФЛ, по УР нейтронов практически неосуществимы, для нахождения связи между ними использовался метод Монте-Карло. В рамках метода осуществляется розыгрыш событий последовательного испускания нейтрона и γ - кванта по УР нейтронов и вычисление соответствующей регистрируемой энергии γ - кванта. Однако прямое использование метода Монте-Карло для многократного моделирования ФЛ, необходимого при итерационном решении обратной задачи, приводит к чрезвычайно большому объему вычислений. Для сокращения объема вычислений использована «линейность» данной задачи: если УР представима в виде суперпозиции нескольких слагаемых или, иначе, компонент, то отвечающая ей ФЛ оказывается равной соответствующей суперпозиции ФЛ этих компонент. Таким образом, для расчётов ФЛ соответствующих разным наборам параметров оказывается возможным однократно сосчитать ФЛ для ограниченного набора используемых компонент, а далее получать необходимые спектры их линейным комбинированием. Сложностью в применении данного подхода является необходимость расчёта форм линий для знакопеременных компонент (ПЛ). Для преодоления этой сложности

предложен дополнительный базис знакопостоянных функций $\rho_n(x) = \frac{(n+1)}{2^{n+1}}(1+x)^n$, также линейно переводимый в базис ПЛ. Таким образом удалось найти параметры, определяющие УР нейтронов и получить удовлетворительное согласие данных всех измеренных ФЛ с соответствующими расчётными кривыми. На рисунке 1 (справа) приведено сопоставление найденных данных УР с результатами существующих вычислений в рамках DWBA а также с оцененными нейтронными данными ENDF/B-VI. Из рисунка видно, что в рамках DWBA не удаётся удовлетворительно описать существенный вклад вылета быстрых нейтронов под малыми углами, связанный с прямыми

процессами. На этом же рисунке слева приведена одна из множества форм линий, по которым проводилась одновременная подгонка.

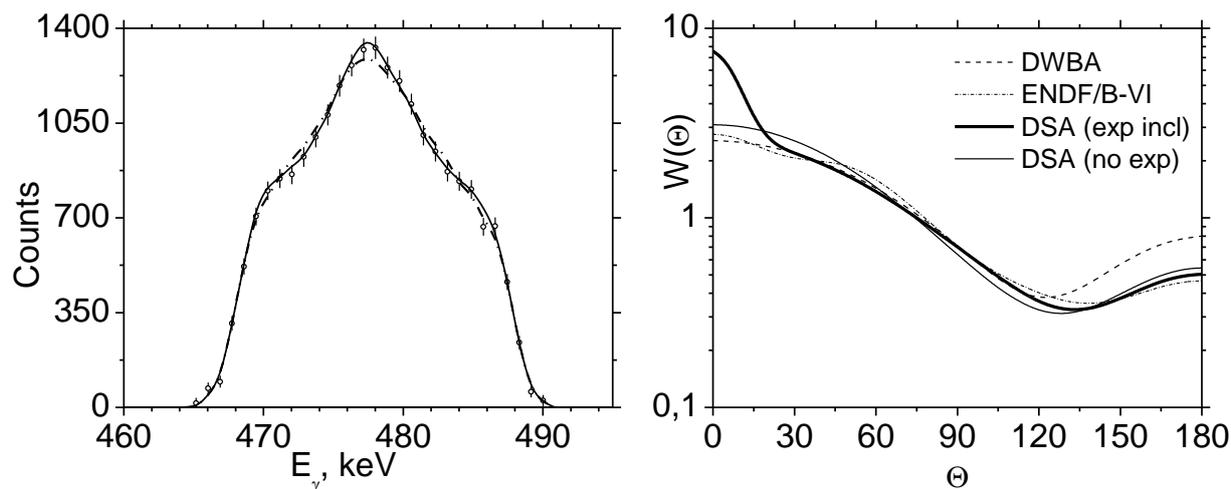


Рисунок 1. Слева ФЛ, соответствующая положению детектора 90° . Экспериментальные точки с погрешностям; сплошная линия – окончательный результат подгонки, штрих-пунктир – подгонка без добавки, учитывающей рассеяние вперед. Справа угловое распределение быстрых нейтронов, испускаемых в реакции ${}^7\text{Li}(n, n'\gamma){}^7\text{Li}^*$, найденное доплеровским анализом форм γ - линий (сплошная полуэллиптическая – с учётом экспоненциальной компоненты, тонкая – без учёта), а также данные базы ENDF/B-VI (штрих-пунктир) и выполненных в борновском приближении расчёты (пунктир).

