

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук
Отделение физики плазмы, атомной физики и астрофизики
Циклотронная лаборатория

Ильясова Маргарита Вадимовна
**Применение методов нейтронной и гамма спектрометрии для изучения
распределений быстрых ионов в плазме токамака**

Специальность 1.3.9 – физика плазмы

Научный доклад

Санкт-Петербург

2022

Научный руководитель: Шевелев Александр Евгеньевич,
кандидат физико-математических наук,
и.о. старшего научного сотрудника
ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Рецензент: Корнев Владимир Александрович,
кандидат физико-математических наук,
научный сотрудник
ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Рецензент: Мещеряков Алексей Иванович,
кандидат физико-математических наук,
заведующий лабораторией «Ливень»
отдела физики плазмы ИОФ РАН

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Понимание физики быстрых ионов в термоядерной плазме считается одной из важнейших задач для обеспечения работы термоядерного реактора. Принцип работы будущих термоядерных установок, таких как ИТЭР и ДЭМО, основан на использовании термоядерной реакции $D + T \rightarrow n + \alpha$, которая протекает при температурах 10-20 кэВ. В результате каждой реакции высвобождается 17,5 МэВ энергии, которая распределяется между продуктами реакции: α -частицами, $E_\alpha = 3,5$ МэВ, и нейтронами, $E_n = 14$ МэВ. Не имеющий заряда нейтрон не подвергается влиянию внешнего магнитного поля и покидает токамак, при этом его кинетическая энергия конвертируется в тепловую за пределами токамака. В то же время α -частицы удерживаются внешним магнитным полем токамака в плазме, и их роль становится жизненно важной с точки зрения создания самоподдерживающейся термоядерной реакции синтеза. α -частицы, рожденные с энергией, превышающей средние температуры ионов трития и дейтерия, должны передать свою энергию ионам основной плазмы через замедление посредством кулоновского рассеяния. На существующих установках, таких как JET, TFTR, Alcator C-Mode и др. [1-3, A2,A12], достаточно часто наблюдаются неустойчивости, вызванные быстрыми ионами. Неустойчивости в свою очередь оказывают влияние на удержание ионов и представляют серьезную угрозу для надежной работы термоядерного реактора.

В настоящее время эксперименты по зажиганию термоядерного синтеза проводятся в дейтериевой плазме с внешним источником быстрых ионов, т.е. энергичные ионы генерируются специально посредством дополнительного нагрева, например, ионного циклотронного резонансного нагрева (Ion Cyclotron Resonance Heating, ИЦР-нагрев) или инъекции пучка нейтральных атомов (Neutral Beam Injection, NBI), а также их комбинацией. Для изучения физики быстрых ионов разработан и функционирует специальный набор диагностических средств. Было накоплено большое количество информации,

объясняющей физику быстрых ионов в плазме, но несмотря на это, остаются неразрешенными ряд фундаментальных вопросов, касающихся удержания α -частиц в термоядерном реакторе.

С точки зрения диагностики дейтерий-тритиевая плазма представляет собой суровую рабочую среду, в которой большая часть средств диагностики быстрых ионов сталкивается с серьезными техническими и принципиальными ограничениями. Поэтому возникла необходимость поиска новых процессов, которые могли бы лечь в основу новых методов диагностики плазмы. В термоядерном реакторе с дейтерий-тритиевой плазмой ожидается высокая интенсивность испускания нейтронного и гамма-излучения. Оба процесса могут быть использованы для диагностики быстрых ионов, поскольку соответствующие методы детектирования преодолевают большую часть технических и принципиальных проблем, встречающихся в современной диагностике быстрых ионов.

Основная задача спектрометрии нейтронного и гамма-излучения как диагностики быстрых ионов в термоядерной плазме состоит в определении энергетического распределения быстрых ионов из измеренных спектров нейтронного и гамма-излучения. Нейтронная спектрометрия применяется на существующих установках более 40 лет. За это время были созданы усовершенствованные спектрометры нейтронного излучения, и с их помощью были измерены спектры нейтронного излучения и изучены особенности его распределения. Спектры нейтронов, покидающих плазму, предоставляют информацию об энергетическом распределении быстрых частиц в плазме. Спектрометрия гамма-излучения – относительно новый метод в сравнении с нейтронной спектрометрией. Тем не менее, за время существования этого метода диагностики плазмы были спроектированы высокоэффективные быстрые спектрометры на основе сцинтилляторов и на основе особо чистого германия (High Purity Germanium, HPGe). Наблюдаемый в измерениях уровень гамма-излучения, рожденного высокоэнергичными ионами, используется для определения эффективной температуры хвоста функции распределения

быстрых ионов. В более общем случае измеренная интенсивность гамма-излучения используется для оценки удержания быстрых ионов. Полученные данные могут быть сравнены с данными, полученными с помощью других диагностик плазмы, например, детектора потерь быстрых ионов на токамаке (Fast Ion Loss Detector, FILD), анализатора атомов перезарядки (Neutral Particle Analyzer, NPA). Благодаря установке HPGe детектора на токамаке JET в 2008 году было измерено уширение за счет эффекта Доплера пиков гамма-излучения из различных ядерных реакций в плазменных экспериментах по ускорению ^2H , ^4He и ^3He ионов, с помощью комбинированного ИЦР+NBI метода нагрева.

Результаты, полученные с помощью нейтронной и гамма-диагностики на существующих установках за последние годы, демонстрируют развитие методов диагностики термоядерной плазмы, основанные на анализе ядерного излучения. В частности, результаты показывают, что из измерений нейтронного и гамма-излучения можно получить количественную информацию об энергетическом распределении быстрых ионов, их взаимодействии с ионами примесей и нестабильностями в плазме, детально рассматривая ядерные процессы, происходящие при этом взаимодействии.

Цель данного исследования – изучение распределений быстрых ионов во время разрядов плазмы токамака на основе спектрометрии нейтронного и гамма-излучения, образующегося во время этих разрядов.

Для достижения поставленной цели следовало решить следующие **задачи**:

1. Развить методы нейтронной спектроскопии для обеспечения нейтронных измерений в плазменных экспериментах, в том числе измерений выхода нейтронов из плазмы во время разряда плазмы, оценки скорости термоядерной реакции по измеренному нейтронному выходу;
2. Развить методы калибровки нейтронных спектрометров, включая методы обработки сигнала, получаемого с нейтронных спектрометров;
3. Разработать и ввести в строй системы нейтронной спектрометрической диагностики на токамаках ФТИ им. А.Ф. Иоффе ТУМАН-3М и Глобус-М2 для изучения выхода нейтронов и распределений быстрых ионов с оценкой влияния на них различных физических явлений;

4. Развить методы анализа спектров гамма-излучения для изучения энергетических и угловых распределений быстрых ионов в плазме токамака;
5. Применить методы анализа спектров гамма-излучения в гамма-диагностике быстрых ионов в плазме токамака JET, в том числе удерживаемых α -частиц, рожденных в реакциях термоядерного синтеза, а также для измерения скорости термоядерного синтеза;
6. Разработать экспериментальную установку для измерения на циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе функций возбуждения гамма-переходов в ядрах ^{11}B и ^{11}C , рожденных в ядерных реакциях между ионами ^3He и ^9Be для проведения детального и качественного анализа спектров гамма-излучения, рожденного плазме со сценариями нагрева ионов малой добавки ^3He .

Объект исследования: спектры нейтронного и гамма-излучения, рожденные в плазме токамака.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- развиты методы спектрометрии нейтронного излучения при помощи детекторов на основе органического сцинтиллятора BC-501A, включая разработку методов цифровой обработки сигналов, в частности методы отделения сигнала, полученного при регистрации нейтронного излучения, от сигнала, полученного при регистрации гамма-излучения;
- разработана оригинальная методика измерения функций отклика сцинтилляционного спектрометра на моноэнергетические нейтроны, основанная на регистрации нейтронов на совпадение с гамма-квантами при облучении пучком ионов ^4He бериллиевой мишени на циклотроне;
- получены экспериментальные данные о выходе нейтронного излучения из дейтериевой плазмы токамаков ТУМАН-3М и Глобус-М2 в разрядах с инжекцией пучка атомов дейтерия;
- получены экспериментальные данные об удержании быстрых ионов в разрядах плазмы на токамаках ТУМАН-3М и Глобус-М2 из измерений нейтронного излучения;
- развиты алгоритмы восстановления энергетического и углового распределений быстрых ионов по спектрам гамма-излучения, рождаемого в ядерных реакциях в плазме токамака;
- получены экспериментальные данные об энергетическом и угловом распределениях удерживаемых α -частиц, рожденных в реакциях термоядерного синтеза в плазме токамака JET;
- из измеренных спектров и профилей гамма-излучения с энергией 16,7 МэВ, рожденного в термоядерной реакции $^3\text{He}(\text{D},\gamma)^5\text{Li}$, получена

экспериментальная оценка скорости реакции термоядерного синтеза ${}^3\text{He}(\text{D},\text{p}){}^4\text{He}$ в $\text{D}-{}^3\text{He}$ плазме JET;

Практическая ценность полученных результатов диссертационной работы заключается в следующем:

- созданные спектрометры нейтронного излучения нашли применение в экспериментальных исследованиях характеристик плазмы на токамаках ТУМАН-3М и Глобус-М2;
- разработанная методика измерения функций отклика спектрометров на моноэнергетические нейтроны может использоваться для калибровки сцинтилляционных спектрометров и для восстановления распределений нейтронного излучения по измеренным аппаратурным спектрам;
- разработанные методики цифровой обработки и амплитудного анализа сигнала сцинтилляционных детекторов нейтронного излучения применяются в экспериментах с термоядерной плазмой на токамаках ТУМАН-3М и Глобус-М2;
- разработанные методики изучения распределений быстрых ионов нашли применение в экспериментальных исследованиях плазмы на токамаке JET и будут применены в диагностике плазмы термоядерного реактора ИТЭР;
- развита методика оценки скорости реакции термоядерного синтеза в $\text{D}-{}^3\text{He}$ плазме по измеренному гамма-излучению 16,7 МэВ;
- Разработана экспериментальная установка для измерения на циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе функций возбуждения гамма-переходов в ядрах, рожденных в реакциях между изотопами Н и He и ядрами Be, В и С;

