

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Департамент государственной научной и научно-технической политики

Рабочая группа  
«Эксперименты на ускорителях и реакторах Германии»

Директор Департамента государственной научной и  
научно-технической политики

\_\_\_\_\_ Романовский М.Ю.

О Т Ч Е Т

о научно-исследовательских работах в 2019 году,  
проводимых на ускорителях и реакторах Германии

Научный координатор рабочей группы  
«Эксперименты на ускорителях  
и реакторах Германии»

Васильев А.Н.

Москва, 2019

## Список координаторов экспериментов

№	Координаторы и институты-участники эксперимента	Название эксперимента
1.	д.ф.-м.н. Белостоцкий С.Л. ПИЯФ	Эксп. 3 ОЛИМПУС
2.	ч.-к. РАН Кравчук Л.В. ИЯИ РАН, ИЯФ СО РАН, ИФВЭ, НИИЭФА	Эксп. 4 Ускорительные технологии
3.	д.ф.-м.н. Носик В.Л., НИЦ КИ и др.	Эксп. 6 Фотон
4.	ч.-к. РАН Боос Э.Э., НИИЯФ МГУ	Эксп. 7 ИС
5.	д.ф.-м.н. Друцкой А.Г., ФИАН, МИФИ	Эксп. 8 ИД
6.	д.ф.-м.н. Ханзадеев А.В., ПИЯФ	Эксп. 9 Экз. ядра
7.	д.ф.-м.н. Новиков Ю.Н. ПИЯФ	Эксп. 10 SHIPTRAP
8.	к.ф.-м.н. Губер Ф.Ф., ИЯИ РАН, ИТЭФ, МИФИ	Эксп. 12 НАДЕС
9.	д.ф.-м.н. Оглоблин А.А., НИЦ КИ	Эксп. 13 ГАЛО
10.	д.ф.-м.н. Алхазов Г.Д., ПИЯФ	Эксп. 14 КОМПТОН
11.	д.ф.-м.н. Голубев А.А., ИТЭФ, НИЦ КИ, ИПХФ РАН, ОИВТ РАН	Эксп. 16 АРРА
12.	д.ф.-м.н. Зайцев Ю.М., ИТЭФ, ИЯИ РАН, ПИЯФ, МИФИ, МГУ	Эксп. 17 СВМ
13.	ч.-к. РАН Коршенинников А.А., НИЦ КИ, ПИЯФ	Эксп. 18 Nustar
14.	д.ф.-м.н. Васильев А.Н., ИФВЭ, ИТЭФ, ПИЯФ	Эксп. 19 ПАНДА
15.	д.ф.-м.н. Киселев Ю.Т., ИТЭФ	Эксп. 20 АНКЕ
16.	к.ф.-м.н. Титов Н.А., ИЯИ РАН	Эксп. 21 КАТРИН
17.	ч.-к. РАН Данилян Г.В., ИТЭФ	Эксп. 22 ДЕЛЕНИЕ
18.	ч.-к. РАН Домогацкий Г.В., ИЯИ РАН	Эксп. 23 БАЙКАЛ
19.	ч.-к. РАН Воробьев А.А., ПИЯФ	Эксп. 24 ПРОТОН

## РЕФЕРАТ

Отчет 313 с., 277 рис., 10 табл., 2 прил.

ФИЗИКА, ЭКСПЕРИМЕНТ, НАУЧНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО, ГЕРМАНИЯ, ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ, СИЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ, ФИЗИКА ФОТОНОВ, ТЯЖЕЛЫЕ ИОНЫ, ДЕЛЕНИЕ ЯДРА, ПОЛЯРИЗАЦИЯ, СТРУКТУРНЫЕ ФУНКЦИИ, УСКОРИТЕЛЬ ЧАСТИЦ, ДЕТЕКТОР, СПЕКТРОМЕТРИЯ

Приведен отчет о научно-исследовательских работах, выполненных в 2019 году по программе сотрудничества российских научных центров с научными центрами Германии в области экспериментальной физики элементарных частиц и с использованием ускорителей. Направления исследований велись по двадцати направлениям<sup>1</sup>.

В 2019 году продолжились исследования по изучению спиновых свойств и структуры протона в электрон-протонных взаимодействиях, которые проводились по проекту 3 OLYMPUS/HERMES. В эксперименте проводится обработка экспериментальных данных и подготовка публикаций.

Одним из важнейших результатов работ 2019 года является развитие исследований (после официального запуска в 2017 г.) на крупном ускорительном комплексе XFEL – рентгеновском лазере на свободных электронах. Российская сторона активно участвует в изучении и улучшении характеристик ускорительных комплексов и методов проведения исследований в ускорительном центре в Гамбурге. Важным направлением Российско-Германского сотрудничества в научно-технической сфере традиционно являются исследования материалов и нано-систем с использованием источников рентгеновского излучения, основанных на уже существующих ускорителях PETRA III в центре DESY, а теперь и на комплексе XFEL.

Работы в ускорительном центре DESY также направлены на подготовку физической программы исследований на международном линейном коллайдере ILC (проект 7) и разработку детекторов для эксперимента на ILC (проект 8). Разработка детекторов нового поколения позволило в 2019 году выйти с предложением о расширении сотрудничества между ДФЗИ и российскими научными центрами (прежде всего ФИАН).

Основным направлением сотрудничества с Германией по исследованию свойств материи на действующих ускорителях является проведение экспериментов в лаборатории ГСИ (г. Дармштадт), где проводятся исследования по следующим направлениям: изучение структуры экзотических ядер (проект 9 и проект 13), прецизионные измерения масс и разностей масс атомов и ядер (проект 10); поиск и исследование явлений, связанных со спонтанным нарушением киральной симметрии (проект 12 HADES).

---

<sup>1</sup> Нумерация глав не совпадает с направлением исследований, так как по нескольким направлениям исследования закончились.

В Техническом университете Дармштадта проводятся совместные исследования по определению величины поляризуемости протона и нейтрона (проект 14).

Подготовка исследований в новом центре ФАИР (г. Дармштадт) охватывает как разработку, создание и тестирование детекторов, так и проведение исследований в рамках существующих экспериментов, а также моделирование физических процессов для экспериментов. Российские специалисты играют важную роль в подготовке совместных исследований в экспериментах CBM (проект 16), APRA (проект 17), NuSTAR (проект 18), ПАНДА (проект 19).

В 2019 году завершен совместный эксперимент в Институте Ядерной Физики (Юлих, Германия), целью которого было изучение изменения свойств в ядерной материи мезонов со скрытой и открытой странностью (проект 20 ANKE). Тем не менее, данная тематика будет продолжена группой ИТЭФ в действующем эксперименте NADES в ГСИ (г. Дармштадт).

Проект 21 KATRIN в КИТ, Карлсруэ, направлен на поиск массы электронного антинейтрино в бета-распаде трития.

В проекте 22 «Деление» проводятся измерения эффекта вращения делящегося ядра.

Еще одним направлением совместных исследований является подготовка к измерениям и обработка данных в эксперименте по исследованию фундаментальных свойств материи с использованием Байкальского глубоководного нейтринного телескопа в сотрудничестве с DESY-Zeuthen (проект 23).

В 2019 г. продолжились работы по подготовке нового эксперимента «ПРОТОН» (проект 24), основная цель которого прецизионное измерение радиуса протона в упругом электрон–протонном рассеянии на ускорителе в Майнце.

Оглавление	
Сокращения и определения.....	6
ВВЕДЕНИЕ .....	8
1 Отчет по эксперименту 3 ОЛИМПУС .....	11
2 Отчет по эксперименту 4 «Ускорительные технологии» .....	14
3 Отчет по эксперименту 6 ФОТОН .....	29
4 Отчет по эксперименту 7 «Физика на ILC» .....	37
5 Отчет по эксперименту 8 «Детекторы для ILC».....	43
6 Отчет по эксперименту 9 «Структура экзотических ядер» .....	55
7 Отчет по эксперименту 10 SHIPTRAP.....	62
8 Отчет по эксперименту 12 HADES .....	67
9 Отчет по эксперименту 13 GALO .....	109
10 Отчет по эксперименту 14 COMPTON .....	111
11 Отчет по эксперименту 16 APPA .....	114
12 Отчет по эксперименту 17 CBM.....	158
13 Отчет по эксперименту 18 NuSTAR .....	205
14 Отчет по эксперименту 19 ПАНДА.....	233
15 Отчет по эксперименту 20 ANKE.....	252
16 Отчет по эксперименту 21 KATRIN .....	258
17 Отчет по эксперименту 22 «Деление» .....	274
18 Отчет по эксперименту 23 «Байкал».....	280
19 Отчет по эксперименту 24 «Протон» .....	283
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	292
ПРИЛОЖЕНИЕ А. СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ.....	300
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Запрос финансирования на 2020 г. (в тыс. долларов США) .....	313

Сокращения и определения

бозон Хиггса	–	скалярная частица, один из важнейших элементов стандартной модели. Экспериментально обнаружен в июле 2012 г.
ВЧ	–	Высокочастотные
ИТЭФ, НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ	–	Федеральное государственное бюджетное учреждение "Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И.Алиханова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт"
ИФВЭ, НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ	–	Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
ИЯИ	–	Институт ядерных исследований Российской Академии наук, Москва
ИЯФ СО РАН	–	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН
КХД		квантовая хромодинамика
МИФИ, НИЯУ МИФИ	–	Национальный Исследовательский Ядерный Университет Московский Инженерно-Физический Институт
МССМ	–	Минимальная Суперсимметричная Стандартная Модель. Расширение стандартной модели, основанное на теории суперсимметрии (симметрии между бозонами и фермионами).
НИИЭФА	–	Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова
НИИЯФ МГУ	–	Научно-исследовательский институт Ядерной Физики Московского Государственного университета
НИЦ КИ	–	Национальный исследовательский центр «Курчатовский Институт»
ПИЯФ, НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ	–	Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт"
РЛСЭ (XFEL)	–	Рентгеновский лазер на свободных электронах
РНЦ КИ	–	Российский национальный центр Курчатовский Институт
СВЧ	–	Сверхвысокая частота (используется для обозначения Гигагерцового диапазона)
СМ	–	Стандартная Модель, теоретическая схема, используемая в настоящее время для расчетов вероятностей рождения различных частиц (в том числе бозона Хиггса и топ-кварка).
тор (t) кварк	–	точечная частица с массой 174 ГэВ, обнаружен экспериментально в 1995 г.
ФИАН	–	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук
фм (fm)	–	единица длины в ядерной физике равная $10^{-15}$ метра
ФЭУ	–	фотоэлектронный умножитель
эВ (eV), ГэВ= $10^9$ эВ	–	электронвольт - широко используемая в физике единица энергии, равная энергии получаемой электроном при ускорении в электростатическом поле, когда разность потенциалов между

		двумя позициями частицы составляет один Вольт
ADC (АЦП)	–	аналогово-цифровой преобразователь
CompHERP	–	разрабатываемый в НИИЯФ МГУ начиная с 1989 г. программный пакет, предназначенный для проведения символьных и численных вычислений в физике высоких энергий, генерации потока событий и моделирования в детекторах
DAQ	–	система сбора данных
DESY(ДЕЗИ)	–	Deutsches Elektronen-Synchrotron – исследовательский ядерно-физический центр Германии
FAIR	–	Facility for Antiproton and Ion Research (Исследовательский Центр Ионов и Антипротонов)
FEE	–	Front-End-Electronics – входная детекторная электроника
FPGA	–	Field Programmed Grid Array - программируемая логическая интегральная схема
GSI	–	Gesellschaft Schwere Ionen (Общество по изучению Тяжёлых Ионов)
HADES (ХАДЕС)	–	широкоапертурный магнитный спектрометр диэлектронов
HERA	–	Hadron Electron Ring Accelerator (Адрон-электронный кольцевой ускоритель)
ILC	–	International Linear Collider. Международный проект линейного коллайдера со сталкивающимися пучками электронов и позитронов с энергией несколько ТэВ. Находится в стадии утверждения
ILD	–	Детектор на ILC
LHC	–	Large Hadron Collider, или Большой адронный коллайдер Европейского центра ядерных исследований (ЦЕРН). Кольцевой коллайдер со сталкивающимися пучками протонов с энергиями 7,8 ТэВ и после модернизации 13, 14 ТэВ.
OLYMPUS HERMES	–	Многоцелевые детекторы на <i>ep</i> -коллайдере; одноименные коллаборации
PETRA	–	Ускоритель синхротронного излучения в Гамбурге
RHIC	–	
SIS18, SIS100	–	ускорители заряженных частиц в GSI
SiPM	–	Кремниевые фотоумножители
TDS	–	Transverse Deflecting System – система поперечного отклонения сгустков электронов для целей специальной диагностики
TDS INJ	–	Система поперечного отклонения сгустков на участке инжекции пучка XFEL
TDS BC1 TDS BC2	–	Система поперечного отклонения сгустков на участках ускорителя XFEL
TOF	–	time-of-flight (время-пролетная техника)

## ВВЕДЕНИЕ

В 2019 году было продолжено сотрудничество научных центров России с научными центрами Германии в области экспериментальной физики ядерной физики, физики элементарных частиц и изучения свойств материалов с помощью ускорителей.

Основная часть этого сотрудничества проходит в крупнейших научных центрах Германии: в научном центре Немецкий синхротрон (DESY) в г. Гамбург, включая Рентгеновской Лазер на Свободных Электронах (РЛСЭ или XFEL) и в научном центре Сообщество Тяжелых Ионов (GSI) в Дармштадте.

Каждая глава данного отчета посвящена определенному проекту.

Эксперимент 3 «ОЛИМПУС»/HERMES в ДЕЗИ посвящен обработке и анализу набранных данных в экспериментах по изучению спиновых свойств электрон-протонных взаимодействий при высоких энергиях и структуры протона в эксперименте.

Дальнейшее развитие ДЕЗИ связано с запуском в 2017 г. гамма-лазера на свободных электронах и развитию методик проведения исследований. Российские институты активно участвуют в этих работах:

Проект 4 «Ускорительные технологии» как раз посвящен настройке и достижению оптимальных режимов крупного исследовательского комплекса XFEL. Работы в этом году были направлены на оптимизацию настроек всего комплекса, в том числе: поперечные отклоняющие системы для ускорительного комплекса XFEL, усовершенствование резонатора фото-инжектора, исследование работы резонатора-дефлектора с минимизированным уровнем аберраций, разработка резонаторов непрерывного ВЧ режима, разработка источника синхротронного излучения PETRA IV, исследования тонкопленочных геттеров в условиях мощного синхротронного излучения.

Проводится подготовка и проведение исследований в центрах синхротронного излучения. Конечные цели проекта 6 «ФОТОН» направлены на исследования материалов и нано-систем с использованием источников рентгеновского излучения. Сегодня экспериментальные возможности ЕРЛСЭ позволяют находиться на переднем фронте наноструктурных рентгеновских исследований с беспрецедентным временным разрешением до 20-100 фс. В 2019 г. основные усилия были направлены на разработку методов распространения волнового фронта рентгеновского излучения XFEL, совершенствование многопиксельных рентгеновские детекторы с высоким временным разрешением, изучение рассеяния интенсивных аттосекундных импульсов рентгеновского излучения на резонансных ядерных средах для изучения сверхбыстрых процессов и приложений в квантовой информатике, определение параметров фокусировки жесткого рентгеновского излучения, эксперименты по серийной кристаллографии.

Заметно увеличивается активность экспериментов, проводимых в настоящее время в исследовательском центре тяжелых ионов ГСИ в Дармштадте, что связано с запуском ускорителя и первых очередей экспериментов в 2018 г.

В эксперименте 9 «Экзотические ядра» по изучению структуры экзотических ядер сотрудничества GSI/ПИЯФ в 2019 г. завершен теоретический анализ экспериментальных данных по упругому мало-угловому рассеянию протонов на нейтронно-избыточных изотопах углерода  $^{14-17}\text{C}$  и стабильном ядре  $^{12}\text{C}$ .



В эксперименте 10 «SHIPTRAP» по прецизионному измерению масс атомов и ядер в 2019 г. была произведена тщательная обработка и анализ полученных данных по прямому измерению масс трансфермиевых элементов, выполненных в прошлом году и работы по повышению точности измерений масс использованием запущенной в 2018 году новой пятиловушечной системы PENTATRAP.

В 2019 г. Коллаборация ХАДЕС (проект 12) отмечает 25-летие с момента своего образования. Эксперимент «HADES» направлен на поиск и исследование явлений, связанных со спонтанным нарушением киральной симметрии. В 2019 г. состоялся физический сеанс на ускорителе SIS18 в реакции  $Ag+Ag$  при энергии налетающих ядер серебра 1.58 АГэВ, на который было выделено пучковое время (88 смен). Российские группы участвовали в подготовке к этому физическому сеансу, в обработке и анализе экспериментальных данных. В 2019 году программа исследований расширена направлением по изучению изменения свойств в ядерной материи мезонов со скрытой и открытой странностью.

В рамках проекта 13 «ГАЛО» в 2019 г. проводилось изучение скорости астрофизической реакции  $^{12}C(\alpha,\gamma)^{16}O$ .

Продолжаются исследования на действующих экспериментальных установках в г. Дармштадт (Технический Университет), в ядерном центре в Берлине и в Институте технологий Карлсруэ (Karlsruhe Institute of Technology):

В проекте 14 «КОМПТОН» проводится подготовка предложения и экспериментальной установки к исследованиям на пучке ускорительного комплекса в Майнце.

В эксперименте 21 «КАТРИН» получены первые ограничения на массу электронного антинейтрино в бета-распаде трития.

В проекте 22 ДЕЛЕНИЕ была продолжена деятельность по изучению Т-нечетных эффектов в излучении мгновенных  $\gamma$ -квантов и нейтронов при бинарном делении ядер  $^{235}U$  и  $^{233}U$  поляризованными холодными нейтронами.

В 2019 г. завершены исследования по проекту 20 «АНКЕ» – изучение изменения свойств в ядерной материи мезонов со скрытой и открытой странностью.

Новым направлением является проект 24 «ПРОТОН», основная цель которого прецизионное измерение радиуса протона в упругом электрон–протонном рассеянии на ускорителе в Майнце.

В 2019 г. активно развивались проекты, связанные с подготовкой новых экспериментов. Одним из направлений исследований является подготовка к запуску и исследованиям международного линейного коллайдера:

В рамках проект 7 «ILC» ведется подготовка физической программы исследований на международном линейном коллайдере. Исследования посвящены, прежде всего, изучению свойств бозона Хиггса и топ-кварка.

Проект 8 «ILD» направлен на разработку детектора ILD, который должен быть установлен на этом новом ускорителе. В 2019 году немецкая сторона выступила с предложением о совместных работах по созданию адронного калориметра при высокой интенсивности для эксперимента CMS на коллайдере LHC, используя разработки, выполненные российскими специалистами в рамках коллаборации CALICE для детектора ILD.

Значительная часть работ направлена на подготовку и начало экспериментов в Дармштадте в научно-исследовательском центре ФАИР.

В рамках проекта 16 АППА велась подготовка и проведение эксперимента по разработке рентгеновского диагностического метода для регистрации излучения мишени под воздействием тяжелоионного пучка, энергетических потерь ионов в ионизованном веществе, численное моделирование экспериментов для исследования свойств веществ в экстремальных состояниях...

В эксперимент 17 CBM не просто ведется работа по подготовке к исследованиям, но и (в рамках сотрудничества с экспериментом HADES) создана коллаборация микро CBM, где проводятся исследования свойств детекторов. В частности, проведено сопряжение прототипа центральной части времяпролетной системы с интегрированной электроникой считывания. Также проводилась доработка считывающей электроники, продолжены разработка и тестирование алгоритмов восстановления физических событий. Продолжены работы по созданию механических конструкций и газовых систем для детекторов RICH и MUCH. Проводилось моделирование адронного калориметра с целью оптимизации его геометрии. Выполнено моделирование точности определения центральности и угла плоскости реакции.

По проекту 18 NuSTAR проводилась работы по шести направлениям: исследования экзотических ядер на установке R3B с использованием нейтронного время-пролетного спектрометра, создание системы распределения высоковольтного питания для нового широкоапертурного нейтронного детектора NeuLAND и протонного спектрометра на базе работающих в вакууме дрейфовых трубок, измерения в инверсной кинематике сечений упругого рассеяния протонов и неупругого рассеяния альфа-частиц на экзотических ядрах, изучение реакций с релятивистскими пучками радиоактивных ядер и измерения масс ионными ловушками Пеннинга следующего поколения.

В эксперименте 19 ПАНДА основные работы были направлены на разработку и создание детекторов, а именно: центрального электромагнитного калориметра, время-пролетного детектора и корпускулярной мишени эксперимента. Кроме этого велись работы по моделированию физических процессов и разработке физической программы.

Отдельно стоит Проект 23 БАЙКАЛ – проведение измерений и обработка данных в эксперименте по исследованию фундаментальных свойств материи с использованием Байкальского глубоководного нейтринного телескопа.

Российские физики принимают активное участие в подготовке и проведении экспериментов, а также в обработке экспериментальных данных и анализе результатов измерений. В 2019 г. в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus, опубликовано 79 работ с участием российских физиков. Российскими физиками было сделано 87 доклада на различных международных конференциях от имени Сотрудничеств. Список публикаций и докладов приведен в отчетах каждого эксперимента и в Приложении А всего отчета.

В Приложениях к каждому проекту приведены дополнительные статистические сведения, включающие информацию об участии российских институтов в совместных работах, информацию по расходованию валютных средств в 2019 г. и запрос на финансирование в 2019 году.

Суммарные данные по использованию валютных средств по каждому эксперименту и запрос на финансирование в 2020 году приведены в Приложении Б сводного отчета.

Представлен отчет по эксперименту OLYMPUS. Эксперимент OLYMPUS тематически является продолжением эксперимента HERMES. Полное название эксперимента HERMES «Исследование спина при высоких энергиях». Координатор работ от НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ – зав. лабораторией, доктор физ.-мат наук, профессор, Белостоцкий Станислав Львович.

Петербургский институт ядерной физики ПИЯФ участвует в коллаборации HERMES с момента запуска этого эксперимента. ПИЯФ поставил для эксперимента спектрометрический магнит и систему пропорциональных камер, обеспечивающих работу центральной трековой системы.

Эксперимент проводился на поляризованном позитронном/ электронном пучке с энергией 27.6 ГэВ коллайдера HERA с использованием поляризованных мишеней.. Эксперимент является уникальным по возможностям доступа к спиновым характеристикам нуклона (адронов) при высоких энергиях. Целью эксперимента являлось изучение спиновой структуры протона и нейтрона, в частности, решение проблемы так называемого «спинового кризиса». HERMES получил уникальные данные по вкладу кварков в спин-нуклона, по зависящим от спина кварковым распределениям, а также, по изучению эффектов «поперечного спина», например, по орбитальному движению партоннов в нуклоне.

Группа ПИЯФ активно вовлечена в анализ данных в эксперименте HERMES. Анализ богатейшего экспериментального материала, полученного в эксперименте, согласно планам администрации ДЕЗИ продолжается по сей день. Целью дальнейшего анализа является получение уникальной информации о полном угловом моменте кварков и глюонов. Дополнительными направлениями исследований являются изучение полных спиновых характеристик в процессах рождения векторных мезонов, поляризация гиперонов, а также, изучение процессов адронизации в ядерной среде.

Целью эксперимента OLYMPUS является определение вклада двух-фотонного обмена (TPE) в упругое рассеяние заряженных лептонов на протонах. Плохое теоретическое знание TPE, его недоучет, является наиболее вероятным объяснением значительных расхождений в

измерении отношения электрического и магнитного форм факторов протона  $\frac{\mu G_e(Q^2)}{G_m(Q^2)}$ .

Вклад TPE определяется путем измерения зарядовой асимметрии при упругом рассеянии электронов и позитронов на протонах как функции переданного импульса  $Q^2$ . Эксперимент OLYMPUS проводился на электронном ускорителе DORIS (DESY) при энергии 2 ГэВ. Набор данных производился с помощью лево-право симметричной установки с тороидальным магнитом. Особо важное при измерениях зарядовой асимметрии измерение светимости проводилось тремя независимыми мониторами. ПИЯФ поставил для эксперимента систему сцинтилляционных счетчиков и пропорциональных камер с быстрой электроникой, обеспечивших работу мало-углового монитора (под лаб. углом 12 град).

Основной результаты измерений в эксперименте OLYMPUS зарядовой асимметрии  $R_{2\gamma}$  представлен на Рис. 1.1. Наиболее детально промерена область по  $Q^2$  от 0.5 до 1.5 GeV<sup>2</sup>, где вклад TPE ( $R_{2\gamma} - 1$ ) на уровне -1%. Сплошные кривые демонстрируют большой разброс теоретических предсказаний в этой области по  $Q^2$ .

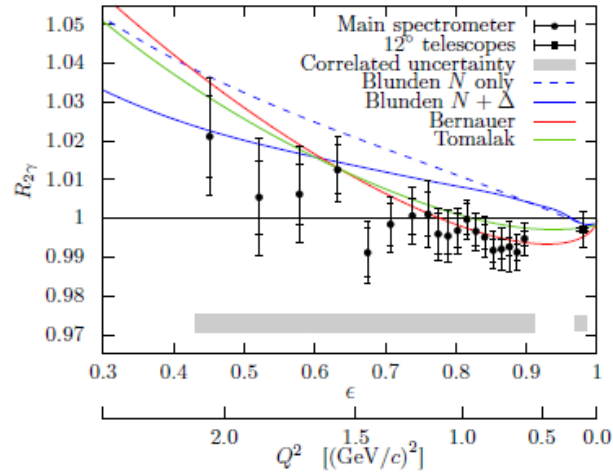


Рис. 1.1 – Измеренная в эксперименте OLYMPUS зарядовая симметрия  $R_{2\gamma}$  как функция поляризации виртуального фотона  $\epsilon$  (ниже показана шкала  $Q^2$ )

Слабые адронные распады гиперонов, изучаемые в эксперименте HERMES, предоставляют уникальную возможность измерять их поляризацию, и таким образом, передачу спина гиперону от поляризованного позитронного/ электронного первичного пучка. При этом в глубоко неупругом рассеянии фактически измеряется передача спина от выбитого кварка, т.е. зависящие от спина функции фрагментации. Последние тесно связаны со спиновой структурой рожденного гиперона. Если преобладает токовая фрагментация, то фрагментируют в  $\Lambda$  гиперон преимущественно легкие кварки  $u$  и  $d$ . С другой стороны, не исключено, что вероятность фрагментации  $s$ -кварка в  $\Lambda$  гиперон существенно выше. К сожалению, функции фрагментации пока невозможно получить без использования упрощенных моделей. Измерение парциальной передачи спина для данного кварка дает возможность прямой оценки отношения спин-зависящей и спин-независящей функций фрагментации.

Как уже отмечалось выше, группа ПИЯФ является лидером нескольких направлений анализа данных. Традиционными для группы являются предложенные нами исследования поляризации и передачи спина  $\Lambda$  гиперону  $D_{LL}$ . Результаты этих работ многократно обсуждались на Международных конференциях и частично опубликованы. Предварительный результат-  $D_{LL}^{\Lambda} = 0.11 \pm 0.10_{stat} \pm 0.03_{syst}$  (HERMES Col.Phys.Rev.,D74:0072004,2006) – был получен по данным измерений до 2006 года.

В 2019 году продолжалась работа по получению окончательного результата по передаче спина Лямбда и анти-Лямбда гиперону в ГНР по полному набору данных, который содержал 36996  $\Lambda$ -событий и 6075 анти- $\Lambda$ -событий. Формализм анализа был существенно усовершенствован: параметр  $D_{LL}$  рассматривался как двухмерный вектор, тщательно исследовалась систематика и пр. Интегральный результат, полученный в новом подходе, приведен ниже:

$$D_{LX}^{\Lambda} = -0.012 \pm 0.026_{stat} \pm 0.022_{syst} \quad D_{LX}^{\bar{\Lambda}} = -0.022 \pm 0.068_{stat} \pm 0.022_{syst}$$

$$D_{LZ}^{\Lambda} = 0.050 \pm 0.039_{stat} \pm 0.032_{syst} \quad D_{LZ}^{\bar{\Lambda}} = -0.083 \pm 0.096_{stat} \pm 0.032_{syst} .$$

Полученный результат совместим с нулем, что свидетельствует о том, что выбитый из мишени  $u$ - кварк, наследующий поляризацию пучка, не оказывается в составе  $\Lambda$ - гиперона, который рождается, в основном, в центральной части фрагментационной струны.

В этом отношении трудно интерпретировать расхождение с данными эксперимента COMPASS (Рис. 1.2). COMPASS получил нарастающую поляризацию ( $D_{LZ}$ ) для анти- $\Lambda$ , тогда как результат для  $\Lambda$ - гиперона остается совместимым с нулем.

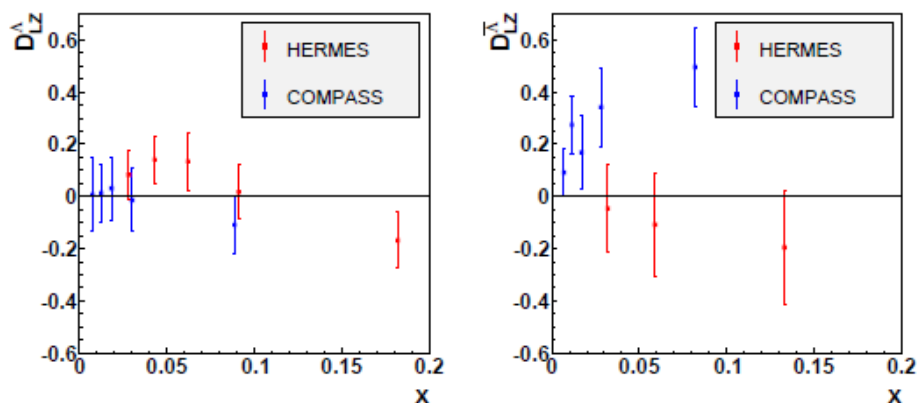


Рис. 1.2 – Продольная передача спина для  $\Lambda$  (слева) и анти- $\Lambda$ -гиперона (справа) по данным экспериментов HERMES и COMPASS

В 2019 году завершена, таким образом, обработка данных по передаче спина  $\Lambda$ -гиперону. Готовится публикация по этой теме. Обработка данных эксперимента HERMES по другим направлениям продолжается. На 2020 г. планируется расход в сумме 3500 долларов США на работы по подготовке публикации.

#### Приложение 1

Число специалистов, участвовавших в работах центра по тематике эксперимента.

Участвовали в работе всего – 5, участвовали в работе за границей – 2.

Число молодых специалистов, привлеченных в эти работы -3.

Число студентов и аспирантов – участников экспериментов.- 2.

Число диссертаций на соискание ученых степеней: Нет (планируется на 2020 год)

Список книг и статей, опубликованных и подготовленных в 2019 г. сотрудниками ПИЯФ по теме HERMES – 2:

1. Beam-helicity asymmetries for single-hadron production in semi-inclusive deep-inelastic scattering from unpolarized hydrogen and deuterium targets HERMES Collaboration (A. Airapetian (Giessen U. & Michigan U.) et al.). Mar 20, 2019. 29 pp. Phys.Lett. B797 (2019) 134886

2. Longitudinal double-spin asymmetries in semi-inclusive deep-inelastic scattering of electrons and positrons by protons and deuterons, HERMES Collaboration (A. Airapetian (Giessen U. & Michigan U.) et al.). Published in Phys.Rev. D99 (2019) no.11, 112001 DOI: 10.1103/PhysRevD.99.112001.

## 2 Отчет по эксперименту 4 «Ускорительные технологии»

Представлен отчет по эксперименту «Ускорительные технологии», координатор работ – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, директор ИЯИ РАН Л.В. Кравчук. В 2019 году данное направление исследований объединили работы по двум проектам, которые ранее финансировались отдельно в связи с их одинаковой направленностью. В работах в рамках данного проекта с финансированием по линии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации участвовали три российских организации: ИЯИ РАН, НИИЭФА и ИЯФ СО РАН.

### 2.1 Исследования, проводимые сотрудниками ИЯИ РАН

Сотрудники ИЯИ РАН активно участвовали в работах по следующим направлениям:

- Поперечные отклоняющие системы для ускорительного комплекса XFEL
- усовершенствованного резонатора фото-инжектора
- Исследование работы резонатора - дефлектора с минимизированным уровнем aberrаций
- Разработка резонаторов непрерывного ВЧ режима

#### 2.1.1 Поперечные отклоняющие системы для ускорительного комплекса XFEL

Одним из направлений участия России в создании Лазера на свободных электронах XFEL является разработка, изготовление, поставка, наладка и ввод в эксплуатацию трех диагностических систем поперечного отклонения (Transverse Deflecting System - TDS) пучка ускоренных электронов в ускорительном комплексе XFEL.

Эти три системы расположены в различных местах ускорителя: TDS INJ - в инжекторе, TDS BC1 – после компрессора 1 сгустков электронов (Bunch Compressor 1 – BC1) и TDS BC2 – после компрессора 2 сгустков электронов (Bunch Compressor 2 – BC2). Задача систем TDS - измерение продольного профиля пучка электронов, продольного фазового пространства и срезов эмиттанса в местах ускорителя, где расположены системы.

Система TDS INJ была запущена в первой половине 2017 года, и в сентябре 2017 года выполнен физический запуск Лазера XFEL с участием этой системы. На *Рис. 2.1-Рис. 2.3* показан вид системы TDS INJ,



Рис. 2.1 – Система питания большой мощности HPRF INJ

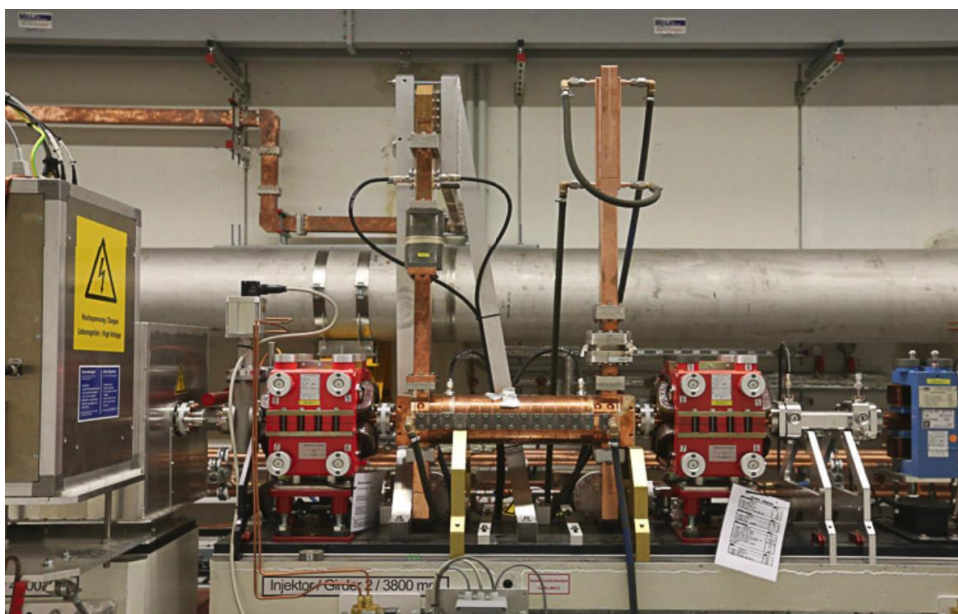


Рис. 2.2 – Структура поперечного отклонения пучка TDS INJ

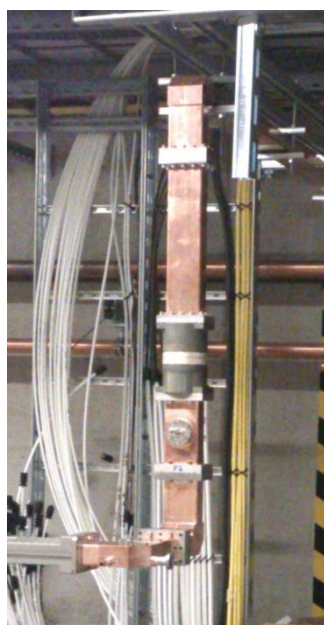


Рис. 2.3 – Волноводная система TDS INJ

Данная система включает высокочастотную систему питания большой мощности HPRF INJ, структуру поперечного отклонения пучка TDS INJ и соединяющую их волноводную систему длиной 55 м. Результат измерения эмиттанса с использованием системы TDS INJ показан на Рис. 2.4.

## *Slice Emittance*

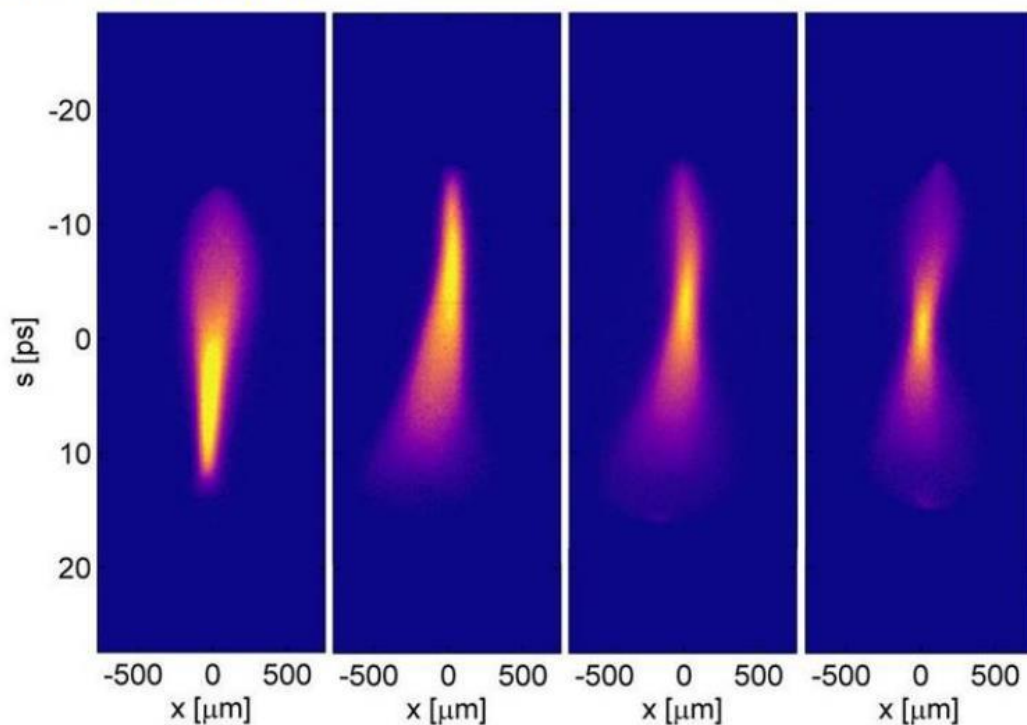


Рис. 2.4 – Результат измерения эмиттанса с использованием системы TDS INJ

Высокочастотная система питания большой мощности HPRF BC1 поставлена в DESY в 2019. Система TDS BC1 показана на рисунках Рис. 2.5-Рис. 2.7.

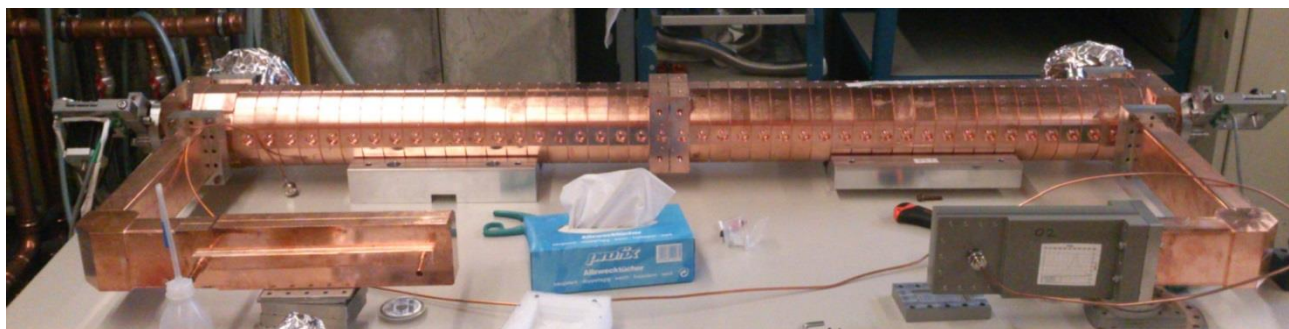


Рис. 2.5 – Отклоняющая структура системы TDS BC1

Отклоняющая система и волноводный тракт системы TDS BC1 поставлены в 2017 году. Эти системы настроены и готовы к работе.

Высокочастотная система питания большой мощности HPRF BC1 поставлена в DESY в 2019 году, смонтирована на экспериментальном стенде, налажена и испытана с клистроном TV2002DoD в диодном режиме.



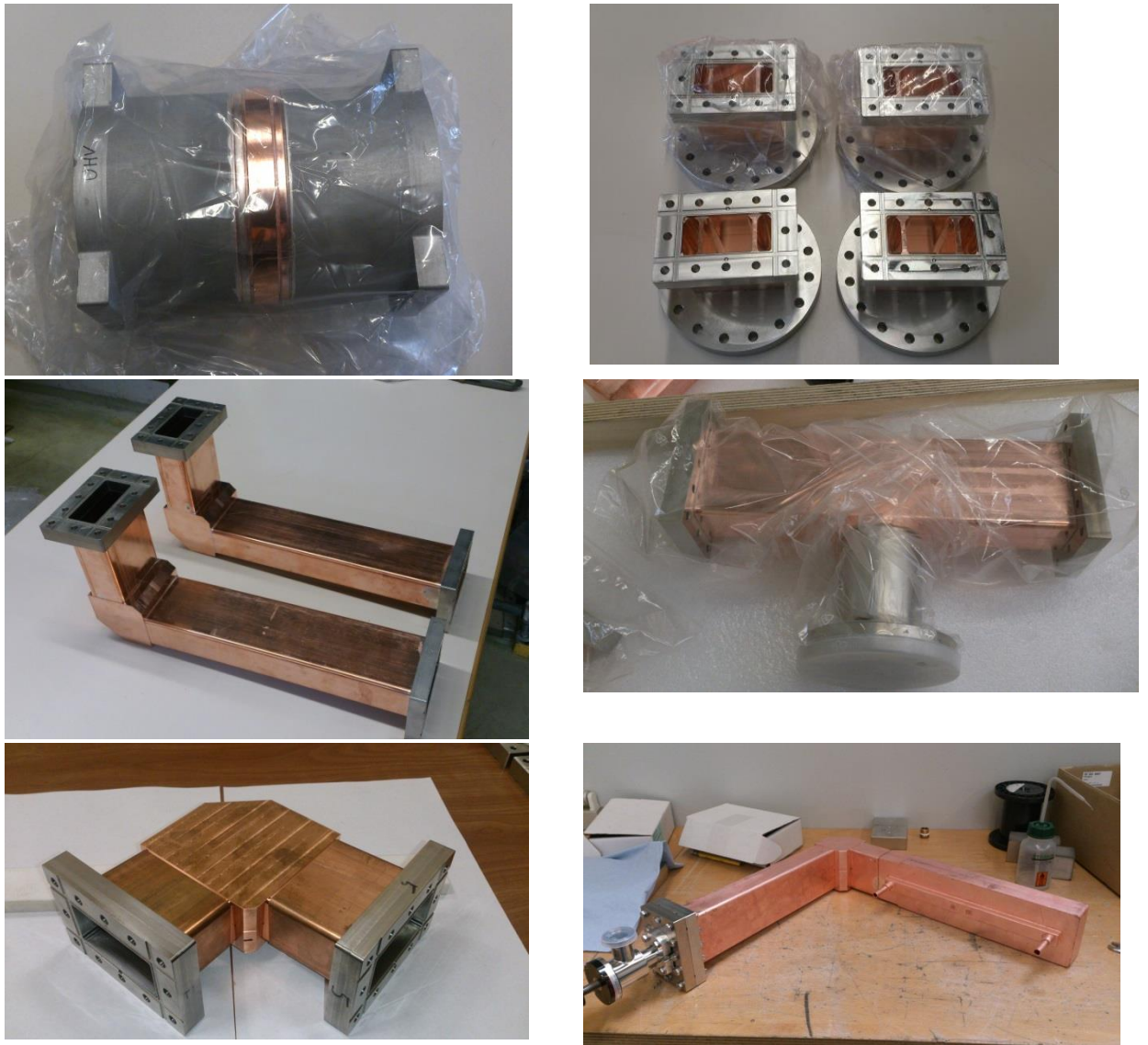


Рис. 2.6 – Волноводный тракт системы TDS BC1



Рис. 2.7 – Высокочастотная система питания большой мощности HPRF BC1

В процессе испытаний на системе HPRF BC1 получены все проектные параметры, а именно:

- импульсное напряжение питания клистрона 255 кВ
- импульсный ток клистрона 255 А
- длительность импульса 6 мкс
- частота следования импульса 10 Гц
- напряжение подогревателя катода клистрона 34 А
- ток подогревателя катода клистрона 23 А
- ток питания трех обмоток соленоида клистрона
  - Обмотка 1 156.0 А
  - Обмотка 2 127.9 А
  - Обмотка 3 147.5 А
- время реакции быстрой технической блокировки 1.5 мкс.

Осциллограммы напряжения и тока клистрона показаны на *Рис. 2.8*. Слева представлены осциллограммы напряжения (белый) и тока (голубой) клистрона при нормальной работе. В случае пробоя быстрая техническая блокировка обеспечивает сброс высокого напряжения клистрона внутри импульса и ограничение тока клистрона на уровне 450 А, как это видно из осциллограммы на *Рис. 2.8* справа.



Рис. 2.8 – Осциллограммы напряжения (белый) и тока (голубой) клистрона: слева нормальная работа, справа – случай срабатывания быстрой блокировки

Система TDS BC1 готова к установке в тоннеле XFEL. Установка в тоннеле XFEL, наладка и запуск системы TDS BC1 будут выполнены в течение перерыва в работе XFEL в соответствии с планами XFEL. Система TDS BC2 поставлена в тоннеле XFEL, налажена и работает – *Рис. 2.9*.



Рис. 2.9 – Система TDS BC2

### 2.1.2 Изготовление усовершенствованного резонатора фото-инжектора

В связи с загруженностью в 2019 г. опытного производства ДЕЗИ Гамбург задачами изготовления оборудования для установок этой площадки, начатое в 2018 г. изготовление разработанного ИЯИ РАН резонатора фото-инжектора Gun 5 передано отделению ДЕЗИ Цойтен. Необходимость повторного изготовления оснастки и тестовых образцов в опытном производстве ДЕЗИ Цойтен привела к потерям времени и переносу изготовления, настройки и запуска резонатора Gun 5.1 на 2020-й год.

В 2019 г. дополнительно исследованы возможности снижения интенсивности темновых токов. Для определения величины токов, попадающих в апертуру ускорителя, проведено численное моделирование автоэмиссии электронов и их последующего движения. Изменена форма поверхности резонатора в области фотокатода для снижения на ней величины электрического поля. По результатам расчетов, модификация формы поверхности резонатора приводит к уменьшению величины темнового тока на 40%. Изменения внесены в конструкцию и технологическую документацию.

### 2.1.3 Исследование работы резонатора - дефлектора с минимизированным уровнем аббераций

Проводилось исследование работы разработанного в ИЯИ РАН и запущенного в эксплуатацию в 2018 г. на линии пучка резонатора-дефлектора для измерения характеристик уникально коротких сгустков электронов в эксперименте REGAE, Рис. 2.10.

Полученная информация систематизирована и рассматриваются возможности повышения ВЧ эффективности таких резонаторов при сохранении минимума аббераций.

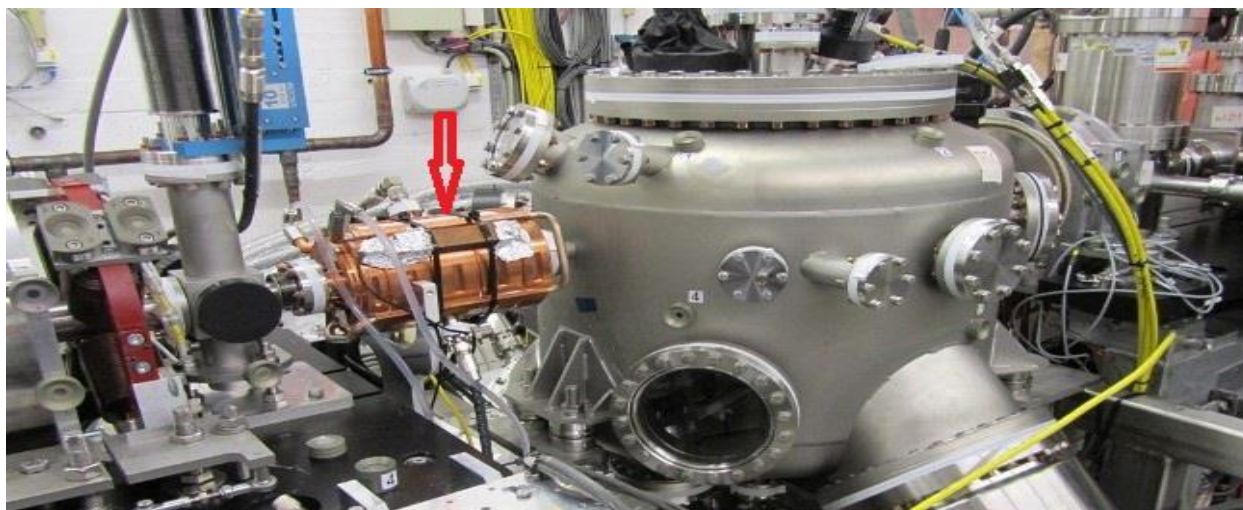


Рис. 2.10 – Резонатор-дефлектор на линии пучка установки REGAE

### 2.1.4 Разработка резонаторов непрерывного ВЧ режима

Программа модернизации European XFEL предусматривает сооружение дополнительного инжектора, работающего в непрерывном режиме. Рассматриваются как сверхпроводящие, так и нормально проводящие варианты резонаторов дополнительного инжектора.