Далее в работе исследована реакция ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$. К упрощениям в расчетах для последней реакции приводит возможность пренебрежения процессами торможения, однако поскольку анализируемой ФЛ 4.44 МэВ соответствует переход с уровня 2^+ на 0^+ , для неё необходимо учитывать УК между нейтроном и γ - квантом в выходном канале. Таким образом, для описания кинематики в этом случае использовалась ФУК, которая даётся выражением
$$W(E_\alpha, \theta_\gamma, \theta_n, \phi_n) = \sum_{l_n, l_\gamma} \sum_{k \leq l_n, l_\gamma} A_{l_n k l_\gamma}(E_\alpha) P_{l_\gamma}^k(\cos \theta_\gamma) \cdot P_{l_n}^k(\cos \theta_n) \cos(k\phi_n)$$
 – где (l_n, k, l_γ) – индексы (k и l_γ чётно), нумерующие параметры $A_{l_n k l_\gamma}$, к поиску энергетической зависимости которых, таким образом, сводится решаемая задача. В этой формуле аргументами косинусов в присоединённых ПЛ являются θ_n и θ_γ – полярные углы вылетающих нейтрона и γ - кванта, а ϕ_n – разница их азимутальных углов в сферической системе отсчета с осью z направленной вдоль скорости бомбардирующих α - частиц. Для моделирования ФЛ в этом случае использовался розыгрыш в соответствие с «плотностями вероятностями» непосредственно входящими в данную формулу, что оказалось возможным после модификации разработанных кодов, так что вычисления проводились непосредственно со знакопеременными компонентами. Поскольку в ФУК содержит большее число параметров, чем при описании УР нейтронов для предыдущей реакции, следующим шагом был проведен анализ, позволивший определить их множество, необходимое для обеспечения адекватной подгонки. Параметры при этом разбивались на группы, так что в первой оказались те из них, которые необходимы для схождения наблюдаемого УР нейтронов, во второй – УР γ - квантов, в

третьей – ФЛ, наблюдаемой под углом 0° («вырожденной» в соответствие со свойствами присоединённых ПЛ), и в четвертой – для всех остальных ФЛ. После определения множества параметров была произведена одновременная подгонка всех рассчитываемых кривых под наблюдаемые данные (ФЛ и УР), давшая искомую энергетическую зависимость, описывающую кинематику реакции. Для выделения этой зависимости была проведена повторная параметризация коэффициентов ФУК, позволившая получить устойчивое описание их энергетического поведения. Коэффициенты повторной параметризации содержат в удобной компактной форме все данные кинематики реакции и были использованы при дальнейших плазменных расчётах в работе. Результаты подгонки иллюстрирует рисунок 2, на котором приведены расчётные кривые ФЛ и УР по значению коэффициентов ФУК при $E_\alpha = 3$ МэВ.