Основные положения работы:

1. Разработана и применена на циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе методика калибровки спектрометров нейтронного излучения на основе органических сцинтилляторов с использованием регистрации нейтронов и гамма-квантов, рожденных в реакции ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$, на совпадение;
2. Разработаны нейтронные спектрометрические системы на токамаках ФТИ им. А.Ф. Иоффе ТУМАН-3М и Глобус-М2 с использованием спектрометров на основе жидкого органического сцинтиллятора BC-501, позволяющих проводить измерения нейтронных спектров при скорости счета до 10^6 c^{-1} ;
3. Развита методика анализа спектров гамма-излучения, генерируемого в плазме, для изучения распределений быстрых ионов, включая

удерживаемые α -частицы, рожденные в процессе термоядерного синтеза. Получены экспериментальные оценки скорости термоядерного синтеза в D- ^3He плазме токамака JET из анализа профилей высокоэнергетического гамма-излучения;

4. Разработана экспериментальная установка для измерения функций возбуждения гамма-переходов в ядрах, рожденных в реакциях между изотопами H и He и ядрами Be, B и C, на циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Проведены тестовые измерения спектров нейтронного и гамма излучения, рожденного при облучении бериллиевой мишени пучком ионов ^3He ;

Апробация работы

Материалы, вошедшие в диссертацию, доложены на научных семинарах в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, а также на научных семинарах в зарубежных лабораториях: на токамаке JET, Калэмский научный центр, г. Абингдон, Великобритания, а также на токамаке ASDEX Upgrade, Институт Физики Плазмы Макса Планка, г. Гархинг, Германия. Результаты были представлены на международных и всероссийских конференциях:

- Звенигородская (Международная) конференция по физике плазмы и УТС, Звенигород, 18-22 марта, 2019 г.;
- Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы» (2019, 2021 гг.);
- 23rd High-Temperature Plasma Diagnostic Conference, virtual, 14-18 December 2020;
- 28th IAEA Fusion Energy Conference, virtual, 10-15 May 2021;
- International Conference on Fusion Reactor Diagnostics, Varenna, Italy, September 6-10, 2021;
- LXXI Международная конференция по ядерной физике «Ядро-2021. Физика атомного ядра и элементарных частиц. Ядерно-физические технологии», онлайн, 20-25 сентября, 2021 г.

Результаты и материалы, изложенные в диссертации, опубликованы в ведущих журналах по физике плазмы и экспериментальной ядерной физике. Список публикаций приведен в конце научного доклада

Личный вклад автора в решение поставленных задач

Автором **лично** сформулированы цель работы и задачи, которые было необходимо решить для ее достижения; изучено современное состояние проблемы спектроскопических измерений нейтронного и гамма-излучения, генерируемых в термоядерной плазме; проведена обработка данных, полученных при проведении калибровки нейтронных спектрометров ВС-501А, получены функции отклика спектрометров на моноэнергетическое нейтронное излучение и получена оценка эффективности регистрации нейтронов спектрометрами в зависимости от энергии; проведена обработка и анализ данных, полученных в экспериментах на токамаках ТУМАН-3М и Глобус-М2; проведена обработка и анализ данных, полученных в экспериментах на токамаке JET; получена экспериментальная оценка интенсивности термоядерного синтеза в D-³He плазме токамака JET из интенсивности гамма-излучения с энергией 16,7 МэВ; получены угловые распределения вылета продуктов ядерных реакций между ионами ³He и ⁹Be для возбужденных состояний ядер ¹¹B и ¹¹C.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены основные источники быстрых ионов в плазме токамака. Основным способом нагрева плазма является омический нагрев, который имеет существенные ограничения, поскольку его эффективность падает с ростом температуры плазмы. Для нагрева плазмы до температур зажигания термоядерной реакции (~ 20 кэВ) в токамаке применяются дополнительные методы нагрева. Инжекция пучков нейтральных атомов (neutral beam injection, NBI) и ИЦР-нагрев являются широко используемыми методами безындукционного нагрева плазмы в токамаках [1,4]. Энергия, передаваемая с помощью дополнительного нагрева, поглощается компонентами плазмы, в результате чего в плазме происходит генерация быстрых ионов. Наибольший интерес представляет так называемая схема трех-ионного ИЦР-нагрева с инъекцией нейтрального пучка, которая позволяет обеспечить генерацию быстрых α -частиц в плазме без непосредственного использования D-T плазмы. Такой сценарий нагрева активно применяется в экспериментах по генерации быстрых α -частиц и имитации их поведения в плазме на токамаке JET [A1, A2, A12].

Кроме того, быстрые ионы рождаются в термоядерной плазме в результате вторичного взаимодействия быстрых ионов с другими компонентами плазмы. В частности, рассматривается процесс генерации быстрых ионов, ноконов, за счет близких столкновений ионов основной плазмы с энергичными α -частицами, рожденными в DT реакции [5]. А также перечислены основные термоядерные реакции, протекающие в плазме токамака, приводящие к рождению быстрых частиц, и ядерные реакции, которые являются результатом взаимодействия быстрых ионов и ионов примесей плазмы. Регистрация нейтронов и гамма-квантов, излучаемых термоядерной плазмой, предоставляет возможность идентифицировать ядерные реакции, проходящие в плазме, а также получить информацию о распределении быстрых частиц.

Во второй главе рассмотрены существующие ядерно-физические методы регистрации нейтронов, применяемые в экспериментах по термоядерному

синтезу. Большинство доступных методов были реализованы на существующих установках, и в этой главе проведен обзор нейтронных детектирующих систем на существующих термоядерных установках [6]. Среди всего многообразия нейтронных детектирующих систем выгодно выделяются компактные нейтронные спектрометры на основе органических сцинтилляторов NE213 и BC-501A со схожими параметрами за счет относительной дешевизны сцинтиллятора и возможности создавать детекторы с большим объемом рабочего вещества [7].

Как и другие сцинтилляторы (органические и неорганические), BC-501A чувствителен как к нейтронному, так и к гамма-излучению, которое возбуждает органические молекулы BC-501A на разных уровнях, создавая световые импульсы с разной скоростью спада высвечивания, что позволяет эффективно разделять нейтронные и гамма-события [7]. Аппаратурные спектры нейтронного излучения, зарегистрированного в органическом сцинтилляторе, имеют форму прямоугольной ступени. В реальности распределение амплитуд электрических импульсов имеет существенно другой вид благодаря статистическому размытию края ступени и искажению ее формы за счет нелинейности световых выходов, краевых эффектов и др. [8]. Эти свойства сцинтиллятора BC501-A приводят к необходимости проведения процедуры калибровки компактных нейтронных спектрометров, которая включает в себя параметризацию форм импульсов, соответствующих регистрации нейтронного и гамма-излучения, для их дальнейшего разделения, измерение функций отклика детекторов на моноэнергетическое нейтронное излучение и определение энергетической зависимости эффективности регистрации нейтронов.

В ФТИ им. А.Ф. Иоффе была разработана методика калибровки компактных нейтронных спектрометров на основе сцинтиллятора BC-501A, включающая цифровые методы обработки сигналов, получаемых с нейтронных спектрометров BC-501A, и методику проведения n - γ разделения [A4]. Методика n - γ разделения реализуется в специальном коде DeGaSum, в

котором фиксируются параметры аппаратного отклика при регистрации гамма-кванта или нейтрона. Форма импульса, соответствующего зарегистрированному детектором единичному событию, с хорошей точностью описывается формулой [А3]:

$$U(E, t) = A(E) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t-t_0}{\tau_1}}\right)^p \cdot \left(e^{\frac{t-t_0}{\tau_2}} + B \cdot e^{\frac{t-t_0}{\tau_3}}\right), \quad (1)$$

где $A(E)$ – амплитуда импульса, пропорциональная зарегистрированной энергии частицы, t_0 – время, соответствующее началу импульса, τ_1 , τ_2 , τ_3 , B и p – параметры, соответствующие конкретной электронной схеме преобразования сигнала и временным характеристиками импульса высвечивания. Импульс каждого сигнала может быть описан путем варьирования параметров A , t_0 , B , а остальные параметры в формуле (1) должны быть зафиксированы. Параметр B , описывающий хвостовую часть импульса, отличается для нейтронного и гамма-импульса, что позволяет разделить эти события. На практике применяется набор из трех форм импульсов: для описания регистрации гамма-события, для описания регистрации нейтронов с высокой и низкой энергиями. Каждый импульс описывается одной формой импульса из набора. Диаграмма n - γ разделения, основанного на разделении по форме импульса показана на Рис. 1.

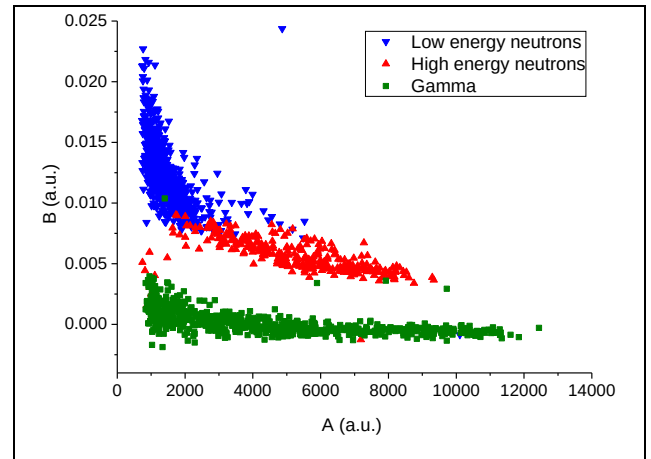


Рис. 1. – Результаты n - γ разделения, основанного на разделении по форме импульса: параметр B (формула (1)) в зависимости от амплитуды импульса A (формула (1)).