Вместе с высокочастотной фото-пушкой инжектор должен иметь резонатор для группировки пучка. Совместно с сотрудниками группы PITZ начата разработка резонатора группирователя, работающего на частоте 1,3 ГГц в непрерывном режиме.

В результате оптимизации ВЧ параметров выбран состоящий из трех ячеек резонатор с эффективным напряжением 400 кВ и мощностью ВЧ потерь 16 кВт. Расчетное распределение электрического поля в ячейках и по оси резонатора показано на Рис. 2.11. Ведется мульти-физический анализ предложенного варианта.

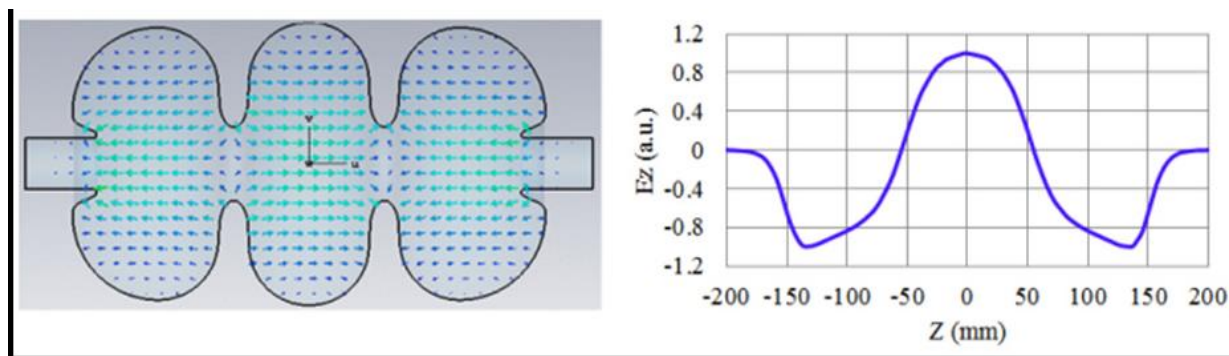


Рис. 2.11 – Расчетное распределение электрического поля в ячейках (слева) резонатора группирователя непрерывного ВЧ режима и распределение  $E_z$  на оси (справа)

## 2.2 Работы АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», выполнявшиеся в 2019 г.

В 2019 году было продолжено сотрудничество DESY и НИИЭФА по определению облика нового источника синхротронного излучения PETRA IV, в частности проведены исследования, направленные на выбор параметров электромагнитов и их оптимизацию с учётом взаимного влияния на создаваемые ими магнитные поля. В ходе проведения исследований выполнено 2D и 3D-моделирование электромагнитов (SHG33, QF6, QF8, DQ1, DQ2C, SH2B), выполнены итерационные 2D и 3D-расчёты. Некоторые иллюстрации проведения этих работ приведены на рисунках 1 - 6. В Табл. 2.1 приведены параметры, а на Рис. 2.12 графическое представление результатов расчётов распределения магнитного поля в электромагните SHG33.

На Рис. 2.13 показаны результаты 2D-расчётов для электромагнита QF8.

Табл. 2.1 Параметры секstupольного электромагнита SHG33

### Variant No. 18

Ampere-winding of the main coil	$AW_{\text{sext}}$	5.4 kA
Ampere-winding of the horizontal correction coil	$AW_{\text{hor}}$	3.0 kA
Ampere-winding of the correction lateral horizontal coil	$AW_{\text{horside}}$	3.0 kA
Ampere-winding of the correction vertical coil	$AW_{\text{ver}}$	3.0 kA
Ampere-winding of the skew coil	$AW_{\text{skew}}$	3.0 kA
Field in the center of the sextupole magnet	$B_y(0,0)$ $B_x(0,0)$	-0.156 T -0.207 T
Sextupole magnetic strength	$1/d^2B/dr^2$	2736.62 T/m <sup>2</sup>
Gradient	G	2.3 T/m

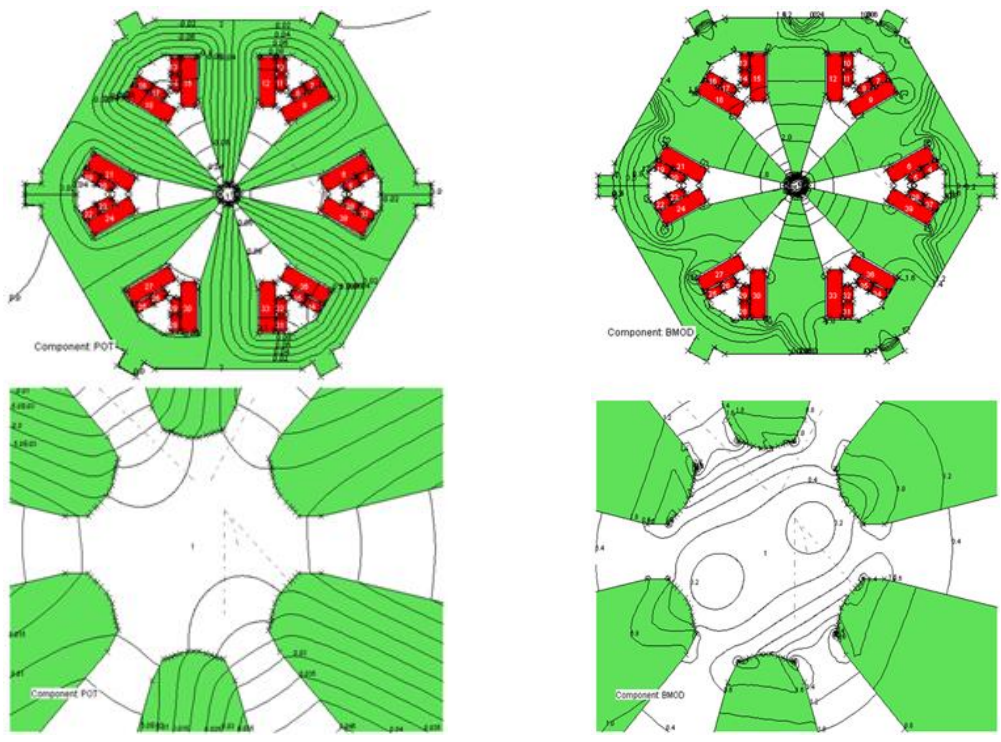


Рис. 2.12 – Пример графического представления результатов расчётов распределения магнитного поля в электромагните SHG33

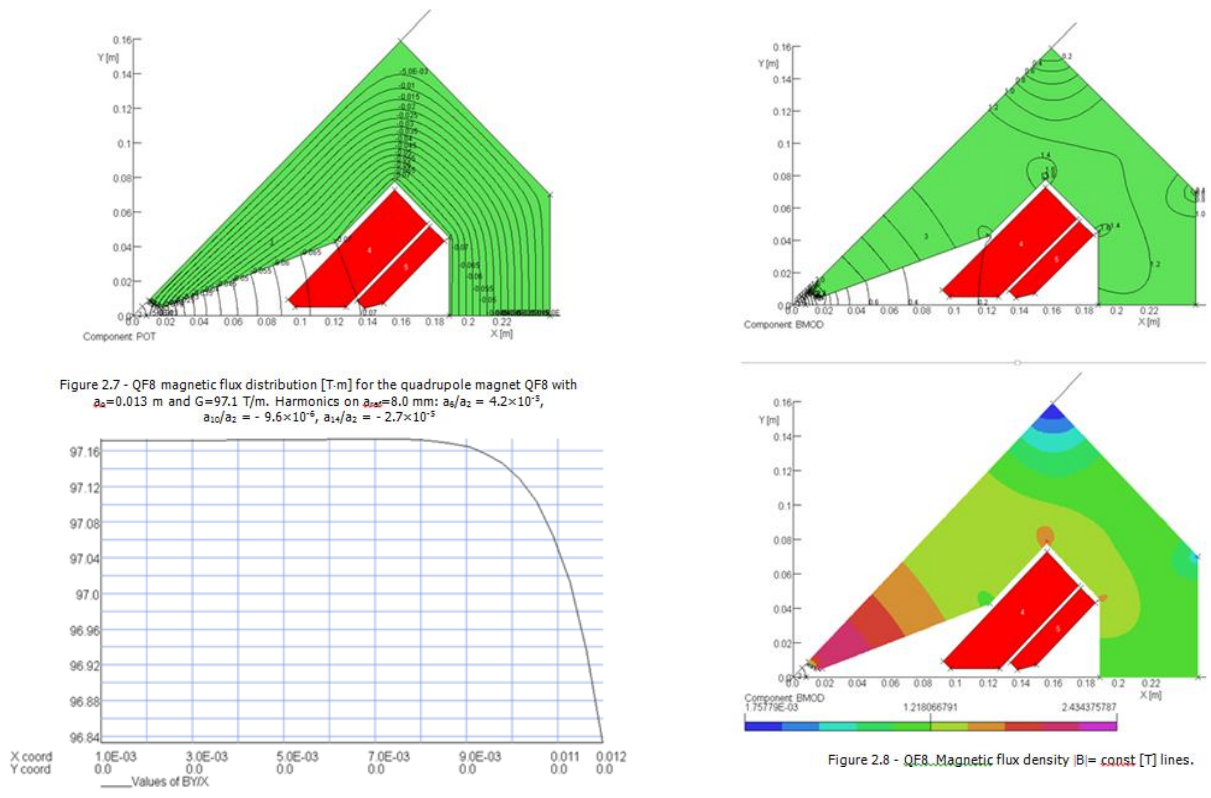


Figure 2.9 - QF8..Distribution By/x along x.

Рис. 2.13 – Иллюстрация выполнения 2D-расчётов для электромагнита QF8

На Рис. 2.13 представлены 3D-модели электромагнитов DQ1, SH2B и DQ2C, на Рис. 2.15 – для секступольного электромагнита SHG26 и квадрупольного электромагнита QHG20, на Рис. 2.16 – 3D-модели пар электромагнитов для расчёта взаимных влияний: SH2B и Q8; DQ2C и QF8.

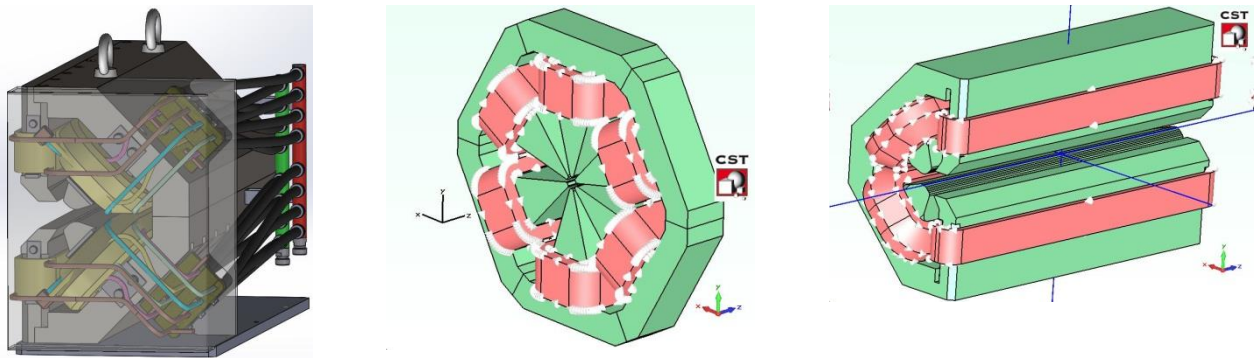


Рис. 2.14 – 3D-модели электромагнитов DQ1, SH2B и DQ2C

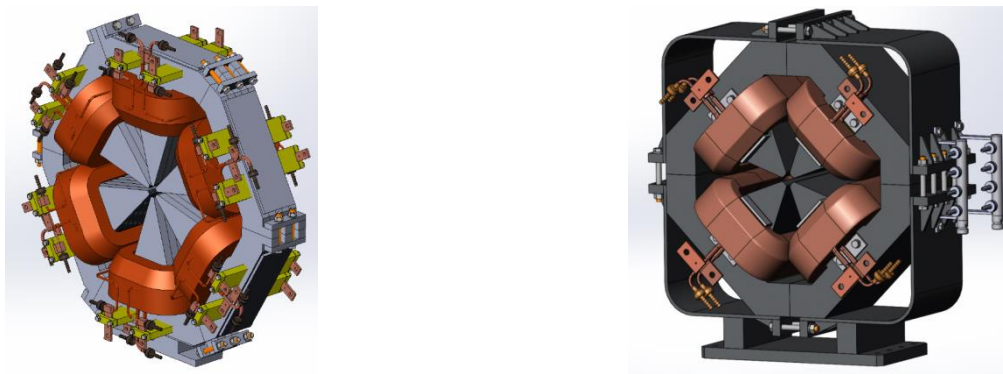


Рис. 2.15 – 3D модели секступольного электромагнита SHG26 и квадрупольного электромагнита QHG20

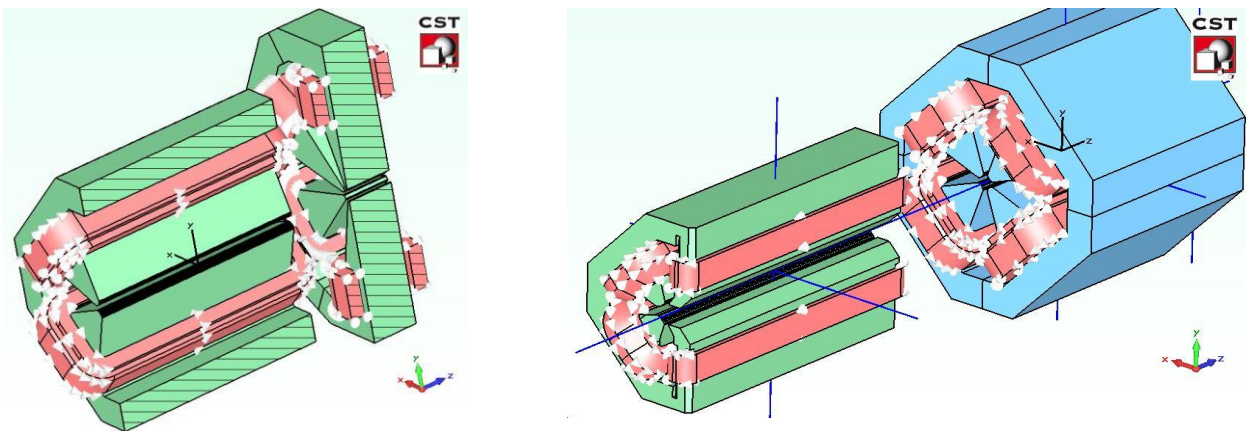


Рис. 2.16 – 3D-модели пар электромагнитов для расчёта взаимных влияний: SH2B и Q8; DQ2C и QF8

На Рис. 2.17 представлены примеры графического представления результатов выполненных расчётов.

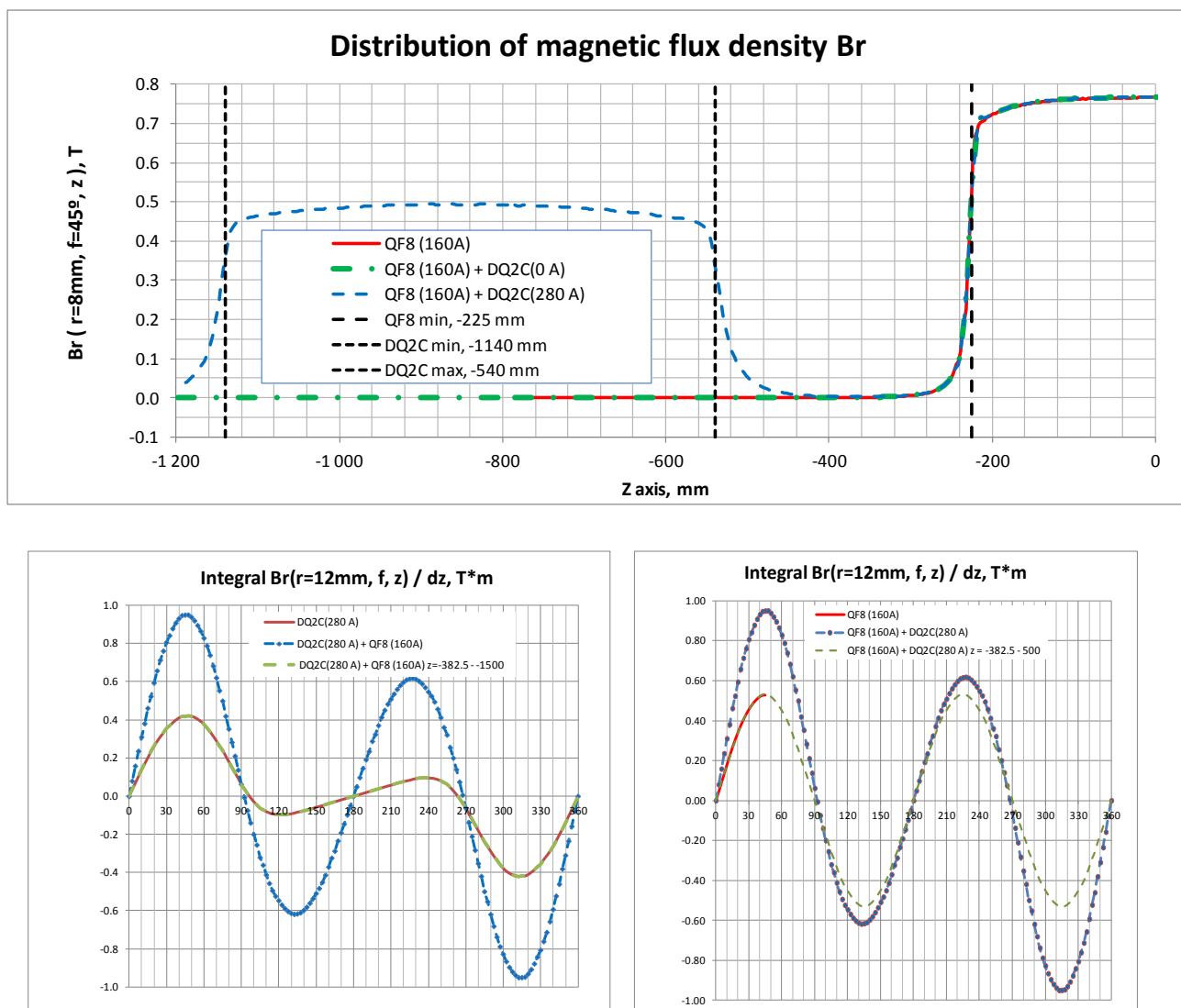


Рис. 2.17– Примеры графического представления результатов выполненных расчётов

Выполнен расчёт для исполнения трёх электромагнитов (дипольного, секступольного и квадрупольного) в общем ярме. Модели, которые использовались для проведения расчетов, приведены на Рис. 2.18 (размеры приведены в Табл. 2.2), а примеры представления результата расчётов - на Рис. 2.19.

По результатам рассмотрения вариантов исполнений - как отдельно стоящих электромагнитов, так и вариантов исполнения электромагнитов в едином магнитопроводе, а также выполненных с целью оптимизации структуры ускорителя исследований взаимного влияния на характеристики электромагнитов их рассеянных магнитных полей, получены предварительные параметры электромагнитов, позволяющие приступить к подготовке спецификаций электромагнитов, включающих в себя все технические требования, необходимые для дальнейшего проектирования электромагнитов проекта PETRA IV.

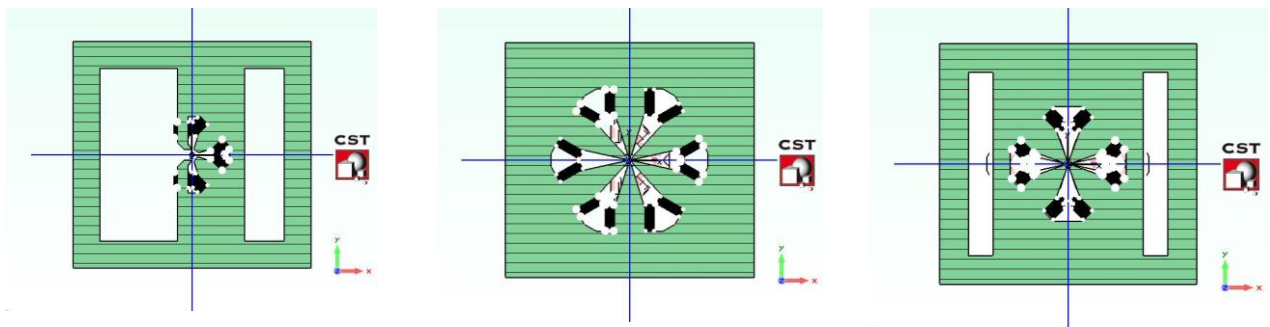
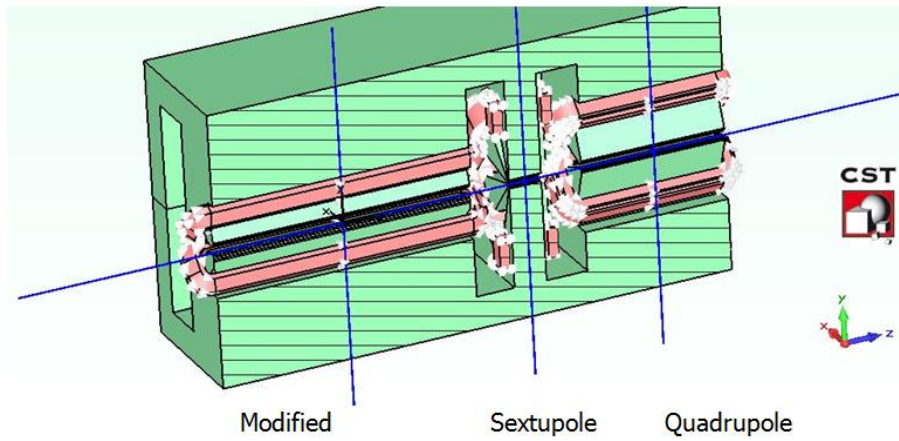


Рис. 2.18 – Компьютерные модели для проведения расчётов (дипольного, секступольного и квадрупольного) в общем ярме

Табл. 2.2 Размеры магнитов по оси пучка

Yoke	Z min, mm	Z max, mm
Modified magnet	-397	397
Sextupole	515.4	615.4
Quadrupole	743.4	1193.4

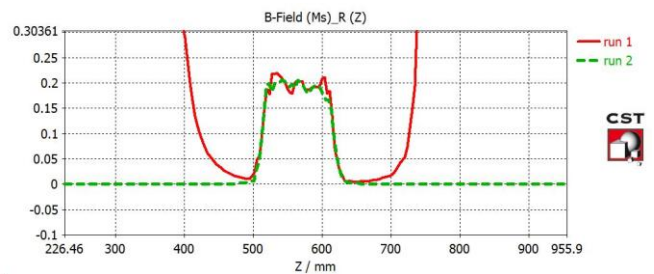
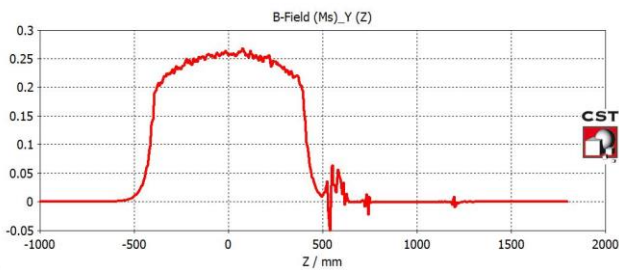


Рис. 2.19 – Компьютерные модели для проведения расчётов (дипольного, секступольного и квадрупольного) в общем ярме



### 2.3 Отчет ИЯФ СО РАН о работах в DESY по ускорительным технологиям

Основным направлением работ являются исследования тонкопленочных геттеров, как элементов вакуумной системы ускорителя, в условиях мощного синхротронного излучения. В 2019 году проведены совещания в DESY по экспериментальной программе и созданию проектной документации на проведение исследования стабильности различных тонкопленочных геттерных покрытий в присутствии интенсивного Синхротронного Излучения (СИ).

В качестве источника СИ будет использоваться поток СИ из секции затухателей PETRA III (DESY). В ИЯФ СО РАН спроектирован и изготовлен поглотитель финальной секции затухателей, предусматривающий возможность вывода коллимированного СИ. Поглотитель рассчитан на 25 кВт мощности СИ.

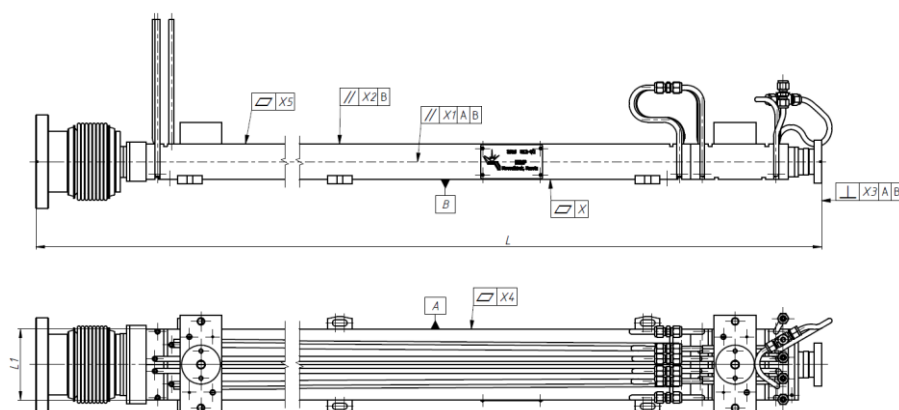


Рис. 2.20 – Поглотитель финальной секции затухателей

В 2019 году изготовлены, протестированы и отправлены в DESY два фокусирующих соленоида. Основные параметры магнитов представлены в Табл. 2.3, а 3D модель – на Рис. 2.21

Соленоиды будут использоваться для фокусировки пучка источника электронов ARES, чтобы повысить ток в ускорителе для экспериментов по кильватерному ускорению SINBAD.

Табл. 2.3 Основные параметры магнитов

Количество магнитов	2
Апертура, мм	30
Диаметр магнита, мм	520
Максимальная напряженность магнитного поля, Тл	1,8
Ток в обмотке возбуждения, А	275 А
Толщина магнита, мм	220
Вес магнита, кг	150
Давление воды	6 атм
Перепад давления воды	2 атм
Расход воды	10 л/мин

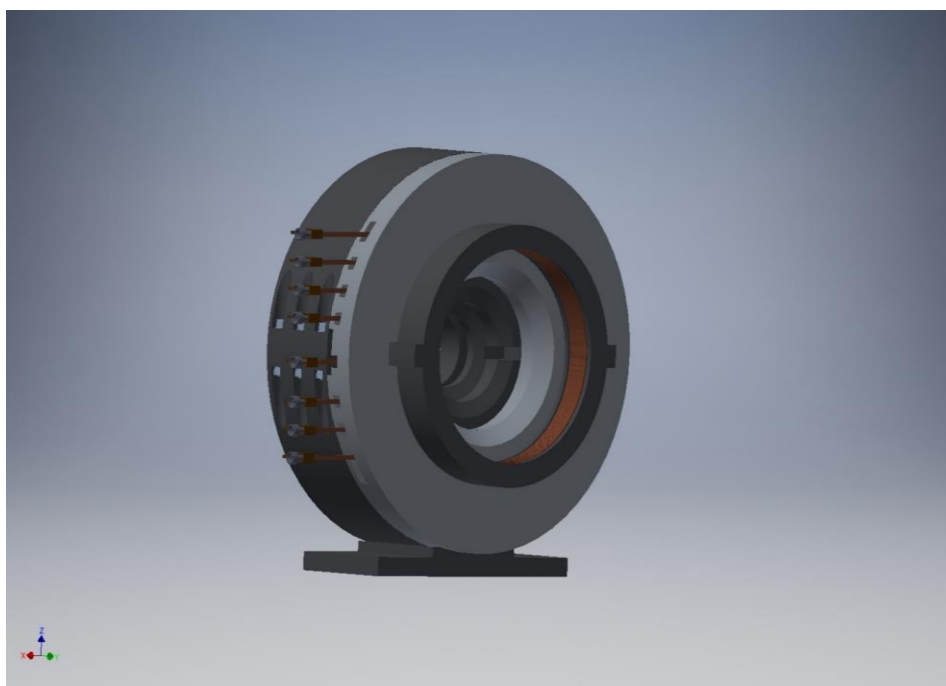


Рис. 2.21 –3D модель соленоида

#### 2.4 План работ и проект сметы расходов по эксперименту на 2020 г.

В 2020 году, с непосредственным участием специалистов ИЯИ РАН, будут проводиться:

- завершение изготовления, настройка и испытания разработанного резонатора фото-инжектора Gun 5;
- завершение разработки физического предложения и выполнение разработки конструкции нормально проводящего резонатора – группирователя непрерывного ВЧ режима.

Основные задачи АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова – проектирование установки для изучения прототипов вакуумных камер с НЭГом в условиях мощного синхротронного излучения из PETRA-III.

План работ ИЯФ СО РАН на 2020 год включает разработку совместно со специалистами DESY физико-технических требований к электромагнитам с повышенными параметрами, необходимых для дальнейшего проектирования электромагнитов проекта PETRA IV.

Указанные работы требуют пребывания сотрудников российских институтов для проведения исследований.

Для выполнения работ в 2020 г требуется поддержка Министерства науки и высшего образования РФ в размере 28000 долларов США для финансирования визитов.

## 2.5 Публикации 2019 года, отражающие результаты по эксперименту:

Российскими участниками эксперимента опубликованы статьи:

1. В журнале Nuclear Instruments and Methods A - V. Paramonov, A. Skasyrskaya, B. Militsyn. Parameters Stability of S-Band RF Gun Cavity Due to Effects of Pulsed RF Heating, Nuclear Instruments and Methods A, v. 940, p. 337, 2019;

2. В журнале Journal of Physics, индексируемом в Scopus - V. Paramonov, V. Danielyan, K. Floettmann, A. Simonyan, V. Tsakanov. Design, construction and tuning of an RF deflecting cavity for the REGAE facility. Journal of Physics, V. 1238, n1, p. 012069, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1238/1/012069>, 2019

С участием российских участников эксперимента:

На Международной конференции по ускорителям заряженных частиц IPAC 2019, Мельбурн, 19-24 мая 2019 г. представлен стендовый доклад: S. Lal, Y. Chen, H. Qian, S. H. Shaker, G. Shu, F. Stephan, V. Paramonov. RF

Design Studies of a 1.3 GHz Normal Conducting CW Buncher for European X-FEL.

Proc. IPAC 2019, p. 3109, 2019,

<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2019/papers/wepts012.pdf>

Опубликован электронный препринт

1. V. Paramonov, A. Skasyrskaya, B. Militsyn. Procedure of simulations for Evaluations of Transient Parameters Stability for RF Cavities Due to Effects of Pulsed RF Heating, <https://arxiv.org/abs/1812.10317>, 2019, предполагается публикация в журнале в 2020 г.

2.6 Приложение 1

Табл. 2.1 Данные о результативности научной деятельности в эксперименте  
«Ускорительные технологии» - проект 4 в 2019 году

Проекты	Участвующие организации	Число специалистов, участвующих в проекте	Из них, участвующих в работах в DESY	Число статей из базы WoS (Scopus) с названием журналов	Число докладов от имени коллаборации	Число молодых учёных (моложе 35 лет)	Число студ. и аспирантов – участников проекта	Число защит диссертаций
Проект-4	ИЯИ РАН	9	6	2	1	2	2	0
	НИИЭФА	7	4	0	0	3	0	0
	ИЯФ СО РАН	4	2	0	0	1	0	0
<b>Всего:</b>		<b>20</b>	<b>12</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>0</b>

Заявка по финансированию проекта-4 в 2020 г. - всего 28000 \$.

### 3 Отчет по эксперименту 6 ФОТОН

Представлен отчет по теме «Фотонные науки». Координатор работ – внс ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, д.ф.-м.н., В.Л. Носик

#### 3.1 Введение

Основные работы выполняются российскими учеными на источнике Синхротронного Излучения (СИ) PETRAIII в центре DESY (Гамбург) и Европейском рентгеновском лазере на свободных электронах ЕРЛСЭ (xfel.eu).

Сегодня экспериментальные возможности ЕРЛСЭ позволяют находиться на переднем фронте наноструктурных рентгеновских исследований с беспрецедентным временным разрешением до 20-100 фс. По сравнению с обычными источниками синхротронного излучения возможности ЕРЛСЭ установки в Гамбурге ограничены всего 6 станциями, что объясняется линейной (а не круговой) геометрией ондуляторов. Фактически 4 станции (инструмента) ЕРЛСЭ уже активно используются, еще 2 (из 6) практически готовы, однако число предложений от различных исследовательских групп, а, следовательно, и конкуренция, постоянно растет. В таких условиях реальное значимое участие российских ученых возможно лишь в составе устойчивых консорциумов.

Объясняется это, прежде всего, высокой стоимостью самих станций и использованием самого современного научного оборудования и использованием новых схем экспериментов.

Основные работы, выполнявшиеся в 2019 г.

- Разработка методов распространения волнового фронта рентгеновского излучения XFEL
- Многопиксельные рентгеновские детекторы с высоким временным разрешением.
- Рассеяние интенсивных аттосекундных импульсов рентгеновского излучения на резонансных ядерных средах для изучения сверхбыстрых процессов и приложений в квантовой информатике
- Определение параметров фокусировки жесткого рентгеновского излучения на станции HED (EXFEL) с использованием флуоресцентного кристаллического детектора
- Серийная кристаллография с использованием излучения Рентгеновских лазеров на свободных электронах.

#### 3.2 Основные направления и результаты исследований

##### 3.2.1 Разработка методов распространения волнового фронта рентгеновского излучения XFEL

Основные исполнители: Бузмаков А.А., Кожевников И.В. (ФНИЦ «Кристаллография и фотоника»).

В связи с началом проведения первых реальных измерений на XFEL в составе оптической группы XFEL начаты работы по созданию инструментов диагностики рентгеновского пучка на каналах SASE1 и SASE2: определение положения пучка, его интенсивности, формы и других параметров.

Для этого разработаны интерактивные пользовательские программы-шаблоны (в

рамках репозитория XTR: XrayToolsRepository) для визуализации данных с детекторов и датчиков, подключённых к системе управления оборудованием KARABO.

Проведены измерения рассеяния SASE излучения от рентгеновского зеркала, что в дальнейшем должно позволить выполнять онлайн диагностику состояния оптических элементов в каналах XFEL.

Полученные результаты обсуждены с сотрудниками XFEL и DESY М. Юрковым, А. Манкузо, Х. Зином и Л. Самойловой. В результате проведенных обсуждений доработаны методы расчета распространения волнового фронта для инструмента XFEL SPB, предназначенного для получения изображений биомолекул с фемтосекундным временным разрешением на XFEL.

### 3.2.2 Многопиксельные рентгеновские детекторы с высоким временным разрешением

Основной исполнитель – В. Носик (ФНИЦ «Кристаллография и фотоника»).

Новые многопиксельные детекторы (от 1000 x 1000 пикселей до 2000 x 3000 пикселей) должны позволить обладать высоким динамическим диапазоном, способностью детектировать одиночные фотоны и анализировать изображения с разрешением до 100 фс. Учитывая большой объем получаемой информации (сравнимый по количеству терабайт информации с экспериментами ЦЕРН) первичный анализ изображений и отбраковку ложных сигналов предполагается возложить на блок анализа данных самого детектора. Кроме того, для проведения экспериментов pump-probe согласование излучения лазерных оптических установок и системы управления импульсами ЕРЛСЭ, контроля систем впрыска наночастиц и других систем. Подобное оборудование пока не производится в РФ, хотя, учитывая планы по строительству установки ИСИ-4, однозначно будет востребовано уже в ближайшем будущем.

Одно из перспективных направлений взаимодействия с ДЕЗИ и ЕРЛСЭ в 2019-2022 годах связано с совместной разработкой и созданием новых детекторов и сцинтилляционных материалов к ним. В настоящее время данный проект согласовывается в НИЦ «Курчатовский институт» и ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

### 3.2.3 Рассеяние интенсивных аттосекундных импульсов рентгеновского излучения на резонансных ядерных средах для изучения сверхбыстрых процессов и приложений в квантовой информатике

Основной исполнитель – В. Носик (ФНИЦ «Кристаллография и фотоника»).

В 2019 году были выполнена серия теоретических исследований, посвященных дифракционному рассеянию лазерного рентгеновского излучения на кристаллах с резонансными ядерными переходами. Уникально узкие по энергии мессбауэровские уровни и возможности воздействия на их положения при помощи магнитных полей и ультразвуковых колебаний позволяют использовать рассеяние интенсивных аттосекундных импульсов рентгеновского излучения на резонансных ядерных средах для изучения сверхбыстрых процессов, а запутанность квантовых состояний открывает новые направления исследований с приложениями в квантовой информатике.

### 3.2.4 Разработка методов распространения волнового фронта рентгеновского излучения XFEL

Основные исполнители: Макаров С.С., Пикуз С.А. (ИФВД РАН).

В рамках экспериментов на Европейском рентгеновском лазере на свободных электронах (станция «HED») была проведена характеристика фокуса жесткого рентгеновского излучения (энергия 9 кэВ). Информация о волновом фронте рентгеновского излучения и его распределении интенсивности в точке фокусировки крайне важна для экспериментов, которые проводятся с использованием лазеров на свободных электронах (ЛСЭ). К таким экспериментам можно отнести, в частности, фазово-контрастную визуализацию объектов, малоугловое рентгеновское рассеяние, визуализацию объектов на основе дифракции когерентного рентгеновского излучения и др.

На первом этапе экспериментов (апрель-май 2019, Proposal#2353) рентгеновский пучок размером  $\sim 1$  мм и энергией 9 кэВ фокусировался бериллиевыми линзами CRL1+CRL3 в пятно размером  $d=2$  мкм. Кристалл фторида лития использовался в качестве детектора для характеристики фокусировки пучка. Для этого была произведена регистрация профиля пучка в различных плоскостях от теоретического фокуса (в диапазоне от -15 до 15 см). Пример полученной каустики пучка, зарегистрированной с использованием флуоресцентного детектора LiF, представлен на *Рис. 3.1*

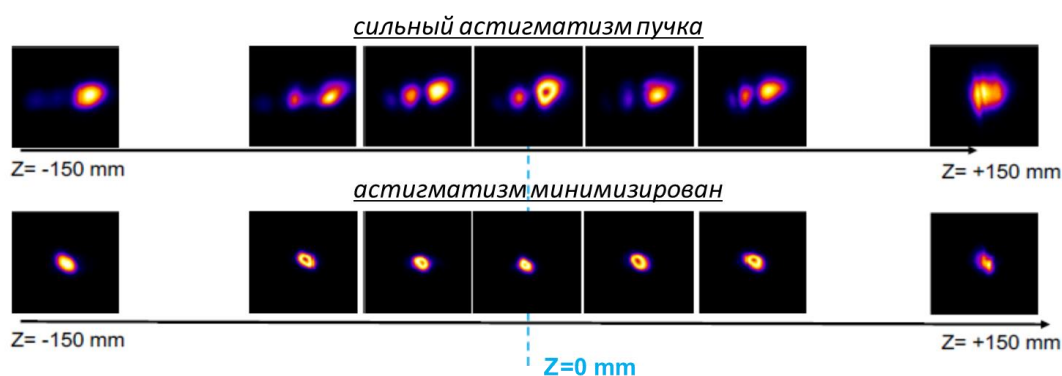


Рис. 3.1 – Профиль сфокусированного рентгеновского пучка (линза-CRL3), зарегистрированный с помощью флуоресцентного кристаллического детектора фторида лития (точка наилучшей фокусировки  $Z=0$ )

Благодаря высокому пространственному разрешению (для энергии 9 кэВ не менее 0.7 мкм) и чувствительности кристалла LiF было установлено, что:

- размер сфокусированного пучка был  $d \sim 4$  мкм (расчетный  $d=2$  мкм);
- сфокусированный пучок состоял из 2-3 пятен, что объясняется смещенным отражением от системы зеркал перед линзами;
- полный размер пучка равнялся  $\sim 20$  мкм, однако в области  $d=4$  мкм находилось более 80% энергии излучения;
- сфокусированный пучок обладал сильным астигматизмом в одном направлении.

Также в ходе исследований была определена расходимость пучка на станции HED при фокусировке линзой CRL3. Впервые получены экспериментальные данные по порогам абляции детектора LiF при воздействии фемтосекундных рентгеновских импульсов. Пример полученных изображений на детекторе LiF представлен на *Рис. 3.2*.

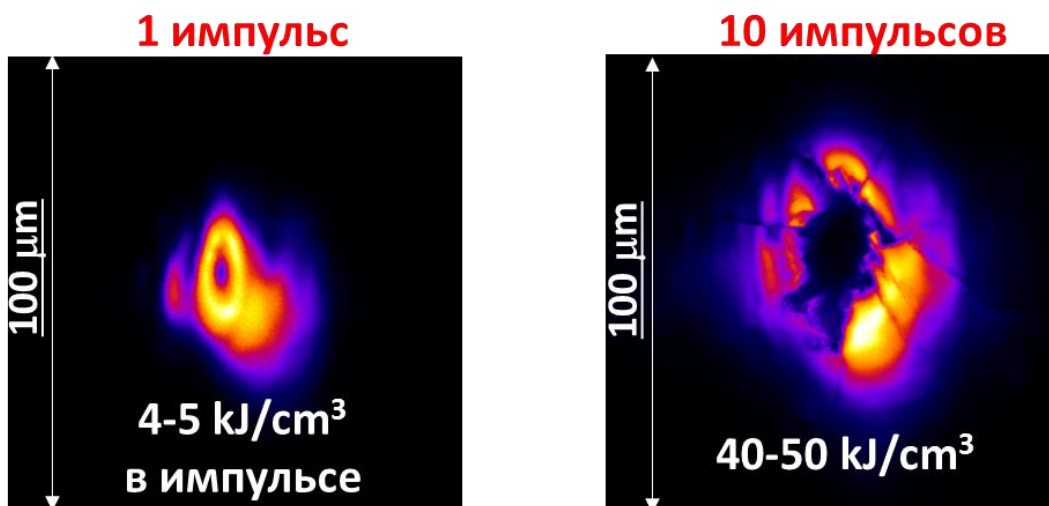


Рис. 3.2 – Результат по исследованию порога абляции детектора LiF в поле сверхинтенсивного рентгеновского излучения EXFEL

Произведена первичная оценка данной величины в  $\sim 4$  кДж/см<sup>3</sup> при облучении одним импульсом (singleshot). Данный результат чрезвычайно полезен для планирования радиографических экспериментов по физике высоких плотностей энергии (как правило, используется singleshot режим).

На втором этапе экспериментов (Proposal#2151) рентгеновский пучок размером  $\sim 1$  мм и энергией 9 кэВ фокусировался бериллиевыми линзами CRL1+CRL4 в пятно субмикронного размера. Детектор LiF использовался для проверки качества фокусировки пучка по вышеописанной схеме. Была выполнена серия экспериментов по уточнению значения порога абляции кристалла LiF под воздействием высокоинтенсивного фемтосекундного рентгеновского излучения. В частности, были реализованы режимы, когда кристалл облучался несколькими фемтосекундными импульсами. Полученные в эксперименте данные находятся на стадии обработки.

Публикация статей в рецензируемых научных журналах по результатам вышеописанных экспериментов планируется после полной обработки полученных данных и их сравнении с другими диагностиками, использованными при исследовании пучка на станции HED (*тальбот-интерферометрия, метод импринтинга-фокусировки и сканирующая техника на основе птихографии*).

По результатам проектов предыдущих лет, финансируемых за счет мин. науки, подготовлена статья в журнал Journal of synchrotron Radiation: Makarov Sergey, Pikuz Sergey, Ryazantsev Sergey, Pikuz Tatiana, Buzmakov Alexey, Rose Max, Lazarev Sergey, Senkbeil Tobias, Gundlach Andreas von, Stuhr Susan, Rumancev Christoph, Dzhigaev Dmitry, Skopintsev Petr, Zaluzhnyy Ivan, Viefhaus Jens, Rosenhahn Axel, Kodama Ryosuke and Vartanyants Ivan / *Soft x-ray diffraction patterns measured by LiF detector with sub-micron resolution and ultimate dynamic range* / Journal of Synchrotron Radiation, 2020.

На данный момент работа находится на этапе второго рецензирования, и её выход ожидается в начале 2020 года.



### 3.2.5 Серийная кристаллография с использованием излучения Рентгеновских лазеров на свободных электронах

Основные исполнители: Самыгина В.Р. , Дубова К.М. (ФНИЦ «Кристаллография и фотоника», НИЦ «Курчатовский институт»).

Проведена предварительная оценка влияния физико-химических факторов на конформацию и стабильность молекул флавивирусов методом рентгеновского малоуглового рассеяния в рамках заявки SAXS-940 на станции синхротронного излучения P12, ПетраШ (Гамбург) (время 21\10\2019, 2 смены), ведется обработка полученных данных. В рамках участия в эксперименте 2316 'проведен анализ единичной молекулы' на инструменте SPB/FSX, XFEL (Гамбург), а именно: оценка качества образца вируса клещевого энцефалита, тест инъекции вируса клещевого энцефалита и рибосомы, сбор дифракционных данных с вирионов вируса клещевого энцефалита в растворе, оценка качества дифракционных данных, тест инъекции микрокристаллических суспензий модельных белков с использованием GDVN-инжектора для последующих экспериментов по времяразрешающей серийной кристаллографии.

#### 3.2.5.1 Эксперимент по рентгеновскому имиджингу единичных частиц инактивированного вируса клещевого энцефалита с использованием XFEL и тестированию инъекции микрокристаллических суспензий.

Вирус клещевого энцефалита относится к флавивирусам, переносится клещами. Ежегодно регистрируются тысячи случаев клещевого энцефалита. Несмотря на то, что против инфекции существуют достаточно эффективные вакцины, заболеваемость остаётся стабильно высокой. Таким образом, необходимо создание альтернативных традиционным вакцинам средств профилактики и (или) лечения, в частности, на основе низкомолекулярных соединений, а также повышение эффективности вакцины. Данные о строении вирусных частиц должны сыграть в решении этой проблемы ключевую роль. Однако решение структуры данного вируса представляет собой нетривиальную задачу. Использование XFEL может помочь решить эту задачу, так как позволяет получить структуру одной частицы в растворе в нативном состоянии.

Эксперимент по имиджингу единичных частиц инактивированного вируса клещевого энцефалита (ВКЭ) был проведен на инструменте SPB/FSX Европейского лазера на свободных электронах XFEL. Ключевым моментом эксперимента является успешная инъекция образца. Использование буфера с соответствующей проводимостью и желателно испаряющегося в процессе эксперимента, необходимо.

Предварительно был проведен тест образца вируса клещевого энцефалита в разных буферах с использованием малоуглового рентгеновского рассеяния. После последней стадии очистки вирус находился в 26мМ хлорида натрия, 20мМ Трис-хлор буфере рН 7.8. Оптимальным буфером для XFEL-эксперимента, в котором проводится большинство экспериментов с использованием электроспрея, являлся 25 мМ аммоний-ацетатный буфер. Аликвота образца переводилась в 25 мМ аммоний-ацетатный буфер рН 7.5 с использованием ультрацентрифужного концентратора VivaSpin500 с порогом отсека по молекулярной массе 300кДа на миницентрифуге Eppendorf со скоростью 5000 об\мин.

Эксперимент по рентгеновскому малоугловому рассеянию был проведен для образца в 26мМ хлорида натрия, 20мМ Трис-хлор буфере рН 7.8 и образца в 25 мМ аммоний-ацетатный буфер рН 7.5. Измерения проводились на станции синхротронного излучения P12

синхротронного источника Петра III. Для каждого типа буфера было измерено три разных концентрации образца вируса:  $5 \times 10^{12}$ ,  $2.5 \times 10^{12}$  и  $1.5 \times 10^{12}$ .

Измерения проводились с использованием робота для смены образцов. Применяли монохроматическое излучение с длиной волны 0.124 нм (энергия излучения 8.1 кэВ). Расстояние образец-детектор составляло 3000 мм, что соответствовало угловому диапазону вектора рассеяния  $0.05 \text{ нм}^{-1} < s < 1.1 \text{ нм}^{-1}$ . Сигнал регистрировали с помощью двумерного пиксельного детектора PILATUS 6M (Dectris, Швейцария). Двумерную картину рассеяния усредняли по радиальному направлению с помощью программы FIT2D. С использованием программы PRIMUS из кривых рассеяния раствором ВКЭ вычитали рассеяние буферным раствором. Интегральные структурные параметры частиц ВКЭ (радиус инерции  $R_g$  и максимальный размер  $D_{\text{max}}$ ) оценивали в приближении Гинье и с помощью непрямого Фурье-преобразования программой GNOM. Трехмерную *ab initio* форму частицы ВКЭ восстановили с помощью программы DAMMIN.

