

Федеральное агентство научных организаций РФ
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

УДК 539.1; 539.12; 539.123

№ госрегистрации 01201050397

Инв.№

УТВЕРЖДАЮ
директор ИЯИ РАН
член-корр. РАН д.т.н.

Л.В.Кравчук



24 января 2017 года

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА, РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА
(промежуточный за 2016 год)
0031-2014-0067

Научный руководитель
заместитель директора по научной работе
д.ф.-м.н.

Г.И.Рубцов
19 января 2017 года

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы д.ф.-м.н.



Г.И.Рубцов (введение, заключение)
19.01.2017

Исполнители темы:



д.ф.-м.н. Ткачёв И.И. (раздел 1)
19.01.2017



д.ф.-м.н. Недорезов В.Г. (раздел 2)
19.01.2017



к.ф.-м.н. Конобеевский Е.С. (раздел 3)
19.01.2017

РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 119 с., 62 рис., 3 табл.

БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР, ЦЕРН, СТОЛКНОВЕНИЯ ЯДЕР СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ, ЭКСПЕРИМЕНТ АЛИСА, КВАРК-ГЛЮОННАЯ ПЛАЗМА, УЛЬТРАПЕРИФЕРИЧЕСКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЯДЕР, ФИКСИРОВАННАЯ МИШЕНЬ, СВЕТИМОСТЬ, ТРИГГЕРНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ, ДЕТЕКТОРЫ ЧЕРЕНКОВА, КВАРЦЕВЫЙ РАДИАТОР, ОПТИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ, ФЭУ НА ОСНОВЕ МИКРОКАНАЛЬНЫХ ПЛАСТИН, ПЛОСКОСТЬ РЕАКЦИИ, МАГНИТНЫЙ СПЕКТРОМЕТР, КИРАЛЬНАЯ СИММЕТРИЯ, ВЕКТОРНЫЕ МЕЗОНЫ, ЧАРМОНИЙ, ДИФРАКЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ, АНАЛОГОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, ЭКСПЕРИМЕНТ ХАДЕС, ЭКСПЕРИМЕНТ СВМ, ЭКСПЕРИМЕНТ NA61, ЭКСПЕРИМЕНТ MPD, КОЛЛАЙДЕР НИКА, СПИНОВАЯ АСИММЕТРИЯ, ПОЛЯРИЗУЕМОСТЬ, ФОТОРОЖДЕНИЕ, РЕФРАКЦИОННАЯ ИНТРОСКОПИЯ, ГИГАНТСКИЙ РЕЗОНАНС

Выполнялись работы по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, пункт 15. Современные проблемы ядерной физики, в том числе физики элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий, включая физику нейтрино и астрофизические и космологические аспекты, а также физики атомного ядра, физики ускорителей заряженных частиц и детекторов, создание интенсивных источников нейтронов, мюонов, синхротронного излучения и их применения в науке, технологиях и медицине.

Работы проводились в следующих направлениях:

поиск и исследование новых физических явлений в области энергий до нескольких ТэВ, новых элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий в экспериментах на Большом адронном коллайдере;

поиск и исследование редких процессов с участием элементарных частиц на протонных и вторичных (пионных, каонных, мюонных) пучках высокой интенсивности в целях открытия новых явлений, происходящих на сверхмалых расстояниях;

создание новых и развитие существующих методов регистрации частиц и излучений для будущих экспериментов в области физики элементарных частиц;

исследование механизмов образования и распада сверхплотной ядерной материи в столкновениях релятивистских ионов, изучение свойств адронов, кварков и глюонов и сверхплотной ядерной среды;

прецизионное исследование электромагнитных взаимодействий нуклонов и ядер;

исследование свойств адронов в ядерной среде, изучение их связанных состояний (мезонные ядра, дельта-ядра, гиперядра);

исследование структуры ядер и механизмов фрагментации в процессах столкновений релятивистских ядер и в электромагнитных реакциях;

получение прецизионных данных по рассеянию и реакциям с участием протонов, нейтронов, гамма-квантов, легких ядер и других данных;

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2016 год. Из полученных результатов можно выделить следующие важнейшие результаты работ.

В эксперименте ALICE проводились сеансы физических измерений на пучках сталкивающихся протонов и для столкновений протонов с ядрами свинца. Детектор T0 использовался во всех этих сеансах вместе с другими системами. Работы по модернизации, устранению неполадок, поддержанию работоспособности, обеспечению безаварийного процесса измерений и получения экспериментальных данных с детектора T0 были выполнены практически полностью сотрудниками ИЯИ и МИФИ.

На установке ALICE проведено сканирование по методу Ван дер Меера для p-p столкновений при энергии $\sqrt{s} = 13$ TeV с использованием передних детекторов T0, V0 и AD. В ноябре проведены сканирования по методу Ван дер Меера для p-Pb и Pb-p столкновений при энергии 8 TeV.

Разработана концепция и созданы образцы черенковского детектора на основе кварцевых радиаторов и микроканальных ФЭУ для триггерного ФИТ-детектора установки ALICE.

В течение проведённого в 2016 году сеанса работы БАК выполнены измерения дифракционных процессов при столкновении протонов с энергией 13 ТэВ в с.ц.м., которая является максимальной энергией столкновений элементарных частиц, когда-либо достигнутой в экспериментах на ускорителях.

В GSI проведены стендовые испытания прототипных детекторных модулей электромагнитного калориметра EMC с использованием космического излучения и LED-оптической системы со светодиодным источником. Проведены испытания и паспортизация 86 EMC-модулей.

В эксперименте NA61 были исследованы коллективные потоки в столкновениях ядер свинца при импульсах 13 и 30 ГэВ/с на нуклон.

Для установки CBM на сооружаемом ускорительном комплексе ФАИР в ИЯИ РАН было развернуто изготовление и тестирование на космике модулей переднего адронного калориметра фрагментов.

В рамках мегапроекта НИКА продолжалось сотрудничество ИЯИ РАН – ОИЯИ по разработке переднего адронного калориметра фрагментов для установки MPD/NICA. Подготовлен технический проект калориметра, состоящего из 90 индивидуальных модулей.

Выполнен первый в мире успешный эксперимент с активной поляризованной мишенью, разработанной и созданной российскими участниками коллаборации A2 (Майнц, Германия). Высокая эффективность и низкий порог регистрации протонов отдачи в мишени открывают новые возможности в исследовании спиновой структуры протона и получении модельно независимых данных. Поляризация протонов мишени составила $\approx 65\%$, время поддержания поляризации при температуре 45 мК в магнитном поле 0,4 Т около 100 часов. На пучке поляризованных меченых фотонов ускорителя МАМІ измерены поляризационные наблюдаемые в реакциях фоторождения π^0 и π^+ мезонов, а также асимметрия сечения комптоновского рассеяния, позволяющая извлечь модельно независимые данные о спиновых поляризуемостях протона.

Выполнено исследование реакции $\gamma p \rightarrow p\pi^0$ при энергиях фотонов от 425 до 1445 МэВ с использованием поперечно поляризованной протонной мишени и продольно поляризованного пучка. Впервые измерена асимметрия пучок-мишень и получены прецизионные данные для мишенной асимметрии. Новые данные дают информацию о вкладах различных барионных резонансов в сечение фотопоглощения.

Для реакции фоторождения η -мезонов на квазисвободных протонах и нейтронах впервые измерены дважды поляризационная наблюдаемая и спин-зависимые сечения. Измерения проводились на пучке циркулярно поляризованных меченых фотонов ускорителя МАМІ с использованием продольно поляризованной мишени на основе дейтерированного бутанола. Результаты показывают, что узкая структура, ранее наблюдавшаяся в η -фоторождении на нейтроне, проявляется только в сечении, связанным со спиновой амплитудой $1/2$, соответствующей вкладам нуклонных резонансов $N1/2^- (S_{11})$ и $N1/2^+ (P_{11})$. Полученные результаты хорошо согласуются с недавними модельными предсказаниями.

Исследовано фоторождение $\pi\eta$ -пар на квазисвободных нуклонах, связанных в дейтроне, от порога до энергии налетающих фотонов 1,4 ГэВ. Впервые измерены дифференциальные сечения, угловые распределения, распределения инвариантных масс $\pi\eta$ -пар и мезон-нуклонных пар, а также пучковые асимметрии для реакций $\gamma p \rightarrow p\pi^0\eta$, $\gamma p \rightarrow p\pi^+\eta$, $\gamma p \rightarrow p\pi^-\eta$ и $\gamma n \rightarrow n\pi^0\eta$. Чтобы оценить вклады взаимодействия в конечном состоянии, были также изучены соответствующие реакции на протонной мишени и на ^3He . Эксперименты проведены на пучке меченых фотонов ускорителя МАМІ с

использованием 4π - электромагнитного калориметра на основе детекторов Crystal Ball и TAPS. Формы дифференциальных сечений и асимметрии для реакций на протонах и нейтронах очень близки, что согласуется с предположением о доминирующем вкладе в эти реакции цепочки распадов $D_{3/2} > D(1232) > \pi\eta N$. Однако, абсолютные величины сечений из-за эффектов взаимодействия в конечном состоянии подавлены по сравнению с данными для свободных протонов.

Выполнены прецизионные измерения фотонной асимметрии для реакции $\gamma p \rightarrow \pi^0 p$ в диапазоне энергий 320–650 МэВ. Измерения проводились коллаборацией A2 на фотонном пучке ускорителя MAMI. Полученные результаты существенно улучшают существующие мировые данные и хорошо согласуются с предсказаниями моделей MAID, SAID и Бонн-Гатчина. Обнаружено указание на интерференцию между слабыми F -волнами и резонансами $N(1520)3/2^-$ и $N(1535)1/2^-$.

Разработан метод выделения изовекторного электрического квадрупольного гигантского резонанса на фоне превалирующего изовекторного электрического дипольного гигантского резонанса, основанный на измерении асимметрии вперед–назад вылета быстрых нейтронов в реакции (γ, n) на изотопах свинца с помощью пороговых нейтронных детекторов и сцинтилляционных спектрометров. Проведено сравнение имеющихся данных по возбуждению изовекторных электрических квадрупольных ($E2$) резонансов в прямых и обратных реакциях с реальными и виртуальными фотонами.

Совместно с Национальным Исследовательским Ядерным Университетом «МИФИ» проведены работы по изучению изоскалярных монопольных возбуждений в среднетяжёлых ядрах. Получены данные о коэффициентах сжимаемости ядерной материи, существенные для астрофизики и ядерной физики.

В рамках подготовки эксперимента BGO-OD (Bonn – ELSA) по исследованию фотоядерных реакций в области энергий фотонов до 4 ГэВ выполнены прецизионные оценки эффективности регистрации протонов в BGO-калориметре. Проведено моделирование калориметра по программе GEANT-4. Полученные результаты используются при анализе редких событий фоторождения мезонов с большой множественностью.

С помощью моделирования по программам GEANT-4 и LOENT (Low Energy Neutron Transport), разработан источник медленных нейтронов на базе линейного ускорителя ЛУЭ-8 ИЯИ РАН. Источник изготовлен и апробирован на пучке электронов с энергией 8 МэВ; начаты эксперименты по нейтронному активационному анализу. Достигнута чувствительность обнаружения малых примесей на уровне 10^{-6} .

С целью разработки методов получения короткоживущих изотопов на электронных ускорителях проведены расчёты вероятности эмиссии γ -квантов, электронов, позитронов из продуктов фотоядерных реакций $^{14}\text{N}(\gamma, 2n)^{12}\text{N}$ и $^{14}\text{N}(\gamma, 2p)^{12}\text{B}$ при $E_e \sim 50$ МэВ в сравнении с выходом фоновой реакции $^{13}\text{C}(\gamma, p)^{12}\text{B}$. Исследованы возможности получения медицинских радиоизотопов, необходимых для позитронно-эмиссионной томографии и радиотерапии в результате реакций (γ, p) и (γ, pn) . Разработана фотоядерная методика получения и радиохимического извлечения радионуклида ^{67}Cu , получаемого в результате реакции $^{68}\text{Zn}(\gamma, p)$, применяемого в медицине для радиоиммунотерапии. Измерены также выходы $^{69\text{m}}\text{Zn}$ и ^{161}Ho в реакциях $^{71}\text{Ga}(\gamma, pn)^{69\text{m}}\text{Zn}$ и $^{162}\text{Er}(\gamma, p)^{161}\text{Ho}$. Разработан метод обнаружения скрытых взрывчатых веществ на основе фотоядерных реакций $^{14}\text{N}(\gamma, 2n)^{12}\text{N}$, $^{14}\text{N}(\gamma, 2p)^{12}\text{B}$, $^{13}\text{C}(\gamma, p)^{12}\text{B}$ с использованием модельных расчетов по программам TALYS и EMPIRE.

Проведено исследование когерентных эффектов в формировании рентгеновских изображений (совместно с международным лазерным центром МЛЦ МГУ) на базе фемтосекундного лазерного комплекса. Показано, что пространственная когерентность возникает благодаря фокусировке лазерного луча в пятно малого размера (около 10 микрон). Благодаря этому улучшается контраст изображений для объектов с малым градиентом плотности.

В коллаборации GRAAL проведены исследования по физике фотоядерных взаимодействий (ненуклонных степеней свободы). Изучена мультифрагментация ядра ^{12}C при энергии фотонов от 800 до 1500 МэВ. Измерена вероятность полного распада этого ядра на отдельные нуклоны и вероятность образования легких кластеров (дейтерия, трития, гелия) в конечном состоянии. Полученные экспериментальные данные проанализированы в рамках каскадно-испарительной модели, описывающей динамику возбуждений и распадов лёгких ядер.

Совместно с лабораторией атомного ядра ИЯИ РАН разработаны новые методы и создана аппаратура для низкофоновых измерений спектров наведенной активности с использованием германиевых гамма-спектрометров.

Сильные расхождения между теорией и экспериментом, обнаруженные в pn и pd взаимодействиях, указывают на необходимость продолжения исследования механизмов различных процессов в малонуклонных системах. Для исследования pn и pp корреляций в малонуклонных системах разработана программа экспериментов по исследованию реакций $d + ^2\text{H} \rightarrow ^2\text{He} + (nn)$, $n + ^3\text{H} \rightarrow ^2\text{H} + (nn)$ и $n + ^2\text{H} \rightarrow p + (nn)$. Проведенное моделирование реакций позволило сформулировать методику определения энергия

виртуального 1S_0 состояния по форме энергетического (времяпролётного) спектра нейтрона от развала этого состояния в определенной кинематике и в совпадении с заряженной частицей (^2He , ^2H или p). Согласно этой методике была создана экспериментальная установка в НИИЯФ МГУ. На пучке 15 МэВ дейтронов циклотрона У-120 НИИЯФ МГУ исследована реакция $d + ^2\text{H} \rightarrow ^2n^S + ^2p^S \rightarrow n + n + p + p$, идущая через образование в промежуточном состоянии синглетных пар – динейтрона ($^2n^S$) и дипротона ($^2p^S$). Впервые, в кинематически полном эксперименте получено значение энергии виртуального синглетного 1S_0 состояния 2n -системы 0.076 ± 0.06 МэВ, которая соответствует значению синглетной длины nn -рассеяния $a_{nn} = -22.2 \pm 0.6$ фм, и сделать вывод о заметном неучтенном вкладе $3N$ -сил и о малой величине параметра нарушения зарядовой симметрии ядерных сил.

Проведено кинематическое моделирование реакций подхвата альфа-кора из ядра ^6He или ^6Li – $^6\text{He} + ^2\text{H} \rightarrow ^6\text{Li} + (nn)$ и $^6\text{Li} + ^2\text{H} \rightarrow ^6\text{Li} + (np)$ с регистрацией как заряженной частицы ^6Li так и нейтрона от развала синглетного nn (np) 1S_0 состояния. Показана возможность получения информации об энергии синглетных двухнуклонных состояний, исследуя форму энергетического спектра нейтронов от распада этих состояний. Продемонстрировано хорошее описание дифференциальных сечений и распределений по продольным импульсам нуклонов с помощью полученных аналитических выражений.

Проведено исследование взаимодействия нейтронов малых энергий с ядрами с возбуждением коллективных степеней свободы. Успешное описание нейтронных данных для большого количества чётно-нечётных изотопов позволяет распространить данный метод на область нейтронных данных в $A \sim 100$ с целью уточнения параметров квадрупольной деформации.

Полученные результаты находятся на уровне лучших мировых или превышают их и представляют собой существенное продвижение в фундаментальных исследованиях природных явлений.

СОДЕРЖАНИЕ

Реферат	3
Введение	10
Основные результаты	11
1 Отдел экспериментальной физики	11
2 Лаборатория фотоядерных реакций	75
3 Лаборатория атомного ядра	86
Заключение	115

ВВЕДЕНИЕ

Выполнялись работы по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, пункт 15. Современные проблемы ядерной физики, в том числе физики элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий, включая физику нейтрино и астрофизические и космологические аспекты, а также физики атомного ядра, физики ускорителей заряженных частиц и детекторов, создание интенсивных источников нейтронов, мюонов, синхротронного излучения и их применения в науке, технологиях и медицине.

Работы проводились в следующих направлениях:

поиск и исследование новых физических явлений в области энергий до нескольких ТэВ, новых элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий в экспериментах на Большом адронном коллайдере;

построение на этой основе теории, существенно расширяющей современную теорию элементарных частиц;

поиск и исследование редких процессов с участием элементарных частиц на протонных и вторичных (пионных, каонных, мюонных) пучках высокой интенсивности в целях открытия новых явлений, происходящих на сверхмалых расстояниях;

создание новых и развитие существующих методов регистрации частиц и излучений для будущих экспериментов в области физики элементарных частиц;

исследование механизмов образования и распада сверхплотной ядерной материи в столкновениях релятивистских ионов, изучение свойств адронов, кварков и глюонов и сверхплотной ядерной среды;

прецизионное исследование электромагнитных взаимодействий нуклонов и ядер;

исследование свойств адронов в ядерной среде, изучение их связанных состояний (мезонные ядра, дельта-ядра, гиперядра);

исследование структуры ядер и механизмов фрагментации в процессах столкновений релятивистских ядер и в электромагнитных реакциях;

исследование свойств адронов и механизмов реакций с их участием при промежуточных (до нескольких ГэВ) энергиях, поиски экзотических состояний, в том числе дибарионов, пентакварков и других;

исследование свойств ядерных изомеров и возможностей высвобождения запасенной в них энергии;

получение прецизионных данных по рассеянию и реакциям с участием протонов, нейтронов, гамма-квантов, легких и делящихся ядер, спектрам нейтронов деления и других данных, необходимых для ядерной энергетики и других приложений.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1 Лаборатория релятивистской ядерной физики. Физика атомного ядра,

релятивистская ядерная физика

Научный руководитель, заведующий Лабораторией релятивистской ядерной физики, доктор физ.-мат. наук, профессор А.Б.Курепин

Исполнители темы:

Ведущий научный сотрудник канд. физ.-мат наук Т.Л.Каравичева

Ведущий научный сотрудник канд. физ.-мат наук Ф.Ф.Губер

Старший научный сотрудник канд. физ.-мат наук А.И.Решетин

Ведущий научный сотрудник д-р физ.-мат наук И.А.Пшеничников

Старший научный сотрудник канд. физ.-мат наук Н.С.Топильская

Старший научный сотрудник канд. физ.-мат наук А.П.Ивашкин

Старший научный сотрудник канд. физ.-мат наук А.С.Садовский

Заведующий сектором канд. физ.-мат наук Д.В.Серебряков

Зам. директора Института, Зав. отделом О.В.Каравичев

Заведующий сектором А.В.Веселовский

Ведущий инженер И.В.Морозов

Ведущий инженер Н.А.Курепин

Научный сотрудник А.И.Маевская

Научный сотрудник М.Б.Голубева

Младший научный сотрудник О.В.Андреева

Младший научный сотрудник С.В.Морозов

Младший научный сотрудник О.А.Петухов

Младший научный сотрудник Е.В.Карпечев

Младший научный сотрудник А.А.Тихонов

Младший научный сотрудник А.Н.Курепин

Ведущий инженер Н.А.Курепин

Стажер-исследователь А.С. Коневских

Стажер-исследователь Д.А.Финогеев

Стажер-исследователь А.А.Фурс

Стажер-исследователь А.И.Шабанов

Техник С.К.Попов

Студентка МФТИ У.А.Дмитриева

1 ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

CERN (ЦЕРН) – Европейская организация ядерных исследований, г. Женева, Швейцария

LHC (БАК) - Большой адронный коллайдер - ускоритель в ЦЕРНе;

SPS – Супер-протонный синхротрон, кольцевой ускоритель в ЦЕРНе;

ALICE (*A Large Ion Collision Experiment*), АЛИСА – один из международных мегаэкспериментов на БАК, в основном ориентированный на изучение взаимодействий тяжелых ионов;

HADES (ХАДЕС) – эксперимент на ускорителе в ГСИ, г. Дармштадт, Германия;

CBM – планируемый эксперимент на строящемся ускорителе в ГСИ, Дармштадт, Германия;

NA61/SHINE - SPS Heavy Ion and Neutrino Experiment - эксперимент на ускорителе SPS;

NICA (НИКА) – ускоритель, коллайдер встречных пучков, строящийся в г. Дубна, Россия;

MPD – Multi-Purpose Detector- многоцелевой детектор на ускорителе НИКА;

AliRoot - Программа для детального моделирования процессов рождения и регистрации частиц, а также для анализа данных с установки АЛИСА;

FEE – Front-End-Electronics - детекторная электроника;

FPGA – Field Programmed Grid Array - программируемая логическая интегральная схема;

ФЭУ – фотоэлектронный умножитель;

MAPD- микропиксельный лавинный фотодиод;

DAQ – система сбора экспериментальных данных;

ADC – цифро-аналоговый преобразователь;

DCS (*Detector Control System*) – система управления детектором;

DQM (*Data Quality Monitoring*) – система контроля качества набранных данных;

minimum bias – набор всех событий, без каких-либо ограничений.

MIP – (*Minimum Ionizing Particle*) - минимально ионизирующая релятивистских частица.

PYTHIA – генератор взаимодействий элементарных частиц.

RHIC – коллайдер релятивистских тяжелых ионов национальной лаборатории в Брукхэйвене, США

T0 – детекторное устройство, стартовый триггерный детектор

V0- детекторное устройство, передний триггерный детектор

FMD (*Forward Multiplicity Detector*) – Фронтальный детектор множественности

ФИТ (*Forward Interaction Trigger*) - Фронтальный Интеллектуальный Триггер, детекторное устройство ФИТ

ZDC (*zero degree calorimeter*) – калориметр под нулевым углом

TOF(time-of-flight) – времяпролётный детектор

BC- (Bunch Crossing) - синхросигнал ускорителя

eV (эВ) - электронвольт - единица энергии, равная энергии, получаемой электроном при ускорении в электростатическом поле, когда разность потенциалов между двумя позициями частицы составляет один вольт;

TeV (ТэВ) – тераэлектронвольт - единица энергии, равная 10^{12} эВ;

mV (мВ) – милливольт - единица измерения амплитуды электрического сигнала, равная 10^{-3} вольта;

ns (нс) – наносекунда – 10^{-9} секунды;

ps (пс) – пикосекунда – 10^{-12} секунды;

fm (фм) – фемтометр - единица длины в ядерной физике равная 10^{-15} метра

1.1 Исследование ядро–ядерных столкновений на установке ALICE на встречных пучках ускорителя LHC (CERN), - эксперимент ALICE

1.1 РЕФЕРАТ

Представлены результаты, полученные в 2016 году в ходе решения сотрудниками Лаборатории совокупности научных задач по изучению протон-протонных, протон-ядерных и ядро-ядерных столкновений при ультрарелятивистских энергиях на БАК, включая возбуждения и фрагментацию ядер под действием виртуальных фотонов в ультрапериферических взаимодействиях ядер. Описываются выполненные в 2016 г. сотрудниками Лаборатории работы по детекторным системам T0 и ФИТ, которые обеспечили полноправное участие российских учёных из ИЯИ как в текущей физической программе эксперимента АЛИСА в 2016 году, так и возможность участвовать в модернизации его детекторных систем, планируемых к использованию в последующие годы. В частности, в комплексе детекторов установки ALICE важнейшую роль играет стартовый времяпролетный и триггерный детектор T0. Детектор располагается вблизи точки столкновения ускоряемых БАК протонов или ядер и обеспечивает проведение измерений множественности рожденных частиц, мониторинг светимости БАК, определение момента столкновений первичных частиц для вычисления времени пролета рожденных частиц, диагностику пучка и формирование триггерных сигналов. Кроме этого T0 участвует в определении плоскости реакции, величины эллиптического потока рождающихся в результате столкновений частиц.

1.1 ВВЕДЕНИЕ

В настоящем разделе представлены результаты 2016 года, полученные в ходе реализации долгосрочной программы экспериментальных исследований в рамках мегапроекта АЛИСА на пучках БАК. Рамки участия российских институтов, включая ИЯИ РАН, в реализации научной программы Большого Адронного Коллайдера установлены «ПРОТОКОЛОМ ОБ УЧАСТИИ В РЕАЛИЗАЦИИ ПРОГРАММЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ (БАК)» (Распоряжение Правительства РФ от 18 декабря 2003 г. № 1871-р) к «СОГЛАШЕНИЮ между ПРАВИТЕЛЬСТВОМ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ и ЕВРОПЕЙСКОЙ ОРГАНИЗАЦИЕЙ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ (ЦЕРН) о ДАЛЬНЕЙШЕМ РАЗВИТИИ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО СОТРУДНИЧЕСТВА В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ» от 30 октября 1993 г. (Постановление Правительства Российской Федерации от 12 октября 1993 г. № 1040).

В настоящем отчёте представлены физические результаты исследований протон-протонных и протон-ядерных столкновений на пучках БАК, полученные в мегаэксперименте АЛИСА при активном участии сотрудников ИЯИ РАН. Также представлены результаты проведённых в 2016 г. работ по детекторным системам T0 и ФИТ, которые относятся к зоне ответственности ИЯИ РАН. Успешное выполнение этих работ обеспечило полноправное участие российских учёных в текущей программе эксперимента АЛИСА и дало возможность участвовать в модернизации детекторных систем этого эксперимента.

В комплексе детекторов установки ALICE важную роль играет стартовый времяпролётный и триггерный детектор T0. Детектор располагается вблизи номинальной точки столкновения релятивистских ионов и обеспечивает проведение измерений множественности рожденных частиц, мониторинг и определение светимости БАК, измерение момента столкновений пучков для вычисления времени пролета рожденных заряженных частиц, диагностику пучка и формирование триггерных сигналов LM уровня (нулевого уровня минус 1).

Используя пучки БАК с уменьшенной энергией на фиксированной мишени, можно получить данные в диапазоне энергий 30-100 ГэВ. Поиск эффектов фазового перехода и определение критической точки является основной целью энергетического скана. Более того, это дает возможность исследовать рождение чармония, J/ψ , $\psi(2S)$, χ , на нескольких ядерных мишенях, разделить механизмы жесткого рождения и затем подавления в результате адронной диссоциации в кварк-глюонной плазме от механизма вторичного рождения чармония в результате рекомбинации очарованных кварка и антикварка, т.к. вероятность рекомбинации сильно падает с уменьшением энергии. В отчете рассмотрены возможности использовать пучки БАК для взаимодействия с фиксированной мишенью.

Рассмотрены электромагнитные возбуждения дискретных уровней ядер свинца в их ультрапериферических взаимодействиях на БАК с последующим излучением ими фотонов и переходом в основное состояние. Данный процесс можно отнести к разновидности ядерной резонансной флуоресценции (ЯРФ). В 2016 году дополнительно исследовались каналы эмиссии протонов вместе с нейтронами и чисто протонные каналы электромагнитной диссоциации. Данные по эмиссии протонов необходимы для уточнения сечений электромагнитной диссоциации, на которые опирается метод мониторинга светимости БАК для Pb-Pb столкновений.

1.1.1 Работы по техническому обслуживанию и экспертному сопровождению детектора T0.

Одной из важнейших подсистем триггерной системы супердетектора ALICE является детектор T0. Группа сотрудников ИЯИ РАН совместно коллегами из МИФИ и

КИ приняла участие в разработке, изготовлении и вводе в строй этого детектора. Анализ работы детектора T0 в 2016 году показал, что основные параметры детектора T0 соответствуют техническим требованиям. Вместе с тем были выявлены факторы, оказывающие влияние на результаты измерений. Во время технической остановки ускорителя зимой 2015-2016 гг. была проведена модернизация лазерной системы и быстрой электроники T0.

Испытания лазерной системы проводились с целью выявления причин общей тенденции к падению амплитуд сигналов от лазерной системы в детекторах T0-A и T0-C в ходе физических измерений в 2015 году. Оптические кабели лазерной системы для каждого элемента детектора T0 состоят из короткого (1,5 м) и длинного кабелей (около 40 м). Результаты исследований показали, что падение трансмиссии света в коротких кабелях является результатом радиационных повреждений коротких оптических кабелей в результате их эксплуатации в жёстких радиационных условиях эксперимента ALICE. Поэтому в феврале 2016 года были изготовлены новые короткие оптические кабели и проведена их установка без демонтажа детектора T0-A, что повлияло на прокладку этих кабелей внутри защитного корпуса детектора T0 (см. рис. 1.1.1 и рис. 1.1.2).

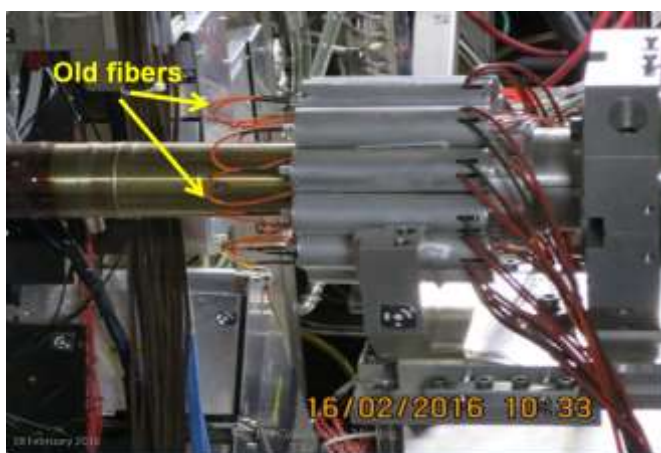


Рисунок 1.1.1 - Детектор T0-A (без защитного корпуса) со старыми короткими оптическими кабелями



Рисунок 1.1.2 - Детектор T0-A с новыми короткими оптическими кабелями

К сожалению, аналогичная замена коротких кабелей для детектора T0-C невозможна, так как с 2007 года нет доступа к этому детектору.

В конце 2015 года было завершено производство нового модуля управления лазером и разветвителя сигналов синхронизации в стандарте VME (Laser Control and Clock Distribution VME Module (LCC) (рис. 1.1.3). Этот модуль заменил три модуля быстрой электроники детектора T0, таких как GRPG (gate and pulse distribution module), CDM (clock distribution) и модуль управляемой задержки (Delay). Модуль был успешно интегрирован в быструю электронику детектора T0 в феврале 2016 года. Использование этого модуля позволяет работать на частоте 40 МГц, генерировать сигнал запуска системы лазерной калибровки по калибровочному триггеру от центральной триггерной системы (СТР), разветвлять синхросигнал, формировать ворота различной длительности для модулей измерения амплитуды сигналов, осуществлять задержку выходных сигналов с шагом 25 пс.



Рисунок 1.1.3 - Модуль управления лазером и разветвитель сигнала синхронизации в стандарте VME (LCC)

Ввод в эксплуатацию на ALICE нового быстрого уровня триггера LM центрального триггерного процессора (СТР) требует прихода сигналов от триггерных детекторов в СТР не позднее 450 нс после столкновения. Короткое время прихода сигнала позволяет использовать триггерные решения СТР в качестве пре-триггера для детектора переходного излучения (TRD). Использование модуля LCC и перенос электроники основных триггерных детекторов V0 и T0 вплотную к СТР позволило сократить время выработки триггерных сигналов и достичь требуемой задержки прихода сигнала не более чем на 450 нс после столкновения.

В 2016 году в эксперименте ALICE проводились сеансы физических измерений на пучках сталкивающихся протонов и столкновений протонов с ядрами свинца. T0 детектор принимал 100% участие (рис. 1.1.4) во всех сеансах. Работы по модернизации, устранению неполадок, поддержанию работоспособности, обеспечению безаварийного процесса измерений и получения экспериментальных данных с детектора T0 были выполнены практически полностью сотрудниками ИЯИ и МИФИ.

1.1.2 Определение момента столкновения пучков для времяпролётной системы с использованием детектора T0

Существенным преимуществом супердетектора АЛИСА в сравнении с другими экспериментами является возможность идентифицировать рождающиеся в столкновениях протонов и ядер частицы с использованием различных технологий. Благодаря этому коллаборацией АЛИСА собран большой массив уникальных экспериментальных данных, в частности, изучено рождение резонансов ϕ , $K^*(892)^0$, Δ^{++} и $\Lambda(1520)$, легких антиядер и др. Идентификация заряженных частиц, являющихся продуктами распада указанных резонансов, осуществляется комбинированным способом с помощью совокупности детекторов, которая включает в себя: систему внутреннего трекинга ITS, время-проекционную камеру ТРС, детектор переходного излучения TRD, время-пролётный детектор TOF совместно с детектором T0. Идентификация частиц в промежуточном интервале поперечного импульса (от 0.5 до 4 GeV/c) выполняется с использованием время-пролётной системы. Важной компонентой этого анализа является точное определение момента столкновения пучков, которое может определяться детектором T0 (t_{ev}^{T0}), самим детектором TOF (t_{ev}^{TOF}), или считаться равным нулю (t_{ev}^{fill}) если в событии отсутствуют данные с обоих детекторов. На рис. 1.1.2.1 показано влияние способа определения момента взаимодействия детектором T0, TOF и без его определения на разделение каонов и пионов в интервале их поперечных импульсов от 0.5 до 5 GeV/c.

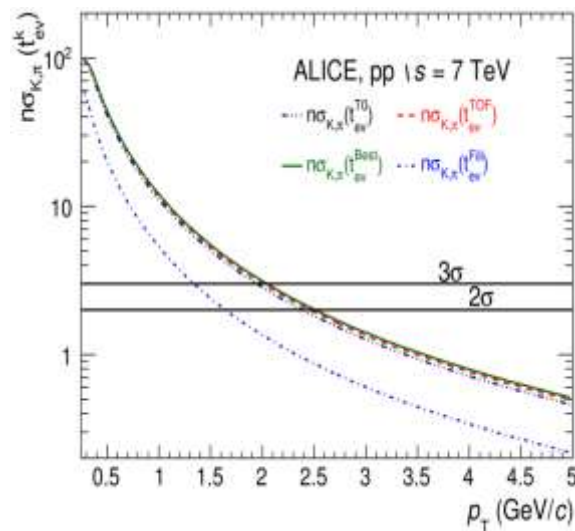


Рисунок 1.1.2.1 - Разделение каонов и пионов в зависимости от поперечного импульса

Для обеспечения стабильной идентификации частиц с использованием время-пролётной системы необходимо контролировать разрешение и момент столкновения пучков при наборе физических данных. В связи с конструкционной особенностью детектора T0, зависимость временного измерения не является постоянной по отношению к

зарядовому измерению. Поэтому для улучшения временного разрешения детектора необходимо проводить амплитудно-временную коррекцию. Для выполнения такой коррекции рассчитывается зависимость времени срабатывания отдельного элемента детектора от амплитуды исходного сигнала по физическим данным. Вычисление псевдо-непрерывной функции этой зависимости обеспечивает пересчет времени срабатывания модуля с поправкой на амплитуду аналогового сигнала. В 2016 году была проведена процедура по поиску зависимости временных измерений от амплитудных для p-Pb столкновений. На рисунке 1.2.2 представлена зависимость временных измерений от амплитудных для одного из каналов детектора T0-A до и после коррекции.

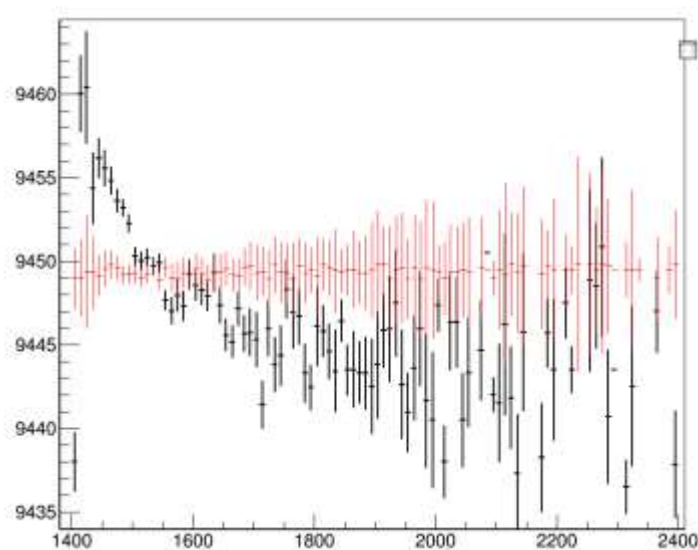


Рисунок 1.1.2.2 - Зависимость временных измерений (по оси ординат, в каналах; 1 канал = 25 пс) от амплитудных (по оси абсцисс) для данных до коррекции (обозначено черным) и после (красным)

Благодаря выполненной коррекции (калибровке) появилась возможность определять момент взаимодействия пучков с точностью до 45 пс (рис. 1.1.2.3) .

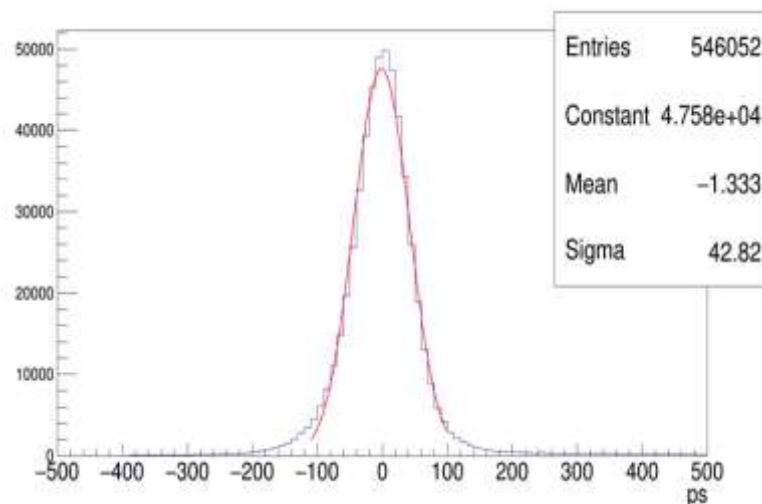


Рисунок 1.1.2.3 - Временное разрешение детектора T0 при столкновениях p-Pb при энергии в системе центра масс $\sqrt{s} = 8.02$ TeV

Таким образом, в течение всего 2016 года разрешение определения момента столкновений не превышало 45 пс как для протонных, так и для протон-ядерных взаимодействий. На рис 1.2.4 показан тренд разрешения момента столкновений, а на рис 1.2.5 — тренд времени столкновений после реконструкции событий для протон-протонных столкновений. Эти тренды публикуются на странице контроля качества данных в конце каждого цикла реконструкции. Видно, что разрешение колеблется от ране к рану от 43 пс до 46 пс и определение момента столкновений с использованием данных с одного из детекторов (T0A/T0C) или с участием обоих детекторов центрированы вокруг нуля в пределах 10 пс.