В методике калибровки компактных нейтронных спектрометров ВС-501А в качестве источника нейтронов была предложена ядерная реакция ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$. В данной реакции после спуска нейтрона энергетической группы n_1 рождается ядро ${}^{12}\text{C}^*$, находящееся в первом возбужденном состоянии, возбуждение которого снимается излучением гамма-кванта с

энергией 4,44 МэВ. Из кинематики ядерной реакции следует, что энергия нейтронов n_1 , попадающих в детектор, зависит от угла обзора мишени детектором относительно направления пучка налетающих ионов ^4He , что в свою очередь предоставляет возможность измерений нейтронов в широком диапазоне энергий. Процесс протекания ядерной реакции $^9\text{Be}(\alpha, n\gamma)^{12}\text{C}$ позволяет реализовать метод n - γ совпадений, который основывается на синхронной регистрации гамма-излучения и нейтронов, рожденных в ядерной реакции, и выделить моноэнергетические нейтроны n_1 .

Описанная методика калибровки нейтронных спектрометров, включающая в себя метод n - γ разделения и поиска n - γ совпадений, была применена в измерениях на циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Была проведена серия экспериментов по измерению функций отклика компактных нейтронных спектрометров на основе органического сцинтиллятора BC-501A с размерами $\varnothing 50,8 \text{ мм} \times 50,8 \text{ мм}$ [A4]. Детекторы располагались на расстоянии 50 см от ^9Be мишени, и их положение изменялось относительно оси пучка ионов. В измерениях было возможно менять положение каждого детектора от 0 до 150° относительно направления пучка. Также использовался гамма-спектрометр на основе кристалла быстрого сцинтиллятора $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ $\varnothing 76,2 \text{ мм} \times 76,2 \text{ мм}$ для регистрации 4,44 МэВ гамма-квантов, который располагался на расстоянии $\sim 3,5$ см от мишени. Сигналы детекторов BC-501A и $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ синхронно оцифровывались частотой дискретизации 500 МГц.

В экспериментах на циклотроне ускорялись ионы $^4\text{He}^{+2}$ до энергий 2,055, 5,53, 6,05 и 10,08 МэВ. При таком расположении детекторов относительно мишени и при таких выбранных энергиях ионов ^4He время пролёта 4,44 МэВ гамма-кванта от мишени до $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ гамма-детектора составляет примерно 0,15 нс. При этом время пролета нейтронов n_1 при фиксированном расстоянии до детектора d определяется их энергией E : $t = 72,3d(1/E)^{1/2}$, и составляет от 11 до 26 нс в этих экспериментах, что позволяет по этой временной задержке между регистрацией гамма-кванта и нейтрона выделить моноэнергетическую группу нейтронов n_1 с определенной энергией. Достоинством метода поиска

n - γ совпадений является относительно простое определение эффективности регистрации нейтронов нейтронным спектрометром, ε , которая выражается как отношение числа зарегистрированных нейтронов n_1 , a_{n1} , к числу зарегистрированных 4,44 МэВ гамма-квантов, a_γ , с учетом геометрического фактора, G , и коэффициента углового распределения вылета нейтронов, k_{n1} : $\varepsilon = a_{n1} / (a_\gamma \cdot G \cdot k_{n1})$ [A4].

В результате проведения экспериментов по калибровке компактных нейтронных спектрометров были получены функции отклика двух нейтронных спектрометров на основе сцинтиллятора BC-501A на моноэнергетическое нейтронное излучение в

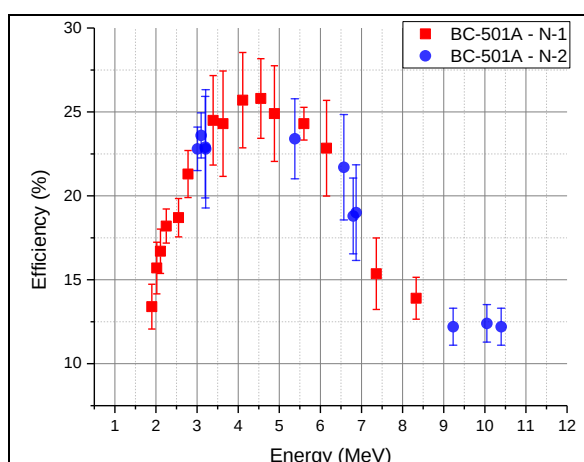


Рис. 3. — Зависимость эффективности регистрации нейтронного излучения для порога регистрации $E_n = 1.3$ МэВ от энергии нейтронов.

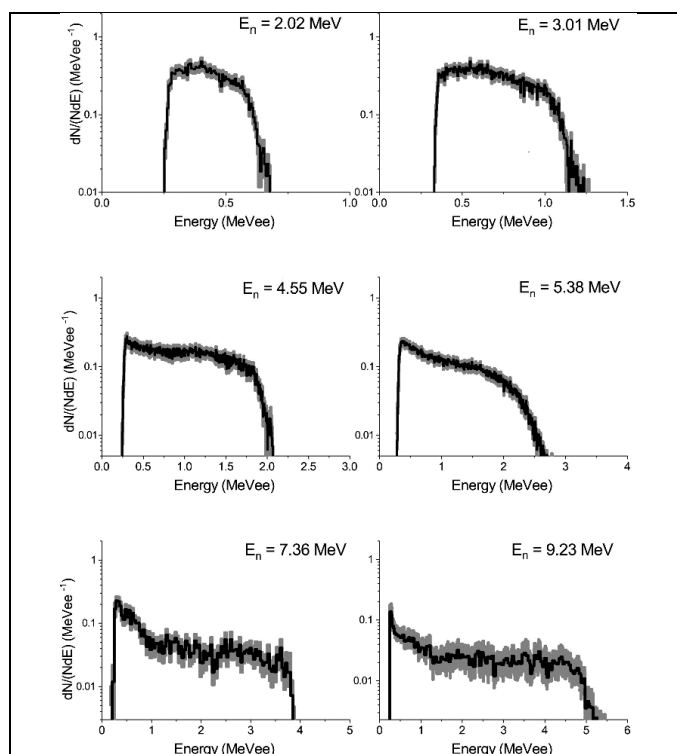


Рис. 2. — Функции отклика компактных нейтронных спектрометров, нормированные на эффективность регистрации нейтронного излучения. Неопределенности показаны серой областью.

широком диапазоне энергий от 1,9 до 10,4 МэВ. Примеры измеренных функций отклика показаны на Рис. 2. Кроме того, с помощью метода n - γ совпадений была определена зависимость эффективности детектора от энергии регистрируемого нейтрона, представленная на Рис. 3. Эффективность регистрации нейтронов для данных спектрометров достигает максимума $\sim 25\%$ при энергии $\sim 4,5$ МэВ.

В третьей главе проводится обзор нейтронных спектрометрических систем, разработанных на токамаках в ФТИ им. А.Ф. Иоффе ТУМАН-3М и Глобус-М2. На этих установках проводятся эксперименты по нагреву дейтериевой плазмы инъекцией пучка нейтрального дейтерия. Такие разряды сопровождаются испусканием потоков нейтронов с энергией 2.45 МэВ из DD реакции термоядерного синтеза [9,10]. Для изучения распределения быстрых ионов дейтерия, в токамаках ТУМАН-3М и Глобус-М2, а также оптимизации режимов NBI нагрева были разработана две нейтронные спектрометрические системы. Основная задача системы нейтронной спектрометрии заключается в предоставлении данных об энергетическом распределении нейтронов в разрядах с NBI нагревом [A8, A11].

Система нейтронной спектрометрии токамака ТУМАН-3М включает в себя компактный нейтронный спектрометр на основе органического сцинтиллятора BC-501A Ø50,8 мм×50,8 мм [A8]. Нейтронный детектор защищен магнитным экраном от рассеянного магнитного токамака поля и помещен в свинцовый бокс для защиты от жесткого рентгеновского излучения, падающего на детектор из плазмы. Спектрометр BC-501A располагается на расстоянии ~250 см от фронтальной части защиты до оси тора и имеет тангенциальную линию обзора плазмы. Сигнал детектора оцифровывался в течение всего разряда с частотой 500 МГц и обрабатывался в режиме офлайн. Процедура n -у разделения, описанная в Главе 2, была применена при обработке сигналов, измеренных нейтронным детектором BC-501A на токамаке ТУМАН-3М, в результате чего были получены спектры нейтронного и гамма-излучения.

Для восстановления энергетического распределения нейтронов, рожденных в плазме во время разрядов токамаков ТУМАН-3М и Глобус-М2, использовался код DeGaSum. Алгоритмы восстановления распределения нейтронов подробно описаны в [A3,11]. Для восстановления функции энергетического распределения нейтронов и получения количественной оценки нейтронного выхода во время разряда плазмы, использовались

функции отклика нейтронного полученные в ходе процедуры калибровки, описанной в Главе 2. Использование кода DeGaSum и функций отклика спектрометра на моноэнергетическое нейтронное излучение с учетом эффективности регистрации позволяет восстановить энергетическое распределение нейтронов, испущенных из плазмы токамака, оценить абсолютный выход нейтронов во время разряда плазмы и оценить скорость DD реакции.

В экспериментах с инъекцией пучка нейтрального дейтерия в дейтериевую плазму токамака Туман-3М энергия инжектированного пучка дейтерия находилась в диапазоне от 20 до 27 кэВ. В результате применения процедуры нейтрон-гамма разделения, описанной в Главе 2, была получена скорость счета нейтронного спектрометра BC-501A.