Оценка распределения частиц по размерам в приближении полидисперсных сфер по программе MIXTURE показала, что частицы ВКЭ в нативной форме имеют узкое распределение со средним радиусом 25 нм и шириной распределения 1 нм. Это совпадает с литературными данными о размерах частиц ВКЭ. ВКЭ частицы после смены буфера представляли собой в растворе смесь сферических частиц радиуса 25 нм (с объемной долей 80%), 50 нм (с объемной долей 10%) и 100 нм (с объемной долей 10%). Полученные данные указывали на процесс агрегации при переводе в аммонийно-ацетатный буфер. Поскольку гомогенность важна для успешной инъекции, было решено проводить тест инъекции и последующий эксперимент в буфере 26мМ хлорида натрия, 20мМ Трис-хлор буфере pH 7.8 поскольку он обеспечивал стабильность образца.

Распределение частиц ВКЭ по размерам в приближении полидисперсных сфер получили с помощью программы MIXTURE непосредственно перед сбором данных на Инструменте SPB/SFX. После смены буфера измерялся спектр белка на спектрофотометре NanoDrop. Также был установлен оптимальный pH буфера, при котором частицы находятся в стабильном состоянии, он составлял 7.8.

Образец концентрации  $5 \times 10^{12}$  на мл после теста на станции P12 Петра III, был протестирован на инжекторе типа электроспрей с использованием метода DMA (dynamic mobility assay). Тест показал стабильную инъекцию препарата. С образца был собран набор дифракционных данных на инструменте SPB/SFX с использованием детектора AGIPD. Экспозиция составляла 0,000998 сек. Было собрано два набора данных (в 3-ю и 4-ую смены). Первый набор содержал 1694300 дифракционных картин, второй набор содержал 6988900 дифракционных картин. Интенсивность рассеяния от образца была достаточной для обработки данных (Рис. 3.3).

Для сравнения, от частиц меньшего размера, исследовавшихся в рамках того же эксперимента 2116 (рибосома 80S), такой интенсивности рассеяния получено не было. Показатель hit rate (количество дифракционных картин (имиджей) с рассеянием от единичной частицы) составлял 0.18% для первого набора и 0.05% для второго набора. Данные в процессе обработки.

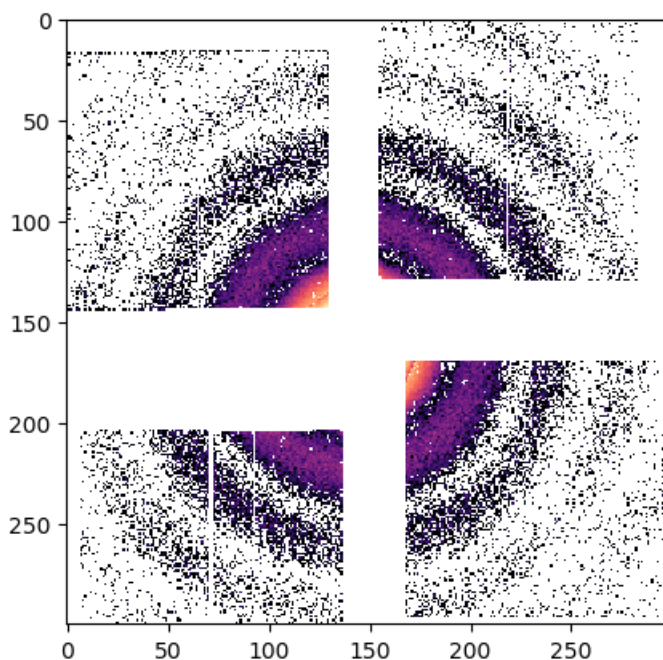


Рис. 3.3 – Дифракционная картина от частицы инактивированного вируса клещевого энцефалита

### 3.2.5.2 Тесты инъекции микрокристаллических суспензий.

После эксперимента на инструменте SPB/FSX были проведены тестовые эксперименты по инъекции микрокристаллических суспензий. Помимо имиджинга единичных частиц на инструменте SPB/FSX может быть реализован эксперимент по времяразрешающей серийной микрокристаллографии.

Эти эксперименты составляют около 95% проводимых на этом инструменте экспериментов. Методика позволяет исследовать реакции, происходящие в кристаллах белков при комнатной температуре в реальном времени. Для мембранных белков, для которых получение кристаллов больше 10 мкм бывает проблематично из-за их особых свойств и монокристалльный метод сбора данных не дает хороших результатов, серийная кристаллография позволяет собрать набор дифракционных данных. Для растворимых белков основным достоинством метода можно назвать исследование ферментативных реакций. Микрокристаллические суспензии модельных белков бета-лактамазы TEM-1 из *E.coli* и человеческого фактора ингибирования миграции макрофагов были протестированы на VGDN-инжекторе.

Тесты были проведены на лабораторном варианте инжектора в лаборатории ХВІ Европейского XFEL с участием сотрудников группы характеристики образцов. Тестировалось 500 мкл образца микрокристаллов фактора ингибирующего миграцию макрофагов и 300 мкл бета-лактамазы. Предварительно микрокристаллы инспектировались с помощью флуоресцентного микроскопа Nikon, размер кристаллов составлял 10-20 мкм. Было отмечено, что микрокристаллы бета-лактамазы не имеют четких граней. Были использованы сопла 0.45 мкм и 0.7 мкм. Скорость потока составляла 0.2 мл/мин. Использование металлического фильтра с ячейками 0.22 мкм с соплом 0.45 мкм приводило к осаждению кристаллической суспензии на фильтре. Использование сопла диаметром 0.7 мкм (Рис. 3.4) без фильтра показало лучший результат. Однако требуется воспроизведение теста с большим количеством образца, не менее 1-2 мл каждого образца. Однако тест показал принципиальную возможность инъекции образцов.

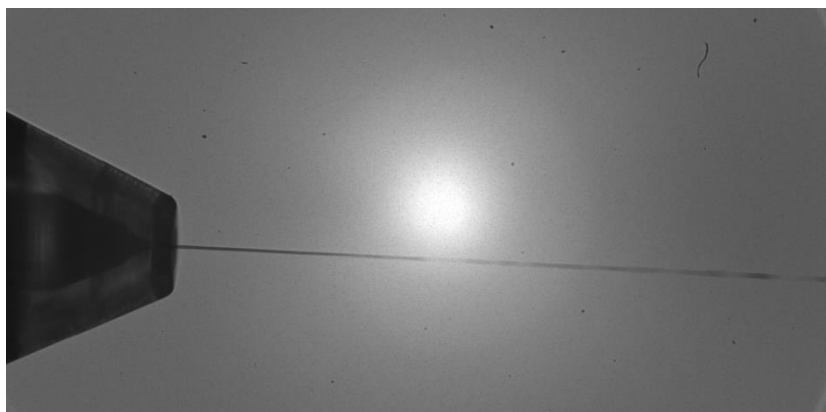


Рис. 3.4 – Поток микрокристаллов из GDVN-инжектора

### 3.3 Основные показатели

1. Число специалистов, участвующих в работах центра. (8)
2. Число молодых специалистов, привлеченных в эти работы. (3- Дубова К.М., Макаров С.С. – аспиранты, Бузмаков А.А.- до 35 лет)
3. Число студентов – участников экспериментов (0).
4. Число диссертаций на соискание ученых степеней, защищенных в рамках участия в работах центра (планируются 2 - Дубова К.М., Макаров С.С. – аспиранты).
5. Число докладов от имени коллабораций, сделанных российскими учеными (0).
6. Число публикаций в ведущих научных журналах (с указанием наименования издания, в т.ч. из базы WoS), содержащих результаты интеллектуальной деятельности, полученные в рамках участия в работах центра (0).

В 2020 году расходы на исследовательские работы по теме «Фотонные науки» планируются примерно на том же уровне, что и в 2019 году. Планируется увеличение числа проектов, связанных с новым оборудованием для современных источников синхротронного излучения (включая ИСИ-4) и рентгеновских лазеров на свободных электронах проектам.

Представлен отчет по теме «Моделирование эффектов рождения t-кварка, бозона Хиггса и новой физики на Международном Линейном Коллайдере». Координатор работ – зав. отделом МГУ, д. ф.-м. н., член-корр. РАН Э.Э. Боос.

#### 4.1 Введение

Объект исследования: процессы рождения t-кварка и бозона Хиггса в рамках Стандартной модели (СМ) и ее расширений. Компьютерные методы вычислений процессов на будущем коллайдере ILC с учетом результатов LHC.

Целью проекта является анализ уникальных возможностей линейного коллайдера ILC по идентификации обнаруженного на LHC бозона Хиггса, по исследованию возможных аномальных взаимодействий в секторе топ-кварка, анализ перспектив измерения параметров новых гипотетических частиц. Анализ во всех случаях проводится на основе результатов, получаемых при анализе данных LHC. Известно, что в СМ существует проблема нестабильности массы бозона Хиггса относительно радиационных поправок от гипотетических массивных частиц, которые могут рождаться при больших масштабах энергии. В рамках СМ наибольший вклад в поправки к массе бозона Хиггса дают виртуальные процессы с участием t-кварка. Различные расширения СМ предполагают существование дополнительных симметрий, а также массивных частиц - партнёров t-кварка. Они могут играть ключевую роль в проблеме стабилизации массы бозона Хиггса. Поэтому поиск таких партнёров и изучение их свойств представляет огромный интерес. В рамках данного проекта исследуются процессы с участием t-кварка и его суперсимметричных партнёров, бозона Хиггса и новых частиц в рамках СМ и ее расширений. Одной из целей является создание генераторов событий на основе пакета CompHEP для процессов рождения t-кварка и бозона Хиггса и использование этих генераторов для поиска возможных отклонений от предсказаний СМ в процессах на коллайдере ILC, принимая во внимание методы, разработанные для LHC и будущих проектов FCChh, FCCee, FCCeh, а также уже имеющиеся результаты коллайдера LHC, разработка высокоавтоматизированных программных вычислительных средств, а также оптимизация феноменологического анализа.

При выполнении работы использовались следующие методы: новые эффективные Монте-Карло генераторы процессов с рождением t-кварка, бозона Хиггса и новых частиц на основе пакета CompHEP. Оптимизация выделения сигнала для исследуемых процессов методами многомерного анализа наблюдаемых, на основе метода нейронных сетей.

Основные результаты работы: Проведено моделирование ряда процессов с участием бозона Хиггса и основных процессов рождения и распада топ кварков для модернизированного варианта работы коллайдера LHC в режиме высокой светимости (HL-LHC) и планируемых модификациях будущего коллайдера FCC (FCCee, FCChh, FCCeh). В частности, вычислены основные характеристики процессов одиночного рождения топ кварка, с учётом эффективных аномальных операторов, аномальных взаимодействий  $Wtb$ , а также меняющихся аромат нейтральных токов (FCNC), для различных планируемых значений энергии и интегральной светимости перечисленных коллайдеров. Получены предсказания для сечений рассматриваемых процессов при энергии HL-LHC: 14 TeV, 27 TeV и 100 TeV. Созданы Монте-Карло генераторы перечисленных процессов. Эти генераторы использовались для оценки точности измерения параметров взаимодействия топ кварка с полями СМ, а также гипотетическими полями из различных расширений СМ в режимах

высокой энергии и светимости на коллайдере LHC (HL-LHC) и в различных режимах на коллайдере FCC. С помощью проведённого моделирования показано, что коллайдер FCC будет способен измерить характеристики процессов с одиночным рождением топ кварка с точностью на один-два порядка величины превосходящей измерения доступные на коллайдере LHC/HL-LHC.

При выполнении работы проведена полная цепочка моделирования исследованных процессов. С помощью пакетов CompHEP и Madgraph созданы Монте-Карло события на партонном уровне моделирования. Эти события пропущены через программу Pythia для моделирования излучений и процессов образования адронов, а также через программу Delphes для моделирования отклика детектора. Эти генераторы используются участниками коллабораций CMS и ILC для разработки эффективных экспериментальных методов выделения сигнала

## 4.2 Основные результаты:

### 4.2.1 Оценка потенциала дальнейшего обновления LHC до коллайдера HE-LHC

До настоящего времени результаты LHC с большой точностью подтверждают применимость Стандартной модели физики элементарных частиц в секторах сильных и электрослабых взаимодействий. Модернизация LHC до фазы высокой светимости (HL-LHC) при энергии 14 ТэВ с интегральной светимостью  $3 \text{ ab}^{-1}$  будет зондировать Стандартную модель с еще большей точностью и позволит повысить чувствительность к возможным отклонениям от СМ, благодаря десятикратному увеличению набора данных, обновленным детекторам и ожидаемым улучшениям в теоретическом понимании.

В составе международной группы ученых – участников коллабораций CMS, ILC, в том числе, совместно с отделом теоретической физики DESY (G. Weiglein, H. Bahl), – проведено Монте-Карло моделирование ряда процессов с участием бозона Хиггса и топ кварка в рамках СМ, а также в различных сценариях — расширениях СМ. На основе этого моделирования даны предсказания точности измерений характеристик процессов на модернизированном коллайдере LHC (HL-LHC), а также оценка потенциала дальнейшего обновления LHC до коллайдера с энергией столкновений 27 ТэВ (HE-LHC) и интегральной светимостью  $15 \text{ ab}^{-1}$  для поиска новой физики в процессах с бозоном Хиггса и топ кварком.

Для системной интерпретации потенциальных отклонений от СМ, нами был использован подход эффективной теории поля (SMEFT), в котором СМ дополняется набором калибровочно инвариантных операторов более высокой размерности. В рамках SWIFT сечения процессов могут быть параметризованы следующим образом:

$$\sigma = \sigma_{SM} + \sum_i \frac{1 \text{TeV}^2}{\Lambda^2} C_i \sigma_i + \sum_{i \leq j} \frac{1 \text{TeV}^4}{\Lambda^4} C_i C_j \sigma_{ij}.$$

где  $C_i$  – это коэффициенты Вильсона при соответствующих аномальных операторах, а  $\sigma_i$  – сечения процессов с участием этих операторов.

Используя подход SWIFT, проведена оценка чувствительности процессов одиночного рождения топ кварка к аномальным операторам. Результаты приведены в Табл. 4.1 ( $r_i = \sigma_i/\sigma_{SM}$ ,  $r_{ii} = \sigma_{ii}/\sigma_{SM}$ ). Показано отношение  $r_i = \sigma_i/\sigma_{SM}$  для 14 ТэВ и 27 ТэВ для всей кинематической области, а также для области с высоким поперечным импульсом,

Установлено, что влияние оператора  $O_{\phi Q}$  остается неизменным при переходе от 14 до 27 ТэВ, так как его эффект заключается только в перемасштабировании параметра взаимодействия СМ. Влияние дипольного оператора  $O_{tW}$  возрастает примерно вдвое, тогда как чувствительность к четырёхфермионному оператору существенно усиливается при переходе от 14 ТэВ и 27 ТэВ.

Предварительные результаты исследований опубликованы в работе Standard Model Physics at the HL-LHC and HE-LHC, P. Azzi {et al.} [HL-LHC Collaboration and HE-LHC Working Group], arXiv:1902.04070 [hep-ph].

Табл. 4.1 Чувствительность t-канального процесса одиночного рождения топ кварка к трем аномальным операторам при различных режимах модернизированного коллайдера HE-LHC

	<i>t</i> -channel 14 TeV ( $p_T^t > 350$ GeV)		<i>t</i> -channel 27 TeV ( $p_T^t > 350$ GeV)	
	$\sigma_{SM}$	225 pb	0.746 pb	640 pb
$r_{tW}$	0.025	0.052	0.022	0.040
$r_{tW,tW}$	0.014	0.31	0.016	0.34
$r_{\phi Q^{(3)}}$	0.12	0.12	0.12	0.12
$r_{\phi Q^{(3)},\phi Q^{(3)}}$	0.0037	0.0037	0.0037	0.0037
$r_{Qq^{(3,1)}}$	-0.36	-6.45	-0.39	-6.79
$r_{Qq^{(3,1)},Qq^{(3,1)}}$	0.135	18.8	0.222	26.8

#### 4.2.2 Подготовка обзора современного состояния физики топ кварка

Подготовлен обзор современного состояния физики топ кварка. В обзоре рассмотрены основные понятия и современное состояние физики топ кварка. Описаны основные свойства и взаимодействия топ кварка, а также обобщены основные экспериментальные результаты, полученные на Большом адронном коллайдере (LHC). Кратко рассмотрены перспективы физики топ кварка на LHC при увеличении светимости и энергии столкновений (HL-LHC). Обсуждаются возможные проявления новой физики за пределами СМ в секторе топ кварка.

Результаты исследований опубликованы в работе Top Quark: Results and Prospects, E.Boos, L. Dudko, P. Mandrik and S. Slabospitskii, Phys. Part. Nucl. 50, no.3, 231 (2019) Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra 50, no.3 (2019).

#### 4.2.3 Изучение перспективы прямого измерения элемента матрицы СКМ $|V_{tb}|$

Для варианта коллайдера FCC-eh изучены перспективы прямого измерения элемента матрицы СКМ  $|V_{tb}|$  и возможных аномальных взаимодействий топ кварка с W-бозоном и b-кварком. Вершина  $Wtb$ , с учётом аномальных вкладов, может быть параметризована следующим образом:

$$L = \frac{g}{\sqrt{2}} \left[ W_\mu \bar{t} \gamma^\mu (V_{tb} f_1^L P_L + f_1^R P_R) b - \frac{1}{2M_W} W_{\mu\nu} \bar{t} \sigma^{\mu\nu} (f_2^L P_L + f_2^R P_R) b \right] + h.c.$$

Где  $f_1^L$  и  $f_1^R$  -аномальные левые и правые векторные, а  $f_2^L$  и  $f_2^R$  -аномальные левые и правые тензорные параметры взаимодействия.

На основе созданных Монте-Карло генераторов, сделана оценка чувствительности процессов одиночного рождения топ кварка к векторным и тензорным аномальным взаимодействиям  $Wtb$  на планируемом коллайдере FCCee в зависимости от его интегральной светимости (см. Рис. 4.1).

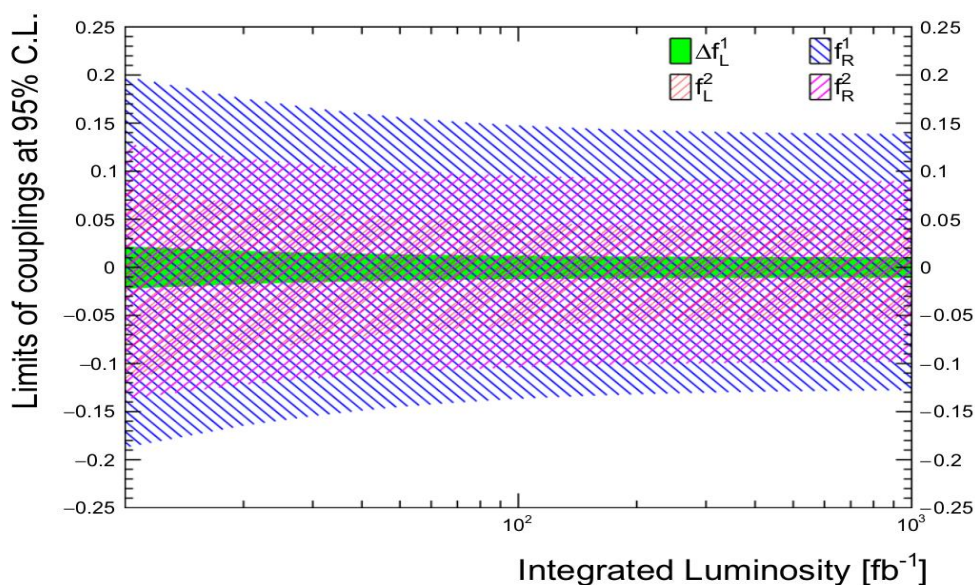


Рис. 4.1 – Ожидаемая чувствительность к аномальным параметрам взаимодействия  $Wtb$  как функция интегральной светимости коллайдера FCCee

Результаты исследований опубликованы в работе FCC Physics Opportunities: Future Circular Collider Conceptual Design, Report Volume 1, A. Abada {et al.} [FCC Collaboration], Eur. Phys. J. C 79, no. 6, 474 (2019).

#### 4.2.4 Формулировка требований на физические параметры электрон-позитронного коллайдера

С использованием результатов моделирования физических процессов при непосредственном участии наших сотрудников были сформулированы требования на физические параметры электрон-позитронного коллайдера FCCee, способного измерить характеристики процессов на один-два порядка величины превосходящей измерения доступные на коллайдере LHC/HL-LHC. Выработанные рекомендации будут использованы при рассмотрении различных стадий работы линейного коллайдера в проекте ИС. Для процессов с участием бозона Хиггса, а также процессов с топ кварком необходимы следующие режимы:

а). Интегральная светимость не менее  $5 \text{ ab}^{-1}$  при  $\sqrt{s} = 240 \text{ ГэВ}$  для измерений констант взаимодействия бозона Хиггса с бозонами по его относительной ширине распада и полному сечению ассоциированного рождения  $HZ$ .

б). Интегральная светимость около  $0.2 \text{ ab}^{-1}$  в окне шириной  $5 \text{ ГэВ}$  вокруг порога рождения пары  $t\bar{t}$ , разделённая между восемью энергетическими точками от  $\sim 340$  до  $\sim 345 \text{ ГэВ}$ , для измерения массы топ кварка, ширины его распада и его Юкавской константы взаимодействия с бозоном Хиггса.

с). Интегральная светимость не менее  $1,5 \text{ ab}^{-1}$  выше порога рождения пары  $t\bar{t}$ ,  $\sqrt{s} = 365 \text{ ГэВ}$ , для измерения электрослабых параметров взаимодействия топ кварка. Эти данные



также обеспечивают трехкратное улучшение точности ширины распада бозона Хиггса по сравнению с данными при  $\sqrt{s} = 240$  ГэВ, что, в свою очередь, позволяет существенно усилить ограничения на параметры взаимодействия бозона Хиггса.

Результаты исследований опубликованы в работе FCC-ee: The Lepton Collider : Future Circular Collider Conceptual Design, Report Volume 2, A. Abada {et al.} [FCC Collaboration], Eur. Phys. J. ST 228, no. 2, 261 (2019)..

#### 4.3 Доклады и публикации за 2019 год:

Полный список публикаций:

1) Standard Model Physics at the HL-LHC and HE-LHC, P. Azzi {et al.} [HL-LHC Collaboration and HE-LHC Working Group], arXiv:1902.04070 [hep-ph].

2) Top Quark: Results and Prospects, E. Boos, L. Dudko, P. Mandrik and S. Slabospitskii, Phys. Part. Nucl. 50, no.3, 231 (2019), Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra 50, no.3 (2019).

3) FCC Physics Opportunities : Future Circular Collider Conceptual Design, Report Volume 1, A. Abada {et al.} [FCC Collaboration], Eur. Phys. J. C 79, no. 6, 474 (2019).

4) FCC-ee: The Lepton Collider : Future Circular Collider Conceptual Design, Report Volume 2, A. Abada {et al.} [FCC Collaboration], Eur. Phys. J. ST 228, no. 2, 261 (2019).

Список докладов за 2019 год:

(1) Differences in fully differential production cross section and decay width of polarized top-quark depending on various anomalous  $Wtb$  couplings. Авторы: Боос Э.Э., Буничев В.Е. The XXIV International Workshop High Energy Physics and Quantum Field Theory (QFTHEP'2019), г. Сочи, Россия, 22-29 сентября 2019

(2) Recommendations for the search of the Anomalous  $Wtb$  interactions in the  $tW$  - associated Single Top Quark Production. Авторы: Баскаков А.В., Боос Э.Э., Буничев В.Е., Дудко Л.В., Волков П.В., Перфилов М.А. The XXIV International Workshop High Energy Physics and Quantum Field Theory (QFTHEP'2019), г. Сочи, Россия, 22-29 сентября 2019

(3) SMEFT approach to BSM physics. Автор: Боос Э.Э. INTERNATIONAL BOGOLYUBOV CONFERENCE PROBLEMS OF THEORETICAL AND MATHEMATICAL PHYSICS dedicated to the 110th anniversary of N.N.Bogolyubov's birth, Moscow-Dubna, Russia, Россия, 9-13 сентября 2019

(4) Поиск тёмной материи в процессах с топ-кварком. Автор: Боос Э.Э. ЛБО - 90! Конференция, посвящённая 90-летию со дня рождения Л.Б. Окуня, Федеральное государственное бюджетное учреждение "Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И.Алиханова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт", Россия, 8 июля 2019

(5) Модельно-независимые ограничения на ширину топ-кварка из комбинации резонансных и безрезонансных сечений. Авторы: Баскаков А.В., Боос Э.Э., Дудко Л.В. «Ломоносовские чтения - 2019». Секция «Ядерная физика», Москва, МГУ, Россия, 15-25 апреля 2019

(6) Поиск аномальных связей во взаимодействии топ кварка с  $W$  бозоном и  $b$ -кварком в процессах  $tW$ -ассоциированного рождения одиночных топ-кварков. Авторы: Перфилова М.А., Баскакова А.В., Боос Э.Э., Буничева В.Е., Воротникова Г.А., Дудко Л.В., Волкова П.В. «Ломоносовские чтения - 2019». Секция «Ядерная физика», Москва, МГУ, Россия, 15-25 апреля 2019

(7) Поиск нейтральных токов меняющих аромат кварков в событиях одиночного рождения топ кварка в эксперименте CMS. Авторы: Воротников Г.А., Баскаков А.В., Боос Э.Э., Буничев В.Е., Дудко Л.В., Мандрик П.С., Перфилов М.А., Попов А.А., Слабоспитский С.Р., Сквонпек К., Чернодед А. «Ломоносовские чтения - 2019». Секция «Ядерная физика», Москва, МГУ, Россия, 15-25 апреля 2019

(8) Специфический сценарий МССМ. Авторы: Дубинин М.Н., Федотова Е.Ю. «Ломоносовские чтения - 2019». Секция «Ядерная физика», Москва, МГУ, Россия, 15-25 апреля 2019

#### 4.4 План работ на 2020 г.

В 2020 году мы планируем исследовать процессы рождения радиона, гипотетической частицы, возникающей в моделях с дополнительными измерениями пространства-времени, на будущем коллайдере ILC. Исследования будут основываться на результатах для LHC. Мы исследуем сценарий, в котором радион распадается на фермионные и векторные поля тёмной материи и является медиатором (посредником), осуществляющим взаимодействие между полями SM и темной материей. Используя современные данные измерения параметров взаимодействия тёмной материи, мы сделаем оценку возможности наблюдения подобных процессов на ILC а также - оценку точности измерения параметров взаимодействия радиона с полями SM и темной материей при различных проектных значениях энергии и интегральной светимости коллайдера ILC.

Совместно с группой ФИАН мы планируем продолжить работы по детальному моделированию и исследованию свойств процессов с рождением и распадом бозона Хиггса на ILC.

Совместно с группой учёных DESY под руководством профессора Георга Вагляйна мы планируем продолжить оценку теоретических неопределенностей для вычислений наблюдаемых в Хиггсовском секторе различных суперсимметричных расширений SM.

Будет продолжено дальнейшее развитие пакета CompHEP и разработка алгоритмов вычислений в следующем за лидирующем порядке по теории возмущений.

Для выполнения работ 2020 году необходимо 7 KUSD.

#### 4.5 Приложение А

1. Число специалистов, участвующих в работах центра - 5
2. Число молодых (< 35 лет) специалистов, привлеченных в эти работы - 2
3. Число студентов - участников экспериментов - 0
4. Число диссертаций на соискание ученых степеней, защищенных в рамках участия в работах центра -1

Баскаков Алексей Владиславович, Исследование процессов с участием топ-кварка и проявления возможных отклонений от Стандартной Модели. 01.04.16 - Физика атомного ядра и элементарных частиц Шифр диссертационного совета МГУ.01.11, Дата защиты диссертации 17 мая 2019 года

5. Число докладов от имени коллабораций, сделанных российскими учеными – 8.
6. Число публикаций в ведущих научных журналах, содержащих результаты, полученные в рамках участия в работах центра - 3.

## 5 Отчет по эксперименту 8 «Детекторы для ILC»

Представлен отчет по теме: «Подготовка детектора для экспериментов на электрон-позитронном коллайдере ILC». Координатор работ – ведущий научный сотрудник. ФИАН, доктор физ.-мат. наук, А.Г. Друцкой.

В настоящее время ожидается решение японского правительства по строительству линейного  $e^+e^-$  коллайдера ILC в Японии. В марте 2019 года было принято промежуточное решение японского правительства о необходимости более детальной разработки проекта и переговорах с потенциальными странами-участницами об ожидаемом вкладе в проект. Необходимо отметить, что в настоящее время в научном сообществе и руководстве наукой становится очевидным необходимость строительства  $e^+e^-$  коллайдера при высокой энергии столкновений. Наиболее вероятно ожидается строительство линейного  $e^+e^-$  коллайдера (проекты ILC, CLIC), но как альтернатива рассматриваются также проекты циклических  $e^+e^-$  коллайдеров (СерС, FCC-ee) при энергиях в несколько сотен ГэВ. Следует отметить, что как разработка детекторных технологий, так и развитие физической программы исследований в существенной степени совпадает для всех этих  $e^+e^-$  коллайдеров и, соответственно, проводимые исследования в этих областях будут использованы в любом из этих проектов в случае принятия положительного решения о строительстве.

В 2019 году группа сотрудников ФИАН и аспирантов МИФИ продолжила своё участие в работах по подготовке эксперимента ILD на будущем линейном коллайдере ILC. Сотрудники группы принимали участие в тестовых испытаниях прототипа адронного калориметра детектора ILD и последующей компьютерной обработке результатов этих испытаний. С целью развития физической программы исследований нашей группой моделировались и разрабатывались новые методы измерения распадов бозона Хиггса и изучались алгоритмы реконструкции струй на детекторе ILD.

### 5.1 Введение

Линейный  $e^+e^-$  коллайдер (ILC) – это мегапроект, который должен стать следующим по величине проектом после LHC в области физики высоких энергий. Несколько лет назад Япония предложила построить линейный коллайдер на своей территории в окрестности города Китаками на севере основного острова Хонсю. Окончательное решение по проекту в настоящее время ещё не принято. В 2017 году было предложено вести строительство поэтапно. По предложению физического сообщества Японии, на первом этапе было решено ограничиться полной энергией столкновения 250 ГэВ в системе центра масс. Это позволит снизить первоначальную стоимость проекта на 30%. Однако на инженерном уровне предлагается сохранить возможность в дальнейшем увеличить длину коллайдера и, соответственно, увеличить энергию в системе центра масс до 1000 ГэВ.

В настоящее время проводится интенсивная работа по оптимизации детектора ILD, в которой активное участие принимает наша группа. За счет получаемого финансирования наша группа участвует в оптимизации адронного калориметра, который является частью детектора ILD. Совместно с коллегами из ДФЗИ мы участвуем в разработке и тестовых испытаниях прототипа адронного калориметра, а также в обработке данных, полученных в тестовых испытаниях. Наша группа принимает активное участие в работе коллаборации CALICE по созданию нового поколения калориметров с высокой сегментацией, в том числе со считыванием сигнала из сцинтиллятора с помощью миниатюрных фотодетекторов

кремниевых фотоумножителей. Деятельность группы в рамках коллаборации включает разные направления: разработку и тестирование технологии, участие в создании и испытаниях действующих прототипов, разработку методик и обработку экспериментальных данных. Последний вариант прототипа адронного калориметра был собран на основе изготовленных в России сцинтилляционных элементов и в течение двух лет проходил испытания в разных режимах на тестовых пучках частиц разных типов и энергий. В 2019 году была продолжена обработка экспериментальных данных, полученных при тестовых испытаниях этого калориметра. Надо отметить, что конструкции калориметров на основе технологий, предложенных и апробированных коллаборацией CALICE, приняты в качестве основного варианта для создания новых детекторов в экспериментах CMS и DUNE. Вообще говоря, развитие технологий сцинтилляционных счётчиков со считыванием на SiPM представляет самостоятельный интерес, поскольку может быть использовано в различных приложениях для диагностики в ядерной медицине.

Кроме того, наша группа занимается развитием программы физических исследований, планируемых на будущем линейном коллайдере. Одним из направлений поиска Новой Физики на линейном коллайдере является измерение ширины бозона Хиггса. В нашей группе разрабатывается новый метод измерения ширины, хорошо адаптированный к энергии в системе центра масс 250 ГэВ. Также ведутся работы по оптимизации методов реконструкции струй при низких нагрузках, ожидаемых на ILC.

## 5.2 Анализ данных с прототипа адронного калориметра ILD

В рамках коллаборации CALICE группа ФИАН участвует в тестировании нового технологического прототипа адронного калориметра для детектора ILD. Этот прототип был собран из сцинтилляционных пластин, изготовленных на российском предприятии методом литья под давлением. Сотрудники лаборатории сыграли ведущую роль в разработке принципиальной конструкции калориметра как для первого прототипа, так и для текущего варианта, проходящего испытания в настоящее время. Сотрудники группы ФИАН также принимали участие в испытаниях калориметра на тестовых пучках, активно участвуют в обработке экспериментальных данных и разработке методов анализа.

Новый технологический прототип сцинтилляционного адронного калориметра детектора ILD собран из сцинтилляционных ячеек размером  $30 \times 30 \times 3 \text{ мм}^3$  с лункой сферической формы диаметром 7 мм и глубиной 1.6 мм в центре большой плоскости. Над центром лунки расположен кремниевый фотоумножитель, который регистрирует световой сигнал, создаваемый частицей при прохождении через сцинтиллятор. При этом свет собирается прямо на фотодетектор без спектросмещающего волокна. Измерения характеристик отдельных ячеек такого типа с прямым считыванием, выполненные ранее в том числе и нашей группой, показали, что такая геометрия с лункой обеспечивает однородность отклика ячейки на уровне лучше 90%, что вполне достаточно, для того чтобы исключить ее влияние на разрешение адронного калориметра. Кроме технологии считывания и геометрии ячейки, важное отличие прототипа нового поколения от предыдущего физического прототипа состоит также в том, что платы электроники находятся непосредственно за каждым активным слоем, как и планируется в полномасштабном детекторе.

Испытания прототипа проводились в пучках одиночных мюонов, электронов и адронов разных энергий от ускорителя SPS в научном центре ЦЕРН. При этом, кроме

стандартного режима непрерывного считывания сигнала был также опробован так называемый режим импульсного включения (PP — Power Pulsing mode). Такой режим означает временное отключение питания детектора и переход в режим ожидания в перерывах между столкновениями пучков в линейном коллайдере, для которого разрабатывается детектор ILD. В предполагаемом режиме работы линейного коллайдера цикл составит 200 мс, из которых время столкновения пучков будет занимать менее 1 мс, т. е. детектор будет находиться в режиме ожидания 99% времени. Выключение части электроники в перерывах между столкновениями позволит значительно сэкономить энергию и снизить нагрев (а, следовательно, и затраты на охлаждение) электроники детектора. Одной из задач тестовых испытаний прототипа адронного калориметра была также проверка его работы в режиме с импульсным включением и сравнение результатов с результатами работы в режиме с постоянно включенной электроникой. В этих двух режимах работы были набраны данные при нескольких энергиях отрицательных пионов. В данном исследовании было проведено сравнение характеристик ливней, инициированных пионами с энергиями 10 ГэВ, 20 ГэВ, 40 ГэВ и 80 ГэВ.

В калориметре основная измеряемая величина — это энергия частицы. Полная энергия вычисляется как сумма сигналов, превышающих определённый порог, по всем ячейкам кластера, соответствующего адронному ливню. Для экспериментов на тестовых пучках с одиночными частицами кластеризация не проводится, а просто вычисляется сумма сигналов выше порога во всех ячейках калориметра. Сигнал в ячейке калориметра измеряется в единицах MIP (Minimum Ionizing Particle), т. е. в единицах, соответствующих отклику при прохождении одной минимально ионизирующей частицы. Сигнал, полученный от минимально ионизирующей частицы, используется, в том числе и для выравнивания отклика отдельных ячеек калориметра, т. е. для их интеркалибровки. Поскольку в данном исследовании проводилось сравнение разных режимов работы, то переход к абсолютной шкале с помощью калибровочных коэффициентов не требовался. Кроме того, в ходе анализа была предварительно выполнена идентификация типа частиц, поскольку в пучках одиночных пионов есть обычно примесь мюонов и электронов. Предварительное исследование с помощью моделирования показало, что доля неправильно идентифицированных пионов (примесь мюонов и электронов в отобранных событиях) не превышает 5% процентов в рассматриваемом диапазоне энергий.

На *Рис. 5.1* показаны распределения суммарной измеренной энергии одиночных отрицательных пионов с разной начальной энергией в двух режимах работы: в стандартном режиме с постоянно включенной электроникой и в режиме с импульсным включением электроники считывания.

Видно, что энергетические распределения для разных режимов находятся в хорошем согласии друг с другом для всех рассмотренных энергий пионов. Можно отметить, что в импульсном режиме распределение для энергии 80 ГэВ чуть уже в области больших измеренных энергий, чем при работе в стандартном режиме. После переключения в режим с импульсным включением электроники было обнаружено, что произошел сдвиг энергетической шкалы примерно на 7%. Для восстановления соответствия между двумя режимами потребовалась перенастройка калибровочных коэффициентов шкалы MIP.

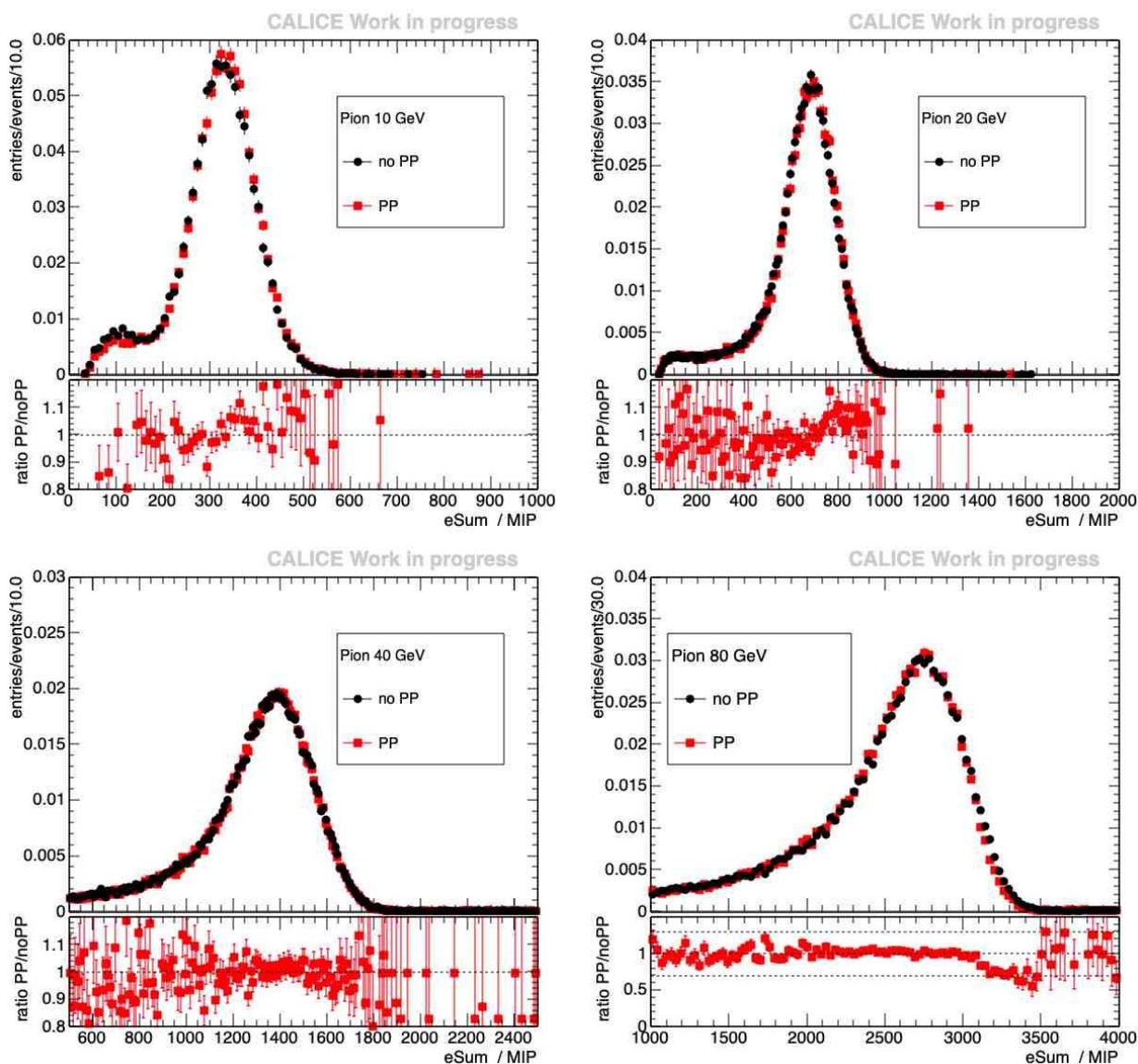


Рис. 5.1 – Энергетическое распределение для отрицательных пионов с энергией 10 ГэВ (слева вверху), 20 ГэВ (справа вверху), 40 ГэВ (слева внизу) и 80 ГэВ (справа внизу) в режиме непрерывной работы электроники («no PP», черные кружки) и в режиме импульсного включения («PP», красные квадраты); под каждым графиком показаны отношения распределений

На Рис. 5.2 показано сравнение двух наборов данных для энергии пионов 80 ГэВ. Оба набора данных получены в импульсном режиме: один сразу после включения этого режима и без корректировки шкалы, а другой непосредственно вслед за первым, но после корректировки шкалы. Для сравнения приведены также энергетические спектры мюонов из этих же наборов данных, которые показывают, что произошел сдвиг именно энергетической шкалы, подобной сдвигу при изменении температуры. Для объяснения причин обнаруженного изменения энергетической шкалы необходимы дополнительные исследования.

Помимо энергетического распределения было проведено также сравнение других измеряемых величин для всех четырех рассматриваемых энергий пионов. Исследование показало, что такие величины, как число активных ячеек в кластере (с сигналом выше порога), радиус ливня, продольный центр тяжести ливня и спектр отклика ячеек, находятся в хорошем согласии в обоих режимах работы

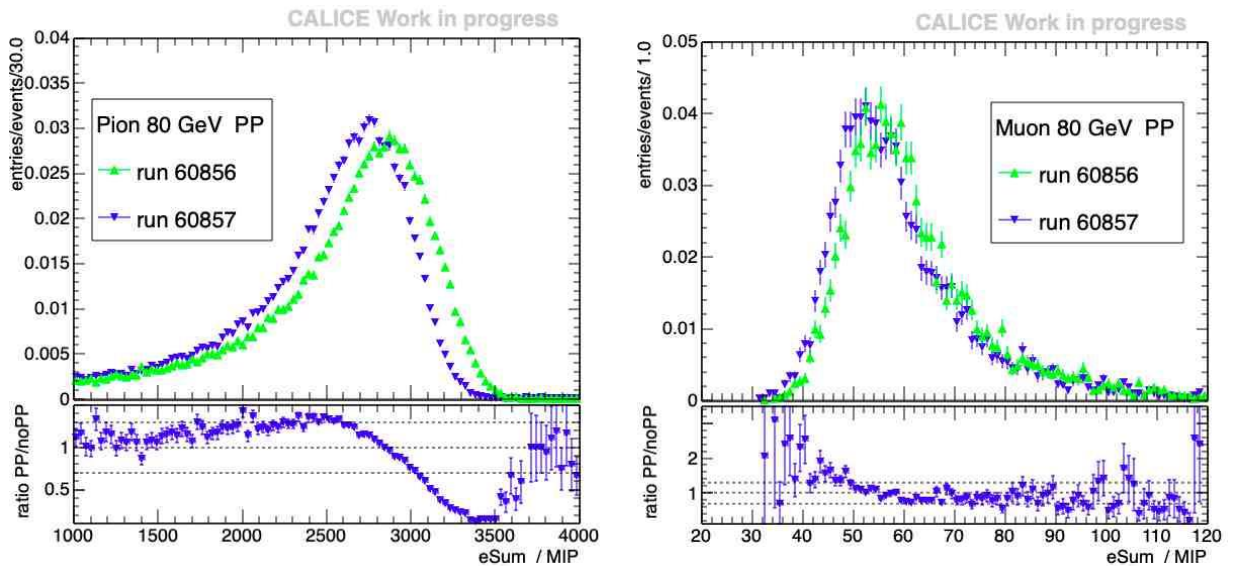


Рис. 5.2 – Энергетическое распределение для отрицательных пионов с энергией 80 ГэВ (слева) и для мюонов из тех же наборов данных (справа) в режиме импульсного включения («PP») до (синие треугольники) и после корректировки энергетической шкалы (зелёные треугольники); под каждым графиком показаны отношения распределений

Одна из характеристик, а именно радиус ливня, играет важную роль при реконструкции событий и идентификации частиц в полномасштабном детекторе, в частности при разделении двух близко расположенных ливней, образованных разными частицами. Радиус ливня вычисляется как средневзвешенное расстояние от центра ячейки до оси ливня по всем ячейкам с сигналом выше порога, при этом в качестве веса берется амплитуда сигнала в ячейке. Надо отметить, что пропорциональное изменение энергетической шкалы не влияет на оценку величины радиуса. На Рис. 5.3 показаны распределения радиусов ливней, инициированных пионами разных энергий в прототипе адронного калориметра ILD, для разных режимов работы детектора. Видно, что распределения радиусов, полученные при разных режимах работы, находятся в хорошем согласии друг с другом, т. е. изменение режима работы электроники считывания не влияет на регистрируемую топологическую структуру ливня.

### 5.3 Физика на ILC

На сегодняшний день Стандартная модель физики элементарных частиц прекрасно согласуется со всеми экспериментальными результатами, полученными на коллайдерах. Последняя частица, предсказанная в рамках этой модели и названная бозоном Хиггса, была найдена на Большом адронном коллайдере (LHC) в июле 2012 года. Однако существует множество указаний на неполноту Стандартной модели. Она описывает только три вида фундаментальных взаимодействий и не включает гравитацию, не объясняет существования именно трех поколений лептонов и кварков, в ней нет объяснения барионной асимметрии, нет явных кандидатов на роль частиц темной материи.

Одним из эффективных способов поиска эффектов за пределами Стандартной модели является изучение распадов бозона Хиггса. Как предполагается, полная энергия на старте эксплуатации коллайдера составит 250 ГэВ. При такой энергии большое сечение будет иметь процесс  $e^+e^- \rightarrow HZ$ , с которым связана данная работа.

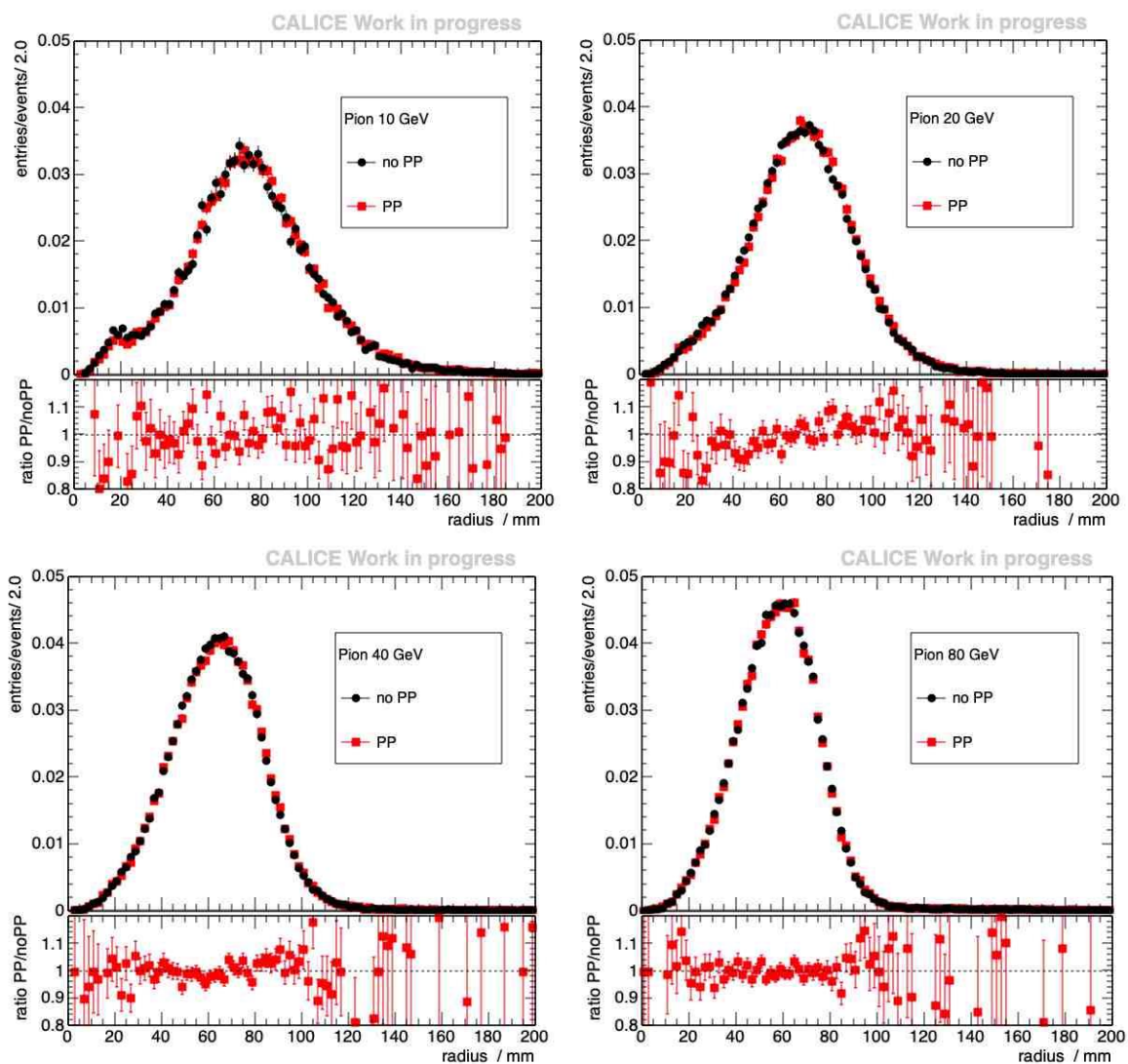


Рис. 5.3 – Распределение измеренного радиуса ливня от отрицательного пиона с энергией 10 ГэВ (слева сверху), 20 ГэВ (справа сверху), 40 ГэВ (слева внизу) и 80 ГэВ (справа внизу) в режиме непрерывной работы электроники («no PP», черные кружки) и в режиме импульсного включения («PP», красные квадраты); под каждым графиком показаны отношения распределений

Для данного исследования проводилось детальное моделирование процесса  $e^+e^- \rightarrow HZ$ , с последующими распадами  $H \rightarrow ZZ^*$ ,  $Z \rightarrow jj$ ,  $Z^* \rightarrow \mu^+\mu^- / e^+e^-$ , и подсчет разности масс  $M(jjll) - M(jj) + M(Z)$  в области массы бозона Хиггса. Ширина ожидаемого сигнала будет включать в себя ширину  $Z$ -бозона, что, тем не менее, должно дать узкий пик сигнала в разности масс, соответствующий номинальной массе бозона Хиггса. Исследование данного канала важно для модельно-независимого измерения ширины бозона Хиггса и констант связи бозона Хиггса.