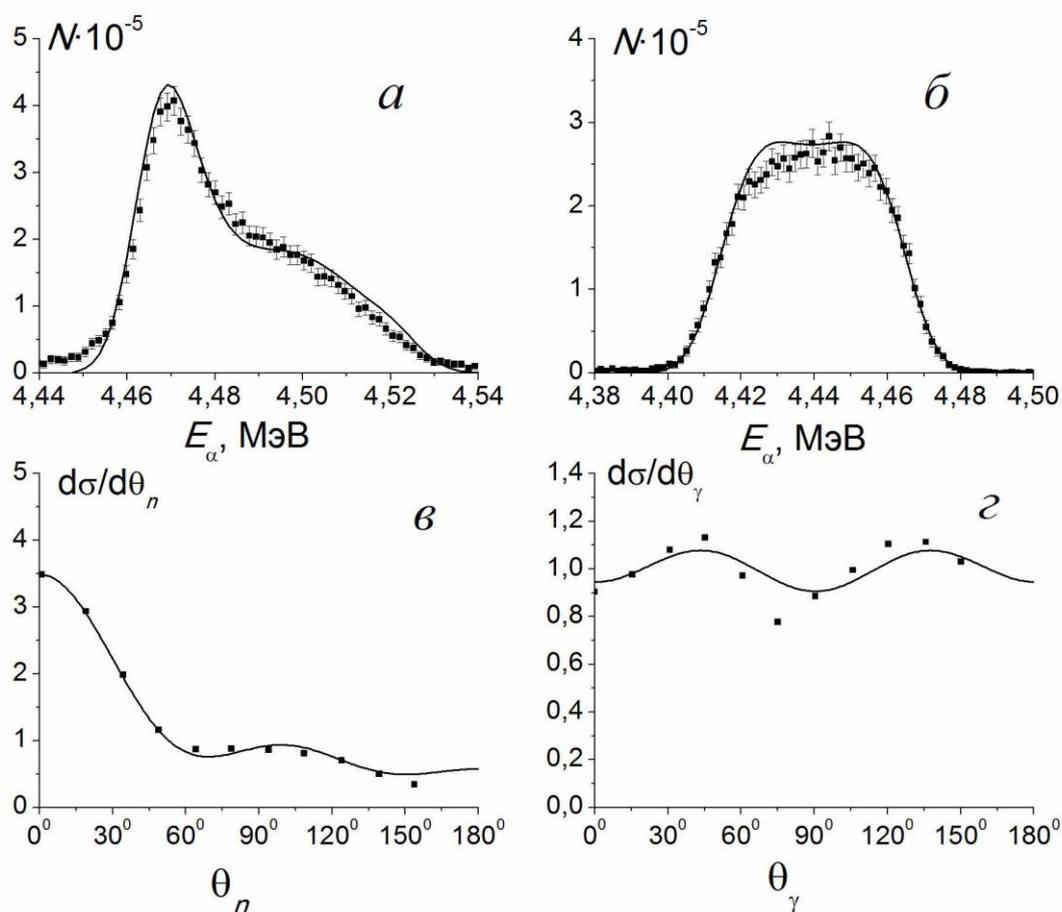


Рисунок 2. Данные, измеренные на циклотроне ФТИ, а также рассчитанные по интерполированным значениям коэффициентов ($E_\alpha = 3$ МэВ): а и б – ФЛ соответствующие положению детектора 0° и 90° , в и г – УР нейтронов и γ -квантов соответственно.

При этом также была проанализирована роль угловых размеров и энергетического разрешения детектора и релятивистских эффектов, а реализующие учёт соответствующих всем этим эффектам поправок коды использовались и далее в исследованиях. Завершают исследования реакции в главе

расчёты для двух модельных ФР в плазме – изотропного (сферическое распределение), и кольца в пространстве скоростей, а также демонстрация влияния УК после интегрирования по ФР.

Наконец, в главе приведены расчёты поглощения нейтронов различными материалами фильтров, традиционно используемыми для ослабления этой компоненты излучения: полиэтилен, вода, и гидрид лития с различным изотопным составом – соотношениями ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$. Рассмотрены спектры в нескольких моделях, позволяющих сделать общую оценку эффективности подавления. Продемонстрировано, что кроме преимущества в подавлении нейтронов, ${}^6\text{LiH}$ фильтр существенно превосходит другие материалы, имея существенно более низкий уровень индуцированного излучения; в частности, особые сложности в применении кислородо- и углеродосодержащих материалов связаны с дискретными гамма- линиями появляющимися на спектре при организации защиты с использованием воды или полиэтилена.