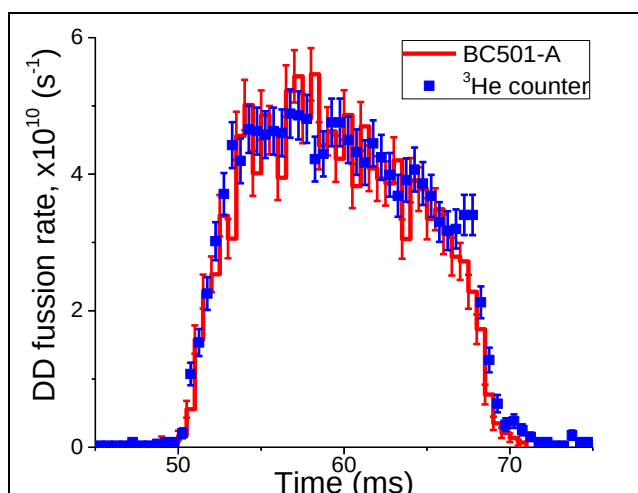


Рис. 4. – Временная эволюция скорости термоядерной DD-реакции с временным шагом 0.5 мс в разряде #20070810, полученная с помощью нейтронного спектрометра BC-501A (красная линия) и нейтронного газового счетчика на основе ^3He (синие точки).

Скорость счета нейтронного спектрометра BC-501A позволяет наблюдать эволюцию нейтронного выхода во время разряда плазмы, что в свою очередь дает оценку скорости термоядерной DD реакции. Чтобы получить абсолютные значения нейтронного выхода и скорости термоядерного синтеза, при анализе данных были учтены эффективность регистрации нейтронов, положение детектора, геометрический фактор, определяемый положением

детектора, вероятность испускания нейтрона в направлении детектора. Прохождение нейтронного излучения из плазмы до детектора моделировалось методом Монте-Карло с помощью кода MCNP. Временная эволюция скорости DD термоядерного синтеза представлена на Рис. 4 (красная линия) для разряда плазмы токамака ТУМАН-3М #20070810. Общая ошибка измерения скорости

термоядерного синтеза не превышает 10% [А8]. Калиброванный нейтронный ^3He -счетчик, который также использовался в нейтронных измерениях на токамаке ТУМАН-3М, дает аналогичные результаты по оценке нейтронного выхода, учитывая эффективность счетчика (Рис. 4, синие точки).

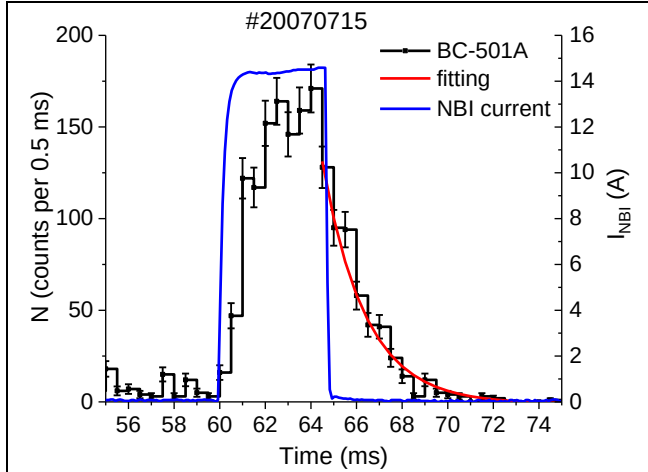


Рис. 5. – Сигналы, измеренные во время разряда плазмы токамака ТУМАН-3М #20070715: синяя линия – ток источника ионов I_{NBI} , А; черная линия – скорость счета нейтронного спектрометра ВС-501А, отсчеты в 0.5 мс; красная линия – экспоненциальная кривая, описывающая спад скорости счета нейтронного спектрометра, отсчеты в 0.5 мс.

На основе проведенных нейтронных измерений было оценено время замедления быстрых ионов дейтерия, инжектированного в плазму ТУМАН-3М, по спаду нейтронного выхода в разряде #20070715 после окончания инъекции пучка дейтерия. Временная эволюция скорости счета нейтронного спектрометра ВС-501А в данном разряде показана на Рис. 5. Характерное время спада скорости счета нейтронного спектрометра $\tau_n \approx 1,88$ мс (красная линия на Рис. 5).

Измерение времени спада нейтронных потоков позволяет оценить общее время удержания быстрых ионов дейтерия, τ_{loss} , которое определяется характерным временем потерь за счет перезарядки, нестабильностей пучка, полагая что $1/\tau_n \approx 1/\tau_{\text{loss}} + 1/\tau_s$. Здесь $\tau_s = (\tau_{se}/3) \cdot \ln[(E_b^{3/2} + E_c^{3/2})/(E_n^{3/2} + E_c^{3/2})]$ – характерное время замедления быстрого дейтерия до энергии E_n , при которой сечение DD-реакции уменьшается в e раз, относительно энергии пучка E_b [12,13]. τ_{se} – спитцеровское время замедления на электронах; E_c – критическая энергия $E_c = 14,8 \cdot T_e \cdot A_b \cdot Z_i^{4/3} / A_i^{2/3}$ (T_e – электронная температура, A_b – атомный номер инжектируемых атомов; Z_i – зарядовое число ионов плазмы; A_i – атомный номер ионов плазмы) [12]. Согласно расчетам, в исследуемом разряде $\tau_s = 2,2$ мс. Измеренное время спада нейтронного потока $\tau_n \approx 1,88$ мс дает оценку

времени удержания быстрых ионов $\tau_{loss} \approx 14$ мс. Этот результат свидетельствует о том, что кулоновское замедление является преобладающим механизмом потерь быстрых ионов в рассматриваемом разряде. Время спада скорости счета нейтронного спектрометра $\tau_n = 1,88$ мс, полученное с помощью спектрометра ВС-501А, согласуется с измерениями, проведенными с помощью ^3He счетчика, в разряде #20070715. Значение $\tau_n \sim 0,85\tau_s$ находится в соответствии с данными, полученными в предыдущих исследованиях на токамаке ТУМАН-3М [14], в которых τ_n было оценено как $\sim 0.84\tau_s$.

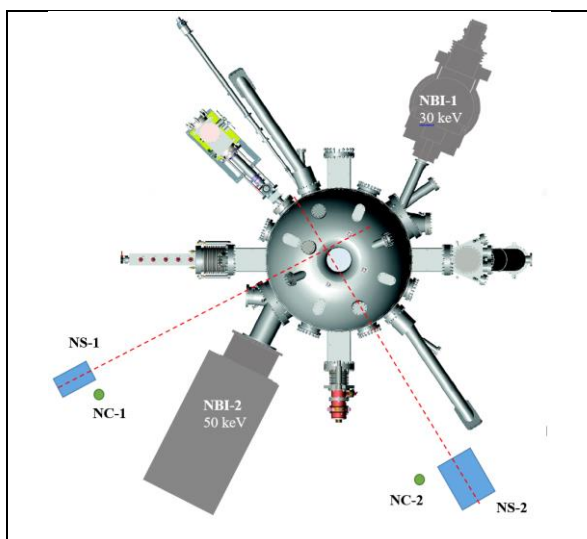


Рис. 6. — Схема расположения системы нейтронной диагностики в зале токамака Глобус-М2. NS-1, NS-2 — нейтронные спектрометры №1 и №2, NC-1, NC-2 — нейтронные счетчики на основе ^{10}B №1 и №2; NBI-1 — инжектор пучка нейтральных частиц, 30 кэВ, NBI-2 — инжектор пучка нейтральных частиц, 50 кэВ.

Система нейтронной диагностики на токамаке Глобус-М2 содержит два газоразрядных счетчика на основе использования изотопа ^{10}B и два компактных нейтронных спектрометра на основе жидкого органического сцинтиллятора ВС-501А размером $\varnothing 50.8$ мм $\times$ 50.8 мм [А11]. Схема расположения нейтронных спектрометров относительно токамака Глобус-М2 представлена на Рис. 6. Первый ВС-501А спектрометр (NS-1) располагается в свинцовой защите на расстоянии от передней стенки защиты до вакуумной камеры токамака ~ 430 см. Второй спектрометр (NS-2) также был

помещен в свинцовую защиту и установлен на расстоянии 210 см от камеры токамака. Оба нейтронных спектрометра защищены от действия магнитного поля токамака магнитными экранами. Нейтронный выход из плазмы токамака Глобус-М2 измеряется с помощью двух ^{10}B счетчиков СНМ-11. Первый счетчик (NC-1) установлен рядом со спектрометром NS-1 на расстоянии приблизительно 4.5 м от камеры токамака, и его положение зафиксировано.

Второй счетчик может перемещаться по залу токамака на расстояние от 1 до 11 м от камеры для обеспечения измерения нейтронного выхода в более широком диапазоне. Была проведена *in situ* калибровка нейтронных счетчиков с использованием Am-Be источника нейтронов для обеспечения точных измерений общего выхода нейтронов из плазмы токамака Глобус-М2 [A9]. Системой нейтронной диагностики проводились измерения нейтронного излучения, рожденного в плазме во время разрядов токамака Глобус-М2 с инжекцией пучка нейтрального дейтерия. Энергия инжектированного пучка дейтерия в этих экспериментах составляла около 28 кэВ.