На данный момент выполнен ряд работ по исследованию данного процесса:

- 1) генерация собственного набора данных, реконструкция событий с учетом геометрии детектора;
- 2) отбор реконструированных сигнальных событий из официального набора данных коллаборации ILD;
- 3) отбор изолированных лептонов с помощью процессора *IsolatedLeptonTagging* и реконструкция струй с помощью процессора *JetClustering* для официального и



- собственного наборов данных;
- 4) написание процессоров для моделирования и получения необходимого набора распределений; анализ данных.

С помощью ряда программ, таких как WHIZARD 2.6, DD4hep и Marlin, было сгенерировано и реконструировано по 5000 событий с исследуемой цепочкой процессов: а) с натуральной шириной  $Z$ -бозона; б) с нулевой шириной  $Z$ -бозона, что необходимо для оценки эффективности и разрешения детектора, а так же проверки работы алгоритма в целом. Для генерации были применены следующие параметры: а) поляризация пучков: [ $P_{e^-} = +80\%$ ,  $P_{e^+} = -30\%$ ]; б) процесс ISR не активирован; в) первичный  $Z$ -бозон распадается только в каналы  $\mu\mu/ee$  для простоты на первой стадии исследования.

Официальный набор данных представляет собой несколько файлов, в которых главным процессом является  $e^+e^- \rightarrow ZH$ . Файлы отличаются возможными вариантами распада первичного  $Z$  в различные каналы:  $q\bar{q}$ ,  $n\bar{n}$ ,  $e^+e^-$ ,  $\mu^+\mu^-$ ,  $\tau^+\tau^-$ . Данные файлы были сгенерированы со светимостью  $1 \text{ аб}^{-1}$  для поляризаций eRpL [ $P_{e^-} = 100\%$ ,  $P_{e^+} = 100\%$ ] и eLpR [ $P_{e^-} = 100\%$ ,  $P_{e^+} = 100\%$ ]), процесс ISR был активирован. Из официального набора данных удалось извлечь 349 событий для eRpL и 594 события для eLpR. Однако в дальнейшем, в связи со сложностью применения программ анализа к процессу  $\tau^+\tau^-$ , события с этим каналом были исключены из исследования. Для их включения в анализ требуется доработка. Итого имеется 334 события для eRpL и 569 событий для eLpR, что в сумме дает 903 события.

С помощью процессора IsolatedLeptonTagging были отделены «быстрые» лептоны от остальных частиц в коллекции реконструированных частиц. Данная процедура необходима для последующей корректной работы алгоритма реконструкции струй, который может захватить лептоны. Эффективность данного алгоритма составляет порядка 90%. Кроме того, лептоны могут вылетать за аксептанс детектора и не регистрироваться. Данная особенность также учитывается в моделировании. Как показало исследование, ожидается процент сигнальных событий, в которых зарегистрировано правильное число быстрых лептонов, порядка 65-70%. Выход сигнальных событий для официального набора данных – 620 событий (~68%), для собственного набора данных – 3077 событий (62%). Для реконструкции струй был использован алгоритм Valencia с параметрами  $R = 2.0$ ,  $\beta = 1.9$ . Данный алгоритм считается наиболее точным для работы на детекторе ILD.

На основе моделирования были построены представляющие интерес распределения, такие как: реконструированные массы двух струй ( $Z$ -бозона), двух лептонов ( $Z^*$ -бозона), 4-частичные массы двух струй и двух лептонов (бозона Хиггса) и, наконец, разница масс  $M(jjll) - M(jj) + M(Z)$  для официального и собственного наборов данных.

Анализируя сгенерированные массы двух струй из официального набора данных, мы пришли к выводу, что в данном наборе содержится дополнительный процесс  $Z^*Z^*$ , что видно по хвосту в распределении по массе двух кварков, который необходимо исключить. Итого осталось 436 сигнальных событий, что, тем не менее, достаточно для данного анализа.

Для анализа собственных событий были построены разницы масс для набора с нулевой шириной  $Z$ -бозона (рис. 4 слева) и со стандартной шириной (рис. 4 справа). Как можно заметить, пик узкий в первом случае, что подтверждает работу алгоритма, во втором случае пик тоже достаточно узкий, однако стоит понимать, что данное распределение содержит в себе натуральную ширину  $Z$ -бозона, то есть в дальнейшем необходимо подгонять распределение свёрткой функций Гаусса и Брейт-Вигнера для достижения более точных результатов.

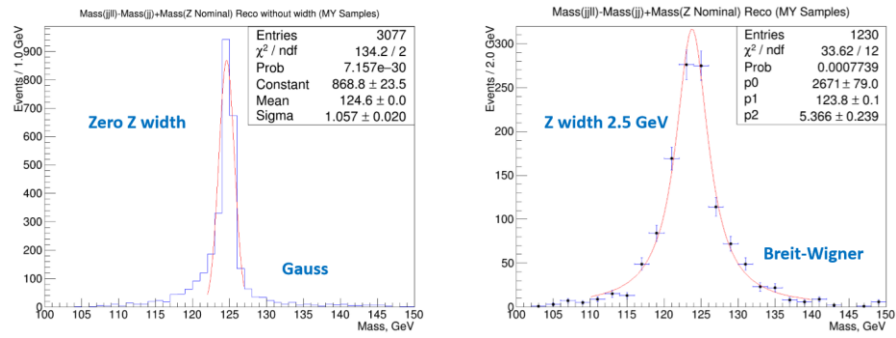


Рис. 5.4 – Распределения по разности масс  $M(jjll) - M(jj) + M(Z)$  для случая моделирования  $Z$ -бозона с нулевой натуральной шириной (слева) и стандартной шириной (справа)

Ниже представлено сравнение разницы масс (Рис. 5.5 слева) и массы  $M(jjll)$  (Рис. 5.5 справа). Как можно видеть, распределение для разницы масс выглядит компактнее, чем распределение прямо вычисленной массы. Используя данный метод, сигнал можно надёжно отделить от фона.

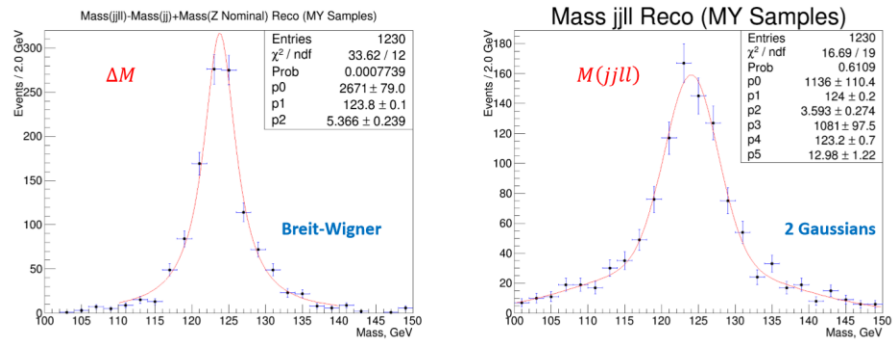


Рис. 5.5 – Распределение по реконструированной разности масс  $M(jjll) - M(jj) + M(Z)$  (слева) и массе  $M(jjll)$  (справа) для случая моделирования  $Z$ -бозона со стандартной шириной

Также важно провести подобный анализ, используя официальный набор данных. Как видно из анализа данных распределение по разнице масс (Рис. 5.6 слева) более симметрично и компактно, в сравнении с прямым измерением массы бозона Хиггса (Рис. 5.6 справа).

Таким образом, можно сделать вывод, что с помощью метода, применённого в данном исследовании, можно с высокой точностью измерить относительную вероятность распада  $H \rightarrow ZZ^*$ . В результате измерения данного процесса можно оценить значение полной ширины бозона Хиггса  $\sim 5\%$  при интегральной светимости  $2 \text{ аб}^{-1}$  и энергии 250 ГэВ.

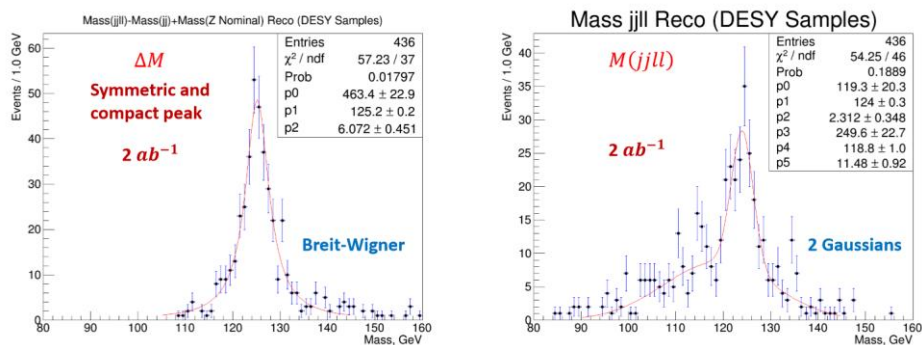


Рис. 5.6 – Распределение по реконструированной разности масс  $M(jjll) - M(jj) + M(Z)$  (слева) и массе  $M(jjll)$  (справа) для официального набора данных из репозитория ДЕЗИ

### 5.3.1 Изучение методов реконструкции адронных струй на детекторе ILD

В настоящее время одним из важнейших классов задач, решаемых в ускорительных экспериментах на этапе реконструкции событий и анализа данных, является поиск адронных струй. В столкновениях на коллайдерах могут рождаться кварки. Однако кварки не могут существовать в свободном состоянии и быстро адронизируются, порождая струи - направленный пучок частиц. Из-за невозможности прямого наблюдения кварков в детекторе получить информацию об исходном кварке можно только косвенно, исследуя струи, ассоциированные с этой частицей.

Линейные электрон-позитронные коллайдеры типа ILC при столкновениях пучков производят значительно меньше низкоэнергичного фона по сравнению с адрон-адронными коллайдерами, такими как LHC. Тем не менее, эти фоновые процессы необходимо оценивать и учитывать, в частности, процесс  $\gamma\gamma \rightarrow hadrons$ , который является одним из основных фоновых процессов при реконструкции струй.

Частицы, образующиеся в таком фоновом процессе, могут войти в состав струи при её реконструкции при помощи алгоритмов реконструкции струй (далее APC), что, в свою очередь, негативным образом сказывается на энергетическом разрешении струй. Стоит отметить, что устойчивость алгоритмов реконструкции к данному фону не одинакова.

Была выполнена работа по определению APC, который является наиболее устойчивым к фону  $\gamma\gamma \rightarrow hadrons$ . Для сравнения были выбраны алгоритмы Kt, Durham (Gen e+e- Kt) и Valencia (VLC). Поиск и реконструкция струй выполнялись на данных, соответствующих процессу  $e+e- \rightarrow HZ \rightarrow 4j$  при  $\sqrt{s} = 500$  ГэВ. В первой части данной работы была проведена оптимизация параметров выбранных APC на основе анализа реконструированных инвариантных масс Z- и H-бозонов, полученных из соответствующих им струй. Распределения по инвариантной массе данных частиц оценивались с помощью статистически устойчивых критериев IQR34 и gms90, а также медианы распределения. Данная процедура была повторена для всех оцениваемых APC при различных параметрах. Минимумы графиков зависимости статистических критериев от параметра R алгоритма позволяют сделать выбор оптимальных параметров для каждого из рассматриваемых APC. Пример зависимостей приведен на Рис. 5.7.

На основании проведенного анализа в качестве оптимальных параметров были выбраны следующие значения R, используемого при реконструкции бозона Хиггса: Kt R = [1.6]; Gen e+e- R = [1.0, 1.1, 1.3]; VLC ( $\gamma = \beta = 1$ ) R = [1.6, 1.7].

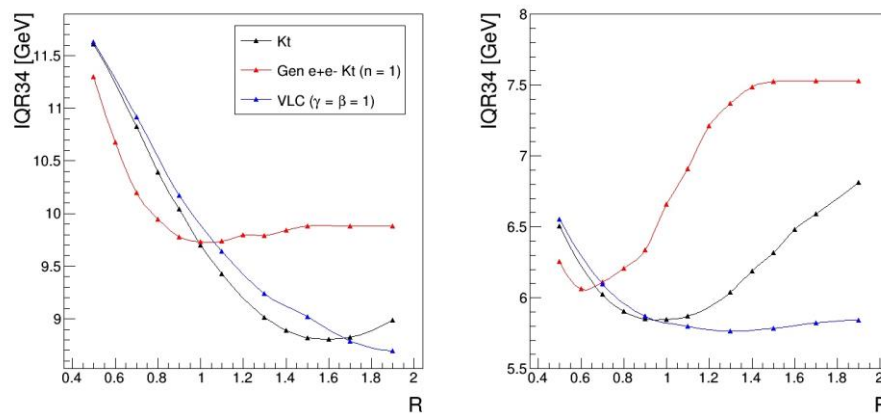


Рис. 5.7 – Зависимость критерия IQR34 от параметра R для трёх различных APC; изображение справа приведено для распределений инвариантной массы бозона Хиггса, слева — для Z-бозона

Для оценки влияния фона  $\gamma\gamma \rightarrow hadrons$  на реконструкцию струй с помощью различных APC проводится сравнение параметров струй, полученных с помощью алгоритмов, и истинных параметров струй, полученных с помощью процессора TrueJet. Для различных APC при выбранных оптимальных параметрах были построены распределения разницы энергии бозонов, восстановленных с помощью APC и собранных из истинных струй, для случаев наличия и отсутствия фона. Такие же распределения были построены для разницы масс. Разрешение полученных распределений оценивается по характеристикам IQR34 и rms90. Отклик оценивается как медиана распределения. Пример таких распределений приведен на Рис. 5.8. Гистограмма слева приведена для случая отсутствия фона, справа - для случая наличия фона.

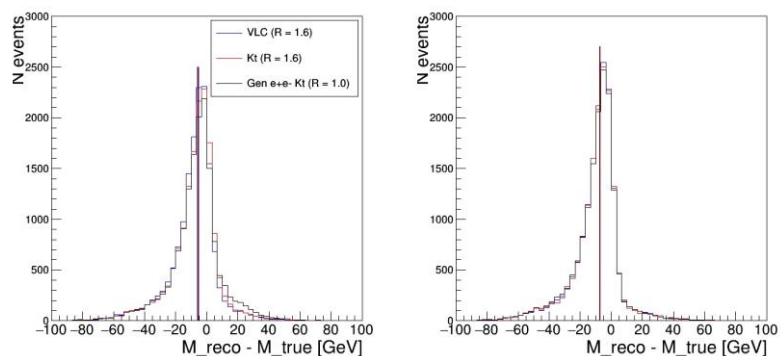


Рис. 5.8 – Разница инвариантных масс бозона Хиггса, реконструированного из струй, полученных с помощью APC и истинных параметров струй; результаты приведены для трёх алгоритмов с оптимальными параметрами (прямыми линиями показаны значения медианы)

В случае реконструкции бозона Хиггса, наличие фона приводит к ухудшению энергетического разрешения алгоритма VLC на 5-7%, продольно инвариантного Kt алгоритма — на 7-9%, обобщенного  $e+e-$  Kt алгоритма — на 14-15%. Массовое разрешение при наличии фона ухудшается на 3-3.5% для VLC, 4% для продольно инвариантного Kt и 10-11% для обобщенного Kt. Можно заключить, что наиболее оптимальным алгоритмом для реконструкции бозона Хиггса в адронных модах распада в процессе  $e+e- \rightarrow HZ$  при  $\sqrt{s} = 500$  ГэВ на ILC является алгоритм VLC с параметрами  $R = 1.6$   $\beta = 1$   $\gamma = 0.5$ .

#### 5.4 Заключение

В 2019 году была продолжена обработка данных, полученных в 2018 году при испытаниях прототипа адронного калориметра детектора ILD. В этой работе принимала активное участие группа ФИАН. В частности, мы провели сравнение основных измеряемых характеристик адронных ливней в двух режимах работы детектора: в стандартном режиме при постоянно включенной электронике и в импульсном режиме с периодическим отключением электроники считывания в процессе набора данных. Показано, что для энергий пионов 10, 20 и 40 ГэВ энергетическое распределение и другие характеристики согласуются в двух режимах работы. Для энергии пионов 80 ГэВ после корректировки энергетической шкалы, проведенной непосредственно в процессе набора данных, было также достигнуто согласие между характеристиками, полученными при разных режимах работы детектора.

Было выполнено моделирование процесса  $e+e- \rightarrow HZ$ ,  $H \rightarrow ZZ^*$ ,  $Z \rightarrow jj$ ,  $Z^* \rightarrow \mu+\mu- / e+e-$  при  $\sqrt{s} = 500$  ГэВ, определена точность измерения соответствующего произведения сечения процесса и относительной вероятности распада бозона Хиггса на интегральной

светимости  $2 \text{ аб}^{-1}$ . С помощью этого метода может быть модельно-независимо измерена ширина бозона Хиггса. Точность измерения ширины была оценена в  $\sim 5\%$  при наборе  $2 \text{ аб}^{-1}$  интегральной светимости при энергии 250 ГэВ.

С помощью моделирования был проведен анализ различных алгоритмов реконструкции струй на детекторе ILD коллайдера ILC. На основе анализа было получено, что наилучшей точностью обладает алгоритм Valencia. Были получены оценки точности измерения параметров струй.

Сотрудники нашей группы представляли полученные результаты и выступали от имени коллаборации на международных конференциях. В 2020 году планируется продолжение этих работ с учётом возможных новых задач, необходимых для разработки адронного калориметра и развития физической программы исследований.

### 5.5 Запрос на 2020 г.

Запрашиваемая на 2020 год сумма по эксперименту 8 на задачи, выполнявшиеся в течение предыдущих несколько лет, составляет \$ 16,000. В то же время предлагается существенно расширить данную заявку. Основанием этого являются работы, выполнявшиеся по данному проекту в течение долгого времени и давшие основу цифровому детектору нового поколения, разработанному по принципу калориметра детектора ILD в рамках коллаборации CALICE. Российские ученые внесли значительный вклад в развитие нового подхода в калориметрии на основе кремниевых фотоумножителей.

В данный момент на основе той же технологии планируется производство калориметра для коллаборации CMS на БАК для создания торцевых калориметров при работе с высокой интенсивностью. Прототип калориметра прошел успешные испытания на тестовых пучках, было продемонстрировано, что в такой структуре можно идентифицировать отдельные частицы в струе и добиться высокой точности восстановления энергии. Российские ученые внесли важный вклад в разработку новых методов реконструкции энергии, методов калибровки и тестирования элементов.

Производство части сцинтилляторов планируется осуществить в России. Одним из трех центров сборки и тестирования данного детектора выбран ДЕЗИ, в тесном сотрудничестве с которым проводились работы российскими специалистами по проекту 8. Поскольку российские специалисты имеют необходимый опыт и знания, ДЕЗИ выразил заинтересованность к совместным работам с Россией по созданию этого детектора. Данный интерес сформулирован в письме научного директора ДЕЗИ проф. И. Мниха в адрес зам. министра науки и высшего образования Г.В. Трубникова.

С российской стороны в проекте заинтересованы сотрудники ФИАН, МГУ, МИФИ и МФТИ. Данные работы позволят молодым российским ученым, аспирантам и студентам пройти настоящую детекторную школу и принять непосредственное участие в создании установки нового поколения.

Требуемое финансирование предполагает командирование в Германию (в ДЕЗИ) в течение следующих пяти лет в следующем объеме: 2020 г. – 12 человеко-месяцев, с 2021 по 2023 г – по 17 человеко-месяцев, 2024 г. – 6 человеко-месяцев.

Подробно обоснование и запрос на проведение этих работ изложен в письме директора ФИАН Н.Н. Колачевского № 11220-9311-207МН от 04.12.2019 г.

Таким образом, запрос на 2020 г. по данному направлению составляет 48 тыс. долларов США, а общий запрос на 2020 год по проекту – 64 тыс. долларов США,

## 5.6 Приложение А

Число специалистов, участвовавших в работах центра по тематике в 2019 г. ИЛС: участвовали в работе всего – 7, участвовали в работе за границей – 6.

Число молодых специалистов, привлеченных в эти работы: всего – 4, участвовали в работе за границей – 3.

Число диссертаций на соискание ученых степеней: всего – 0.

Список статей, опубликованных в 2019 г.:

1. А.Г. Друцкой, Эксперименты на линейном коллайдере ИЛС: ожидаемые результаты физических исследований, УФН, **189**, 478–493 (2019).
2. Е.С. Антонов, Первые результаты Монте-Карло моделирования процесса  $e+e- \rightarrow H(ZZ^*), Z \rightarrow jj$  и  $Z^* \rightarrow \mu+\mu-/e+e-$  при энергии 250 ГэВ на ИЛС, "Труды МФТИ", Том 11 №4(44), 47-51, (2019).
3. CALICE Collaboration (V. Bocharnikov, M. Chadeeva, M. Danilov et al.), Characterisation of different stages of hadronic showers using the CALICE Si-W ECAL physics prototype, Nucl.Instrum.Meth. **A937** (2019) 41-52, arXiv:1902.06161.
4. CALICE Collaboration (V. Bocharnikov, M. Chadeeva, M. Danilov et al.) Analysis of Testbeam Data of the Highly Granular RPC-Steel CALICE Digital Hadron Calorimeter and Validation of Geant4 Monte Carlo Models., Nucl.Instrum.Meth. **A939** (2019) 89-105

Список докладов, представленных на конференциях в 2019 г.

1. М. М. Chadeeva, "Pion shower characteristics with and without power pulsing", CALICE collaboration meeting at CERN, 30 Sep – 2 Oct 2019.
2. S. Korpachev, "Impact of detector effects on the response of highly granular ILD hadron calorimeter to single hadrons", Moscow international school of physics, HSE study Center, 20-27 February 2019.
3. С. Кorpачев, "Влияние детекторных эффектов на отклик высокогранулярного адронного калориметра ILD на одиночные адроны", VIII Межинститутская молодежная конференция Физика элементарных частиц и космология 2019, МФТИ, Москва, 11-12 апреля 2019.
4. С. Кorpачев, "Использование технологии нейронных сетей для улучшения разрешения высокогранулярного адронного калориметра", Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике МКТЭФ-2019, ИГЭФ, Москва, 25-28 ноября 2019.
5. А. Drutskoy, "Higgs width measurement using  $H \rightarrow Z^*Z$  decay at ILC", Annual Meeting "Physics at the Terascale", DESY, Hamburg, 25 November 2019.
6. Е. Антонов, "Первые результаты Монте-Карло моделирования процесса  $e+e- \rightarrow H(ZZ^*)$ , где  $Z \rightarrow jj$  и  $Z^* \rightarrow \mu\mu / ee$ , при энергии 250 ГэВ", VIII Межинститутская молодежная конференция Физика элементарных частиц и космология 2019, МФТИ, Москва, 11-12 апреля 2019.

## 6 Отчет по эксперименту 9 «Структура экзотических ядер»

Эксперимент «Структура экзотических ядер» проводится коллаборацией GSI (Дармштадт) – НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ. Координатор эксперимента - доктор физ.-мат. наук Ханзадеев Алексей Викентьевич.

### 6.1 Введение

В 2019 г. завершен теоретический анализ экспериментальных данных по упругому мало-угловому рассеянию протонов на нейтронно-избыточных изотопах углерода  $^{14-17}\text{C}$  и стабильном ядре  $^{12}\text{C}$ . Проведена работа по подготовке статьи по результатам этого анализа. Опубликована статья: “Nuclear-matter distribution in the proton-rich nuclei  $^7\text{Be}$  and  $^8\text{B}$  from intermediate energy proton elastic scattering in inverse kinematics” (Nuclear Physics A 989 (2019))

### 6.2 Описание эксперимента

В эксперименте изучается распределение плотности материи в легких экзотических ядрах методом упругого рассеяния протонов на этих ядрах в инверсной кинематике.

Размеры ядра и его форма принадлежат к числу основных характеристик атомного ядра. Наиболее надёжным способом получения информации о радиальном распределении ядерной материи считается измерение дифференциального сечения упругого рассеяния на исследуемых ядрах протонов промежуточной энергии. При этих энергиях хорошо работает теория многократного рассеяния Глаубера, которая достаточно точно описывает процесс упругого рассеяния и позволяет вполне однозначно связать экспериментально измеренное сечение с распределением плотности ядерной материи. С помощью этого метода упругого рассеяния протонов были получены распределения плотности материи для всех стабильных ядер. В связи с прогрессом, достигнутым в 80-е годы XX века в технике получения пучков короткоживущих радиоактивных ядер, в ПИЯФ было предложено распространить метод протонного рассеяния для исследования экзотических ядер, измеряя дифференциальные сечения рассеяния в инверсной кинематике. То есть, налетающий пучок экзотических ядер рассеивается на водородной мишени, в качестве которой было предложено использовать созданный в ПИЯФ ионизационный спектрометр ИКАР. Предложение о проведении такого эксперимента было с высоким приоритетом принято к постановке в Исследовательском центре тяжёлых ионов GSI (Дармштадт).

Первичные пучки ионов ( $^{18}\text{O}$  или  $^{22}\text{Ne}$ ), разгоняемые на синхротроне тяжёлых ионов, фокусировались на бериллиевой мишени толщиной  $8 \text{ г/см}^2$ , расположенной на входе фрагмент-сепаратора. Получаемые при фрагментации первичного пучка требуемые ионы выделялись фрагмент-сепаратором согласно их магнитной жёсткости. При необходимости разделительная способность фрагмент-сепаратора могла быть усилена введением в центральной дисперсионной фокальной плоскости (S2 на *Рис. 6.1*) дополнительного ахроматического алюминиевого поглотителя нужной толщины.

В результате были получены чистые пучки вторичных ионов, в которых уровень примесей не превышал нескольких процентов (см. *Рис. 6.2*). Энергия вторичных пучков в центре мишени составляла около  $700 \text{ МэВ/нуклон}$ , разброс энергий пучковых частиц равнялся  $1,3 \%$  (сигма), а угловая расходимость не превышала  $5 \text{ мрад}$ . Интенсивность пучков составляла  $1-3 \cdot 10^3$ , величина коэффициента заполнения – от  $25 \%$  до  $50 \%$ .

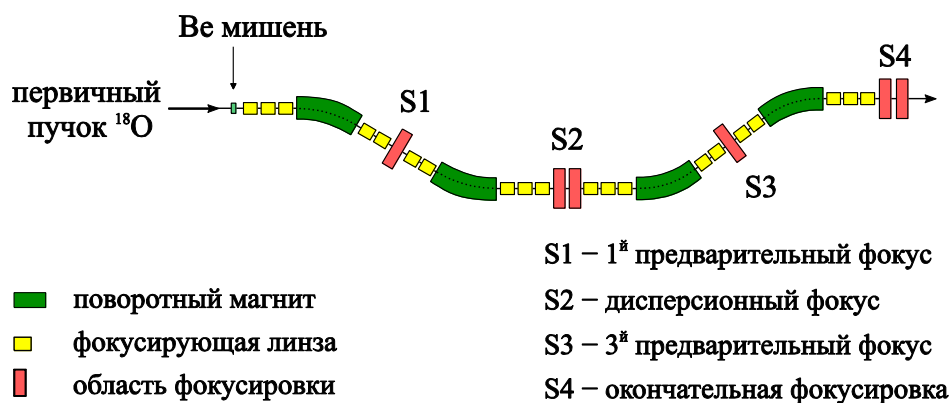


Рис. 6.1 – Схема фрагмент-сепаратора; в фокальных плоскостях находятся коллиматоры с окнами изменяющихся размеров и вспомогательные детекторы

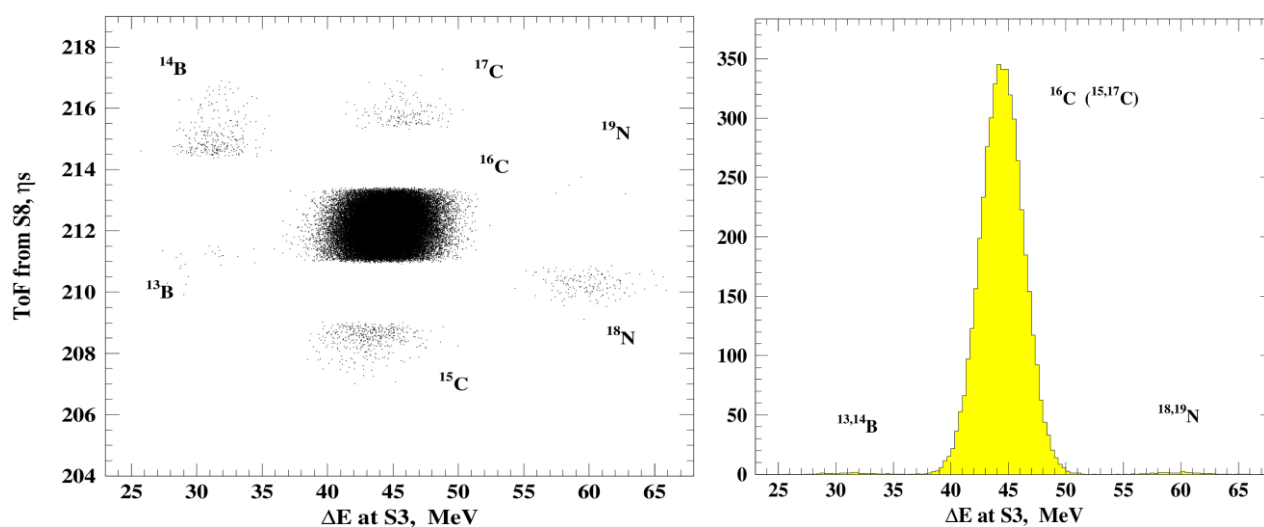


Рис. 6.2 – Уровень примесей во вторичном пучке  $^{16}\text{C}$  (нежелательные примеси легко отделяются)

Экспериментальная установка показана на *Рис. 6.3*. Основной компонент установки – ионизационная камера ИКАР, наполненная водородом при высоком давлении. Наполненная водородом ионизационная камера ИКАР служила газовой мишенью и детектором протонов отдачи. Четыре пропорциональные камеры (PC1-PC4) использовались для измерения угла рассеяния налетающего ядра, а набор сцинтилляционных счётчиков S1-S3 и VETO – для формирования триггерного сигнала и идентификации пучковой частицы. Большой дипольный магнит ALADIN вместе с дрейфовой камерой (DC) и расположенной за ней стенкой сцинтилляционных счётчиков использовался для выделения упругого канала. Налетающее ядро взаимодействует с протоном внутри ионизационной камеры, которая служит одновременно мишенью и детектором протона отдачи. Протон отдачи регистрируется в совпадении с рассеянным ядром, угол рассеяния которого  $\Theta_S$  измеряется трековым детектором, состоящим из двух пар многопроволочных пропорциональных камер (PC1-PC2 и PC3-PC4), расположенных до и после ИКАРа.



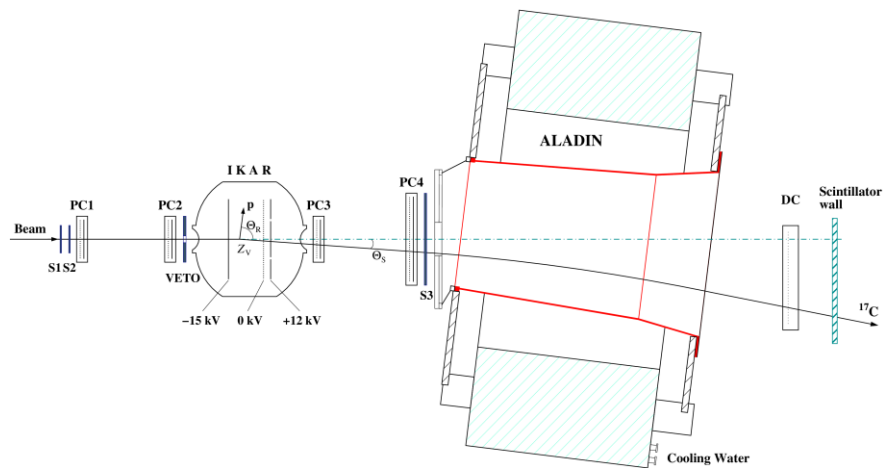


Рис. 6.3 – Схема экспериментальной установки для измерения сечения упругого протон-ядерного рассеяния в инверсной кинематике

Набор сцинтилляционных счётчиков S1, S2 и S3, включённых на совпадение, использовался для формирования быстрого триггера, а также для идентификации заряда налетающего ядра путём измерения  $\Delta E$ . Сцинтилляционный счётчик VETO с круговым отверстием диаметром 2 см, центр которого совпадает с осью пучка, был установлен непосредственно перед входным окном ИКАРа и включён в триггер на антисовпадение для того, чтобы избавиться от пучкового гало. Кроме того, измерялось время появления сигнала с дополнительного сцинтилляционного счётчика, установленного на линии пучка в области дисперсионного фокуса фрагмент-сепаратора (S2 на рис. 1; при этом путь, проходимый пучковой частицей от этого счётчика до триггерного счётчика S1 составляет несколько десятков метров). Это время пролёта вместе с  $\Delta E$  позволяет надёжно отделиться от ядер примесей, что демонстрирует Рис. 6.2.

Детектор ИКАР состоит из шести идентичных модулей (на схеме показан только один), расположенных в ряд вдоль оси камеры, совпадающей с направлением пучка и помещённых в корпус из нержавеющей стали. Каждый модуль представляет собой аксиально-симметричную ионизационную камеру, обладающей равным  $2\pi$  аксептансом по азимутальному углу для регистрации протонов отдачи. Электроды камеры – катод, сетка и анод – параллельны друг другу и перпендикулярны направлению пучка. Для уменьшения многократного кулоновского рассеяния налетающей частицы входное и выходное окна ИКАРа выполнены из бериллия толщиной 0,5 мм. Окна имеют форму полусферы выпуклостью внутрь, что позволяет выдерживать высокое давление внутри детектора. С той же целью уменьшения количества вещества на пути пучковой частицы центральные части всех электродов выполнены из тонкой алюминиевой фольги толщиной 10 мкм; общая толщина алюминия составляет 140 мкм. Давление внутри ИКАРа составляло 10 атм и контролировалось двумя манометрами с точностью 0,16 %. Одновременно измерялась температура.

Один из шести модулей вместе с типичным событием рассеяния показан на Рис. 6.4.  $T_R$  – энергия протона отдачи,  $z$  – расстояние от точки взаимодействия  $Z_V$  до сетки, а  $\Theta_R$  и  $\Theta_S$  – углы рассеяния протона и налетающего ядра соответственно. Указаны расстояния между электродами и величина поданного напряжения.

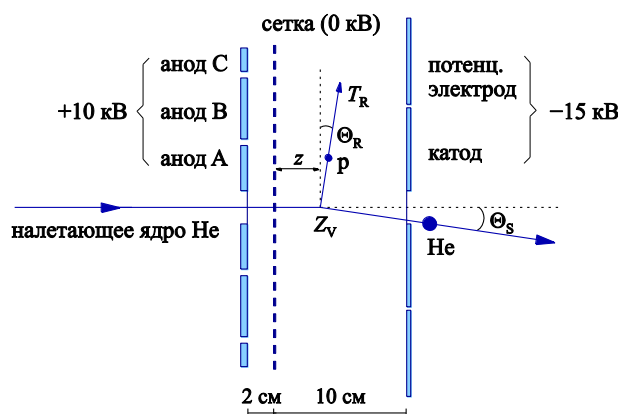


Рис. 6.4 – Схематическое изображение (не в масштабе) одного из шести модулей ИКАРа вместе с типичным событием рассеяния налетающего ядра He на протоне в рабочем объёме

Каждый анод разделён на три части: центральный анод А и кольцевые аноды В и С. Сигналы снимаются с анодов А и В, а внешний кольцевой анод С используется для выравнивания электрического поля. С аналогичной целью улучшения линейности поля в промежутке сетка-катод используется кольцевой (потенциальный) электрод катода. Всего в ИКАРе имеется тринадцать сигнальных электродов – шесть центральных анодов А (по числу модулей), три кольцевых анода В (которые являются общими для соседних модулей) и четыре катода (два из которых тоже являются общими для соседних модулей).

Налетающее ядро рассеивается на малый угол ( $\Theta_S < 30$  мрад), при этом трек протона отдачи почти параллелен плоскости электродов. Протон отдачи тормозится, теряя энергию на ионизацию и возбуждение молекул водорода. Образовавшиеся в результате ионизации электроны (число которых пропорционально оставленной протоном энергии) дрейфуют по направлению к аноду; при этом дрейфом положительных ионов можно пренебречь, так как их подвижность на три порядка меньше подвижности электронов. Это движение зарядов вызывает ток в катодной цепи. Сигнал на аноде, вследствие экранирующего эффекта сетки, возникает лишь в момент прохождения электронов сквозь сетку. Сигналы, наведённые дрейфующими электронами на анодах, поступают на соответствующие входы чувствительных к току предусилителей с низким уровнем шума, затем проходят через усилители-формирователи и регистрируются параллельными аналого-цифровыми преобразователями (FADC, частота 25 МГц), каждый из которых связан со своим сигнальным электродом.

Анализ этих сигналов позволяет определить кинетическую энергию протона отдачи  $T_R$  (или её часть в том случае, когда энергия протона достаточно велика, и он покидает пределы рабочего объёма), а также угол вылета протона  $\Theta_R$  и координату точки взаимодействия  $Z_V$  вдоль оси камеры.

Для калибровки энергетической шкалы использовались  $\alpha$ -источники  $^{241}\text{Am}$  слабой активности, нанесённые на катоды напротив каждого из анодов. Кроме того, в двух модулях такие же источники были нанесены на сетку, что позволяло непрерывно контролировать чистоту газа. Как известно, ионизационные камеры с водородным наполнением крайне чувствительны к электроотрицательным примесям, в первую очередь к кислороду: даже незначительное количество молекул  $\text{O}_2$  на уровне  $\geq 10^{-6}$  приводит к заметным потерям числа дрейфующих электронов вследствие их прилипания к атомам кислорода. В результате уменьшается амплитуда импульса, причём величина этого уменьшения зависит от положения

точки взаимодействия  $Z_V$ . С целью уменьшения эффекта прилипания использовался сверхчистый водород (с уровнем примесей  $<10^{-6}$ ), а перед наполнением ИКАР в течение недели прогревался и откачивался ультравакуумным насосом. Сравнение собираемых зарядов от катодного и сеточного  $\alpha$ -источников даёт возможность определить величину прилипания, при анализе экспериментальных данных вводилась соответствующая поправка.

Точность измерения угла рассеяния налетающего ядра определяется главным образом вкладом многократного кулоновского рассеяния, так как этот вклад превышает собственное угловое разрешение трекового детектора. Для уменьшения количества вещества на пути пучковой частицы между камерами каждой пары (PC1-PC2 и PC3-PC4) соосно пучку были установлены пластиковые трубы большого диаметра, заполненные гелием при атмосферном давлении и по торцам закрытые тонкой плёнкой из майлара. Максимальный вклад многократного кулоновского рассеяния составил  $\approx 1,0$  мрад (для ядра  $^8\text{B}$ ), минимальный –  $0,4$  мрад для  $^8\text{He}$ .

Для отделения событий упругого рассеяния от событий развала налетающего ядра при взаимодействии с веществом измерялась  $x$ -координата рассеянного ядра после прохождения магнитного поля ( $B_{\text{max}} = 1,5$  Т). Координата измерялась с помощью дрейфовой камеры, а расположенная за нею стенка сцинтилляционных счетчиков использовалась для зарядовой идентификации частицы путём измерения  $\Delta E$ . Качество выделения упругого канала показано на *Рис. 6.5*. Параллельно основной области сосредоточения ядер  $^{17}\text{C}$  видны изотопы  $^{16}\text{C}$ ,  $^{15}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$  и  $^{13}\text{C}$ .

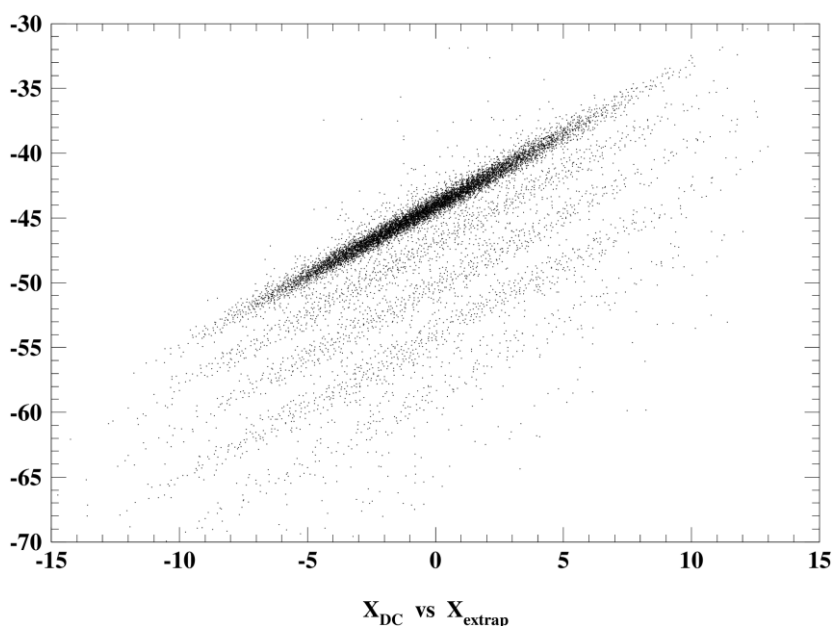


Рис. 6.5 – Корреляция между  $x$ -координатой, измеренной дрейфовой камерой и  $x$ -координатой, полученной путём экстраполяции выходного трека для рассеяния  $p\text{-}^{17}\text{C}$

На *Рис. 6.6* показана корреляция между оставленной в ИКАРе энергией протона отдачи и углом рассеяния налетающего ядра для  $^8\text{B}$ . Эта корреляция использовалась для построения дифференциального сечения рассеяния.

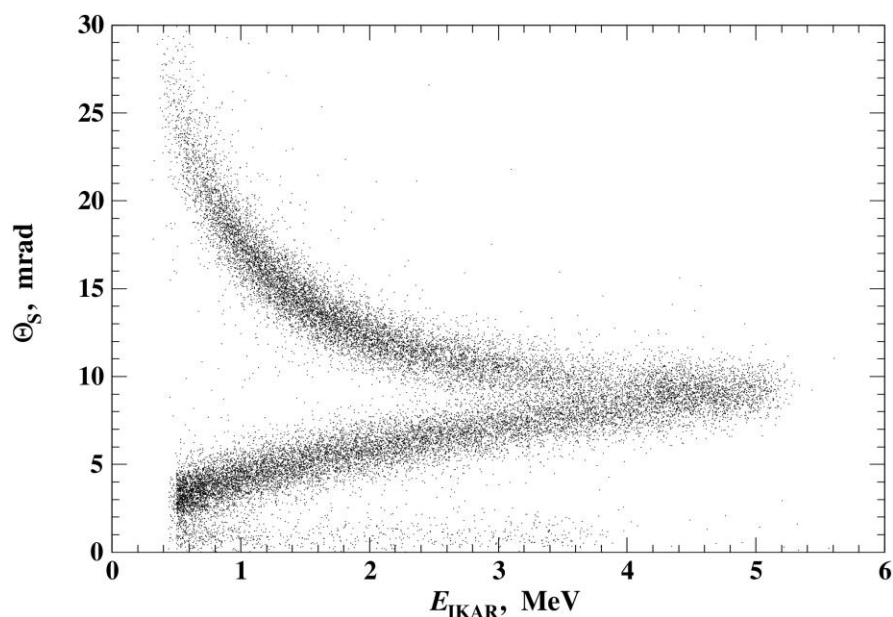


Рис. 6.6 – Корреляция между углом рассеяния ядра  ${}^8\text{B}$  и энергией протона отдачи, измеренной в ИКАРе

### 6.3 Основные результаты

В ряде экспериментов по исследованию легких экзотических ядер, выполненных на пучках радиоактивных ядер ускорителя GSI, с точностью абсолютной нормировки 2-3 % были измерены дифференциальные сечения упругого рассеяния протонов на стабильных ядрах  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^{12}\text{C}$ , на ядрах с избытком нейтронов –  ${}^{6,8}\text{He}$ ,  ${}^{8,9,11}\text{Li}$ ,  ${}^{12,14}\text{Be}$ ,  ${}^{14,15,16,17}\text{C}$  и ядрах с избытком протонов –  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^8\text{B}$  при энергии 0,7 ГэВ/нуклон в диапазоне переданных импульсов  $0,002 \leq |t| \leq 0,05$  (ГэВ/с)<sup>2</sup>. Из анализа измеренных сечений были определены параметры распределения ядерной материи для этих ядер. Были обнаружены новые свойства ядерной материи у нейтронно-избыточных ядер – существование нейтронной шубы и гало, а в протонно-избыточном ядре  ${}^8\text{B}$  – наличие протонного гало.

На всех этапах выполнения программы исследований экзотических ядер роль российской группы являлась определяющей:

- подготовлено и выдвинуто предложение о проведении экспериментов,
- главная часть экспериментальной установки – наполненная водородом под высоким давлением ионизационная камера ИКАР, являющаяся активной мишенью – была разработана и изготовлена в ПИЯФ,
- все трековые детекторы также были произведены в ПИЯФ,
- алгоритмом обработки экспериментальных данных был разработан в ПИЯФ, анализ проводится под руководством ученых ПИЯФ.

### 6.4 Основные направления деятельности в 2020 г

В 2020 году будут опубликованы результаты эксперимента и теоретического анализа измеренных дифференциальных сечений упругого протонного рассеяния на изотопах углерода.

В 2020 году будут опубликованы результаты эксперимента и теоретического анализа измеренных дифференциальных сечений упругого протонного рассеяния на изотопах

углерода. На выполнение планов по теме «Экзотические ядра» в 2020 г. (а именно, для обсуждения, совместного написания и согласования статей) потребуется 1 чел./месяц пребывания в GSI (~4500 долларов США).

## 6.5 Приложение А

В 2019 году по эксперименту «Экзотические ядра» состоялся 1 визит в GSI сотрудника ПИЯФ А.В. Добровольского сроком на 1 месяц. Израсходовано 4144 долларов США. В этот период была завершена консервация ионизационной камеры ИКАР, обсуждены результаты теоретического анализа данных, полученных для серии изотопов углерода, и обсужден план статьи по результатам этого анализа.

1. Число специалистов, участвующих в работах центра в 2019 г.: В 2019 г. в GSI был командирован 1 специалиста на один месяц. Всего в ПИЯФ этой тематикой занимаются 5 человек.

2. Число молодых специалистов, привлеченных в эти работы: в эти работы вовлечен 1 специалист в возрасте до 35 лет.

3. Число студентов – участников эксперимента: НЕТ

4. Число диссертаций, защищенных в рамках участия в работах центра: НЕТ

5. Число докладов и публикаций... в 2019 г.: - опубликована 1 статья: “Nuclear-matter distribution in the proton-rich nuclei  ${}^7\text{Be}$  and  ${}^8\text{B}$  from intermediate energy proton elastic scattering in inverse kinematics” (Nuclear Physics A 989 (2019) 40–58).

## 7 Отчет по эксперименту 10 SHIPTRAP

В данной главе представлен отчет по исследованию фундаментальных свойств материи: «Прецизионные измерения масс ионными ловушками Пеннинга» (Accurate Mass Measurements with Penning Traps). Краткое наименование проекта SHIPTRAP. Координатор работы зав. лабораторией Физики Экзотических Ядер НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, доктор физ.- мат. наук, профессор Новиков Юрий Николаевич.

### 7.1 Введение

Ионные ловушки начали занимать видное место в многофункциональных исследованиях фундаментальных свойств материи. Они активно используются для решения задач, связанных с изучением свойств экзотических радиоактивных ядер с сильно асимметричным составом протонов и нейтронов. В мире имеется всего лишь несколько ионных ловушек, предназначенных для прямых измерений масс атомов. В Германии это установки SHIPTRAP на ускорителе в ГСИ (Дармштадт), TRIGATRAP на реакторе в Майнце и запущенная недавно система PENTATRAP в институте М. Планка по ядерной физике в Хайдельберге.

