

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию
Ильясовой Маргариты Вадимовны

«Применение методов нейтронной и гамма спектроскопии для изучения поведения быстрых ионов в плазме токамака»

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 - Физика плазмы

Диссертация Ильясовой Маргариты Вадимовны посвящена развитию и применению методов нейтронной и гамма спектроскопии в диагностике высокотемпературной плазмы, в частности, для изучения поведения популяции быстрых ионов в плазме токамака. Диссертация содержит 128 страниц текста, включающего 2 таблиц и 73 рисунка. Список литературы содержит 142 наименования.

Актуальность темы исследований

В настоящее время на ряде существующих токамаков, таких как JET, ASDEX Upgrade, DIII-D, Alcator C-Mode, проводятся эксперименты по нагреву D-D и D-T плазмы в которых рождаются α -частицы, с энергией, превышающей средние температуры ионов трития и дейтерия. Эксперименты, как правило, проводятся с дейтериевой плазмой в которой энергичные ионы генерируются посредством дополнительного ионного циклотронного резонансного нагрева или инжекции пучка нейтральных атомов, а также их комбинацией. В таких экспериментах зачастую наблюдаются неустойчивости плазмы, вызванные быстрыми ионами. В свою очередь неустойчивости ухудшают удержание ионов и представляют серьезную угрозу для безопасной работы термоядерного реактора.

Кроме того, в настоящее время продолжается сооружение международного токамака-реактора ИТЭР. Эта установка призвана продемонстрировать научную, технологическую и практическую возможность использования термоядерной реакции для получения энергии. ИТЭР спроектирован для проведения экспериментов с DT плазмой, в которых коэффициент усиления мощности составит $Q \leq 10$, а нагрев плазмы α -частицами будет доминировать над другими видами нагрева. Мощный дополнительный нагрев DT плазмы ИТЭР также будет сопровождаться образованием популяции энергичных ионов, физику которых предстоит изучить.

Таким образом, изучение поведения быстрых ионов в плазме токамака становится одной из наиболее актуальных задач настоящего этапа термоядерных исследований.

Анализ содержания диссертации

По структуре, содержанию и изложению материала диссертационная работа Ильясовой М.В. является законченным научным трудом и состоит из введения, пяти глав и заключения.

Во введении была обоснована актуальность выбранной темы работы, сформулированы цель и задачи, определен объект исследования, описаны методология и методы исследования, указаны научная новизна и практическая значимость проведенных исследований, представлены научные положения, выносимые на защиту, представлены апробация работы на семинарах и конференциях различного уровня, личный вклад автора в исследование проблемы, раскрыта структура диссертации, представлено описание каждой главы.

Первая глава посвящена обзору основных источников быстрых ионов в плазме токамака. Описаны процессы, лежащие в основе генерации и ускорения быстрых ионов в плазме с помощью методов дополнительного нагрева плазмы, таких как инжекция пучков нейтральных атомов и ионный циклотронный резонансный нагрев. Описаны процессы поглощения компонентами плазмы энергии, передаваемой с помощью дополнительного нагрева, в результате протекания которых в плазме происходит генерация быстрых ионов. Кроме того, приведено описание процесса вторичного взаимодействия быстрых ионов с другими компонентами плазмы, в результате которого также рождаются быстрые ионы.

Вторая глава представляет собой обзор методов нейтронной и гамма-спектрометрии высокотемпературной плазмы. Описаны физические процессы, лежащие в основе генерации нейтронного и гамма-излучения в высокотемпературной плазме. Рассмотрены детекторы, применяемые для измерения нейтронного излучения, и системы нейтронной диагностики на уже существующих плазменных установках. Рассмотрены детекторы, применяемые в гамма-спектрометрии, и спектрометрические системы, установленные на существующих токамаках. Представлены методы анализа гамма-излучения.