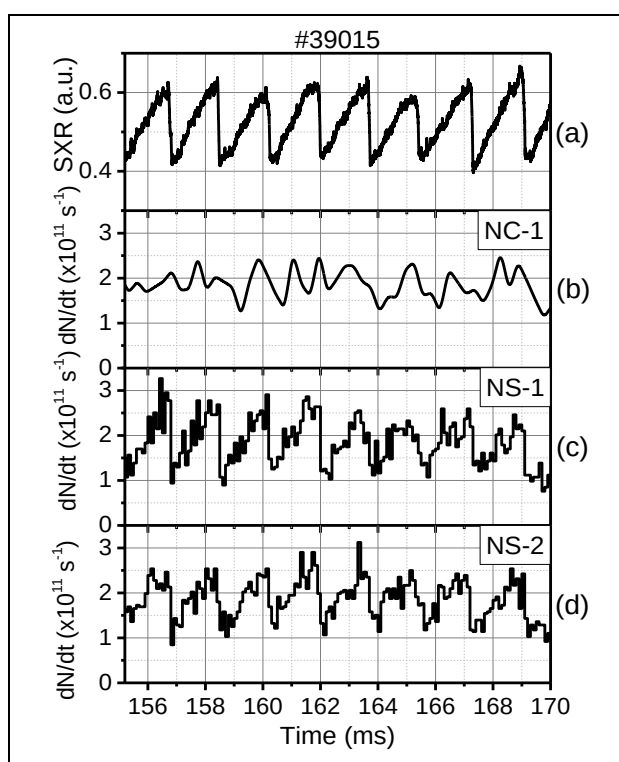


Рис. 7. – Пилообразные осцилляции, наблюдавшиеся по время разряда #39015: а) сигнал SXR, б) нейтронный выход из плазмы, зарегистрированный NC-1, в) нейтронный выход из плазмы, зарегистрированный NS-1, д) нейтронный выход из плазмы, зарегистрированный NS-2.

В разряде плазмы токамака Глобус-М2 #39015 наблюдались пилообразные колебания. Сигнал, зарегистрированный нейтронными спектрометрами NS-1 и NS-2, нормированный на нейтронный выход из плазмы, представлен на Рис. 7c,d) вместе с сигналом, зарегистрированным нейтронным счетчиком NC-1 (Рис. 7b)), который использовался для калибровки спектрометров. Сигналы нейтронных спектрометров синхронизированы с сигналом датчика мягкого рентгеновского излучения (SXR), представленном на Рис. 7a). Во время срыва пилообразных осцилляций нейтронный выход падает на ~60% от

собственного максимума, что демонстрирует существенные потери или перераспределение быстрых ионов в плазме во время развития неустойчивости такого рода [A11].

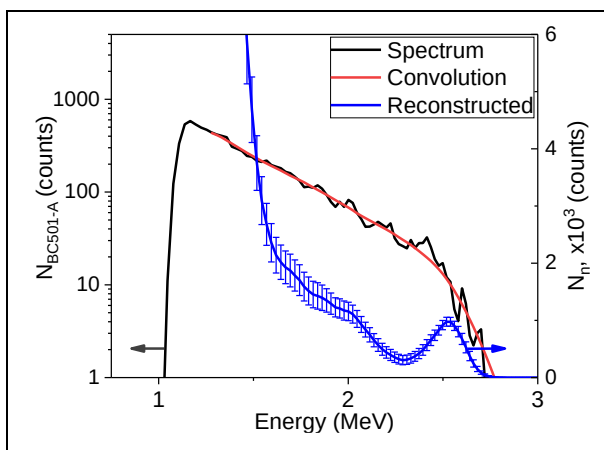


Рис. 8. – Результат восстановления энергетического распределения нейтронов (синяя линия), полученного из спектра нейтронного излучения (черная линия). Красная линия – свертка полученного энергетического распределения нейтронов с функциями отклика спектрометра.

качестве примера, на Рис. 8 (черная линия) представлен энергетический спектр нейтронов, полученный путем суммирования результатов измерений во время разрядов плазмы #40257, 40258, 40260 токамака Глобус-М2 для достижения большей статистики. Используя код DeGaSum и полученные в Главе 2 функции отклика спектрометров BC-501A, было восстановлено энергетическое распределение нейтронов (Рис. 8, синяя линия) [A11].

Компактные нейтронные спектрометры BC-501A показали себя как эффективный инструмент для измерения нейтронных потоков из плазмы токамака. Использование детекторов такого типа позволяет оценить нейтронный выход и интенсивность протекания термоядерных реакций в разряде плазмы, а также изучать особенности энергетического распределения быстрых ионов в различных режимах нагрева плазмы инжекцией пучка нейтральных атомов [A10].

Четвертая глава посвящена спектрометрии гамма-излучения, генерируемого в термоядерной плазме. Рассмотрены ядерно-физические процессы, лежащие в основе методов измерения гамма-излучения, а также детекторы, применяемые в гамма-спектрометрии, и гамма-

Компактные нейтронные спектрометры позволяют измерить энергетические спектры DD нейтронов, испускаемых из плазмы. На восстановленных из измерений на токамаках ТУМАН-3М и Глобус-М2 энергетических распределениях нейтронов наблюдается характерный пик в области энергий 2-2.5 МэВ, что соответствует регистрации нерассеянных нейтронов и нейтронов, однократно рассеянных на малый угол, рожденных в DD реакции. В

спектрометрические системы, установленные на уже существующих термоядерных установках [15]. Существующие технологии предоставляют два типа детекторов гамма-излучения, удовлетворяющих высоким требованиям использования в плазменном эксперименте: сцинтилляционные и полупроводниковые детекторы [15]. Среди сцинтилляторов широко распространено применение кристаллов быстрого сцинтиллятора $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, а из полупроводниковых детекторов преимущественно используются детекторы на основе особо чистого германия, HPGe.

Токамак JET имеет наиболее совершенную систему гамма-спектрометрии среди действующих токамаков. На токамаке JET энергетические спектры гамма-излучения измеряются с помощью различных устройств с горизонтальной и вертикальной линиями обзора [A13]. В систему гамма-спектрометрии входят два спектрометра большого размера на основе кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ $\varnothing 76,2 \text{ мм} \times 152,4 \text{ мм}$ [A5] с вертикальной линией обзора и один аналогичный спектрометр с тангенциальной линией обзора [A7]. В некоторых разрядах один из вертикальных детекторов $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ заменяется полупроводниковым HPGe спектрометром. В дополнение к высокоэффективным спектрометрам используется гамма-камера, состоящая из 19 компактных $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ детекторов с размерами кристаллов $\varnothing 25 \text{ мм} \times 17 \text{ мм}$ с 10 горизонтальными и 9 вертикальными линиями обзора в полоидальном сечении плазмы.

В этой главе представлены два метода анализа гамма-излучения, основанные на изучении интенсивностей гамма-линий, наблюдаемых в плазме токамака, а также основанные на изучении форм гамма-линий, искаженных и уширенных за счет эффекта Доплера [A13]. Описаны физические процессы, лежащие в основе представленных методов анализа. Оба представленных метода анализа спектров гамма-излучения были применены в экспериментах с генерацией α -частиц, рожденных при инжектировании пучков дейтерия в D- ^3He плазму токамака JET.

Используя 3-ионный D-(D_{NBI})-³He сценарий радиочастотного нагрева, инжектированные частицы D_{NBI} были ускорены в центре D-³He плазмы до более высоких энергий с помощью ИЦР-волн, что в свою очередь привело к возникновению локализованного в центре плазмы источника α-частиц [16]. Основные параметры плазмы в этих экспериментах были следующими: ток плазмы, $I_p=2,5$ МА, магнитное поле $B_0\approx 3,7$ Т, усредненная электронная плотность $n_{e0}\approx 6\times 10^{-19}$ м⁻³, мощность ИЦР-нагрева и NBI $P_{\text{ИЦРН}} \sim 4\text{-}6$ МВт, $P_{\text{NBI}} \sim 3\text{-}20$ МВт, концентрация ионов ³He $n_{3\text{He}}/n_e \approx 20\%\text{--}25\%$ [A5].

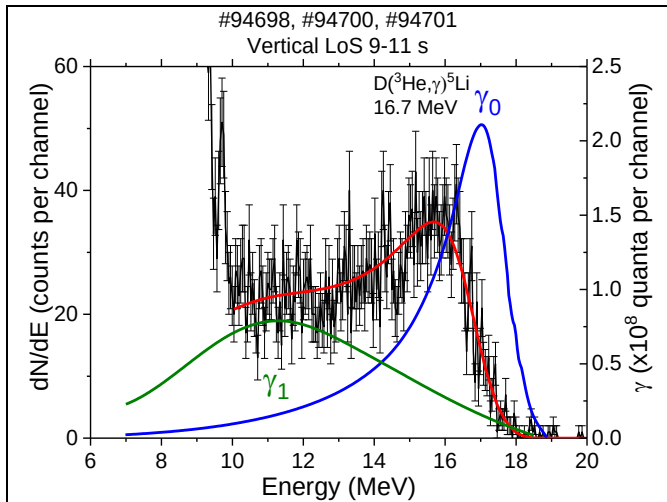


Рис. 9. – Измеренный спектр гамма-излучения, полученный путем суммирования данных разрядов JET #94698, 94700, 94701 в диапазоне энергий 10-20 МэВ, и восстановленное энергетическое распределение испущенных гамма-квантов γ_0 и γ_1 , показанное синей и зеленой линиями, соответственно.

JET #94698, 94700, 94701 с похожими параметрами плазмы в энергетическом диапазоне 10-20 МэВ, представлен на Рис. 9. Область локализации α-частиц, рожденных в плазме, была определена с помощью томографического восстановления профиля гамма-излучения с использованием сигналов гамма-камеры. Доля источника гамма-радиации в диапазоне энергий $E>10$ МэВ, видимая для вертикального спектрометра в полоидальном сечении плазмы, была оценена как 60,4% [A13]. Из полученного спектра гамма-излучения были восстановлены интенсивности гамма-переходов в основное состояние (γ_0) и в

В D-³He плазме информация об источнике α-частиц (выход и пространственный профиль) может быть получена из измерений 16.7 МэВ гамма-излучения, рожденного в ³He(D,γ)⁵Li реакции, которая является второй ветвью термоядерной ³He+D реакции [17]. Спектр гамма-излучения, измеренный спектрометром LaBr₃(Ce) с вертикальной линией обзора, полученный путем суммирования данных из разрядов

первое возбужденное состояние (γ_1) ядер ${}^5\text{Li}$, рожденных в ${}^3\text{He}(D,\gamma){}^5\text{Li}$ реакции. Из разложения гамма-спектра на две линии оценен коэффициент ветвления переходов в основное (I_0) и первое возбужденное состояние (I_1) в ${}^5\text{Li}$ как $I_0/I_1=1,12\pm0,18$. Оно согласуется со значением $I_0/I_1=1,0\pm0,2$, полученным в работе [18] при $E_D=480$ кэВ.