Группа физиков лаборатории Физики Экзотических Ядер (ЛФЭЯ) Петербургского Института Ядерной Физики (ПИЯФ)- НИЦ «Курчатовский Институт» входит в коллаборацию зарубежных групп, участвующих в этих трёх немецких проектах, базирующихся на ионных ловушках Пеннинга. Совместные работы по этим программам ведутся на протяжении последних более чем десяти лет. Так как в России пока нет исследовательских ионных ловушек, привлечение Российских учёных к этим работам за рубежом заслуживает поддержки.

Долговременная остановка ускорителей ГСИ, связанная с переходом института в новое качество в рамках комплекса ФАИР, приостановила на какое-то время эксперименты на установке SHIPTRAP. Этот вынужденный перерыв позволил заняться модернизацией самой установки, перенесению ловушки в новое расположение по ходу пучка, а также разработкой её новых компонентов. В то же время, было уделено много внимания развитию самого метода ловушечной масс-спектрометрии созданием установки PENTATRAP, состоящей из пяти последовательно расположенных ионных ловушек, основным предназначением которой было доведение точности измерения масс до ещё больших значений, превосходящих те, что были достигнуты на SHIPTRAP.

Прямые измерения масс нуклидов трансурановых элементов являются основным направлением деятельности SHIPTRAP, учитывающей тот факт, что она является единственной в мире системой, способной это осуществить. В появившейся возможности выхода на пучок ускорителя летом прошлого года были выполнены эксперименты по прямому измерению масс сверхтяжёлых нуклидов (No, Lr и Rf). Эксперимент прошёл весьма удачно, и его описание было дано в отчёте по проекту SHIPTRAP за 2018 г. Однако, в 2019 г. шла кропотливая обработка и анализ данных, приведшие к получению конкретных количественных результатов. Другим направлением были off-line эксперименты на ловушке PENTATRAP, позволившие улучшить точности, полученные ранее на SHIPTRAP, на один порядок величины. Эти достижения представлены в настоящем отчёте.

## 7.2 Установка SHIPTRAP

Составными частями комплекса SHIPTRAP являются криогенная камера торможения, фокусирующая и банчирующая системы, две ионные ловушки Пеннинга, а также пролётная база от ловушки к детектору ионов. Комплекс может использоваться как в режиме “on-line” с селектором скоростей SHIP, с которого поступают продукты реакции синтеза нуклидов, так и в “off-line” режиме с использованием переносных долгоживущих или стабильных нуклидов. Направляемые в ловушку ионы удерживаются в ней сильным магнитным (7 Т) и слабыми электрическими полями в малом объёме (диаметром области менее 100 микрон). Затем ионы подвергаются возбуждению внешним радиочастотным полем и выводятся наружу. В классической схеме регистрации циклотронная частота возбуждённого иона определяется по резонансу в кривой времени пролёта иона к детектору. Эта резонансная частота простым соотношением связана с массой иона. Такая схема определения резонансной частоты используется во всех существующих в мире ловушках Пеннинга, установленных на пучках радиоактивных ядер. Начиная с 2014 г. коллаборацией SHIPTRAP используется концептуально новый метод регистрации ионов с помощью фазового отображения их движения на позиционно-чувствительный детектор (см. предыдущие отчёты по проекту), предложенный и осуществлённый С. Елисеевым в “off-line” режиме работы установки.

## 7.3 Работы на установке SHIPTRAP в 2019 году

### 7.3.1 Исследования ландшафта масс сверхтяжёлых элементов

В 2019 г. была произведена тщательная обработка и анализ полученных данных по прямому измерению масс трансфермиевых элементов, выполненных в прошлом году. Полученные значения масс нуклидов  $^{251-254}\text{No}$ ,  $^{254-256}\text{Lr}$  и  $^{257}\text{Rf}$  позволили по известным цепочкам альфа-распадов воспроизвести часть ландшафта сверхтяжёлых нуклидов вплоть до элемента дармштадтия ( $Z=110$ ). Это привело к возможности определения величин щелей в оболочечной структуре, ответственной за стабилизирующие факторы в сверхтяжёлых элементах. Данные, полученные нами и приведённые на *Рис. 7.1*, показывают выделенность чисел нейтронов  $N=152$  и  $N=162$ , которые характеризуют «квазимагичность» нуклидов с этим числом нейтронов и приводят к выводу об экспериментальной идентификации «малых островов стабильности», возникающих на подступах к предполагаемому острову устойчивости сверхтяжёлых элементов, к достижению которого приложены титанические усилия ЛЯР ОИЯИ (Дубна).

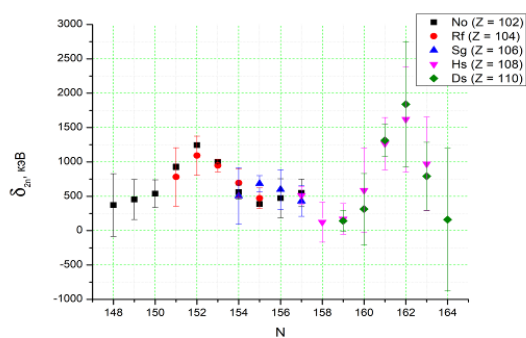


Рис. 7.1 – Результаты исследований нуклидов  $^{251-254}\text{No}$ ,  $^{254-256}\text{Lr}$  и  $^{257}\text{Rf}$

### 7.3.2 Повышение точности измерений масс с использованием запущенной в 2018 году новой пятиловушечной системы PENTATRAP

Ловушка SHIPTRAP, при её монополюсном положении в измерениях масс трансурановых элементов, имеет ряд недостатков, не позволяющих выйти на измерения весьма тонких эффектов, необходимых для решения ряда фундаментальных вопросов современной физики. Одной из этих проблем является изучение свойств нейтрино, которой была посвящена деятельность нашей группы в этом проекте в предыдущие годы (см. отчёты по проекту за 2013-2015 гг.).

В 2018 г. в институте М. Планка в Хайдельберге была запущена новая система PENTATRAP, состоящая из 5 ловушек Пеннинга, в создании которой активно участвовала лаборатория физики экзотических ядер ПИЯФ. Первые стартовые эксперименты показали, что точность прямого измерения масс  $\delta M/M$  составляет величину  $10^{-11}$ , что на два порядка величины улучшает точность, достигнутую на SHIPTRAP и других установках ( $10^{-9}$ ).

Высокозарядные ионы через масс-сепаратор и систему ионно-оптического тракта выводятся в подвал, в специально оборудованный теплоизоляционный бункер, где на антивибрационной платформе установлен магнит масс-спектрометра с пятью ионными ловушками (см. Рис. 7.2).

Масс-спектрометр из пяти ловушек в высокооднородном магнитном поле позволяет проводить синхронное измерение масс неизвестных и калибровочных нуклидов, что способствует существенному подавлению систематических неточностей в определении масс нуклидов.

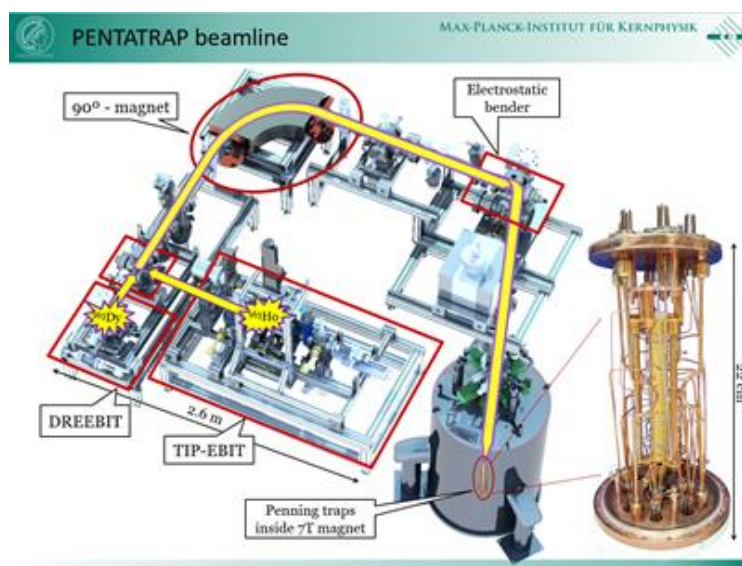


Рис. 7.2 – Схема установки SHIPTRAP

Первые прикладные эксперименты по измерению разницы масс  $^{187}\text{Re}$ - $^{187}\text{Os}$  привели к точности 3 эВ, что закладывает хороший фундамент для определения массы антинейтрино. Дальнейшее уточнение этого значения в полномасштабном эксперименте позволит рассматривать эту пару нуклидов как дополняющую тритиевый эксперимент. Сравнение полученных нами на PENTATRAP значений разности масс с выполненными нами же на установке SHIPTRAP приведено на Рис. 7.3. Они прекрасно совпадают с измерениями энергий распада для  $^{187}\text{Re}$  методами криогенной микрокалориметрии и ещё раз подтверждают возможность определения массы нейтрино с использованием болометров.



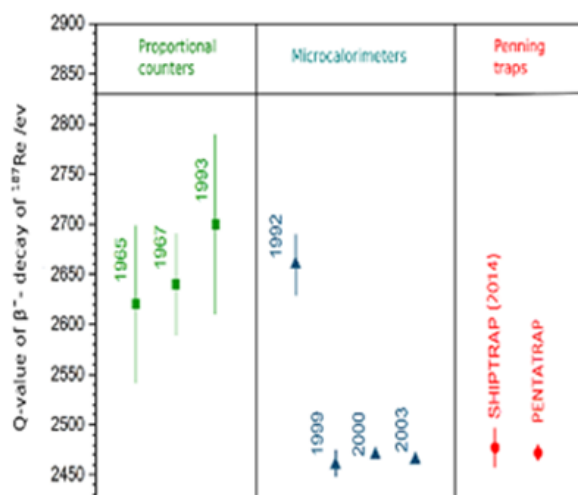


Рис. 7.3 – Сравнение значений разности масс на установках PENTATRAP и SHIPTRAP и других

#### 7.4 Выступления и публикации в 2019 г. по тематике проекта

Выступления – 3:

1) S. Eliseev. “*Penning-trap mass spectrometry and neutrino mass*”, MEDEX- international conference, Prague, 31 May, 2019.

2) S. Eliseev. “*Penning-trap mass spectrometry (PENTATRAP) and neutrino mass (ECHO project)*”, WE-Heraeus seminar “Massive neutrinos”, Bad Honnef, 11 July, 2019.

3) Ю. Нечипоренко. «*Цифровая электроника в исследованиях тяжёлых ядер*». Конференция Open Science, Gatchina, November 13, 2019.

Публикаций и защищенных диссертаций – нет.

#### 7.5 Заключение

Основным результатом в 2019 году было завершение анализа полученной информации в экспериментальном сеансе на пучке с прямыми измерениями масс сверхтяжёлых элементов на установке SHIPTRAP в 2018 г. Полученные данные свидетельствуют о существовании «малых островов стабильности».

В экспериментах на запущенной недавно установке PENTATRAP был получен рекордный результат по точности в масс-спектрометрии. В частности, увеличена на порядок величины по сравнению с нашим предыдущим результатом на SHIPTRAP, точность определения разности масс пары нуклидов рения-осмия с массовым числом  $A = 187$ , достигшая 3 эВ.

#### 7.6 ПРИЛОЖЕНИЕ А

- 1) Число специалистов, участвовавших в проекте в 2018 году, - 6 (4-основных и 2 соисполнителя).
- 2) Число молодых специалистов (моложе 35 лет), привлечённых к работам, - 4. (О.Безроднова, Н. Мартынова, Ю. Нечипоренко, С. Ченмарев).
- 3) Число студентов, участвовавших в экспериментах, - 3 (О. Безроднова, Н. Мартынова, Ю. Нечипоренко).

- 4) Число докладов, сделанных сотрудниками ПИЯФ от имени коллаборации на международных конференциях - 3
- 5) Число совместных публикаций в реферируемых журналах – нет.
- 6) Финансирование работ российскими организациями в 2019 г. не планировалось.
- 7) Финансирование, выделенное на 2019 г., - 22,500 USD
- 8) Количество затраченных дней в 2019 г. на выполнение проекта – 141 командировочный день.

#### 7.7 План работы группы на 2020 г.

- Подготовка и участие в экспериментальном сеансе на пучке в феврале 2020 г. на установке SHIPTRAP в ГСИ,
- Участие в экспериментах на ионной ловушке PENTATRAP,
- Обработка и анализ полученной информации в экспериментах на установках SHIPTRAP и PENTATRAP; посткалибровочные измерения, подготовка докладов и публикаций.

Запрашиваемая КВОТА на 2020 год по проекту «SHIPTRAP» составляет 25,000 USD,

Она будет распределена на командировочные поездки в Германию для подготовки и проведения экспериментального сеанса, посткалибровочных и других работ, необходимых после эксперимента по сверхтяжёлым элементам, а также участия в эксперименте на установке PENTATRAP в Хайдельберге. Предполагаемое число основных исполнителей 3-4 человека с общим количеством человеко-дней в Германии около 170.

Представлен отчет о научно-исследовательской работе, выполненной в рамках проекта Российско-Германского сотрудничества по исследованию фундаментальных свойств материи по теме «Исследование рождения векторных мезонов в адрон-ядерных и ядерно-ядерных взаимодействиях на установке HADES (GSI, Германия)», краткое наименование HADES. Координатор работ - ведущий научный сотрудник ИЯИ РАН, канд. физ.-мат. наук Ф.Ф.Губер.

### 8.1 Введение

В 2019 г. коллаборация ХАДЕС отмечает 25-летие с момента своего образования. За эти годы на широкоапертурном магнитном спектрометре ХАДЕС был выполнен целый ряд экспериментов по исследованию свойств ядерной материи при энергиях налетающих ядер порядка 1 – 2 ГэВ на нуклон в лабораторной системе. Физическая программа этих экспериментов направлена на поиск и исследование явлений, связанных со спонтанным нарушением киральной симметрии – фундаментальной симметрии сильных взаимодействий. При нулевой температуре и больших барионных плотностях ядерной материи физический КХД-вакуум обладает двумя основными характеристиками: конфайнментом и спонтанно нарушенной киральной симметрией. Нарушение киральной симметрии определяет базовые свойства наблюдаемого мира, в частности, массовый спектр легких адронов. В столкновениях тяжелых ионов при высоких энергиях устанавливаются экстремальные температуры и плотности, при которых ожидается «плавление» кирального конденсата и формирование кирально-симметричной среды. Однако, уже при энергиях налетающих ядер порядка 1 – 2 ГэВ на нуклон в лабораторной системе данные эффекты могут проявиться, в частности, в изменении свойств легких векторных мезонов (сдвиг массы и изменение ширины резонансов), рожденных в ядро-ядерных столкновениях. Изучение свойств этих мезонов посредством детектирования их распадов с испусканием электрон-позитронных пар является важнейшим направлением исследований на установке ХАДЕС.

В настоящее время наблюдается исключительно высокий интерес к исследованию свойств плотной барионной ядерной материи при энергиях налетающих ядер в несколько ГэВ. Помимо экспериментов на установке ХАДЕС, такие эксперименты ведутся на действующих установках BM@N в ОИЯИ, NA61 в ЦЕРН, STAR в Брукхэйвенской лаборатории в США. В рамках Мегaproектов ФАИР (Дармштадт, Германия) и НИКА (Дубна, Россия) сооружаются новые экспериментальные установки CBM и MPD, соответственно на ФАИР и на коллайдере НИКА, в сооружение которых принимают участие ученые ИЯИ РАН ИТЭФ и МИФИ.

Исследование коллективных потоков заряженных частиц, образующихся в столкновениях тяжелых ядер, также является одним из важных направлений на ХАДЕСе. При энергиях пучка порядка 1-2 ГэВ на нуклон основная мотивация для изучения потоков связана с исследованием уравнения состояния ядерной материи. Исследование уравнения состояния ядерной материи посредством оценки её сжимаемости позволяет на макроскопическом уровне поставить предел по массам нейтронных звезд, что важно для понимания эволюции звезд и астрофизики в целом. Российские ученые принимают активное участие в этих исследованиях на установке ХАДЕС.

Для корректной интерпретации данных, полученных в столкновениях тяжелых ионов, необходима также информация об элементарных нуклон-нуклонных столкновениях, которая позволит выделить эффекты в ядерных столкновениях. В настоящее время установка ХАДЕС является единственным спектрометром в мире, на котором исследуется образование дилептонов, а также заряженных пионов, каонов и фрагментов ядер в различных сталкивающихся системах: pp, dp, pA, AA в области энергий столкновений ~1-4 ГэВ на нуклон.

ХАДЕС является также единственным большим экспериментом в ГСИ, который будет проводить физические эксперименты на модернизированном ускорителе SIS18 в рамках объявленной программы ФАИР-фаза-0. В ГСИ утверждена программа дальнейших экспериментов на установке ХАДЕС.

## 8.2 Экспериментальная установка ХАДЕС

Установка ХАДЕС (HADES – High Acceptance DiElectron Spectrometer)<sup>2</sup> [1] представляет собой широкоапертурный магнитный спектрометр для идентификации и измерения энергии адронов и электронов/позитронов, образующихся в ядро-ядерных взаимодействиях при энергиях налетающих ядер 1 - 2 ГэВ на нуклон и в адрон-ядерных взаимодействиях при энергиях до 4 ГэВ. Геометрически спектрометр разделен азимутально на шесть идентичных секторов, которые определяются расположением обмоток сверхпроводящего тороидального магнита, и перекрывают область полярных углов в диапазоне от 18° до 88° и практически полный азимутальный угол. Поперечное сечение двух противоположных секторов показано на Рис. 8.1. При такой геометрии акцептанс установки в области промежуточных быстрых для дилептонных пар достаточно большой и составляет примерно 40%.

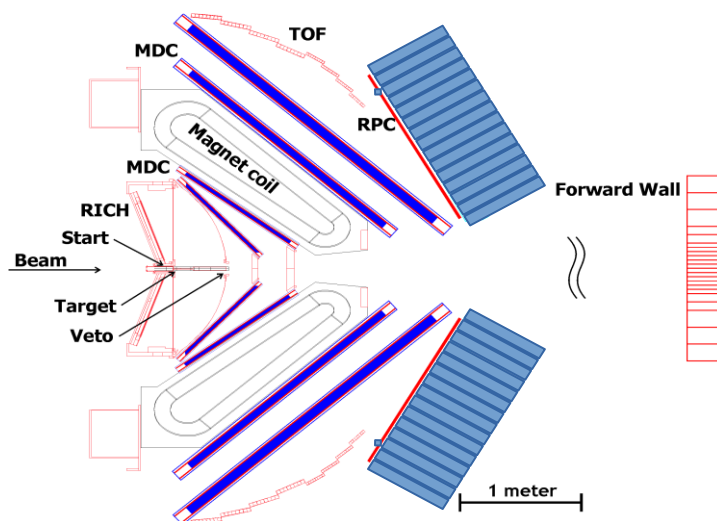


Рис. 8.1 – Схема установки ХАДЕС

Для идентификации и измерения импульсов заряженных частиц спектрометр имеет несколько детекторных подсистем. Электроны и заряженные адроны – пионы, каоны, протоны и более тяжелые заряженные фрагменты идентифицируются по времени пролета

<sup>2</sup> The High-Acceptance Dielectron Spectrometer HADES. G. Agakishiev et al., Eur.Phys.J.A41:243-277,2009.

частиц между стартовым детектором, расположенным перед мишенью и двумя системами RPC и TOF, расположенными после магнита. RPC – резистивные плоскостные камеры – имеют временное разрешение порядка 80 пс<sup>3</sup>, а сцинтилляционный годоскоп TOF<sup>4</sup> - порядка 180 пс. Это позволяет с высокой эффективностью идентифицировать заряженные частицы в столкновениях тяжелых ядер.

Для идентификации электронов, помимо описанной выше времяпролетной системы, используется кольцевой черенковский пороговый детектор (RICH), расположенный в области вокруг мишени, где отсутствует магнитное поле. Дополнительно, также для этой цели, в области передних углов ранее использовался предливневый детектор (SHOWER), который в настоящее время заменен на электромагнитный калориметр – ECAL.

Измерение импульсов заряженных частиц и их углов вылета из мишени обеспечивается трековой системой детекторов, состоящей из сверхпроводящего тороидального магнита и набора из четырех плоскостей мини дрейфовых камер (MDC). Камеры измеряют положение и направление движения заряженных частиц до и после области магнитного поля. Из отклонения траекторий в магните определяется импульс каждой частицы. Данная система обеспечивает импульсное разрешение для заряженной частицы с точностью порядка 1 %.

Еще одной важной детекторной системой установки ХАДЕС является передний многоканальный сцинтилляционный годоскоп FW (Forward Wall)<sup>5</sup>. Определяющий вклад в создание и обслуживание этого годоскопа внесла группа ИЯИ РАН. Этот годоскоп был впервые использован на установке ХАДЕС для идентификации *np* взаимодействий при исследовании образования электрон-позитронных пар в *dp*-реакции при энергии налетающих дейтронов 1,24 ГэВ на нуклон<sup>6</sup>. Годоскоп располагается на расстоянии 7 м от мишени и перекрывает область полярного угла от 0,33 до 7,17 градусов. После значительной модернизации переднего годоскопа, проведенной группой ИЯИ РАН, он был использован в 2012 г. в эксперименте по исследованию образования электрон-позитронных пар в реакции Au+Au при энергии налетающих ядер золота 1,24 ГэВ на нуклон. Основное назначение переднего годоскопа в этом эксперименте состояло в определении плоскости реакции при событийном анализе данных и в использовании этой информации для анализа потоков заряженных частиц в данной реакции.

### 8.3 Отчет о работах, выполненных российскими институтами в эксперименте ХАДЕС в 2019 г.

В 2019 г. состоялся физический сеанс на ускорителе SIS18 в реакции Ag+Ag при энергии налетающих ядер серебра 1.58 АГэВ, на который было выделено пучковое время (88 смен). Российские группы участвовали в подготовке к этому физическому сеансу, в обработке и анализе экспериментальных данных.

Группа ИЯИ РАН выполнила работа по монтажу переднего годоскопа на установку

<sup>3</sup> D. Belver et al., Nucl.Instrum.Meth.A602:687-690, 2009

<sup>4</sup> Agodi, et al., Nucl.Instrum.Meth. A492 (2002) 14-25

<sup>5</sup> К.Лapidus, диссертация «Образование электрон-позитронных пар в квазисвободных нейтрон-протонных столкновениях», <http://www.dissercat.com/content/obrazovanie-elektron-pozitronnykh-par-v-kvazisvobodnykh-neitron-protonnykh-stolknoveniayakh>.

<sup>6</sup> Передний сцинтилляционный годоскоп для регистрации ядерных фрагментов на установке ХАДЕС, О.В. Андреева, М.Б. Голубева, Ф.Ф. Губер, А.П. Ивашкин, А.Б. Курепин, А.И. Решетин, А.С. Садовский, Е.А. Усенко, ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2014, № 2, с. 13-30 . DOI: 10.7868/S0032816214020141

ХАДЕС, была проведена проверка работоспособности всех 288 сцинтилляционных детекторов этого годоскопа и их калибровка на космических мюонах и на фрагментах ядер серебра в начале сеанса. Этой группой был также изготовлен прототип кварцевого пучкового годоскопа, который был установлен в пучковом отверстии сцинтилляционного годоскопа и использован при наборе физических данных.

Группа ИЯИ РАН, в сотрудничестве с чешской и немецкими группами, ведет работу по созданию и запуску новой детекторной системы установки ХАДЕС – 978-канального электромагнитного калориметра (ECAL). К началу физического сеанса 2019 г. были полностью собраны 4 сектора ECAL со 163 модулями в каждом секторе и проведено их тестирование на космическом излучении. На созданном группой ИЯИ РАН испытательном стенде в ГСИ продолжались тестовые измерения и калибровка модулей для 5-го сектора ECAL, который предполагается установить на ХАДЕС в конце 2019 г. Измерения проводились как на космическом излучении, так и световых импульсах от LED-оптической системы. Впервые, частично собранный электромагнитный калориметр ECAL использовался в физическом эксперименте. Электромагнитный калориметр позволит существенно расширить экспериментальные возможности установки ХАДЕС и провести измерения выходов  $\pi^0$  и  $\eta$ -мезонов, а также улучшить идентификацию электронов и позитронов при импульсах больше 400 МэВ/с как в эксперименте ХАДЕС на ускорителе SIS18, так и на будущем ускорителе SIS100 (FAIR).

В 2019 г. в журнале Nature Physics опубликована статья коллаборации ХАДЕС «Probing dense baryon-rich matter with virtual photons» (см. <https://doi.org/10.1038/s41567-019-0583-8>), соавторами которой является группа ученых из Института ядерных исследований РАН, НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ и НИЯУ «Московский инженерно-физический институт». В этой статье обсуждаются результаты эксперимента на установке ХАДЕС по исследованию свойств ядерной материи, которая образуется в столкновениях ядер золота при энергии в системе центра масс сталкивающихся нуклонов 2.4 ГэВ. Впервые показано, что источником наблюдаемого избыточного электромагнитного излучения в области масс электрон-позитронных пар 0.2 – 0.6 ГэВ в центральных столкновениях ядер золота при данной энергии является локально термализованная плотная ядерная материя. Наблюдаемое усиление электромагнитного излучения в этой области масс электрон-позитронных пар подтверждает предположение о сильном уширении  $\rho$  – мезона в горячей и плотной ядерной среде, которое может быть связано с частичным восстановлением нарушенной киральной симметрии.

Группой НИЦ КИ-ИТЭФ было в 2019 г. были сделаны предложения о возможном расширении исследований на ХАДЕСе, направленные на изучение в ядро-ядерных столкновениях свойств ядерной материи на малых ( $< 1$  ферми) межнуклонных расстояниях, соответствующих высокой барионной плотности, т.е. большой величине барионного химического потенциала  $\mu$ . Было также предложено изучить модификации ширины тяжелого гиперона  $\Lambda(1520)$  в ядерной среде в реакциях взаимодействия  $\pi^-$  мезонов с импульсом 1.7 ГэВ/с с ядрами углерода и вольфрама. Для этого предложено использовать уже имеющуюся статистику  $3 \cdot 10^8$  событий в уже выполненном ранее эксперименте на установке ХАДЕС по столкновениям пионов с ядрами углерода и вольфрама. В 2020 году планируется получить первых оценки ширины  $\Lambda(1520)$  в ядерной среде.

Далее, в данном разделе приведены основные результаты, полученные российскими группами в 2019 г.

### 8.3.1 Подготовка и обеспечение работы переднего годоскопа FW в физическом сеансе 2019 г. на установке ХАДЕС

Передний сцинтилляционный годоскоп (Forward Wall) предназначен для измерения геометрии ядро-ядерных столкновений, центральности и угла плоскости реакции. Передний годоскоп является одной из детекторных систем экспериментальной установки ХАДЕС и единственным детектором установки ХАДЕС, регистрирующим частицы в области больших быстрот, в основном, спектры – фрагменты ядер пучка, не участвующих во взаимодействии. В очередном сеансе на ускорителе ионов SIS18 марте 2019 передний сцинтилляционный годоскоп использовался для определения центральности соударений в мишени и измерения угла плоскости реакции на пучке ионов серебра с энергией 1.58 ГэВ на нуклон в реакции  $Ag + Ag$ . Группа ИЯИ РАН, как ответственная за эту детекторную систему, провела работу по подготовке этого годоскопа к сеансу, обеспечивала экспертное обслуживание этого годоскопа во время сеанса и выполнила работу по его энергетической и временной калибровке.

Передний годоскоп установки ХАДЕС - многоканальная система сцинтилляционных детекторов для регистрации заряженных частиц. Конструктивно передний сцинтилляционный годоскоп представляет собой плоскость, собранную из отдельных модулей-сборок сцинтиллятор – ФЭУ. На Рис. 8.2 слева показан внешний вид годоскопа - фотография фронтальной стороны переднего годоскопа, закрытой светоизолирующей плёнкой, и модулей высоковольтного HV-питания на передвижной платформе. На Рис. 8.2 справа представлена схема геометрического расположения детекторных ячеек переднего годоскопа установки ХАДЕС. Для оптимизации акцептанса и уменьшения вклада систематических ошибок в определение угла плоскости реакции была выбрана симметричная геометрия расположения сцинтилляционных ячеек. Платформа позволяет перемещать годоскоп и выставлять его на нужной дистанции от точки взаимодействия пучка с мишенью. В центре размер ячеек наименьший, 4см x 4см, далее идет слой с размером ячеек 8см x 8см, и внешние ячейки имеют размер 16см x 16см. Таким образом, достигается оптимальное соотношение гранулярности детектора и его стоимости. Модули высоковольтного питания (HV) также расположены на передвижной платформе, управление высоким напряжением, измерение токов потребления ФЭУ каждой ячейки осуществляется системой мониторинга медленных параметров (slow control), реализованной в среде EPICS.

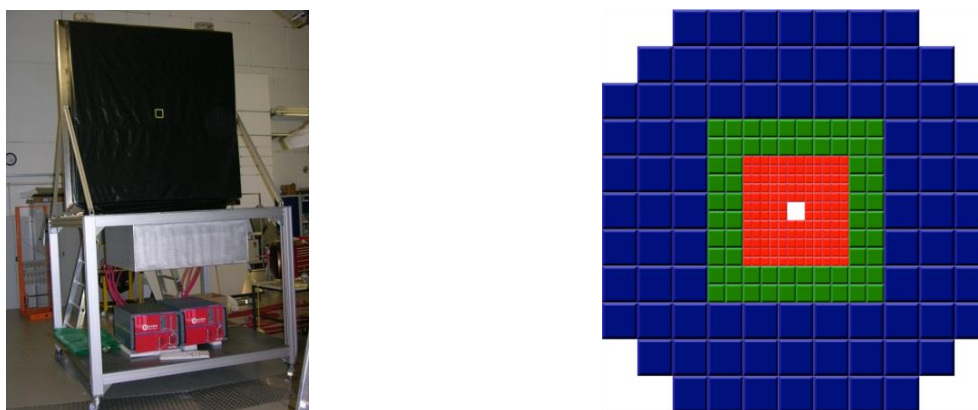


Рис. 8.2 – Слева - общий вид плоскости переднего годоскопа FW установки ХАДЕС; справа - схема расположения сцинтилляционных детекторных ячеек на плоскости годоскопа

Всего годоскоп состоит из 288 ячеек, 140 в центральной области, 64 в середине и 84 больших ячейки во внешней области. Материал ячеек годоскопа - пластмассовый сцинтиллятор на основе полистирола BC408. Толщина сцинтилляторов детекторных ячеек составляет 1" (2,54 см). По оси пучка годоскопа расположено квадратное отверстие размером  $8 \times 8 \text{ см}^2$  для пропускания пучка и наиболее тяжелых фрагментов пучка. Полный поперечный размер переднего сцинтилляционного годоскопа установки ХАДЕС составляет  $180 \times 180 \text{ см}^2$ .

Каждая детекторная ячейка переднего годоскопа состоит из следующих функциональных элементов (см. Рис. 8.3): пластмассового сцинтиллятора BC408 (1), «воздушного» световода с корпусом из алюминиевого сплава с полированной внутренней светоотражающей поверхностью (2), ФЭУ типа XR2982 для детекторных ячеек малого размера и ФЭУ типа XR2262 для детекторных ячеек среднего и большого размеров (3) и делителя высокого напряжения для питания ФЭУ (4).



Рис. 8.3 – Функциональные элементы сцинтилляционной детекторной ячейки переднего годоскопа

В 2019 г. после длительного перерыва (последний сеанс с его использованием был в 2012 г.) этот годоскоп был вновь протестирован перед сеансом и откалиброван на космике. В процессе тестов выяснилось, что некоторые ФЭУ требуют замены, так как сигналы с них не просматривались ни на осциллографе при наблюдении космических частиц, ни в спектрах набранных данных. Замена была произведена на ФЭУ, аналогичные установленным. При этом шум установленных на замену ФЭУ оказался повышенным. Однако в силу того, что шумовой сигнал и сигнал от частиц хорошо разделяются на спектре, на работу годоскопа это влияния не оказало. Необходимость проверки переднего годоскопа связана с тем, что часть ячеек годоскопа показывала неустойчивую работу в предыдущих экспериментальных сеансах. Было установлено, что основные проблемы связаны с нестабильной работой фотоэлектронных умножителей в нескольких сцинтилляционных ячейках вблизи оси пучка, где интенсивность загрузки детекторов является максимальной. Эти фотоумножители были заменены на новые. На Рис. 8.4 представлена схема расположения центральных ячеек годоскопа размером  $4 \times 4 \text{ см}^2$ , где красным цветом помечены ячейки, в которых была произведена замена ФЭУ XR2982 на Hamamatsu.

Система считывания состоит из схемы на двух дискриминаторах и формирователя выходного импульса (см. Рис. 8.5). При этом быстрый дискриминатор сигнала обеспечивает регистрацию переднего фронта входного импульса, а измерение времени над порогом (time over threshold) сигнала после формирователя импульса (shaper) дает информацию о сигнале.

Детали работы этой схемы подробно описаны в отчете за 2018 г.





Рис. 8.4 – Карта замены ФЭУ в центральной части сцинтиляционного годоскопа

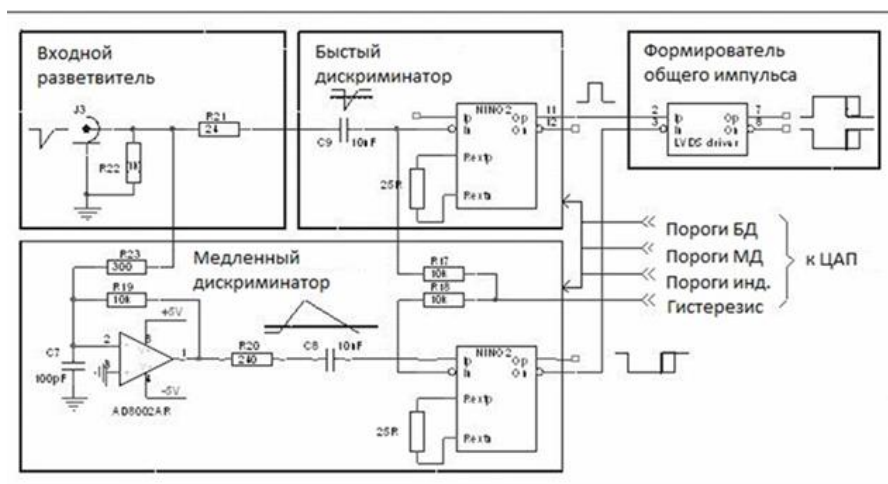


Рис. 8.5 – Принципиальная схема канала оцифровки модуля TOFAddON

В 2019 году, перед сеансом была проведена очередная проверка ячеек с заменой фотоумножителей в ячейках с повышенным шумом. Проверка ячеек годоскопа была выполнена путем регистрации выделенной энергии от космических мюонов, проходящих через годоскоп в вертикальном направлении. С этой целью был организован триггер, требующий срабатывания по крайней мере 3х сцинтиляционных ячеек годоскопа. Таким образом, триггер выбирал космические мюоны, проходящие преимущественно в вертикальной плоскости (плоскости годоскопа). Как известно, выделенная энергия (и как следствие, число образовавшихся фотонов) от космических мюонов пропорционально длине пробега мюона в сцинтиляторе, и для переднего годоскопа зависит от поперечных размеров центральных, средних и внешних детекторных ячеек. Полная информация по всем ячейкам годоскопа представлена на Рис. 8.6, где количество событий в каждом бине гистограммы соответствует количеству отсчетов в сработавшей ячейке. Для ячеек с номерами 1-144

скорость счета ниже, т.к. в этом случае площадь ячейки для проходящих через нее космических мюонов меньше и, соответственно, меньше вероятность получить сигнал в данной ячейке годоскопа. Анализ данных каналов показал, что детектор готов к измерениям в сеансе 2019 год на пучке ионов серебра на ускорителе SIS18

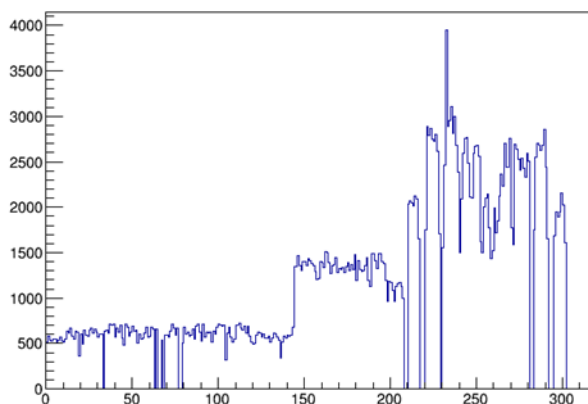


Рис. 8.6 – Скорости счета в сцинтилляционных ячейках годоскопа в зависимости от номера ячейки

Перед сеансом была также проведена калибровка годоскопа на космических мюонах. Полученное двумерное распределение амплитудных спектров в зависимости от номера ячейки, Рис. 8.7, были использованы затем для амплитудной калибровки ячеек в эксперименте на ионном сеансе.

Для практического использования данных, собираемых с модулей годоскопа, необходимо было выполнить калибровку сигнала как по времени, так и по энергии. Данная работа реализуется с помощью среды HYDRA, предназначенная как для обработки экспериментальных данных, так и данных симуляции. Архитектура HYDRA позволяет гибко конфигурировать процесс обработки в зависимости от актуальных задач.

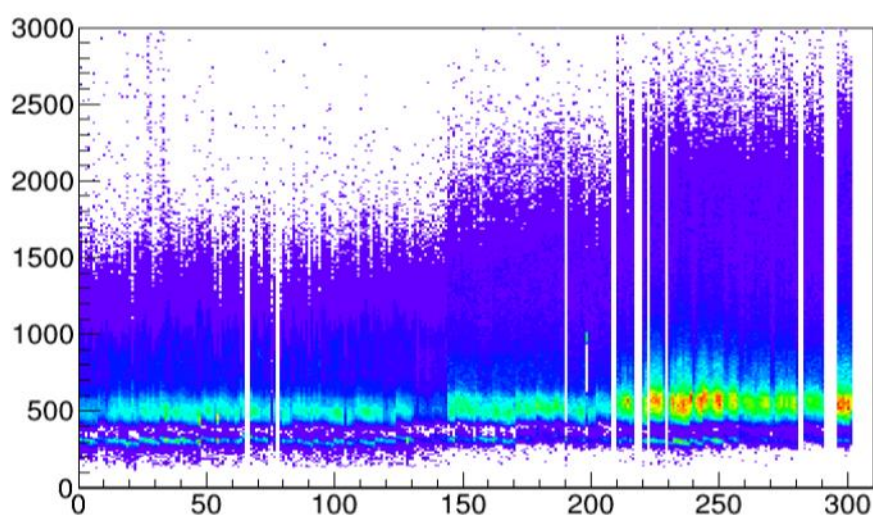


Рис. 8.7 – Двумерное распределение амплитудных спектров в зависимости от номера ячейки

Стандартный подход при оффлайн-обработке – использование скрипта analysisDST, в котором создается и настраивается синглтон класса Hades. Имеется несколько “стилей” осуществления настройки, каждый из которых сводится к последовательности операций:

1) настройка спектрометра (одно из полей Hades). Прописываются активные детекторы и устанавливаются активные модули в каждом из них.

2) Установка первичного и вторичного источников параметров детекторов. Сюда относятся, геометрия и калибровочные параметры.

3) Установка источника данных. Это может быть, как url адрес event builder'a (в случае использования скрипта для QA), так и просто hld-файл сырых данных.

4) Добавление распаковщиков

5) Добавление всех необходимых для дальнейшего анализа заданий (объектов классов, производных от HTask). Для каждого из детекторов имеется определенный набор заданий.

6) Инициализация синглтона. В синглтоне формируется список используемых контейнеров.

7) Начало обработки данных - первый вызов `hades->eventLoop()`. Проход по списку контейнеров и инициализация каждого.

После обработки "сырых" данных скриптом analysisDST на выходе имеем dst-файл формата root, в котором сериализованы объекты классов данных, взятых с активных детекторов. Структуру файла можно рассматривать как набор категорий. Так, некалиброванные данные переднего годоскопа помещены в категории HWallRaw, калиброванные - в HwallCal.

Калибровка годоскопа заключалась в определении амплитудных и временных параметров для конвертации данных класса HwallRaw в данные класса HwallCal. В качестве источников параметров может быть использована база данных Oracle, root-файл или текстовый файл. Для калибровки переднего годоскопа необходим набор из шести параметров для каждого модуля: TDC slope, TDC offset, WC1, WC2, ADC slope и ADC offset. WC1 и WC2 - это коэффициенты в выражении:

$$WC_1 + \frac{WC_2}{\sqrt{x}} \quad (1.1)$$

Значение этого выражения вычитается из времени сигнала, преобразованного как  $TDC_{slope} t_{tof} - TDC_{offset}$ . Таким образом осуществляется временная коррекция сигналов для всех амплитуд, регистрируемых ячейкой (time-walk correction).

На Рис. 8.8 представлены спектры распределений «сырых» амплитуды сигналов и времени срабатывания с нескольких ячеек, полученных на пучке Ag+Ag, а также визуально показано расположение ячеек в годоскопе.

Можно видеть несколько пиков в распределениях ширины сигналов. Первые два пика обусловлены особенностями оцифровывающей аппаратуры. Самый левый пик соответствует пьедесталу, следующий за ним — пороговый пик. Остальные два пика соответствуют частицам с  $Z=1$  (протонам) и  $Z=2$  (альфа-частицам). Можно видеть, что при удалении от оси пучка второй пик ослабляется, поскольку альфа-частицы обладают меньшим углом разлета по сравнению с протонами.

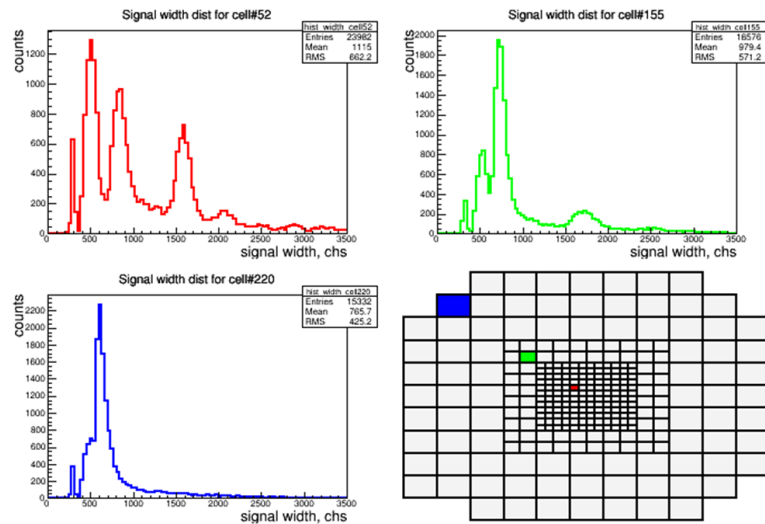


Рис. 8.8 - Распределение «ширины» (длительности ToT) сигналов на трех модулях (малом, среднего размера и большом)

На Рис. 8.9 приведена гистограмма, отображающая распределение ширины сигналов для всех ячеек годоскопа. Геометрия годоскопа должна обеспечивать практически одинаковую длину трека в сцинтилляторе частицы-спектратора для каждой из ячеек.

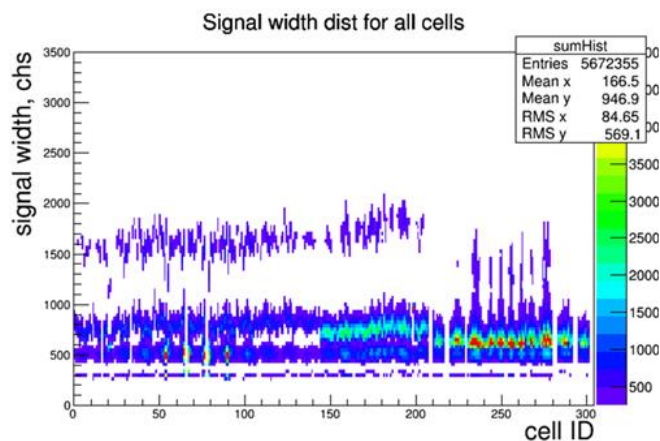


Рис. 8.9 – Сводная гистограмма распределения «ширины» (ToT) сигнала для всех ячеек годоскопа

При этом видно, что положения пиков для протонов и альфа-частиц сильно варьируются между ячейками. Таким образом, для дальнейшего анализа необходима калибровка по энергии каждой ячейки годоскопа, которая обеспечит положение пиков  $Z=1$  и  $Z=2$  в соответствующих местах шкалы.

Калибровка производилась с использованием линейного преобразования  $\Delta E = k_{ADC\_SLOPE} \cdot width + a_{ADC\_OFFSET}$ . Положение пика для протонов приводилось к значению 100 на шкале, а пика для альфа-частиц — к 200. Для нахождения обоих калибровочных коэффициентов необходимо соответствующим двум точкам на исходном распределении поставить два этих значения на шкале. На распределениях, получаемых для малых и средних ячеек, имеются оба пика. Для больших ячеек, находящихся на максимальном удалении от пучка, второй пик практически полностью подавлен. По этой причине потребовалось воспользоваться распределением ширины сигналов, регистрируемых на крупных модулях от

космических мюонов. Распределения ширины сигналов периферийных модулей для космики и для пучка показаны на Рис. 8.10. Таким образом, используются только пики  $Z=1$ . При этом видно, что пик для космики оказывается смещенным в область большей ширины сигнала, что обусловлено большей длиной трека. Отношение длин треков мюонов и протонов составляет около 6. Для использованных ФЭУ амплитуда снимаемого сигнала зависит как корень квадратный от выделившейся энергии. Учитывая это, значение пика для космики приводилось к  $\sqrt{6ADC_{z=1}}$ , т.е. приблизительно к 250 по шкале.

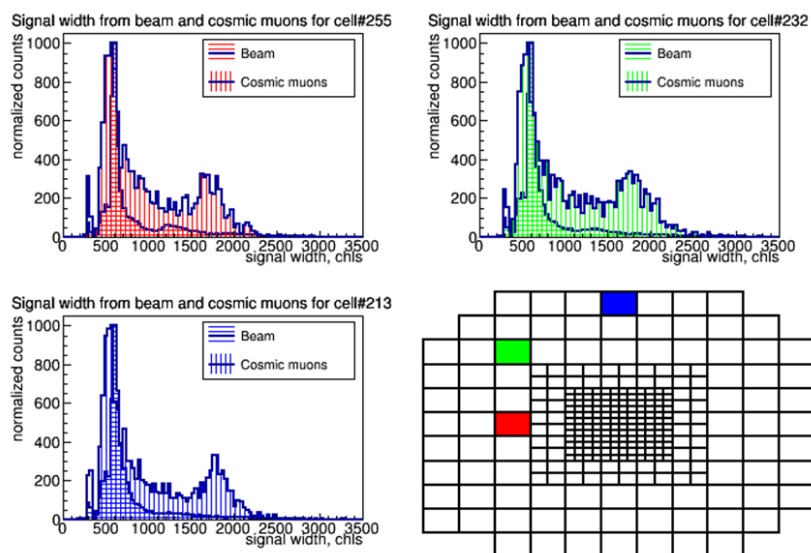


Рис. 8.10 – Распределение сигналов по ширине в трех периферийных ячейках годоскопа (горизонтальная штриховка – данные пучка, вертикальная – космические мюоны)

В качестве положения пика ширины сигнала для каждого из модулей принималось среднее аппроксимирующей функции Гаусса. На гистограммах каждый из пиков фитировался отдельной функцией. Характерный результат аппроксимации гистограмм для пучковых данных показан на Рис. 8.11 для ячеек малого, среднего и крупного размера.

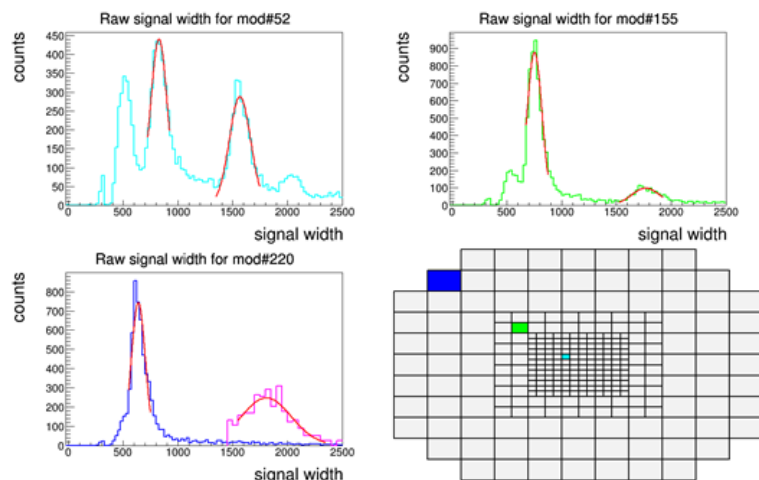


Рис. 8.11 – Примененное фитирование ширины сигналов с трех ячеек годоскопа разного размера

На рисунке также приводится фит гистограммы распределения сигналов от мюонов, снятых с одной из внешних ячеек. По результатам аппроксимации пиков были определены калибровочные коэффициенты  $k_{ADC\_SLOPE}$   $a_{ADC\_OFFSET}$ , которые заносились в файл параметров. Этот файл в дальнейшем использовался при создании dst-файлов с актуально калиброванными данными в категории HWallCal.

Оцифровывающая электроника дает нелинейную зависимость времени сигнала от его ширины. Примеры распределений сигналов в плоскости  $time - width$  для ячеек трех типов приведены на Рис. 8.12.