Первая и вторая главы построены с условным дополнительным делением на разделы, соответствующие двум решаемым обратным задачам – исследование механизмов реакций и реакции в контексте их применения для диагностики плазмы – а также нейтронному аттенюатору. Поскольку уже во второй главе приводятся полные данные кинематики, раздел, посвящённый механизмам реакций, в третьей главе отсутствует.

В **главе 3** приведены основные результаты работы, связанные с проведенными с участием автора измерениями на крупнейшем токамаке JET (Англия). Приведен анализ данных двух экспериментальных сессий, включающий в себя модельные расчёты, сопоставляемые с наблюдаемыми из плазмы спектрами, а также восстановление плазменных параметров по информации из зарегистрированного излучения.

Впервые γ - детектор высокого разрешения использован для диагностики плазмы на токамаке JET в серии экспериментов с дейтериевой плазмой и ИЦН малой добавки ${}^3\text{He}$, так что у частиц была велика поперечная составляющая скорости. Быстрые α - частицы и протоны при этом рождались в реакции $\text{D}({}^3\text{He}, \text{p}){}^4\text{He}$, поэтому их ФР были изотропны. На рисунке 3 приведена ФЛ ~ 4.44 МэВ, зарегистрированная в этих экспериментах. Три реакции могли быть причиной наблюдаемого γ - пика: ${}^9\text{Be}(\alpha, \text{n}\gamma){}^{12}\text{C}$, ${}^{12}\text{C}(\text{p}, \text{p}\gamma){}^{12}\text{C}$ и ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, \text{p}\gamma){}^{11}\text{B}$ (в первых двух случаях это разрядка одного и того же уровня ${}^{12}\text{C}$, в третьем случае – разрядка уровня ${}^{11}\text{B}$ с близкой энергией). Расчёты показывают, что наилучшее согласие расчёта с экспериментом возможно в предположении преобладающего вклада в наблюдаемую ФЛ γ - квантов из реакции ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, \text{p}\gamma){}^{11}\text{B}$. Отклонения от экспериментальных данных в последнем случае может быть объяснено пренебрежением УК в этих расчётах. Таким образом, в этих экспериментах впервые было продемонстрировано возможности использования анализа ФЛ для определения доминирующей реакции.