Для γ_0 -перехода известен коэффициент ветвления реакций ${}^3\text{He}(d,\gamma_0){}^5\text{Li}/{}^3\text{He}(d,p){}^4\text{He}$, позволяющий из интенсивности линии γ_0 получить оценку скорости генерации α -частиц и зависит от энергии ионов D [19]. Коэффициент ветвления был усреднен по энергетическому распределению быстрых ионов дейтерия, рассчитанному кодом TRANSP, исходя из известных параметров NBI и ИЦР-нагрева, примененных в исследуемых разрядах [A13]. Используя среднее значение коэффициента ветвления $\langle B \rangle = 4,69 \times 10^{-5}$, была получена оценка скорости протекания $D({}^3\text{He},p){}^4\text{He}$ реакции в видимом объеме плазмы, усредненная по трем разрядам #94698, 94700, 94701, равная $\sim 5,79 \times 10^{13} \text{ с}^{-1}$. Средняя скорость генерации α -частиц во всей плазме была оценена как $\langle R_\alpha \rangle \approx (1,45 \pm 0,4) \times 10^{16} \text{ с}^{-1}$ [A13]. Суммарная ошибка определения скорости рождения α -частиц составляет 27%. В то же время интенсивность D- ${}^3\text{He}$ реакции была оценена из вычислений кодом TRANSP как $(1 \div 2) \times 10^{16} \text{ с}^{-1}$ [A5], что находится в хорошем согласии с экспериментальными наблюдениями, предоставленными гамма-спектрометрами.

Рожденные в ${}^3\text{He}(d,p){}^4\text{He}$ реакции α -частицы удерживаются в плазме магнитным полем и обладают энергией, достаточной для взаимодействия с ионами примеси ${}^9\text{Be}$. Это взаимодействие приводит к испусканию гамма-излучения с энергией 4,44 МэВ из ${}^9\text{Be}(\alpha,n\gamma){}^{12}\text{C}$ реакции, которое наблюдалось в спектрах гамма-излучения, зарегистрированном спектрометрами, вместе с гамма-линиями из $D+{}^9\text{Be}$ реакций (2,86, 3,37 и 3,59 МэВ) [A13]. Исследования удерживаемых α -частиц были проведены в экспериментах JET с увеличенной мощностью NBI нагрева. В этих экспериментах использовался HPGe спектрометр с вертикальной линией обзора, который позволяет наблюдать смещение и искажение формы линии 4,44 МэВ за счет эффекта Доплера.

На Рис. 10 показана гамма-линия с энергией 4.44 МэВ из реакции ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$ после вычитания фона, полученная путем суммирования данных из разрядов ##95677, 95679, 95680, 95681, 95683, 95684, 95686, 95697 (черные точки) со схожими параметрами плазмы. Восстановленное с помощью анализа Доплеровской формы линии кодом DeGaSum распределение ионов по энергии и углам показаны на Рис. 11 [A13].

Распределение получено на основе имеющихся данных о n - γ корреляции в диапазоне энергий $E_\alpha \sim 1,9$ -7 МэВ. Анализ не проводился для α -частиц с энергией $E_\alpha < 1,9$ МэВ, поскольку сечение ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$ реакции в этом энергетическом диапазоне очень мало [20]. Полученное энергетическое распределение α -частиц содержит значительную фракцию высокоэнергичных α -частиц с энергией 5-7 МэВ, что объясняется кинематикой $\text{D}-{}^3\text{He}$ ядерной реакции. Угловое распределение α -частиц было получено относительно угла θ между направлением движения α -частиц и линией обзора HPGe детектора. Полученное угловое распределение обладает сильной анизотропией с максимумом в диапазоне углов 50° - 100° . Эта анизотропия вызывает искажение гамма-пика и его смещение в область низких энергий. На Рис. 10 зеленой линией показана форма гамма-линии 4,44 МэВ, рассчитанная для полученного энергетического распределения α -частиц (Рис. 11a)) в предположении изотропного углового распределения. Изотропное угловое распределение дает симметричную форму линии, которая значительно шире

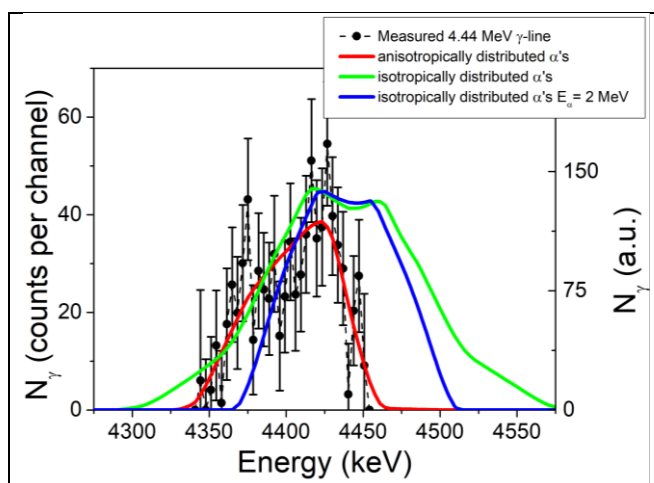
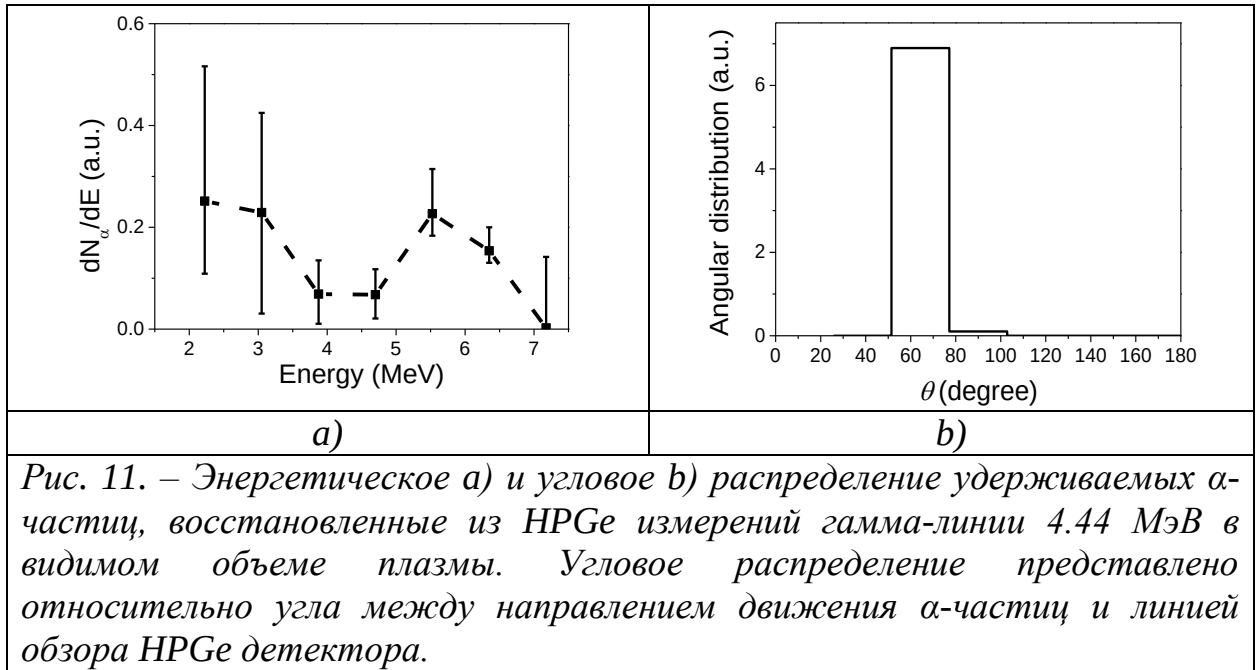


Рис. 10. – Измеренная интегральная гамма-линия 4.44 МэВ из реакции ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$ (черные точки) и описание формы линии (красная линия), соответствующая энергетическому и угловому распределению α -частиц, представленных на Рисунке 11; зеленая линия соответствует форме линии в случае изотропного углового распределения α -частиц; синяя линия – форма 4.44-МэВ гамма-линии, рассчитанная для α -частиц с энергией 2 МэВ с изотропным угловым распределением.

наблюдаемой. Форма линии, полученная для моноэнергетических частиц с энергией 2 МэВ, изотропно распределенных, шире измеренной линии (Рис.10, синяя линия). Таким образом, измерение Доплеровской формы гамма-линии с энергией 4,44 МэВ позволило заметить, что несмотря на то, что угловое распределение рожденных α -частиц изотропно, в эксперименте наблюдалась сильная угловая анизотропия удерживаемых α -частиц в видимом для детектора объеме с большой фракцией высокоэнергичных α -частиц [A13]. Этот эффект вызван движением удерживаемых α -частиц в токамаке JET по замкнутой банановой траектории [21]. Детектор с вертикальной линией обзора наблюдает только часть этой траектории, где частицы двигаются по спирали в направлении от детектора.