В третьей главе приведено описание методики калибровки компактных нейтронных спектрометров на основе жидкого сцинтиллятора ВС-501А, разработанной и примененной на циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Представлено описание методов обработки сигналов, получаемых с нейтронных спектрометров, и методики проведения нейтрон-гамма разделения. Описан метод поиска нейтрон-гамма совпадений, который при использовании ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$ реакции позволил получить источник моноэнергетических нейтронов в широком энергетическом диапазоне. В результате применения описанных методов цифровой обработки сигнала нейтронного спектрометра и метода поиска нейтрон-гамма совпадений были получены функции отклика двух нейтронных спектрометров на основе сцинтиллятора ВС-501А на моноэнергетическое нейтронное излучение в диапазоне энергий от 1,9 до 10,4 МэВ. Была определена зависимость эффективности детектора от энергии регистрируемого нейтрона при фиксированном пороге регистрации.

Разработанные методики нашли практическое применение в создании диагностических систем нейтронной спектрометрии на токамаках в ФТИ им. А.Ф. Иоффе ТУМАН-3М и Глобус-М2. Автором был получен ряд ценных экспериментальных данных в измерениях во время разрядов дейтериевой плазмы с инжекцией пучка нейтрального дейтерия. В результате измерений были получены спектры нейтронного излучения с помощью спектрометра ВС-501А. С помощью кода DeGaSum было восстановлено энергетическое распределение DD-нейтронов. Была получена временная эволюция нейтронного выхода в течение разрядов плазмы. Из полученных данных была оценена интенсивность протекания DD термоядерной реакции в разряде плазмы, которая достигала порядка 10^{10} - 10^{11} с⁻¹. Было оценено время спада нейтронного потока после прекращения инжекции D-пучка. В нейтронных измерениях на Глобус-М2 наблюдалось влияние пилообразных осцилляций на выход нейтронов и удержание быстрых ионов в плазме.

Четвертая глава посвящена анализу спектров гамма-излучения, генерируемого в плазме токамака. Автором представлены результаты изучения распределений быстрых ионов в плазме токамака JET. В частности, была получена экспериментальная оценка скорости рождения α -частиц в реакции синтеза $\text{D}+{}^3\text{He}$ по интенсивности измеренного гамма-излучения 16,7 МэВ, а из анализа Доплеровской формы гамма-линии 4,44 МэВ из

${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$ реакции было восстановлено энергетическое и угловое распределение удерживаемых α -частиц.

Пятая глава представляет собой описание подготовки к проведению измерений функций возбуждения ядер ${}^{11}\text{B}$ и ${}^{11}\text{C}$, рожденных в ядерных реакциях между ядрами ${}^3\text{He}$ и ${}^9\text{Be}$, необходимых для детального анализа распределений быстрых ионов в плазме с содержанием ${}^3\text{He}$ и примеси ${}^9\text{Be}$. Описана методика эксперимента, проведенного на циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Представлены полученные в предварительных измерениях результаты, включающие в себя угловые распределения вылета гамма-квантов и легких продуктов реакций между ядрами ${}^9\text{Be}$ и ${}^3\text{He}$.

В **заключении** автор подводит итоги проведенных исследований. Сделаны выводы о степени успешности решения поставленных задач и достижении цели исследований, а также рассмотрены направления дальнейшего развития темы исследований.

Основные научные результаты

Основные результаты, полученные в данной работе и изложенные в тексте диссертации, относятся к развитию и применению методов нейтронной и гамма-спектрометрии для изучения быстрых ионов в плазме токамака.

Была разработана методика калибровки спектрометров нейтронного излучения на основе органических сцинтилляторов с использованием метода совпадений регистрации нейтронов и гамма-квантов, рожденных в реакции ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$. Предложенная методика позволила провести калибровку двух нейтронных спектрометров на основе жидкого органического сцинтиллятора ВС-501А, получить функции откликов спектрометров при регистрации моноэнергетического нейтронного излучения в диапазоне энергий 1,9 – 10,4 МэВ и определить эффективность регистрации нейтронов. В разработанной методике использована процедура разделения нейтронного и гамма-сигнала.

Были разработаны и созданы нейтронные спектрометрические системы на токамаках ФТИ им. А.Ф. Иоффе ТУМАН-3М и Глобус-М2 с использованием спектрометров на основе жидкого органического сцинтиллятора ВС-501А. Были проведены измерения нейтронных спектров при скорости счета до 10^6 с^{-1} в условиях значительного фонового гамма-излучения в экспериментах с инъекцией нейтрального дейтерия в дейтериевую плазму, по результатам которых были оценены выход нейтронов из плазмы, время удержания быстрых ионов, скорость DD-реакции синтеза и получить энергетическое распределение нейтронов.