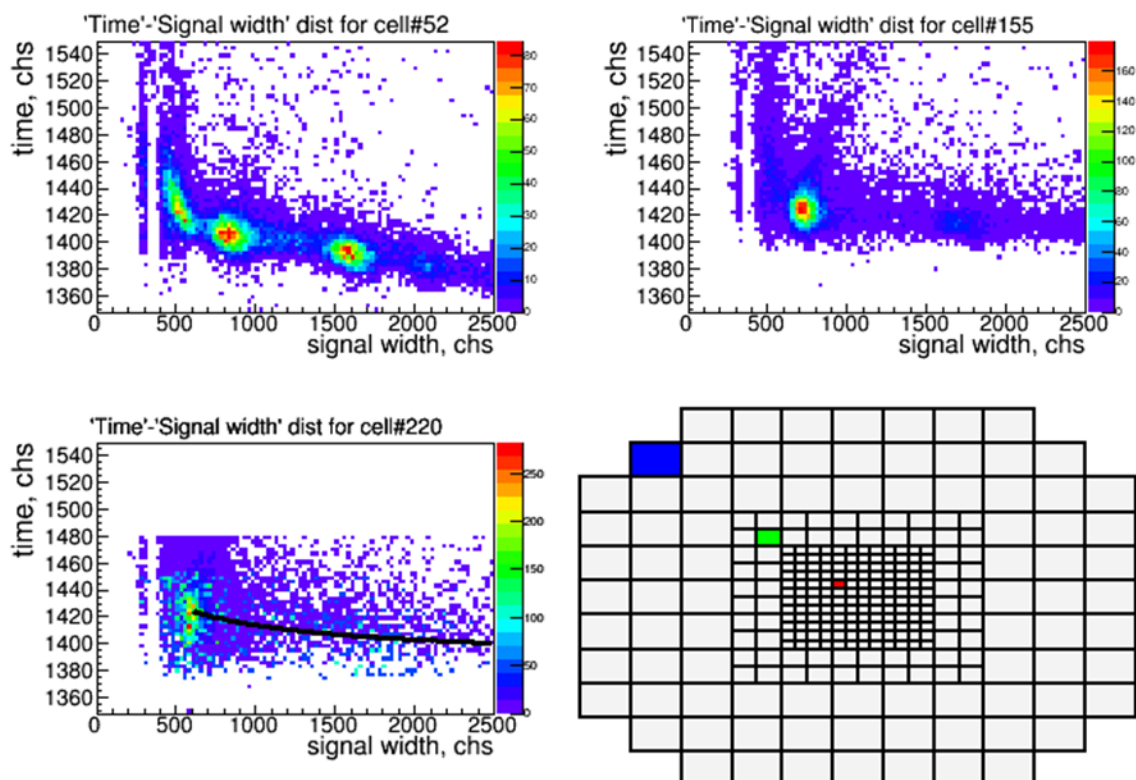


Рис. 8.12 – Зависимость времени сигнала от его ширины для трех ячеек разного размера

Walktime correction - процедура нивелирования данного эффекта. Способ учета - построение фитирующей функции для распределения, получение параметра WC2 и вычитание второго члена (1.1) из экспериментального времени. Результат walktime correction отражен на рис. 13.

Начало сигнала с модулей переднего годоскопа, должно соответствовать моменту времени, когда фрагменты пучка долетают до ячеек годоскопа. В данной конфигурации эксперимента (1.58 AGeV) это время приблизительно равняется 25 нс (бета около 0.8). Учет вариации в смещении времени прихода сигнала от каждой из ячеек выполнен установкой WC1, соответствующим плато на кривых Рис. 8.13. Результирующая картина пиков откалиброванных распределений по времени показана на Рис. 8.14.

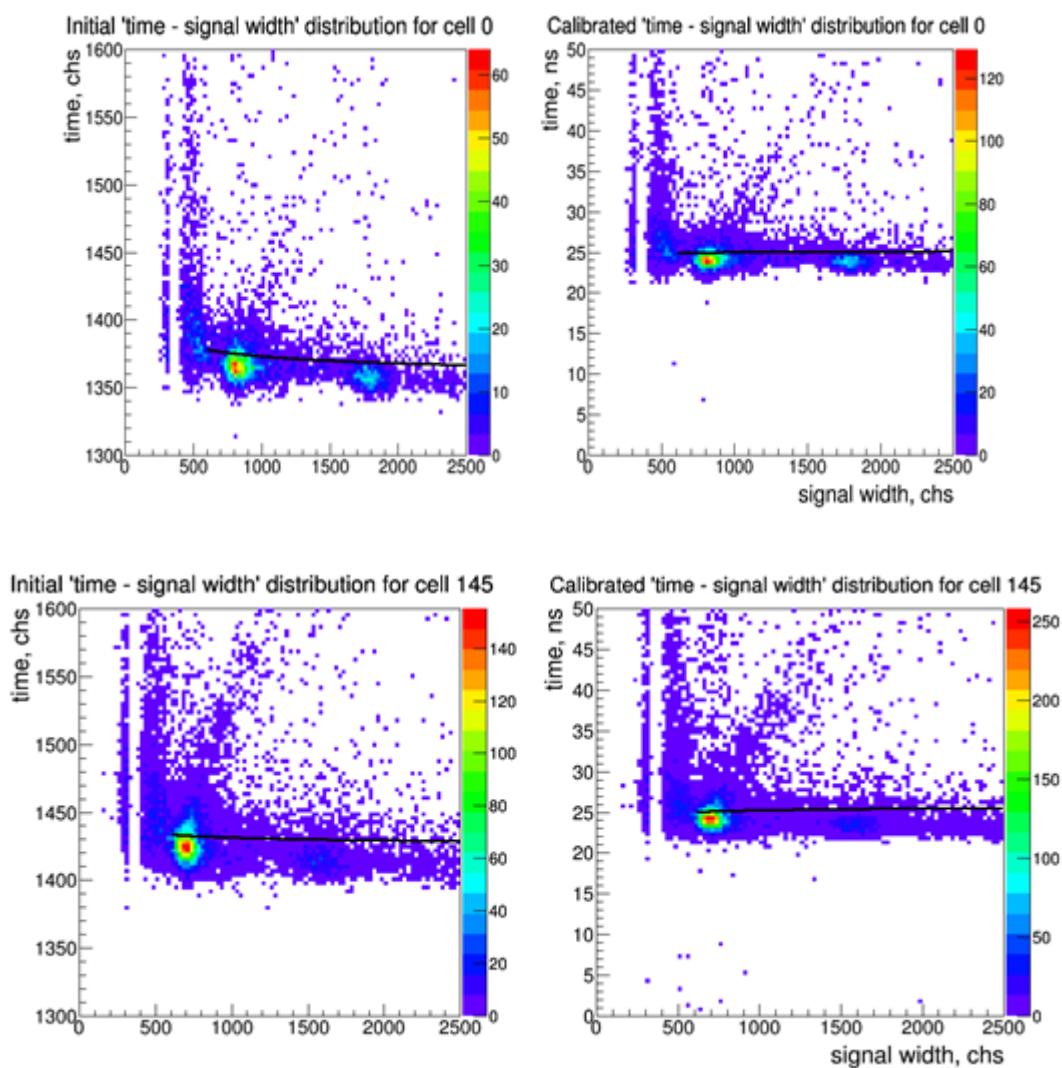


Рис. 8.13 – Результат применения walktime correction для трех ячеек годоскопа

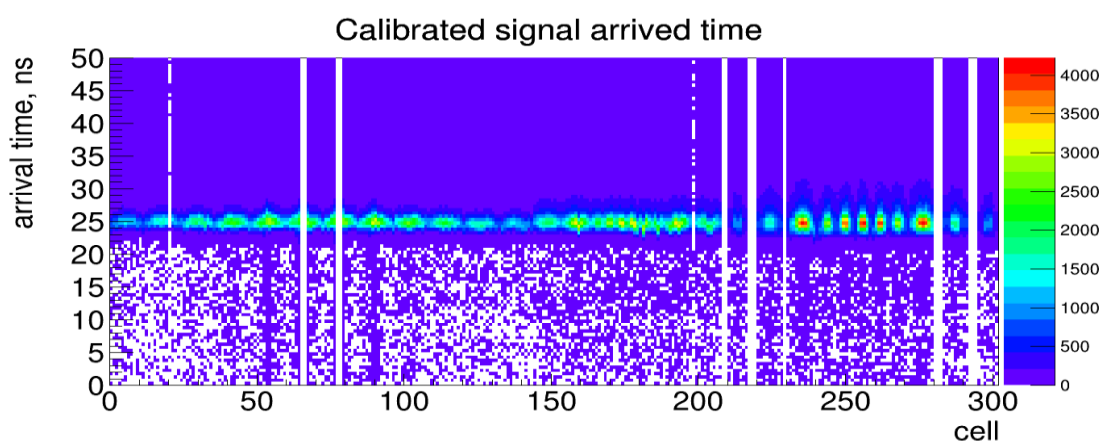


Рис. 8.14 – Распределение времени сигнала от номера ячеек годоскопа после калибровки

Пример работы ячейки годоскопа после процедуры калибровки представлен на Рис. 8.15, где показаны спектры амплитуд, time-walk коррекции и временного отклика ячейки.

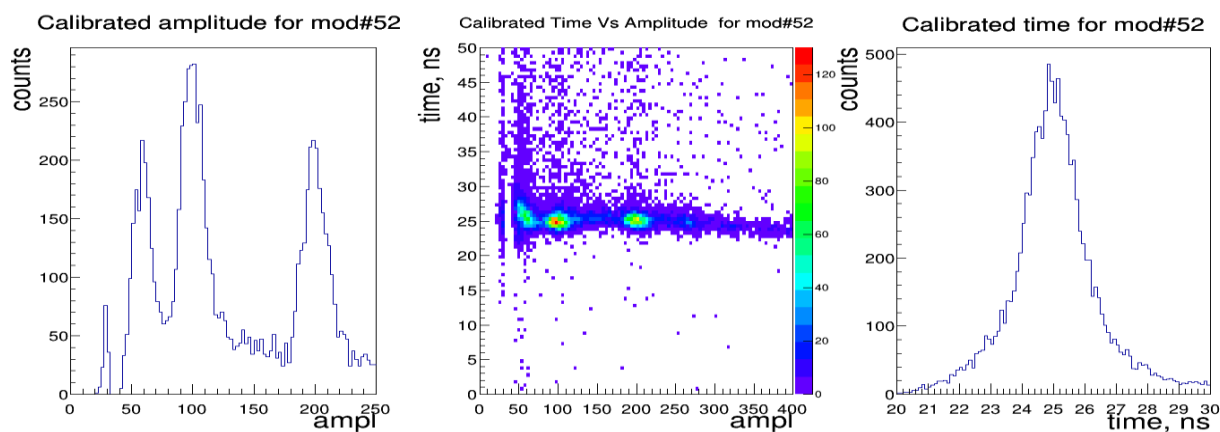


Рис. 8.15 – Спектры калиброванной амплитуды (слева), выравнивания временного отклика (в центре) и времени сигнала (справа) для ячейки 52 годоскопа

На Рис. 8.16 показана картина распределений амплитуд сигналов со всех ячеек годоскопа после калибровки.

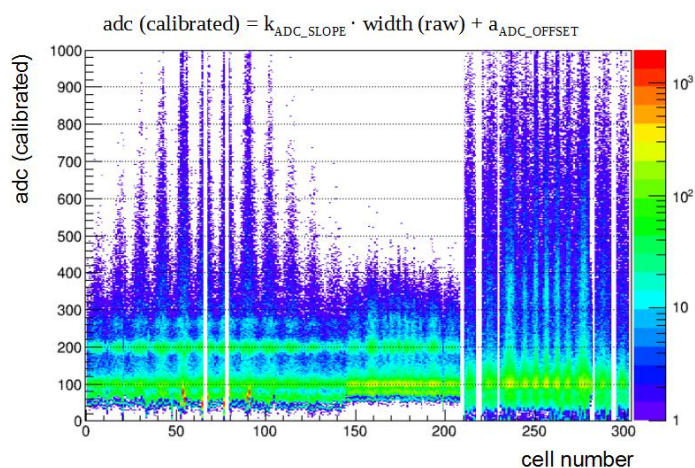


Рис. 8.16 – Спектры калиброванной амплитуды всех ячеек годоскопа

На Рис. 8.17 и Рис. 8.18, в качестве примера, приведены результаты анализа отклика ячеек годоскопа, полученные на пучке в столкновениях ионов серебра. При этом фрагменты с несколькими  $Z$  хорошо видны в центральных ячейках годоскопа.

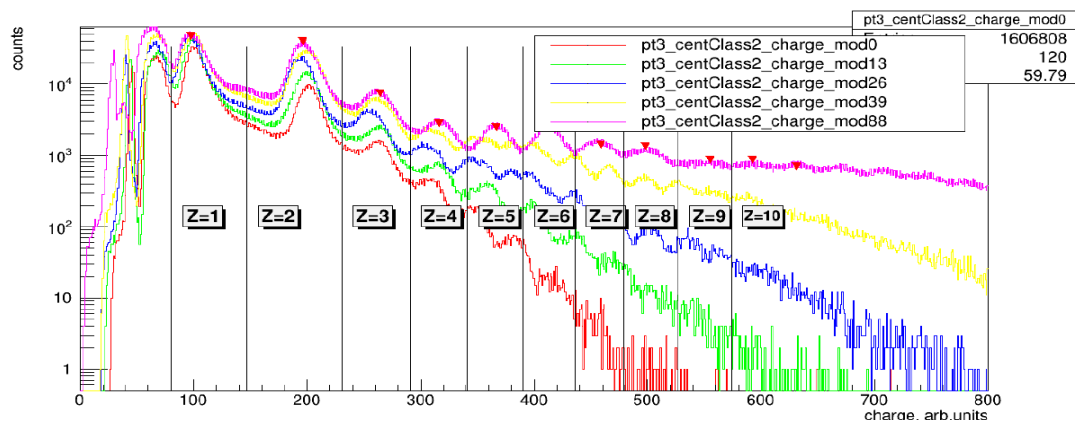


Рис. 8.17 – Спектры в нескольких малых(4x4см<sup>2</sup>) ячейках годоскопа.



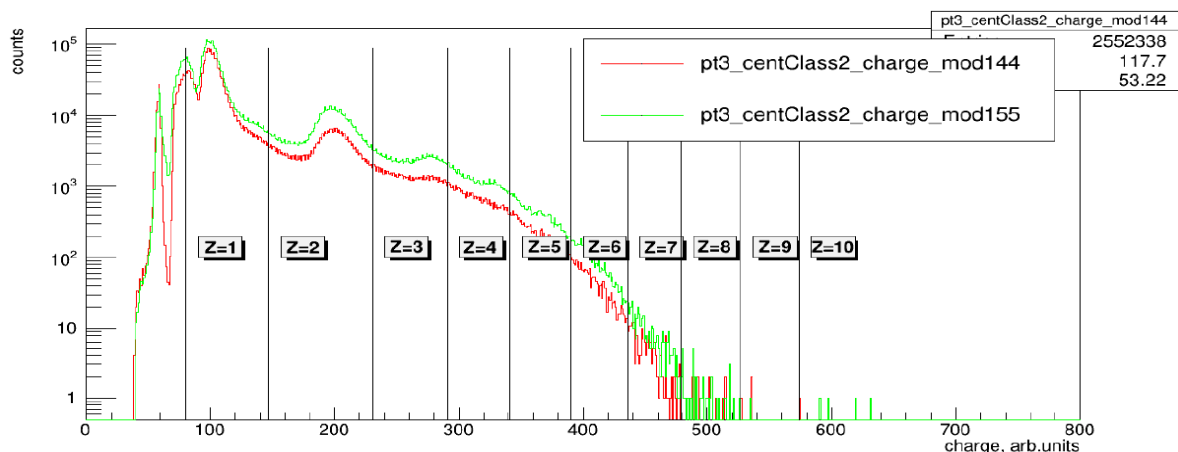


Рис. 8.18 – Спектры амплитуд в средних ячейках годоскопа ( $8 \times 8 \text{ см}^2$ )

Таким образом, проведенная группой ИЯИ РАН в 2019 г. работа по подготовке переднего годоскопа, его экспертное обслуживание во время сеанса с последующей амплитудной и временной калибровкой ячеек годоскопа, позволяет получить экспериментальные данные с этого годоскопа, необходимые для дальнейшего анализа полученных экспериментальных данных с целью определения центральности и угла плоскости реакции в столкновениях  $\text{Ag}+\text{Ag}$  энергии налетающих ядер серебра 1.58 АГэВ.

### 8.3.2 Тестирование кварцевого переднего годоскопа (QFH) на сеансе эксперимента ХАДЕС в марте 2019 года

В эксперименте ХАДЕС на ускорителе ионов SIS18 (ГСИ, Дармштадт) для измерения геометрии ядро-ядерных столкновений - центральности и плоскости реакции, применяется передний сцинтилляционный годоскоп (ForwardWall, FWALL). В центре годоскопа FWALL имеется отверстие ( $8 \times 8 \text{ см}^2$ ) для прохождения прямого пучка и тяжелых фрагментов в реакции ион-ионных соударений. Наличие этого пучкового отверстия приводит к потере информации о тяжелых фрагментах, которые также проходят через это отверстие. Результат моделирования точности определения прицельного параметра с использованием для определения центральности только сцинтилляционного годоскопа FWALL показан на *Рис. 8.19* слева. На вставке этого рисунка показана также зависимость суммарной выделенной энергии в FWALL от прицельного параметра. Для устранения неоднозначности в определении центральности по выделенной энергии в годоскопе и улучшения точности определения центральности, группой ИЯИ было предложено использовать дополнительный пучковый годоскоп, установленный в этом пучковом отверстии. Как показали предварительные результаты моделирования, *Рис. 8.19* справа, с использованием этого пучкового годоскопа можно получить практически монотонную зависимость выделенной энергии от прицельного параметра и для центральных и полупериферических событий получить заметное улучшение разрешения по центральности.

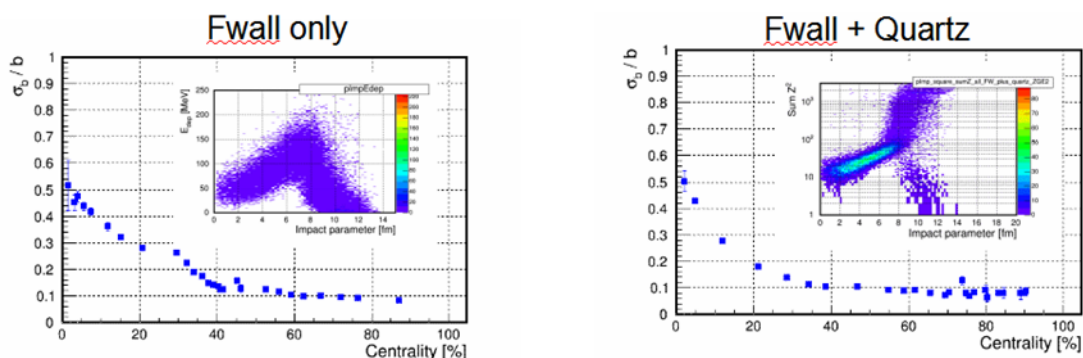


Рис. 8.19 – Результат моделирования и оценки разрешающей способности сцинтилляционного годоскопа FWALL (слева) и системы годоскопов (справа)

В качестве пучкового годоскопа тяжелых ионов и фрагментов, устанавливаемого в отверстие ( $8 \times 8 \text{ см}^2$ ) переднего сцинтилляционного годоскопа, было предложено использовать годоскоп на основе черенковских детекторов с радиаторами из радиационно стойкого кварца. Такой детектор должен регистрировать ионы в большом динамическом диапазоне, поскольку сигнал пропорционален  $Z^2$ , выдерживать загрузки вплоть до интенсивности прямого пучка ионов от ускорителя, которая составляет порядка нескольких миллионов в секунду, должен иметь разумную сегментацию для разделения нескольких ионов по отдельным регистрирующим элементам и обладать высокой радиационной стойкостью.

Для определения амплитудных спектров ожидаемых фрагментов в пластинках переднего кварцевого годоскопа было проведено моделирование отклика кварцевого годоскопа для реакции Ag+Ag при энергии 1.58 ГэВ/нуклон. В качестве генератора был использован транспортный пакет программ SHIELD. Моделирование детекторов было произведено с помощью GEANT4. Результат показан на Рис. 8.20. Как видно, ожидаемый спектр фрагментов идет вплоть до максимального Z, соответствующего ионам серебра

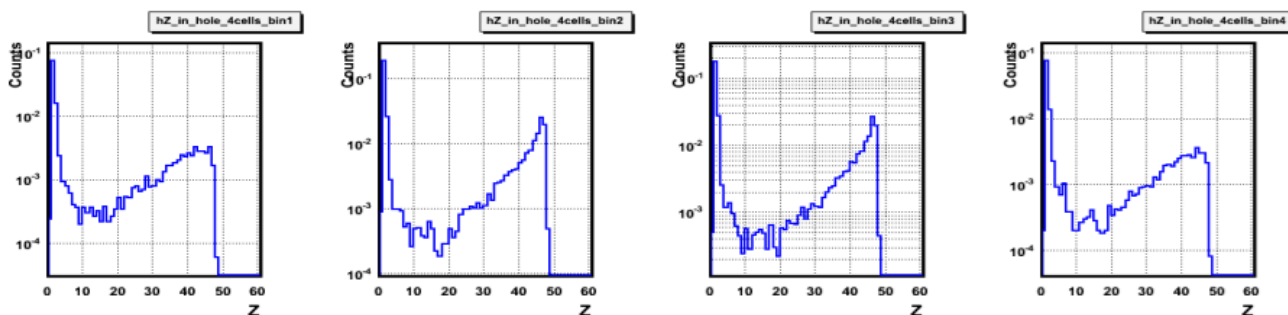


Рис. 8.20 – Результат моделирования отклика 4-х кварцевых пластин на пучке взаимодействий Ag+Ag при энергии 1.58 ГэВ/нуклон

. В 2019 г. группой ИЯИ РАН была предложена схема годоскопа, Рис. 8.21 слева. Пучковый годоскоп состоит из 4х кварцевых пластин пластин размером  $80 \times 20 \times 4$  мм. Черенковский свет с каждой пластины считывается отдельным ФЭУ. На Рис. 8.21 справа показана схема отдельного детектора пучкового годоскопа.

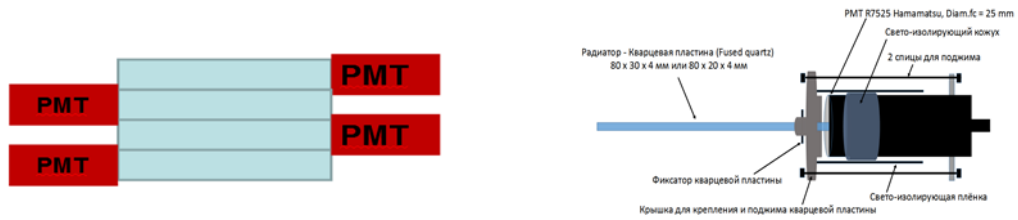


Рис. 8.21 – Слева – схема прототипа пучкового кварцевого годоскопа, справа – схема отдельного детектора годоскопа

Однородность светосбора с каждого детектора этого годоскопа исследовалась на космических мюонах. Было показано, что она составляет порядка 10% по длине кварцевого радиатора.

Для оценки радиационной загрузки на пучке ионов эксперимента ХАДЕС были проведены расчеты с помощью пакета FLUKA. Было показано, что при интенсивности пучка ионов серебра  $2 \cdot 10^6$  ионов/сек при энергии 1.65 ГэВ/нуклон, накопленная в течение одного месяца сеанса радиационная доза в кварце не превысит 5 Мрад, которая не приводит к деградации оптических свойств кварца.

Прототип кварцевого годоскопа представляет собой сборку из кварцевых пластин с ФЭУ, помещенных в светозащитную коробку. Сборка из 4-х элементов показана на Рис. 8.22 слева. На Рис. 8.22 справа показана фотография переднего сцинтилляционного годоскопа и пучкового кварцевого годоскопа, установленных на эксперименте ХАДЕС.

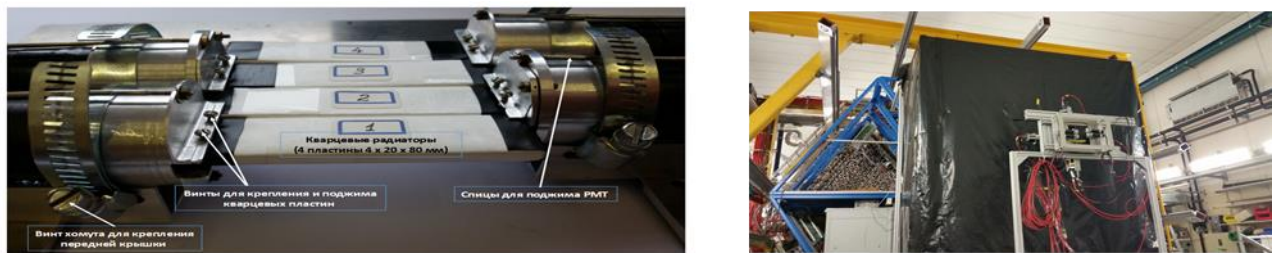


Рис. 8.22 – Слева, фотография кварцевого пучкового годоскопа, собранного из 4х детекторов; справа – передний сцинтилляционный годоскоп и кварцевый годоскоп на установке ХАДЕС

Большие загрузки кварцевого годоскопа предъявляют жесткие требования к считывающей электронике. Она должна обеспечить съем сигнала малой длительности (порядка нескольких наносекунд) и при этом время считывания и готовности электроники к следующему импульсу не должна превышать расчетного времени в пучке ионов ускорителя на эксперименте ХАДЕС. В случае реакции Ag+Ag, исследованной в марте 2019 года, частота сигналов от частиц пучка составила порядка  $2.5 \cdot 10^6$  в среднем за один сброс ("спилл"), доходя до  $3.5 - 4 \cdot 10^6$  в пиках интенсивности в пределах одного сброса. Обычные прямые методы оцифровки сигнала быстрыми амплитудно-цифровыми преобразователями не дают применить их в данном случае, так как, во-первых, необходимо обеспечить очень большую частоту дискретизации, что увеличивает стоимость и сложность канала считывающей электроники, а во-вторых, емкости в цепях преобразования не дают малого времени восстановления канала для последующей регистрации очередного импульса. Альтернативным методом, лишенным этих недостатков, является преобразование сигнала во временной интервал с последующим измерением длины преобразованного импульса. Применяя заданное значение порога срабатывания дискриминатора, можно добиться нужной

длительности импульса и заданной быстроты считывания сигнала. Таким образом, была выбрана схема зарядово-временного преобразователя с заданным порогом (Time-Over-Threshold или ToT метод). Для его реализации необходимо было сконструировать преобразователь заряд-время и обеспечить надежное и быстрое считывание временного промежутка результата такого преобразования. В качестве преобразователя была выбрана схема одновибратора на операционном усилителе с быстрым затуханием. Принципиальная схема канала электроники по методу ToT представлена на Рис. 8.23рис. 23.

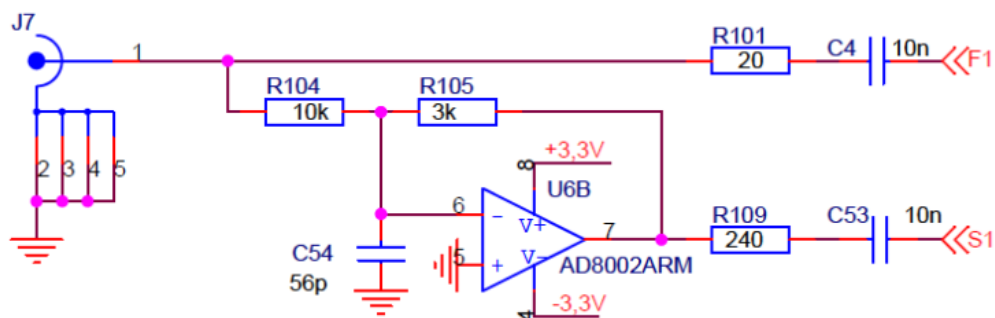


Рис. 8.23 – Принципиальная схема преобразователя заряд-временной интервал

Сигнал с ФЭУ поступает на схему, собранную на ОУ AD8002. Емкость на входе и сопротивление в цепи обратной связи и на входе задают необходимую функцию преобразования. Далее прямой сигнал с ФЭУ и выработанный импульс поступают на каналы дискриминатора, собранные на специальной микросхеме NINO, которая обеспечивает выработку импульса, а также имеет внутри цепи управления и коррекции сигналов для более гибкой настройки канала преобразователя. Вид платы ToT, сконструированной в ИЯИ, показан на Рис. 8.24 слева.

Модуль ToT представляет собой 8-ми каналный преобразователь с дифференциальным считыванием импульсов. Форм-фактор данного модуля был выбран с расчетом на то, что длительность получаемых импульсов можно было считывать стандартной платой регистрации временных импульсов TRB3, разработанной в ГСИ и применяемой для считывания других детекторов эксперимента ХАДЕС. Внешний вид платы TRB3 представлен на Рис. 8.24 справа.

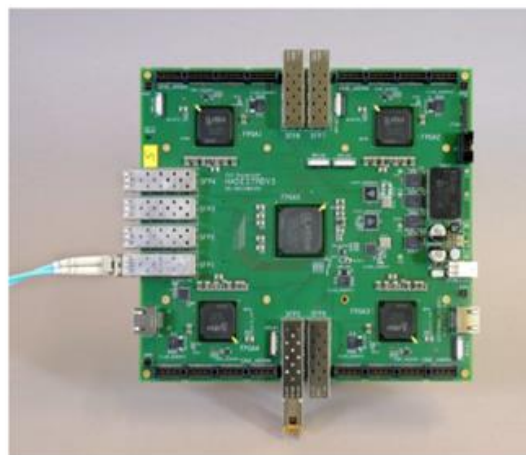


Рис. 8.24 – Слева модуль ToT преобразователя; справа, внешний вид платы TRB3 (многоканальная система регистрации временных отсчетов — Time Readout Board)

Модули TRB3, которые использовались для оцифровки и считывания импульсов с кварцевого годоскопа, были подключены в общую систему сбора данных электромагнитного калориметра. Триггерный сигнал вырабатывался на основе принятия решения по множественности срабатывания время-пролетного детектора (TOF) и детектора RPC (Resistive Plate Chambers). По сигналу триггера происходило считывание импульсов, попавших во временное окно 2 мкс. Для контроля и настройки параметров платы ToT-преобразователя каналы электроники были подключены также к цифровому 4-х каналному осциллографу с удаленным управлением. Пример работы электроники считывания переднего кварцевого годоскопа в системе ХАДЕС показан на Рис. 8.25 слева. Цветами показаны: желтый - триггерный сигнал, выработанный установкой ХАДЕС, красным - импульсы с ФЭУ от фрагментов, попавших на кварцевую пластинку номер 1, голубым - импульсы, выработанные электроникой считывания ToT. Как видно из осциллограмм, время считывание электроники позволяет разделить и уверенно считать сигналы от импульсов, пришедших друг за другом в пределах 50нс. На Рис. 8.25 справа показаны сигналы, выработанные по триггеру ХАДЕС для двух пластин кварцевого годоскопа, номер 1 (дальней от пучка) и номер 2 (ближе к центру пучка). Хорошо видна разница в загрузках этих каналов электроники.

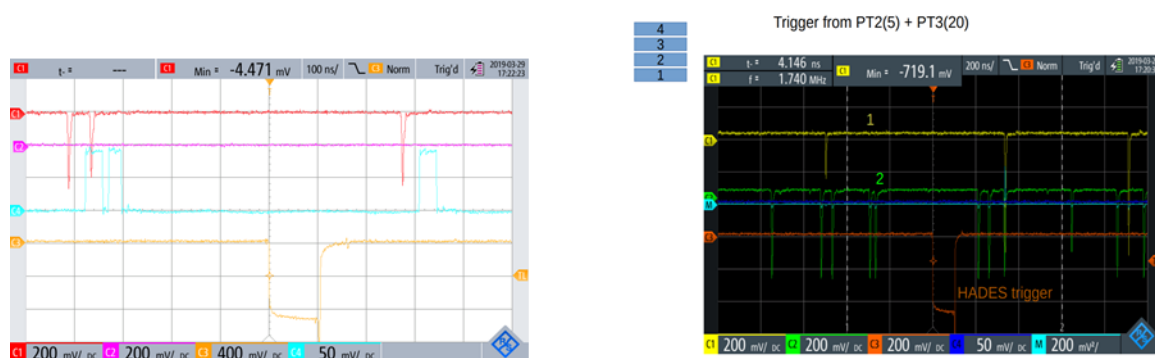


Рис. 8.25 – Слева, осциллограммы работы канала электроники ToT; справа осциллограммы работы канала электроники ToT двух кварцевых пластин годоскопа, одной - далеко от пучка (желтым) и другой - ближе к пучку (зеленым)

Для того, чтобы учесть нелинейность преобразования заряда во временной промежутки и восстановить амплитуду первоначального сигнала, канал ToT электроники требуется прокалибровать. Результат такой калибровки представлен на Рис. 8.26.

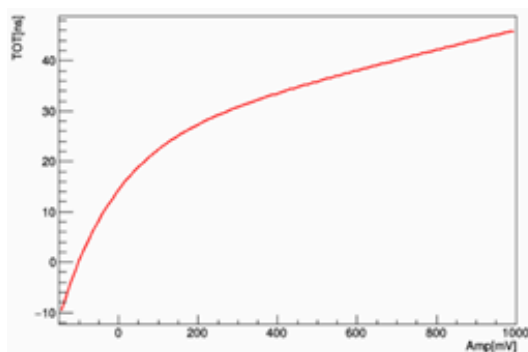


Рис. 8.26 – Функция преобразования амплитуды во временной промежутки ToT

Калибровка производилась следующим образом. Один из каналов электроники считывался одновременно при помощи преобразователя ToT и непосредственным способом оцифровки с помощью цифрового многоканального модуля CAEN DT5742, который позволяет измерять формы импульсов с точностью оцифровки 0.2нс. По результатам измерений была составлена функция, состоящая из суммы двух экспонент с разными весами. Далее обратным преобразованием можно по измеренному времени ToT восстановить начальную амплитуду сигнала.

Экспериментальный вид спектра, измеренный на сеансе с помощью одной из пластин кварцевого годоскопа, показан на *Рис. 8.27*. Хорошо виден пик, соответствующий пучковым ионам серебра, прошедшим через пластину кварцевого годоскопа.

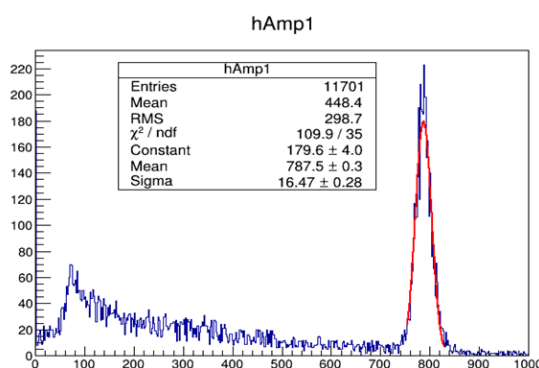


Рис. 8.27 – Спектр сигнала, полученного на пучке серебра Ag45+ и 1% серебряной мишени

По отношению ширины пика серебра и его амплитуде видно, что разрешение годоскопа при этом составляет  $\sim 2\%$ . Учитывая заряд ядра данного иона серебра ( $Z=45$ ), количество фотоэлектронов при этом получается порядка 1.1 на одну минимально ионизирующую частицу (с зарядом  $Z=1$ ). Это говорит о том, что получить отдельные пики фрагментов с  $Z$  меньшими, чем серебро, очень трудно. На *Рис. 8.28* показаны время-амплитудные спектры сигналов с канала электроники пластинки номер 2 (ближе к оси пучка). При этом триггер PT2 - это триггер со множественностью срабатывания TOF+RPC  $> 5$ , а триггер PT3 - со множественностью TOF+RPC  $> 20$ . Хорошо видно пятно непроизводивших в мишени ядер серебра, а также "хвост" фрагментов от реакции Ag+Ag.

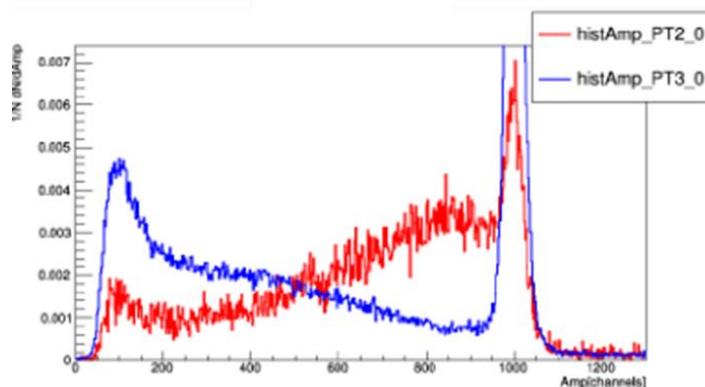


Рис. 8.28 – Амплитудные спектры для триггера PT2 и PT3

8.3.3 Подготовка электромагнитного калориметра ECAL к сеансу на установке ХАДЕС и экспертный контроль его работы во время физического сеанса 2019 г., испытание и подготовка модулей 5-го сектора ECAL для монтажа на ХАДЕС

Группа ИЯИ РАН в сотрудничестве с группами из Чехии и Германии ведет работу по созданию и запуску новой детекторной системы установки ХАДЕС – 978-канального электромагнитного калориметра ECAL<sup>7,8</sup>, дополняющего и расширяющего экспериментальные возможности дилептонного спектрометра ХАДЕС на ускорителе SIS18 в ГСИ (г. Дармштадт, Германия). ECAL, установленный в передней области азимутальных углов  $16^{\circ} < \theta < 45^{\circ}$ , улучшит разделение электронов (позитронов) и пионов с импульсами, большими 400 МэВ/с в измерениях спектров инвариантных масс дилептонных пар в эксперименте ХАДЕС в энергетической области SIS18 и SIS100 (FAIR). ECAL позволит также выполнить точные измерения инклюзивных сечений рождения  $\pi^0$ -,  $\eta$ -мезонов и фотонов в столкновениях тяжёлых ионов при энергии пучка 1 – 10 А GeV. Тесты детекторных ECAL-модулей, проведенные ранее на пучке фотонов в MAMI (University Mainz, Germany)<sup>9</sup>, и детальное моделирование показали, что энергетическое разрешение ECAL (5 - 6) % /  $\sqrt{E(\text{GeV})}$  дает возможность провести идентификацию  $\eta$ -мезонов в предстоящих в 2020 – 2021 гг. физических экспериментах/

Базовая конструкция электромагнитного калориметра ECAL на установке ХАДЕС (Рис. 8.29) определяется геометрией установки ХАДЕС – шесть отдельных секторов, покрывающих полярные углы между  $16^{\circ}$  и  $45^{\circ}$  и почти полный азимутальный угол. Общая эффективная рабочая площадь ECAL составляет около 8 м<sup>2</sup>. ECAL состоит из 978 черенковских детекторных модулей с радиаторами на основе свинцового стекла (163 модуля в каждом секторе).

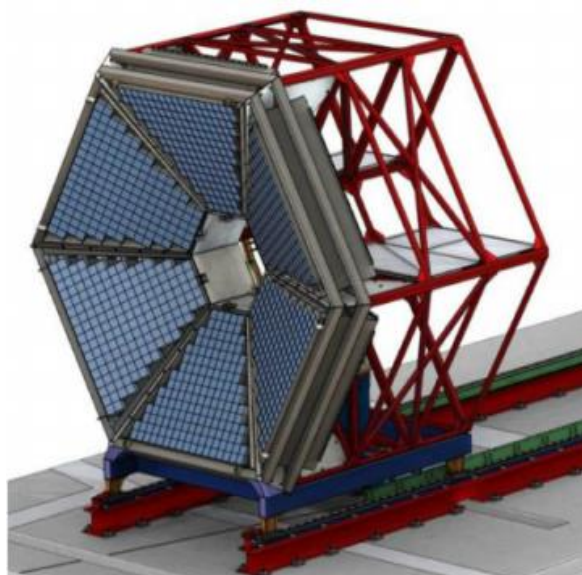


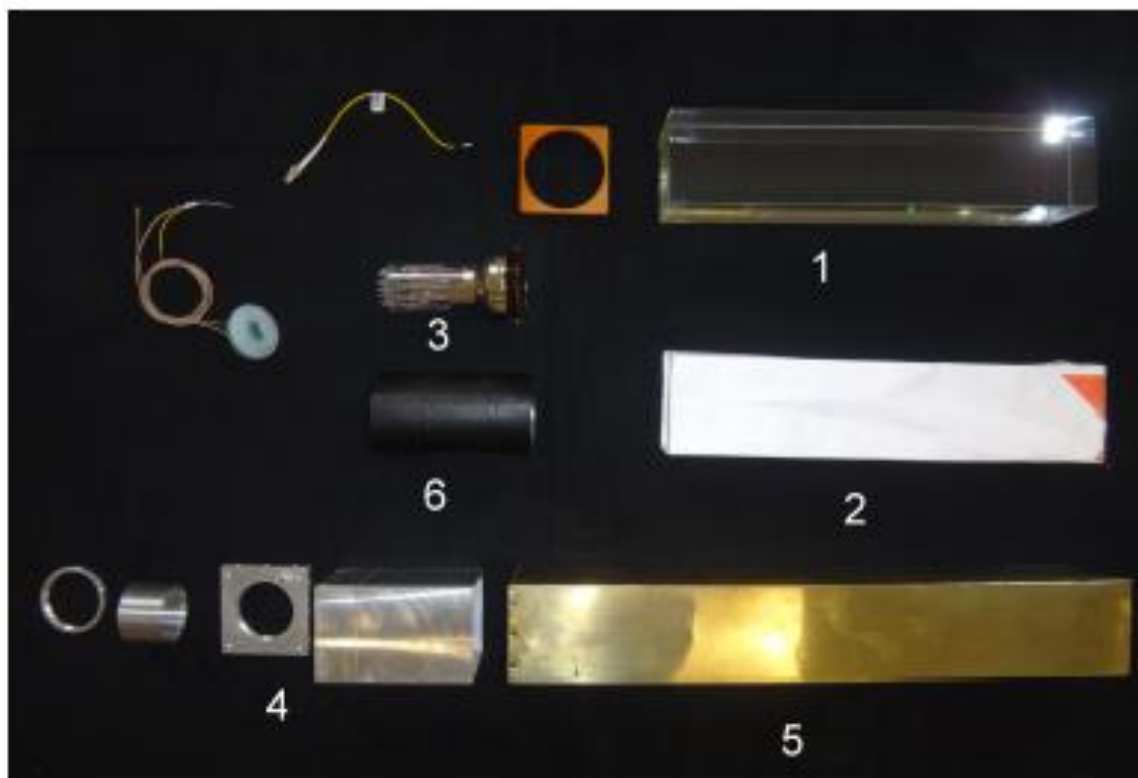
Рис. 8.29 – Конструкция электромагнитного калориметра ECAL на установке ХАДЕС

<sup>7</sup> Svoboda O, Blume C, Czyżycki W at al. Electromagnetic calorimeter for the HADES@FAIR experiment Journal of Instrumentation 9 C05002 (2014).

<sup>8</sup> Czyżycki W at al. Electromagnetic Calorimeter for HADES arXiv: 1109.5550 (2011).

<sup>9</sup> P. Rodriguez-Ramos et al. Electromagnetic Calorimeter for HADES Experiment, EPJ Web of Conferences 81, 06009 (2014).

Каждый черенковский детекторный ECAL-модуль (Рис. 8.30) состоит из радиаторного блока из свинцового стекла CEREN25 (1) размером 92×92×420 мм, обернутого бумагой фирмы Tyvek (2), ФЭУ (3) с защитной алюминиевой крышкой (4), корпуса детекторного модуля из латуни (5) и цилиндрического магнитно-защитного экрана из сплава на основе Ni (6), изготовленного фирмой Aaronia (Germany). Свинцовое стекло CEREN25 имеет следующие основные свойства: радиационная длина ( $X_0$ ) – 2,51 см, показатель преломления – 1,708 (при  $\lambda = 400$  нм) и радиус Мольера – 3,6 см.



1 – радиаторный блок из свинцового стекла CEREN25; 2 – бумага фирмы Tyvek; 3 – ФЭУ; 4 – защитная алюминиевая крышка; 5 – корпус детекторного модуля из латуни; 6 – цилиндрический магнитно-защитный экран из сплава на основе Ni, изготовленного фирмой Aaronia (Germany)

Рис. 8.30 – Конструкция черенковского ECAL-модуля

При прохождении релятивистской частицы через радиатор из свинцового стекла развиваются электромагнитный или адронный ливни. Частицы ливня излучают в радиаторе черенковский свет, который регистрируется ФЭУ. Амплитуда выходного сигнала пропорциональна энергии первичной частицы (лептона или фотона).

В основном модули ECAL укомплектованы ФЭУ Hamamatsu R6091 (3-дюймовый фотокатод). ФЭУ THORN EMI (1,5-дюймовый фотокатод) используются в некоторых модулях из-за проблем с финансированием закупки новых ФЭУ Hamamatsu R6091.

В 2019 г. продолжались начатые ранее работы по стендовым испытаниям детекторных ECAL-модулей как на космическом излучении, так и на световых импульсах от LED-оптической системы, монтажу испытанных модулей в секторах основной конструкции ECAL, испытанию систем входной электроники, системы накопления и считывания экспериментальных данных. Проведены подготовка ECAL к сеансу на установке ХАДЕС и экспертный контроль его работы во время (Ag-Ag)-сеанса в феврале-марте 2019 г.



В отчетный период 2019 г. выполнены следующие основные работы:

- к началу (Ag-Ag)-сеанса на ХАДЕС в феврале-марте 2019 г. были полностью собраны 4 сектора ECAL со 163 модулями в каждом секторе и проведено их тестирование в собранных секторах на космическом излучении.
- проведены временная и амплитудная калибровка секторов ECAL и экспертный контроль его работы во время (Ag-Ag)-сеанса в феврале-марте 2019 г. на установке ХАДЕС.
- выполнено усовершенствование конструкции электростатической защиты в корпусах детекторных модулей в ECAL-секторах № 2 и 6 с целью улучшения шумовых характеристик сигналов с ФЭУ. Проведены повторное тестирование и монтаж секторов № 2 и 6 на калориметре ECAL.
- на космическом излучении и световых импульсах от LED-оптической системы проведены испытания и выбор рабочих значений HV-напряжений для ФЭУ в 163 модулях 5-го сектора (№ 4) калориметра и подготовка модулей к установке их на ХАДЕС в конце 2019 г.

Перед началом физического (Ag-Ag)-сеанса на ХАДЕС проведено тестирование детекторных модулей в собранных 4-х секторах ECAL на космическом излучении. Каждый ECAL-модуль тестировался на ХАДЕС “in-situ” после установки модуля на специальной платформе ECAL. Испытания ECAL-модулей на космическом излучении были проведены непосредственно в ECAL-секторах “in-situ”. Для этих тестов был использован испытательный стенд, состоящий из NIM триггерной электроники, анализатора аналоговых сигналов CAEN Desktop Digitizer DT5742 и CAEN HV-системы высоковольтного питания. Фотография со схемой испытаний “in-situ” на космическом излучении представлена на Рис. 8.31 в центре. Красной линией условно показано, что космические мюоны регистрируются ECAL-модулями в секторных рядах, при этом верхние и нижние модули используются в качестве триггерных детекторов.



Рис. 8.31 – Слева– фотография 4-канального испытательного стенда для измерения ECAL-модулей на космических мюонах в детекторной лаборатории GSI; в центре – фотография со схемой испытаний на космических мюонах ECAL-модулей “in-situ” в секторных рядах, справа – собранный из 4 секций калориметр, готовый к физическому сеансу

В феврале-марте 2019 г. на установке ХАДЕС был проведен первый сеанс набора данных с включенными 4 секторами калориметра ECAL. С 27 февраля по 29 марта исследовались столкновения ядер серебра при энергии пучка 1,58 ГэВ, а с 29 марта по 01 апреля – при энергии пучка 1,23 ГэВ.

Используя экспериментальные данные детекторов Start, RICH, MDC и RPC установки ХАДЕС были проведены временная и амплитудная калибровки калориметра ECAL. Для временной калибровки использовались наиболее быстрые частицы – электроны и  $\gamma$ -кванты, селекция которых производилась по энерговыделению в ECAL. Из *Рис. 8.32* видно, что благодаря отбору частиц по амплитуде, удастся улучшить калибровку детектора по времени.

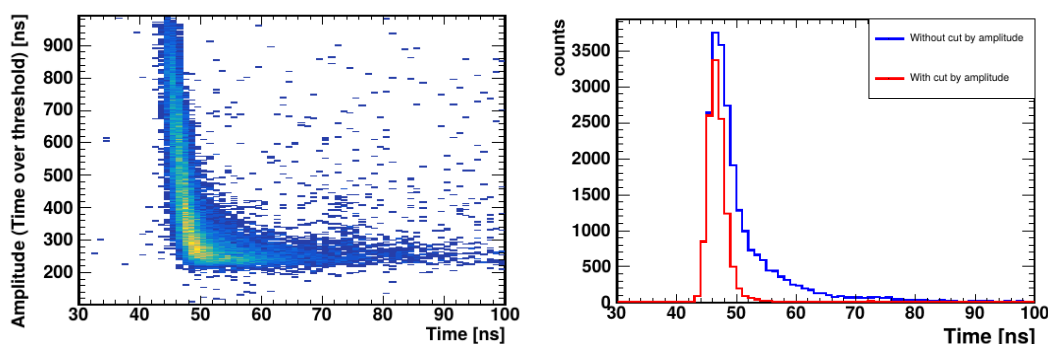


Рис. 8.32 – Амплитудно-временной спектр (слева) и временной спектр (справа) модуля ECAL

Для амплитудной калибровки использовались данные всех детекторов установки ХАДЕС. По данным RICH и RPC производился отбор электронов, в то время как данные детектора MDC позволяли определить кривизну их траектории в магнитном поле и, таким образом, импульс. Отклик детектора в зависимости от импульса аппроксимировался квадратичной функцией (*Рис. 8.33*). Полученные результаты были представлены на конференции FAIRNESS2019 в Генуе, Италии<sup>10</sup>.