Пятая глава посвящена подготовке к измерению функций возбуждения ядер ^{11}B и ^{11}C , рожденных в ядерных реакциях $^9\text{Be}(^3\text{He}, p\gamma)^{11}\text{B}$ и $^9\text{Be}(^3\text{He}, n\gamma)^{11}\text{C}$ между ионами ^3He и ^9Be , необходимых для более детального анализа быстрых ионов в плазме с содержанием ионов ^3He и ионов примеси ^9Be [A6]. На настоящий момент сведения о сечениях ядерных реакций с участием ядер ^9Be и изотопа ^3He имеют отрывочный характер. Кроме того, для анализа распределений быстрых ионов в плазме необходима информация об угловой зависимости испускаемых гамма-квантов. В большинстве исследований

угловая зависимость не изучалась, а измерения проводились при одном или двух направлениях вылета частиц-продуктов. Для проведения изучения функций возбуждения ядер ^{11}B и ^{11}C в реакциях $^9\text{Be}(^3\text{He}, p\gamma)^{11}\text{B}$ и $^9\text{Be}(^3\text{He}, n\gamma)^{11}\text{C}$ в экспериментах на циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе была разработана и изготовлена экспериментальная установка, которая в дальнейшем может быть использована при измерении функций возбуждения гамма- переходов в ядрах, рожденных в реакциях между изотопами водорода и гелия и ядрами Be, B и C. Установка включает в себя камеру реакций, позволяющая с особой точностью измерить заряд пучка ионов, попавшего на мишень. Спектры гамма-излучения в разработанной установке одновременно измеряются двумя HPGe детекторами, наблюдающими мишень под различными углами относительно направления пучка ионов. В ходе подготовки к измерениям функций возбуждения гамма-переходов в реакциях между ^9Be и ^3He были проведены предварительные измерения спектров гамма и нейтронного излучения из бериллиевой мишени, облучаемой пучком ионов ^3He с энергией 2,57 МэВ [А6].

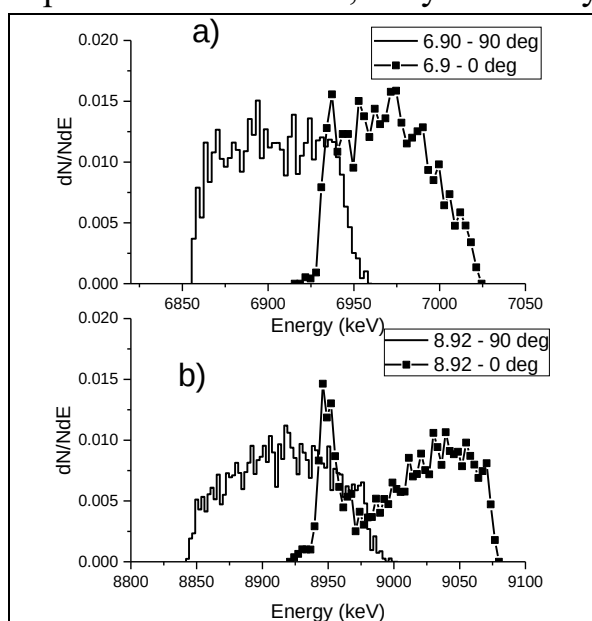


Рис. 12 – Формы линий гамма-переходов а) 6,9 МэВ из реакции $^9\text{Be}(^3\text{He}, n\gamma)^{11}\text{C}$ и б) 8,92 МэВ из реакции $^9\text{Be}(^3\text{He}, p\gamma)^{11}\text{B}$, измеренные под углами 0° и 90° [А6].

Спектры гамма-излучения измерялись двумя HPGe спектрометрами: ORTEC GMX45P4-83-CW-PL и CANBERRA GR5021. Также в качестве монитора использовался дополнительный гамма-спектрометр $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ с размерами $\varnothing 38 \text{ мм} \times 51 \text{ мм}$. В измерениях спектров нейтронов из реакции $^9\text{Be}(^3\text{He}, n\gamma)^{11}\text{C}$ использовался спектрометр на основе жидкого органического сцинтиллятора BC-501A. В ходе эксперимента положение HPGe детекторов менялось относительно направления пучка ионов, падающих на мишень, что позволило измерить доплеровские формы линий при углах обзора 0° , 30° , 60° , 90° и 120° . Расстояние от мишени до

детекторов составляло 40 см. На Рис. 12. показаны формы линий переходов 6,9 МэВ из реакции ${}^9\text{Be}({}^3\text{He},n\gamma){}^{11}\text{C}$ и 8,92 МэВ из реакции ${}^9\text{Be}({}^3\text{He},p\gamma){}^{11}\text{B}$ [А6].

Анализ доплеровской формы гамма-линий позволил восстановить угловое распределение продуктов реакций (n и p), проходящих в бериллиевой мишени при облучении пучком ${}^3\text{He}$. Поиск углового распределения продуктов находился методом, описанным в работе [20]. На Рис. 13 показано угловое распределение вылета протонов при заселении уровня 8,92 МэВ ядра ${}^{11}\text{B}$ в реакции ${}^9\text{Be}({}^3\text{He},p\gamma){}^{11}\text{B}$ относительно направления пучка ${}^3\text{He}$. Таким образом, были подготовлены измерения сечений и угловых распределений гамма и нейтронного излучения в широком диапазоне энергий [А6].

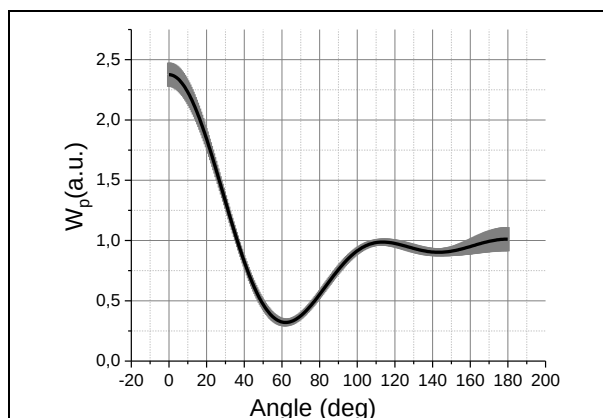


Рис. 13. – Угловое распределение вылета протонов при заселении уровня 8,92 МэВ ядра ${}^{11}\text{B}$ в реакции ${}^9\text{Be}({}^3\text{He},p\gamma){}^{11}\text{B}$ относительно направления пучка ${}^3\text{He}$ при энергии ${}^3\text{He}$ 2,57 МэВ. Неопределенности определения углового распределения отмечены серой областью [А6].

С использованием разработанной системы измерений спектров нейтронного и гамма излучения в ядерных реакциях с участием легких ядер на пучке циклотрона ФТИ им. А.Ф. Иоффе была проведена серия экспериментов по исследованию сечений и угловых распределений гамма излучения в реакциях ${}^9\text{Be}({}^3\text{He},n\gamma){}^{11}\text{C}$ и ${}^9\text{Be}({}^3\text{He},p\gamma){}^{11}\text{B}$ [22]. Были измерены спектры и угловое распределение гамма-излучения в диапазоне 1,52-7 МэВ, а также формы линий гамма-переходов 2, 2,12, 4,8, 6,9, 7,29 и 8,92 МэВ. На момент написания работы проводится обработка анализ полученных экспериментальных данных.

В заключении подводятся итоги проведенных исследований. В ходе выполнения исследований были достигнуты следующие результаты:

1. Разработана и применена на циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе методика калибровки и обработки сигналов детекторов нейтронного излучения на

основе органических сцинтилляторов, основанная на методе нейтрон-гамма совпадений в комбинации с времяпролетной методикой. Была проведена экспериментальная кампания по калибровке двух нейтронных спектрометров на основе сцинтиллятора ВС-501А. Метод нейтрон-гамма совпадений позволил выделить моноэнергетические нейтроны из ${}^9\text{Be}(\alpha, n_1\gamma){}^{12}\text{C}$ реакции в широком диапазоне энергий от 1,9 до 10,4 МэВ. В результате применения этого метода были получены функции отклика двух нейтронных спектрометров на основе сцинтиллятора ВС-501А на моноэнергетическое нейтронное излучение в указанном энергетическом диапазоне. Была определена зависимость эффективности детекторов от энергии регистрируемых нейтронов.

2. На токамаках ФТИ им. А.Ф. Иоффе ТУМАН-3М и Глобус-М2 были разработаны спектрометрические системы нейтронной диагностики. Системы позволяют проводить спектрометрические измерения нейтронных потоков из плазмы токамака со скоростью счета до 10^6 с^{-1} . В экспериментах с инжекцией пучка дейтерия в дейтериевую плазму с помощью спектрометров ВС-501А были измерены аппаратные спектры нейтронного излучения. С помощью кода DeGaSum было восстановлено энергетическое распределение DD-нейтронов, рожденных в разрядах плазмы токамаков Глобус-М2 и ТУМАН-3М. На основе нейтронных измерений была получена временная эволюция нейтронного выхода в течение разряда плазмы. Из полученных данных была оценена интенсивность DD термоядерной реакции, которая достигала порядка 10^{10} - 10^{11} с^{-1} на токамаке ТУМАН-3М и порядка 10^{11} с^{-1} на токамаке Глобус-М2. В нейтронных измерениях на Глобус-М2 наблюдалось влияние пилообразных осцилляций на выход нейтронов и удержание быстрых ионов в плазме.
3. Развита методика анализа спектров гамма-излучения, генерируемого в плазме, для изучения быстрых ионов, включая удерживаемые α -частицы, рожденные в процессе термоядерного синтеза. Из анализа интенсивности гамма-излучения получены оценки скорости термоядерного синтеза в D- ${}^3\text{He}$ плазме токамака JET в разрядах с инжекцией дейтериевых пучков и ИЦР-нагревом. Интенсивность генерации α -частиц была оценена в видимом для детектора объеме плазмы из измерений гамма-излучения реакции ${}^3\text{He}(d,\gamma){}^5\text{Li}$ с энергией 16,7 МэВ. С учетом области локализации источника α -частиц была оценена общая скорость протекания термоядерной ${}^3\text{He}$ -D реакции $\langle R_\alpha \rangle \approx (1,45 \pm 0,4) \times 10^{16} \text{ с}^{-1}$. Анализ уширенной за счет эффекта Доплера формы линии 4,44 МэВ из реакции ${}^9\text{Be}(\alpha, n\gamma){}^{12}\text{C}$ позволил восстановить энергетическое и угловое распределение

удерживаемых α -частиц, рожденных в реакции синтеза D- ^3He . Было отмечено, что в видимом для детектора объеме плазмы удерживаемые α -частицы обладают сильной угловой анизотропией и содержат большую долю высокоэнергетических частиц.