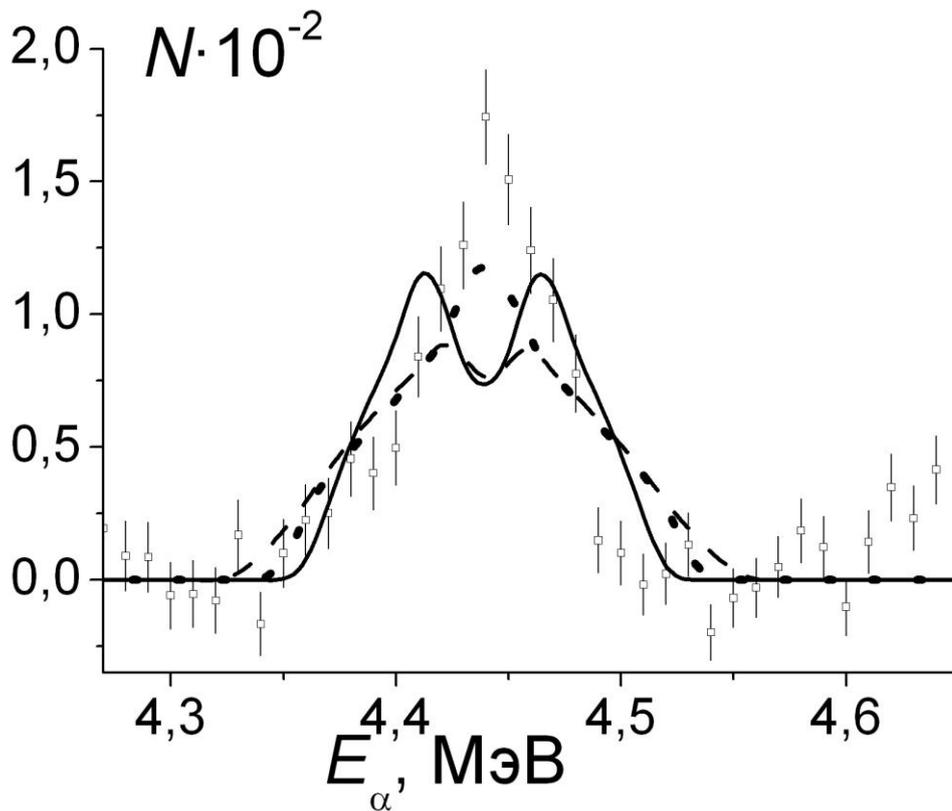


Рисунок 3. Суммирование данных схожих разрядов №73761, 73765, 73768, 73769 (JET): сравнение измеренной формы линии (точки), и результатов моделирования (линии) ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$ – сплошная, ${}^{12}\text{C}(p, \gamma){}^{12}\text{C}$ – штриховая линия и ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, p\gamma){}^{11}\text{B}$ – пунктирная.

В другой серии экспериментов, проведенной в сентябре 2009 года, применялся ИЦ нагрев на третьей гармонике ${}^4\text{He}$ плазмы. Данные регистрации ФЛ 4.44 МэВ реакции ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$ (единственная возможная в этом случае) приведены на рисунке 4. Также на рисунке продемонстрированы расчёты для нескольких значений T_α с использованием различных исходных моделей ФР и учитываемых факторов. Рисунок (б) позволяет сделать окончательный вывод о необходимости учёта подбарьерного реагирования, игнорируя которое невозможно получить удовлетворительное согласие расчёта с экспериментом. Рисунки (г) и (д) демонстрируют влияние возможных ошибок в калибровке и паразитных пиков, а рисунок (а) – ожидаемую ФЛ для модели сильно анизотропного распределения (ДР). Исходя из наблюдаемых данных может быть получена оценка температуры α -частиц ($T_\alpha \lesssim 150$ кэВ). Ожидаемая исходя из оценки температуры (в соответствие с зависимостью найденной во второй главе) скорость счёта находится в согласии с наблюдаемой, что является дополнительным подтверждением корректности методики. Приведенная на рисунке (в) ФЛ, рассчитанная в пренебрежении УК, в исследуемом случае (ФР α - частиц в этом эксперименте) оказывается близкой к точной. Рисунок (е) демонстрирует связь ширины ФЛ с T_α , которая непосредственно может быть использована для нахождения температуры α - частиц в условиях низкой статистики, не достаточной для более прецизионного анализа данных.