Рисунок 1.1.2.4. - Тренд временного разрешение детектора T0 для протон-протонных столкновений при энергиях в системе центра масс $\sqrt{s} = 13$ TeV в зависимости от рана

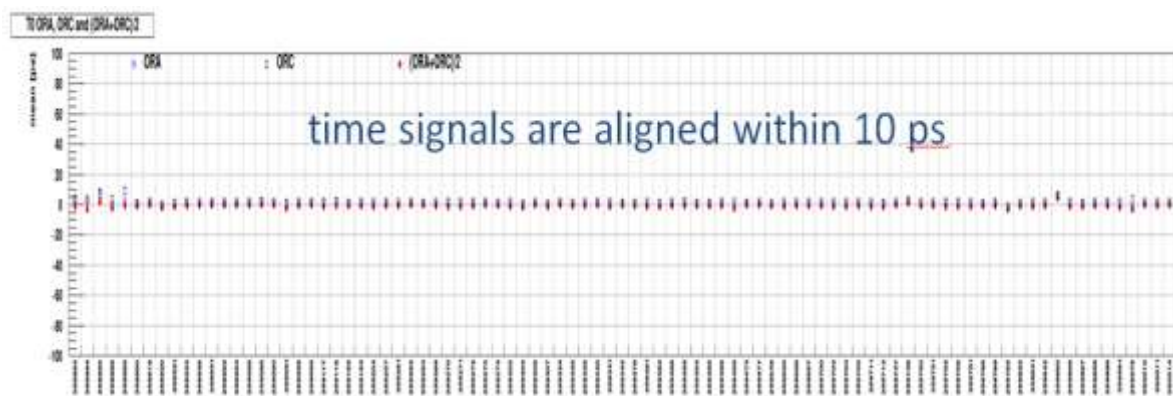


Рисунок 1.1.2.5 - Тренд момента времени столкновений для протон-протонных столкновений при энергиях в системе центра масс $\sqrt{s} = 13$ TeV в зависимости от рана.

Важным фактором, влияющим на определение момента столкновений и эффективность триггерного сигнала 0TVX, является стабильность синхросигнала ускорителя BC (Bunch Crossing). Оптический сигнал BC проходит несколько километров по волокну, проложенному вдоль тоннеля ускорителя. Поэтому в зависимости от температуры среды, смещение времени прихода сигнала может достигать сотни пикосекунд. Измерение среднего значения полусуммы времен срабатывания модулей CFD (дискриминатор со следящим порогом), расположенных по разные стороны точки взаимодействия, позволяет измерить указанное смещение синхросигнала по времени. Для постоянного контроля стабильности сигнала BC в систему мониторинга детектора T0 был

добавлен тренд для этого сигнала (рис 1.1.2.6). Желтая и красная линии показывают дежурному оператору границы безопасного отклонения сигнала от его среднего значения.

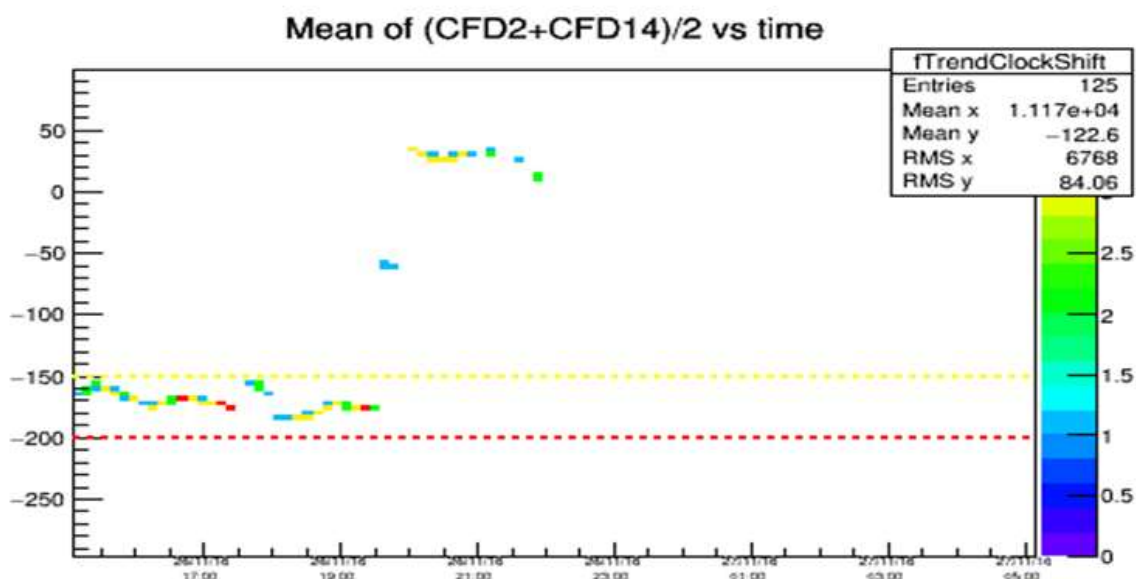


Рисунок 1.1.2.6 - Тренд смещения синхросигнала ВС в течение вывода пучка под номером 5521

Для постоянного контроля параметров детектора разработана система автоматической публикации в интернете трендов данных детектора T0 как функции номеров измерений (ранов), которая доступна по адресу <http://aliquat0.web.cern.ch/aliquat0/data/2016/>.

1.1.3 Физические результаты, полученные с помощью детекторов T0, V0 и AD

1.1.3.1 Определение светимости

Для экспериментального определения светимости и абсолютных значений сечений физических процессов используют опорные сечения, измеренные ранее, в том числе в других экспериментах. Однако для рекордных энергий, при которых проводится эксперимент ALICE, измеренных сечений нет, поэтому возникает необходимость использования триггерных сечений. Триггерные сечения вычисляются при помощи метода Ван дер Меера, где интенсивность счета триггерных сигналов с различных детекторов измеряется как функция относительного смещения встречных пучков БАК друг относительно друга. Светимость на ALICE может измеряться передними детекторами: V0, T0 и ZDC. Во время фазы запуска LHC, для того чтобы оценить качество пучка, V0 и T0 используются для оценки светимости. Начиная с 2012 года основным люминометром эксперимента АЛИСЕ является детектор T0. В качестве основного сигнала для оценки светимости использовался триггерный сигнал 0TVX (в сеансах 2016 года сигнал генерируется, если вершина столкновения находится в пределах ± 20 см). Знание видимого (триггерного) сечения позволяет в режиме реального времени определять светимость. Использование триггерного сечения детектора T0 требует стабильной работы детектора. Для этих целей проводилось исследование старения фотоумножителей T0 на основе данных 2015 и 2016 гг. Из рис. 1.3.1 видно, что существенного изменения со временем амплитуд сигналов с фотоумножителей детектора T0 не наблюдается.

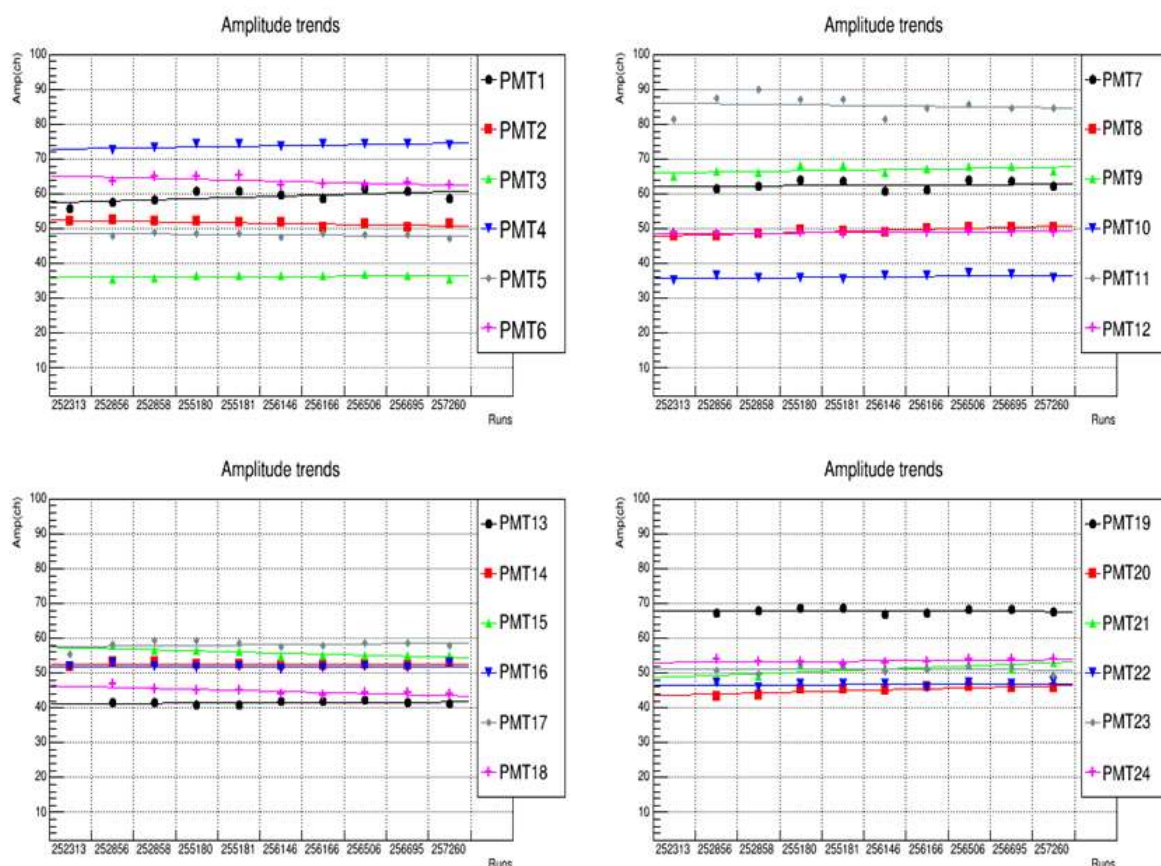


Рисунок 1.1.3.1 - Тренды амплитуд для каждого фотоумножителя (PMT1-PMT24) детектора T0 для данных 2016 года

В мае 2016 года на установке ALICE проведено сканирование по методу Ван дер Меера для p-p столкновений при энергии $\sqrt{s} = 13$ TeV с использованием передних детекторов T0, V0 и AD. В ноябре проведены сканирования по методу Ван дер Меера для p-Pb и Pb-p столкновений при энергии $\sqrt{s} = 8$ TeV (рис. 1.1.3.2). В настоящее время ведется работа по анализу этих данных. Во втором квартале завершен анализ данных по определению видимых сечений для p-p столкновений с энергиями в системе центра масс 13 ТэВ и 5 ТэВ, на основе данных, полученных во время сканирования методом Ван дер Мера в августе и ноябре 2015 года. Анализ показал, что значения видимых сечений детектора T0 согласуются с данными симуляции и равняются 30.1 ± 0.6 мб при энергии 13 ТэВ и 21.6 ± 0.4 мб при энергии 5 ТэВ (рис.1.1.3.3).

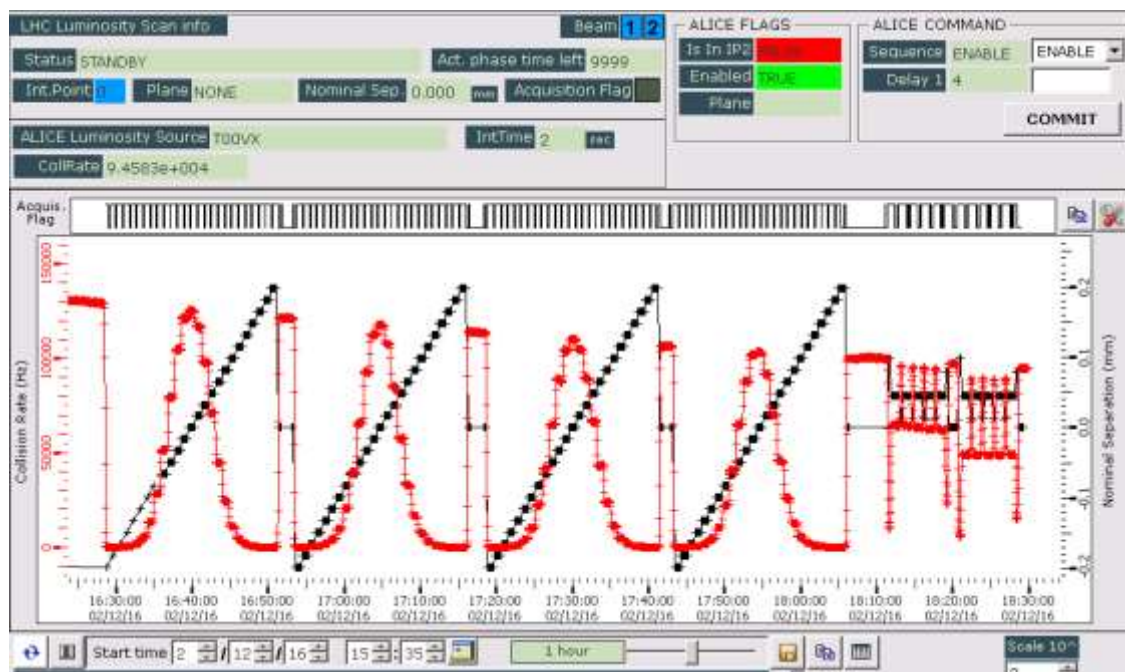


Рисунок 1.1.3.2 Интенсивность счета триггерного сигнала 0TVX (красный цвет) как функция относительного смещения пучков друг относительно друга

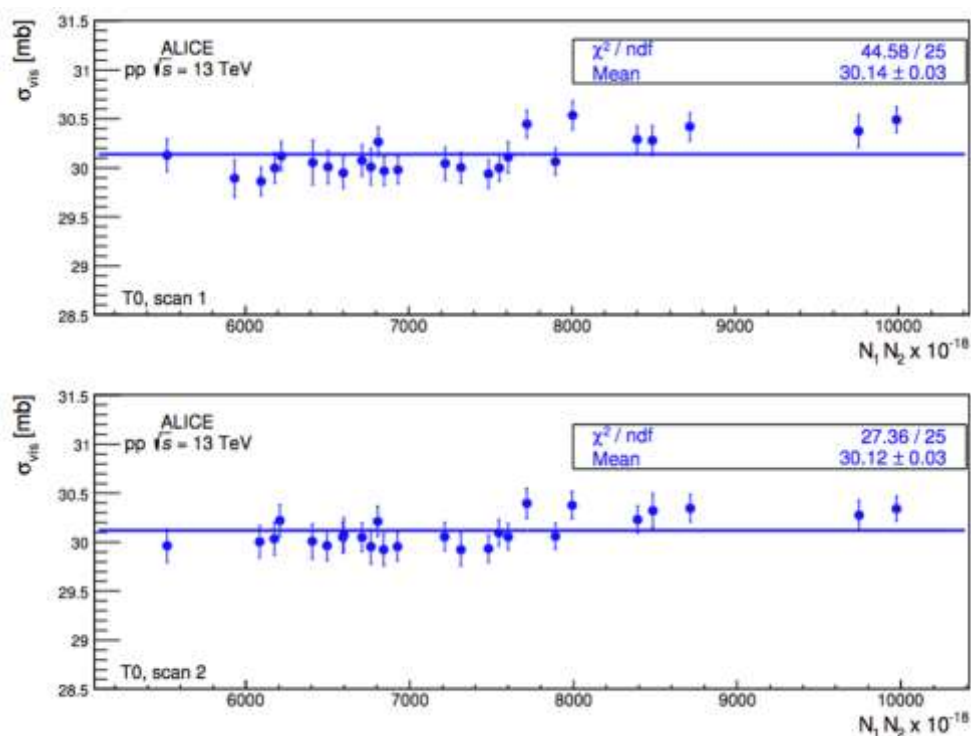


Рисунок 1.1.3.3 - Видимое сечение детектора T0 измеренное во время первого (сверху) и второго (снизу) сканирования методом Ван дер Мера, как функция от произведения интенсивностей (умноженных на 10^{-18} для нормировки) двух пересекающихся банчей для p-p столкновений при энергии $\sqrt{s} = 13$ TeV

В таблице 1.1.3.1 приведены величины триггерных сечений для p-p, p-Pb, Pb-p и Pb-Pb столкновений при различных энергиях за период с 2011 по 2016 годы. Для сканирований, проведенных в июле и ноябре 2012 года, декабре 2015 и мае 2016 года, приведены предварительные результаты, так как анализ данных еще не завершен.

Таблица 1.1.3.1 - Триггерные сечения детекторов T0, V0 и AD, полученные во время сеансов сканирования методом ван дер Меера в 2011-2016 г.г.

Дата	Тип пучка	$\sqrt{s}$, ТэВ	Детектор	Триггерное сечение	Статьи
12.2011	Pb-Pb	2.76	V0	4.10 b	https://arxiv.org/pdf/1305.7044v1.pdf
17.07.2012	p-p	8	T0	25.24 ± 0.01 mb	Предварительно
			V0	55.17 ± 0.03 mb	
24.11.2012	p-p	8	T0	$24,9547 \pm 0,2096$ mb	Предварительно
			V0	$55,7409 \pm 0,4601$ mb	
29.01.2013	p-Pb	5.02	T0	1.59 ± 0.06 b	https://arxiv.org/pdf/1405.1849.pdf
			V0	2.09 ± 0.07 b	
07.02.2013	Pb-p	5.02	T0	1.59 ± 0.05 b	
			V0	2.12 ± 0.07 b	
26.08.2015	p-p	13	T0	30.1 ± 0.6 mb	https://cds.cern.ch/record/2160174
			V0	57.8 ± 1.2 mb	
19-20.11.2015	p-p	5	T0	21.6 ± 0.4 mb	https://cds.cern.ch/record/2202638
			V0	51.2 ± 1.2 mb	
3-4.12.2015	Pb-Pb	5.02	V0	4.44 b	Предварительно
17.05.2016	p-p	13	T0	29.87 mb	Предварительно
			V0	59.01 mb	
			AD	50.76 mb	

1.1.3.2 Определение эллиптического потока заряженных частиц методом плоскости событий

Одним из важнейших параметров для анализа состояния ядерной материи в момент столкновения тяжелых ядер при высоких энергиях, является эллиптический поток. Эллиптический поток представляет собой вторую гармонику в разложении Фурье

азимутального распределения частиц. Эта гармоника позволяет исследовать динамику асимутального коллективного поведения частиц в зоне перекрытия, которая образуется при столкновении пучков. Из-за геометрии зоны перекрытия, вторая гармоника носит название эллиптического потока. Существует несколько методик для расчета потоков. В данном анализе для расчета потока используется метод плоскости событий.

В методе плоскости событий вводится понятие Q-вектора n-гармоники потока для каждого события.

Q-вектор n-гармоники: $\vec{Q}_n = (\sum w_i \cos(n\phi_i), \sum w_i \sin(n\phi_i)) = Q_n (\cos(n\Psi_n), \sin(n\Psi_n))$, где ϕ_i – асимутальный угол i-частицы, w_i – вес. Для эллиптического потока $n=2$. Расчет Q-вектора проводится для каждого субдетектора установки АЛИСА индивидуально. Особо стоит отметить, что при вычислении Q-вектора, необходимо задать вес w в виде модуля вектора асимутального направления для каждой частицы, в виду специфики каждого субдетектора. Для трековых субдетекторов, в частности ТРС, вес принят равным 1. Для субдетекторов, в частности T0 и V0, где множественность измеряется через амплитуды сигнала, который вырабатывается при попадании частиц в элементарную ячейку субдетектора, в качестве веса принимается амплитуда. Из-за ограниченного акспетанса и специфики каждого субдетектора, необходимо проводить калибровку Q-вектора и коррекцию эллиптического потока через разрешение плоскости события. Для вычисления разрешения плоскости события на конкретном субдетекторе, используется особый метод, под названием “метод трех подсобытий”. Данный метод заключается в использовании корреляций между Q-векторами конкретного детектора и еще двух вспомогательных детекторов. Все три субдетектора при этом должны покрывать разные диапазоны по акспетансу. Усредненный по всем событиям Q-вектор позволяет оценить поток. Ключевыми параметрами, влияющими на Q-вектор, является геометрия зоны перекрытия пучков, или центральность взаимодействия.

В связи с будущей модернизацией детектора T0, возникла необходимость в создании отдельного ПО для оценки эллиптического потока на новом детекторе ФИТ. На протяжении 2015 года проводилась разработка данного ПО. Для проверки корректности работы ПО, проводился повторных анализ данных по сеансам Pb-Pb столкновений при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV. Положительный результат данной проверки позволил перейти к обработке новых данных посредством данного ПО. В ходе анализа параметр центральности определялся по субдетектору V0.

В течение 2016 года проводился анализ эллиптического потока и его параметров, методом плоскости событий по данным, собранным в ходе сеансов Pb-Pb столкновений при

энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. Основная задача при вычислении эллиптического потока заключалась в определении плоскости событий, калибровки каналов детектора T0 и коррекции Q-вектора потока для T0-A и T0-C, рис. 1.1.3.4 и рис. 1.1.3.5, соответственно.

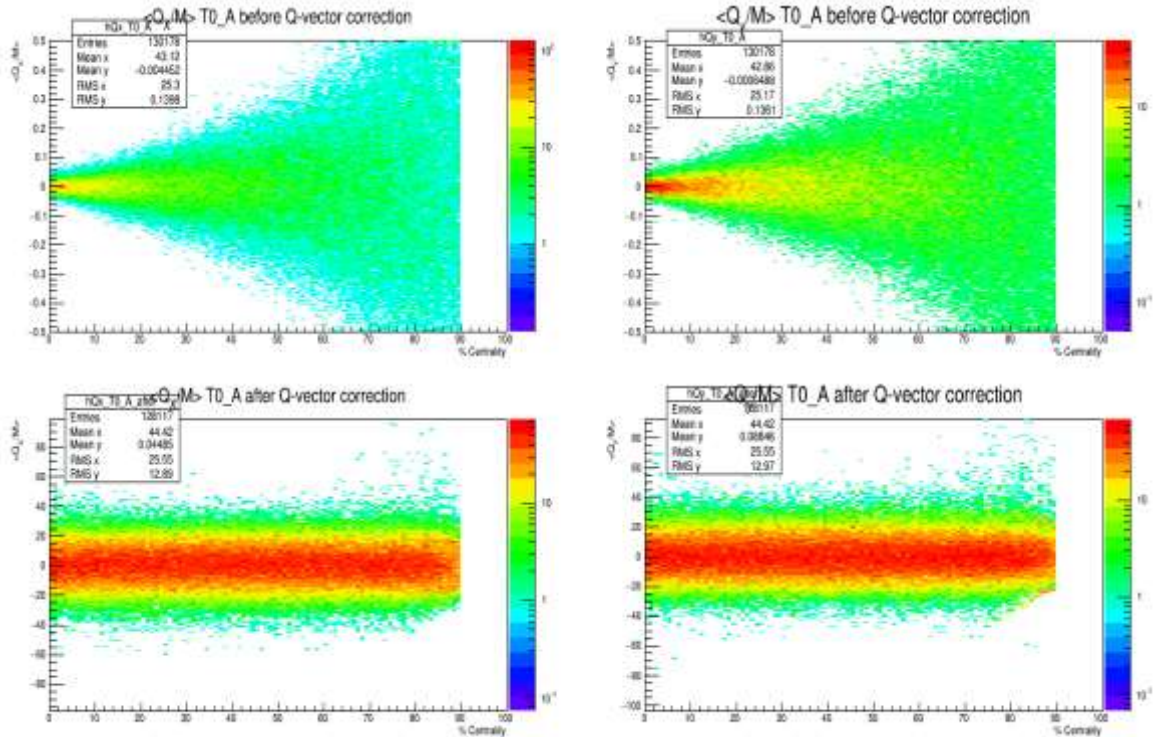


Рисунок 1.1.3.4 - Измерения Q-вектора на T0-A, до и после корректировки

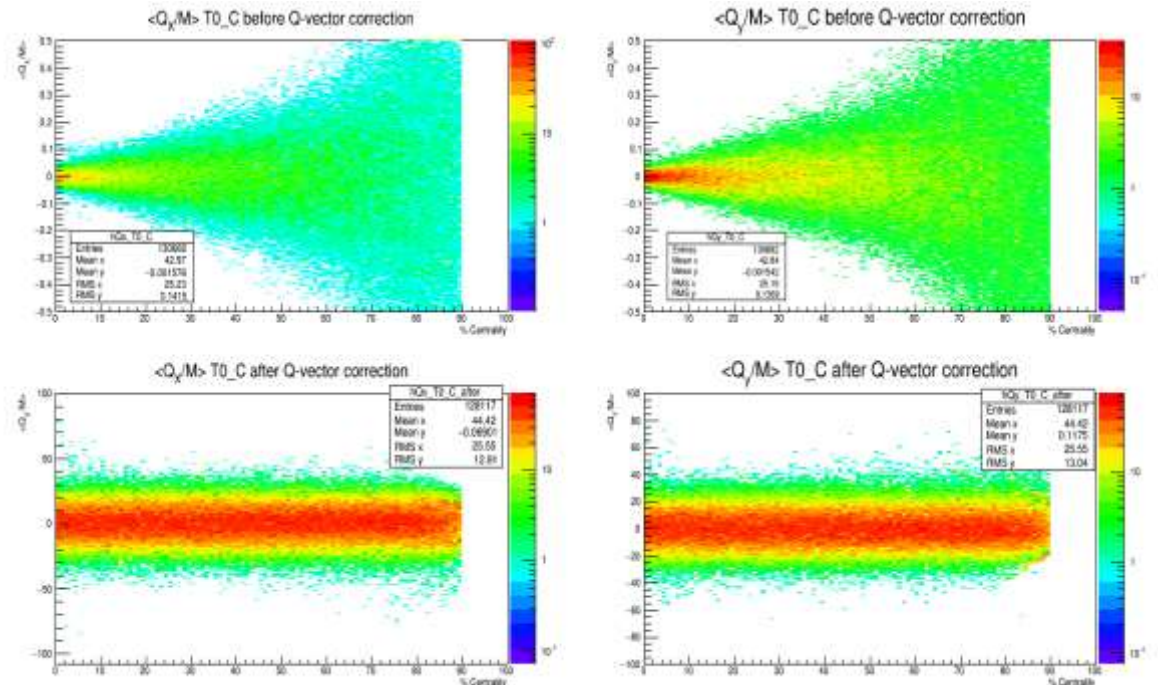


Рисунок 1.1.3.5 - Измерения Q-вектора на T0-C, до и после корректировки

На рис. 1.1.3.6 представлены результаты по определению разрешения плоскости реакции основных детекторов АЛИСА, которые используются для ее определения.

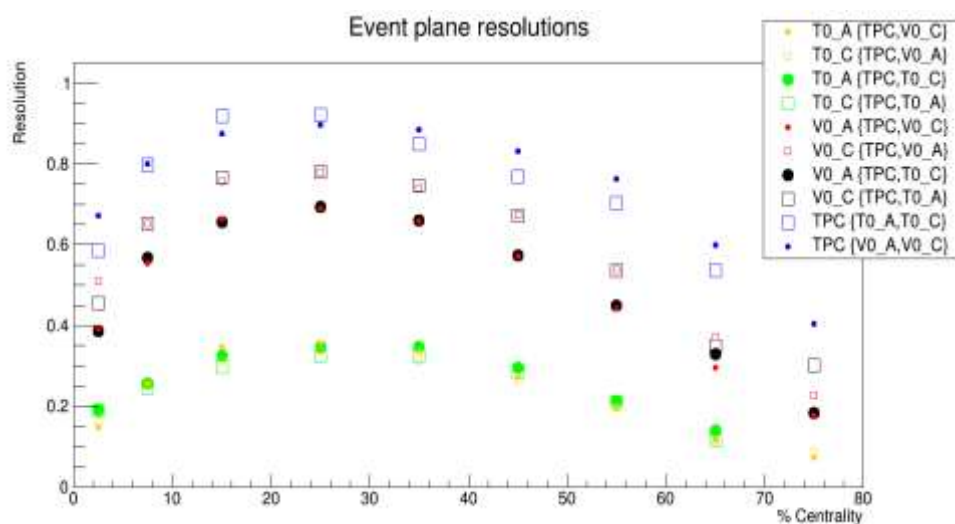


Рисунок 1.1.3.6 - Разрешение направления плоскости событий для детекторов T0, V0, TPC в зависимости от центральности взаимодействия. В фигурных скобках указаны детекторы, которые использовались для определения разрешения.

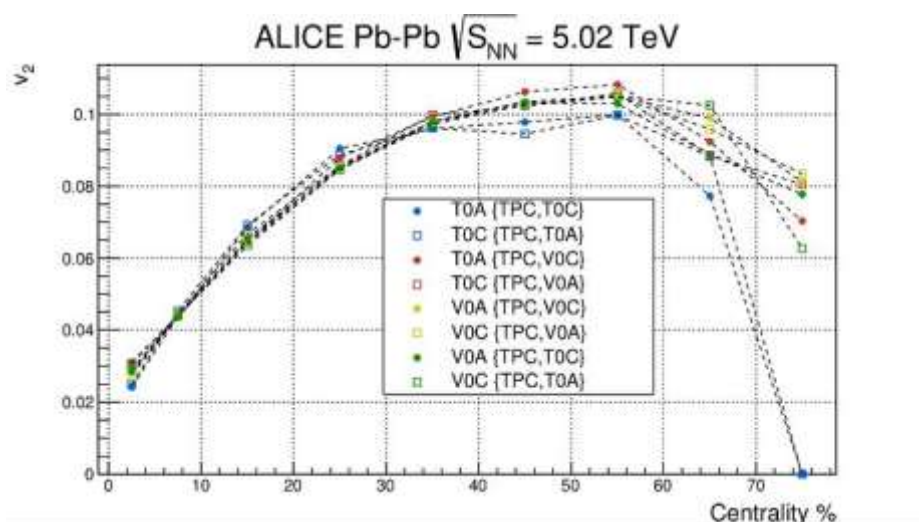


Рисунок 1.1.3.7 - Эллиптический поток V_2 в зависимости от центральности взаимодействия.

Окончательный результат по эллиптическому потоку (V_2) с использованием различным детекторов установки АЛИСА, представлен на рис. 1.3.7 в зависимости от центральности взаимодействия. Значения потока равные нулю в диапазоне 70-80% по центральности, связаны с разрешением плоскости событий в данном диапазоне.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что данное ПО можно использовать при модернизации детектора T0 в детектор ФИТ.

1.1.4 Тестовые испытания на ускорителе PS детекторов T0 и ФИТ

Усовершенствование детекторных систем мегадетектора ALICE необходимо для обеспечения возможности проведения экспериментальных исследований на пучках БАК после остановки коллайдера в 2017-2018 гг. для его модернизации, в результате которой

его светимость увеличится более, чем в десять раз. Столь сложные новые условия эксперимента требуют модернизации нескольких ключевых детекторов ALICE, в частности триггерных детекторов. В настоящее время разработана концепция и созданы образцы черенковского детектора на основе кварцевых радиаторов и микроканальных ФЭУ для триггерного ФИТ-детектора установки АЛИСА. Основными компонентами детектора являются микроканальных ФЭУ XP85012/A1-Q MCP-PMT Planacon с кварцевым окном, кварцевые радиаторы и пассивная быстрая электроника. Исследования параметров фотоумножителя на микроканальных пластинах ФЭУ XP 85012 с точки зрения его применения в детекторном устройстве ФИТ с высоким временным разрешением позволило выявить конструктивные особенности этих ФЭУ, влияющих на временное разрешение. Для устранения этих эффектов совместно с фирмой PHOTONIC, USA было принято решение модернизировать сами ФЭУ XP 85012 с использованием разработанных в ИЯИ электронных плат, которые встраиваются внутрь ФЭУ. В результате были созданы образцы модифицированного ФЭУ XP 85012 мод1. Дополнительно проводилась работа по созданию следующей модификации ФЭУ. В настоящее время выпущено два ФЭУ XP85012-мод2. Во второй версии модификации было оптимизировано расположение делителя высокого напряжения, что позволило уменьшить размеры ФЭУ XP85012-мод2 на 10 мм, что дает возможность изменить конфигурацию детектора ФИТ-С с плоской на сферическую, что является преимуществом ввиду ограниченного пространства, доступного для размещения ФИТ внутри мегадетектора АЛИСА. Испытания ФЭУ XP85012-мод2 было проведено на пучках PS, CERN в ноябре 2016 года.

1.1.4.1. Описание методики тестовых измерений на пучке PS

Тестовые измерения проводились на ускорителе PS в ЦЕРНе в ноябре 2016 года. Схема измерений представлена на рис. 1.1.4.1. Пучок отрицательных пионов от ускорителя, имеющих импульс 6 ГэВ/с, проходил через систему детекторов, состоящую из:

- двух черенковских модулей детектора T0, расположенных места вблизи вывода пучка (пучок в этом месте узкий, ≈ 2 см),
- двух черенковских модулей ФИТ, расположенных на расстоянии ≈ 3 м от модулей детектора T0 (пучок расширяется до ≈ 5 см),
- координатного детектора, разработанного специально для этих измерений, позволяющего определять координату пролета частицы с шагом 1 см (состоит из двух ортогонально расположенных сборок по 5 сцинтилляционных детекторов размером 1x1x5 см, просматриваемых кремниевыми фотоумножителями).

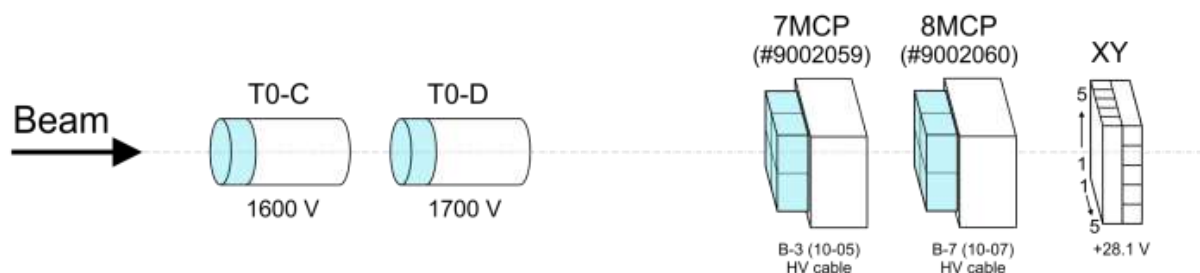


Рисунок 1.1.4.1 - Схема тестовых измерений на ускорителе.

Импульсы с детекторов поступают на оцифровщик формы импульсов CAEN DT5742 с шагом оцифровки 200 пс. Информация поступает в компьютер и с помощью специально разработанных программ определяются временные и амплитудные параметры тестируемых детекторов.

На рис. 1.1.4.2 представлены данные по профилю пучка, полученные с помощью координатного детектора.

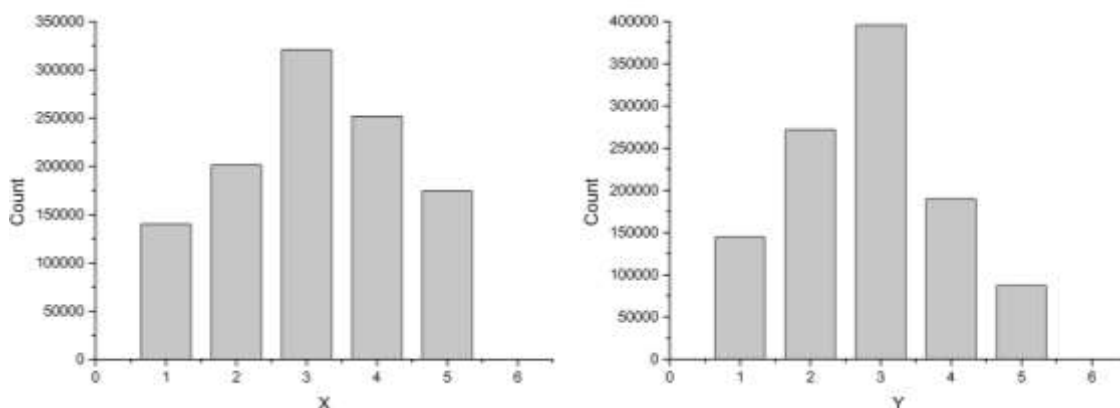


Рисунок 1.1.4.2. - Профиль пучка пионов в области расположения черенковских модулей детектора ФИТ

1.1.4.2. Временные характеристики черенковских модулей детектора T0

Черенковские модули детектора T0, используемые в установке ALICE, работают уже около 10 лет. С целью изучения эволюции их свойств со временем были измерены характеристики двух идентичных работающим запасных модулей, которые ранее не были в эксплуатации. Было измерено временное разрешение модулей относительно друг друга. Полученные результаты представлены на рис. 1.1.4.3.

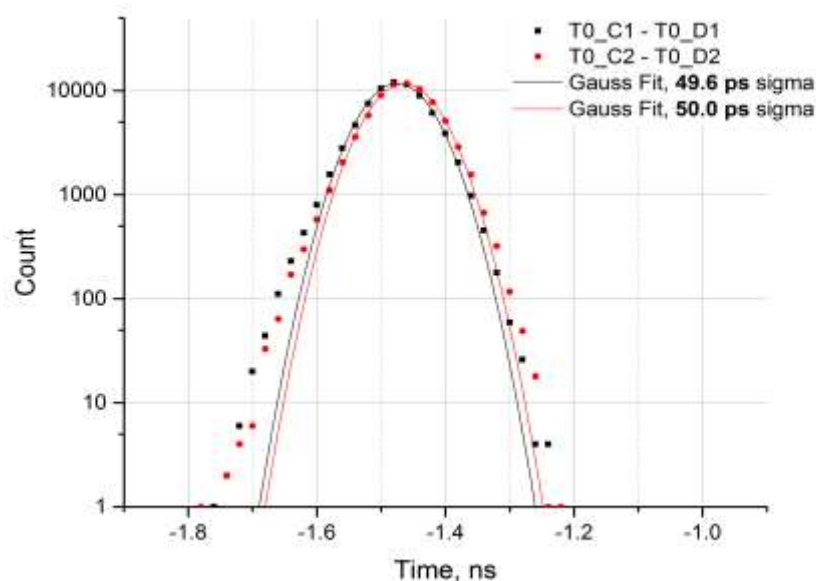


Рисунок 1.1.4.3 - Временной спектр, полученный для двух черенковских модулей детектора T0

Временное разрешение для этой системы в целом составило 50 пс. Это означает, что при условии одинаковых детекторов, временное разрешение одного из них в $\sqrt{2}$ раз меньше, т.е. составляет около 35 пс. Эти значения соответствуют полученным для этих модулей 10 лет назад. Эти детекторы использовались в дальнейшем как триггерные для запуска системы считывания информации.

1.1.4.3. Временные характеристики черенковских модулей ФИТ

Черенковские модули были собраны из фотоумножителей XR85012, модифицированных производителем специально для использования в составе детектора ФИТ. Были подробно исследованы основные характеристики, влияющие на параметры этого детектора. На рис. 1.1.4.4 представлены зависимости усиления (амплитуды сигнала) от напряжения на ФЭУ. Амплитуды сигналов с квадрантов отличаются, что необходимо учитывать при настройке детекторов, поскольку питание является общим для четырех квадрантов. Возможно, что потребуется коррекция на плате съема сигналов, позволяющая выравнивать амплитуды со всех квадрантов.

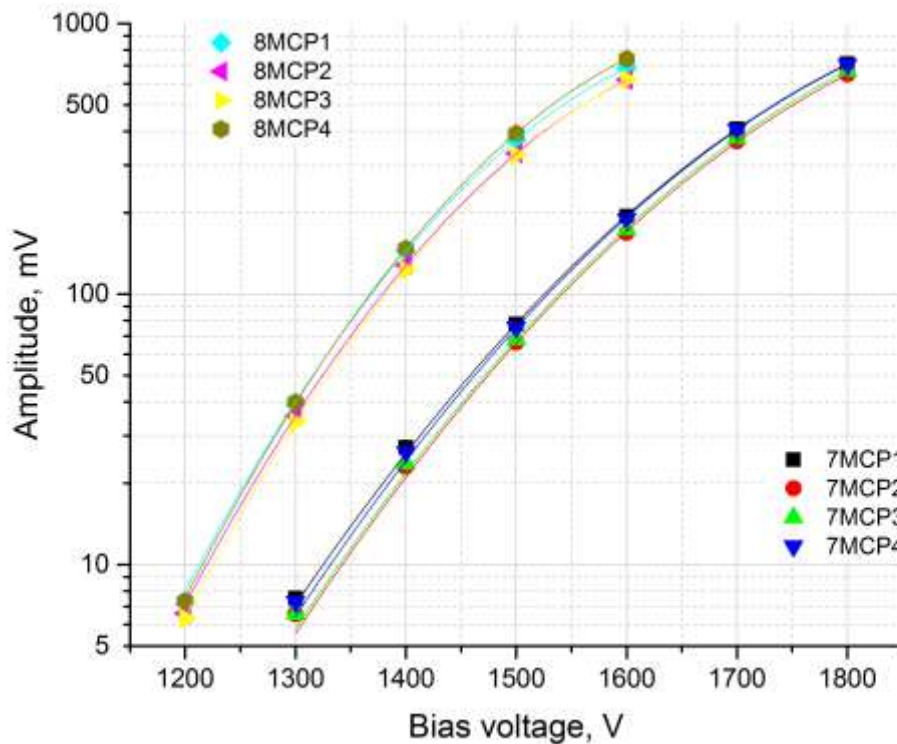


Рисунок 1.1.4.4 - Зависимость амплитуды сигнала с квадрантов черенковских модулей от напряжения питания ФЭУ

Временные измерения для черенковских модулей ФИТ проводились двумя методами: относительно триггерных детекторов и аналогично описанном выше для модулей детектора Т0. Полученные временные спектры представлены на рис. 1.1.4.5 и 1.1.4.6 соответственно.