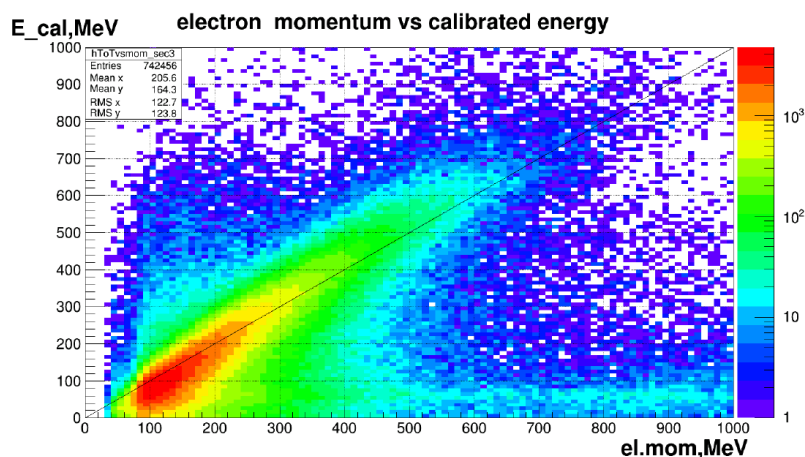


Рис. 8.33 – Амплитудная калибровка детектора ECAL

<sup>10</sup> Материалы конференции «FAIR next generation scientists - 6th Edition Workshop» A. Shabanov et al. Segmented Cherenkov Electromagnetic Calorimeter (ECAL) of the HADES experiment on SIS18 (GSI)". Статья принята к печати в журнале "Open Access Journal of Physics: Conference Series (JPCS)".

Для проверки качества данных с детектора ECAL была разработана программа событийного мониторинга ECAL event display. Программа позволяет наглядно представлять отклик детектора на отдельные события, а также сравнивать его с работой детектора RPC, расположенного вплотную к электромагнитному калориметру ECAL (Рис. 8.34). Синим фоном обозначена геометрия детектора ECAL; черные точки – координаты хитов в детекторе RPC; красные точки – координаты хитов в детекторе ECAL; Зеленые квадраты – сработавшие ячейки детектора ECAL; желтые квадраты – ячейки с наибольшей амплитудой в кластере. Отсутствие хитов в детекторе RPC вблизи сработавшей ячейки детектора ECAL означает, что отклик детектора вызван нейтральной частицей:  $\gamma$ -квантом или нейтроном, которые можно различить в анализе по времени пролета. Событийный анализ данных позволил выявить недостатки алгоритма ClusterFinder, которые планируется исправить в ходе дальнейшей работы. Данные результаты были представлены на совещании Коллаборации NADES в г. Кракове (Польша), сентябрь 2019 г.

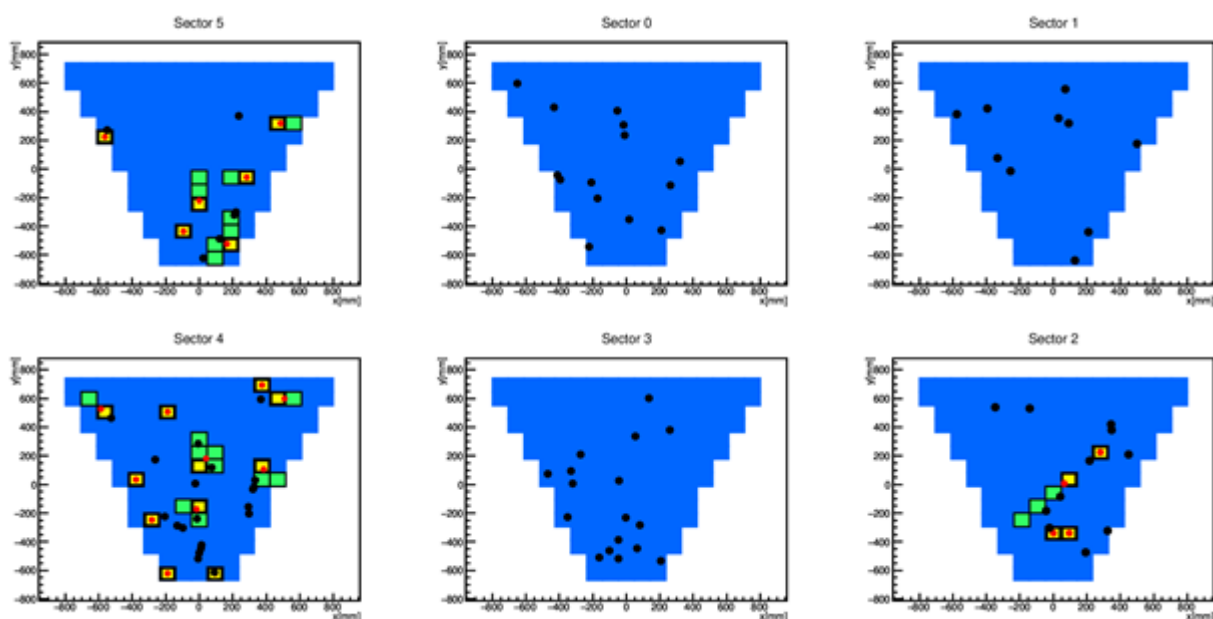


Рис. 8.34 – ECAL event display – событийный мониторинг данных с электромагнитного калориметра ECAL.

В 2019 году выполнено усовершенствование конструкции электростатической защиты в корпусах детекторных модулей в ECAL-секторах № 2 и 6 с целью улучшения шумовых характеристик сигналов с ФЭУ.

В процессе введения в эксплуатацию секторов № 2 и 6 ECAL в отдельных детекторных модулях наблюдались некоррелированные сигналы высокой амплитуды и шумовые импульсы. Исследование причины этого явления показало чрезвычайную чувствительность шумовой компоненты сигнала с ФЭУ к геометрическому взаимному расположению магнитного экрана и ФЭУ внутри корпуса модуля. Решение проблемы было найдено в применении каптон-медного защитного слоя, располагаемого по всей длине ФЭУ с фотокатодом. ФЭУ Hamamatsu R6091 (3-дюймовый фотокатод) с тонким каптон-медным защитным слоем показан на Рис. 8.35.



Рис. 8.35 – ФЭУ Hamamatsu R6091 (3-дюймовый фотокатод) с тонким каптон-медным защитным слоем.

После усовершенствования конструкции электростатической защиты в детекторных модулях были проведены повторное LED-тестирование и монтаж секторов № 2 и 6 на платформу калориметра ECAL. Заключительный этап монтажа сектора № 6 на платформу калориметра ECAL представлен на *Рис. 8.36*.



Рис. 8.36 – Заключительный этап монтажа сектора № 6 на платформу калориметра ECAL.

На космическом излучении и световых импульсах от LED-оптической системы проведены испытания и выбор рабочих значений HV-напряжений для ФЭУ в 163 модулях 5-го сектора (№ 4) калориметра ECAL и подготовка модулей к установке на ХАДЕС в декабре 2019 г.

Каждый ECAL-модуль тестировался на стенде, созданном группой ИЯИ РАН в детекторной лаборатории GSI. Все ECAL-модули были испытаны от световых импульсов LED-оптической системы и на космических мюонах: были выбраны значения рабочего HV-напряжения на ФЭУ Hamamatsu R6091, исходя из требуемой величины средней амплитуды сигнала -1500 мВ. Для отдельных модулей проведена оценка амплитудного разрешения спектра космических частиц.

Фотография стенда в детекторной лаборатории GSI представлена на Рис.31 (а), на котором ECAL-модули с радиатором показаны в середине, при этом космические частицы проходят через радиатор в вертикальном направлении (на Рис.31 (а) условно показаны красной стрелкой). В каждом измерительном канале 2 сцинтилляционных детектора, расположенных в верхнем и нижнем положении от радиатора ECAL-модуля и включенных на совпадение, формируют триггер вертикального прохождения космической частицы через радиатор. На Рис. 8.37 приведена фотография стенда для испытаний ECAL-модулей от световых импульсов LED-оптической системы.

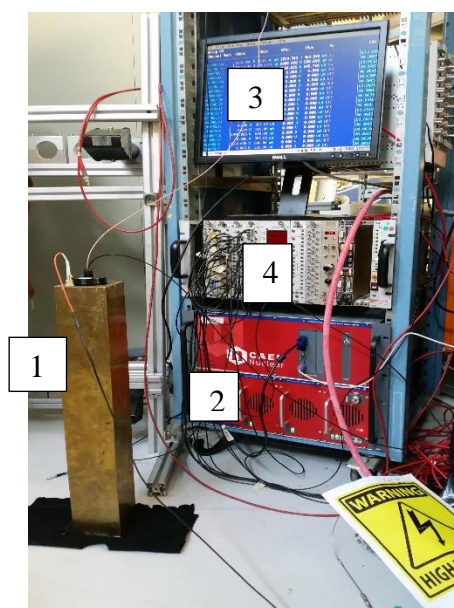
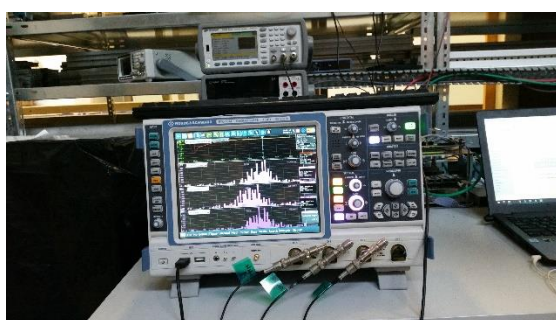
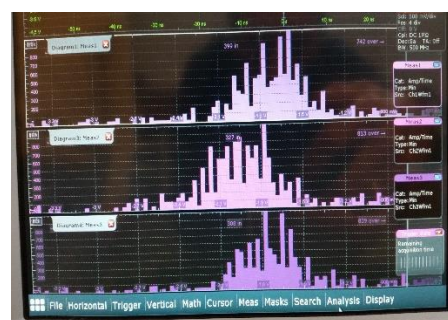


Рис. 8.37 – Фотография стенда для испытаний ECAL-модуля от световых импульсов LED-оптической системы. 1 – испытуемый ECAL-модуль; 2, 3 – CAEN-система HV-питания; 4 – NIM-крейт с триггерной электроникой

Сбор, накопление и анализ данных проводились на 4-канальном цифровом осциллографе ROHDE&SCHWARZ RTO 1044 (Рис. 8.38 а). В качестве примера на Рис. 8.38 б показаны набранные спектры от космических мюонов для 3 ECAL-модулей.



(а)



(б)

Рис. 8.38 – (а) – 4-канальный цифровой осциллограф ROHDE&SCHWARZ RTO 1044; (б) – пример набранных спектров от космических мюонов для 3 ECAL-модулей

## 8.4 Анализ экспериментальных данных, полученных на установке ХАДЕС

### 8.4.1 Исследование коллективных потоков заряженных частиц в столкновениях Au+Au при энергии 1.23 ГэВ на нуклон

Одной из главных целей экспериментальных программ по изучению столкновений тяжелых ионов как на ускорителях RHIC, SPS и SIS18 - это изучение транспортных свойств сильно взаимодействующей материи. Анизотропные потоки, проявляющие себя в угловой неоднородности испускания частиц в плоскости, поперечной направлению пучка, являются одной из наблюдаемых чувствительных к транспортным свойствам материи: уравнению состояния, скорости звука и отношению удельной вязкости сдвига к энтропии  $\eta/s$ . Угловая анизотропия рожденных частиц может быть количественно описана коэффициентами  $v_n$  в разложении азимутального распределения их импульсов в ряд Фурье:

$$\frac{dN}{d(\phi - \psi_s^n)} = \frac{1}{2\pi} \left( 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} v_n \cos(n[\phi - \psi_s^n]) \right)$$

где  $\phi$  – азимутальный угол импульса для частиц данного типа,  $\psi_s^n$  – азимутальный угол плоскости симметрии порядка  $n$ . Новые возможности по изучению коллективных азимутальных потоков имеются и в области энергий порядка 1-2 ГэВ на нуклон благодаря недавно полученным на установке HADES экспериментальным данным с высокой статистикой. Изучение зависимости коллективных потоков разных гармоник от центральности и типа частиц, от поперечного импульса и быстроты рожденных частиц является основным инструментом для получения информации об уравнении состояния ядерной материи. На Рис. 8.39 показаны предварительные результаты коллаборации HADES для зависимости от быстроты направленного потока ( $v_1$ ), эллиптического потока ( $v_2$ ) и треугольного потоков ( $v_3$ ) протонов образованных в столкновениях Au+Au при энергии 1.23 ГэВ на нуклон.

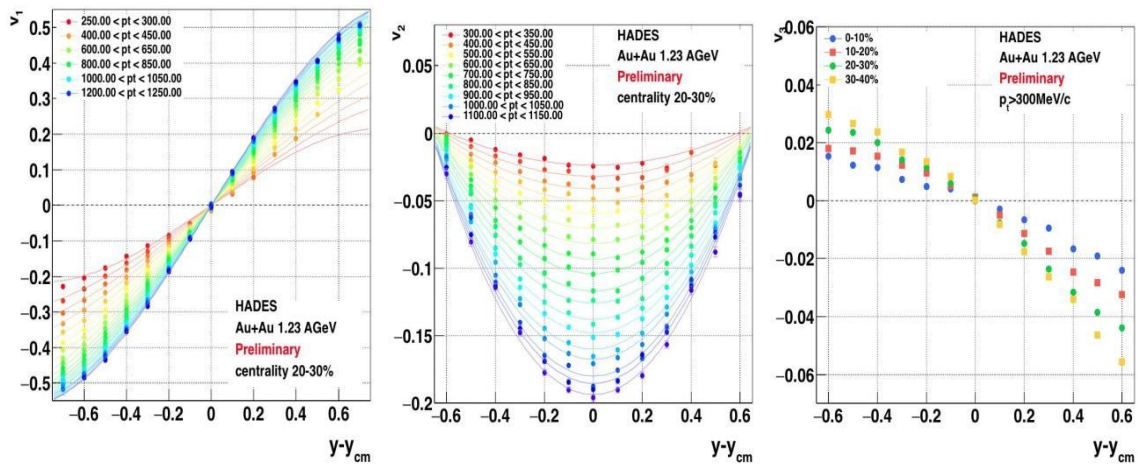


Рис. 8.39 – Предварительные результаты коллаборации ХАДЕС для зависимости от быстроты для направленного потока ( $v_1$ ), эллиптического потока ( $v_2$ ) и треугольного потоков ( $v_3$ ) протонов образованных в столкновениях Au+Au при энергии 1.23 ГэВ на нуклон

В 2018 г. группа НИЯУ МИФИ совместно с ИЯИ занималась изучением возможных систематических эффектов в результатах по измерениям коллективных потоков. В частности, был закончен анализ систематики в определении плоскости симметрии столкновений и ее разрешения.

Проведенный анализ показывает, что метод двух случайных подсобытий, который традиционно использовался для определения разрешения плоскости события на протяжении последних нескольких лет, ведет к систематическому завышению величины разрешения на 10-20% в зависимости от центральности. Основной причиной этого является присутствие так называемых непотоковых эффектов, вызванных близко действующими корреляциями хитов, не связанных с общей плоскостью симметрии столкновения. Предложенный метод трех подсобытий, разделенных интервалом по псевдо-быстроте, позволяет решить эту проблему. Поэтому для анализа использовался именно метод 3-х подсобытий, которые определяются следующим, представленным на *Рис. 8.40* образом:

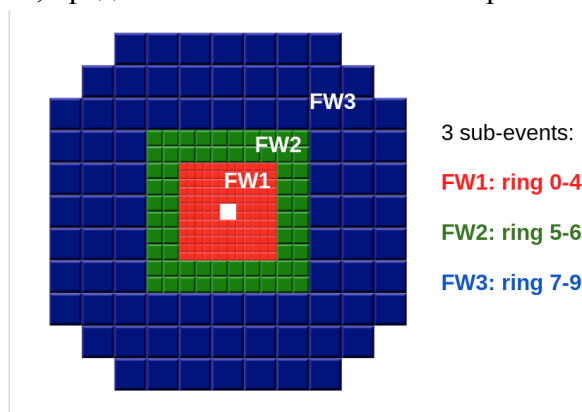


Рис. 8.40 – Определение подсобытий системы регистрации спектров Forward Wall

С использованием этого метода удалось воспроизвести результаты, представленные ранее на совещании коллаборации в 2018 году, *Рис. 8.41*.

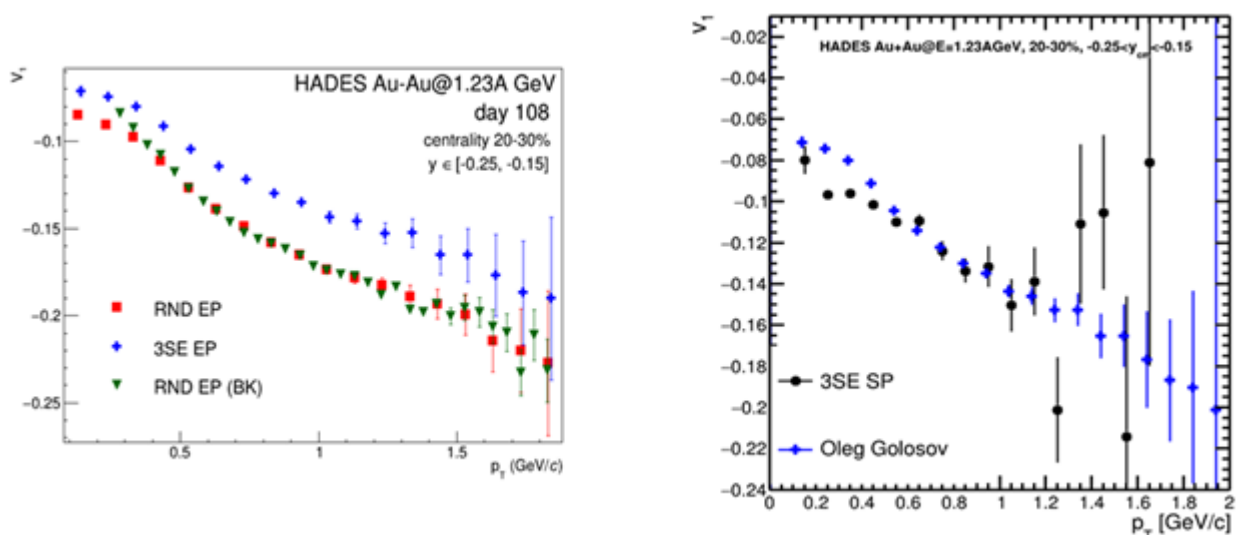


Рис. 8.41 – Сравнение результатов, полученных при помощи QnCorrections Framework с данными, представленными в 2017 году на конференции Quark Matter и данными, представленными на совещании коллаборации в 2018 году

Измерение направленного потока в эксперименте HADES производилось методом скалярного произведения, согласно формуле:

$$v_n = \langle u_n Q_n \rangle / R_n$$

где  $u$ -вектора:

$$u = e^{i\phi},$$

$\phi$  — азимутальный угол рожденной частицы, а  $Q$ -вектора определяются суммой  $u$ -векторов в каждом событии:

$$Q = \sum_{k=1}^N e^{i\phi_k} = V_n e^{i\phi_{EP}},$$

Разрешение плоскости симметрии  $R_1^{FW}$  измерялось методом трех подсобытий. В методе трех подсобытий используются плоскости симметрии, построенные с использованием хитов, зарегистрированных в детекторе Forward Wall. За счет построения  $Q$ -векторов с использованием спектров, то есть частиц, зарегистрированных в различных быстрых диапазонах относительно рожденных частиц, достигается подавление корреляций, не связанных с потоками.

$$R_n = \sqrt{\frac{\langle Q_n^A Q_n^B \rangle \langle Q_n^A Q_n^C \rangle}{\langle Q_n^C Q_n^B \rangle}}$$

Одной из задач, выполненных в 2019 году, являлась адаптация пакета QnCorrections Framework к данным эксперимента HADES. QnCorrections Framework<sup>11</sup> - это пакет объектно-ориентированных библиотек, написанных на языке C++, предназначенных для корректировки  $Q$ -векторов на неоднородность акцептанса по азимутальному углу. Для конфигурации набора детекторов используется менеджер, позволяющий моделировать как трековые, так и каналные детекторы, для каждого из которых можно задать собственный набор поправок. Поправки могут вводиться дифференциально как функции переменных события и/или трека. Последовательность корректировки  $Q$ -векторов строго определена: сначала центрирование, затем диагонализация и масштабирование. В результате перечисленных операций распределение  $Q$ -векторов среди всех событий становится изотропным, как в случае идеального акцептанса, Рис. 8.42.

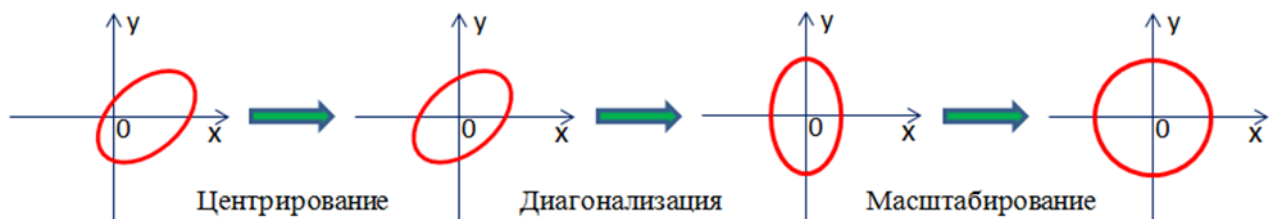


Рис. 8.42 – Влияние поправок на неоднородность акцептанса по азимутальному углу на форму распределения  $Q$ -векторов

С использованием QnCorrections Framework методом трёх подсобытий произведена оценка вклада коррекций высших порядков, то есть диагонализации и масштабирования на итоговый результат. Диагонализация и масштабирование использовались для коррекции  $u$ -вектора, но несмотря на это, в области малого поперечного импульса, вклад поправки составляет порядка 5%, Рис. 8.43.

<sup>11</sup> V. Gonzalez, J. Onderwaater, I. Selyuzhenkov, <https://github.com/FlowCorrections/FlowVectorCorrections> (2018)



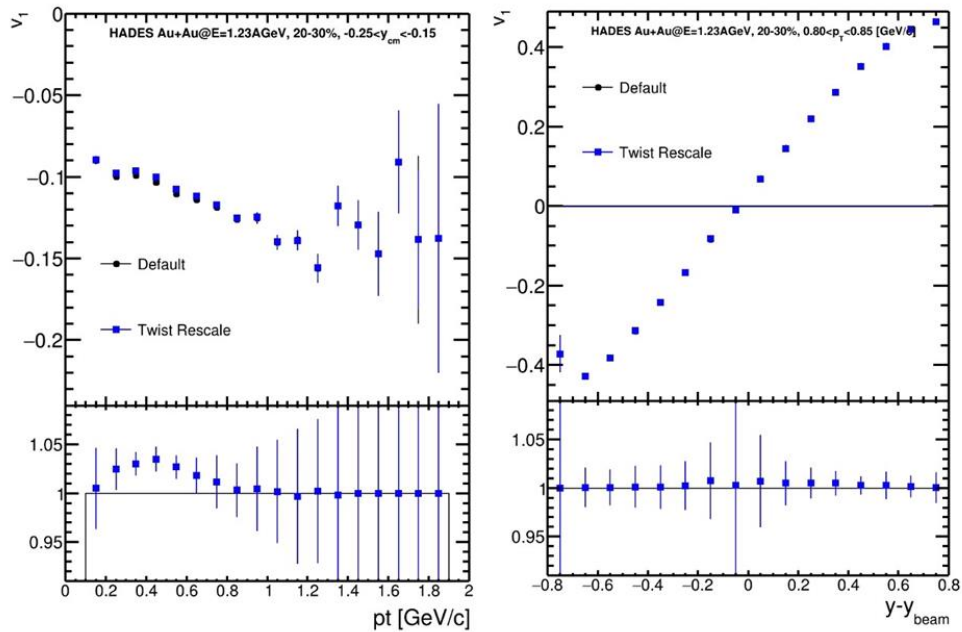


Рис. 8.43 – Сравнение зависимостей направленного потока протонов от поперечного импульса (слева) и быстроты в системе центра масс (справа), полученных с применением и без применения поправок высокого порядка (диагонализации и масштабирования) на неоднородность аксептанса MVD по азимутальному углу

Использование метода трёх подсобытий даёт на выходе 6 независимых наблюдаемых: значения потоков для различных подсобытий и различных компонент Q- и u-векторов, которые должны между собой быть согласованы. Как представлено на *Рис. 8.44*, различие между компонентами и подсобытиями порядка 5%.

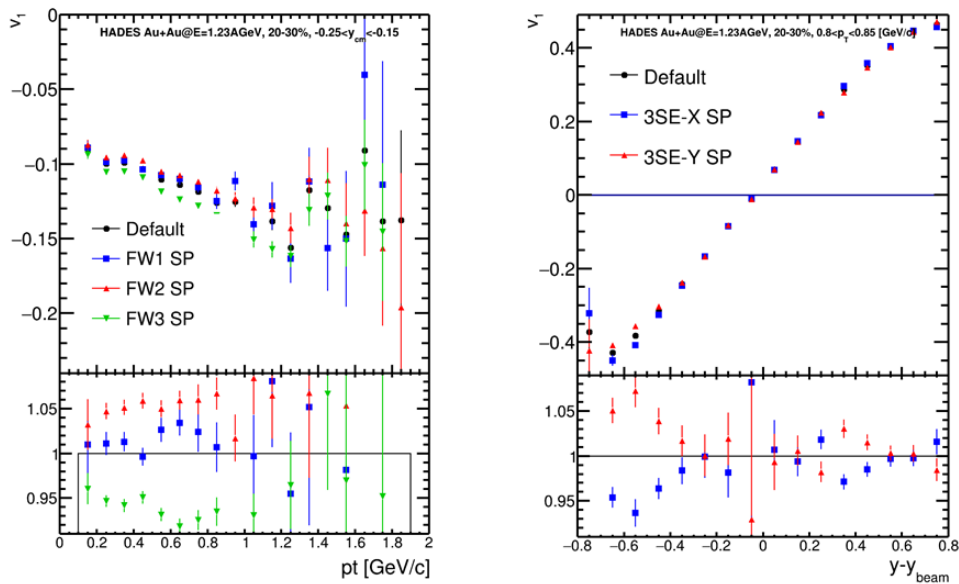


Рис. 8.44 – Сравнение зависимостей направленного потока протонов от поперечного импульса (слева) и быстроты в системе центра масс (справа), измеренных относительно плоскостей симметрии спектаторов пучка, полученных с использованием сигнала из различных областей Forward Wall

Разделение системы регистрации спектаторных частиц на подсобытия имеет недостаток. Поскольку, второе подсобытие определено, как 5 и 6 кольца FW, между соседними подсобытиями возникает корреляция, не связанная с плоскостью симметрии события. Данный эффект завышает разрешение второго подсобытия в центральных событиях. Для минимизации этого эффекта между подсобытиями введён зазор в 1 кольцо. Эта поправка позволила сократить разницу между подсобытиями до 5%, Рис. 8.45.

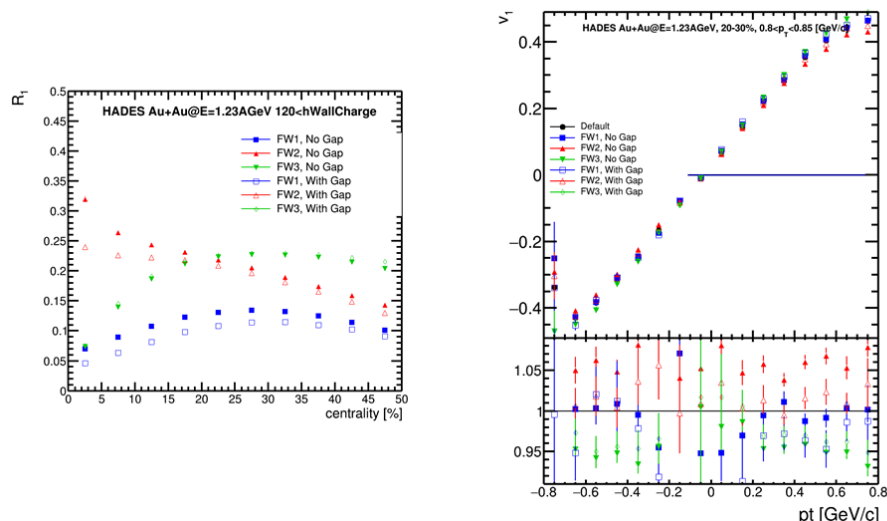


Рис. 8.45 – Слева: сравнение полного разрешения Forward Wall, полученного методами случайных подсобытий и трех подсобытий, Справа: сравнение зависимости направленного потока от поперечного импульса, представленного коллаборацией HADES на конференции QuarkMatter 2017, и полученного с помощью QnCorrections Framework. (центральность 20-30%)

Проведено исследование систематики измерения направленного потока в центральных событиях. Как видно из Рис. 8.46, при центральности 0-10% разница между подсобытиями достигает 20% для первых двух подсобытий.

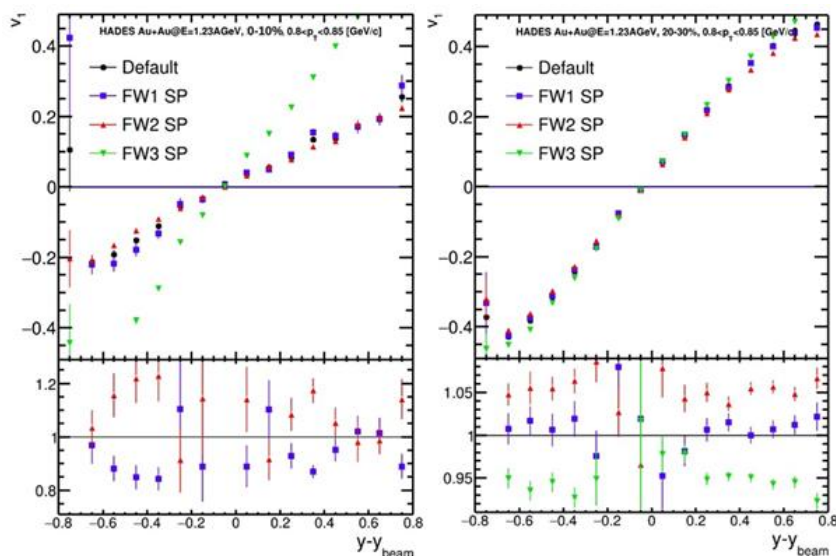


Рис. 8.46 – Зависимость направленного потока протонов от быстроты в системе центра масс, измеренного относительно плоскостей симметрии спектаторов пучка, полученных с использованием сигнала из различных областей Forward Wall для центральных (0-10%, слева) и среднецентральных (20-30%, справа) столкновений

Третье подсобытие, определенное как периферийные кольца Forward Wall, дает значение потока, отличающееся в несколько раз. Такой эффект может быть следствием корреляций рожденных частиц и частиц-наблюдателей в области небольших быстрот.

Адаптация пакета QnCorrections Framework к данным HADES и проведенное исследование зависимости результатов измерения анизотропных потоков от используемого метода оценки плоскости симметрии и метода определения ее разрешения закладывают основу для полноценного систематического анализа анизотропных потоков в столкновениях тяжелых ядер при энергиях эксперимента HADES.

#### 8.4.2 Определение центральности в столкновениях Au+Au при энергии пучка 1.23 ГэВ на нуклон

Процедура, использованная для определения центральности, основана на модели Монте-Карло Глаубера. Данный метод уже использовался ранее в действующих экспериментах STAR и ALICE и будущих CBM на FAIR и MPD на NICA.

Модель Монте-Карло Глаубера описывает процесс столкновения двух ядер и позволяет связать распределения геометрических величин (таких как прицельный параметр, нуклонов-участников и т.д.). Эта часть осуществляется с помощью открытого кода, разработанного группой PHOBOS<sup>12</sup>. Параметры модели Глаубера были подогнаны для описания распределений, полученных из данных. Для этого использовался CBM Centrality Framework<sup>13</sup>. Процедура подгонки заключается в следующем:

- На основе двухкомпонентной модели определяется число  $N_{anc}$  нуклонов-источников (т.е. взаимодействий между нуклонами, из которых рождаются частицы):  $N_{anc}(f) = f N_{part} + (1-f) N_{coll}$ . Здесь  $f$  - искомый параметр. В случае детекторов, регистрирующих рожденные частицы, для каждого нуклона-источника рожденных частиц, с помощью отрицательного биномиального распределения проводится моделирование числа рожденных частиц. Отрицательное биномиальное распределение определяется средним ( $\mu$ ) и параметром  $k$ , связанным с дисперсией. Число рожденных частиц в каждом событии суммируется по всем нуклонам-источникам, что определяет множественность события.
- В случае детектора FW, который регистрирует нуклоны-спектаторы, за число нуклонов-источников принимается число спектаторных протонов. Моделирование числа протонов проводится с помощью биномиального распределения с параметром  $p = 79/197$ , который соответствует вероятности нуклона быть протоном в ядре золота. Далее, для каждого спектаторного протона с помощью отрицательного биномиального распределения моделируется отклик детектора (т.е. вероятность будет ли этот протон зарегистрирован). Заряд, зарегистрированный FW в каждом событии суммируется, что определяет полный сигнал в FW.

В результате моделированное распределение, сравнивается с распределением, полученным из данных, путем подсчета приведенного  $\chi^2$ . Процедура, описанная выше, повторяется для

<sup>12</sup> Improved version of the PHOBOS Glauber Monte Carlo C. Loizides (LBNL), J. Nagle (Colorado U.), P. Steinberg (BNL), SoftwareX 1-2 (2015) 13-18

<sup>13</sup> CBM Centrality Framework V. Klochkov (GSI/Frankfurt University), I. Selyuzhenkov (GSI/NRNU MEPH). <https://git.cbm.gsi.de/pwg-c2f/analysis/centrality>

различных комбинаций параметров  $f$ ,  $\mu$  и  $k$ . В результате находятся параметры, соответствующие минимальному значению  $\chi^2$ . Используя модельные распределения, проводится определение границ классов центральности в соответствии с процедурой [18]. Гистограмма разбивается на равные по площади части, соответствующие классам центральности. На *Рис. 8.47* представлен результат разбиения на классы центральности с использованием множественности RPC и заряда в FW.

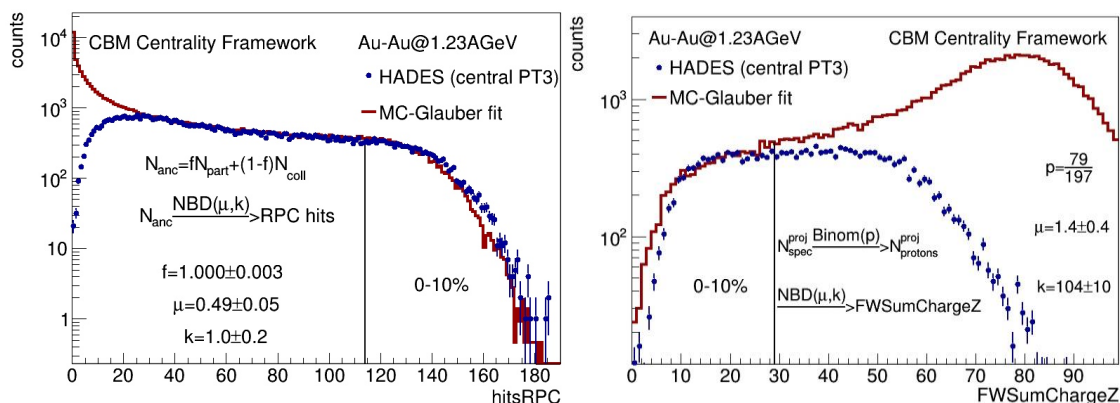


Рис. 8.47 – Результат фитирования распределения множественности детектора RPC (слева) и распределения заряда, зарегистрированного детектором FW (справа).

Зависимость прицельного параметра от центральности, определенной с использованием RPC и FW, представлена на *Рис. 8.48*. Результаты, полученные группой МИФИ, согласуются с результатами, полученными ранее с использованием детекторов RPC+TOF. Однако, видно, что процедура, основанная на данном подходе, неточно воспроизводит экспериментальное распределение по центральности, определенное FW. Связано это с тем, что в текущей процедуре определения центральности с помощью FW не учтены процессы образования фрагментов и отклик детектора на их попадание. Отклик детектора на попадание отдельных протонов учитывался с помощью отрицательного биномиального распределения.

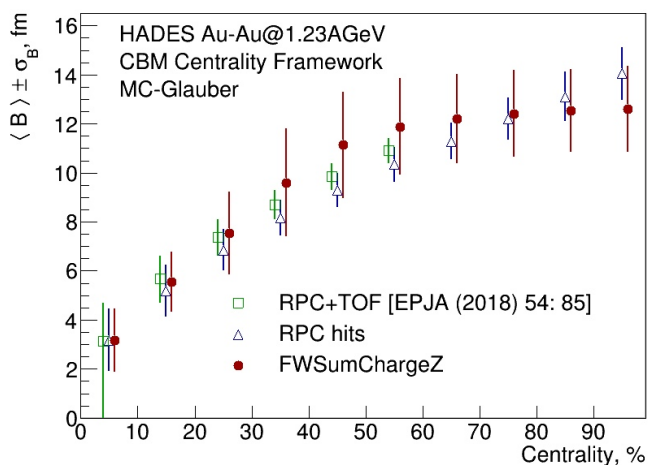


Рис. 8.48. – Зависимость прицельного параметра от центральности. Представлены результаты для детектора RPC, полученные ранее и группой НИЯУ МИФИ, а также первые результаты для детектора FW

### 8.4.3 Изучение свойств ядерной материи в ядро-ядерных столкновениях на малых межнуклонных расстояниях, соответствующих высокой барионной плотности.

Исследование свойств сильно взаимодействующей материи, находящейся в разных фазах, является одной из приоритетных задач физики сильных взаимодействий. Основным методом получения информации об этих свойствах является изучение реакций столкновений тяжелых ионов в широком диапазоне энергий от нескольких ГэВ (GSI) до ТэВ (LHC). В то время как при высоких энергиях изучается область фазовой диаграммы, соответствующая высокой температуре ( $T \approx 200$  МэВ) и барионному химическому потенциалу  $\mu \approx 0$ , эксперименты при низких энергиях направлены на исследование области низких температур ( $T \approx 20-30$  МэВ) и величин  $\mu$ , соответствующих барионной плотности, в 2-3 раза превышающей нормальную ядерную плотность  $\rho_0 = 0.16 \text{ фм}^{-3}$ . Получение данных в неизученной области фазовой диаграммы при ещё больших плотностях является актуальной задачей современной физики сильных взаимодействий, поскольку в этой области ожидается переход холодной адронной материи в кварк-глюонную фазу.

На XXXVI митинге коллаборации NA60 (Дармштадт, март 2019) группой НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ было представлено предложение по расширению программы исследований на ХАДЕСе. Предлагается изучение свойств ядерной материи в ядро-ядерных столкновениях на малых ( $< 1$  ферми) межнуклонных расстояниях, соответствующих высокой барионной плотности, т.е. большой величине барионного химического потенциала  $\mu$ . На Рис. 8.49 показаны кинематические границы образования странных пар  $\Lambda K^+$  и  $\Lambda K^0_S$  в столкновениях ядер золота при энергии  $2.4 \text{ ГэВ}$ .

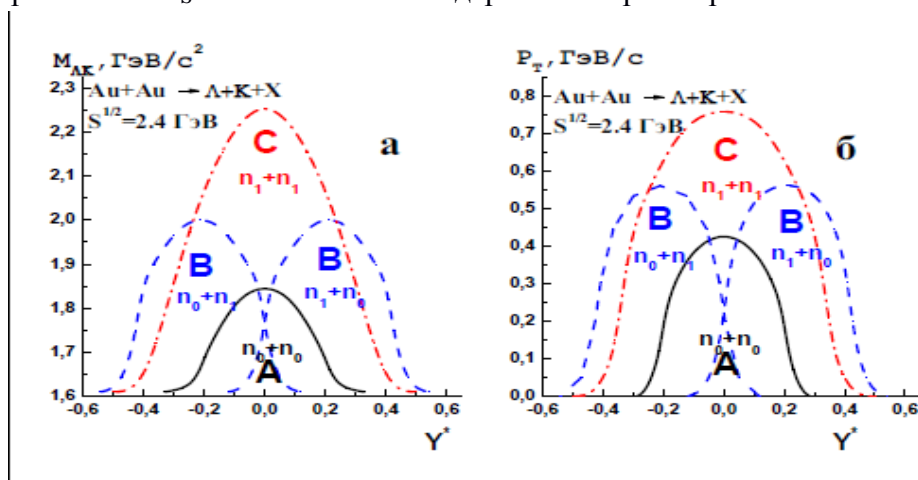


Рис. 8.49 – Кинематика процесса образования пар  $\Lambda K$  в реакции  $\text{Au}+\text{Au}$  при энергии  $S^{1/2}=2,4 \text{ ГэВ}$  для трех возможных комбинаций нуклонных столкновений. а – зависимость инвариантной массы системы  $\Lambda K$  от быстроты  $\Lambda$  гиперона  $Y^*$  в системе центра масс сталкивающихся нуклонов; б – поперечный импульс  $\Lambda$  гиперона как функция  $Y^*$

Сплошной линией показана кинематическая граница рождения пар в столкновениях одиночных ядерных нуклонов с нормальными ферми-импульсами  $\sim 250 \text{ МэВ/с}$  (зона А), пунктирными – границы образования пар в случае, когда нуклон одного из сталкивающихся ядер имеет нормальный ферми-импульс, а его партнер имеет импульс больше  $250 \text{ МэВ/с}$  (зоны В). Наибольший интерес представляют события в зоне С, где их появление возможно только в случае, когда оба нуклона сталкивающихся ядер имеют импульсы, превышающие фермиевские. В этом случае оба нуклона входят в состав компактных двухнуклонных

корреляций, и рождение пар ЛК происходит в зоне, плотность которой в несколько раз больше нормальной ядерной плотности. Рождение странных пар ЛК в области С является редким процессом, однако проведенная оценка показывает, что использование огромной статистики ( $10^{10}$  событий), набранной в эксперименте HADES при изучении столкновений ядер золота, позволит найти достаточное количество событий образования странных пар в области С, свободной от вкладов других столкновений, и получить новую важную информацию о свойствах сверхплотной ядерной материи и роли КХД в генерации ядерных сил.

На XXXVII митинге коллаборации HADES (Краков, сентябрь 2019) группой ИТЭФ было также представлено еще одно предложение по изучению модификации ширины тяжелого гиперона  $\Lambda(1520)$  в ядерной среде. Вычисление сечений инклюзивного образования  $\Lambda(1520)$  пионами на ядрах углерода и вольфрама было выполнено в рамках развитой в ИТЭФ модели рождения адронов на ядрах, основанной на ядерной спектральной функции. Показано, что величины как дифференциальных, так и полных сечений обладают достаточно высокой чувствительностью к полной ширине гиперона  $\Gamma$  в ядерной среде. На Рис. 8.50 показана зависимость полного сечения образования  $\Lambda(1520)$  на ядрах как функция  $f$ . Полная ширина  $\Gamma$  является суммой ширины в свободном пространстве 15.6 МэВ и столкновительной ширины 55 МэВ, предсказанной кирально-унитарной теорией.

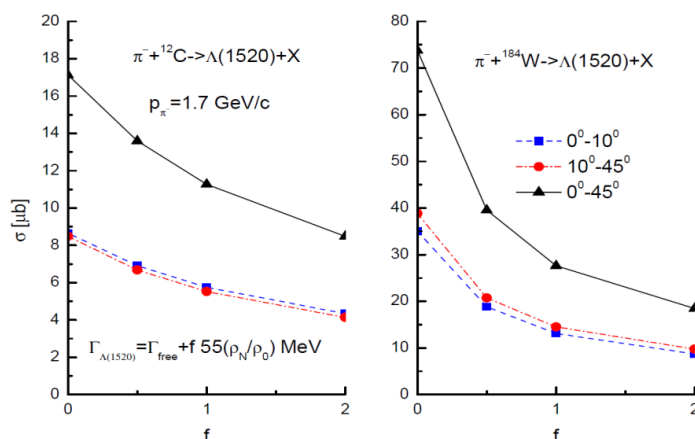


Рис. 8.50 – Зависимость полных сечений инклюзивного образования  $\Lambda(1520)$  гиперона  $\pi^-$  мезонами с импульсом 1.7 ГэВ/с на ядрах углерода и вольфрама от ширины гиперона в ядерной среде

Видно, что изменение сечений в зависимости от ширины достаточно сильное и может быть определено экспериментально. Для этого планируется использовать имеющуюся статистику  $3 \cdot 10^8$  событий столкновений пионов с ядрами углерода и вольфрама. В 2020 году мы планируем получить первую оценку ширины  $\Lambda(1520)$  в ядерной среде.

## 8.5 Заключение

Знаменательным событием в 2019 г. стала публикация в журнале Nature Physics статьи коллаборации HADES «Probing dense baryon-rich matter with virtual photons» (см. <https://doi.org/10.1038/s41567-019-0583-8>), соавторами которой является группа ученых из Института ядерных исследований РАН, НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ и НИЯУ «Московский инженерно-физический институт». В этой статье обсуждаются результаты

эксперимента на установке ХАДЕС по исследованию свойств ядерной материи, которая образуется в столкновениях ядер золота при энергии в системе центра масс сталкивающихся нуклонов 2.4 ГэВ. Методом дилептонной спектроскопии измерено спектральное распределение электрон-позитронных пар, которое почти экспоненциально падает в зависимости от реконструированной массы в области до 1 ГэВ. Впервые показано, что источником наблюдаемого избыточного электромагнитного излучения в области масс электрон-позитронных пар 0.2 – 0.6 ГэВ в центральных столкновениях ядер золота при данной энергии является локально термализованная плотная ядерная материя. Измеренная температура составляет 72 МэВ, что более чем в 100 миллионов раз превышает температуру на поверхности Солнца. Барионная плотность этой ядерной материи, согласно различным транспортным моделям, в 3 раза превышает плотность обычных ядер. Наблюдаемое усиление электромагнитного излучения в этой области масс электрон-позитронных пар подтверждает предположение о сильном уширении  $\rho$  – мезона в горячей и плотной ядерной среде, которое может быть связано с частичным восстановлением нарушенной киральной симметрии.

В статье отмечается, что свойства горячей и плотной ядерной материи, которая образуется в процессе столкновения ядер при достаточно низких энергиях (порядка нескольких ГэВ) близки к свойствам материи, образующейся при слиянии двух нейтронных звезд, а также для внутренних областей отдельных нейтронных звезд, которые рассчитываются в различных астрофизических моделях. Таким образом, показано, что свойства материи в нейтронных звездах могут изучаться на Земле в ядро-ядерных экспериментах при достаточно умеренных энергиях столкновений.

В 2019 г. состоялся физический сеанс эксперимента Ag+Ag на ускорителе SIS18 при энергии налетающих ядер серебра 1.58 АГэВ, на который было выделено пучковое время (88 смен). Программным комитетом ГСИ выделено также 87 смен для проведения измерений на пучке пионов. Однако, по ряду технических причин этот эксперимент, скорее всего, состоится не ранее 2021 г. Одобрена также предварительная программа экспериментов на ХАДЕСе по исследованию протон-протонных столкновений и протон-ядерных столкновений после 2020 г. После запуска ускорителя SIS100 комплекса ФАИР установка ХАДЕС будет перемещена на этот комплекс и будет первой установкой для проведения ядро-ядерных экспериментов на этом ускорителе.

В 2019 г. российскими группами в рамках подготовки к физическому сеансу на установке ХАДЕС по исследованию свойств ядерной материи в реакции Ag+Ag на ускорителе SIS18 при энергии налетающих ядер серебра 1.65 АГэВ был выполнен ряд работ по подготовке ряда детекторных систем установки к сеансу:

Группа ИЯИ РАН в 2019 г. выполнила работа по монтажу переднего годоскопа на установку ХАДЕС, проведена проверка работоспособности всех 288 сцинтилляционных детекторов этого годоскопа и их калибровка на космических мюонах.

Группа ИЯИ РАН, в сотрудничестве с чешской и немецкими группами, ведет работу по созданию и запуску новой детекторной системы установки ХАДЕС – 978-канального электромагнитного калориметра ECAL. К началу сеанса 2019 г. были полностью собраны 4 сектора ECAL со 163 модулями в каждом секторе и проведено их тестирование на космическом излучении. На созданном группой ИЯИ РАН испытательном стенде в ГСИ продолжались тестовые измерения и калибровка модулей для 5-го сектора калориметра,

который предполагается установить на ХАДЕС в конце 2019 г. Измерения проводились как на космическом излучении, так и световых импульсах от LED-оптической системы. Электромагнитный калориметр позволит существенно расширить экспериментальные возможности установки ХАДЕС и провести измерения выходов  $\pi^0$  и  $\eta$ -мезонов, а также улучшить идентификацию электронов и позитронов при импульсах больше 400 МэВ/с как в эксперименте ХАДЕС на ускорителе SIS18, так и на будущем ускорителе SIS100 (FAIR).