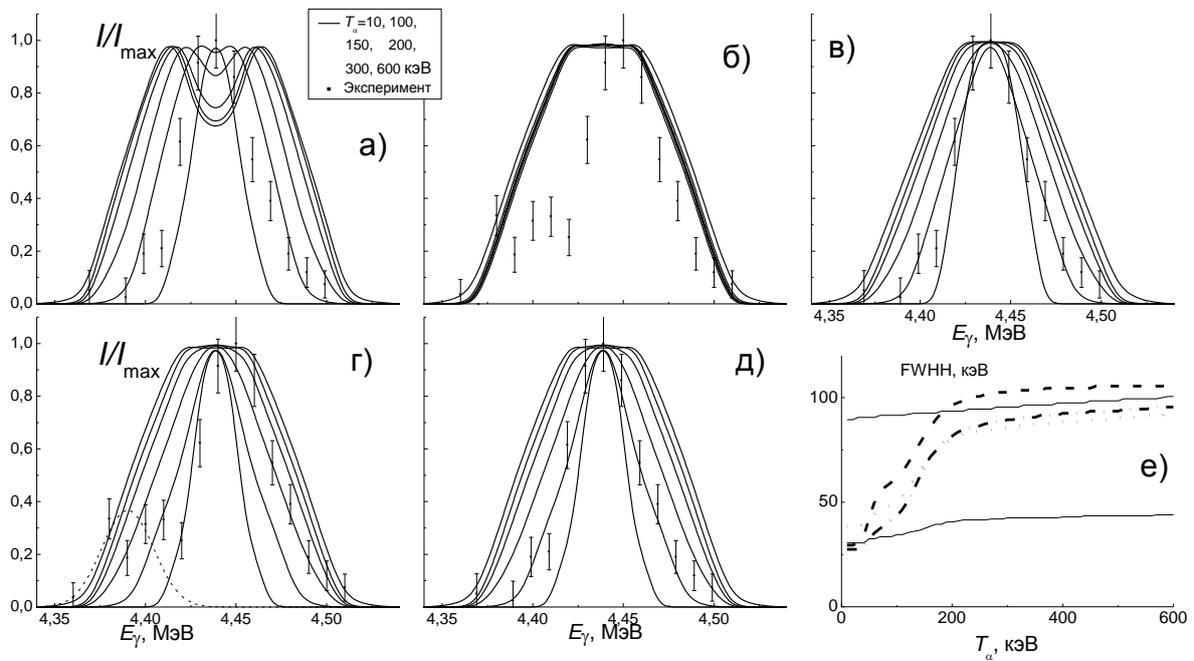


Рисунок 4. Расчёт ФЛ в различных приближениях и для различных случаев аксиальной симметрии и температуры T_α α -частиц, сопоставленные с экспериментальными данными. Рисунки (а), (б), (в), (г), (д) – дисковое распределение, пренебрежение подпороговым реагированием, пренебрежение ФУК, и два случая общих случая с разной калибровкой соответственно. Более широкие линии соответствуют большим T_α . (е) – зависимость ширины ФЛ от T_α . Верхняя сплошная линия – пренебрежение подпороговым реагированием; нижняя – дисковое распределение, наблюдаемое под углом 0° к МП; пунктир – дисковое, угол 90° ; точки – пренебрежение ФУК; штрих-пунктир – базовый вариант (учет ФУК, изотропное распределение).

Кроме анализа ФЛ, в главе приведено обоснование использования, в том числе исходя из параметров ослабления нейтронного излучения, ${}^6\text{LiH}$ аттенюатора на токамаке JET. В первую очередь проведены MCNP расчёты в модели геометрии, приближенной к JET. Рассчитанный в DD-сценарии спектр BGO детектора без аттенюатора хорошо согласуется с экспериментальным, что явилось проверкой модели. С аттенюатором из-за существенно больших вычислительных требований задачи оказалось возможным моделирование относительно небольшого числа детектированных событий, что позволило оценить коэффициент ослабления на уровне ~ 500 раз при точности оценки 50%, однако было не достаточным для получения спектра, который можно было бы детально проанализировать. Далее проведено экспериментальное исследование (обоснование) эффективности аттенюатора. С этой целью сравнивались два идентичных разряда на одном из которых для защиты BGO детектора в rooflab JET использовался, а на другом не использовался нейтронный фильтр. Идентичность излучения плазмы независимо контролировалась экваториальным NaI детектором. Сравнивая данные разрядов обнаружено, что фактор ослабления интенсивности γ - пиков из реакции неупругого рассеяния нейтронов в BGO детекторе составляет ~ 100 . Таким образом экспериментально подтверждена высокая эффективность ${}^6\text{LiH}$ как материала для нейтронной защиты γ - спектрометров. При этом необходимо отметить, что при использовании

аттенюатора ослабление интенсивности γ -излучения в диапазоне >3 МэВ относительно мало (~ 2), что говорит о высокой прозрачности ${}^6\text{LiH}$ для γ -излучения мегаэлектронвольтового диапазона.

В **заключении** приведены основные результаты и выводы работы. Ниже приведены те из них, которые связаны с первым аспектом актуальности – исследованиями ядерных реакций.