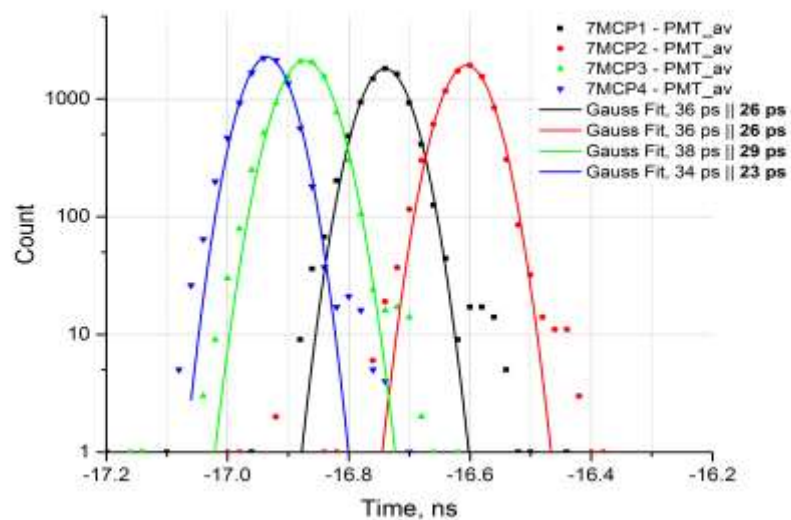


Рисунок 1.1.4.5 - Временные спектры четырех квадрантов черенковского модуля ФИТ, полученные относительно триггерных детекторов

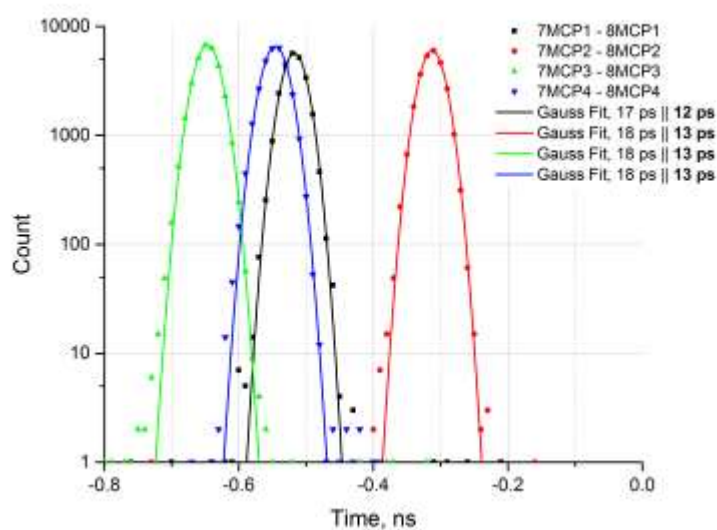


Рисунок 1.1.4.6 - Временные спектры, полученные для двух черенковских модулей, полученных относительно друг друга

Временное разрешение для одного модуля составило 13 пс, что является результатом, близким к рекордным для черенковских детекторов такого размера (53x53 мм).

На рис. 1.1.4.7 представлена зависимость временной задержки сигналов с четырех квадрантов от напряжения на ФЭУ. Как и ожидалось, задержка изменяется синхронно, и проводить подстройку задержки каналов после изменения напряжения питания не нужно.

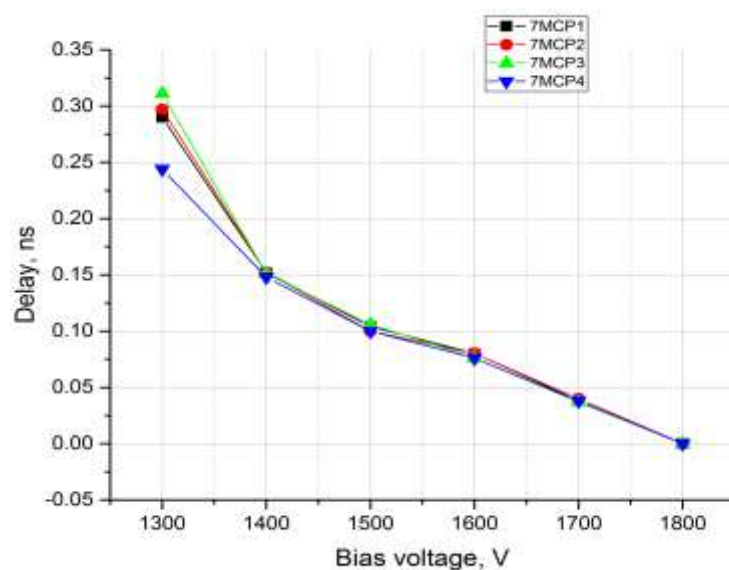


Рисунок 1.1.4.7 - Задержка сигналов с четырех квадрантов черенковского модуля как функция напряжения питания

1.1.4.4 Определение количества фотоэлектронов, образующихся в черенковском детекторе ФИТ

Одной из наиболее важных характеристик черенковского детектора, определяющих основные параметры, является число фотоэлектронов, образующихся при пролете частиц через радиатор детектора. Для определения этого параметра были измерены амплитудные спектры при регистрации отдельных фотонов (рис. 1.1.4.8) и спектры при регистрации релятивистских частиц (пионов на ускорителе) — рис. 1.1.4.9.

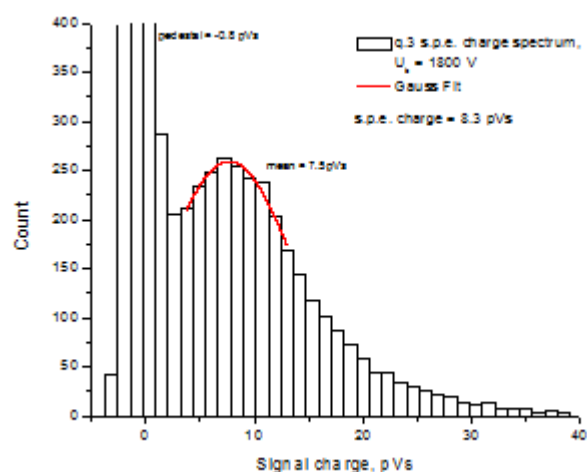


Рисунок 1.1.4.8 - Амплитудный спектр однофотонных импульсов.

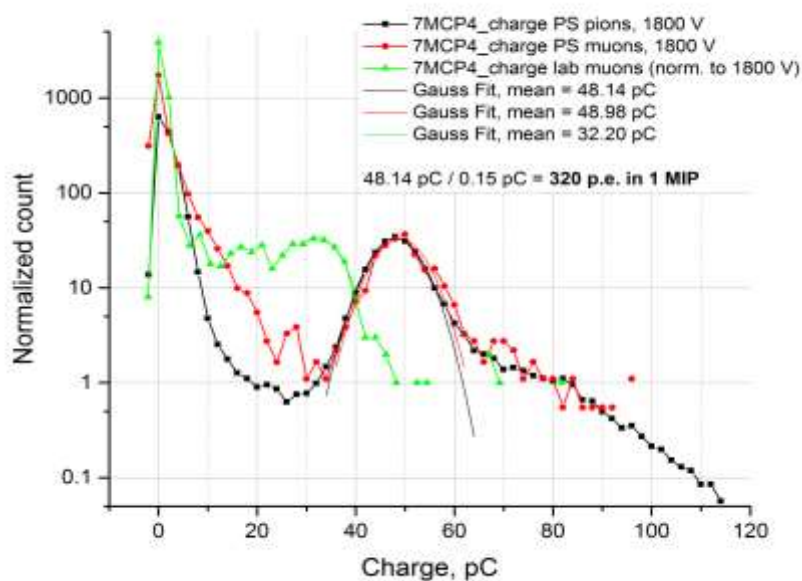


Рисунок 1.1.4.9 - Амплитудный спектр черенковского модуля при регистрации релятивистских частиц

Сравнение этих спектров позволяет сделать вывод о том, что число фотоэлектронов, образующихся в черенковском детекторе на основе фотоумножителя XR85012 и радиатора толщиной 2 см, составляет 320.

1.1.4.5. Исследование наводок с канала на канал в черенковском модуле ФИТ

Основным недостатком фотоумножителя XR85012 является электрическая наводка с одного квадранта на другой. На рис. 1.4.10 представлены осциллограммы с квадрантов фотоумножителя. Нижняя осциллограмма показывает наводку положительной полярности от квадранта, через который прошла частица на соседний. При наличии сигнала и на этом квадранте, результирующий импульс будет искажен, и временная отметка может быть сдвинута на величину до 0,5 нс (рис. 1.1.4.11).

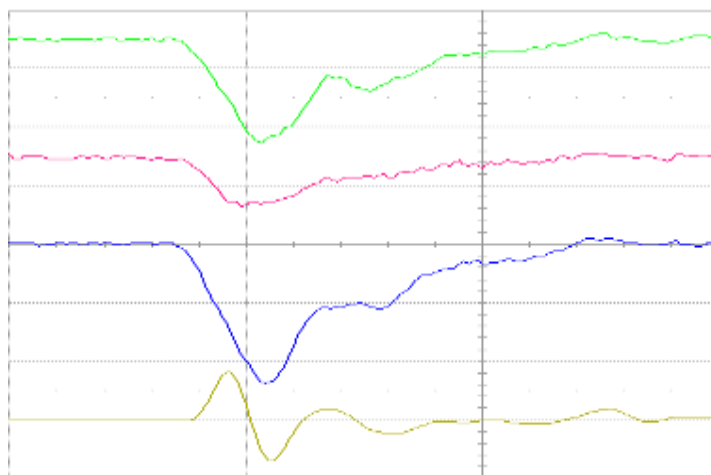


Рисунок 1.1.4.10 - Осциллограммы импульсов с квадрантов черенковского модуля

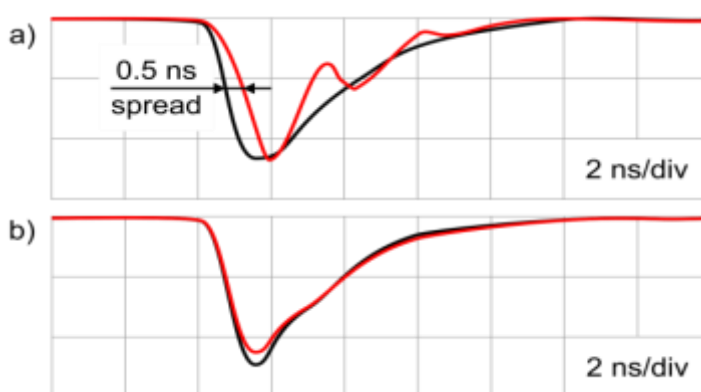
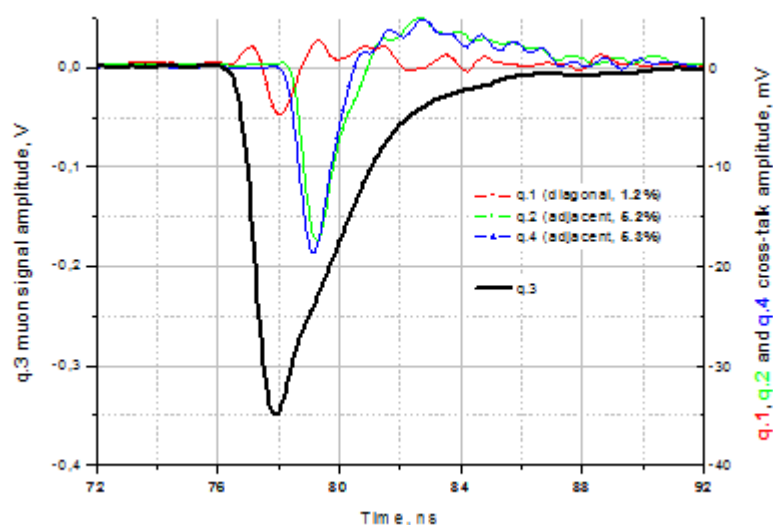


Рисунок 1.1.4.11 - Осциллограммы импульсов с квадрантов фотоумножителя, иллюстрирующие влияние наводки положительной полярности

В модернизированном фотоумножителе были убраны резисторы, необходимые для работы общего вывода, что позволило значительно снизить наводки с квадранта на квадрант (особенно положительной полярности, наиболее неприятные для временных

измерений). На рис. 1.1.4.12 представлены осциллограммы, полученные с модернизированного фотоумножителя. Проведенные измерения показали, что модернизированный фотоумножитель может быть использован при разработке детектора



ФИТ.

Рисунок 1.1.4.12 - Осциллограммы импульсов с модернизированного фотоумножителя.

Кроме электрической наводки с квадранта на квадрант была обнаружена оптическая наводка, образующаяся прохождением небольшой части света из одного радиатора в другой через входное окно фотоумножителя. Этот эффект не влияет на временные параметры, т.к. частицы во все квадранты попадают одновременно, и свет прямой и от соседнего квадранта приходят одновременно. Это может несколько исказить данные амплитудных измерений.

Для оценки этого эффекта были проведены измерения, результаты которого представлены на рис. 1.1.4.13. Сигнал снимается с квадранта 7MCP1 и измеряется амплитуда сигнала в зависимости от координаты пролета частицы через соседние квадранты (координата определяется с помощью координатного детектора). Видно, что чем ближе к квадранту 7MCP1 проходит частица, тем больше амплитуда сигнала, вызванного «пролезанием» света через окно фотоумножителя. Эта величина может достигать 10-12%.

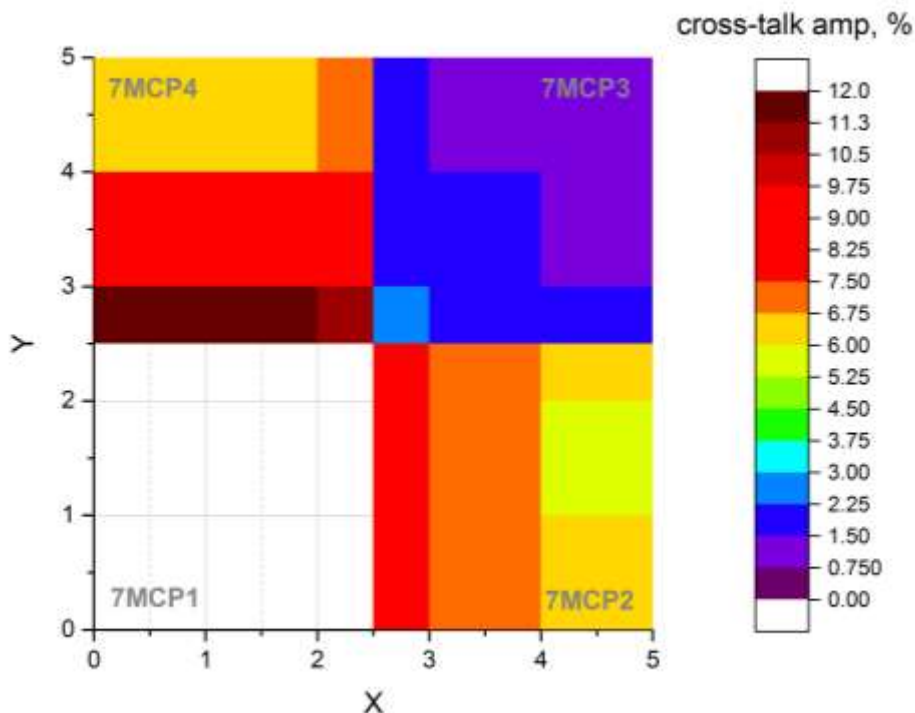


Рисунок 1.1.4.13 - Амплитуда сигнала с квадранта 7MCP1 от координаты пролета частицы через другие квадранты черенковского модуля ФИТ

1.1.4.6 Разработка пакета программ для тестовых измерений с использованием Dizitizer CAEN Mod. DT5742

Для измерения характеристик MCP используется Дигитайзер (CAEN Mod. DT5742 Desktop Waveform Digitizer), позволяющий вести запись формы аналоговых сигналов. Дигитайзер имеет 16+1 каналов включая триггерный и скорость записи 12бит@5ГГц. Временное окно для записи сигнала составляет 200 нс и разрешение 16 бит (200 пс) с динамическим диапазоном 1 В. Запись события может происходить как по внешнему триггеру, так и по внутреннему. Для выполнения измерений Дигитайзер был нормирован по амплитуде сигнала, амплитудное разрешение составляет несколько милливольт. На рисунке 1.4.14 представлена зависимость временного смещения сигнала от амплитуды. Измерение было выполнено при помощи быстрого генератора с джиттером 5 пс, временное разрешение дигитайзера составило 5 пс для сигналов более 100 мВ.

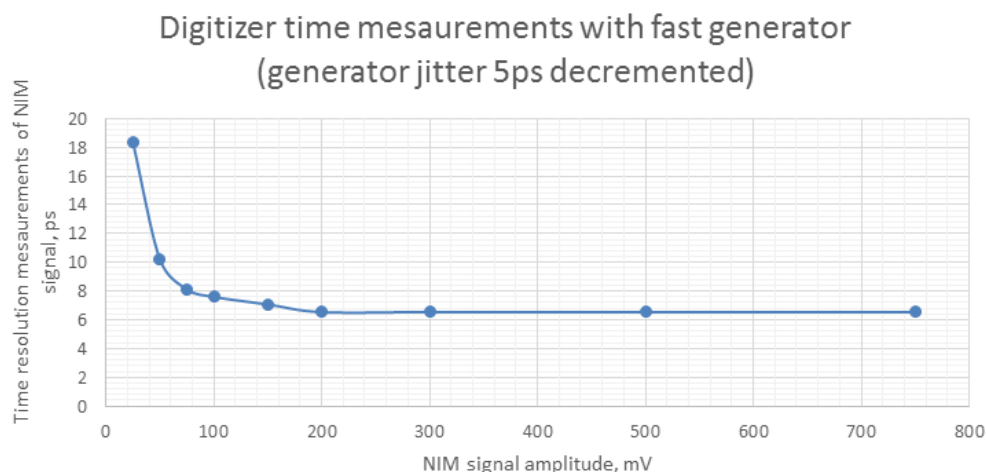


Рисунок 1.1.4.14 - Зависимость временного смещения от амплитуды сигнала

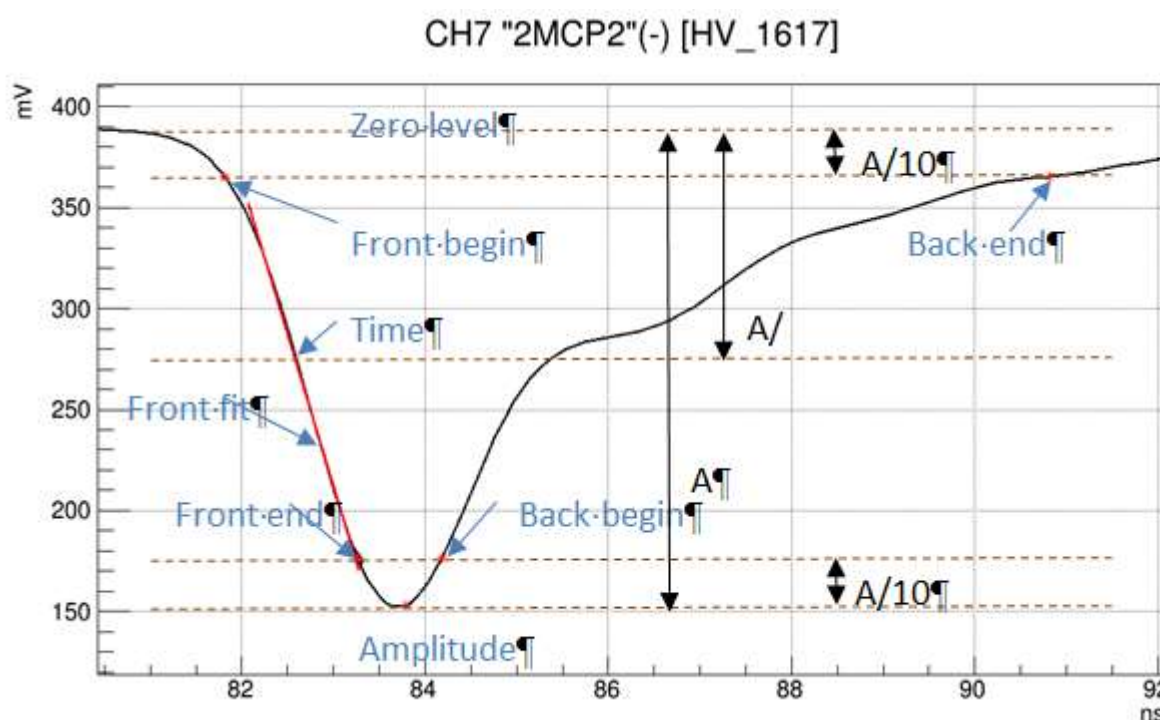


Рисунок 1.1.4.15 - Основные параметры амплитудного сигнала

Дигитайзер записывает результаты измерения в отдельный файл для каждого канала в виде строки для каждого события. Каждая строка представляет из себя 1024 значения с плавающей точкой соответствующих амплитудным значениям сигнала на протяжении временного окна 200 нс. Для обработки данных дигитайзера, а именно получения непосредственно амплитуды, времени и заряда амплитудного сигнала был разработан на основе пакета ROOT проект DDP (Digitizer Data Processing) который позволяет конвертировать сырые данные дигитайзера в удобный для обработки формат пакета ROOT TTree. Важно отметить, что размер данных сокращается на три порядка, что позволяет легко обмениваться данными при удаленной работе с сервером. Обработка

записанных данных ведется в несколько этапов. Для обработки данных первоначально применяется фильтр Блэкмана для высоких частот с границей 500 МГц для фильтрации цифровых шумов самого дигитайзера. Затем, происходит поиск окна не содержащего сигнала и наводок исходя из средней величины и среднеквадратичного отклонения от среднего значения амплитуды в окне. В этом окне производится вычисление нулевого уровня. Амплитуда сигнала определяется как максимальное значение напряжения на выбранном временном отрезке с учетом полярности сигнала. На уровне 10% от амплитуды находятся времена границ переднего и заднего фронтов сигнала. Время сигнала находится несколькими способами: среднее положение фронта сигнала, по фитированию фронта сигнала полиномами первой и третьей степени. На рисунке 1.1.4.15 представлен эскиз сигнала и его основные параметры. Для симуляции модуля QTC (преобразование заряда во время) производится вычисление заряда сигнала во временном окне относительно константы – 0,0 мВ. Для наблюдения шумов производится вычисление среднего значения и среднеквадратичного отклонения от среднего значения сигнала во временном окне. Наряду с приведёнными значениями, также возможно вычисление времени сигнала по симуляции модулей CFD (дискриминатор со следящим порогом) и LED (пороговый дискриминатор), вычисление фактического заряда сигнала (от начала переднего до конца заднего фронта относительно нулевого уровня) и обработка сигналов со специальных координатных детекторов. Наряду с обработкой сигналов проект DDP имеет графический интерфейс, позволяющий производить мониторинг данных в реальном времени. Имеется возможность наблюдать формы сигналов, для любого события, проверить правильность вычисления параметров сигнала, быстро построить амплитудные и частотные спектры. Так же возможно удобно подобрать параметры обработки (в том числе временное окно, минимальную амплитуду, параметры фитирования фронтов) для любого канала и запустить обработку. На рисунке 1.4.16 представлены основные окна графического интерфейса. Наличие простого графического интерфейса очень важно, поскольку делает работу по набору данных более ясной, быстрой, и позволяет обнаружить ошибки на раннем этапе и исправить их.

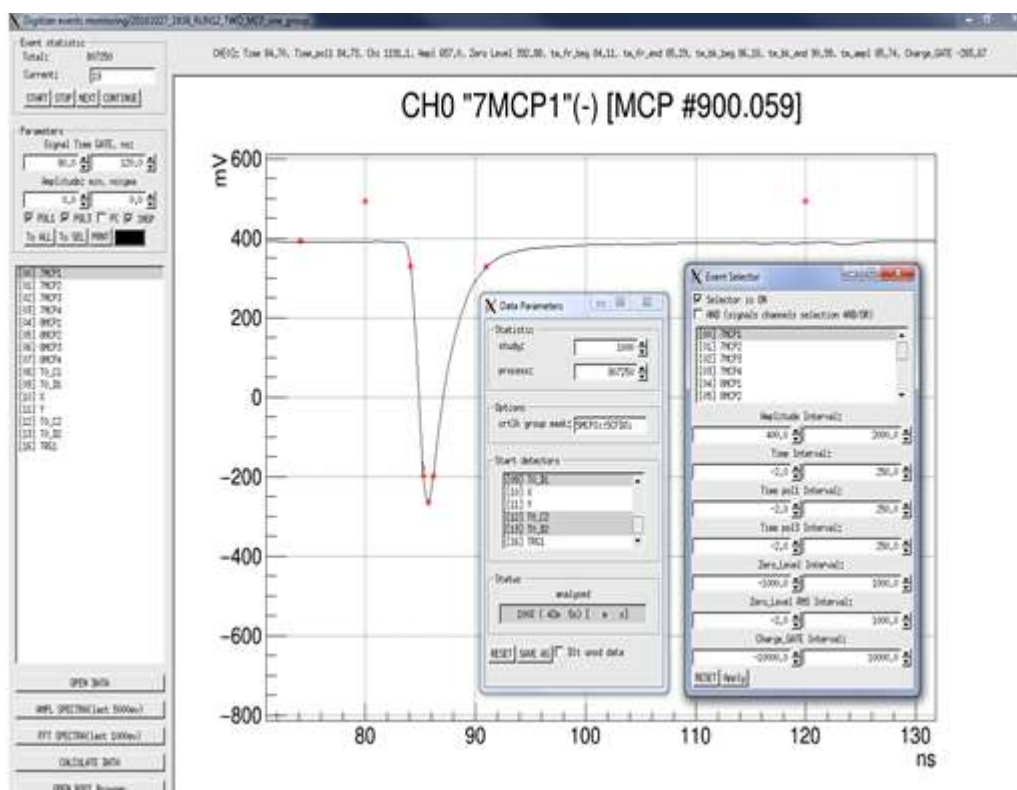


Рисунок 1.1.4.16 - Графический интерфейс пакета программ DDP

Стоит отметить, что проект DDP используется многими группами для работы с дигитайзером, и зарекомендовал себя как надежный и удобный инструмент. Проект DDP претерпевает постоянную отладку при его использовании и его возможности постоянно расширяются в соответствии с текущими нуждами по обработке данных, чему способствует удобная для расширения структура написания рабочей программы в объектно-ориентированном стиле языка C++.

1.1.5 ALICE Diffractive (AD) детектор

В течение проведенного в 2016 году сеанса работы БАК выполнены измерения дифракционных процессов при столкновении протонов с энергией 13 ТэВ в с.ц.м., которая является максимальной энергией столкновений элементарных частиц, когда-либо достигнутой в экспериментах на ускорителях. Начата обработка полученных экспериментальных данных по одиночной, двойной и центральной дифракции, которая включает анализ данных не только с системы детекторов ADA и ADC, созданных при участии сотрудников ИЯИ РАН, но и данных центральных детекторов ITS (вершинный детектор), TOF – T0 (время-пролетная система), TPC (время-проекционная камера) и др.

Детектор ALICE Diffractive (AD) (рис. 1.5.1) состоит из двух частей (А и С) расположенных по обе стороны от точки взаимодействия эксперимента ALICE. Каждая часть представляет собой двухслойный годоскоп из сцинтилляторов размером 22x22x2,5 см³, установленных возле вакуумной трубы на расстоянии 18 м (сторона А) и 20 м (сторона С) от точки взаимодействия. Свет от сцинтилляторов собирается и передается

спектро-смещающим волокном к ФЭУ (fine mesh Hamamatsu PMT R5946, hybrid assembly H6153-70). AD детектор покрывает диапазон псевдобыстрот в интервале $4.8 < \eta < 6.3$ со стороны А и $-7,0 < \eta < -4,9$ со стороны С, что позволяет исследовать дифракционные процессы при малых поперечных импульсах. Детектор AD также используется в эксперименте ALICE как монитор светимости БАК и для сепарации фоновых событий.

Успешная работа системы детекторов ADA и ADC в проведенном протон-протонном сеансе 2016 года продемонстрировала эффективность триггера дифракционных событий, которые характеризуются большой разницей быстрот частиц (рис. 1.5.2), регистрируемых в протон-протонных столкновениях, что позволит всесторонне исследовать дифракционные процессы. Можно ожидать, что обработка данных позволит не только проверить справедливость непертурбативных моделей дифракции протонов, но и получить информацию о возбуждении новых нуклонных резонансов в результате центральной дифракции. Параллельно с набором данных проведена работа по уточнению параметров установки, временного и амплитудного разрешения, изучению радиационной стойкости и старения материалов детекторов и электроники.

Наряду с амплитудным, для детектора AD важно и временное разрешение, которое со стороны А составляет 0,5 нс, а со стороны С - 0,3 нс. На рис. 1.1.5.3 представлено временное разрешение AD детектора для всех 16 каналов. Временное разрешение для каналов со стороны А оказалось хуже, чем для стороны С. Основной вклад во временное разрешение вносят геометрия детектора, собственное разрешение ФЭУ и считывающая электроника. Помимо регистрации событий от сцинтиллятора, регистрируются события и от попадания частиц в оптическое волокно и фотокатод ФЭУ, что дополнительно ухудшает временное разрешение детектора. Для исследования этого вопроса был проведен анализ зависимости временного разрешения для разных диапазонов заряда, корреляция событий для соседних слоев как для временных, так и амплитудных измерений. Был изучен вклад во временное разрешение событий с ранним временем и малым зарядом, которыми являются события связанные с попаданием частиц в оптоволокно и фотокатод ФЭУ. Полученные результаты позволяют изучить вклад во временное разрешение детектора ранних событий от попадания частиц в сцинтиллятор и фотокатод ФЭУ, и оценить различия собственного временного разрешения ФЭУ для разных каналов.

На тестовом сеансе на пучке пионов T10 ускорителя PS проведено первое испытание новой электроники считывания для будущей модернизации установки. Она включает в себя плату считывания TRB3 (Время-цифровой преобразователь TDC внутри ПЛИС (FPGA), Front End Electronics (FEE)) и компьютер с установленным программным обеспечением TRB3. Все данные передаются на компьютер в первичных «сырых» файлах, которые могут быть затем проанализированы посредством специализированного программного обеспечения в автономном режиме. В ходе испытаний получено высокое временное разрешение 30 пикосекунд.

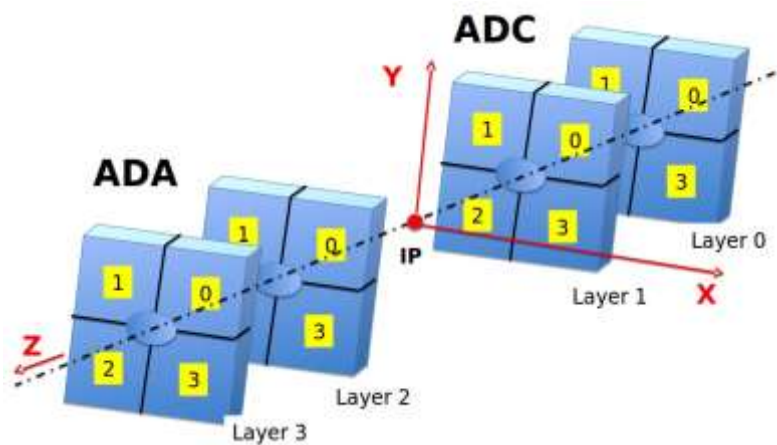


Рисунок. 1.1.5.1 - Расположение слоев сцинтилляторов детекторов ADA и ADC, IP – точка взаимодействия

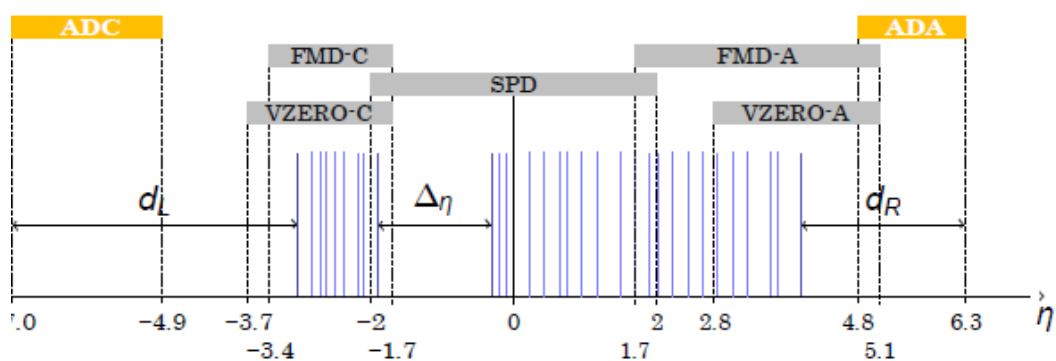


Рисунок 1.1.5.2 - Разница быстрой детекторов ADA и ADC по сравнению с другими детекторами установки ALICE

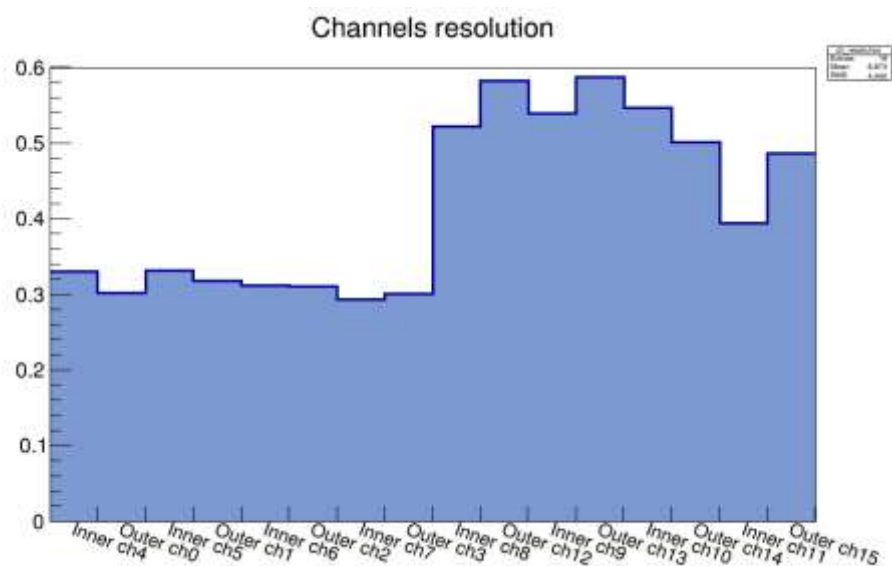


Рисунок. 1.1.5.3 - Временное разрешение каналов системы детекторов

1.1.6 Эксперимент с фиксированной мишенью AFTER на пучках БАК для физики адронов и столкновений тяжёлых ионов

Несмотря на большой прогресс, достигнутый в экспериментах на ускорителях SPS в ЦЕРНе, коллайдеров RHIC в Брукхейвене, США, и LHC (БАК) в ЦЕРНе, свойства вещества в экстремальных условиях сверхвысоких температур и плотностей до сих пор недостаточно изучены. При высоких температурах и больших плотностях энергии квантовой хромодинамикой (КХД) предсказывается существование кварк-глюонной плазмы (КГП). В отдельных случаях эксперименты с фиксированной мишенью на пучках БАК имеют преимущества по сравнению с экспериментами на встречных пучках этого коллайдера. Высокая светимость эксперимента с фиксированной мишенью значительно увеличит статистическую точность получаемых данных, а также обеспечит лучший контроль над эффективностью и аксептансом. При использовании протонного и ионного пучков БАК может быть исследована область энергии между максимальной энергией SPS ($\sqrt{s} \sim 29$ ГэВ) и стандартной энергией RHIC ($\sqrt{s} = 200$ ГэВ) в p-A и A-A столкновениях. Для протонного пучка с энергией 7 ТэВ энергия в нуклон-нуклонном центре масс составит $\sqrt{s_{NN}} = 114.6$ GeV, и для пучка свинца с энергией 2.75 ТэВ $\sqrt{s_{NN}} = 71.8$ ГэВ.

Новые эксперименты в этом энергетическом интервале очень важны для изучения механизмов рождения и подавления рождения кваркониумов и понимания условий возникновения кварк-глюонной плазмы. Исследование эффектов холодной ядерной материи (CNM) расширяет понимание свойств ядерной материи и требует систематических и статистически достоверных измерений также в области низких энергий. Чтобы понять эффекты холодной ядерной материи, планируются эксперименты с высокой статистикой по рождению чармония при низких энергиях до 35 ГэВ/нуклон в эксперименте CBM на FAIR и в эксперименте MPD на коллайдере NICA в Дубне. В ЦЕРНе на ускорителе SPS предложен и готовится эксперимент на фиксированной мишени CHIC (Charm in Heavy Ion Collisions) для изучения рождения чармония при энергиях до $\sqrt{s_{NN}} \sim 20$ ГэВ. На коллайдере RHIC проводится программа измерений по уменьшению и сканированию энергии пучка (BES-I) на установках STAR и PHENIX, однако светимость пучка резко падает с уменьшением энергии. На установке STAR осуществляется программа измерений на фиксированной мишени и уже получены первые данные в столкновениях Au-Au при энергии 14.5 ГэВ, что соответствует $\sqrt{s_{NN}} = 3.9$ ГэВ в системе центра масс. Однако, эта энергия недостаточна для исследования рождения чармония.

Используя пучки БАК с уменьшенной энергией на фиксированной мишени, можно получить данные в диапазоне энергий 30-100 ГэВ. Поиск эффектов фазового перехода и определение критической точки является основной целью энергетического скана. Более

того, это дает возможность исследовать рождение чармония, J/ψ , $\psi(2S)$, χ , разделить механизмы жесткого рождения и затем подавления в результате адронной диссоциации в кварк-глюонной плазме от механизма вторичного рождения чармония в результате рекомбинации очарованных кварка и антикварка, т.к. вероятность рекомбинации сильно падает с уменьшением энергии.

Существуют три исследованные возможности использовать пучки БАК высокой энергии для взаимодействия с фиксированной мишенью. Эксперимент с мишенью в форме тонкого кольца, помещенного в гало пучка, может быть проведен на существующих на БАК установках (например, ALICE или LHCb). Мишень может помещаться в рабочее положение с помощью специального устройства после проведения пучка. В эксперименте будет использоваться только гало пучка, а мишень будет являться еще и дополнительным коллиматором. Этот эксперимент с фиксированной мишенью в форме тонкого кольца может являться первой стадией более сложного эксперимента AFTER (A Fixed Target Experiment), требующего создания новой установки.

Другой возможностью является использование изогнутого отклоняющего кристалла, помещенного в гало пучка. Несколько протонов (или ионов свинца) в банче могут быть каналированы по оси кристалла. Как показал, в частности, эксперимент UA9 в ЦЕРНе, такая техника выведения пучка эффективна и позволяет получать чистые и хорошо сфокусированные пучки. Замечательной особенностью этой техники является то, что она не влияет на установки БАК, т.к. использует только гало пучка.

Существующая система газовой мишени для измерения светимости (SMOG) в эксперименте LHCb может быть использована для физики с фиксированной мишенью на БАК. Проведены тестовые измерения p-Ne и Pb-Ne столкновений, но в настоящее время нет точных измерений плотности и давления газа.

Эксперимент AFTER имеет обширную физическую программу, позволяет использовать различные пучки и мишени большой толщины, в том числе поляризованные. Физическая программа включает исследование рождения кваркониев, измерение процесса Дрелла-Яна, исследование рождения D-мезонов, измерение потоков, спиновую физику, энергетическое сканирование для поиска критической точки возможного перехода в кварк-глюонную плазму.