Были развиты методы анализа спектров гамма-излучения, генерируемого в плазме, для изучения распределений быстрых ионов, включая удерживаемые α -частицы, рожденные в реакции синтеза. Были получены экспериментальные оценки скорости реакции синтеза в D- ${}^3\text{He}$ плазме токамака JET из анализа профилей высокоэнергетического гамма-излучения.

Была разработана экспериментальная установка для измерения функций возбуждения гамма-переходов в ядрах, рожденных в реакциях между изотопами водорода и гелия и ядрами Be, B и C, на циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Были проведены предварительные измерения спектров нейтронного и гамма-излучения, рожденного при облучении бериллиевой мишени пучком ионов ${}^3\text{He}$.

Научная новизна диссертации

В диссертационной работе разработана оригинальная методика измерения функций отклика сцинтилляционного спектрометра на моноэнергетические нейтроны, развиты методы спектрометрии нейтронного излучения при помощи детекторов на основе жидкого органического сцинтиллятора ВС-501А, включая разработку методов цифровой обработки сигналов. Впервые с помощью нейтронных спектрометров были получены экспериментальные данные о выходе нейтронного излучения, а также об удержании быстрых ионов дейтерия в разрядах дейтериевой плазмы на токамаках ТУМАН-3М и Глобус-М2. Были развиты алгоритмы восстановления энергетического и углового распределений быстрых ионов из спектров гамма-излучения, рождаемого в плазме токамака, и на основе этих алгоритмов получены экспериментальные данные об энергетическом и угловом распределении α -частиц, рожденных в реакциях синтеза в плазме токамака JET. Впервые получена экспериментальная оценка скорости генерации α -частиц в ${}^3\text{He}(d,p){}^4\text{He}$ реакции синтеза в D- ${}^3\text{He}$ плазме JET из измеренных спектров и профилей гамма-излучения с энергией 16,7 МэВ, рожденного в реакции ${}^3\text{He}(d,\gamma){}^5\text{Li}$.

Практическая значимость работы

Представленная диссертационная работа несомненно имеет большое практическое значение. Разработанная методика измерения функций отклика нейтронных спектрометров на моноэнергетические нейтроны может найти широкое применение для калибровки широкого класса спектрометров на основе любых органических сцинтилляторов, а полученные функции отклика могут применяться для восстановления распределений нейтронного излучения по экспериментально измеренным спектрам как в плазменных, так и в ядерно-физических экспериментах. Созданные спектрометры нейтронного излучения на основе органического сцинтиллятора ВС501-А в совокупности с разработанными методиками цифровой обработки и амплитудного анализа сигналов сцинтилляционных детекторов нейтронного излучения нашли применение в экспериментальных исследованиях характеристик плазмы на токамаках ТУМАН-3М и Глобус-М2. Методики изучения распределений быстрых ионов, представленные в настоящей работе, нашли применение в экспериментальных исследованиях плазмы на токамаке JET и могут быть использованы в диагностике плазмы термоядерного реактора ИТЭР. Развитая методика оценки скорости реакции синтеза в D- ${}^3\text{He}$ плазме по измеренному гамма-излучению 16,7 МэВ также находит применение в анализе спектров гамма-излучения, измеренных на токамаке JET, и может быть использована в диагностике плазмы ИТЭР. Разработанная экспериментальная установка для измерения на циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе функций возбуждения гамма-переходов в ядрах применяется для изучения функций возбуждения гамма-переходов в ядрах, рожденных в реакциях между изотопами водорода и гелия и ядрами Be, B и C.

Замечания к диссертационной работе

1. Замечания к используемым терминам. Некоторые используемые в диссертации термины, приведены автором без указания четкого определения, например, «Доплеровская форма гамма-линий» или «не-Максвелловская форма». Некорректное использование термина «свертка» на стр. 52, 75 для выражения аппаратного (измеренного) спектра вместо общепринятого определения аппаратного спектра как «интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода» (см.