- Получено УР нейтронов в реакции ${}^7\text{Li}(n, n'\gamma){}^7\text{Li}$. Обоснована необходимость введения дополнительной экспоненциальной добавки, описывающей существенный вылет вперед нейтронов и связанный, по-видимому, с вкладом прямого механизма реакции – выбивания из ${}^7\text{Li}$ слабосвязанного нейтрона. Данные сопоставлены с расчётами по оптической модели, не способной удовлетворительно описать такой процесс, и предсказаниями БД ENDF.
- Обоснована необходимость учета ФУК при исследовании механизма реакции ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$. Действительно, показано, что без учёта последней принципиально невозможно получить одновременное согласие расчётных данных всех измеряемых величин с экспериментом.
- В компактной и удобной для дальнейшего использования форме найдены параметры, описывающие энергетическую зависимость ФУК и парциального сечения реакции ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$ с возбуждением линии 4.44 МэВ – которые дальше использованы для плазменных расчётов. ФЛ и УР вычисленные по найденным значениям интерполяционных коэффициентов хорошо согласуются с доступными экспериментальными данными. Кроме УК в расчётах были учтены угловые размеры, разрешение детектора и релятивистские поправки. Торможение частиц в мишени и подложке может быть лишь малой поправкой к полученным значениям, и поэтому оно не было учтено в работе.
- Проанализировано влияние релятивистских эффектов на ФЛ и асимметрию УР.

Далее приводятся результаты связанные со вторым аспектом актуальности – применением методики в экспериментах с термоядерной плазмой.

- Показана необходимость учёта подбарьерного реагирования при расчёте интегральных ФЛ с характерной температурой ФР в диапазоне менее ~ 200 кэВ – актуальном для плазменных расчётов.
- Найдена и параметризована зависимость «удельной» скорости реакции ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$ с возбуждением линии 4.44 МэВ в зависимости от температуры для изотропного и предельного анизотропного случаев. Она может быть использована для различных, в том числе плазменных и астрофизических исследований, путем введением единственного масштабного коэффициента, характеризующего конкретные параметры проводимых расчетов. В частности MCNP моделированием был найден соответствующий коэффициент, связанный с вероятностью регистрации одиночного γ -кванта на JET, позволивший таким образом использовать эту зависимость для оценки скорости счёта детекторов на JET.
- Первые измерения спектров на токамаке JET с использованием HPGe детектора сопоставлены с расчётом в предположении, что наблюдаемая ФЛ определяется исключительно реакцией

${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$ и изотропным распределением α -частиц. Эта гипотеза не получила убедительного подтверждения. Лучшее согласие расчёта с экспериментом возможно в предположении существенного вклада в наблюдаемую ФЛ γ -квантов из реакции ${}^9\text{Be}({}^3\text{He}, p\gamma){}^{11}\text{B}$.

- На примере анализа данных первых экспериментах на JET с измерением линии 4.44 МэВ детектором высокого разрешения (2009 г.) продемонстрированы возможности развиваемой методики и в частности получена оценка температуры α -частиц ($\lesssim 150$ кэВ). Оценка величины скорости счёта, которая следует из найденной и параметризованной её зависимости от температуры, оказалась в согласии с наблюдаемым значением. Это согласие является хорошим дополнительным подтверждением корректности развиваемых подходов несмотря на грубость оценок скорости счёта, поскольку последняя сильно зависит от T_α .

Наконец, следующие выводы могут быть сформулированы относительно третьего аспекта актуальности – связанного с обоснованием нейтронной защиты.

- В работе подробно исследованы параметры защиты, включая сравнительный анализ различных материалов. Несмотря на высокую стоимость ${}^6\text{LiH}$ (в том числе по сравнению с ${}^7\text{LiH}$), его использование может быть оправдано на ИТЕР – в условиях сильно ограниченного пространства, доступного для построения защиты детекторов. Согласованность результатов расчетов (моделирования) прохождения излучения через нейтронный аттенюатор (являющийся также прототипом решения для ИТЕР) с измерениями на генераторе нейтронов и в плазменном эксперименте является подтверждением корректности проведенных исследований.