Кварконии являются важными объектами для изучения свойств деконфайнмента материи при столкновениях ультрарелятивистских тяжелых ионов. Но механизм рождения и подавления рождения кваркониев недостаточно изучен в некоторых кинематических областях. Данные по рождению кваркониев с высокой статистикой в этих областях дают возможность понять механизм рождения, изучить вклад и важность

процесса регенерации кваркониев, т.к. вероятность рекомбинации уменьшается с уменьшением энергии столкновения. Будет возможно не только изучать рождение J/ψ , $\psi(2S)$ и $\Upsilon(nS)$ мезонов, но также и соответствующие χ_c состояния, измерение которых требует высокой статистики и большого аксептанса детектора и хорошего контроля эффективности.

Изучение процесса Дрелла-Яна важно само по себе, а кроме того еще и как фоновый процесс при изучении кваркониев. Рождение D-мезонов является важной составляющей в рождении и диссоциации чармония.

Основным параметром для определения возможности рождения чармония в эксперименте с фиксированной мишенью является аксептанс. Проведены расчеты геометрического аксептанса и выходов J/ψ -мезонов на фиксированной мишени на установке АЛИСЕ на пучках БАК. Получены результаты, показывающие возможность проведения таких экспериментов с хорошей статистической точностью. На рис. 1.6.1 представлен расчет распределений по поперечному импульсу и быстрой для J/ψ -мезонов, рожденных в эксперименте с фиксированной мишенью на установке АЛИСЕ в точке $z=+50$ см (сплошная линия) и $z=0$ (пунктир) в столкновениях ядер свинца Pb-Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}}=71.8$ ГэВ (вверху) и соответствующий аксептанс (внизу). J/ψ -мезоны регистрируются в диапазоне быстрой $-2.5 < \eta < -4.0$ ($-2.97 < \eta < -4.09$) для J/ψ , рожденных в точке $z=0$ ($z=+50$ см). Геометрический аксептанс (I) равен $(12.0 \pm 0.2)\%$ для J/ψ , рожденных в точке $z=0$, и равен $(8.0 \pm 0.2)\%$ для J/ψ , рожденных в точке $z=+50$ см. Геометрический аксептанс для измерений с фиксированной мишенью составляет величину такого же порядка и даже превосходит геометрический аксептанс в столкновениях ядер свинца в эксперименте АЛИСЕ на БАК.

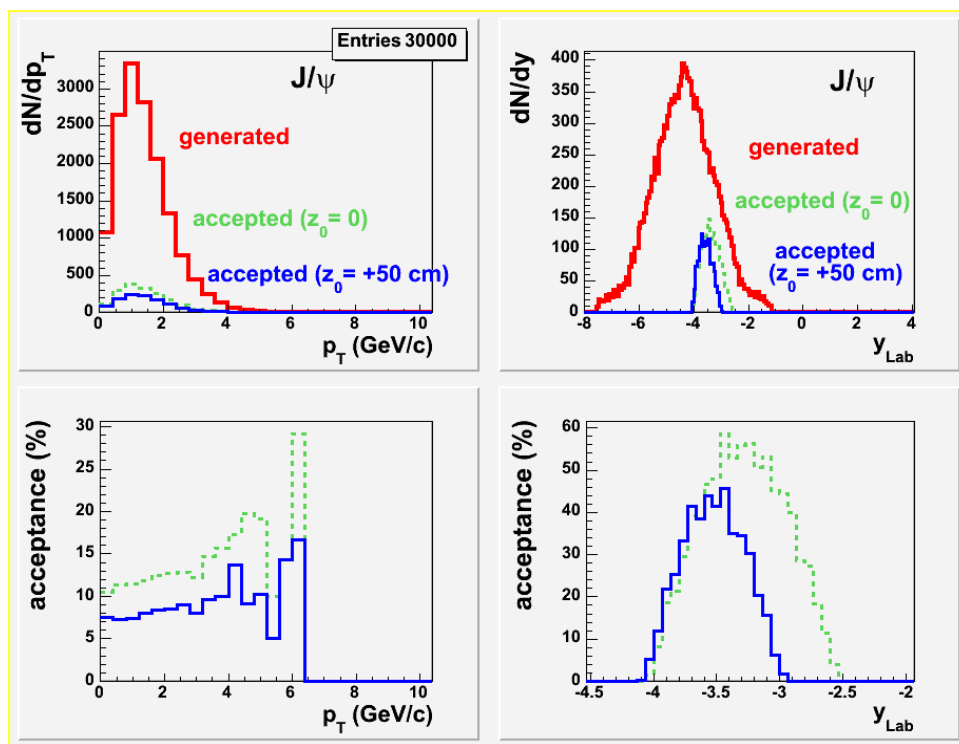


Рисунок 1.1.6.1 - Распределение по поперечному импульсу и быстроте для J/ψ -мезонов, рожденных в эксперименте с фиксированной мишенью на установке АЛИСЕ в точке $z=+50$ см (сплошная линия) и $z=0$ (пунктир) в столкновениях ядер свинца Pb-Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}}=7.18$ ГэВ (вверху) и соответствующий этим условиям аксептанс (внизу).

1.1.7 Ультрапериферические взаимодействия ядер на БАК

1.1.7.1 Ядерная резонансная флуоресценция ядер свинца на БАК.

Рассмотрены электромагнитные возбуждения дискретных уровней ядер свинца в их ультрапериферических взаимодействиях на БАК с последующим излучением ими фотонов и переходом в основное состояние. Данный процесс можно отнести к разновидности ядерной резонансной флуоресценции (ЯРФ).

1.1.7.2 Эмиссия нуклонов вперёд ядрами свинца на БАК в результате их ультрапериферических взаимодействий

Результатом воздействия лорентц-сжатых кулоновских полей ядер в их ультрапериферических столкновениях на БАК является электромагнитная диссоциация ядер-партнёров. Сечения эмиссии нейтронов вперёд ядрами свинца были вычислены с помощью разработанной в ИЯИ РАН модели RELDIS и были измерены в эксперименте ALICE в предыдущие годы. В 2016 году дополнительно исследовались каналы эмиссии протонов вместе с нейтронами и чисто протонные каналы электромагнитной диссоциации. Данные по эмиссии протонов необходимы для уточнения сечений

электромагнитной диссоциации, на которые опирается метод мониторинга светимости БАК. Кроме этого, числом испущенных протонов и нейтронов определяются свойства ядер-остатков, которые имеют отношение заряда к массе, близкое к ядрам пучка ^{208}Pb и поэтому не отделяются от ядер пучка существующей системой коллиматоров.

Вычислены сечения возбуждения отдельных уровней в ядрах свинца, полное сечение ЯРФ, распределения излучаемых фотонов по энергии, углу и псевдобыстроте. Оценены возможности детекторов БАК для регистрации таких фотонов, возможности использования ЯРФ для мониторинга светимости коллайдера. С помощью ранее разработанной в ИЯИ РАН модели RELDIS определены сечения каналов развала ядер свинца в ультрапериферических взаимодействиях, в частности, каналов $^{207}\text{Pb} + n$, $^{206}\text{Tl} + n + p$, $^{205}\text{Hg} + n + 2p$, в которых ядро-остаток имеет отношение заряда к массе, близкое к ядрам пучка ^{208}Pb . Такие ядра могут воздействовать на сверхпроводящие магниты БАК и приводить к потере их сверхпроводящих свойств. Предложено использовать нейтронные и протонные Zero Degree Calorimeters (ZDC) эксперимента ALICE для определения сечений электромагнитной диссоциации ядер с эмиссией определённого числа протонов и нейтронов, из которых можно извлечь сечения образования определённых ядер-остатков.

1.1.8 Список публикаций и докладов 2016 года, связанных с экспериментом ALICE

1. V.A. Grigoryev, V.A. Kaplin, T.L. Karavicheva, A.B. Kurepin, E.F. Maklyaev, Yu A. Melikyan, D.V. Serebryakov, W.H. Trzaska, E.M. Tykmanov, "Study of the Planacon XP85012 photomultiplier characteristics for its use in a Cherenkov detector", J.Phys.Conf.Ser. 675 (2016) no.4, 042016
2. V.A. Grigoryev, V.A. Kaplin, T.L. Karavicheva, A.S. Konevskikh, A.B. Kurepin, V.A. Loginov, Yu A. Melikyan, I.V. Morozov, A.I. Reshetin, D.V. Serebryakov et al., "Fast timing and trigger Cherenkov detector for collider experiments", .Phys.Conf.Ser. 675 (2016) no.4, 042015
3. А.Б.Курепин, Н.С.Топильская «Проект эксперимента AFTER с фиксированной мишенью на пучках коллайдера LHC для физики адронов и столкновений тяжелых ионов» Международная сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий», Дубна, 12-15 апреля 2016 г. Послано в печать в ЭЧАЯ.
4. Н.С.Топильская, А.Б.Курепин «Heavy ion collisions in a fixed target mode at the LHC beams» Международный Балдинский Семинар ISHEPP_ XXIII, Дубна, Россия, 19-24 сентября 2016 г Послано в печать в European Physical Journal.
5. D.A. Finogeev, V.A. Grigoryev, V.A. Kaplin, O.V. Karavichev, T.L. Karavicheva, A.S. Konevskikh, A.B. Kurepin, A.N. Kurepin, V.A. Loginov, A.I. Mayevskaya, Yu.A. Melikyan, I.V. Morozov, D.V. Serebryakov, A.I. Shabanov, M. Slupecki, A.A. Tikhonov and W.H. Trzaska, "Performance study of the fast timing Cherenkov detector based on a microchannel plate PMT"; ICPPA-2016, Moscow, Russia, Послано в печать в J. Phys. Conf. Ser.

Публикации АЛИСЕ:

1. "Jet-like correlations with neutral pion triggers in pp and central Pb–Pb collisions at 2.76 TeV" Phys.Rev.Lett. 117 (2016) 182301
2. Higher harmonic flow coefficients of identified hadrons in Pb-Pb collisions at 2.76 TeV. JHEP 1609 (2016) 164
3. Elliptic flow of electrons from heavy-flavour hadron decays at mid-rapidity in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV. JHEP 1609 (2016) 028
4. D-meson production in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV and in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV. Phys.Rev. C94 (2016) no.5, 054908
5. Pseudorapidity dependence of the anisotropic flow of charged particles in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV. Phys.Lett. B762 (2016) 376-38

6. Correlated event-by-event fluctuations of flow harmonics in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV. Phys.Rev.Lett. 117 (2016) 182301
7. Measurement of transverse energy at midrapidity in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV. Phys.Rev. C94 (2016) no.3, 034903
8. Centrality dependence of charged jet production in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. Eur.Phys.J. C76 (2016) no.5, 271
9. Centrality dependence of $\psi\psi(2S)$ suppression in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. JHEP 1606 (2016) 050
10. The Λp interaction studied via femtoscopy in p + Nb reactions at $\sqrt{s_{NN}}=3.18$ GeV. Phys.Rev. C94 (2016) no.2, 025201
11. Measurement of D-meson production versus multiplicity in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV. JHEP 1608 (2016) 078
12. Particle identification in ALICE: a Bayesian approach. Eur.Phys.J.Plus 131 (2016) no.5, 168
13. Anisotropic flow of charged particles in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV. Phys.Rev.Lett. 116 (2016) no.13, 132302
14. Production of $K^* (892)0$ and $\phi (1020)$ in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. Eur.Phys.J. C76 (2016) no.5, 245
15. “Correlated Event-by-Event Fluctuations of Flow Harmonics in Pb-Pb Collisions at 2.76 TeV” Phys.Rev. Lett. 117, 182301
16. Multiplicity dependence of charged pion, kaon, and (anti)proton production at large transverse momentum in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. Phys.Lett. B760 (2016) 720-735

Доклады на международных конференциях:

1. T.Karavicheva "FIT upgrade" Международная конференция «ALICE CERN - Russia» в Москве 14-15 сентября 2016 года:
2. A.Konevskich, «Luminosity determination at the ALICE experiment at the Large Hadron Collider», Международная конференция «ALICE CERN - Russia» в Москве 14-15 сентября 2016 года:
3. A. Furs «Measurements of Event Plane at the ALICE experiment in Pb-Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV», Международная конференция «ALICE CERN - Russia» в Москве 14-15 сентября 2016 года:

4. U. Dmitrieva «Nuclear resonance fluorescence in collisions of lead nuclei at the LHC», Международная конференция «ALICE CERN - Russia» в Москве 14-15 сентября 2016 года:

5. Yu. Melikyan "Analysis of the FIT T0+ prototype beam test results"; Международная конференция «ALICE CERN - Russia» в Москве 14-15 сентября 2016 года

6. A. Konevskich "Luminosity determination in ALICE at the Large Hadron Collider", IEEE Nuclear Science Symposium 2016

<http://www.nss-mic.org/2016/program/ListProgramDB.asp?session=N35>

7. T. Karavicheva, "The Fast Interaction Trigger detector for the ALICE Upgrade", ICPPA-2016, Moscow, Russia

8. D.A. Finogeev, V.A. Grigoryev, V.A. Kaplin, O.V. Karavichev, T.L. Karavicheva, A.S. Konevskikh, A.B. Kurepin, A.N. Kurepin, V.A. Loginov, A.I. Mayevskaya, Yu.A. Melikyan, I.V. Morozov, D.V. Serebryakov, A.I. Shabanov, M. Slupecki, A.A. Tikhonov and W.H. Trzaska "Performance study of the fast timing Cherenkov detector based on a microchannel plate PMT"; ICPPA-2016, Moscow, Russia

9. А.Б.Курепин, Н.С.Топильская «Проект эксперимента AFTER с фиксированной мишенью на пучках коллайдера LHC для физики адронов и столкновений тяжелых ионов» Международная сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий», Дубна, 12-15 апреля 2016 г. Послано в печать в ЭЧАЯ.

10. Н.С.Топильская, А.Б.Курепин « Heavy ion collisions in a fixed target mode at the LHC beams» Международный Балдинский Семинар ISHEPP_ XXIII, Дубна, Россия, 19-24 сентября 2016г, Послано в печать в European Physical Journal

11. Igor Pshenichnov, Ulyana Dmitrieva, *On forward protons and photons produced in PbPb collisions at the LHC*, Workshop on Proton and Photon-induced nuclear collisions at the LHC, ЦЕРН, Женева, 08.07.2016

Доклады на совещаниях коллаборации ALICE в 2016 году:

1. T.L. Karavicheva, V. Kaplin, D. Serebryakov, I. Morozov "Fit at P2"

https://indico.cern.ch/event/586581/contributions/2363157/attachments/1369681/2076688/FIT_Point2_10-11-12-V2.pdf

2. T. Karavicheva, V. Kaplin, D. Serebryakov, I. Morozov "Fit Front end electronics and readout"

<https://indico.cern.ch/event/586581/contributions/2363151/attachments/1369666/2076738/fit0510.pdf>

3. Yu.Melikya « Analysis of T0+ beam test result» https://indico.cern.ch/event/586581/contributions/2363163/attachments/1369757/2076833/Analysis_of_T0_beam_test_results.pdf
4. T.Karavicheva, V.Kaplin, D.Serebryakov, I.Morozov, W.Trzaska “Fit at P2” https://indico.cern.ch/event/572977/contributions/2319048/attachments/1349853/2037134/FIT_Point2_6-10-12-V1.pdf
5. T.Karavicheva, V.Kaplin, D.Serebryakov, A.Tikhonov, W.Trzaska “Fit update detector & readout & trigger system” https://indico.cern.ch/event/572977/contributions/2319099/attachments/1349858/2037146/FIT_meeting-06-10-2016.pdf
6. V.Kaplin, T.Karavicheva, D.Serebryakov, A.Tikhonov “Fit front end electronics & Readout” <https://indico.cern.ch/event/572977/contributions/2319050/attachments/1349911/2037253/fit0510.pdf>
7. T.Karavicheva, D.Finogeev, V.Kaplin, A.Konevskich, A.Kurepin, D.Serebryakov, A.Tikhonov, “Fit T0+ 2016 activity and test results” <https://indico.cern.ch/event/556840/contributions/2243652/attachments/1310395/1960669/TK-FIT-T0-14-07-2016.pdf>
8. T.Karavicheva, V.Kaplin, D.Serebryakov, A.Tikhonov “Fit front end electronics & Readout” https://indico.cern.ch/event/556840/contributions/2243653/attachments/1310265/1960207/FIT_opionA_1960207/FIT_opionA_1960207.pdf
9. T.Karavicheva “T0+/FIT activities at P2” <https://indico.cern.ch/event/527243/FIT-T0-12-05-2016.pptx>
10. A.Maevskaya, Update on simulation. <https://indico.cern.ch/event/572977/contributions/2319089/attachments/1349886/2037327/FITv5October2016.pdf>
11. A.Maevskaya, Update on simulation. <https://indico.cern.ch/event/572977/contributions/2319089/attachments/1349886/2037327/FITv5October2016.pdf>
12. A.Maevskaya, FIT simulation Status report <https://indico.cern.ch/event/514653/contributions/2027729/attachments/1251627/1845752/FITSimStatusMar16.pdf>
13. A.Maevskaya, T0 QA status <https://indico.cern.ch/event/588403/contributions/2372229/attachments/1371653/2080635/T0QA15Nov2016.pdf>
14. A.Maevskaya, T0 QA status <https://indico.cern.ch/event/588239/contributions/2371458/attachments/1370761/2078881/T0QA13Nov2016.pdf>

15. A.Maevskaya, T0 QA status
<https://indico.cern.ch/event/587308/contributions/2366801/attachments/1370308/2077956/T0QA11Nov2016.pdf>
16. A. Maevskaya, T0 QA status
<https://indico.cern.ch/event/581318/contributions/2357443/attachments/1364008/2065401/T0QA1Nov2016.pdf>
17. A.Maevskaya, T0 QA status
https://indico.cern.ch/event/559243/contributions/2256553/attachments/1323594/1986048/T0QA_16082016.pdf
18. A. Maevskaya, T0 QA status
<https://indico.cern.ch/event/527916/contributions/2161101/attachments/1270417/1882316/T0QALHC16de.pdf>
19. A. Konevskikh. «Latest results of luminosity scan performed with T0»
https://indico.cern.ch/event/497844/contributions/2309916/attachments/1343789/2024941/Latest_results_of_luminosity_scan_performed_with_T0_1.pdf
20. A. Konevskikh. «Update on pp 2015 vdM analysis»
https://indico.cern.ch/event/494665/contributions/2005586/attachments/1223896/1790667/vdm4634_05022016.pdf
- Доклад на всероссийской конференции:
У.А.Дмитриева, И.А.Пшеничных, *Ядерная резонансная флуоресценция в столкновениях ядер свинца на БАКе*, 59-я Всероссийская научная конференции МФТИ, Долгопрудный, МФТИ, .11.2016, труды конференции
http://conf59.mipt.ru/static/reports_pdf/1292.pdf
- У.А.Дмитриевой защищена выпускная квалификационная работа на степень бакалавра на тему «Проявления эффектов ядерной структуры в ультрапериферических столкновениях релятивистских ядер», Москва, ИЯИ РАН, 06.07.2016

1.2 Исследование рождения векторных мезонов в адрон-ядерных и ядерно-ядерных взаимодействиях на установке HADES (GSI, Германия)

Руководитель: ведущий научный сотрудник, кандидат физ-мат. наук Ф.Ф. Губер

1.2 РЕФЕРАТ

На установке HADES исследовались азимутальные потоки заряженных частиц, образующихся в результате Au+Au столкновений при энергии налетающего ядра 1.23 ГэВ на нуклон. Анизотропные потоки частиц являются важной характеристикой для описания свойств и эволюции системы, образующейся в ядро-ядерном взаимодействии. При энергиях пучка порядка 1-2 ГэВ на нуклон, основная мотивация изучения коллективных потоков связана с исследованием уравнения состояния ядерной материи. Исследование уравнения состояния ядерной материи посредством оценки её сжимаемости позволяет на макроскопическом уровне оценить массы нейтронных звёзд, что важно для понимания эволюции звёзд и астрофизики в целом.

Проведен анализ систематических погрешностей определения разрешения угла плоскости симметрии столкновения. Установлено, что результаты предварительного анализа коллективных потоков в эксперименте HADES подвержены влиянию так называемых «нон-флоу» эффектов – короткодействующих корреляций частиц, не связанных с общей плоскостью симметрии столкновения. Проведено подробное исследование различных систематических эффектов, влияющих на точность определения разрешения методов трех подсобытий, таких как влияние коррекций неравномерного аксептанса детектора, влияние величины зазора по быстрой между подсобытиями, влияние выбора вспомогательных подсобытий и симметричности детектора в направлении осей x и y . Дополнительно проведено сравнение различных способов разделения детектора для выбора двух случайных подсобытий. Данные исследования являются неотъемлемой частью анализа коллективных потоков на эксперименте HADES и будут использованы при конечной оценке их систематических неопределенностей.

Начаты работы по модернизации переднего 288-ми канального сцинтилляционного годоскопа. Этот годоскоп планируется использовать для определения центральности и ориентации угла плоскости реакции в столкновениях ядер серебра при энергии 1.65 АГэВ, которые планируется провести в 2018 г. В 2016 году проведено моделирование точности определения центральности и угла плоскости реакции как для уже существующего переднего годоскопа со сцинтилляционными детекторами, свет с которых детектируется с помощью ФЭУ, так и нового годоскопа со сцинтилляционными детекторами, свет с которых собирается переизлучающим оповолокном и детектируется полупроводниковыми лавинными микропиксельными фотодиодами. Были изготовлены и протестированы несколько вариантов таких детекторов с целью улучшения временного разрешения.

В 2016г. продолжена работа по созданию новой детекторной системы установки ХАДЕС – 978-ми канального электромагнитного калориметра для проведения исследований на пучках ядер как действующего ускорителя SIS18 в GSI, так и создаваемого ускорителя SIS-100 на ФАИР в Дармштадте, Германия. На созданном с помощью группы ИЯИ РАН испытательном стенде были проведены калибровка и выбор рабочего HV-напряжения первых 86 модулей калориметра с трехдюймовыми ФЭУ Hamamatsu R6091. Измерения проводились как на космике, так и на световых импульсах от LED-оптической системы.

1.2.1 Исследование потоков заряженных частиц в столкновениях тяжелых ионов золота Au+Au при энергии налетающего пучка 1.23 ГэВ на нуклон

Коллективные потоки частиц, регистрируемые в экспериментах по изучению столкновений ядер ультрарелятивистских энергий (STAR, PHENIX), рассматриваются в качестве одного из важнейших наблюдаемых, характеризующих образование т. н. кварк-глюонной плазмы (КГП) в таких столкновениях. Вместе с тем интересным представляется и эволюция перехода от фазы адронной материи к фазе КГП в зависимости от начальной энергии сталкивающихся ядер. В этой связи несколькими коллаборациями (STAR, NA61/SHINE, CBM, NICA-MPD) подготовлены, а на действующих экспериментах уже начаты программы сканирования по энергии, связанные с изучением фазовой диаграммы в области около критической точки. Новые возможности по изучению азимутальных потоков имеются теперь и в области энергий порядка 1 ГэВ на нуклон благодаря недавно полученным на установке HADES экспериментальным данным с высокой статистикой в этой области энергий на самой нижней границе предложенной программы сканирования по энергии. Ведущийся в ИЯИ РАН в последние годы анализ азимутальных потоков частиц в Au+Au столкновениях при энергии налетающего пучка 1.23 ГэВ на нуклон, позволил получить указания на существование и более высоких гармоник v_3 и v_4 в азимутальных потоках в этой области энергии. Изучение литературы показало, что в области энергий порядка нескольких ГэВ не имеется публикаций, касающихся ненулевого вклада высоких гармоник v_3 и v_4 . Поэтому требуется тщательное изучение возможных систематических эффектов. В 2016 году было

продолжено изучение возможных систематических эффектов в результатах, полученных ранее в 2013-2014 годах. В частности, выполнен анализ систематики в определении плоскости симметрии столкновений. Найдено, что суммарные систематические погрешности определения разрешения угла плоскости симметрии столкновения методом трех подсобытий составляют не более 5%, в то время как вклад «нон-флоу» эффектов в методе двух случайных подсобытий достигает 30%.

1.2.2 Стендовые испытания модулей электромагнитного калориметра EMC для модернизации установки HADES (GSI, Darmstadt)

В рамках Программы модернизации установки HADES планируется замена существующего Pre-Shower-детектора, установленного на передних углах $18^\circ < \theta < 45^\circ$, на электромагнитный калориметр EMC с черенковскими детекторными модулями из свинцового стекла. Основным преимуществом нового прибора будет существенное повышение эффективности разделения пионов и электронов при более высоких значениях импульса этих частиц ($p > 400$ МэВ/с).

В 2016 году, в ГСИ проводились стендовые испытания прототипных детекторных модулей электромагнитного калориметра EMC с использованием космического излучения и LED-оптической системы со светодиодным источником. Измерения проведены в периоды 23 июня – 08 июля и 13 сентября – 06 октября 2016 г.

Испытуемые детекторные модули (Рис.2.2.1) состояли из радиатора на основе свинцового стекла, ФЭУ Hamamatsu R6091 с HV-делителем, пластмассовой шайбы для фиксации положения ФЭУ, вращающейся чашки для вывода высоковольтных и сигнальных кабелей, корпусов из латуни и алюминия, LED-оптической системы со светодиодным источником.

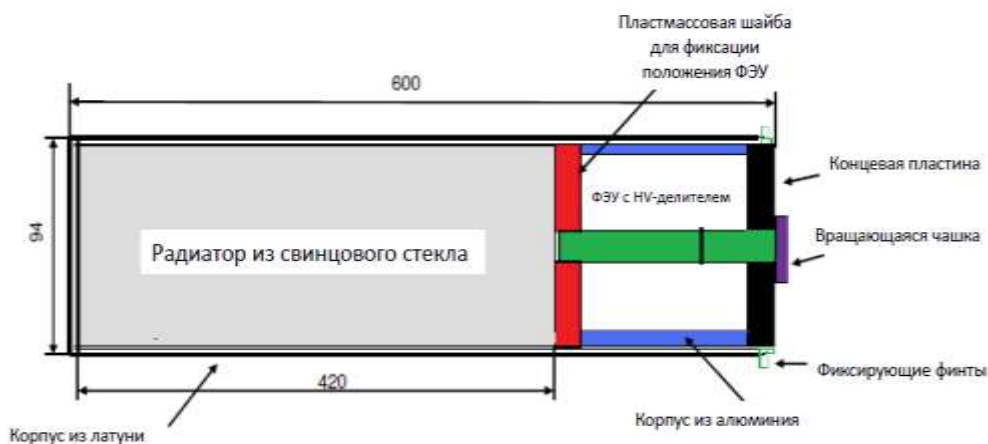


Рисунок 1.2.2.1 - Конструкция детекторного модуля электромагнитного калориметра EMC

Основная цель стендовых испытаний прототипных ЕМС-модулей состояла в следующем:

- выбор рабочего HV-напряжения на ФЭУ Hamamatsu R6091 в испытуемых модулях при средней величине амплитуды сигнала 1500 мВ в условиях регистрации космического излучения и световых импульсов от LED-оптической системы;
- изучение возможностей использования LED-оптической системы для амплитудной калибровки индивидуальных модулей;
- выявление дефектных модулей и их подготовка для соответствующего ремонта;
- определение уровня утечки света (плохой свето-изоляции) на верхних и нижних поверхностях корпусов отдельных дефектных модулей;
- выработка рекомендаций для сборки и монтажа модулей.

В ходе стендовых испытаний ЕМС-модулей была выполнена следующая работа:

1. Проведена модернизация рабочего стенда для испытаний ЕМС-модулей.

Усовершенствованный рабочий стенд для испытаний ЕМС-модулей (Рис. 2.2.2) состоит из следующих элементов:

- стендовая рама №1 с 4 каналами для размещения триггерных «ВЕРХ-НИЗ» телескопов сцинтилляционных детекторов и 4 ЕМС-модулей для испытаний на космическом излучении и LED-оптической системе (1);
- стендовая рама №2 (в стадии сборки) для испытаний ЕМС-модулей с использованием космического излучения (2);
- CAEN SY 1527LC Универсальная многоканальная система высоковольтного HV-питания для стендовой рамы №1 (3);
- ISEG система высоковольтного HV-питания для стендовой рамы №2 (4);
- NIM-крейт с модулями электроники для генерации триггерных сигналов космического излучения (5);
- 80 MHz Function / Arbitrary Waveform Генератор для запуска LED-оптической системы со светодиодным источником (6);
- Цифровой осциллограф RTO 1044 (7).

В ходе модернизации стенда для испытаний ЕМС-модулей были собраны и отлажены 4-канальные схемы совпадений и «ИЛИ» (для триггерных «ВЕРХ-НИЗ» телескопов) на основе NIM-электроники (Рис. 1.2.2.2) для формирования внешнего триггерного сигнала космического излучения, запускающего цифровой осциллограф RTO 1044. Таким образом, при наличии 4-х аналоговых сигналов с ЕМС-модулей имеется возможность одновременных испытаний 4-х ЕМС-модулей.

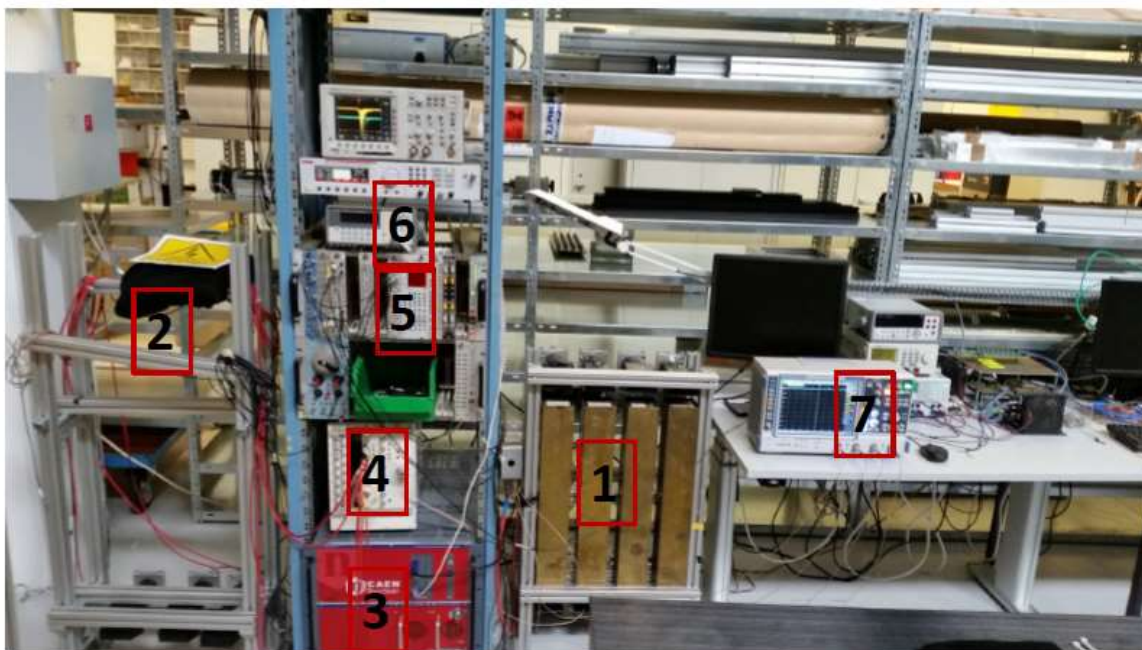


Рис.1.2.2.2 - Рабочий стенд для испытаний EMC-модулей. Основные компоненты испытательного стенда обозначены цифрами, см. текст.

2. Собрана и отлажена новая LED-оптическая система со светодиодным источником для амплитудной калибровки индивидуальных EMC-модулей.

В оптической системе для амплитудной калибровки EMC-модулей используется светодиод (LED) с длиной волны излучения в голубом диапазоне. В ходе измерений LED последовательно подсоединялся к испытываемому модулю. LED запускался 80 MHz Function / Arbitrary Waveform Генератором с параметрами: частота – 1 kHz; амплитуда импульса – 3.85 V; смещение нулевого уровня сигнала +1.045 V; ширина импульса – 10 ns; длительность заднего фронта импульса – 5 ns.

3. Проведены испытания 86 шт. EMC-модулей.

Проведены калибровка и выбор рабочего HV-напряжения на ФЭУ Hamamatsu R6091 в испытываемых модулях при средней величине амплитуды сигнала 1500 мВ в условиях регистрации космического излучения и световых импульсов от LED-оптической системы. Перед измерениями каждый EMC-модуль оборачивался чёрной лентой и помещался в свето-изоляционный отсек рабочего испытательного стенда.

Описание рабочих методов испытаний и данные измерений представлены в Электронном Журнале испытаний.

Результаты испытаний и выводы.

1. Проведены испытания и паспортизация 86 ЕМС-модулей.

Испытанные ЕМС-модули классифицируются по 4-м градациям качества сборки и функционирования:

А) *ХОРОШЕЕ* качество – 61 модуль (около 71% от суммарного числа испытанных ЕМС-модулей)

Для этих модулей успешно проведены калибровка и выбор рабочего HV-напряжения на ФЭУ Hamamatsu R6091 при средней величине амплитуды сигнала 1500 мВ от космического излучения и световых LED-импульсов.

Однако почти во всех «хороших» модулях наблюдается большая утечка света (плохая свето-изоляция) на «ВЕРХНЕЙ» и/или «НИЖНЕЙ» плоскостях корпуса модуля. Проведение тестов на космическом излучении было возможным только при использовании черной ленты и материи для свето-изоляции ЕМС-модулей.

Таблица с номерами ЕМС-модулей и соответствующими выбранными значениями HV-напряжения представлены в Электронном Журнале испытаний.

Б) Механическое ПОВРЕЖДЕНИЕ – 13 модулей

Эти модули имеют в основном повреждения на «НИЖНЕЙ» плоскости корпуса модуля: разрушена пайка в механическом соединении «НИЖНЕЙ» крышки-пластины с корпусом модуля. В качестве примера на Рис. 1.2.2.3 показаны места механических повреждений «НИЖНЕЙ» крышки-пластины на ЕМС-модуле №71, приводящих к утечке света (плохой свето-изоляции) в указанных местах и нарушению механической прочности корпуса модуля.

В) Полностью отсутствует выходной сигнал (включая собственные шумы ФЭУ) – 4 модуля

Возможной причиной полного отсутствия выходного сигнала является нарушение электрического контакта сигнального кабеля с анодом ФЭУ.

Г) Отсутствует выходной сигнал при подаче световых импульсов в LED-оптической системе – 8 модулей

Возможная причина: обрыв оптического кабеля внутри ЕМС-модуля.

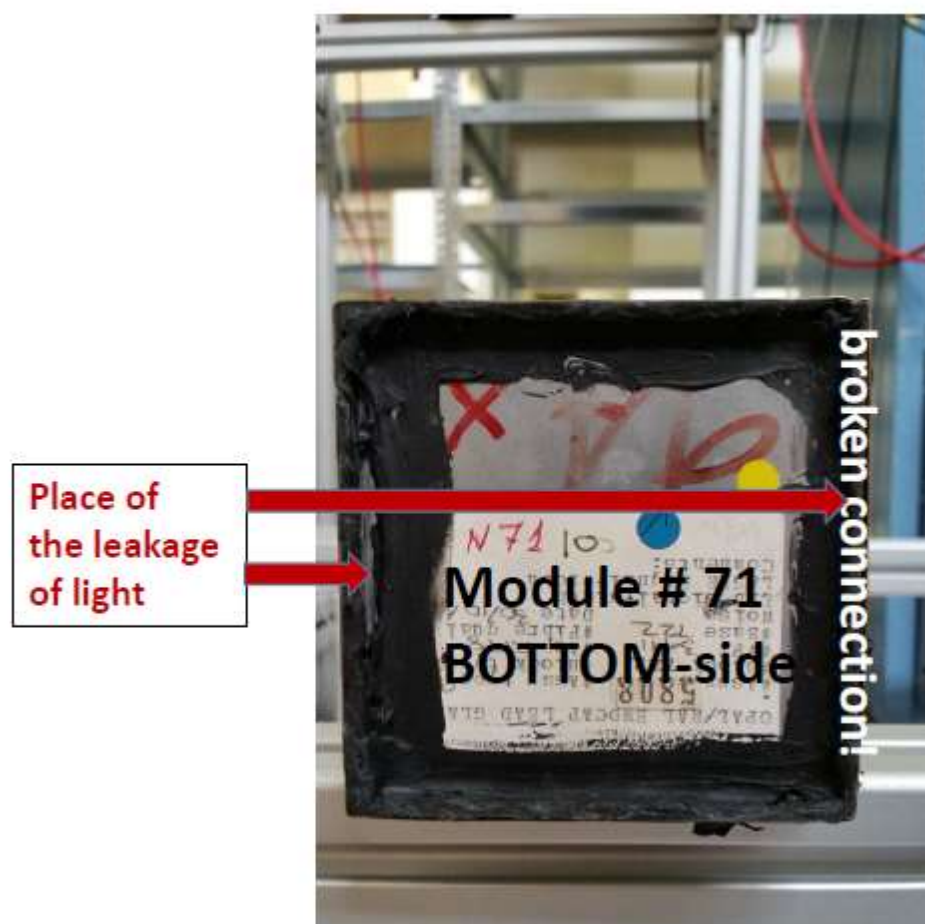


Рис. 1.2.2.3 Пример механических повреждений «НИЖНЕЙ» крышки-пластины на ЕМС-модуле №71, приводящих к утечке света (плохой светоизоляции) в указанных местах и нарушению механической прочности корпуса модуля

2. LED-оптическая система со светодиодным источником может быть успешно использована для амплитудной калибровки (выбор рабочего HV-напряжения на ФЭУ) индивидуальных ЕМС-модулей с точностью измерения амплитуды сигнала (1500 мВ) 10-15 %.

Стендовые испытания показали, что различия в величине амплитуды сигнала для индивидуальных ЕМС-модулей на порядок больше, чем ошибка, определяемая качеством оптического соединения LED-источника с конкретным ЕМС-модулем. Полученный результат может свидетельствовать о реальных различиях ЕМС-модулей, определяемых их сборкой: различным качеством соединения оптического кабеля и радиатора или различием в отражательной способности боковых граней радиаторов из свинцового стекла.

3. В существующей схеме HV-делителя высоковольтного эл. напряжения ФЭУ R6091 отсутствует нагрузочное сопротивление R_L , рекомендованное фирмой-изготовителем Hamamatsu.

Рекомендации

1. С целью устранения утечки света, соединения «НИЖНИХ» крышек-пластин с корпусами ЕМС-модулей должны быть тщательно пропаяны.

2. Для отдельных ЕМС-модулей должно быть проверено качество оптических контактов ФЭУ и радиаторов из свинцового стекла.

3. В HV-делителях высоковольтного эл. напряжения ФЭУ R6091 должно быть установлено нагрузочное сопротивление R_L .

Планы

В стендовых испытаниях модулей электромагнитного калориметра ЕМС, запланированных на первую половину 2017 г., должна быть проведена:

- паспортизация **230-250 ЕМС-модулей**, необходимых для сборки и монтажа 2 секторов электромагнитного калориметра ЕМС установки HADES;
- проведён ремонт дефектных ЕМС-модулей, испытанных в 2016 г.

1.2 Список публикаций HADES за 2016 г.

1. Inclusive $\{\Lambda\}$ production in proton-proton collisions at 3.5 GeV.
HADES Collaboration (J. Adamczewski-Musch, ...M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Lebedev, A.Reshetin, A.Sadovsky, *et al.*), 12 pp.
e-Print: arXiv:1611.01040 [nucl-ex]
2. The Λp interaction studied via femtoscopy in p + Nb reactions at $\sqrt{s_{NN}}=3.18$ GeV
HADES Collaboration (J. Adamczewski-Musch ...M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Lebedev, A.Reshetin, A.Sadovsky, ... et al.), 12 pp. Phys.Rev. C94 (2016) no.2, 025201 DOI: 10.1103/PhysRevC.94.025201 e-Print: arXiv:1602.08880 [nucl-ex]
3. Strange hadron production at SIS energies: an update from HADES. HADES Collaboration (M. Lorenz, ... M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Lebedev, A.Reshetin, A.Sadovsky, *et al.*). 9 pp. J.Phys.Conf.Ser. 668 (2016) no.1, 012022 DOI: 10.1088/1742-6596/668/1/012022
4. Statistical model analysis of hadron yields in proton-nucleus and heavy-ion collisions at SIS 18 energies
Statistical hadronization model analysis of hadron yields in p + Nb and Ar + KCl at SIS18 energies. HADES Collaboration (G. Agakishiev, ... M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Lebedev, A.Reshetin, A.Sadovsky, *et al.*). 8 pp. Eur.Phys.J. A52 (2016) no.6, 178 DOI: 10.1140/epja/i2016-16178-x e-Print: arXiv:1512.07070 [nucl-ex]

1.3 Исследование рождения адронов в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях на ускорителе SPS в ЦЕРН (эксперимент NA61)

Руководитель : зав. ЛРЯФ, доктор физ- мат. наук А.Б. Курепин

1.3 РЕФЕРАТ

Одной из основных задач эксперимента NA61(SHINE) в ЦЕРНе является поиск критической точки сильновзаимодействующей ядерной материи и детальное исследование начала деконфаймента. Для поиска критической точки необходимы измерения наблюдаемых, чувствительных к исследуемым эффектам. Такими наблюдаемыми являются множественность и спектральные характеристики вторичных адронов, включая странные барионы/антибарионы, и пособытийные флуктуации некоторых физических величин, таких как множественность, заряды, поперечные импульсы, отношения выхода странных и нестранных мезонов. Ожидается, что резкое увеличение величины флуктуаций является отличительной чертой физических явлений вблизи критических областей. Программа исследований NA61 включает проведение измерений выходов заряженных частиц в центральных столкновениях ядер ${}^7\text{Be} + {}^9\text{Be}$, $\text{Ar} + \text{Sc}$ и $\text{Xe} + \text{La}$ при энергиях 13, 20, 30, 40, 80, 158 ГэВ на нуклон и рассчитана до 2018 г.