А.И. Абрамов и др «Основы экспериментальных методов ядерной физики», 1977, стр. 509 или Nicholas Tsoulfanidis «Measurement & Detection of Radiation», 2015 стр.334).

2. Замечания к формулировкам положений, выносимых на защиту. Два положения, а именно 1 и 4:

1. Методика калибровки спектрометров нейтронного излучения на основе органических сцинтилляторов с использованием метода совпадений регистрации нейтронов и гамма-квантов, рожденных в реакции ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$;

4. Экспериментальная установка для измерения функций возбуждения гамма-переходов в ядрах, рожденных в реакциях между изотопами водорода и гелия и ядрами Be, B и C, на циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Тестовые измерения спектров нейтронного и гамма-излучения, рожденного при облучении бериллиевой мишени пучком ионов ${}^3\text{He}$.

следовало бы сформулированы так, чтобы они более полно соответствовали направлению исследований «Диагностика плазмы» паспорта научной специальности 1.3.9. «Физика плазмы».

3. Замечания к оформлению диссертации. Практически весь иллюстративный материал (рисунки, графики, схемы и диаграммы) представлен с надписями на английском языке. В некоторых случаях отсутствует перевод или недостаточно пояснений в тексте. Не все подписи к рисункам корректны (например, рисунок 5.9)
4. Некоторые экспериментальные результаты представлены без оценки погрешности (например, на стр. 97)
5. Замечания по списку используемой литературы. Обширный список использованной литературы представлен в диссертации. Однако первая ссылка на ITER Physics Basis Editors 1999 явно устарела, поскольку в 2007 году вышла новая редакция Progress in the ITER Physics Basis (Chapter 5: Physics of energetic ions). В главе 2 представлено описание нейтронных спектрометров и, в частности, алмазного детектора. К сожалению, в списке литературы отсутствуют ссылки на пионерские работы с алмазными нейтронными спектрометрами российских ученых. Нет ссылок на последние достижения наших коллег в области разработки алмазных спектрометров термоядерных нейтронов для вертикальной нейтронной камеры ИТЭР.

Однако, отмеченные недостатки не снижают ценности представленной диссертационной работы. Работа представляет собой законченное исследование, научная новизна и значимость которого не вызывают сомнений. Оценивая работу в целом, можно отметить высокую степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций. Представленная диссертационная работа демонстрирует высокий научный уровень соискателя и способность проводить исследования актуальных вопросов физики плазмы, требующих широкого спектра знаний и навыков.

Достоверность результатов, представленных в диссертации, прошли проверку численным моделированием и расчетами, а также сравнением с результатами, полученными с помощью других диагностик плазмы. Материалы, вошедшие в диссертацию, прошли апробацию в качестве докладов на научных семинарах в ФТИ им. А.Ф. Иоффе и в зарубежных лабораториях, на всероссийских и международных конференциях. Результаты и материалы, изложенные в диссертации, опубликованы в ведущих рецензируемых журналах по физике плазмы и экспериментальной ядерной

физике, включенных в Перечень ВАК и/или индексируемых в базах данных отслеживания цитируемости Scopus и Web of Science. Всего по материалам диссертации опубликовано 13 статей, 11 из которых опубликованы в журналах, индексируемых в базе данных “Web of Science”.

Автореферат диссертации в полном объеме отражает содержание диссертации.

Заключение

Представленная диссертационная работа полностью удовлетворяют требованиям действующего «Положения о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе», предъявляемым к диссертационным работам, представленным на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а её автор – Ильясова Маргарита Вадимовна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – Физика плазмы.

Официальный оппонент:

Кащук Юрий Анатольевич
кандидат физико-математических наук,
начальник отдела нейтронной и спектроскопической диагностики,
Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
«Проектный центр ИТЭР»
123060, г. Москва, ул. Расплетина д.11 к.2
Телефон +7 917 512 51 35
E-mail: Y.Kashchuk@iterrf.ru

« ____ » _____ 2022 г.

Подпись Кащука Ю.А. заверяю.

Директор

Красильников А.В.