Список публикаций по теме диссертации

1. Гин, Д.Б. и др. Исследование углового распределения неупруго рассеянных нейтронов в реакции ${}^7\text{Li}(n, n'\gamma){}^7\text{Li}^*$ при $E_n=14.9$ МэВ методом анализа формы γ -линии 478 кэВ. Тезисы докладов. Стр. 122. Ядро-2008. Проблемы фундаментальной ядерной физики. Разработка ядерно-физических методов для нанотехнологий, медицинской физики и ядерной энергетики. 2008. Москва.
2. Гин, Д.Б. и др. Влияние подпороговой области сечения реакции ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$ на доплеровскую форму γ -линии 4.44 мэВ, используемой для диагностики термоядерной плазмы. Тезисы докладов. Стр. 391. XXXVII Международная (звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. 2010.
3. Gin, D. Study of the ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$ reaction for the high temperature plasma diagnostic. in 45th Zakopane Conference on Nuclear Physics "Extremes of the Nuclear Landscape". 2010. Zakopane, Poland.

4. Gin, D., et al. Study of the ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$ reaction for the high temperature plasma diagnostic. Abstract p. 29 in 1st International Youth Conference on Fusion Energy. 2010. Daejeon, Republic of Korea.
5. Gin, D.B., et al. Doppler broadened γ - lineshape in reaction ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$ at temperatures $T_\alpha < 0.6$ MeV in plasma. Abstract p. 143 in LX International Conference on Nuclear Physics "Nucleus 2010. Methods of Nuclear Physics for Femto- and Nanotechnologies". 2010. Saint-Petersburg.
6. Гин, Д.Б. и др. Исследование n- γ угловой корреляции в реакции ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$ методом анализа формы γ -линии 4.44 МэВ. Тезисы докладов. Стр. 121. Ядро-2008. Проблемы фундаментальной ядерной физики. Разработка ядерно-физических методов для нанотехнологий, медицинской физики и ядерной энергетики. 2008. Москва.
7. Гин, Д.Б. и др. Энергетическая зависимость n- γ угловой корреляции в реакции ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$. Тезисы докладов. Стр. 116. 59 Международное совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра "Ядро 2009". 2009. Чебоксары.
8. Чугунов, И.Н. и др. Испытания на токамаке Джет нейтронного аттенюатора для гамма спектрометрической диагностики плазмы. Тезисы докладов. Стр. 112-113. XII Всероссийская конференции "Диагностика высокотемпературной плазмы" ДВП-12. 2007. г. Звенигород, Московской области.
9. Гин, Д.Б. и др. Исследование угловой корреляции n- γ в реакции ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$ методом анализа формы γ - линии 4.44 МэВ. Известия Российской академии наук. Серия Физическая, 2009. **73(6)**: стр. 774-777.
10. Гин, Д.Б. и др. Энергетическая зависимость n- γ угловой корреляции в реакции ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$. Известия Российской академии наук. Серия Физическая, 2010. **74(6)**: стр. 787-792.
11. Гин, Д.Б. и др. Доплеровские формы γ - линии реакции ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$ в плазме при температурах $T_\alpha < 0.6$ МэВ. Известия Российской академии наук. Серия Физическая, 2011. **75(7)**: стр. 987-992.
12. Gin, D.B., et al., Study of the ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$ reaction for the high temperature plasma diagnostics. Fusion Science and Technology, 2011. **61(1t)**: p. 16-21.
13. Чугунов, И.Н., et al., Испытания нейтронного аттенюатора на основе ${}^6\text{LiH}$ для диагностики плазмы в токамаке JET. Приборы и техника эксперимента, 2008(2): стр. 12-16.
14. Kiptily, V.G., et al., Doppler broadening of gamma ray lines and fast ion distribution in JET plasmas. Nuclear Fusion, 2010. **50(8)** 084001.