В 2016г. на установке NA61 состоялся целый ряд физических и тестовых сеансов с участием сотрудников ИЯИ РАН. Проведены измерения выходов заряженных частиц для реакции $\text{Pb}+\text{Pb}$ при энергиях налетающих ядер свинца 13, 30 и 150 АГэВ. Полученные данные будут использоваться также для анализа азимутальных потоков идентифицированных частиц, образовавшихся в этой реакции и анализа флуктуаций поперечного импульса и множественности заряженных частиц.

На установке NA61 получены новые экспериментальные данные по рождению частиц в протон-ядерных взаимодействиях. Полученные результаты по выходам пионов и каонов необходимы для анализа данных в нейтринных экспериментах в FERMILAB.

Выполнен анализ распределений по флуктуациям поперечного импульса и множественности для отрицательных пионов, образующихся в этих реакциях $p+p$, $\text{Be}+\text{Be}$ и $\text{Ar}+\text{Sc}$ при энергиях в диапазоне от 13 до 158 ГэВ на нуклон. Полученные результаты для центральных событий не дают указаний на усиление флуктуаций в данной области энергий и масс сталкивающихся ядер. Отбор событий по центральности проводился с использованием переднего адронного калориметра, разработанного и изготовленного в ИЯИ РАН. В конце 2016г. проведены и в течение 2017 г. и 2018 г. будут продолжены измерения для реакций $\text{Xe}+\text{La}$ и $\text{Pb}+\text{Pb}$ в этой же области энергий, что позволит значительно расширить область поиска критической точки на фазовой диаграмме.

Разработана методика и выполнен анализ направленных коллективных потоков в столкновениях ядер свинца при энергии налетающих ядер 30 АГэВ. Экспериментальные данные для этого анализа были получены в тестовом сеансе на установке NA61/SHINE ранее, в ноябре 2015г. Получены значения коллективных направленных потоков при этой энергии для неидентифицированных частиц в нескольких диапазонах по центральности взаимодействия. Показана перспективность систематического анализа коллективных потоков идентифицированных частиц на этой установке при разных энергиях и размерах сталкивающихся ядер.

1.3 ВВЕДЕНИЕ

Уникальность эксперимента NA61/SHINE в ЦЕРН заключается в том, что на этой установке ведутся эксперименты по нескольким направлениям:

- поиск критической точки сильновзаимодействующей ядерной материи в ядро-ядерных столкновениях и детальное исследование начала деконфайнмента, т.е. поиск и исследование перехода между двумя фазами сильновзаимодействующей материи;
- измерения сечений выхода заряженных адронов в протон-ядерном взаимодействии для нейтринной физики;
- измерения сечений в адрон-ядерных реакциях для физики космических лучей.

1.3 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1.3.1 Исследование перехода между фазами сильновзаимодействующей материи

Поиск и исследование перехода между двумя фазами сильно- взаимодействующей материи в ядро-ядерных столкновениях ведутся в настоящее время также на ускорителе RHIC (США) и планируются на вновь создаваемых ускорительных комплексах NICA в Дубне и FAIR в Дармштадте, Германия. Области фазовой диаграммы, которые исследуются (или будут исследоваться) в этих экспериментах, показаны на рис. 3.1.1. Ряд моделей сильных взаимодействий предсказывают резкую фазовую границу (фазовый переход 1-го рода) между адронным газом и кварк-глюонной плазмой, заканчивающуюся в критической точке (рис. 1.3.1.1).

Точное положение критической точки на фазовой плоскости неизвестно. Поэтому в эксперименте NA61/SHINE поиск ее положения осуществляется посредством сканирования этой плоскости в реакциях с различными массами ядер при энергиях налетающих ядер в диапазоне от 13 до 158 ГэВ/с на нуклон.

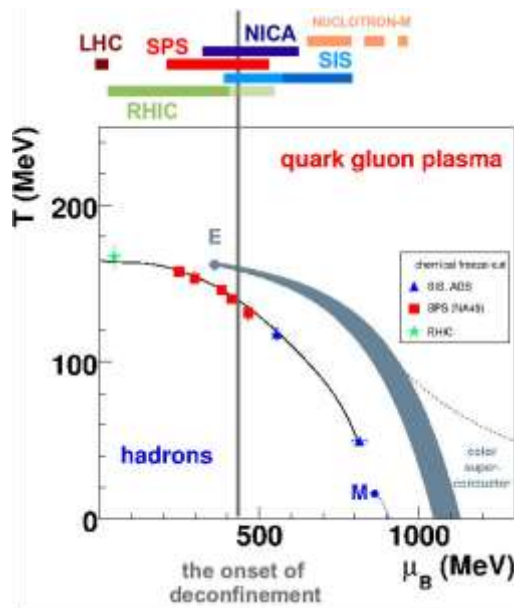


Рисунок 1.3.1.1 - Переход между двумя фазами сильно взаимодействующей материи: адронный газ и кварк-глюонная плазма.

В NA61/SHINE исследуются событийные (event-by-event) флуктуации так называемых сильно интенсивных величин, которые представляют собой комбинации первых и вторых моментов распределений таких физических величин, как множественность и поперечные импульсы вторичных частиц. Особенность сильно интенсивных величин состоит в том, что они не зависят как от объема, так и от флуктуации объема взаимодействующих ядер. Резкое увеличение величины таких флуктуаций может являться отличительной чертой физических явлений вблизи критических областей (рис. 1.3.1.2, слева). Исследуются также отношения выхода странных и нестранных мезонов. Первоначально программа исследований NA61/SHINE включала проведение измерений выходов заряженных частиц в центральных столкновениях ядер ${}^7\text{Be} + {}^9\text{Be}$, $\text{Ar} + \text{Sc}$ и $\text{Xe} + \text{La}$ при импульсах 13, 20, 30, 40, 75, 158 ГэВ/с на нуклон. В конце 2015 года программа была расширена – теперь она включает и исследование коллективных потоков в столкновениях ядер свинца в том же диапазоне импульсов. Вся программа измерений рассчитана до 2018 г. (рис. 1.3.1.2, справа). Другим важным направлением экспериментальных работ является наблюдение подавления выхода адронов с большим поперечным импульсом в $\text{Au} + \text{Au}$ столкновениях (гашение струй в ядерной материи с высокой плотностью).

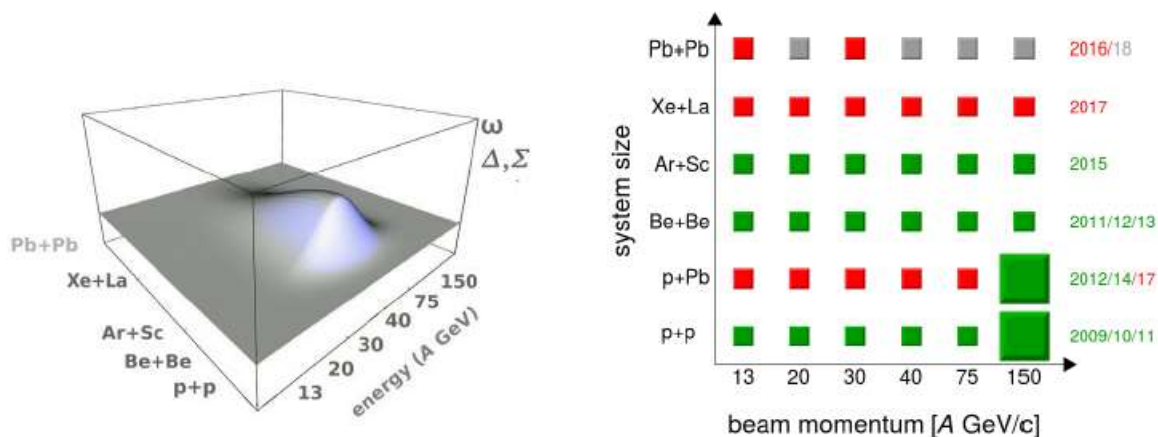


Рисунок 1.3.1.2 Слева - ожидаемое поведение сильно интенсивных величин в области критической точки фазовой диаграммы. Справа - диаграмма набора данных для ионной программы эксперимента NA61/SHINE. Зелеными квадратами показаны уже законченные измерения, красными - программа измерений на период 2016-2018 г.г. Серыми квадратами показаны планируемые измерения Pb + Pb, утвержденные программным комитетом ЦЕРНа в конце 2015г.

1.3.1.2 Измерения выходов адронов в протон-ядерных реакциях

В рамках эксперимента NA61 выполняются измерения с высокой точностью выходов заряженных пионов и каонов в реакциях взаимодействия протонов с ядрами при импульсах от 30 до 400 ГэВ/с. Уже полученные ранее данные для реакции p+C при импульсе налетающих протонов 31 ГэВ/с были использованы для определения потоков нейтрино в эксперименте T2K и минимизации систематических ошибок в определение параметров смешивания. В настоящее время ведутся измерения выходов пионов и каонов в эксперименте NA61/SHINE для p+A реакций, которые необходимы для нейтринных экспериментов в FNAL (USA);

1.3.1.3 Измерения сечений в адрон-ядерных реакциях для физики космических лучей

Обсерватория Пьера Оже и эксперимент KASCADE анализируют широкие атмосферные ливни с целью получения информации об источниках космических лучей. В эксперименте NA61/SHINE выполнены измерения сечений образования заряженных частиц при взаимодействии пионов с ядрами углерода при энергии пионов 158 и 350 ГэВ. Эти сечения необходимы для реконструкции событий космического излучения. Результаты NA61/SHINE помогут улучшить разрешение в экспериментах на космических лучах, необходимое для определения элементного состава космического излучения при высоких энергиях.

Для определения центральности и угла плоскости реакции в ядро-ядерных столкновениях для исследования азимутальных коллективных потоков частиц, в эксперименте используется передний адронный калориметр фрагментов, который был разработан и изготовлен в Институте ядерных исследований РАН. Основная активность группы ИЯИ РАН в данном проекте связана с созданием адронного калориметра высокого разрешения, поддержкой его функционирования в физических экспериментах NA61/SHINE и участием в анализе экспериментальных данных с получением конечных физических результатов.

1.3 ПУБЛИКАЦИИ

1. Measurements of $\pi^\pm$, $K^\pm$, K^0_S , Λ and proton production in proton-carbon interactions at 31 GeV/c with the NA61/SHINE spectrometer at the CERN SPS NA61/SHINE Collaboration (N. Abgrall *et al.*). 76 pp. Eur.Phys.J. C76 (2016) no.2, 84 CERN-PH-EP-2015-278 DOI: 10.1140/epjc/s10052-016-3898-y e-Print: arXiv:1510.02703 [hep-ex]
2. Production of Λ -hyperons in inelastic p+p interactions at 158 GeV/c. NA61/SHINE Collaboration (A. Aduszkiewicz *et al.*). 19 pp. Eur.Phys.J. C76 (2016) no.4, 198 CERN-PH-EP-2015-274 DOI: 10.1140/epjc/s10052-016-4003-2 e-Print: arXiv:1510.03720 [hep-ex]
3. Measurements of $\pi^\pm$ differential yields from the surface of the T2K replica target for incoming 31 GeV/c protons with the NA61/SHINE spectrometer at the CERN SPS NA61/SHINE Collaboration (N. Abgrall *et al.*). 23 pp. Eur.Phys.J. C76 (2016) no.11, 617 CERN-EP-2016-057 DOI: 10.1140/epjc/s10052-016-4440-y e-Print: arXiv:1603.06774 [hep-ex] |направлено в Eur. Phys. J. C
4. Multiplicity and transverse momentum fluctuations in inelastic proton-proton interactions at the CERN Super Proton Synchrotron NA61/SHINE Collaboration (A Aduszkiewicz *et al.*). 16 pp. CERN-PH-EP-2015-273 e-Print: arXiv:1510.00163 [hep-ex] направлено в Eur. Phys. J. C
5. Two-particle correlations in azimuthal angle and pseudorapidity in inelastic p+p interactions at the CERN Super Proton Synchrotron NA61/SHINE Collaboration (A. Aduszkiewicz *et al.*). 14 pp. CERN-EP-2016-234 e-Print: arXiv:1610.00482 [nucl-ex] направлено в Eur. Phys. J. C
6. Hadron calorimeter (PSD) with new photo-detectors (MPPC) in NA61 experiment at CERN. Marina Golubeva, Fedor Guber, Alexander Ivashkin, Alexander Izvestnyy, Alexey Kurepin, Sergey Morozov, Oleg Petukhov, Ilya Selyuzhenkov, Ilya Svintsov, Arkadiy Taranenko Направлено в журнал Journal of Physics: Conference series

1.4 Исследование свойств сжатой барионной материи на установке CBM в GSI (Дармштадт, Германия)

1.4 РЕФЕРАТ

Для установки CBM на сооружаемом ускорительном комплексе ФАИР в ИЯИ РАН в 2016г было развернуто изготовление и тестирование 44 модулей переднего адронного калориметра фрагментов (PSD – Projectile Spectator Detector), который будет использоваться в установке CBM для определения глобальных характеристик событий в ядро-ядерных столкновениях таких как центральность и положение плоскости реакции. В течение 2016 г. велись работы по тестированию различных прототипов аналоговой и считывающей электроники для этого калориметра как на космике в ИЯИ РАН, так и на тестовых пучках в ЦЕРНе. Исследовался отклик модулей калориметра на пучках протонов в ЦЕРНе с различными типами микропиксельных лавинных фотодиодов, предварительно облученными нейтронами, для определения наиболее подходящих фотодиодов для модулей, т.к. калориметр на установке CBM будет работать в условиях больших потоков нейтронов и высоких радиационных дозах. В 2016 г. подготовлено соглашение между ИЯИ РАН, ОИЯИ и ФАИР об использовании части изготовленных в ИЯИ РАН модулей на установке BM@N на ускорителе НУКЛОТРОН в ОИЯИ.

1.4 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для установки CBM на сооружаемом ускорительном комплексе ФАИР в ИЯИ РАН в 2016г было развернуто изготовление и тестирование на космике 44 модулей переднего адронного калориметра фрагментов (PSD – Projectile Spectator Detector) (рис. 1.4.1.1). Этот калориметр будет использоваться в установке CBM для определения таких глобальных характеристик событий в ядро-ядерных столкновениях как центральность и угол плоскости реакции.

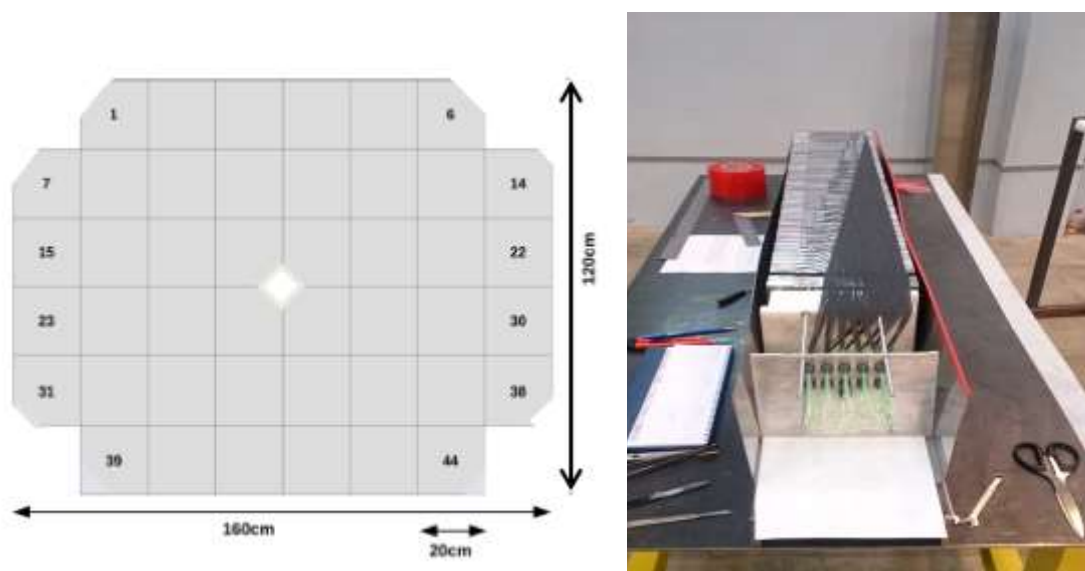


Рисунок 1.4.1.1 - Слева, схема калориметра (вид по пучку). Справа, процесс сборки одного из модулей в ИЯИ РАН

В течение 2016г. велись работы по тестированию различных прототипов аналоговой и считывающей электроники для этого калориметра как на космике в ИЯИ РАН, так и на тестовых пучках в ЦЕРНе.

Исследовался отклик модулей калориметра на пучках протонов в ЦЕРНе с различными типами микропиксельных лавинных фотодиодов, предварительно облученными нейтронами, для определения наиболее подходящих фотодиодов для модулей, т.к. калориметр на установке CBM будет работать в условиях больших потоков нейтронов и высоких радиационных дозах.

В 2016г. руководством ФАИР было объявлено, что в связи с задержкой строительства ускорительного комплекса, в течение нескольких последующих лет, (так называемая ФАИР-фаза-0), отдельные детекторные системы установки CBM могут временно использоваться на других ускорительных комплексах в мире. В связи с этим, в 2016 г. подготовлено соглашение между ИЯИ РАН, ОИЯИ и ФАИР об использовании части изготовленных в ИЯИ РАН модулей на установке BM@N на ускорителе НУКЛОТРОН в ОИЯИ.

1.4 ПУБЛИКАЦИИ

1. T. Ablyazimov et al., (CBM Collaboration), Challenges in QCD matter physics –The scientific programme of the Compressed Baryonic Matter experiment at FAIR, Report of the CBM Collaboration to the FAIR Scientific Council, <https://arxiv.org/abs/1607.01487> Submitted to European Physical Journal A

2. V. Mikhaylov, F. Guber, A. Ivashkin, A. Kugler, S. Kushpil, V. Kushpil, O. Svoboda, P. Tlustý, V. Ladygin, S. Seddiki, I. Selyuzhenkov, Performance of the forward calorimeters for heavy-ion experiments at FAIR, NICA, and CERN SPS, PoS EPS-HEP2015 (2015) 281

1.5 Исследование коллективных эффектов и не нуклонных степеней свободы в ядрах, переходных процессов в сжатой ядерной материи при столкновениях протонов и тяжёлых ионов с ядрами.», эксперимент MPD/NICA, Дубна

1.5 РЕФЕРАТ

В 2016 г. в рамках мегапроекта НИКА продолжалось сотрудничество ИЯИ РАН – ОИЯИ по разработке переднего адронного калориметра фрагментов для установки MPD/NICA. Подготовлен технический проект калориметра, состоящего из 90 индивидуальных модулей. Предложенный вариант калориметра позволит восстанавливать угол плоскости реакции с точностью в 1.5 раза лучше, чем в ныне существующих экспериментальных установках. Предложен уникальный метод определения центральности взаимодействий с использованием не только энергии, выделенной спектаторами в калориметре, но и пространственного распределения спектаторов по поверхности калориметра

1.5 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В 2016 г. в рамках мегапроекта НИКА продолжалось сотрудничество ИЯИ РАН – ОИЯИ по разработке переднего адронного калориметра фрагментов для установки MPD/NICA. Подготовлен технический проект калориметра, состоящего из 90 индивидуальных модулей, см. рис. 1.5.1.1. Предложенный вариант калориметра обладает точностью восстановления угла плоскости реакции примерно 20^0 - 25^0 , что почти в 1.5 раза лучше, чем в существующих экспериментальных установках.

Представлен новый оригинальный метод определения центральности взаимодействий с использованием не только восстановленной энергии, выделенной спектаторами в калориметре, но и пространственного распределения спектаторов на поверхности калориметра. С этой целью введена новая физическая наблюдаемая, энергетическая асимметрия: $E_{As} = (E_{in} - E_{out}) / (E_{in} + E_{out})$, где E_{in} и E_{out} – энергосвыделения во внутренней и внешней частях калориметра, см. рис. 1.5.1.1. Там же показана корреляция между энергетической асимметрией и полным энергосвыделением в калориметре. Узкие области в корреляционной картине соответствуют определенной центральности.

Новый метод позволяет разрешить неоднозначность в измерении центральности, вызванную утечками энергий спектаторов в отверстие для пучка, а также улучшить точность определения центральности.

В рамках подготовки к производству адронного калориметра, в ИЯИ РАН изготавливается первый супермодуль, состоящий из 9 индивидуальных модулей калориметра.

В 2017 г. начнется основная фаза изготовления модулей переднего адронного калориметра для эксперимента MPD/NICA. Будет изготовлено около трети калориметра. Будут разработаны методы энергетической калибровки продольных секции модулей калориметра с помощью частиц с минимальной ионизирующей способностью. Будут проведены исследования схемы съема сигнала с калориметра, фотодетекторов и аналоговой электроники. Будут проведены Монте-Карло расчеты влияния отклика калориметра на физические параметры установки MPD/NICA в целом.

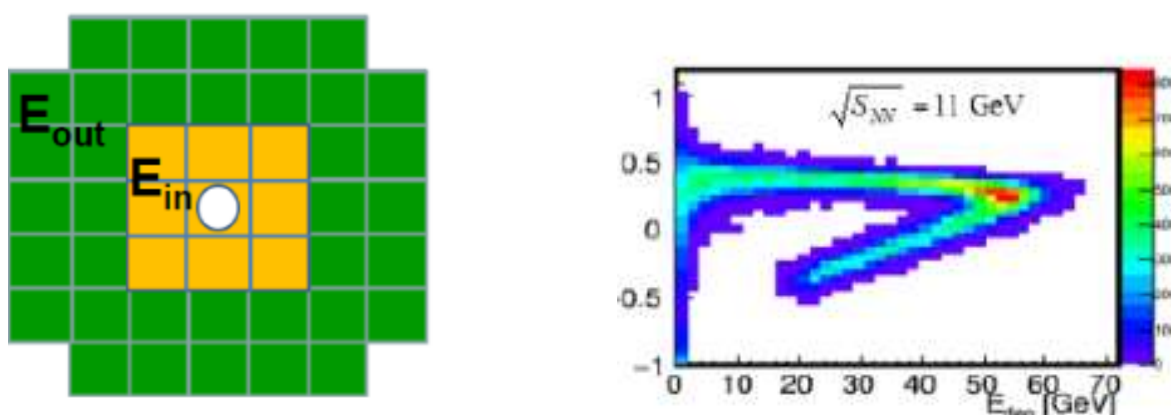


Рисунок 1.5.1.1 Слева - структура калориметра и выделение областей для определения энергетической асимметрии. Справа - корреляция между энергетической асимметрией и полным энергетическим выделением в калориметре.

1.4 ПУБЛИКАЦИИ по эксперименту MPD/NICA за 2016 г.

1. A.B.Kurepin, Study of nuclear fragmentation at MPD/NICA, Baldin ISHEPP XXIII, September 19-24, 2016.
2. M.Golubeva et al., Forward hadron calorimeter (FHCAL) at MPD/NICA, 2nd international conference on particle physics and astrophysics, ICPPA, October 10-14, 2016
3. M.Golubeva et al., Forward hadron calorimeter at MPD/NICA, to be published in Journal of Physics.

1 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в настоящем отчете научные результаты получены в ходе работ сотрудников ИЯИ РАН по изучению протон-ядерных и ядро-ядерных столкновений на экспериментальных установках: ALICE на БАК в ЦЕРНе; NA61 на SPS в ЦЕРНе. Кроме этого, интенсивно велись работы по подготовке будущих экспериментов по изучению этих же явлений: AFTER на БАК в ЦЕРНе; CBM на ускорителе FAIR в GSI; MPD на коллайдере NICA в ОИЯИ, г. Дубна. Выполненные работы характеризуются тематическим и методическим единством, покрывают исключительно широкий диапазон энергий сталкивающихся частиц и ядер, демонстрируют разнообразие и сложность изучаемых характеристик и явлений, связанных со столкновениями релятивистских ядер. В частности, благодаря тщательно отработанной методике и технологии создания передних адронных и электромагнитных калориметров в экспериментах NA61, опыт их создания и эксплуатации может быть успешно перенесён в будущие эксперименты CBM и MPD для создания аналогичных устройств. Принципиально важным является высокий научный уровень исследований, подтверждённый участием в международных мегапроектах вместе с другими институтами России и зарубежными научными центрами, многочисленными публикациями в престижных международных журналах уровня Q1.

Среди результатов 2016 г. можно выделить ряд наиболее важных.

1. В эксперименте ALICE проводились сеансы физических измерений на пучках сталкивающихся протонов и для столкновений протонов с ядрами свинца. Детектор T0 использовался во всех этих сеансах вместе с другими системами. Работы по модернизации, устранению неполадок, поддержанию работоспособности, обеспечению безаварийного процесса измерений и получения экспериментальных данных с детектора T0 были выполнены практически полностью сотрудниками ИЯИ и МИФИ.

2. На установке ALICE проведено сканирование по методу Ван дер Меера для p-p столкновений при энергии $\sqrt{s} = 13$ TeV с использованием передних детекторов T0, V0 и AD. В ноябре проведены сканирования по методу Ван дер Меера для p-Pb и Pb-p столкновений при энергии $\sqrt{s} = 8$ TeV (рис. 1.3.2). В настоящее время ведется работа по анализу этих данных.

3. Разработана концепция и созданы образцы черенковского детектора на основе кварцевых радиаторов и микроканальных ФЭУ для триггерного ФИТ-детектора установки ALICE. Это дает возможность сотрудникам ИЯИ участвовать в модернизации детекторных систем ALICE, планируемых к использованию в последующие годы.

4. В течение проведённого в 2016 году сеанса работы БАК выполнены измерения дифракционных процессов при столкновении протонов с энергией 13 ТэВ в с.ц.м., которая является максимальной энергией столкновений элементарных частиц, когда-либо достигнутой в экспериментах на ускорителях.

5. В GSI проведены стендовые испытания прототипных детекторных модулей электромагнитного калориметра EMC с использованием космического излучения и LED-оптической системы со светодиодным источником. Проведены испытания и паспортизация 86 EMC-модулей.

6. В эксперименте NA61 были исследованы коллективные потоки в столкновениях ядер свинца при импульсах 13 и 30 ГэВ/с на нуклон.

7. Для установки CBM на сооружаемом ускорительном комплексе ФАИР в ИЯИ РАН было развернуто изготовление и тестирование на космике модулей переднего адронного калориметра фрагментов.

8. В рамках мегапроекта НИКА продолжалось сотрудничество ИЯИ РАН – ОИЯИ по разработке переднего адронного калориметра фрагментов для установки MPD/NICA. Подготовлен технический проект калориметра, состоящего из 90 индивидуальных модулей.

2 Лаборатория фотоядерных реакций

Руководитель темы: д.ф.-м.н., профессор Владимир Георгиевич Недорезов

Основные исполнители:

Гуревич Григорий Манович	д.ф.-м.н.	зав. сект.
Джилавян Леонид Завенович	к.ф.-м.н.	Снс
Кондратьев Рудольф Леонидович	к.ф.-м.н.,	с.н.с
Лапик Александр Михайлович		н.с.
Лисин Валерий Павлович	к.ф.-м.н	зав.сект.
Мушкаренков Александр Николаевич	к.ф.-м.н	н.с.
Недорезов Владимир Георгиевич	д.ф.-м.н.	зав.лаб.
Полонский Андрей Леонидович	к.ф.-м.н.,	н.с.
Руднев Николай Вячеславович		м.н.с.
Русаков Артур Владимирович		н.с.
Солодухов Геннадий Васильевич	к.ф.-м.н	зав.сект.
Тулупов Борис Алексеевич	к.ф.-м.н	с.н.с
Туринге Андрей Арисович	к.ф.-м.н	с.н.с.

2 РЕФЕРАТ

Отчет содержит 8 страниц, 1 рисунок, перечень публикаций в реферируемых журналах из 27 наименований, 15 докладов на конференциях и 5 препринтов.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЯДЕР, НУКЛОН, ФОТОН, МЕЗОН

В отчете приведены новые результаты, полученные в 2016 году в лаборатории фотоядерных реакций ИЯИ РАН по физике электромагнитных взаимодействий нуклонов и ядер. Особое внимание уделено изучению поляризационных эффектов и спиновой структуры нуклонов. Начато изучение нелинейных эффектов квантовой электродинамики во взаимодействиях интенсивных электромагнитных полей с веществом на пучках электронов, релятивистских ионов и фемтосекундных тераваттных лазеров. Все приведенные в отчете результаты являются новыми и соответствуют мировому уровню.

Цель работы: прецизионное исследование электромагнитных взаимодействий нуклонов и ядер; исследование свойств адронов в ядерной среде, изучение их связанных состояний (мезонные ядра, дельта-ядра, гиперядра); изучение нелинейных эффектов квантовой электродинамики во взаимодействиях интенсивных электромагнитных полей с веществом на пучках релятивистских ионов, электронов и фемтосекундных тераваттных лазеров;

2 ВВЕДЕНИЕ

За последние годы изучение электромагнитных взаимодействий ядер в ведущих научных центрах США, Японии, Германии и других стран характеризовалось существенным расширением тематики исследований и применением новых методов. Это включало в себя прецизионное измерение амплитуд фоторождения мезонов на свободных и связанных нуклонах, изучение спиновых структурных функций и формфакторов нуклонов, исследование коллективных возбуждений ядер (гигантских резонансов), фото – и электроделения ядер. Эксперименты выполнялись на пучках реальных и виртуальных фотонов, релятивистских ионов и фемтосекундных лазеров с большой импульсной мощностью. На этой основе развивались прикладные исследования с использованием фотоядерных методов для создания систем безопасности, детектирования взрывчатых веществ и делящихся материалов, медицинской диагностики и др. В настоящем отчете приведены результаты исследований, выполненных в лаборатории фотоядерных реакции ИЯИ РАН в рамках указанной тематики.

2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Приведенные результаты относятся к следующим направлениям исследований, которые были сформулированы в Плане ЛФЯР на 2016 год:

- Прецизионное исследование электромагнитных взаимодействий нуклонов и ядер; исследование свойств адронов в ядерной среде, изучение их связанных состояний,
- Исследование свойств гигантских резонансов в ядрах,
- Подготовка эксперимента BGO-OD (Bonn – ELSA) по исследованию фотоядерных реакций в области энергий фотонов до 4 ГэВ.
- Разработка источника медленных нейтронов на базе линейного ускорителя ЛУЭ-8.
- Разработка методики получения и использования короткоживущих изотопов на электронных ускорителях.
- Исследование когерентных эффектов в формировании рентгеновских изображений на фемтосекундном лазерно – плазменном источнике.
- Исследования по физике фотоядерных взаимодействий (изучение ненуклонных степеней свободы атомных ядер)
- Разработка методов и аппаратуры для низкофоновых измерений гамма-излучений с использованием германиевых гамма-спектрометров.

Результаты:

1. Выполнен первый в мире успешный эксперимент с активной поляризованной мишенью, разработанной и созданной российскими участниками коллаборации A2 (Майнц, Германия), элементы которой показаны на рис.1. Высокая эффективность и низкий порог регистрации протонов отдачи в мишени открывают новые возможности в исследовании спиновой структуры протона и получении модельно независимых данных. Поляризация протонов мишени составила $\approx 65\%$, время поддержания поляризации при температуре 45 мК в магнитном поле 0,4 Т около 100 часов. На пучке поляризованных меченых фотонов ускорителя МАМІ измерены поляризационные наблюдаемые в реакциях фоторождения π^0 и π^+ мезонов, а также асимметрия сечения комптоновского рассеяния, позволяющая извлечь модельно независимые данные о спиновых поляризуемостях протона.

Выполнено исследование реакции $\gamma p \rightarrow p\pi^0$ при энергиях фотонов от 425 до 1445 МэВ с использованием поперечно поляризованной протонной мишени и продольно поляризованного пучка. Впервые измерена асимметрия пучок-мишень F и получены новые прецизионные данные для мишенной асимметрии T . В эксперименте использована система мечения фотонов по энергии ускорителя МАМІ и фотонные спектрометры Crystal Ball и TAPS. Выполнено разложение поляризационных сечений по полиномам Лежандра и сравнение с предсказаниями PWA-моделей. Новые данные дают информацию о вкладах различных барионных резонансов в сечение фотопоглощения.

Для реакции фоторождения η -мезонов на квазисвободных протонах и нейтронах впервые измерены дважды поляризационная наблюдаемая E и спин-зависимые сечения $\sigma_{1/2}$ и $\sigma_{3/2}$. Измерения проводились на пучке циркулярно поляризованных меченых фотонов ускорителя МАМІ с использованием продольно поляризованной мишени на основе дейтерированного бутанола. Результаты показывают, что узкая структура, ранее наблюдавшаяся в η -фоторождении на нейтроне, проявляется только в сечении $\sigma_{1/2}$ и, следовательно, связана со спиновой амплитудой $1/2$, соответствующей вкладам нуклонных резонансов $N1/2^-$ (S_{11}) и $N1/2^+$ (P_{11}). Полученные результаты хорошо согласуются с недавними модельными предсказаниями.

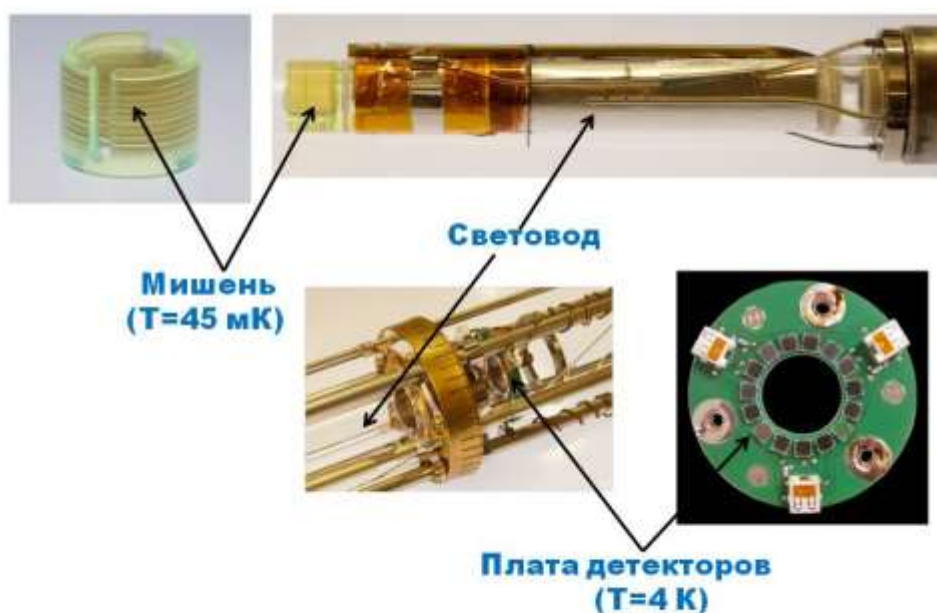


Рис. 1. Элементы активной поляризованной мишени

Исследовано фоторождение $\pi\eta$ -пар на квазисвободных нуклонах, связанных в дейтроне, от порога до энергии налетающих фотонов 1,4 ГэВ. Впервые измерены дифференциальные сечения, угловые распределения, распределения инвариантных масс $\pi\eta$ -пар и мезон-нуклонных пар, а также пучковые асимметрии для реакций $\gamma p \rightarrow \rho\pi^0\eta$, $\gamma p \rightarrow \pi\pi^0\eta$, $\gamma p \rightarrow \pi\pi^+\eta$ и $\gamma p \rightarrow \pi\pi^-\eta$. Чтобы оценить вклады взаимодействия в конечном состоянии, были также изучены соответствующие реакции на протонной мишени и на ^3He . Эксперименты проведены на пучке меченых фотонов ускорителя MAMI с использованием 4 π - электромагнитного калориметра на основе детекторов Crystal Ball и TAPS. Формы дифференциальных сечений и асимметрии для реакций на протонах и нейтронах очень близки, что согласуется с предположением о доминирующем вкладе в эти реакции цепочки распадов $D_{3/2} > D(1232) > \pi\eta N$. Однако, абсолютные величины сечений из-за эффектов взаимодействия в конечном состоянии подавлены по сравнению с данными для свободных протонов.

Выполнены прецизионные измерения фотонной асимметрии Σ для реакции $\gamma p \rightarrow \pi^0 p$ в диапазоне энергий 320–650 МэВ. Измерения проводились коллаборацией A2 на фотонном пучке ускорителя MAMI. Полученные результаты существенно улучшают существующие мировые данные и хорошо согласуются с предсказаниями моделей MAID, SAID и Бонн-Гатчина. Обнаружено указание на интерференцию между слабыми F -волнами и резонансами $N(1520)3/2^-$ и $N(1535)1/2^-$.

2. Разработан метод выделения изовекторного электрического квадрупольного гигантского резонанса на фоне превалирующего изовекторного электрического дипольного гигантского резонанса, основанный на измерении асимметрии вперед–назад вылета быстрых нейтронов в реакции (γ, n) на изотопах свинца с помощью пороговых нейтронных детекторов и сцинтилляционных спектрометров. Проведено сравнение имеющихся данных по возбуждению изовекторных электрических квадрупольных ($E2$) резонансов в прямых и обратных реакциях с реальными и виртуальными фотонами.

Совместно с Национальным Исследовательским Ядерным Университетом «МИФИ» проведены работы по изучению изоскалярных монопольных возбуждений в среднетяжелых ядрах. Получены данные о коэффициентах сжимаемости ядерной материи, существенные для астрофизики и ядерной физики.

3. В рамках подготовки эксперимента BGO-OD (Bonn – ELSA) по исследованию фотоядерных реакций в области энергий фотонов до 4 ГэВ выполнены прецизионные оценки эффективности регистрации протонов в BGO-калориметре. Проведено моделирование калориметра по программе GEANT-4. Полученные результаты используются при анализе редких событий фоторождения мезонов с большой множественностью.

4. С помощью моделирования по программам GEANT-4 и LOENT (Low Energy Neutron Transport), разработан источник медленных нейтронов на базе линейного ускорителя ЛУЭ-8 ИЯИ РАН. Источник изготовлен и апробирован на пучке электронов с энергией 8 МэВ; начаты эксперименты по нейтронному активационному анализу. Достигнута чувствительность обнаружения малых примесей на уровне 10^{-6} .

5. С целью разработки методов получения короткоживущих изотопов на электронных ускорителях проведены расчеты вероятности эмиссии π -квантов, электронов, позитронов из продуктов фотоядерных реакций $^{14}\text{N}(\gamma, 2n)^{12}\text{N}$ и $^{14}\text{N}(\gamma, 2p)^{12}\text{B}$ при $E_e \sim 50$ МэВ в сравнении с выходом фоновой реакции $^{13}\text{C}(\gamma, p)^{12}\text{B}$. Исследованы возможности получения медицинских радиоизотопов, необходимых для позитронно-эмиссионной томографии и радиотерапии в результате реакций (γ, p) и (γ, pn) . Разработана фотоядерная методика получения и радиохимического извлечения радионуклида ^{67}Cu , получаемого в результате реакции $^{68}\text{Zn}(\gamma, p)$, применяемого в медицине для радиоиммунотерапии. Измерены также выходы $^{69\text{m}}\text{Zn}$ и ^{161}Ho в реакциях $^{71}\text{Ga}(\gamma, pn)^{69\text{m}}\text{Zn}$ и $^{162}\text{Er}(\gamma, p)^{161}\text{Ho}$. Разработан метод обнаружения скрытых взрывчатых веществ на основе фотоядерных реакций $^{14}\text{N}(\gamma, 2n)^{12}\text{N}$, $^{14}\text{N}(\gamma, 2p)^{12}\text{B}$, $^{13}\text{C}(\gamma, p)^{12}\text{B}$. с использованием модельных расчетов по программам TALYS и EMPIRE.