4. На циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе разработана экспериментальная установка для измерения функций возбуждения гамма-переходов в ядрах, рожденных в реакциях между изотопами H и He и ядрами Be, B и C. Подготовлен эксперимент по измерению функций возбуждения гамма-переходов ядер ^{11}B и ^{11}C , являющихся продуктами ядерных реакций между легкими ядрами плазменного топлива и ядрами примесей в плазме токамака. Проведены предварительные измерения спектров гамма и нейтронного излучения при облучении бериллиевой мишени пучком ^3He . Восстановлено угловое распределение вылета протонов относительно направления движения ядра ^3He .

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- A1. Nocente M., Dal Molin A., Eidietis N., Giacomelli L., Gorini G., Kazakov Y., Khilkevitch E., Kiptily V., **Iliasova M.**, Lvovskiy A., Mantsinen M., Mariani A., Panontin E., Papp G., Pautasso G., Paz-Soldan C., Rigamonti D., Salewski M., Shevelev A., Tardocchi M., JET and MST1 contributors, MeV range particle physics studies in tokamak plasmas using gamma-ray spectroscopy // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2020. - Vol. 62. 014015
- A2. Kiptily V.G., Kazakov Y., Fitzgerald M., Nocente M., **Iliasova M.**, Khilkevitch E., Mantsinen M., Nave M.F.F., Ongena J., Sharapov S.E., Shevelev A.E., Stancar Z., Szepesi G., Taylor D.M.A. and Yakovenko Y.V., Excitation of elliptical and toroidal Alfvén Eigenmodes by ^3He -ions of the MeV-energy range in hydrogen-rich JET plasmas // Nuclear Fusion. 2020. - Vol. 60. 112003
- A3. Khilkevitch E.M., Shevelev A.E., Chugunov I.N., **Iliasova M.V.**, Doinikov D.N., Gin D.B., Naidenov V.O., Polunovsky I.A., Advanced algorithms for signal processing scintillation gamma ray detectors at high counting rates // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2020. - Vol. 977. 164309
- A4. **Iliasova M.V.**, Shevelev A.E., Khilkevitch E.M., Chugunov I.N., Minaev V.B., Gin D.B., Doinikov D.N., Polunovsky I.A., Naidenov V.O., Kozlovskiy M.A., Kudoyarov M.F., Calibration of neutron spectrometers based on a BC-501A liquid scintillator using the neutron-gamma coincidence method // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2020. - Vol. 983. 164590
- A5. Nocente M., Kazakov Ye.O., Garcia J., Kiptily V.G., Ongena J., Dreval M., Fitzgerald M., Sharapov S.E., Stancar Z., Weisen H., Baranov Y., Bierwage A., Craciunescu T., Dal Molin A., de la Luna E., Dumonti R., Dumortier P., Eriksson J., Giacomelli L., Giroud C., Goloborodko V., Gorini G., Khilkevitch E., Kirov K.K., **Iliasova M.**, Jacquet P., Lauber P., Lerche E., Mantsinen M.J., Mariani A.,

- Mazzi S., Nabais F., Nave M.F.F., Oliver J., Panontin E., Rigamonti D., Sahlberg A., Salewski M., Shevelev A., Shinohara K., Siren P., Sumida S., Tardocchi M., Van Eester D., Varje J., Zohar A., JET Contributors, Generation and observation of fast deuterium ions and fusion-born alpha particles in JET D-He-3 plasmas with the 3-ion radio-frequency heating scenario // Nuclear Fusion. 2020. - Vol. 60. 124006
- A6. Ильясова М.В.,** Шевелев А.Е., Хилькевич Е.М., Чугунов И.Н., Дойников Д.Н., Кудояров М.Ф., Найденов В.О., Полуновский И.А., Измерения спектров гамма- и нейтронного излучения в ядерных реакциях с ионами ^3He и ^9Be // Письма в Журнал Технической Физики. 2021. - Том 47. №3. Стр. 3-6
Iliasova M.V., Shevelev A.E., Khilkevitch E.M., Chugunov I.N., Doinikov D.N., Kudoyarov M.F., Naidenov V.O., Polunovsky I.A., Measurements of gamma- and neutron-radiation spectra in nuclear reactions with He-3 and Be-9 ions // Technical Physics Letters. 2021. - Vol. 47. No. 2. pp. 103-106
- A7.** Nocente M., Craciunescu T., Gorini G., Kiptily V., Tardocchi M., Braic V., Curuia M., Dal Molin A., Figueiredo J., Giacomelli L., **Iliasova M.**, Kazakov Y., Khilkevitch E., Marcer G., Panontin E., Rigamonti D., Salewski M., Shevelev A., Soare S., Zoita V., Zychor I., A new tangential gamma-ray spectrometer for fast ion measurements in deuterium and deuterium-tritium plasmas of the Joint European Torus // Review of Scientific Instruments. 2021. - Vol. 92. No. 4. 043537
- A8. Iliasova M.**, Shevelev A., Khilkevitch E., Lebedev S., Askinazi L., Kornev V., Minaev V., Tukachinsky A., Doinikov D., Polunovsky I., Naidenov V., Gin D., Measurements of neutron fluxes from tokamak plasmas using a compact neutron spectrometer // Review of Scientific Instruments. 2021. - Vol. 92. No. 4. 043560
- A9.** Скрекель О.М., Бахарев Н.Н., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., **Ильясова М.В.**, Тельнова А.Ю., Хилькевич Е.М., Шевелев А.Е., Калибровка нейтронных счетчиков токамака Глобус-М2 // Журнал Технической Физики. 2022. - Том 92. №1. Стр. 32-35
- A10.** Балаченков И.М., Бахарев Н.Н., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., **Ильясова М.В.**, Курские Г.С., Минаев В.Б., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Скрекель О.М., Тельнова А.Ю., Хилькевич Е.М., Шевелев А.Е., Щеголев П.Б., Анализ потерь быстрых ионов, вызванных распространением тороидальных альфвеновских мод в плазме сферического токамака Глобус-М2 // Журнал Технической Физики. 2022. - Том 92. № 1. Стр. 45-51
- A11. Iliasova M.V.**, Shevelev A.E., Khilkevitch E.M., Bakharev N.N., Skrekel O.M., Minaev V.B., Doinikov D.N., Gin D.B., Gusev V.K., Kornev V.A., Naidenov V.O., Novokhatskii A.N., Petrov Yu.V., Polunovsky I.A., Sakharov N.V., Shchegolev P.B., Telnova A.Yu., Varfolomeev V.I., Neutron diagnostic system at the Globus-M2 tokamak // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2022. - Vol. 1029. 166425
- A12.** Kiptily V.G., Kazakov Ye.O., Nocente M., Ongena J., Belli F., Dreval M., Craciunescu T., Eriksson J., Fitzgerald M., Giacomelli L., Goloborodko V., **Iliasova M.V.**, Khilkevitch E.M., Rigamonti D., Sahlberg A., Salewski M., Shevelev A.E., Garcia J., Oliver H.J.C., Sharapov S.E., Stancar Z., Weisen H. and JET Contributors,

Excitation of Alfvén eigenmodes by fusion-born alpha-particles in D3He plasmas on JET // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2022. - Vol.64. 064001

A13. Iliasova M., Shevelev A., Khilkevich E., Kazakov Ye., Kiptily V., Nocente M., Giacomelli L., Craciunescu T., Stancar Z., Dal Molin A., Rigamonti D., Tardocchi M., Doinikov D., Gorini G., Naidenov V., Polunovsky I., Gin D., JET Contributors, Gamma-ray measurements in D3He fusion plasma experiments on JET // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2022. - Vol. 1031. 166586

Список литературы

- [1] Ye.O. Kazakov et al 2015 Nucl. Fusion 55 032001
- [2] Ye.O. Kazakov et al. 2017 Nature Phys. 13 973-978
- [3] R. J. Hawryluk et al 1994 Phys. Rev. Lett. 72 3530
- [4] Корнев В.А.: диссертация кандидата физ.-мат. наук: 01.04.08. - ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 2019. - 122 стр.
- [5] V I Afanasyev et al 2013 Plasma Phys. Control. Fusion 55 045008
- [6] G. Ericsson, J Fusion Energy 38, 330–355 (2019).
- [7] G. Tardini, F. Gagnon-Moisan, and A. Zimbal, Rev.of Scientific Instruments 87, 103504 (2016);
- [8] H. W. Broek and C. E. Anderson, Rev. Sci. Instrum. 31, 1063 (1960)
- [9] N. N. Bakharev et al Nucl. Fusion 59 (2019) 112022
- [10] V. A. Kornev et al Nucl. Fusion 57 (2017) 126005.
- [11] A.E. Shevelev, et al Nucl. Fusion 53 (2013) 123004.
- [12] W.W. Heidbrink, G.J. Sadler Nucl. Fusion 34 (1994) 535.
- [13] J. D. Strachan et al Nucl. Fusion 21, 67 (1981).
- [14] V. A. Kornev et al Tech. Phys. Lett. 39, 290–293 (2013).
- [15] V G Kiptily, F E Cecil and S S Medley Plasma Phys. Control. Fusion 48 (2006) R59–R82
- [16] M. Salewski, et al., Nucl. Fusion 56 (2016) 046009.
- [17] F.E. Cecil, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 10/11 (1985) 411–414
- [18] W. Buss, W. Del Bianco, H. Waffler, B. Ziegler, Nucl. Phys. A112 (1968) 47
- [19] F.E. Cecil et al, Phys. Review C 32 (1985) 690
- [20] В.Г. Киптиль и др., Вопр. атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. Специальный выпуск ТИЯС-XI, 1997, стр. 223-233
- [21] S.E. Sharapov et al 2005 Nucl. Fusion 45 1168
- [22] М.В. Ильясова и др., тезис доклада на конференции ЯДРО-2021