6. Проведено исследование когерентных эффектов в формировании рентгеновских изображений (совместно международным лазерным центром МЛЦ МГУ) на базе фемтосекундного лазерного комплекса. Показано, что пространственная когерентность возникает благодаря фокусировке лазерного луча в пятно малого размера (около 10 микрон). Благодаря этому улучшается контраст изображений для объектов с малым градиентом плотности.

7. В коллаборации GRAAL проведены исследования по физике фотоядерных взаимодействий (ненуклонных степеней свободы). Изучена мультифрагментация ядра ^{12}C при энергии фотонов от 800 до 1500 МэВ. Измерена вероятность полного распада этого ядра на отдельные нуклоны и вероятность образования легких кластеров (дейтерия, трития, гелия) в конечном состоянии. Полученные экспериментальные данные проанализированы в рамках каскадно-испарительной модели, описывающей динамику возбуждений и распадов легких ядер.

8. Совместно с лабораторией атомного ядра ИЯИ РАН разработаны новые методы и создана аппаратура для низкофоновых измерений спектров наведенной активности с использованием германиевых гамма-спектрометров. Участие лаборатории фотоядерных реакций состояло в модернизации линейного ускорителя ЛУЭ-8 ИЯИ РАН, обеспечении нужных параметров пучка электронов в течение эксперимента.

2 ПУБЛИКАЦИИ:

- реферируемые журналы (включая работы, принятые к печати)

1. J.R.M. Annand, G.M. Gurevich, R. Kondratiev, V. Lisin, A. Mushkarenkov, A. Polonski et al. T and F asymmetries in π^0 photoproduction on the proton. Phys. Rev. C 93, No. 5, 055209 (2016).

2. L. Witthauer, G.M. Gurevich, R. Kondratiev, V. Lisin, A. Mushkarenkov, A. Polonski et al. Insight into the Narrow Structure in η Photoproduction on the Neutron from Helicity-Dependent Cross Sections. Phys. Rev. Lett. 117, 132502 (2016).

3. A. Käser, R. Kondratiev, V. Lisin, A. Mushkarenkov, A. Polonski et al. Photoproduction of $\eta\pi$ - pairs off nucleons and deuterons. Eur. Phys. J. A 52, 272 (2016).

4. S. Gardner, G.M. Gurevich, R. Kondratiev, V. Lisin, A. Mushkarenkov, A. Polonski et al. Photon asymmetry measurements of $\gamma p \rightarrow \pi^0 p$ for $E_\gamma=320-650$ MeV. Eur. Phys. J. A (in print).

5. P. Adlarson, G.M. Gurevich, R. Kondratiev, V. Lisin, A. Mushkarenkov, A. Polonski et al. Measurement of the $\omega \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$ and $\eta \rightarrow e^+ e^- \gamma$ Dalitz decays with the A2 setup at MAMI. Phys. Rev. C (in print).

6. G.M. Gurevich, V.P. Lisin. Measurement of the proton spin polarizabilities at MAMI. Physics of Particles and Nuclei, v. 48, No. 1 (in print).

7. P.Adlarson, G.M.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Measurement of the $\pi^0 \rightarrow e^+ e^- \gamma$ Dalitz decay at MAMI. Phys. Rev. C (in print).
8. V.Sokhoyan, G.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Determination of the scalar polarizabilities of the proton using beam asymmetry Σ_3 in Compton scattering. Eur. Phys. J. A (in print).
9. Л.З. Джилавян. «Возможность разделять изовекторные $E1$ и $E2$ гигантские резонансы при измерении асимметрии вылета нейтронов с помощью пороговых детекторов» Известия РАН. Серия физическая, 2016, Т. 80 , № 5, с. 648-654.
10. L.Z. Dzhilavyan. “The possibility of separating isovector $E1$ and $E2$ giant resonances in measuring neutron emission asymmetry with threshold detectors”. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, 2016, Vol. 80, No. 5, pp. 587–593.
11. Л.З. Джилавян, А.М. Лапик, В.Г. Недорезов, Б.А. Тулупов. «Разделение вкладов изовекторных $E2$ и $E1$ гигантских резонансов в прямых и обратных реакциях с реальными и виртуальными фотонами». Физика элементарных частиц и атомного ядра (ЭЧАЯ), 2017, Т. 48, № 1 [L. Z. Dzhilavyan, A. M. Lapik, V. G. Nedorezov, and B. A. Tulupov. Separation of Contributions of Isovector $E2$ and $E1$ Giant Resonances in Direct and Inverse Reactions with Real and Virtual Photons. Physics of Particles and Nuclei, 2017, Vol. 48, No. 1, pp. 81–88.].
12. О.И. Ачаковский, С.С. Бelyshev, Л.З. Джилавян, Ю.Н. Покотиловский. «Сечения реакций $^{14}\text{N}(\gamma, 2n)^{12}\text{N}$, $^{14}\text{N}(\gamma, 2p)^{12}\text{B}$, $^{13}\text{C}(\gamma, p)^{12}\text{B}$ » Известия РАН. Серия физическая, 2016, Т. 80 , № 5, с. 633-639.
13. O.I. Achakovskiy S.S. Belyshev, L.Z. Dzhilavyan, Yu.N. Pokotilovski. “Cross sections of the reactions $^{14}\text{N}(\gamma, 2n)^{12}\text{N}$, $^{14}\text{N}(\gamma, 2p)^{12}\text{B}$, and $^{13}\text{C}(\gamma, p)^{12}\text{B}$ ”. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, 2016, Vol. 80, No. 5, pp. 572–578.
14. С.С. Бelyshev, Л.З. Джилавян, Ю.Н. Покотиловский. «Эмиссия γ -квантов, электронов, позитронов из характерных мишеней при распадах образованных в этих мишенях ^{12}N и ^{12}B ». Известия РАН. Серия физическая. 2016, Т. 80, № 5, с. 627-632.
15. S.S. Belyshev, L.Z. Dzhilavyan, Yu.N. Pokotilovski. “Emission of γ -quanta, electrons, and positrons upon the decay of ^{12}N and ^{12}B produced in characteristic targets” Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, 2016, Vol. 80, No. 5, pp. 566–571.
16. M.L.Gorelik, S.Shlomo, B.A.Tulupov, M.H.Urin. Investigation of the energy-averaged double transition density of isoscalar monopole excitations in medium-heavy mass spherical nuclei. Nucl.Phys. A 955, 2016, pp. 116-132.
17. М.Л.Горелик, Б.А.Тулупов, М.Г.Урин. Унитарная версия частично-дырочной дисперсионной оптической модели. ЯФ, 2016, Т.79, с. 615-620.

18. M.L.Gorelik, B.A.Tulupov, M.H.Urin. Unitary Version of the Particle – Hole Dispersive Optical Model. Phys.At.Nucl. 2016, Vol.79, pp.924-928.
19. И.Н.Цымбалов, Р.В.Волков, Н.В.Еремин, К.А.Иванов, В.Г.Недорезов, А.Пасхалов, А.Л.Полонский, А.Б.Савельев-Трофимов, Н.М.Соболевский, А.А.Туринге, С.А.Шуляпов, «Исследование реакции $D(\pi, n)H$ вблизи порога с использованием мощного фемтосекундного лазерного излучения», направлено в ЯФ 30.10.2016.
20. А.В. Русаков, К.А. Иванов, Н.А. Борисов, И.Н. Цымбалов, Д.А. Горлова, А.М. Лапик, А.С. Ларькин, В.П. Лисин, И.М. Мордвинцев, А.Н. Мушкаренков, В.Г. Недорезов, А.Л. Полонский, А.Б. Савельев-Трофимов, А.А. Туринге, «Электронный магнитный спектрометр для экспериментов на тераваттном фемтосекундном лазере». Направлено в ПТЭ 23.11.2016.
21. Л.З.Джилаван, А.М.Лапик, В.Г.Недорезов, Б.А.Тулупов. «Разделение вкладов изовекторных E2 и E1 гигантских резонансов в прямых и обратных реакциях с реальными и виртуальными фотонами». ЭЧАЯ 48 (2017) 1, 81.
22. В. Г. Недорезов, Е. С. Конобеевский, С. В. Зуев, А. Л. Полонский, А. А. Туринге, «Возбуждение изомерных состояний ^{111m}Cd , ^{113m}In , ^{115m}In фотонами с энергией до 8 МэВ». Направлено в ЯФ 30.11.2016.
23. А.Н.Андреев, Ю.М.Бурмистров, С.В.Зуев, Е.С.Конобеевский, М.В.Мордовской, В.Г.Недорезов, Н.А.Федоров, «Возможности определения микропримесей в материалах с использованием измерительно-активационного комплекса на базе фотонейтронного источника». Направлено в Известия РАН 25.11.2016.
24. Ю.М.Бурмистров, С.В.Зуев, Е.С.Конобеевский, М.Н.Лифанов, М.В.Мордовской, В.Г.Недорезов, С.В.Зуев. «Изучение радиационно-защитных свойств материалов с использованием метода гамма-поглощения в широком диапазоне энергий гамма-квантов». Направлено в Известия РАН 25.11.2016.
25. А.А.Туринге, А.М.Лапик, А.Н.Мушкаренков, В.Г.Недорезов, Н.В.Руднев., Фрагментация легких ядер фотонами средних энергий. ЭЧАЯ 48, 37-43 (2017).
26. Д.А.Горлова, В.Г.Недорезов, К.А.Иванов, А.Б.Савельев, А.А.Туринге, И.Н.Цымбалов. О возможности генерации позитронов низких энергий на электронном ускорителе ЛУЭ-8 ИЯИ РАН и фемтосекундном лазерном комплексе МЛЦ МГУ, Квантовая электроника, в печати (2017).
27. С. И. Поташев, Ю. М. Бурмистров, А. И. Драчев, С. Х. Караевский, Г. В. Солодухов. Двухкоординатный гибридный детектор медленных нейтронов на основе твердого бора-10 и газовой камеры размерами 128×128 мм². Поверхность (2016) . В печати.

- доклады на конференциях и школах

1. Г.М.Гуревич. Исследование спиновой структуры протона на ускорителе МАМИ. Международная сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН. Дубна, 12-15 апреля 2016 г.
2. L.Z. Dzhilavyan, A.M. Lapik, V.N. Ponomarev, A.V. Rusakov, B.A. Tulupov, S.S. Verbitsky. "Scintillation spectrometers ability for forward-to-backward asymmetry measuring at neutron emission in (γ, n_0) -reactions". Proceedings of the XIV International Seminar on Electromagnetic Interactions of Nuclei (EMIN – 2015, October 5-8, Moscow, Russia). Poster Reports.. Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 2016, pp. 5–11.
3. L.Z. Dzhilavyan. "About yield measuring for the reactions $^{14}\text{N}(\gamma, 2n)^{12}\text{N}$ and $^{14}\text{N}(\gamma, 2p)^{12}\text{B}$ ". Proceedings of the XIV International Seminar on Electromagnetic Interactions of Nuclei (EMIN – 2015, October 5-8, Moscow, Russia). Poster Reports. Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 2016, pp. 12–15.
4. Р.А. Алиев, С.С. Бельшев, Л.З. Джилавян, Б.С. Ишханов, А.А. Кузнецов, К.А. Стопани, В.В. Ханкин. Экспериментальное определение выходов перспективных медицинских радионуклидов ^{67}Cu , $^{69\text{m}}\text{Zn}$ и ^{161}Ho в реакциях (γ, p) и (γ, pn) под действием тормозных фотонов с $E_m \cong 55.6$ МэВ. 66-я международная конференция по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «Ядро-2016». Тезисы докладов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2016, с. 171–172.
5. М.Л.Горелик, Б.А.Тулупов, М.Г.Урин. Унитарная версия частично-дырочной дисперсионной оптической модели. 66-я Международная конференция по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «Ядро-2016». Тезисы докладов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2016, с. 21–22.
6. Tsymbalov. Gamma & neutron production with femtosecond table top TW laser . Book of abstracts of the Int.Conference on Nuclear Photonics. Monterey, California, USA, October 16-21.
7. V.Nedorezov. Near threshold photonuclear reactions, Book of abstracts of the Int.Conference on Nuclear Photonics. Monterey, California, USA, October 16-21.
8. А.Н.Андреев, В.Г.Недорезов и др. «Возможности определения микропримесей в материалах с использованием измерительно-активационного комплекса на базе фотонейтронного источника». Сб.тезисов 66-ой международной конференции по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Саров, 11-14 октября 2016 г., стр. 142.

9. Ю.М.Бурмистров, В.Г.Недорезов и др. «Изучение радиационно-защитных свойств материалов с использованием метода гамма-поглощения в широком диапазоне энергий гамма-квантов». Сб.тезисов 66-ой международной конференции по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Саров, 11-14 октября 2016 г., стр. 174.

10. Andreev A.V., Burmistrov Yu.M. Gromov A.V., Konobeevski E.S., Mordovskoy M.V., Solodukhov G.V., Zuyev S.V. / W-Be photoneutron source of INR RAS // LXV International Conference "NUCLEUS 2015", Saint-Petersburg, June 29 – July 3, 2015, Book of Abstracts, p. 252. <http://onlinereg.ru/site.php?go=203&lang=RUS>

11. A.Andreev, Yu.Burmistrov, A.Gromov, M.Mordovskoy, G.Solodukhov, S.Zuyev / Neutron-Activation Analysis of Materials at IN-LUE Neutron Source // The XIV international Seminar on Electromagnetic Interactions of nuclei, EMIN-2015, Moscow, October 5-8, 2015, Moscow, Russia, INR RAS. <http://www.inr.ac.ru/~pnlab/emin2015/>

12. A.Andreev, Yu.Burmistrov, A.Gromov, R.Ilić, E.Konobeevsky, E.Koptelov, L.Latysheva, M.Mordovskoi, V.Ponomarev, S.Potashev, A.Rogov, S.Sabinin, S.Sidorkin, N.Sobolevsky, G.Solodukhov, V.Tishin, S.Zuyev / Mathematical modeling of neutron sources on the basis of fragmentation and spallation processes and (g,n) reactions // Fifth International Conference on Nuclear Fragmentation 2015, NUFRA 2015, 4-11 October 2015, Kemer (Antalya), Turkey, 13

13. С. И. Поташев, Ю. М. Бурмистров, А. И. Драчев, С. Х. Караевский, Г. В. Солодухов. Двухкоординатный гибридный детектор медленных нейтронов на основе твердого бора-10 и газовой камеры размерами 128×128 мм²

14. IV совещание по малоугловому рассеянию нейтронов "МУРомец 2016" 28-30 сентября 2016 Гатчина. Book of Abstracts, p. 45
<http://fias.uni-frankfurt.de/historical/nufra2015/> <https://oiks.pnpi.spb.ru/events/muromets2016>

15. С. И. Поташев, Ю. М. Бурмистров, А. И. Драчев, С. Х. Караевский, Г. В. Солодухов. Двухкоординатный гибридный детектор медленных нейтронов на основе твердого бора-10 и газовой камеры размерами 128×128 мм². IV совещание по малоугловому рассеянию нейтронов "МУРомец 2016" 28-30 сентября 2016 Гатчина
<https://oiks.pnpi.spb.ru/events/muromets> (2016)

- *препринты*

1. S.Gardner, G.M.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Photon asymmetry measurements of $\gamma p \rightarrow \pi^0 p$ for $E_\gamma=320-650$ MeV. arXiv:1606.07930v1 [nucl-ex].

2. P.Adlarson, G.M.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Measurement of the $\omega \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$ and $\eta \rightarrow e^+ e^- \gamma$ Dalitz decays with the A2 setup at MAMI. arXiv:1609.04503v1 [hep-ex].
3. P.Adlarson, G.M.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Measurement of the $\pi^0 \rightarrow e^+ e^- \gamma$ Dalitz decay at MAMI. arXiv:1611.04739 [hep-ex].
4. Л.З. Джилавян, А.М. Лапик, В.Г. Недорезов, Б.А. Тулупов. «Разделение вкладов изовекторных $E2$ и $E1$ гигантских резонансов в прямых и обратных реакциях с реальными и виртуальными фотонами». Препринт ИЯИ РАН 1423/2016, М., июнь 2016, 19 стр.
5. Л.З. Джилавян, В.Г. Недорезов. Об исследованиях реакции $(\gamma, \gamma')^m$ на среднетяжелых ядрах вблизи фотонейтронных порогов. Препринт ФИАН 2016.

3 Лаборатория атомного ядра

3.1 Исследование взаимодействия нуклонов с малонуклонными системами и лёгкими ядрами на пучках Московской мезонной фабрики.

Руководитель темы: Евгений Сергеевич Конобеевский

Основные исполнители:

Мордовской М.В., снс, кфмн

Зуев С.В., снс, кфмн

Исполнители:

Поташев С.И., снс, кфмн

Бурмистров Ю.М., мнс

Каспаров А.А., стажер-исслед.

Мицук В.В., стажер-исслед.

3.1 Реферат

17 стр., 13 рис.

NN И *PP* КОРРЕЛЯЦИИ, ДЛИНА РАССЕЯНИЯ, ВИРТУАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ, СПЕКТРОМЕТРИЯ НУКЛОНОВ

Сильные расхождения между теорией и экспериментом, обнаруженные в *nd* и *pd* взаимодействиях, указывают на необходимость продолжения исследования механизмов различных процессов в малонуклонных системах. Для исследования *nn* и *pp* корреляций в трехнуклонных ядрах ^3He и ^3H разработана программа экспериментов по исследованию реакций $d + ^2\text{H} \rightarrow ^2\text{He} + (nn)$, $n + ^3\text{H} \rightarrow ^2\text{H} + (nn)$ и $n + ^2\text{H} \rightarrow p + (nn)$. В эксперименте впервые будет проведено прямое определение энергии *nn*-квазисвязанного синглетного 1S_0 состояния в различных реакциях, на основе сравнения этих энергий и их анализа проведены оценки степени *nn*-корреляций в различных реакциях и определен механизм самих этих корреляций. Теоретический анализ измеренных в разных реакциях *nn*-корреляций (энергий *nn*-квазисвязанного синглетного 1S_0 состояния) позволит исследовать зависимости эффективного притяжения, возникающего между нейтронами от характера их исходного состояния.

Проведенное моделирование указанных выше реакций позволило сформулировать методику определения энергии виртуального 1S_0 состояния по форме энергетического (время-пролетного) спектра нейтрона от развала этого состояния в определенной кинематике и в совпадении с заряженной частицей (^2He , ^2H или p). Согласно этой методике была создана экспериментальная установка в НИИЯФ МГУ.

На пучке 15 МэВ дейтронов циклотрона У-120 НИИЯФ МГУ исследована реакция $d + ^2\text{H} \rightarrow ^2n^S + ^2p^S \rightarrow n+n+p+p$, идущая через образование в промежуточном состоянии синглетных пар – динейтрона ($^2n^S$) и дипротона ($^2p^S$) [1]. Полученный в эксперименте

временной спектр нейтронов сравнивался с результатами моделирования для различных значений энергии виртуального состояния nn -системы $\varepsilon_{nn} \pm \Gamma_{nn}$. Для определения наиболее вероятного значения ε_{nn} вычислялись значения χ^2 для экспериментального и смоделированных спектров. По результатам фитирования определено наиболее вероятное значение энергии виртуального nn -состояния $\varepsilon_{nn} = 0.076 \pm 0.06$ МэВ.

Это значение энергии виртуального уровня соответствует значению синглетной длины nn -рассеяния $a_{nn} = -22.2 \pm 0.6$ фм, которое сравнивалось с литературными данными, полученными в последние годы в реакции nd -развала. Анализ данных позволил сделать вывод о зависимости извлекаемой величины длины nn -рассеяния от относительного импульса nn -пары и третьей заряженной частицы, т.е. о заметном неучтенном вкладе $3N$ -сил.

3.1 ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа направлена на экспериментальное исследование нейтрон-нейтронного взаимодействия, и в частности, механизмов nn -корреляций в малонуклонных системах. Хотя исследования нейтрон-нейтронного взаимодействия ведутся на протяжении десятков лет, оказалось, что во многих случаях наблюдаются сильные расхождения экспериментальных данных с результатами наиболее полных и точных на сегодня Фаддеевских расчетов. В частности, такие расхождения были обнаружены в реакции nd -развала в кинематике нейтрон-нейтронного квазисвободного рассеяния (КСР) [1] и в “Space Star” кинематике реакций nd и pd -развала [2] (см. рис. 3.1.1).

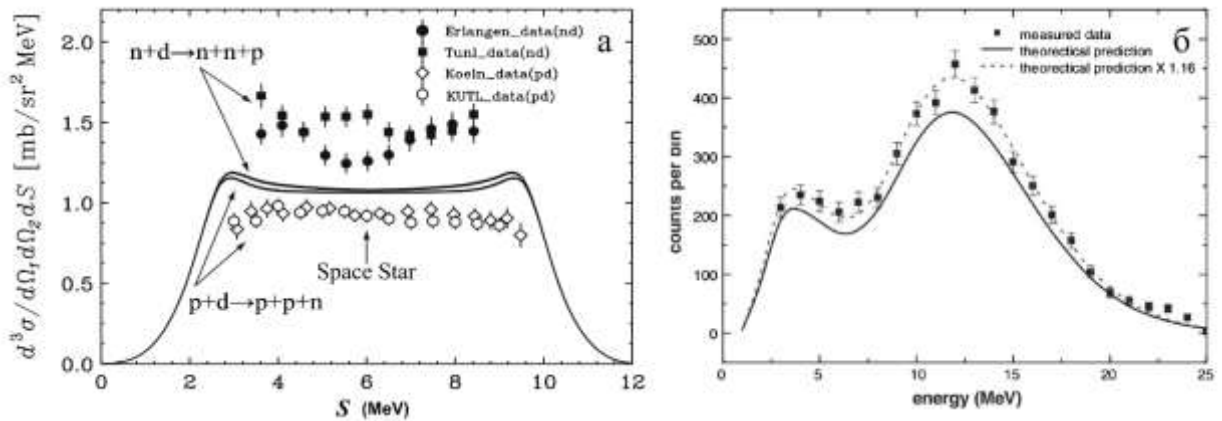


Рисунок 3.1.1 – Сравнение экспериментальных данных и теоретических расчетов для Nd -развала в геометрии Space-Star [2] (а) и реакции квазисвободного nn -рассеяния [1] (б)

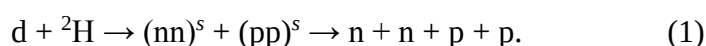
Возможное объяснение этих расхождений [3] состоит в существенном усилении в системах ${}^3\text{H}(pnn)$ и ${}^3\text{He}(ppn)$ nn - и pp -корреляций притягивающего характера в поле третьего нуклона за счет предполагаемого существования в этих системах нестатических и зависящих от относительного импульса парных и трехчастичных сил.

3.1.ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В настоящей работе представлены первые результаты исследования реакции $d+^2\text{H} \rightarrow (pp)+(nn)$ с регистрацией как двух протонов, так и нейтрона от развала синглетного nn 1S_0 состояния. В данной реакции коррелированные nn - и pp -пары могут образовываться динамически в промежуточном состоянии. При этом измеряемые nn - и pp -корреляции, в частности энергии nn (pp) виртуального синглетного 1S_0 состояния могут оказаться отличными от тех, которые присущи свободным nn - и pp -системам.

1 Моделирование реакции $d+^2\text{H} \rightarrow (pp)+(nn)$ и постановка эксперимента

В настоящей работе предлагается определение энергии синглетного виртуального nn -состояния в реакции



Данная реакция уникальна тем, что может идти с образованием на первом этапе синглетных двухнуклонных систем. Моделирование эксперимента проводилось с помощью программы, предназначенной для изучения реакций с тремя и более частицами в конечном состоянии [4]. Для определения углов регистрации частиц в эксперименте сначала проводилось кинематическое моделирование “квазибинарной” реакции $d + ^2\text{H} \rightarrow ^2n^s + ^2p^s$. На рис. 3.1.2 показаны диаграммы $\Theta_{2n}-\Theta_{2p}$ и $E_{2n}-E_{2p}$, где Θ_{2n} и Θ_{2p} – углы вылета, а E_{2n} и E_{2p} – энергии двухнейтронной и двухпротонной систем, соответственно. Анализ этих диаграмм позволил выбрать углы регистрации двух протонов и нейтрона – $\Theta_n \approx 36^\circ$ и $\Theta_p \approx 27^\circ$. При этом предполагалось условие, что оба протона регистрируются одним детектором, а нейтрон регистрируется под углом близким к углу вылета динейтронной системы.

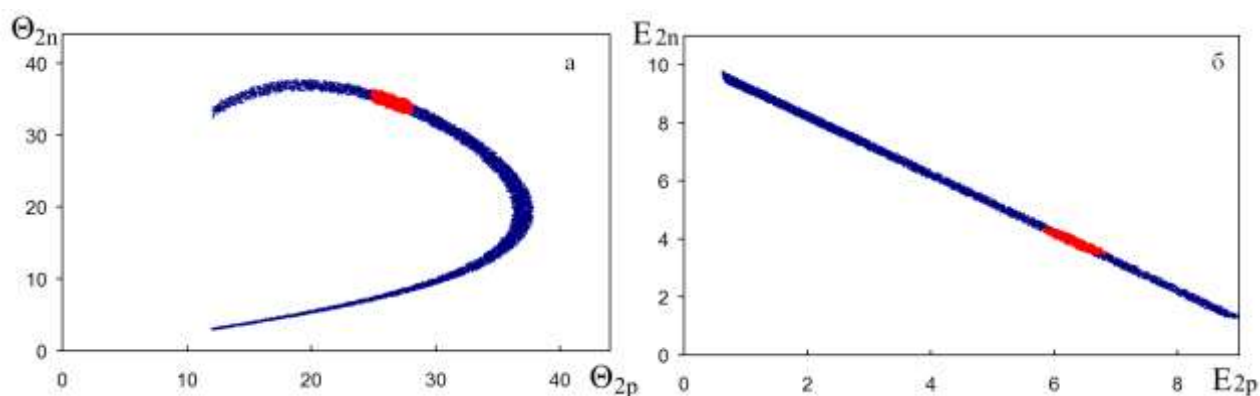


Рисунок 3.1.2 – Результаты кинематического моделирования реакции $d + ^2\text{H} \rightarrow ^2n^s + ^2p^s$ – двумерные диаграммы $\Theta_{2n}-\Theta_{2p}$ (а) и $E_{2n}-E_{2p}$ (б), где Θ_{2n} и Θ_{2p} – углы вылета, а E_{2n} и E_{2p} – энергии двухнейтронной и двухпротонной систем. Красные области соответствуют вылету системы $^2p^s$ под углом $27^\circ \pm 1.5^\circ$

Далее проводилось кинематическое моделирование реакции с четырьмя частицами в конечном состоянии – $d + {}^2\text{H} \rightarrow n + n + p + p$. Кинематика рассчитывалась при следующих условиях: энергия налетающих дейтронов – 15 МэВ, углы регистрации – $\Theta_n = 36^\circ \pm 1.5^\circ$, $\Theta_{p1} = \Theta_{p2} = 27^\circ$. Программа отбирала из событий с произвольно заданными на входе энергиями всех частиц и углом вылета нерегистрируемого второго нейтрона, только события, удовлетворяющие законам сохранения энергии и импульса. На выходе программы получался массив событий с определенными энергиями и углами вылета всех вторичных частиц.

Полученные данные об энергиях протонов были использованы в программе, рассчитывающей потери двух заряженных частиц (в данном случае протонов) в различных слоях на пути от мишени, в том числе в ΔE и E -детекторах. На рис. 3.1.3 приведена двумерная диаграмма ΔE и E , на которой показаны как события от одновременного прохождения двух протонов через детектирующую систему (ΔE -детектор толщиной 25 мкм и E - детектор толщиной 300 мкм), так и локусы потерь для прохождения одной частицы (протонов, дейтронов, гелионов). Видно, что область двухпротонных событий может быть однозначно выделена в эксперименте от локусов одиночных частиц.

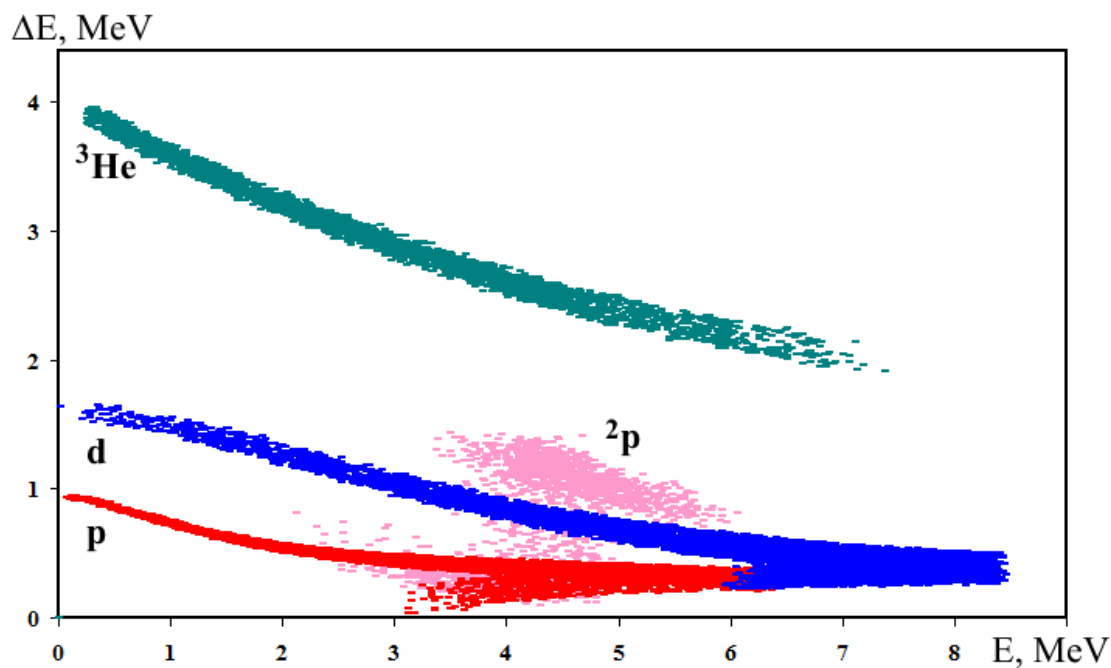


Рисунок 3.1.3 – Результаты моделирования потерь энергии для прохождения заряженных частиц (p , d , ${}^3\text{He}$ и $p+p$) через ΔE - E телескоп

Для каждого моделированного события в реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow n + n + p + p$ можно определить величину относительной энергии двух нейтронов, т.е. величину превышения энергии двухнейтронной системы над двухнейтронной массой:

$$E_{nn} = [E_1 + E_2 - 2(E_1 \times E_2)^{1/2} \times \cos \Delta\Theta] / 2 \quad (2),$$

которое полностью определяется углом $\Delta\Theta$ разлета нейтронов и их кинетическими энергиями E_1 и E_2 в лабораторной системе. Отобрав события со значениями энергии возбуждения E_{nn} в интервале Γ_{nn} : $(E_{nn} - \Gamma_{nn}, E_{nn} + \Gamma_{nn})$ можно проанализировать различные распределения выходных кинематических переменных.

Ранее [5,6], нами было показано, что в реакциях с образованием и распадом квазисвязанных NN -состояний и при условии, что детектирование частицы происходит под углом соответствующим вылету NN -системы в двухчастичной реакции, получается специфический энергетический спектр (и соответствующий ему спектр времени пролета), характеризующийся двумя пиками с расстоянием между ними, зависящим от энергии виртуального состояния E_{nn} . Такая форма спектра обусловлена тем, что попасть в детектор могут только частицы от развала, вылетающие в системе ц.м. или вперед ($\sim 0^\circ$) или назад ($\sim 180^\circ$).

Для примера, на рис. 3.1.4 показаны моделированные спектры времен пролета нейтронов, для всех событий демократического развала $E_{nn} = 0-1400$ кэВ и событий для $E_{nn} = 120$ кэВ, $\Gamma_{nn} = 50$ кэВ. Видно принципиальное отличие этих спектров.

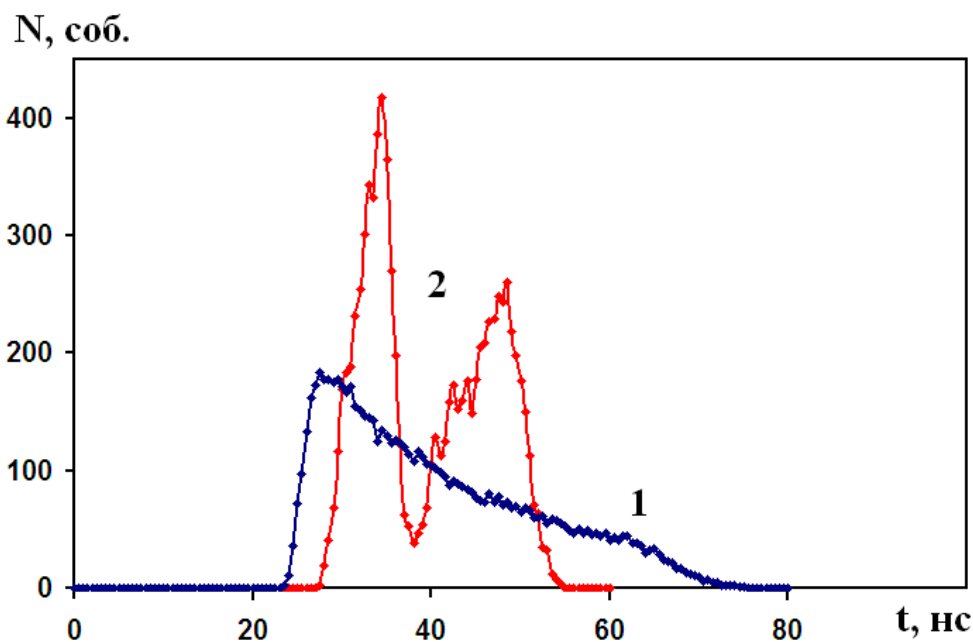


Рисунок 3.1.4 – Моделированные спектры времен пролета нейтронов: 1 – для всех событий демократического развала, 2 – событий для $E_{nn} = 120$ кэВ, $\Gamma_{nn} = 50$ кэВ. Длина времяпролетной базы нейтронов 0.79 м

На рисунках 3.1.5 и 3.1.6 показаны моделированные времяпролетные спектры для различных энергий ($E_{nn} = 50$ кэВ, $\Gamma_{nn} = 30$ кэВ; $E_{nn} = 120$ кэВ, $\Gamma_{nn} = 70$ кэВ; $E_{nn} = 200$ кэВ, $\Gamma_{nn}=100$ кэВ) виртуального состояния. Видно, что различным энергиям соответствуют различные временные интервалы между пиками.

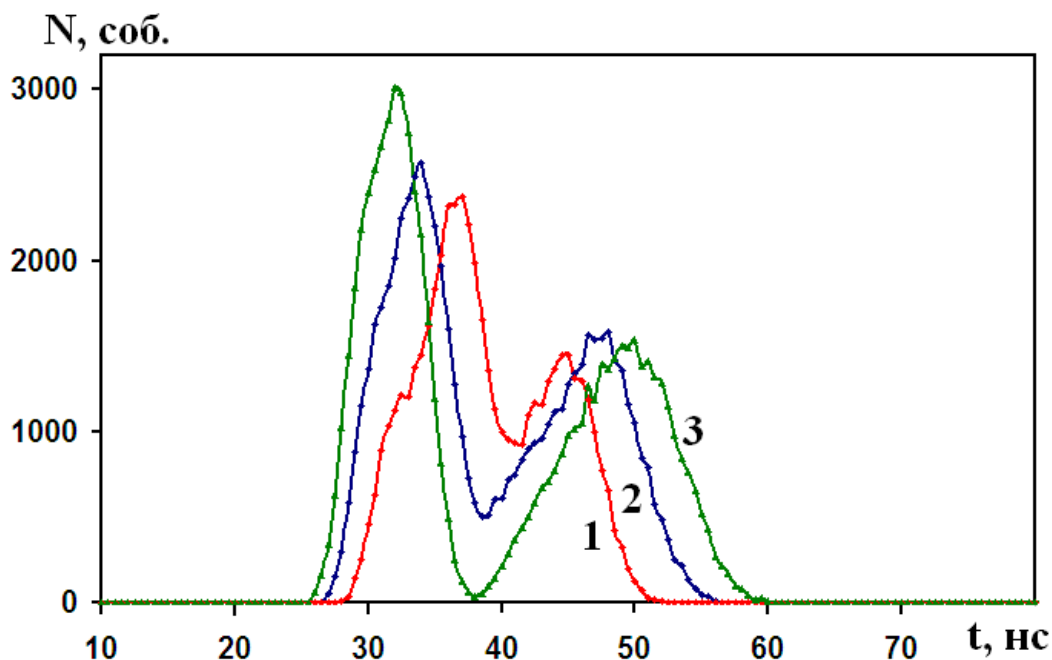


Рисунок 3.1.5 – Моделированные спектры времен пролета нейтронов для событий: 1 – $E_{nn} = 50$ кэВ, $\Gamma_{nn} = 30$ кэВ; 2 – $E_{nn} = 120$ кэВ, $\Gamma_{nn} = 70$ кэВ; 3 – $E_{nn} = 200$ кэВ, $\Gamma_{nn}=100$ кэВ

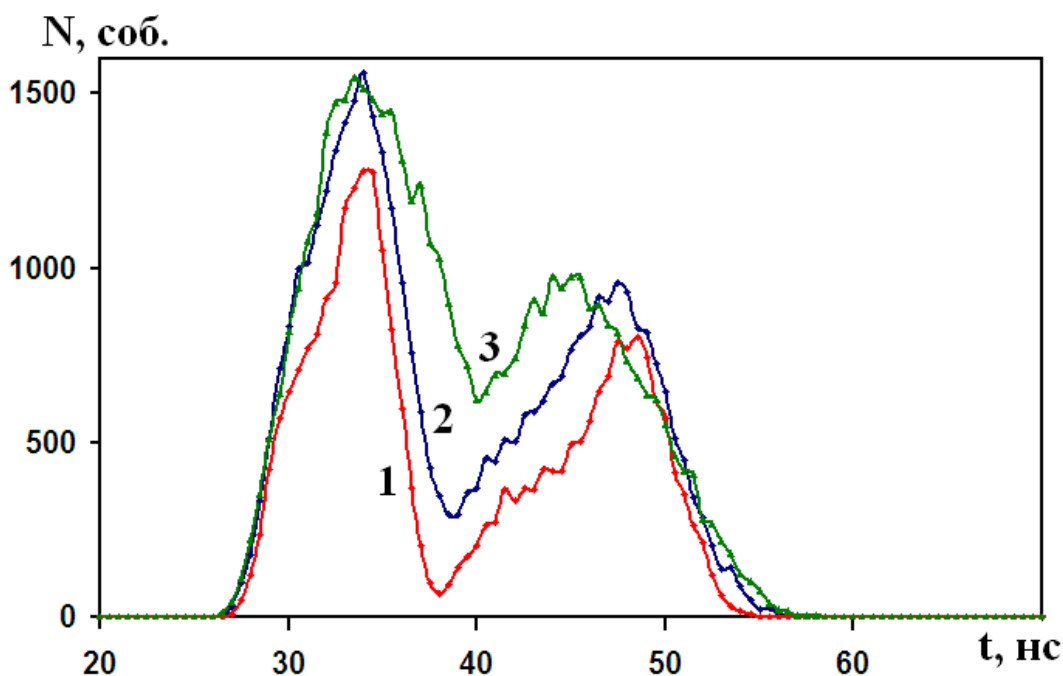


Рисунок 3.1.6 – Моделированные спектры времен пролета нейтронов для событий с $E_{nn} = 120$ кэВ и 1 – $\Gamma_{nn} = 20$ кэВ, 2 – 70 кэВ и 3 – 110 кэВ

На рис. 3.1.6 показаны моделированные времяпролетные спектры для фиксированной энергии $E_{nn} = 120$ кэВ и различных ширин $\Gamma_{nn} = 20, 70$ и 110 кэВ) виртуального состояния. Видно, что изменение ширины состояния влияет в основном на “замытие долины” между пиками и небольшому смещению пика с большим значением времени пролета к середине распределения. В целом можно отметить, что форма временного спектра чувствительна как к величине энергии виртуального состояния nn -системы, так и к ее ширине, что позволит определить эти величины из сравнения экспериментальных данных и результатов моделирования.

2 Экспериментальная установка и результаты

Экспериментальное исследование реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + n + n$ проведено на пучке дейтронов НИИЯФ МГУ с энергией 15 МэВ (рис. 3.1.7). В измерениях была использована мишень из дейтерированного полиэтилена толщиной $2 \text{ мг}\cdot\text{см}^{-2}$, пучок дейтронов с током на мишени $10 - 20$ нА. Два протона регистрировались ΔE – E телескопом под углом 27° . Нейтроны детектировались под углом 36° (соответствующим кинематике двухчастичной реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + {}^2n$) жидким водородосодержащим сцинтиллятором EJ-301, установленным на расстоянии 0.79 м от мишени. Энергия нейтронов определялась по времени пролета нейтронов до детектора, при этом в качестве стартового сигнала времяпролетной системы использовался временной сигнал от ΔE -детектора. В эксперименте использовалась система сбора информации на основе дигитайзеров (цифровых сигнальных процессоров) DT5742 и DT5720 фирмы CAEN, описанная в [7].

Для калибровки времяпролетных спектров нейтронный детектор перемещался на угол 83° для регистрации нейтрона из двухчастичной реакции $d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n$. Временное разрешение в калибровочном измерении составило 2.5 нс, что в основном связано с разбросом места образования нейтроном протона отдачи в достаточно длинном нейтронном детекторе (± 2.5 см) и кинематикой реакции.

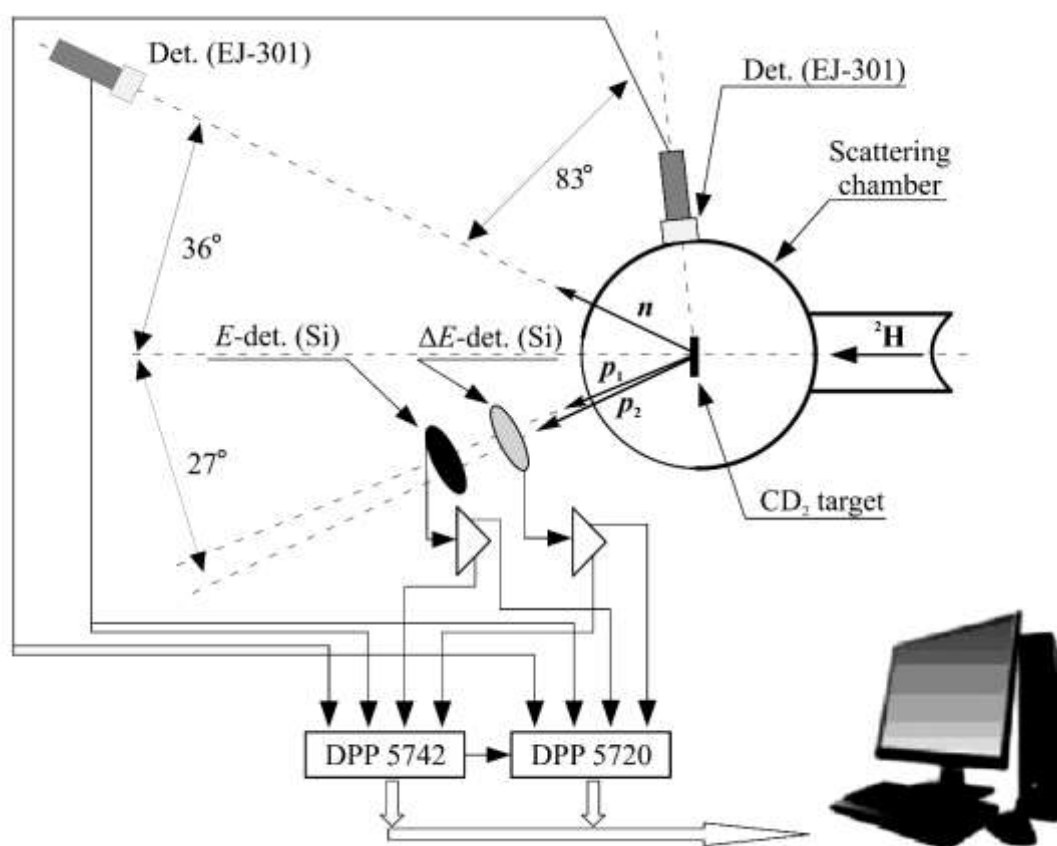


Рисунок 3.1.7 – Схема экспериментальной установки для изучения реакции
 $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$

На рис. 3.1.8 показана двумерная ΔE – E диаграмма, полученная при условии совпадения сигналов от ΔE , E и нейтронного детектора. На рисунке видны локусы ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$, а также протонный и дейтронный локусы. Показана также область диаграммы для событий, полученных в результате моделирования прохождения двух протонов через детектирующую систему. Видно, что имеется значительное количество экспериментальных событий, попадающих в эту область.

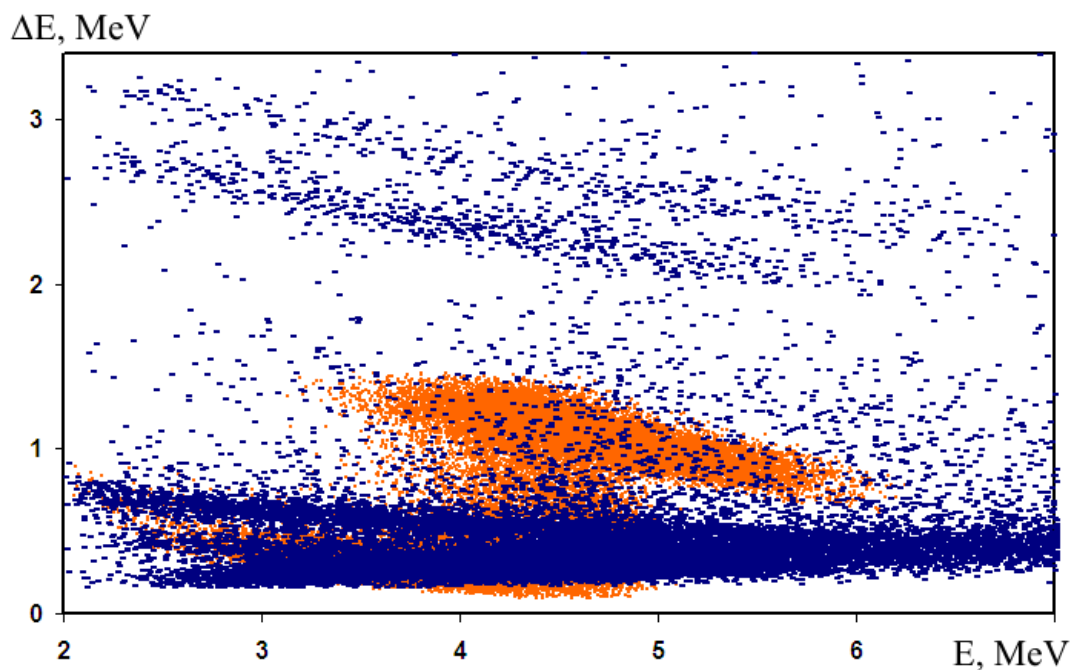


Рисунок 3.1.8 – Двумерная $\Delta E - E$ диаграмма. Точки – экспериментальные события, красная область – результаты моделирования прохождения двух протонов через ΔE - E телескоп

Отбор событий по такой области и определение времени пролета нейтрона для событий принадлежащих этой области приводит к следующему временному спектру нейтронов, показанному на рис. 3.1.9.

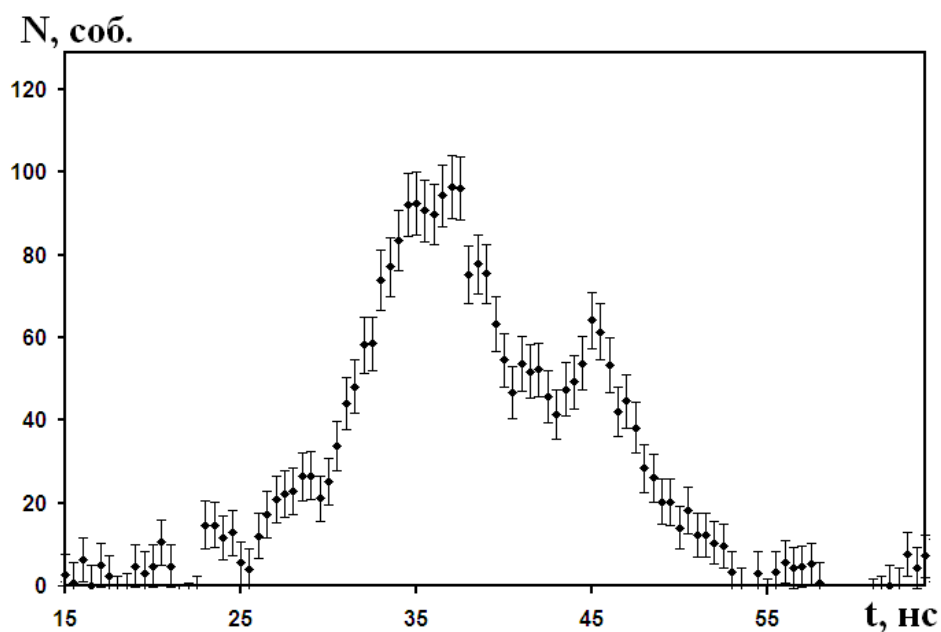


Рисунок 3.1.9 – Экспериментальный времяпролетный спектр нейтронов. Времяпролетная база – 79 см, временное разрешение – 2.5 нс

Экспериментальный спектр сравнивался с результатами моделирования для различных значений энергии и ширины виртуального состояния nn -системы. При этом для каждого значения E_{nn} проводилась процедура фитирования, в процессе которой определялось наилучшее значение интервала Γ_{nn} . В процессе подгонки минимизировалось значение χ^2 для экспериментальных $N^{\text{exp}}(t)$ и моделированных $N_{E_{nn}, \Gamma_{nn}}^{\text{th}}(t)$ точек, даваемое выражением:

$$\chi^2(E_{nn}, \Gamma_{nn}) = \sum_t \frac{(N_{E_{nn}, \Gamma_{nn}}^{\text{th}}(t) - AN^{\text{exp}}(t))^2}{(\Delta N^{\text{exp}}(t))^2}, \quad (3)$$

где A – нормировочный коэффициент, определяемый как отношение интегралов экспериментального и теоретического спектров по всему интервалу суммирования t , а $\Delta N^{\text{exp}}(t)$ – статистическая ошибка экспериментальных точек. Для представляемых данных интервал суммирования по времени пролета составлял 31-48 нс и включал большую часть наблюдаемой структуры. Изменение интервала суммирования незначительно влияла на результат подгонки. Для каждого фиксированного значения E_{nn} оптимальная величина Γ_{nn}^{opt} выбиралась по минимуму χ^2 (3) (см. рис. 3.1.10). Таким образом, для каждого значения E_{nn}^i находилось минимальное значение $\chi_{\min}^2(E_{nn}^i, \Gamma_{nn}^{\text{opt}})$.

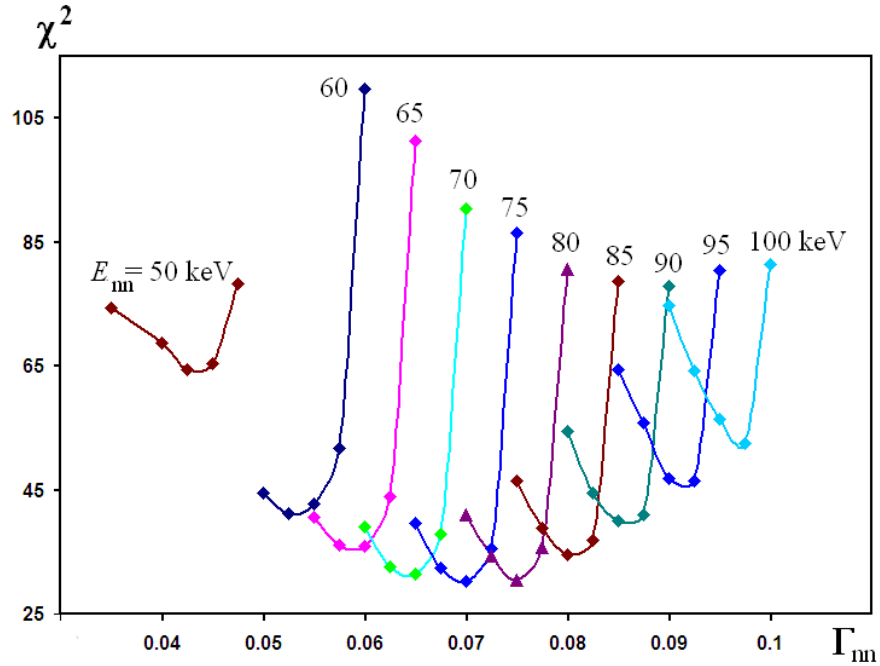


Рисунок 3.1.10 – Зависимость $\chi^2(E_{nn}^i, \Gamma_{nn})$ от величины Γ_{nn}^i для различных E_{nn}^i . Значения χ^2 получены с использованием формулы (3)

На рис. 3.1.11 экспериментальный спектр сравнивается с различными вариантами моделирования – демократический развал ($E_{nn} = 0-1300$ кэВ), $E_{nn} = 160$ кэВ, $\Gamma_{nn} 150$ кэВ; $E_{nn} = 80$ кэВ, $\Gamma_{nn} = 70$ кэВ и $E_{nn} = 40$ кэВ, $\Gamma_{nn} = 35$ кэВ. Для последних трех вариантов, моделирование проводилось для указанных значений E_{nn}^i с оптимальным значением параметра Γ_{nn}^{opt} .

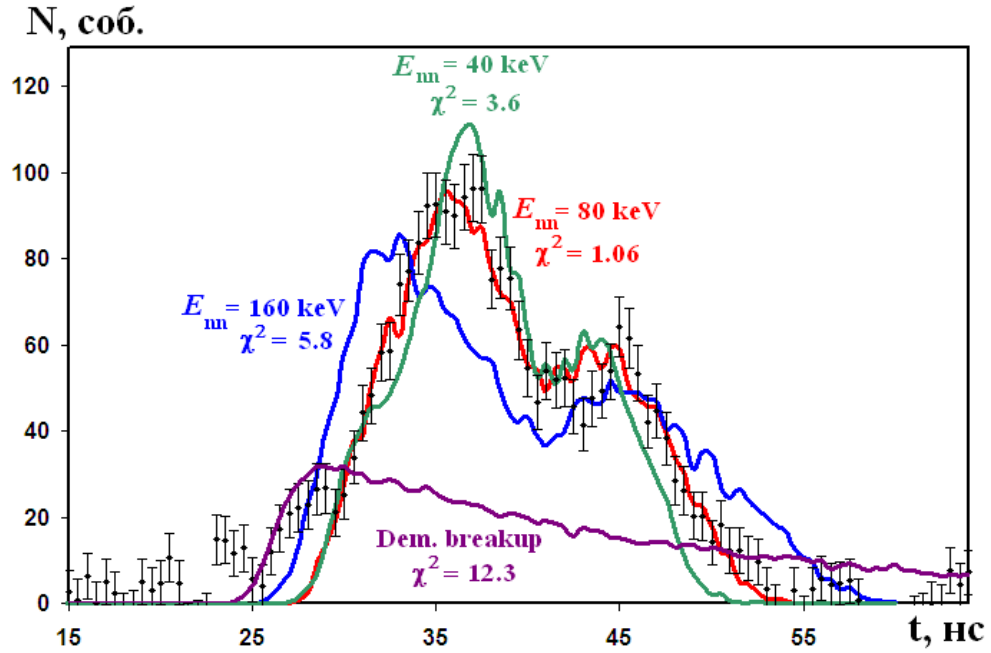


Рисунок 3.1.11 – Экспериментальный времяпролетный спектр нейтронов и примеры моделированных спектров. Моделирование: сиреневая линия – демократический развал, синяя линия – $E_{nn} = 160$ кэВ, $\Gamma_{nn} 150$ кэВ; красная – $E_{nn} = 80$ кэВ, $\Gamma_{nn} = 70$ кэВ, зеленая – $E_{nn} = 40$ кэВ, $\Gamma_{nn} = 35$ кэВ

Для определения величины E_{nn} строилась зависимость минимального значения $\chi_{min}^2(E_{nn}^i, \Gamma_{nn}^{opt})$ от величины E_{nn}^i , которая подгонялась квадратичным полиномом (рис. 3.1.11). При этом минимальное значение χ_{min}^2 определяет величину энергии состояния, а ошибка ΔE_{nn} в определении E_{nn} дается формулой:

$$\Delta E_{nn} = |E_{nn}(\chi_{min}^2) - E_{nn}(\chi_{min}^2 + 1)| \quad (4)$$

Минимальное значение полинома достигается при $E_{nn} = 76$ кэВ, ошибка в определении этой величины составляет ± 6 кэВ.

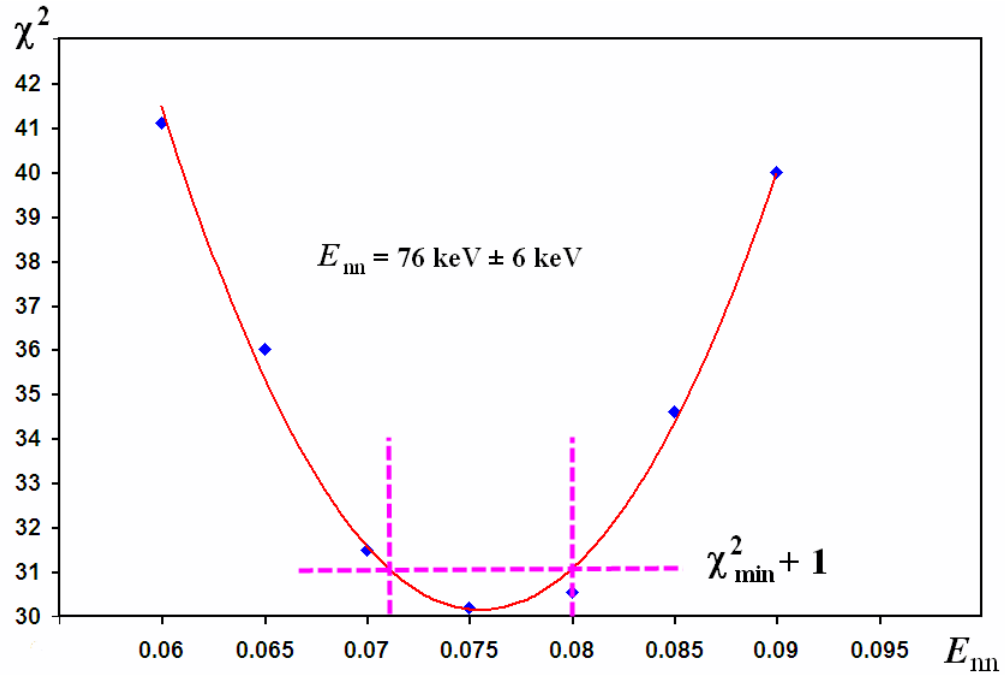


Рисунок 3.1.12 – Зависимость $\chi^2(E_{nn}^i, \Gamma_{nn}^{opt})$ (3) от величины E_{nn}^i . Кривая – подгонка квадратичным полиномом

Значение энергии виртуального состояния nn -системы связано с синглетной длиной нейтрон-нейтронного рассеяния a_{nn} соотношением:

$$\frac{1}{a_{nn}} = -\left(\frac{m_n \varepsilon_{nn}}{\hbar^2}\right)^{1/2} - \frac{1}{2} r_{nn} \frac{m_n \varepsilon_{nn}}{\hbar^2} + \dots \quad (5)$$

Согласно уравнению (5), значению энергии виртуального уровня $\varepsilon_{nn} = 0.076 \pm 0.006$ MeV соответствует значение синглетной длины nn -рассеяния $a_{nn} = -22.2 \pm 0.6$ фм. Это значение длины nn -рассеяния можно сравнить с литературными данными, полученными в последние годы в реакции nd -развала [8 – 13].

Следует отметить, что полученное нами ранее [13] значение $a_{nn} = -17.9 \pm 1.0$ фм было извлечено из эксперимента в приближении нулевого радиуса действия ядерных сил ($r_{nn} = 0$). При использовании формулы (1) с общепринятым значением $r_{nn} = 2.81$ фм мы получим значение $a_{nn} = -16.6 \pm 1.0$ фм, которое и будет далее использоваться в сравнении.

На рис. 3.1.13 отложены экспериментальные значения длин nn -рассеяния в зависимости от параметра R , имеющего значение расстояния, на которое разлетается "динейтрон- 1S_0 " и заряженный фрагмент (протон в nd -развале или дипротон в dd -развале) за фиксированное время (например, 10^{-22} с). Этот параметр характеризует нахождение "динейтрона" и заряженного фрагмента в зоне действия трехчастичных сил в зависимости от параметров конкретного эксперимента (в основном от энергий вторичных частиц). Видно, что значительные различия в величине длины рассеяния в различных

работах можно объяснить различием влияния трехнуклонных сил. На рисунке приведена фитирующая кривая (с коридором ошибок), позволяющая описать данные с $\chi^2/N = 1.2$.

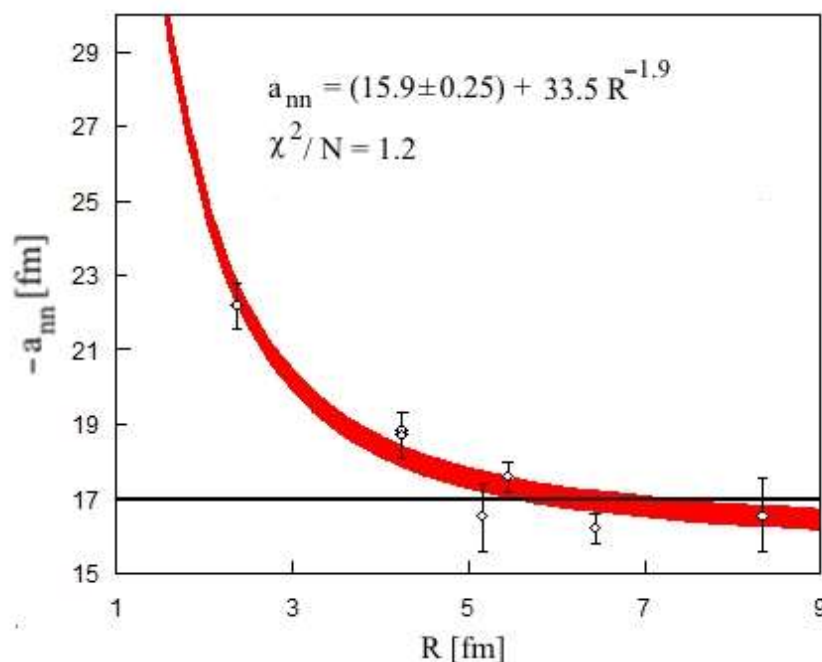


Рисунок 3.1.13 – Зависимость экспериментальных значений длин nn -рассеяния от параметра R

Анализ данных позволил сделать вывод о зависимости извлекаемой величины длины nn -рассеяния от относительного импульса nn -пары и третьей заряженной частицы, т.е. о заметном неучтенном вкладе 3N-сил. При этом аппроксимация кривой на рис.13 к большим значениям R , т.е. к случаю отсутствия вклада 3N-сил дает значение a_{nn} близкое к значению $a_{pp} \approx -17$ фм, что возможно свидетельствует о малой величине параметра нарушения зарядовой симметрии ядерных сил.

3.1.ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исследования nn и pp корреляций в малонуклонных системах разработана программа экспериментов по исследованию реакций $d + {}^2\text{H} \rightarrow {}^2\text{He} + (nn)$, $n + {}^3\text{H} \rightarrow {}^2\text{H} + (nn)$ и $n + {}^2\text{H} \rightarrow p + (nn)$, в которых впервые будет проведено прямое определение энергии nn -виртуального синглетного 1S_0 состояния. Проведенное моделирование реакций позволило сформулировать методику определения энергии виртуального 1S_0 состояния по форме энергетического (времяпролётного) спектра нейтрона от развала этого состояния в определенной кинематике и в совпадении с заряженной частицей (${}^2\text{He}$, ${}^2\text{H}$ или p). Согласно этой методике была создана экспериментальная установка в НИИЯФ МГУ.

На пучке 15 МэВ дейтронов циклотрона У-120 НИИЯФ МГУ исследована реакция $d + {}^2\text{H} \rightarrow {}^2n^S + {}^2p^S \rightarrow n + n + p + p$, идущая через образование в промежуточном состоянии синглетных пар – динейтрона (${}^2n^S$) и дипротона (${}^2p^S$). Впервые, в кинематически полном эксперименте получено значение энергии виртуального синглетного 1S_0 состояния 2n -системы. Значение энергии состояния определено из сравнения экспериментального времяпролетного спектра нейтрона от развала 2n -системы с результатами моделирования, зависящими от этой энергии. По результатам фитирования определено наиболее вероятное значение энергии виртуального nn -состояния $\varepsilon_{nn}=0.076 \pm 0.06$ МэВ. Это значение энергии виртуального уровня соответствует значению синглетной длины nn -рассеяния $a_{nn} = -22.2 \pm 0.6$ фм, которое сравнивалось с литературными данными, полученными в последние годы в реакции nd -развала. Анализ данных позволил сделать вывод о зависимости извлекаемой величины длины nn -рассеяния от относительного импульса nn -пары и третьей заряженной частицы, т.е. о заметном неучтенном вкладе $3N$ -сил. При этом в случае малого вклада $3N$ -сил значения a_{nn} близки к значению $a_{pp} \approx -17$ фм, что, по-видимому, свидетельствует о малой величине параметра нарушения зарядовой симметрии ядерных сил.

3.1 СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Witala H. and Glöckle W. Phys. Rev. C 83, 034004 (2011).
2. Ruan X.S. *et al.* Phys. Rev. C 75, 057001 (2007).
3. Konobeevski E.S., Kukulin V.I., Zuyev S.V. *et al.* Bull. Russ. Acad. Sci. 78, 341 (2014).
4. Zuyev S.V., Kasparov A.A., Konobeevski E. S. *et al.* Bull. Russ. Acad. Sci. 78, 345 (2014).
5. Konobeevski E., Zuyev S., Kasparov A., and Ostashko V. Few-Body Syst. 55, 1059 (2014).
6. Konobeevski E.S., Zuyev S.V., Kasparov A.A. *et al.* Phys. Atom. Nucl. 78, 643 (2015).
7. Zuyev S.V., Kasparov A.A., Konobeevski E.S. *et al.* Bull. Russ. Acad. Sci. 80, 227 (2016).
8. V.Huhn, L.Watzold, Ch.Weber *et al.*, Phys. Rev. C **63**, 014003 (2000).
9. W. von Witsch, X. Ruan, and H. Witala, Phys. Rev. C **74**, 014001 (2006).
10. B.J.Crowe *et al.*, TUNL Progress Report, XLV, 65 (2005-06)
11. D.E.Gonzales Trotter *et al.*, Phys. Rev. Lett. **83**, 3788 (1999).
12. D.E.Gonzales Trotter *et al.*, Phys. Rev. C **73**, 034001 (2006).
13. E.S.Konobeevski *et al.*, Physics of Atomic Nuclei **73**, 1302 (2010).

3.1 ПУБЛИКАЦИИ

Статьи вышедшие:

- 1 А.А.Каспаров, Е.С.Конобеевский, С.В.Зуев Моделирование кинематики реакции $d + d \rightarrow p + p + n + n$ "Дифференциальные Уравнения и Процессы Управления", №2, 2016, с. 257
- 2 С.В.Зуев, А.А.Каспаров, Е.С.Конобеевский, В.М.Лебедев, М.В.Мордовской, А.В.Спасский Реакция $d + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + n$ как источник квазимоноэнергетических нейтронов для исследования свойств нейтронных детекторов. Известия РАН. Серия Физическая, 2016, том 80, № 3, с. 260
- 3 С.В.Зуев, А.А.Каспаров, Е.С.Конобеевский, М.В.Мордовской, И.М.Железных, А.Г.Гасанов, В.М.Лебедев, А.В.Спасский Установка для изучения NN-корреляций в реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow n + n + p + p$ Известия РАН. Серия Физическая, 2016, том 80, № 3, с. 254
- 4 А.А. Каспаров, Е.С. Конобеевский, С.В. Зуев. Моделирование кинематики реакции $d + d \rightarrow p + p + n + n$ // Дифференциальные Уравнения и Процессы Управления, №2, 2016, с. 257-260

Направлено в печать:

- 1 E. Konobeevski, A. Kasparov, M. Mordovskoy, S. Zuyev, V. Lebedev, A. Spassky Determination of energy of nn -singlet virtual state in $d+{}^2\text{H} \rightarrow p+p+n+n$ reaction Few-Body Systems, 2017
- 2 E. Konobeevsky, A. Kasparov, M. Mordovskoy, S. Zuyev, V. Lebedev, A. Spassky Study of n - n correlations in $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$ reaction Journal of Physics: Conference Series, 2017
- 3 С.В. Зуев, А.А. Каспаров, Е.С. Конобеевский Математическое моделирование малонуклонных экспериментов с тремя и более частицами в конечном состоянии Известия РАН. Серия физическая, 2017

Препринты:

- 1 E. Konobeevski, A. Kasparov, M. Mordovskoy, S. Zuyev, V. Lebedev, A. Spassky Study of n - n correlations in $d + {}^2\text{H} \rightarrow p + p + n + n$ reaction arXiv:1611.07963 [nucl-ex]
- 2 E. Konobeevski, A. Kasparov, M. Mordovskoy, S. Zuyev, V. Lebedev, A. Spassky Determination of energy of nn -singlet virtual state in $d+{}^2\text{H} \rightarrow p+p+n+n$ reaction arXiv:1612.02963 [nucl-ex]

Доклады на Конференциях:

- 1 Konobeevsky E., Kasparov A., Mordovskoy M., Zuyev S. Lebedev V., Spassky A. Determination of energy of nn -singlet quasibound state in $d + {}^2\text{H} \rightarrow n + n + p + p$

- reaction 23^{RD} Conference on few-body problems in physics (EFB23), 8-12 August 2016, Aarhus, Denmark
- 2 E.Konobeevski, A. Kasparov, V. Lebedev, M. Mordovskoy, A. Spassky, S. Zuyev Study of n-n correlations in $d+^2\text{H}\rightarrow p+p+n+n$ reaction The 2nd international conference on particle physics and astrophysics (ICPPA – 2016), October 10 – 14, 2016, Moscow
 - 3 E.Konobeevski, A.Kasparov, V.Lebedev, M.Mordovskoy, A.Spassky, S.Zuyev Study of n-n interaction parameters in reactions with two final state neutrons 66-я Международная конференция по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «ЯДРО-2016», Саров, 11-14 октября 2016 г. Тезисы, с. 65
 - 4 S.V. Zuyev, A.A. Kasparov, E.S. Konobeevsky Mathematical simulation of few-nucleon experiments with three and more particles in the final state 66-я Международная конференция по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «ЯДРО-2016», Саров, 11-14 октября 2016 г. Тезисы, с. 160
 - 5 А.А. Каспаров, Е.С. Конобеевский, С.В. Зуев Моделирование реакции $d+d\rightarrow p+p+n+n$ Некоторые актуальные проблемы современной математики и математического образования. Герценовские чтения – 2016. Материалы научной конференции, 11–15 апреля 2016 г. – СПб.: Изд. РГПУ им А. И. Герцена, 2016. – с. 210

3.2 Исследование структуры и механизмов взаимодействия слабосвязанных ядер с ядрами при средних энергиях

Руководитель темы: Евгений Сергеевич Конобеевский, зав. лаб., кфмн

Основные исполнители:

Заварзина В.П., снс, кфмн

Зуев С.В., снс, кфмн

Курлович А.С., стажер-исследователь

Исполнители:

Каспаров А.А., стажер-исслед.

Мицук В.В., стажер-исслед.

3.2 РЕФЕРАТ

9 стр., 3 рис., 1 табл.

ЛЁГКИЕ ГАЛО ЯДРА, КЛАСТЕРНАЯ СТРУКТУРА, ДИНЕЙТРОН, КОР, РЕАКЦИЯ ПОДХВАТА, РЕАКЦИЯ СРЫВА

Цель работы – решение фундаментальной проблемы ядерной физики – исследования кластерной структуры ядер, в частности, существования в ядрах NN-кластеров. Строгая корреляция между нуклонами приводит к явлению кластеризации. Энергии квазисвязанных синглетных состояний двухнуклонной системы составляют порядка 0.1–0.2 МэВ, над порогом развала. Однако в ядре синглетная пара может быть более связана, образуя кластер. Наиболее характерный пример ${}^6\text{He}$, в котором существует динейтронная компонента [1,2]. Для ядра ${}^6\text{Li}$, также обсуждается структура этого ядра ${}^4\text{He} + (np)$.

В рамках темы проведено кинематическое моделирование реакций подхвата альфа-кора из ядра ${}^6\text{He}$ или ${}^6\text{Li}$ – ${}^6\text{He} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^6\text{Li} + (nn)$ и ${}^6\text{Li} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^6\text{Li} + (np)$ с регистрацией как заряженной частицы ${}^6\text{Li}$ так и нейтрона от развала синглетного nn (np) 1S_0 состояния.

В результате исследований показана возможность получения информации об энергии синглетных двухнуклонных состояний исследуя форму энергетического спектра нейтронов от распада этих состояний. Проведенное моделирование определило необходимые параметры планируемого эксперимента.

В процессе исследований рассмотрена также реакция срыва остова гало-ядра в рамках дифракционной теории. Продемонстрировано хорошее описание дифференциальных сечений и распределений по продольным импульсам нуклонов с помощью полученных аналитических выражений.

3.2 ВВЕДЕНИЕ

Один из самых ярких примеров кластеризации ядер – существование нейтронного гало в легких нейтроноизбыточных ядрах [3]. Нейтронное гало-ядро можно представить как компактный кор, окруженный одним или несколькими нейтронами. Особый интерес вызывают ядра с двухнейтронным гало (^{11}Li , ^6He , ^{14}Be). В этих ядрах связанной является только система трех тел кор+ $n+n$, в то время как системы двух тел: динейтрон ($n+n$) и кор+ n не связаны. Можно отметить общие свойства, характерные для этих ядер. По сравнению со стабильными ядрами, в которых все протоны и нейтроны распределены равномерно по ядерному объему, среднеквадратичный радиус пространственного распределения валентных нейтронов значительно превышает аналогичный параметр нуклонов кора. Таким образом, на периферии гало ядер существует нейтронное вещество. Большие расстояния между ядром и нейтронами гало можно объяснить слабой связью: энергия отделения нейтрона для гало ядер на порядок величины меньше чем для обычных ядер. Однако если существование нейтронного гало является хорошо установленным фактом, то проблема определения структуры гало, другими словами определения пространственной конфигурации валентных нейтронов, пока еще полностью не решена.

Наиболее изученное ядро с двухнейтронным гало – ^6He . В работе [4] были рассмотрены две основные конфигурации его гало – динейтронная конфигурация с двумя нейтронами, расположенными компактно ($R_{nn} \sim 2$ Фм) на расстоянии от кора – $R_h \sim 3$ Фм, и сигароподобная конфигурация с валентными нейтронами, расположенными с противоположных сторон кора ($R_{nn} \sim 4 - 5$ Фм, $R_h \sim 1 - 1.5$ Фм). Анализ реакции передачи двух нейтронов, выполненный в Дубне [1] позволил авторам утверждать, что конфигурация «динейтрон» в ^6He дает основной вклад в сечение этой реакции. С другой стороны, исследование радиационного захвата протона ядром ^6He [5] и исследование пространственной конфигурации нейтронов гало методом нейтронной интерферометрии [6] показали, что сигароподобная конфигурация гало является доминирующей в ^6He . Таким образом, даже для наиболее изученного гало-ядра ^6He невозможно сделать заключительный вывод о структуре нейтронного гало. Необходимы новые эксперименты для различных реакций и при различных энергиях.

3.2 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Моделирование реакций срыва кора из ядер ^6He и ^6Li .

Известно, что в свободном состоянии не существует связанного динейтрона, дипротона, и даже синглетного дейтрона. Энергии квазисвязанных синглетных состояний двухнуклонной системы составляют порядка 0.1–0.2 МэВ, над порогом развала. Однако в

ядре синглетная пара может быть более связана, образуя кластер. Наиболее характерный пример ${}^6\text{He}$, в котором существует динейтронная компонента [1,2]. Для ядра ${}^6\text{Li}$, также обсуждается структура этого ядра ${}^4\text{He} + (np)$. Можно предположить, что в ${}^6\text{He}$ (${}^6\text{Li}$) кор ${}^4\text{He}$ может приводить к дополнительному связыванию двух нейтронов (np синглетной пары).

Основная идея предлагаемых нами экспериментов состоит в том, что если из ${}^6\text{He}$ или ${}^6\text{Li}$ быстро удалить альфа-кор, то наблюдаемый характер импульсных распределений «оставшихся» nn и np пар не должен измениться, т.к. эти пары являются в таком эксперименте «секстаторами», которые быстро вылетают из зоны реакции без сильных искажений того состояния, которое эта пара имела первоначально. И можно ожидать что измеренные nn - и np -корреляции, в частности энергии nn (np) квазисвязанного синглетного 1S_0 состояния окажутся совсем не те, которые присущи свободным nn - и np -системам.

В работе проведено кинематическое моделирование реакций подхвата альфа-кора из ядра ${}^6\text{He}$ или ${}^6\text{Li}$ – ${}^6\text{He} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^6\text{Li} + (nn)$ и ${}^6\text{Li} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^6\text{Li} + (np)$ с регистрацией как заряженной частицы ${}^6\text{Li}$, так и нейтрона от развала синглетного nn (np) 1S_0 состояния. В моделируемых экспериментах будут определены энергии nn (np) квазисвязанных синглетных 1S_0 состояний и на основе определения этих энергий (и в случае их отличия от значений для свободных nn , np пар, например, полученных в реакциях $dd \rightarrow nn + pp$ и $dd \rightarrow np + np$) проведены оценки эффективного притяжения, возникающего между валентными нуклонами в поле третьей частицы (кора).

Для определения энергии квазисвязанных двухнуклонных состояний будут применен метод, позволяющий определять эти энергии по форме энергетического спектра нуклонов, получающихся при развале этого состояния [3].

При условии, что детектирование частицы происходит под углом соответствующем вылету NN -системы в двухчастичной реакции, попасть в детектор могут только распадные частицы, вылетающие в системе ц.м. или вперед ($\sim 0^\circ$) или назад ($\sim 180^\circ$). Соответственно получается специфический энергетический спектр (рис. 3.2.1) и соответствующий ему временной спектр (рис. 2), характеризующийся двумя пиками с расстоянием между ними, зависящим от энергии квазисвязанного состояния.

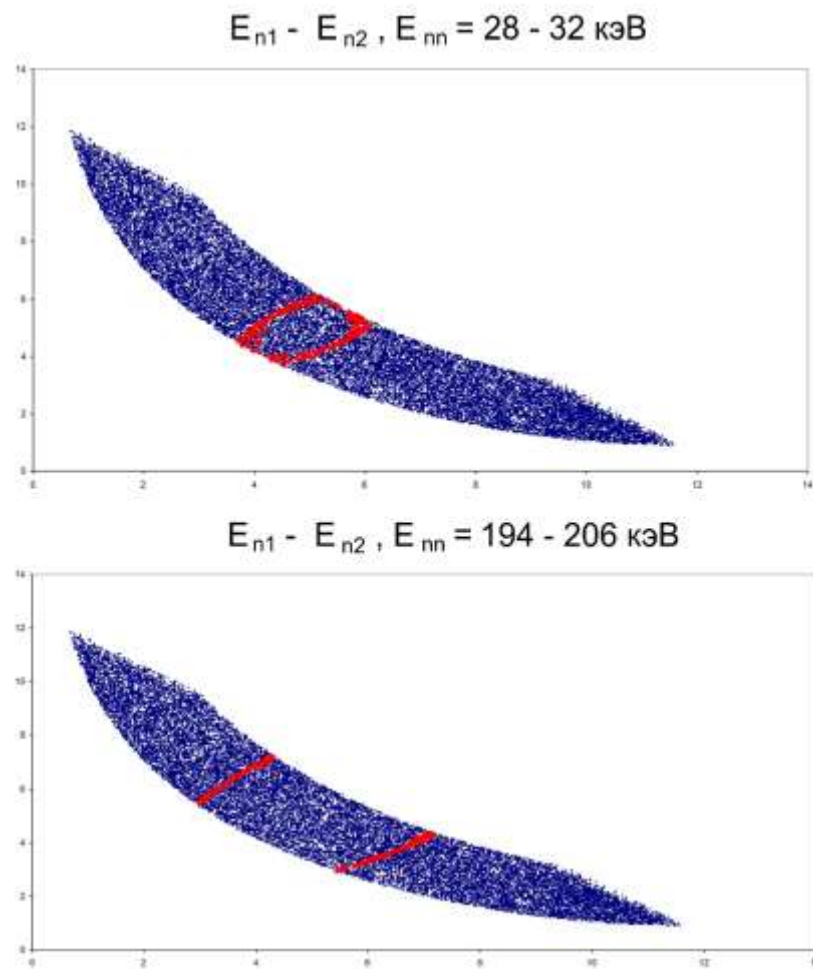


Рисунок 3.2.1 – Двумерные распределения $E_{n1}-E_{n2}$ при различных энергиях виртуального nn -уровня $E_{nn} = 30 \pm 2$ и 200 ± 5 кэВ

При условии, что детектирование частицы происходит под углом соответствующем вылету NN -системы в двухчастичной реакции, попасть в детектор могут только распадные частицы, вылетающие в системе ц.м. или вперед (~ 0 градусов) или назад (~ 180 градусов). Соответственно получается специфический энергетический спектр (рис. 3.2.1) и соответствующий ему временной спектр (рис. 3.2.2), характеризующийся двумя пиками с расстоянием между ними, зависящим от энергии квазисвязанного состояния.

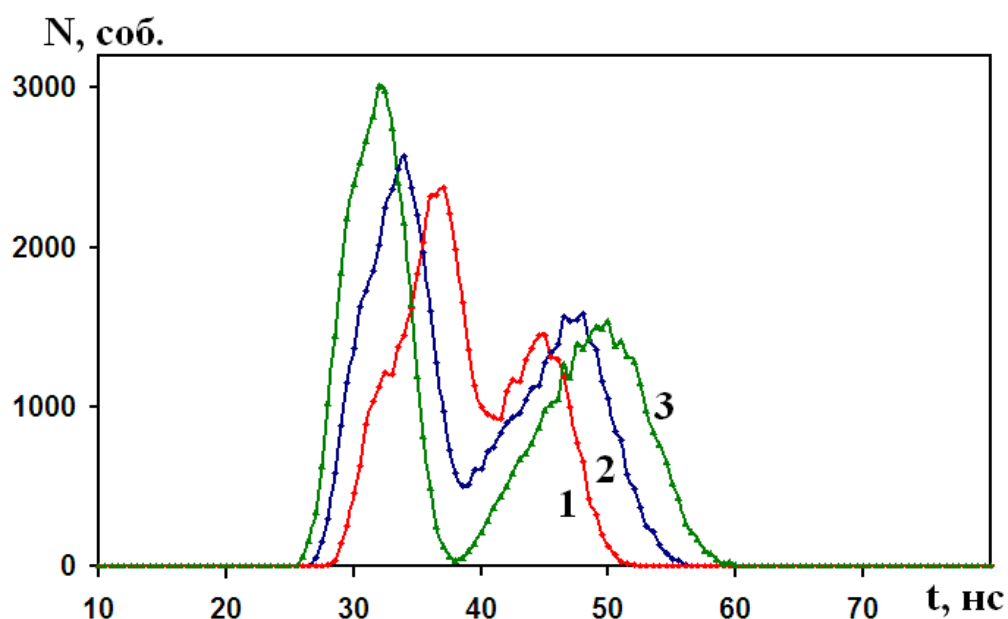


Рисунок 3.2.2 – Моделированные спектры времен пролета нейтронов для событий: 1 – $E_{nn} = 50 \text{ кэВ} \pm 30 \text{ кэВ}$; 2 – $E_{nn} = 120 \text{ кэВ} \pm 70 \text{ кэВ}$; 3 – $E_{nn} = 200 \text{ кэВ} \pm 100 \text{ кэВ}$

Таким образом, проведенное моделирование показало возможность получения информации об энергии квазисвязанных двухнуклонных состояний по форме временного спектра и определило необходимые параметры планируемого эксперимента. В эксперименте будет использован пучок ${}^6\text{He}$ (${}^6\text{Li}$) с энергией $\sim 5\text{-}10 \text{ МэВ/нуклон}$ и тонкая мишень из дейтерированного полиэтилена. В эксклюзивном эксперименте будут регистрироваться как заряженная частица (${}^6\text{Li}$), так и один или два нейтрона. Углы регистрации соответствуют кинематике двухчастичной реакции с вылетом динейтрона или синглетного дейтрона (рис. 3).

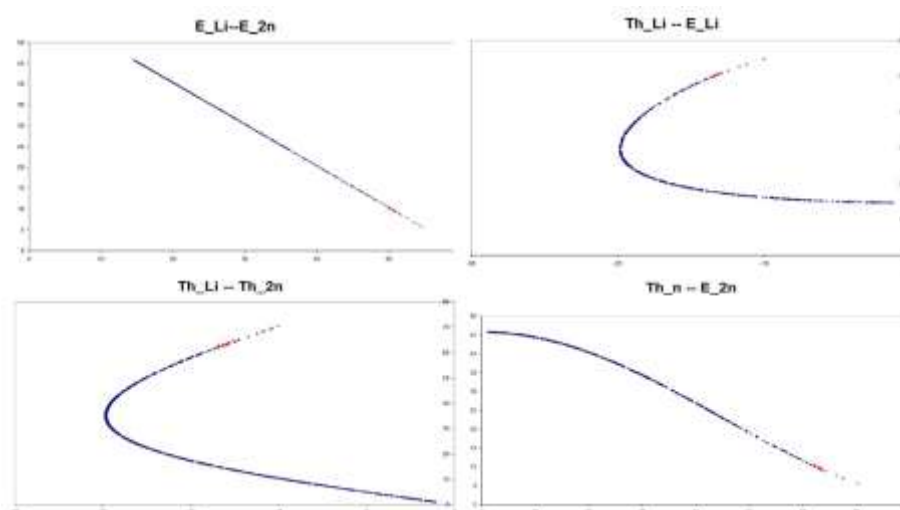


Рисунок 3.2.3 – Моделирование двухчастичной реакции ${}^6\text{He} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^6\text{Li} + nn$. Красным цветом выделены области, соответствующие параметрам планируемой экспериментальной установки

Заряженные частицы (${}^6\text{Li}$) будут регистрироваться телескопом кремниевых детекторов, а нейтроны жидкими сцинтилляторами, с определением энергии по времени пролета. Анализ время-пролетных спектров нейтронов, регистрируемых под углом близким к углу вылета np -системы (или pr -системы) позволит получить информацию об энергии NN - квазисвязанных состояний.

Рассмотрение реакции срыва остова гало-ядра в рамках дифракционной теории.

Наряду с численными методами расчета наблюдаемых величин в дифракционной теории реакций слабосвязанных ядер (дейтрон, гало-ядро) с ядрами неоднократно использовались аналитические методы, основанные на различных предположениях о размерах ядер, волновой функции гало-ядра и форме взаимодействия. Ранее в работе [7] рассматривалась реакция срыва нуклона и срыва остова гало-ядра в рамках дифракционной теории, в которой взаимодействие конститuentов слабосвязанного ядра с легким ядром-мишенью описывается моделью черного диска.

Был сформулирован усовершенствованный вариант приближения малого (по сравнению с размером гало-ядра) эффективного радиуса ядра-мишени, предложенного в [8]. Получены простые аналитические выражения для дифференциального сечения и распределения по продольным импульсам наблюдаемых частиц-остовов, которые позволяют вычислять их с хорошей точностью и полезны при анализе экспериментальных данных.

На ряде частных примеров продемонстрировано хорошее описание дифференциального сечения и распределения по продольным импульсам нуклонов с помощью упомянутых выше аналитических выражений. Показано, как общее соотношение дифракционной модели может быть использовано для вычисления дифференциального сечения реакции срыва остова гало-ядра в приближении малого радиуса ядра-мишени. Рассмотрено также другое приближение дифракционной теории реакции срыва нуклона гало-ядра – случай большого радиуса ядра-мишени. Результаты расчетов сравнивались с результатами, полученными при использовании различных подходов.

Таблица 3.2.1 – Погрешности δ_σ и δ_w

$\frac{k_{cz}}{\alpha}$	$R_n = 2 \text{ фм},$ $R_c = 4 \text{ фм}$		$R_n = 2.5 \text{ фм},$ $R_c = 4.5 \text{ фм}$		$R_n = 3.0 \text{ фм},$ $R_c = 5.0 \text{ фм}$		$R_n = 4.0 \text{ фм},$ $R_c = 6.0 \text{ фм}$
	$\delta_\sigma, \%$	$\delta_w, \%$	$\delta_\sigma, \%$	$\delta_w, \%$	$\delta_\sigma, \%$	$\delta_w, \%$	$\delta_w, \%$
$0-1/\sqrt{2}$	< 0.5	< 1	$0.5-0.9$	< 0.3	$1.0-1.5$	< 0.1	< 0.5
$1/\sqrt{2}-\sqrt{2}$	≤ 1	< 1	$0.9-2.5$	< 0.6	$1.5-4.5$	< 1	< 0.5

В табл. 3.2.1 приведены погрешности δ_σ и δ_w описания приближенными формулами дифференциальных сечений реакции срыва нуклона (h, c) и соответствующих распределений по продольным импульсам частиц-остовов гало-ядра, вычисленных в дифракционной модели для различных радиусов поглощения нуклона R_n и остова R_c ядром-мишенью. Видно, что для всех наборов параметров приближенная асимптотическая формула воспроизводит распределения по продольным импульсам частиц-остовов, полученные с помощью численного интегрирования, с малой погрешностью $\delta_\omega < 1\%$. Абсолютные значения дифференциальных сечений воспроизводятся приближенными формулами с несколько большей погрешностью, которая возрастает по мере увеличения радиуса R_n и импульса $\hbar k_{cz}$. В частности, при $R_n = 3$ фм погрешность δ_σ составляет 1 – 1.5 % при $\frac{k_{cz}}{\alpha} < \frac{1}{\sqrt{2}}$ и 1.5 – 4.5 % при $\frac{1}{\sqrt{2}} < \frac{k_{cz}}{\alpha} < \sqrt{2}$.

Таким образом, в дифракционной теории (модель черного диска) получены достаточно простые выражения для дифференциального сечения реакции срыва нуклона гало-ядра и распределения по продольным импульсам частиц-остовов. Усовершенствованное приближение малого (по сравнению с размером гало-ядра) эффективного радиуса ядра-мишени позволяет с хорошей точностью вычислять эти наблюдаемые величины для легких ядер-мишеней и использовать их при анализе данных эксперимента.

Из расчетов следует также, что рассматриваемый приближенный метод можно успешно применить к реакции срыва остова гало-ядра.

3.2 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках темы проведено кинематическое моделирование реакций подхвата альфа-кора из ядра ${}^6\text{He}$ или ${}^6\text{Li} - {}^6\text{He} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^6\text{Li} + (nn)$ и ${}^6\text{Li} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^6\text{Li} + (np)$ с регистрацией как заряженной частицы ${}^6\text{Li}$ так и нейтрона от развала синглетного nn (np) 1S_0 состояния. Показана возможность получения информации об энергии синглетных двухнуклонных состояний, исследуя форму энергетического спектра нейтронов от распада этих состояний. Проведенное моделирование определило необходимые параметры планируемого эксперимента. Рассмотрена также реакция срыва остова гало-ядра в рамках дифракционной теории. Продемонстрировано хорошее описание дифференциальных сечений и распределений по продольным импульсам нуклонов с помощью полученных аналитических выражений.

Результаты проведенных в 2016 году работ доложены на Международных конференциях *QUARKS-2016* [1] и др.

3.2 СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Yu.Ts.Oganessian *et al.* // Phys. Rev. C **60**, 044605 (1999).
2. Беловицкий Г.Е., Заварзина В.П., Зуев С.В., Конобеевский Е.С., и др. // Ядерная физика. – 2009. – Т.72, № 10. – с. 1772-1776.
3. I.Tanihata *et al.* // Phys. Rev. Lett. **55**, 2676 (1985).
4. M.V.Zhukov *et al.* // Phys. Rep. **231**, 151 (1993).
5. E.Sauvan *et al.* // Phys. Rev. Lett. **87**, 042501 (2001).
6. F.M.Marques *et al.* // Phys. Rev. C **64**, 061301 (2001).
7. Заварзина В.П., Пафомов В.Е., Сергеев В.А. // Известия РАН. Серия физическая. 2014. Т. 78. С. 662; Zavarzina V.P.Pafomov V.E., Sergeev V.A. // Bull. Russ. Acad. Sci.Phys. 2014. V. 78. P. 469.
8. Hansen P.G. // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 77. P. 1016
9. В.П.Заварзина, В.Е.Пафомов, В. А. Сергеев // Известия РАН. Серия физическая, 2016, том 80, № 5, с. 644–647

3.2 ПУБЛИКАЦИИ

Статьи вышедшие:

- 1 V.P.Zavarzina, V.E.Pafomov, and V.A.Sergeev Longitudinal Momentum Distributions in Stripping Reactions with Halo Nuclei *BRAS Physics*, 2016, Vol. 80, No. 5, pp. 583–586
- 2 L.B.Bezrukov, A.S.Kurlovich, B.K.Lubsandorzhiyev, V.V.Sinev, V.P.Zavarzina, and V.P.Morgalyuk On Geoneutrinos. *EPJ Web of Conferences* **125**, 02004 (2016)

Препринты

- 1 Детектор большого объема в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН по изучению природных потоков нейтрино для целей гео- и астрофизики И.Р.Барабанов, Л.Б.Безруков, ...В.П.Заварзина, А.С.Курлович и др. (27) Препринт ИЯИ РАН 1422/ 2016

Доклады на конференциях

- 1 L.B.Bezrukov, A.S.Kurlovich, B.K.Lubsandorzhiyev, V.V.Sinev, V.P.Zavarzina, and V.P.Morgalyuk On Geoneutrinos // 19th International Seminar on High Energy Physics *QUARKS-2016*.
- 2 А.А.Каспаров, Е.С.Конобеевский, В.В.Мицук, М.В.Мордовской Исследование кластерной структуры легких гало-ядер: моделирование реакций ${}^6\text{He}+{}^2\text{H}\rightarrow{}^6\text{Li}+(nn)$ и ${}^6\text{Li}+{}^2\text{H}\rightarrow{}^6\text{Li}+(np)$ <http://www.itep.ru/activity/youth/ysconf/>
- 3 В.П. Заварзина, В.А. Сергеев./ ПРИМЕНЕНИЕ ДИФРАКЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА РЕАКЦИЙ С ГАЛО-ЯДРАМИ // 66-я Международная конференция по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «ЯДРО-2016», Саров, 11-14 октября 2016 г.

3.3 Исследование взаимодействия нейтронов малых энергий с ядрами с возбуждением коллективных степеней свободы

Научный руководитель: И.В.Суркова, снс, кфмн

Исполнители:

Заварзина В.П., с.н.с., кфмн.

Мордовской М.В, зав.сект., кфмн

Мицук В.В. стажер-исслед.

3.3 РЕФЕРАТ

Отчет 6 с, 2 рис.

ОБОБЩЕННАЯ ОПТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СО СВЯЗЬЮ КАНАЛОВ, НЕЙТРОННЫЕ СЕЧЕНИЯ, ЕДИНОЕ ОПИСАНИЕ, МАГИЧЕСКИЕ ЧИСЛА, ПОЛУМАГИЧЕСКИЕ ЧИСЛА

Цель работы – Исследование взаимодействия нейтронов малых энергий с ядрами с возбуждением коллективных степеней свободы.

В процессе исследований проводились работы по анализу имеющихся экспериментальных данных по нейтрон-ядерному взаимодействию при малых энергиях нейтронов 0.04 – 3.0 МэВ для четно-четных изотопов в области массовых чисел $56 \leq A \leq 246$ в рамках оптической модели со связью каналов с целью получения единого оптимального описания нейтронных данных.

В результате исследований впервые получены оптимальные описания сечений неупругого рассеяния нейтронов с возбуждением коллективных уровней 2^+_{11} , полных нейтронных сечений, дифференциальных сечений упругого и неупругого рассеяния нейтронов, а также s-, p- и d- волновых нейтронных силовых функций и радиусов потенциального рассеяния s- и p- нейтронов. Получено единое описание всех имеющихся нейтронных данных. Обнаружено плавное описание зависимости нейтронных сечений от произведения чисел валентных нуклонов $N_p N_n$.

Существование такого описания позволяет с приемлемой точностью предсказывать нейтронные сечения для изотопов элементов, которые, например, не могут быть доступны для измерений сечений в необходимых количествах.

3.3 ВВЕДЕНИЕ

В литературе широко обсуждается влияние магических чисел на устойчивость нуклидов. Утверждается [1], что у сильно деформированных ядер проявляются свойства дважды магических ядер, а их устойчивость объясняется без введения дополнительных магических чисел. Также предполагается различие ядерных и электромагнитных параметров деформации и необходимость учета влияния оболочечных эффектов.

Описание упругого рассеяния и полных сечений нейтронов для деформированных ядер было получено [2] при величинах параметра квадрупольной деформации β_2 на 30% меньших, чем величинах, определенных из кулоновского возбуждения. Поэтому актуальным является получение единого оптимального описания нейтронных данных при проведении анализа имеющихся экспериментальных данных по нейтрон-ядерному взаимодействию при малых энергиях нейтронов.

3.3 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенный авторами анализ экспериментальных данных по нейтрон-ядерному взаимодействию показал, что для четно-четных изотопов в широкой области ядер при энергии нейтронов 0.04 – 3 МэВ возможно получение единого описания нейтронных данных в рамках оптической модели со связью каналов [3] (ОМСК) (см. рис.3.3.1).

Для расчетов использовался вариант обобщенной оптической модели с потенциалом Вудса-Саксона в вибрационном и ротационном пределах. Необходимые для расчетов начальные значения параметров (квадрупольные деформации, параметры диффузности и т.д.) извлекались из существующих баз данных и ряда публикаций последнего времени.

Подгонка расчетных значений к экспериментальным данным проводилась с использованием величин χ^2 в качестве критерия оптимального описания и почти во всех случаях $\chi^2/\nu \leq 1.0$. Получены оптимальные описания сечений неупругого рассеяния нейтронов с возбуждением коллективных уровней 2^+_{11} , полных нейтронных сечений, дифференциальных сечений упругого и неупругого рассеяния нейтронов, а также s-, p- и d- волновых нейтронных силовых функций и радиусов потенциального рассеяния s- и p- нейтронов, которые являются основной экспериментальной информацией при низких энергиях.

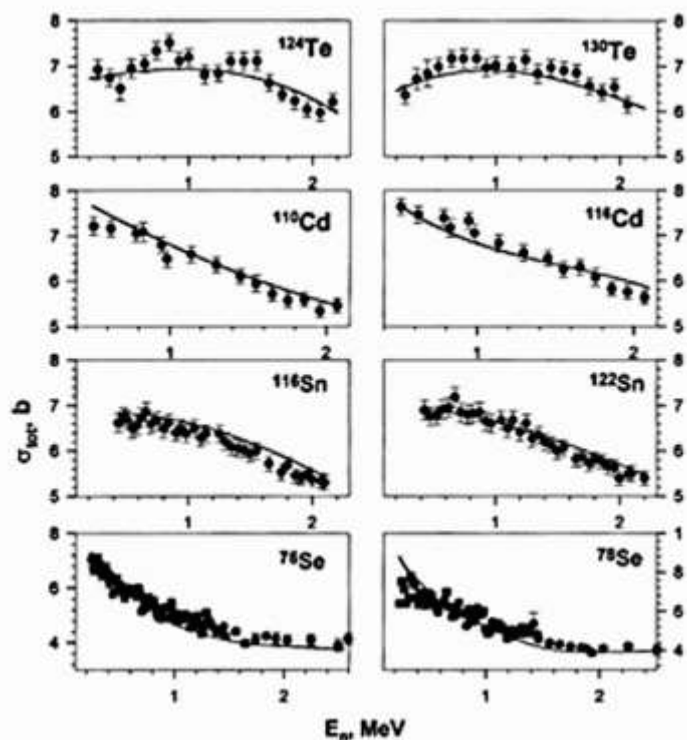


Рисунок 3.3.1 – Пример получения единого описания полных нейтронных сечений с единым набором параметров.

Несмотря на то, что рассматриваемые ядра значительно отличаются по своим свойствам, учет оболочечных эффектов в нейтронных сечениях позволил не только провести описание в единых рамках, но и найти путем анализа проявление «нетрадиционных» магических чисел для ядер. При анализе данных использовались различные варианты потенциала Вудса-Саксона. Для четно-четных ядер в области $58 \leq A \leq 250$ общее описание с единым набором параметров потенциала достигнуто при учете влияния магических (как традиционных, так и нетрадиционных) чисел. Обнаружено плавное описание зависимости нейтронных сечений от произведения чисел валентных нуклонов $N_p N_n$, где N_p и N_n – числа валентных протонов и нейтронов. Возникающие отклонения от единого описания служат основанием для дальнейшего анализа и поиска возможных причин такого отклонения. Плавное поведение такой эмпирической зависимости возникает только лишь при учете оболочечных эффектов.

Например, для ^{68}Zn с учетом классических магических чисел величина $N_p N_n = 20$ соответствует сечению $\sigma = 1.0$ бн. Введение нетрадиционного магического числа $N=38$ дает $N_p N_n = 0$ и, соответственно, $\sigma_{th} = 0.5$ бн $= \sigma_{exp}$, что соответствует экспериментальному сечению (рис. 3.3.2). На рис. 3.3.2 стрелками отмечены положения значений сечения для ^{68}Zn с учетом классических магических чисел. Применение этих методов, например, для изотопов Nd, позволило установить существование нетрадиционного числа $Z=58$, более вероятного, чем $Z=56$, существование которого предполагалось рядом авторов.

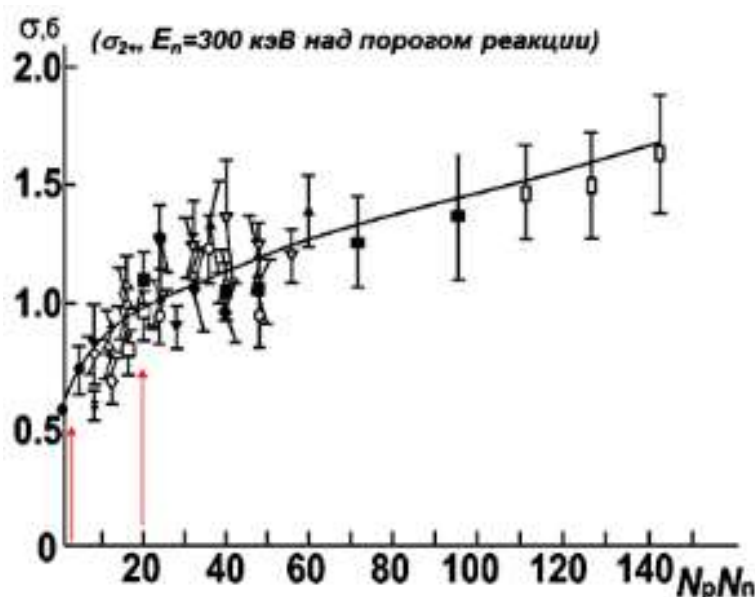


Рисунок 3.3.2 – Поведение зависимости нейтронных сечений от произведения чисел валентных нуклонов $N_p N_n$ для значений $E_n = 300$ кэВ над порогом

Отклонение величины параметра диффузности от средней также хорошо укладывается в систематику произведения $N_p N_n$ (рис. 3.3.2).

Такой же анализ проведен и в отношении величины параметра деформации β_2 . При поиске единого описания считались исходными значения квадрупольной деформации из данных по электромагнитным процессам [4]. Изменения параметра в ту или иную сторону затем анализировались с точки зрения $N_p N_n$ систематики.

Для расчетов в рамках ОМСК важны параметры квадрупольной деформации $\beta_2^{\text{эм}}$, определяющие матричные элементы связи каналов в обобщенной оптической модели и параметр диффузности потенциала, связанный с толщиной поверхностного слоя ядра, на котором плотность нуклонов уменьшается от нормальной ядерной плотности практически до нулевой. Было показано, что диффузности для магических и околomagических ядер отличаются от стандартного значения $a = 0.65$ фм в сторону уменьшения (например, для дважды магических $a = 0.5 - 0.55$ фм). Это также позволяет делать вывод о наличии нетрадиционных магических чисел.

Основное внимание при расчетах уделено влиянию параметра квадрупольной деформации β_2 на получение оптимального описания экспериментальных данных. Для параметров квадрупольной деформации показано различие ядерных и электромагнитных параметров деформации. Как правило, значения β_2 , полученные из нейтронных экспериментов, оказались существенно меньше, чем величины, определенные из кулоновского возбуждения. Проведено описание «сложных ядер» путем изменения значения β_2 , полученных из данных по электромагнитным процессам.

3.3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Успешное описание нейтронных данных для большого количества четно-четных изотопов позволяет считать данную работу перспективной. В дальнейшем предполагается пересмотреть описание нейтронных данных в области $A \sim 100$ с целью уточнения параметров квадрупольной деформации.

В связи со значительным сокращением количества установок во всех странах, занимающихся получением нейтронных экспериментальных данных в диапазоне энергий до 3 МэВ, база данных для подобного анализа фактически не увеличилась за последние десятилетия. В настоящее время в Лаборатории проходят измерения по определению спектра нейтронов на W-Be-фотонейтронном источнике на пучке электронов ускорителя ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН. Использование быстрых нейтронов источника позволит продолжить исследования в данном направлении – получении нейтронных сечений для определенных изотопов и описания полученных данных с помощью упомянутой выше методики.

Результаты проведенных в 2016 году работ представлены на Международной конференции NUCLEUS 2016, Всероссийской научной конференции МФТИ и школе-семинаре «Фундаментальные взаимодействия и космология».

3.3 СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Okunev V.S. // Vestnik MGTU. Ser. Est. Nauki. – 2013. – N4. – PP. 34–55.
2. Mc Ellistrem M.T. et al. // Phys. Rev. C. – 1977. – V.15. – PP. 927–938.
3. Д.А.Заикин и др. Изв РАН Сер Физ, 2013, т. 77. № 4, с. 449.
4. Raman S. et al. // Atom. Data. Nucl. Data Tabl. – 1987. – V.36. – PP. 1–96.

3.3 ПУБЛИКАЦИИ

Доклады на конференциях

1 В.П.Заварзина, М.В.Мордовской, И.В.Суркова Поведение параметра квадрупольной деформации четно-четных ядер в области $58 \leq A \leq 250$ с учетом магических и полумагических свойств ядер 66-я Международная конференция по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «ЯДРО-2016», Саров, 11-14 октября 2016 г. Тезисы, с. 35-36

2 В.В.Мицук, М.В.Мордовской Детектор малоинтенсивных пучков быстрых нейтронов 59-я Всероссийская научная конференция МФТИ с международным участием 21–26 ноября 2016 года. Школа-семинар «Фундаментальные взаимодействия и космология», МФТИ (ГУ)

3 В.В.Мицук, М.В.Мордовской Детектор быстрых нейтронов с малым уровнем помех Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике 29 ноября - 01 декабря 2016 года. ФГБУ “ГНЦ РФ Институт Теоретической и Экспериментальной Физики” НИЦ “Курчатовский Институт”

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2016 год. Из полученных результатов можно выделить следующие важнейшие результаты работ.

В эксперименте ALICE проводились сеансы физических измерений на пучках сталкивающихся протонов и для столкновений протонов с ядрами свинца. Детектор T0 использовался во всех этих сеансах вместе с другими системами. Работы по модернизации, устранению неполадок, поддержанию работоспособности, обеспечению безаварийного процесса измерений и получения экспериментальных данных с детектора T0 были выполнены практически полностью сотрудниками ИЯИ и МИФИ.

На установке ALICE проведено сканирование по методу Ван дер Меера для p-p столкновений при энергии $\sqrt{s} = 13$ TeV с использованием передних детекторов T0, V0 и AD. В ноябре проведены сканирования по методу Ван дер Меера для p-Pb и Pb-p столкновений при энергии 8 TeV.

Разработана концепция и созданы образцы черенковского детектора на основе кварцевых радиаторов и микроканальных ФЭУ для триггерного ФИТ-детектора установки ALICE.

В течение проведённого в 2016 году сеанса работы БАК выполнены измерения дифракционных процессов при столкновении протонов с энергией 13 ТэВ в с.ц.м., которая является максимальной энергией столкновений элементарных частиц, когда-либо достигнутой в экспериментах на ускорителях.

В GSI проведены стендовые испытания прототипных детекторных модулей электромагнитного калориметра EMC с использованием космического излучения и LED-оптической системы со светодиодным источником. Проведены испытания и паспортизация 86 EMC-модулей.

В эксперименте NA61 были исследованы коллективные потоки в столкновениях ядер свинца при импульсах 13 и 30 ГэВ/с на нуклон.

Для установки CBM на сооружаемом ускорительном комплексе ФАИР в ИЯИ РАН было развернуто изготовление и тестирование на космике модулей переднего адронного калориметра фрагментов.

В рамках мегапроекта НИКА продолжалось сотрудничество ИЯИ РАН – ОИЯИ по разработке переднего адронного калориметра фрагментов для установки MPD/NICA. Подготовлен технический проект калориметра, состоящего из 90 индивидуальных модулей.

Выполнен первый в мире успешный эксперимент с активной поляризованной мишенью, разработанной и созданной российскими участниками коллаборации A2 (Майнц, Германия). Высокая эффективность и низкий порог регистрации протонов отдачи в мишени открывают новые возможности в исследовании спиновой структуры протона и получении модельно независимых данных. Поляризация протонов мишени составила $\approx 65\%$, время поддержания поляризации при температуре 45 мК в магнитном поле 0,4 Т около 100 часов. На пучке поляризованных меченых фотонов ускорителя МАМІ измерены поляризационные наблюдаемые в реакциях фоторождения π^0 и π^+ мезонов, а также асимметрия сечения комптоновского рассеяния, позволяющая извлечь модельно независимые данные о спиновых поляризуемостях протона.

Выполнено исследование реакции $\gamma p \rightarrow p\pi^0$ при энергиях фотонов от 425 до 1445 МэВ с использованием поперечно поляризованной протонной мишени и продольно поляризованного пучка. Впервые измерена асимметрия пучок-мишень и получены прецизионные данные для мишенной асимметрии. Новые данные дают информацию о вкладах различных барионных резонансов в сечение фотопоглощения.

Для реакции фоторождения η -мезонов на квазисвободных протонах и нейтронах впервые измерены дважды поляризационная наблюдаемая и спин-зависимые сечения. Измерения проводились на пучке циркулярно поляризованных меченых фотонов ускорителя МАМІ с использованием продольно поляризованной мишени на основе дейтерированного бутанола. Результаты показывают, что узкая структура, ранее наблюдавшаяся в η -фоторождении на нейтроне, проявляется только в сечении, связанным со спиновой амплитудой $1/2$, соответствующей вкладам нуклонных резонансов $N1/2^- (S_{11})$ и $N1/2^+ (P_{11})$. Полученные результаты хорошо согласуются с недавними модельными предсказаниями.

Исследовано фоторождение $\pi\eta$ -пар на квазисвободных нуклонах, связанных в дейтроне, от порога до энергии налетающих фотонов 1,4 ГэВ. Впервые измерены дифференциальные сечения, угловые распределения, распределения инвариантных масс $\pi\eta$ -пар и мезон-нуклонных пар, а также пучковые асимметрии для реакций $\gamma p \rightarrow p\pi^0\eta$, $\gamma p \rightarrow p\pi^+\eta$, $\gamma p \rightarrow p\pi^-\eta$ и $\gamma n \rightarrow n\pi^0\eta$. Чтобы оценить вклады взаимодействия в конечном состоянии, были также изучены соответствующие реакции на протонной мишени и на ^3He . Эксперименты проведены на пучке меченых фотонов ускорителя МАМІ с

использованием 4π - электромагнитного калориметра на основе детекторов Crystal Ball и TAPS. Формы дифференциальных сечений и асимметрии для реакций на протонах и нейтронах очень близки, что согласуется с предположением о доминирующем вкладе в эти реакции цепочки распадов $D_{3/2} > D(1232) > \pi\eta N$. Однако, абсолютные величины сечений из-за эффектов взаимодействия в конечном состоянии подавлены по сравнению с данными для свободных протонов.

Выполнены прецизионные измерения фотонной асимметрии для реакции $\gamma p \rightarrow \pi^0 p$ в диапазоне энергий 320–650 МэВ. Измерения проводились коллаборацией A2 на фотонном пучке ускорителя MAMI. Полученные результаты существенно улучшают существующие мировые данные и хорошо согласуются с предсказаниями моделей MAID, SAID и Бонн-Гатчина. Обнаружено указание на интерференцию между слабыми F -волнами и резонансами $N(1520)3/2^-$ и $N(1535)1/2^-$.

Разработан метод выделения изовекторного электрического квадрупольного гигантского резонанса на фоне превалирующего изовекторного электрического дипольного гигантского резонанса, основанный на измерении асимметрии вперед–назад вылета быстрых нейтронов в реакции (γ, n) на изотопах свинца с помощью пороговых нейтронных детекторов и сцинтилляционных спектрометров. Проведено сравнение имеющихся данных по возбуждению изовекторных электрических квадрупольных ($E2$) резонансов в прямых и обратных реакциях с реальными и виртуальными фотонами.

Совместно с Национальным Исследовательским Ядерным Университетом «МИФИ» проведены работы по изучению изоскалярных монопольных возбуждений в среднетяжёлых ядрах. Получены данные о коэффициентах сжимаемости ядерной материи, существенные для астрофизики и ядерной физики.

В рамках подготовки эксперимента BGO-OD (Bonn – ELSA) по исследованию фотоядерных реакций в области энергий фотонов до 4 ГэВ выполнены прецизионные оценки эффективности регистрации протонов в BGO-калориметре. Проведено моделирование калориметра по программе GEANT-4. Полученные результаты используются при анализе редких событий фоторождения мезонов с большой множественностью.

С помощью моделирования по программам GEANT-4 и LOENT (Low Energy Neutron Transport), разработан источник медленных нейтронов на базе линейного ускорителя ЛУЭ-8 ИЯИ РАН. Источник изготовлен и апробирован на пучке электронов с энергией 8 МэВ; начаты эксперименты по нейтронному активационному анализу. Достигнута чувствительность обнаружения малых примесей на уровне 10^{-6} .

С целью разработки методов получения короткоживущих изотопов на электронных ускорителях проведены расчёты вероятности эмиссии γ -квантов, электронов, позитронов из продуктов фотоядерных реакций $^{14}\text{N}(\gamma, 2n)^{12}\text{N}$ и $^{14}\text{N}(\gamma, 2p)^{12}\text{B}$ при $E_e \sim 50$ МэВ в сравнении с выходом фоновой реакции $^{13}\text{C}(\gamma, p)^{12}\text{B}$. Исследованы возможности получения медицинских радиоизотопов, необходимых для позитронно-эмиссионной томографии и радиотерапии в результате реакций (γ, p) и (γ, pn) . Разработана фотоядерная методика получения и радиохимического извлечения радионуклида ^{67}Cu , получаемого в результате реакции $^{68}\text{Zn}(\gamma, p)$, применяемого в медицине для радиоиммунотерапии. Измерены также выходы $^{69\text{m}}\text{Zn}$ и ^{161}Ho в реакциях $^{71}\text{Ga}(\gamma, pn)^{69\text{m}}\text{Zn}$ и $^{162}\text{Er}(\gamma, p)^{161}\text{Ho}$. Разработан метод обнаружения скрытых взрывчатых веществ на основе фотоядерных реакций $^{14}\text{N}(\gamma, 2n)^{12}\text{N}$, $^{14}\text{N}(\gamma, 2p)^{12}\text{B}$, $^{13}\text{C}(\gamma, p)^{12}\text{B}$ с использованием модельных расчетов по программам TALYS и EMPIRE.

Проведено исследование когерентных эффектов в формировании рентгеновских изображений (совместно с международным лазерным центром МЛЦ МГУ) на базе фемтосекундного лазерного комплекса. Показано, что пространственная когерентность возникает благодаря фокусировке лазерного луча в пятно малого размера (около 10 микрон). Благодаря этому улучшается контраст изображений для объектов с малым градиентом плотности.

В коллаборации GRAAL проведены исследования по физике фотоядерных взаимодействий (ненуклонных степеней свободы). Изучена мультифрагментация ядра ^{12}C при энергии фотонов от 800 до 1500 МэВ. Измерена вероятность полного распада этого ядра на отдельные нуклоны и вероятность образования легких кластеров (дейтерия, трития, гелия) в конечном состоянии. Полученные экспериментальные данные проанализированы в рамках каскадно-испарительной модели, описывающей динамику возбуждений и распадов лёгких ядер.

Совместно с лабораторией атомного ядра ИЯИ РАН разработаны новые методы и создана аппаратура для низкофоновых измерений спектров наведенной активности с использованием германиевых гамма-спектрометров.

Сильные расхождения между теорией и экспериментом, обнаруженные в pn и pd взаимодействиях, указывают на необходимость продолжения исследования механизмов различных процессов в малонуклонных системах. Для исследования pn и pp корреляций в малонуклонных системах разработана программа экспериментов по исследованию реакций $d + ^2\text{H} \rightarrow ^2\text{He} + (nn)$, $n + ^3\text{H} \rightarrow ^2\text{H} + (nn)$ и $n + ^2\text{H} \rightarrow p + (nn)$. Проведенное моделирование реакций позволило сформулировать методику определения энергия

виртуального 1S_0 состояния по форме энергетического (времяпролётного) спектра нейтрона от развала этого состояния в определенной кинематике и в совпадении с заряженной частицей (^2He , ^2H или p). Согласно этой методике была создана экспериментальная установка в НИИЯФ МГУ. На пучке 15 МэВ дейтронов циклотрона У-120 НИИЯФ МГУ исследована реакция $d + ^2\text{H} \rightarrow ^2n^S + ^2p^S \rightarrow n + n + p + p$, идущая через образование в промежуточном состоянии синглетных пар – динейтрона ($^2n^S$) и дипротона ($^2p^S$). Впервые, в кинематически полном эксперименте получено значение энергии виртуального синглетного 1S_0 состояния 2n -системы 0.076 ± 0.06 МэВ, которая соответствует значению синглетной длины nn -рассеяния $a_{nn} = -22.2 \pm 0.6$ фм, и сделать вывод о заметном неучтенном вкладе $3N$ -сил и о малой величине параметра нарушения зарядовой симметрии ядерных сил.

Проведено кинематическое моделирование реакций подхвата альфа-кора из ядра ^6He или ^6Li – $^6\text{He} + ^2\text{H} \rightarrow ^6\text{Li} + (nn)$ и $^6\text{Li} + ^2\text{H} \rightarrow ^6\text{Li} + (np)$ с регистрацией как заряженной частицы ^6Li так и нейтрона от развала синглетного nn (np) 1S_0 состояния. Показана возможность получения информации об энергии синглетных двухнуклонных состояний, исследуя форму энергетического спектра нейтронов от распада этих состояний. Продемонстрировано хорошее описание дифференциальных сечений и распределений по продольным импульсам нуклонов с помощью полученных аналитических выражений.

Проведено исследование взаимодействия нейтронов малых энергий с ядрами с возбуждением коллективных степеней свободы. Успешное описание нейтронных данных для большого количества чётно-нечётных изотопов позволяет распространить данный метод на область нейтронных данных в $A \sim 100$ с целью уточнения параметров квадрупольной деформации.

Полученные результаты находятся на уровне лучших мировых или превышают их и представляют собой существенное продвижение в фундаментальных исследованиях природных явлений.