Все российские группы участвовали в физическом сеансе – обеспечивали дежурство в сменах, экспертный контроль работы переднего годоскопа и электромагнитного калориметра, калибровку переднего годоскопа на пучке ионов серебра, он-лайн анализ полученных данных.

В 2019 году группой НИЯУ МИФИ проведена работа по анализу коллективных потоков и азимутальных корреляций заряженных частиц в экспериментальных данных по столкновениям ионов золота Au+Au при энергии налетающего пучка 1.23 ГэВ на нуклон с фиксированной мишенью, полученных на установке HADES в 2012 г. Исследовались эффекты неидеального акцептанса и эффективности детектора на измеренные величины коллективных потоков.

Создан интерфейс для пакета QnCorrections Framework, который используется для анализа анизотропных потоков в экспериментах, ALICE, NA61/SHINE, NA49, и CBM, и позволяет корректировать измерения коллективных потоков на эффекты неидеального акцептанса детектора по азимутальному углу. Кроме того, изучалось влияние различных методов определения плоскости симметрии спектаторов налетающего ядра на ее разрешение и на измерение направленного потока.

Центральность столкновения является важной величиной, от которой зависят многие физические наблюдаемые. Подход, заложенный в основу определения центральности, позволяет соотнести разным классам центральности такие неизвестные характеристики процесса столкновения, как прицельный параметр, число нуклонов-участников, число нуклонов-наблюдателей и др. Важным направлением деятельности группы НИЯУ МИФИ в 2019 г. было разработка метода определения центральности с помощью детектора Forward Wall (FW), который регистрирует спектаторы налетающего ядра.

В 2019 году группой НИЦ КИ-ИТЭФ было представлено предложение о возможном расширении исследований, направленных на изучение в ядро-ядерных столкновениях свойств ядерной материи на малых ( $< 1$  ферми) межнуклонных расстояниях, соответствующих высокой барионной плотности, т.е. большой величине барионного химического потенциала  $\mu$ . Было показано, что использование огромной статистики ( $10^{10}$  событий), набранной в эксперименте HADES при изучении столкновений ядер золота, позволит найти достаточное количество событий образования странных пар ЛК в области быстрот, свободной от вкладов других столкновений, и получить новую важную информацию о свойствах сверхплотной ядерной материи и роли КХД в генерации ядерных сил. Группой ИТЭФ было также представлено предложение по изучению модификации ширины тяжелого гиперона  $\Lambda(1520)$  в ядерной среде в реакциях взаимодействия  $\pi^-$  мезонов с импульсом 1.7 ГэВ/с с ядрами углерода и вольфрама. Выполненные расчеты показали, что величины как дифференциальных, так и полных сечений обладают достаточно высокой чувствительностью к полной ширине гиперона  $\Gamma$  в ядерной среде. Для этого планируется



использовать уже имеющуюся статистику  $3 \cdot 10^8$  событий столкновений пионов с ядрами углерода и вольфрама. В 2020 году планируется получение первых оценок ширины  $\Lambda(1520)$  в ядерной среде.

В 2019 г. коллаборацией ХАДЕС в соавторстве с российскими группами опубликовано 11 статей по данной теме в рецензируемых журналах. Российские участники коллаборации выступили с 3 докладами на международной конференции и 8 докладами на совещании коллаборации ХАДЕС

#### 8.6 Информация об участии российских специалистов

В 2019 г. в работе по эксперименту принимали участие 3 группы. Суммарная информация об их участии приведена в сводной таблице.

N		ИЯИ РАН	НИЯУ МИФИ	НИЦ «Курчатовский Институт- ИГЭФ
1	Число специалистов, участвующих в ХАДЕС	10	5	3
2	Число молодых специалистов, привлеченных в эти работы	4	-	-
3	Число студентов - участников экспериментов	1	3	-
4	Число диссертаций на соискание ученых степеней, защищенных в рамках участия в работах центра	-	-	-
5	Число докладов от имени коллабораций, сделанных российскими учеными на междунар. конференциях	3	-	-
6	Число публикаций в ведущих научных журналах	9	9	6

Командировочные расходы по эксперименту HADES составили 56288 долларов США. Следует отметить, что часть финансирования была зарезервирована на первый квартал 2020 г. в связи с планируемыми необходимыми работами по подготовке к сеансу.

### 8.7 План участия группы ИЯИ РАН в эксперименте HADES на 2020 г.

В мае-июне 2020г. на установке ХАДЕС планируется технический сеанс по тестированию модернизированных детекторных систем. Российские участники эксперимента примут участие в замене считывающей электроники переднего годоскопа на TRB3 в проведении тестов, калибровке на космике и на пучке. Будут продолжены работы с участием российских специалистов по сборке, тестированию и установке на ХАДЕСе оставшихся двух секторов электромагнитного калориметра.

Планируется продолжение работ по анализу полученных на установке HADES экспериментальных данных по азимутальным потокам заряженных частиц в реакции столкновений ядер золота при энергии налетающих ядер золота 1.23 ГэВ на нуклон и в реакции столкновений ядер серебра при энергии налетающих ядер серебра 1.58 ГэВ на нуклон. Будут выполняться работы по разработке методов определения центральности в эксперименте ХАДЕС.

Будут вестись работы по изучению свойств ядерной материи в ядро-ядерных столкновениях на малых межнуклонных расстояниях, работы по изучению модификации ширины тяжелого гиперона  $\Lambda(1520)$  в ядерной среде в пион-ядерных реакциях.

Планируется доклады участников Российских групп на совещаниях коллаборации HADES, на международных совещаниях и участие в подготовке публикаций.

### 8.8 Заявка российских институтов на финансирование участия в эксперименте ХАДЕС на 2020 г.

В приведенной ниже таблице приводится оценка финансирования, необходимого в 2020 г. для выполнения поставленных задач:

№	Задача	Кол. команд. (чел x мес)			Оценка финанс. (тыс. дол. США)		
		ИЯИ РАН	НИЦ «Курчатовский Институт» - ИТЭФ	НИЯУ МИФИ	ИЯИ РАН	НИЦ «Курчатовский Институт» - ИТЭФ	НИЯУ МИФИ
1	Подготовка и проведение технического сеанса на установке ХАДЕС.	3	1	-	12	4	4
2	Калибровке и анализ экспериментальных данных	2	2	3	8	4	8
3	Сборка, тестирование и монтаж детекторов	3	-	-	12	-	-
3	Обсуждение работ коллаборации ХАДЕС	3	2	2	12	8	8
	Итого	11	4	5	44	16	20

Таким образом, российские группы, участвующие в коллаборации ХАДЕС запрашивают на 2020 г. финансирование командировочных расходов для поездок в GSI в объеме:

ИЯИ РАН - 11 чел. месяцев (или порядка 44 тыс. долларов США);

НИЦ «Курчатовский Институт- ИТЭФ - 5 чел. месяцев (или порядка 21 тыс. долларов);

НИЯУ МИФИ - 5 чел. месяца (или порядка 20 тыс. долларов США);

Итого – три российских института – ИЯИ РАН, НИЯУ МИФИ и НИЦ «Курчатовский Институт - ИТЭФ запрашивают финансирование на обеспечение командировок в 2020 г., которое соответствует обеспечению поездок в ГСИ в суммарном объеме 21 чел.мес, или порядка 84 тыс. дол. США.

#### 8.9 Приложение А. Список докладов и публикаций за 2019 г.

Список публикаций:

1. Probing dense baryon-rich matter with virtual photons, J. Adamczewski-Musch (Darmstadt, GSI) et al.. Nature Phys. 15 (2019) no.10, 1040-1045, DOI: 10.1038/s41567-019-0583-8

2. Time-Like Baryon Transitions studies with HADES, HADES Collaboration (B. Ramstein) et al.) EPJ Web Conf. 199 (2019) 01008 DOI: 10.1051/epjconf/201919901008

3. Sub-threshold production of K0s mesons and  $\Lambda$  hyperons in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.4$  GeV, HADES Collaboration (J. Adamczewski-Musch et al.). Phys.Lett. B793 (2019) 457-463, DOI: 10.1016/j.physletb.2019.03.065

4. Strong absorption of hadrons with hidden and open strangeness in nuclear matter , HADES Collaboration (J. Adamczewski-Musch et al.),. Phys.Rev.Lett. 123 (2019) no.2, 022002 , DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.022002

5. Identical pion intensity interferometry in central Au + Au collisions at 1.23 A GeV , HADES Collaboration (J. Adamczewski-Musch et al.), Phys.Lett. B795 (2019) 446-451 DOI: 10.1016/j.physletb.2019.06.047

6. Calibration of the electromagnetic calorimeter ECal of the HADES experiment, A. Shabanov, D. Borisenko , P. Chudoba , T. Galatyuk, F.Guber, M. Gumberidze, A. Ivashkin, A. Kugler, R. Lalik, S. Morozov, V.Pechenov, O. Petukhov, J. Pietraszko, A. Prozorov, N. Rathod, A. Reshetin, A. Rost, O. Svoboda, P. Salabura, P. Tlusty submitted to Open Access Journal of Physics: Conference Series (JPCS)

7. Tests of Cherenkov Electromagnetic Calorimeter for the HADES experiment. O. Petukhov, P. Chudoba, T. Galatyuk, F. Guber, A. Ivashkin, A. Kugler, A. Reshetin, A. Rost, O. Svoboda and P. Tlusty Accepted in NIM A <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.02.048>

8. Identical pion intensity interferometry at  $\sqrt{s_{NN}}=2.4$  GeV J. Adamczewski-Musch et al.. e-Print: arXiv:1910.07885[nucl-ex]

9. A. Shabanov, D. Borisenko , P. Chudoba , T. Galatyuk , F.Guber, M. Gumberidze, A. Ivashkin, A. Kugler, R. Lalik, S. Morozov, V.Pechenov, O. Petukhov, J. Pietraszko, A. Prozorov, N. Rathod, A. Reshetin, A. Rost, O. Svoboda, P. Salabura, P. Tlusty Calibration of the electromagnetic calorimeter ECal of the HADES experiment, submitted to Open Access Journal of Physics: Conference Series (JPCS)

10. Структура ядерной материи на малых межнуклонных расстояниях. Ю.Т.Киселев и Э.Я.Парьев Ядерная физика 82, 462 (2019)

11. Pion-induced production of  $\Lambda(1520)$  on nuclei near threshold. E.Ya.Paryev, Yu.T.Kiselev Nucl. Phys. A992, 121622 (2019)

12. Near threshold  $\eta$ 'meson production in  $\pi$ -A reactions E.Ya.Paryev Nucl. Phys. A988, 24 (2019)

Список выступлений участников российских институтов на международных совещаниях и конференциях по тематике CBM

1. XXIII International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2019), 15 - 19 April 2019, Dubna, Russia Arseniy Shabanov (Oral) First tests of the ECAL detector at HADES experiment,

2. FAIR next generation scientists - 6th Edition Workshop, 20-24 May 2019 Genova, Italy Arseniy Shabanov (oral), Segmented Cherenkov Electromagnetic Calorimeter (ECAL) of the HADES experiment on SIS18 (GSI)

3. FAIR next generation scientists - 6th Edition Workshop, 20-24 May 2019, Genova, Italy A. Shabanov, D. Borisenko, P. Chudoba, T. Galatyuk, F.Guber, M. Gumberidze, A. Ivashkin, A. Kugler, R. Lalik, S. Morozov, V.Pechenov, O. Petukhov, J. Pietraszko, A. Prozorov, N. Rathod, A. Reshetin, A. Rost, O. Svoboda, P. Salabura, P. Tlusty, Calibration of the electromagnetic calorimeter ECAL of the HADES experiment

Список выступлений участников российских институтов на совещаниях и коллаборации ХАДЕС

II HADES Physics Analysis Meeting, Seligenstadt, Germany, 1-3 July 2019,

1. Arseniy Shabanov, ECAL event display

2. S. Morozov on behalf of INR RAS

"FWALL performance at Ag+Ag 1.58AGeV",

XXXVI HADES collaboration meeting. 11-15 March 2019, Darmstadt, Germany,

3. A.Ivashkin, "Forward Wall performance with new quartz hodoscope in FW beam hole",

4. Yu.Kiselev, "Study of short-distance nuclear structure with HADES"

XXXVII HADES Collaboration Meeting 23-27 September 2019. Krakow, Poland

5. D.Borisenko, "Development of methods for selection most central events in AuAu@1.23 and AgAg@1.58 runs by FW"

Представлен отчет по теме «Исследование механизмов реакций и структуры ядер на границе ядерной стабильности, используя выведенный пучок радиоактивных ядер сепаратора фрагментов», координатор работ - доктор физ.-мат. наук А.А. Оглоблин.

Проект направлен на установление эффективного научного сотрудничества между группами НИЦ «Курчатовский Институт» и института GSI (Дармштадт, Германия), обладающего уникальным ускорителем заряженных частиц. Выполнение проекта позволяет использовать не имеющее аналогов оборудование немецких групп и накопленный ими методический и научный опыт.

Основной деятельностью в рамках проекта является исследование свойств экзотических ядер, т.е. получение информации, принципиальной для развития базовых моделей ядерной физики. В настоящее время, в связи с реализацией проекта FAIR, возможность проведения новых экспериментов существенно ограничена, поэтому важной задачей является помощь в подготовке основных установок к экспериментам и участие в этих экспериментах.

В 2016 году была создана молодежная команда, состоящая из 3 человек (Романа Притулы, Татьяны Леоновой и Андрея Данилова) для подготовки и участия в возможных экспериментах в Германии в GSI/FAIR. В 2019 году в группу включился новый участник – Виктор Старостин.

Изучение астрофизической реакции  $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$  имеет большое практическое значение. Эта реакция является ключом к пониманию соотношения углерода к кислороду после фазы горения гелия. Соотношение  $^{12}\text{C}$  к  $^{16}\text{O}$  в массивных звездах после фазы горения оказывает огромное влияние на последующую эволюцию звезд. Оно определяет путь на диаграмме Герцшпрунга-Рассела, длину стадии горения и конечное состояние звезды в виде черной дыры или нейтронной звезды.

Прямое измерение реакции  $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$  в астрофизически важной области энергий около 300 кэВ невозможно из-за очень малых значений сечений  $10^{-17}$  б. Поэтому было предложено провести эксперимент по изучению реакции через измерение кулоновской диссоциации  $^{16}\text{O}$  на  $\alpha$ -частицу и  $^{12}\text{C}$ , который получил номер S454 – «Изучение скорости астрофизической реакции  $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ ».

Эксперимент S454 «Изучение скорости астрофизической реакции  $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ » проводился коллаборацией с использованием дипольного магнита большого акцептанса GLAD и следующих групп детекторов:

- 1) стенка времяпролетных детекторов TOFD;
- 2) несколько групп fiber (волоконных) детекторов, размещенных до и после дипольного магнита GLAD;
- 3) CALIFA (калориметр для регистрации гамма-квантов и легких заряженных частиц);
- 4) NeuLAND (регистрация нейтронов, использовался только в тестовом режиме);
- 5) SEETRAM (измерение интенсивности пучка).

Два члена молодежной команды – Данилов Андрей и Старостин Виктор – были в командировке в Германии в GSI в период с 25.03.2019 по 09.04.2019.

Члены молодежной команды приняли участие в подготовке и отладке основных установок коллаборации к эксперименту S454.

Совместный эксперимент S454 проводился на синхротроне SIS-16 в начале апреля 2019 года. Члены молодежной команды участвовали в проведении эксперимента, отслеживали стабильность работы и показания волоконных (fiber) детекторов.

Задачи, заявленные проектом №13 ГАЛО на 2019 год, выполнены.

Был проведен эксперимент S454 «Изучение скорости астрофизической реакции  $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ ». Эксперимент послужил тестом работоспособности всех экспериментальных установок во время одновременной работы.

Проведенный визит молодежной команды послужил основой для продолжения продуктивного научного сотрудничества российской стороны с немецкими коллегами из GSI.

На начало следующего года предполагается проведение двух экспериментов: S444 и S467 (одночастичная структура нейтронно-избыточных изотопов Ca: эволюция оболочки вдоль  $Z = 20$ ).

#### 9.1 Приложение А

1. Число специалистов, участвующих в работах центра.- 5 человек
2. Число молодых (< 35 лет) специалистов, привлеченных в эти работы – 4.
3. Число аспирантов - участников экспериментов – 1.
4. Число диссертаций на соискание ученых степеней, защищенных в рамках участия в работах центра и докладов от имени коллабораций, сделанных российскими учеными – нет.
6. Число публикаций в ведущих научных журналах (с указанием наименования издания, в том числе из базы WoS-Web of Science), содержащих результаты интеллектуальной деятельности, полученные в рамках участия в работах центра – 1

1. S. P. Goncharov, R. V. Sukhorukov, A. A. Ogloblin, A. S. Demyanova, A. N. Danilov, S. V. Dmitriev, V. I. Starostin, Analysis of  $\alpha + 9\text{Be}$  Scattering with a Semimicroscopic Potential, Moscow University Physics Bulletin 74 (2019) 137–143, DOI: 10.3103/S0027134919020061

#### 9.2 Приложение Б. Заявка на 2020 год на финансирование проекта

Принять участие в подготовке/проведении одного из будущих экспериментов: S444 (ввод в эксплуатацию основных детекторов R3B) и S467 (одночастичная структура нейтронно-избыточных изотопов Ca: эволюция оболочки вдоль  $Z = 20$ ).

Объём запланированных на 2020 год работ и опыт работы в 2019 году определяют следующую длительность визитов в GSI:

- Старший научный сотрудник – не менее 1 месяца (**4010** долл. США, включая проживание).

- Инженер – не менее 1 месяца (**3440** долл. США, включая проживание)

Итого: 7450 долл. США

Эта сумма запрашивается на финансирование проекта №13«Гало» на 2020 год.

## 10 Отчет по эксперименту 14 COMPTON

Представлен отчет о научно-исследовательской работе, выполненной в рамках проекта Российско-Германского сотрудничества по исследованию фундаментальных свойств материи по теме «Измерения поляризуемости нуклонов методом комптоновского рассеяния фотонов тормозного спектра», краткое наименование КОМПТОН. Координатор работ - главный научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, доктор физ.-мат. наук, профессор Г.Д. Алхазов.

### 10.1 Введение

Эксперимент КОМПТОН проводится коллаборацией ПИЯФ НИЦ КИ, Технического университета Дармштадта (TUD) и Университета Майнца (ИР). Целью эксперимента является определение величин поляризуемости протона и нейтрона по измеряемым сечениям комптоновского рассеяния. Электрическая поляризуемость  $\alpha$  и магнитная поляризуемость  $\beta$  являются фундаментальными характеристиками нуклона. Достаточно точное знание этих констант важно для проверки существующих теорий кварк-мезонной структуры нуклона. Ранее сечения комптоновского рассеяния на нуклонах измерялись с использованием «меченых» фотонов в основном с весьма высокой энергией. В экспериментах с «мечеными» фотонами трудно получить высокую статистическую точность. Кроме того, анализ экспериментальных данных, полученных с использованием фотонов относительно высокой энергии (более 100 МэВ), является существенно модельно зависимым. Физики ПИЯФ предложили новый метод измерения сечений комптоновского рассеяния, основанный на использовании фотонов тормозного спектра с относительно невысокой энергией, что важно для получения модельно-независимой информации о поляризуемости нуклона.

### 10.2 Описание эксперимента и основные результаты 2019 г.

Эксперимент предполагалось проводить на ускорителе электронов S-DALINAC Технического университета Дармштадта с энергией около 100 МэВ. Пучок электронов проходит через радиатор – золотую фольгу толщиной 0,3 мм, в результате чего образуется пучок фотонов с тормозным спектром. Этот пучок проходит через ионизационную камеру высокого давления, наполненную водородом (или дейтерием). Рассеянные фотоны регистрируются  $^{22}\text{NaI}$  гамма спектрометрами в совпадении с сигналами в ионизационной камере от протонов (дейтронов) отдачи.

В ПИЯФ была изготовлена ионизационная камера для проведения измерений. С помощью этой камеры в 2006–2007 годах были проведены первые тестовые измерения сечений  $\gamma$  рассеяния при энергиях электронов 60 и 80 МэВ и токах первичных пучков электронов в диапазоне 1–3 мкА. Итоговая статья по методике эксперимента и результатам анализа данных была опубликована в журнале Nucl. Instr. Meth. A **618** (2010) 160 (“New experimental method for investigation of the nucleon polarizabilities” O. Yevetska *et al.*). Отметим, что при малых энергиях фотонов, т.е. при энергиях, которые особенно важны для получения модельно-независимой информации о нуклонной поляризуемости, ранее были данные всего лишь одного эксперимента (Illinois, 1991г.).

Полученные предварительные результаты по сечениям в нашем эксперименте согласуются с данными эксперимента Illinois и имеют приблизительно такую же статистическую точность. Проведенные эксперименты показали, что предложенный метод позволяет, в принципе, получить сечения комптоновского рассеяния с высокой точностью. Однако интенсивность пучка электронов на ускорителе S-DALINAC оказалась ниже той, что требуется для данной работы.

В TUD было принято решение осуществить модернизацию ускорителя S-DALINAC с целью увеличения энергии и интенсивности ускоряемых электронов. В то же время в ПИЯФ была спроектирована и изготовлена новая ионизационная камера с большей светосилой, что позволит повысить скорость набора данных почти в 10 раз и получить данные с лучшей статистической точностью. Камера была успешно испытана на высокое давление (120 бар) и на утечки.

Как и планировалось, энергия выведенного пучка электронов на ускорителе S-DALINAC была повышена до 120 МэВ. Однако интенсивность пучка электронов не удалось повысить: она остается относительно низкой (~1 мкА). Поэтому для получения высокой статистической точности набор экспериментальных данных на ускорителе S-DALINAC надо было бы проводить в течение нескольких месяцев.

По этой причине директор Технического университета Дармштадта проф. N. Pietralla счел нецелесообразным проводить этот эксперимент на ускорителе S-DALINAC. Он предложил рассмотреть возможность постановки эксперимента КОМПТОН на новом строящемся сильноточном (~150 мкА) электронном ускорителе MESA в Майнце. В 2016–2018 гг. в Университете Майнца состоялись обсуждения нашего предложения. Немецкие коллеги положительно отнеслись к возможности постановки эксперимента КОМПТОН на ускорителе MESA. В результате обсуждений на совещаниях в Университете Майнца (ИКР) было принято решение о подготовке предложения по проведению нашим методом прецизионных измерений поляризуемостей нуклонов на ускорителе MESA.

В декабре 2018 г. было подписано соглашение о сотрудничестве между Университетом Майнца (ИКР) и ПИЯФ по подготовке эксперимента по комптоновскому рассеянию на ускорителе MESA. Запуск ускорителя MESA намечен на 2021–2022 годы.

В 2019 году по программе КОМПТОН:

- Протестирована установка для наполнения ионизационной камеры сверхчистым водородом для эксперимента Комптон.
- Проведен запуск и проверена работа прототипа ионизационной камеры, наполненной водородом, с помощью радиоактивного источника (Am-241).
- Подготовлен проект эксперимента и проведено его обсуждение с руководством ИКР (Майнц). Продолжена подготовка эксперимента по прецизионному измерению поляризуемостей нуклонов.



### 10.3 ПРИЛОЖЕНИЕ А

- 1) Число специалистов ПИЯФ, участвовавших в проекте КОМПТОН – 4.
- 2) Визиты специалистов ПИЯФ в Германию (GSI) по теме КОМПТОН из денег Министерства Образования и Науки – 1.
- 3) Число молодых специалистов (моложе 35 лет) – 2.
- 4) Студенты не участвовали.
- 5) Защит диссертаций, докладов сотрудниками ПИЯФ по теме КОМПТОН на международных конференциях и публикаций в реферируемых журналах не было.
- 6) Финансирование российскими организациями – частично работа финансировалась НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ.
- 7) Финансирование в 2019 г. – \$ 9000. Израсходовано – \$9000. Количество командировочных дней в 2019 г. по теме проекта – 63.

### 10.4 План работ на 2020 г.

1. Собрать стенд в GSI для тестирования аналоговой электроники (предусилители и усилители) для эксперимента Комптон.
2. Провести детальные измерения характеристик опытных образцов (предусилителей и усилителей) для эксперимента Комптон.
3. Написать и протестировать программы для считывания информации для будущих экспериментов по комптоновскому рассеянию на ускорителе MESA (Майнц).

Запрашиваемая КВОТА на 2020 г. по проекту КОМПТОН составляет 9 000 USD. Она будет израсходована на поездки в Дармштадт (GSI) и Университет Майнца (IKP) трех основных исполнителей: Е.М. Маева, А.Г. Инглесси и Г.Е. Петрова с общим количеством человеко-дней в Германии около 60.

## 11 Отчет по эксперименту 16 АРРА

В данном разделе представлен отчет о научно-исследовательской работе по теме АРРА («Атомная, физика плазмы и применения»), координатор работ – зам. директора ИТЭФ, доктор физ.-мат наук, профессор А.А. Голубев.

Основные исследования, проводившиеся в 2019 г. по теме АРРА

1. Подготовка и проведение эксперимента по разработке рентгеновского диагностического метода для регистрации излучения мишени под воздействием тяжелоионного пучка.
2. Подготовка и проведение экспериментальных исследований энергетических потерь ионов в ионизованном веществе.
3. Взаимодействие с веществом быстрых тяжёлых ионов (БТИ), тормозящихся в режиме электронных потерь энергии
4. Численное моделирование экспериментов для исследования свойств веществ в экстремальных состояниях на ускорителе FAIR
5. Оптимизация источников рентгеновского излучения и ускоренных частиц для диагностики в экспериментах проекта FAIR.

### 11.1 Основные исследования, проводившиеся в 2019 г. по теме АРРА

11.1.1 Подготовка и проведение эксперимента по разработке рентгеновского диагностического метода для регистрации излучения мишени под воздействием тяжелоионного пучка

В будущих экспериментах НИИХ проекта FAIR высокоинтенсивные ионные пучки будут использоваться для нагрева материала мишени в исследованиях экстремального состояния вещества. В этих экспериментах знание о распределении поперечного профиля пучка тяжелых ионов на мишени имеет большое значение. Диагностическая система XCOT (X-ray Conversion to Optical radiation and Transport – преобразование рентгеновского излучения в оптическое излучение и транспорт), разработанная совместно с Франкфуртским университетом им. Гете, позволит измерять параметры пучка с использованием рентгеновской флуоресценции, возникающей в процессе взаимодействия ионного пучка с мишенью.

Для тестирования диагностической методики на ускорителе UNILAC в GSI проводился эксперимент с пучком ионов  $Au^{+26}$  с энергией 11,4 МэВ/н при облучении тонкой медной сетчатой мишени (100 проволок на дюйм) диаметром 3 мм и толщиной 10 мкм (Рис. 11.1). В рамках подготовки к эксперименту проводилось полномасштабное моделирование с использованием кода Geant4, позволившее улучшить постановку эксперимента и провести сравнение экспериментальных результатов с модельными.

Рентгеновское изображение мишени формировалось с использованием многоканальной камеры-обскуры, представляющей собой танталовую пластину толщиной 75 мкм с 9 отверстиями диаметром 80 мкм каждое. Расстояние между отверстиями составляло 2,5 мм. Такая конфигурация с несколькими отверстиями использовалась для увеличения статистики на изображении. Расстояния между мишенью, камеры-обскуры и детектором составляли 65 и 130 мм соответственно (увеличение камеры-обскуры составляло 2:1).

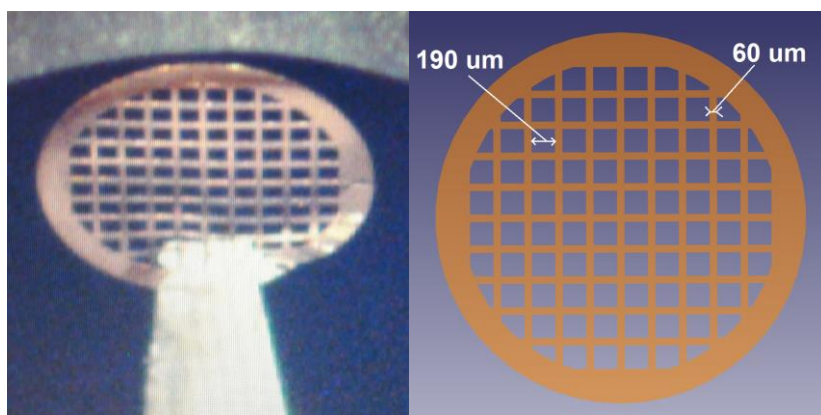


Рис. 11.1 – Слева – фотография медной мишени толщиной 10 мкм; справа - модель мишени для выполнения расчётов с использованием кода Geant4

Регистрация изображений в эксперименте осуществлялась на сцинтилляторе CsI толщиной 100 мкм с использованием sCMOS цифровой камеры с электронно-оптическим усилителем на основе шеврона двух микроканальных пластин (МКП). Регистрация изображений выполнялась в режиме длительной (>30 сек.) экспозиции. В модели экспериментальная мишенная камера была изготовлена из нержавеющей стали в виде сферы с внутренним диаметром 1,0 м и толщиной стенки 50 мм. Внутри мишенной камеры был установлен оптический алюминиевый стол, позволяющий при выполнении расчётов учесть вклад от вторичного рентгеновского и нейтронного излучений. Как в эксперименте, так и в модели графитовый коллиматор (внутренний диаметр 3,5 мм) был помещён перед мишенью вдоль направления пучка. В модели установки размер тонкого виртуального детектора составлял 26x26 мм с разрешением 2000x2000 пикселей.

В результате эксперимента было получено рентгеновское изображение (Рис. 11.2 слева) при интенсивности ионов  $\sim 6 \cdot 10^{11}$  ионов/мм<sup>2</sup>. Модельные изображения (Рис. 11.2 справа) получены при интенсивности  $\sim 4 \cdot 10^{10}$  ионов/мм<sup>2</sup>, статистика фотонов на рассчитанном изображении  $\sim 1.5 \cdot 10^4$  фотонов/мм<sup>2</sup>.

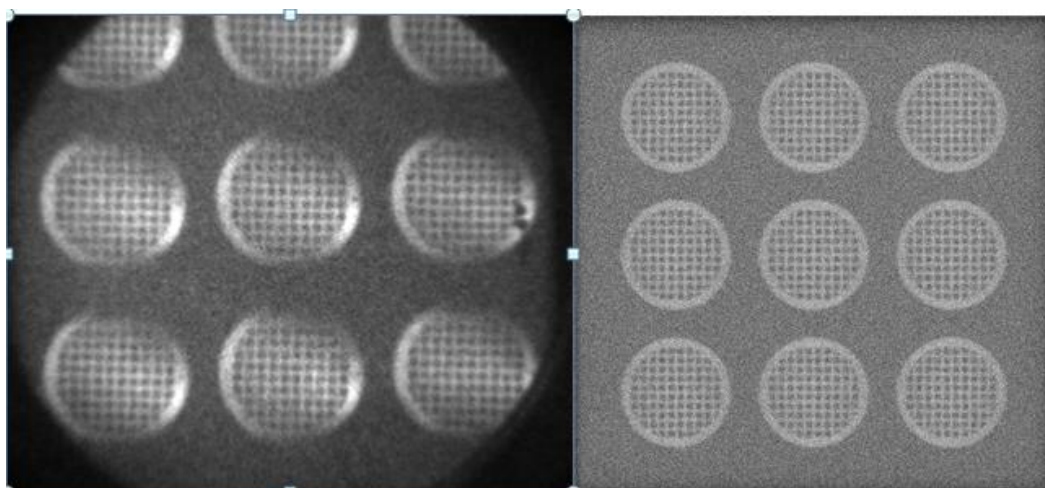
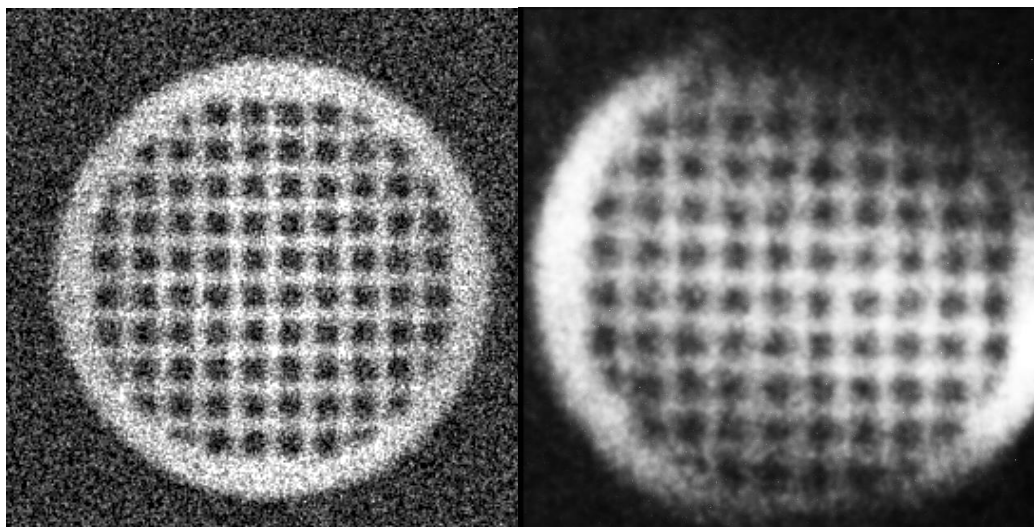


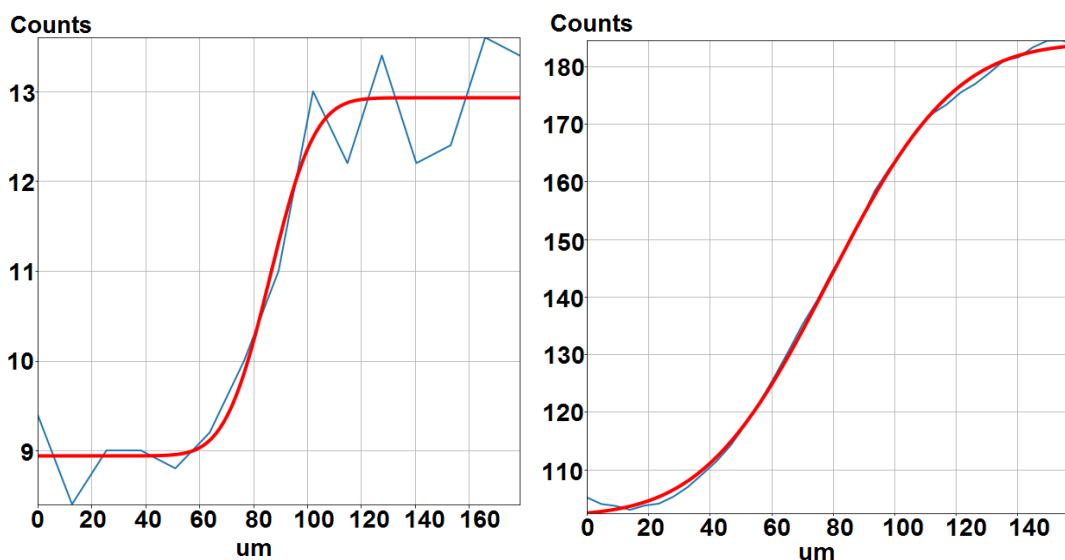
Рис. 11.2 – Рентгеновские изображения мишени: слева - экспериментальное изображение, полученное на пучке ионов Au<sup>+26</sup> с энергией 11.4 МэВ/а.е.м., справа – изображение, рассчитанное с использованием кода Geant4

На *Рис. 11.3* показаны модельные и экспериментальные изображения медной мишени, полученные после суммирования четырех изображений в левом нижнем углу на *Рис. 11.2*.



*Рис. 11.3*– Суммированные рентгеновские изображения: слева - рассчитанное с помощью кода Geant4, справа - экспериментальное изображение

Пространственное разрешение изображений оценивалось путём аппроксимации экспериментального поперечного профиля функции ошибки Erf:  $\sigma \sim 15$  мкм для изображения, полученного в Geant4 и  $\sigma \sim 30$  мкм для экспериментального изображения (*Рис. 11.4*). Разницу в пространственном разрешении можно объяснить эффектом размытия в детекторе (CsI) и вибрацией мишени в ходе нагрева при прохождении пучка ионов. Частотно-контрастная характеристика (MTF) составляет около 20% как для эксперимента, так и для моделирования.



*Рис. 11.4* – Горизонтальные поперечные профили: построенный по модельным данным (слева), экспериментальный профиль (справа); красная линия - аппроксимация функцией ошибок Erf

### 11.1.2 Подготовка и проведение экспериментальных исследований энергетических потерь ионов в ионизованном веществе

Подготовлен и проведён эксперимент по исследованию торможения тяжёлых ионов  $\text{Ag}^{+26}$  с энергией 3,6 МэВ/н в водородной плазме мишени на основе тетта-пинч разряда. Цель эксперимента – исследование процессов перезарядки тяжёлых ионов в плазме. Данный эксперимент представляет интерес в области физики высокой плотности энергии в веществе, при определении сечений ионизации и рекомбинации ионов и прикладного применения генераторов плазмы в качестве устройств для повышения зарядового состояния ионов (plasma stripper) в ускорительной технике в рамках проекта FAIR.

Мишень на основе тетта-пинч разряда была установлена в линию транспортировки пучка (Рис. 11.5) экспериментальной площадки Z6 ускорительного комплекса GSI-FAIR. Мишень представляет собой цилиндрический стеклянный объем длиной 400 мм с размещённой на поверхности цилиндра индукционной катушкой. В процессе подготовки к эксперименту собрана и оптимизирована система вакуумной откачки и напуска газа в мишень. Для достижения рабочего давления водорода применялась ранее отлаженная двухкаскадная система дифференциальной вакуумной откачки. Максимальное давление газа, при котором осуществляется зажигание разряда, составляет 1,2 мбар при сохранении вакуума во внешней линии транспортировки пучка от ускорителя, на уровне  $10^{-5}$  мбар. Проведена юстировка положения мишени и диафрагм системы дифференциальной откачки на оптической оси линии транспортировки пучка.

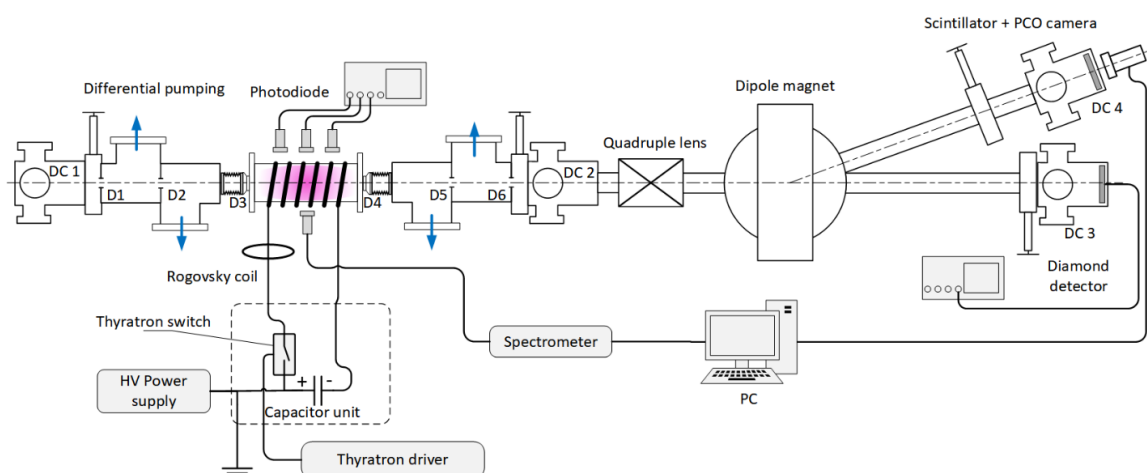


Рис. 11.5 – Схема экспериментальной установки для измерения энергетических потерь ионов в плазме

Системы подключения диагностических приборов и каналов синхронизации при проведении экспериментальных исследований (Рис. 11.6), входящие в состав установки можно разделить на три группы:

1. Управление плазменной мишенью - система включает в себя приборы для контроля и регулировки давления водорода, контроля и управления напряжением на ёмкостях накопителя, приборы для синхронизации запуска мишени со временем прихода пучка ионов.
2. Диагностика плазмы - система включает в себя средства для измерения состава, температуры и интегральной плотности электронов плазмы. В ходе эксперимента записывались эмиссионные спектры водородной плазмы. Измерения проводились,

интегральным способом на всём протяжении развития разряда, при помощи спектрометра Ocean Optics HR4000 с диапазоном чувствительности 200-1100 нм и разрешением (FWHM) 0,5 нм. Данные измерения являются контрольными и позволяют восстановить режим работы мишени и параметры плазмы по ранее полученным диагностическим результатам, выполненным методом спектрометрии с временным разрешением. Для контроля временных параметров газового разряда и пространственного распределения плотности плазмы вдоль оси пучка применялись фотодиоды OSRAM SFH203 установленные на корпусе мишени.

- Измерение потерь энергии ионов и диагностика пучка - для регистрации микроструктуры импульса пучка ионов использовался алмазный детектор с высоким временным разрешением (лучше 1 нс). С использованием детекторов тока пучка SF (DC1, DC2) была определена трансмиссия пучка через мишень (Рис.2.1). Для определения зарядового состояния ионов после взаимодействия с плазмой применялся анализирующий дипольный магнит с напряжённостью магнитного поля до 1.3 Т. Пространственное распределение ионов различных зарядностей регистрировалось при помощи сцинтиллятора, размещённого в вакуумной диагностической камере (Рис. 11.7 слева) и цифровой ПЗС камеры. Пример зарегистрированного изображения свечения сцинтиллятора показан на Рис. 11.7 справа.

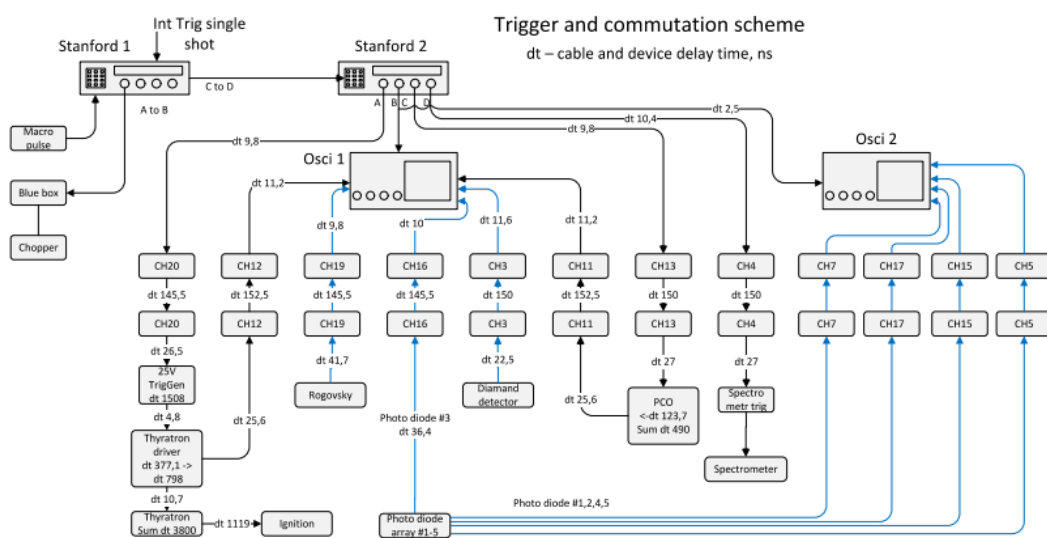


Рис. 11.6 – Схема подключения диагностических приборов и каналов синхронизации при проведении экспериментальных исследований

В ходе эксперимента получены данные о зарядовом распределении пучка при различном давлении водорода в плазменной мишени. Пример обработанных данных по зарядовому распределению пучка ионов при прохождении через невозмущённый водород без разряда и плазму с электронной плотностью  $10^{16} \text{ см}^{-3}$  приведён на Рис. 11.8. Слева – график зарядового состав (A) пучка ионов золота после прохождения через невозмущенный водород (colg gas) и плазму тетта-пинч мишени (plasma). Справа – сравнение экспериментальных результатов зарядового распределения после взаимодействия с плазмой с численным расчетом.

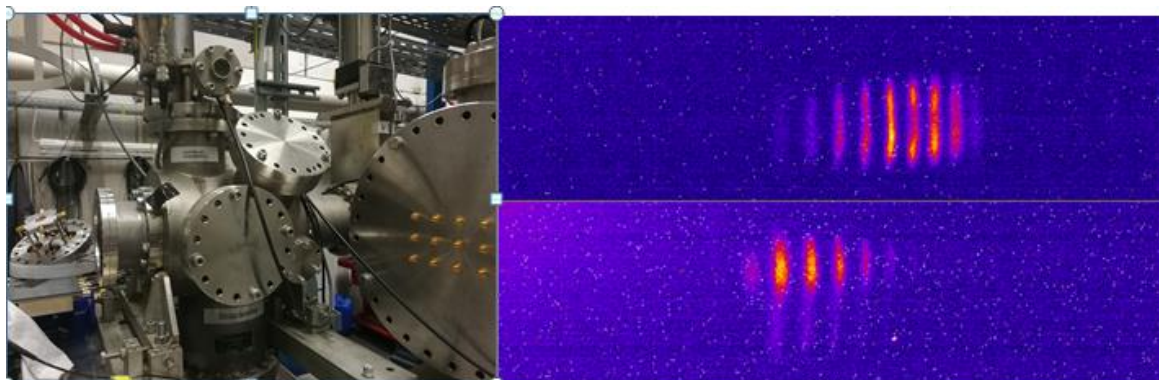


Рис. 11.7 – Слева - вакуумная диагностическая камера размещённая за анализирующим дипольным магнитом; справа - изображение нескольких зарядностей ионов после прохождения плазменной мишени

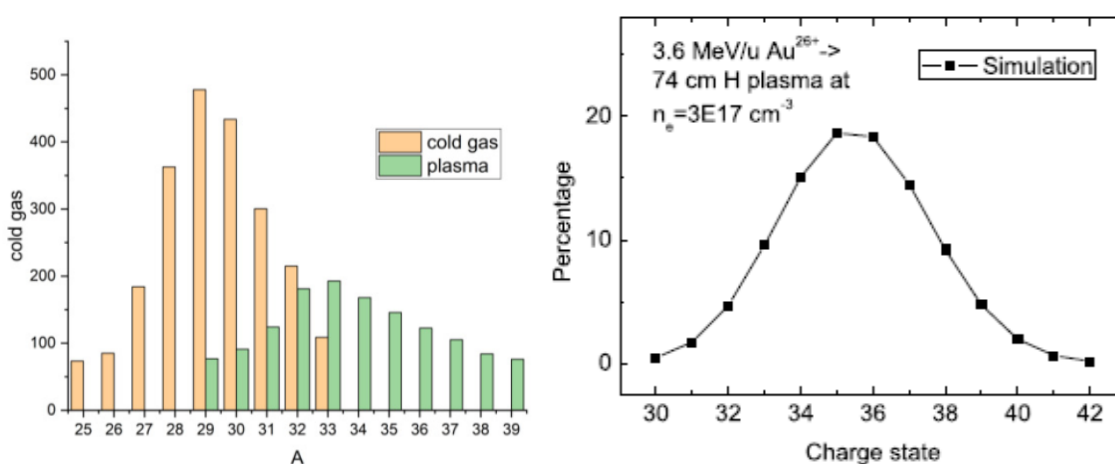


Рис. 11.8 – Зарядовый состав пучка ионов золота после прохождения через мишени

На Рис. 11.8 видно, что среднее значение заряда ионов после взаимодействия с плазмой находится в диапазоне от +32 до +34. В то время как среднее значение заряда при взаимодействии с водородом составило от +28 до +31. Полученные данные были сопоставлены с результатами моделирования (Рис. 11.8справа).

Следует отметить, что экспериментальная установка позволяет достигать больших значений энерговыклада в плазму (до 50 кДж) однако для достижения этих параметров требуются дополнительные работы по защите измерительной аппаратуры от влияния электромагнитных наводок возникающих при работе высоковольтной схемы мишени. Также, планируется повысить трансмиссию тока пучка через мишень. Существенные потери пучка наблюдаются в связи асимметрией магнитного поля индуктора приводящей к дефокусировке ионного пучка.

### 11.1.3 Взаимодействие с веществом быстрых тяжёлых ионов (БТИ), тормозящихся в режиме электронных потерь энергии

В рамках деятельности в 2019 году проводились теоретические и экспериментальные исследования эффектов возбуждения, структурной и химической модификации, а также кинетики травления треков БТИ в интересных для технологических применений оксидах.

Были решены следующие задачи:

1. Экспериментально и теоретически был исследован отклик трёх диэлектриков  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  (YAG) на облучение ионами Хе с энергией 167 МэВ. Оказалось, что рекристаллизация появляющейся расплавленной области, является определяющим механизмом образования треков БТИ в этих оксидах. Моделирование показало, что потери энергии налетающего иона и первичное возбуждение электронной и ионной подсистем этих материалов очень похожи. Однако, релаксация трека проходила по-разному, приводя к совершенно различной итоговой структуре треков 167 МэВ Хе в этих диэлектриках. Высоко разрешающая просвечивающая электронная микроскопия облучённых образцов подтвердила это заключение. Треки не появились в  $\text{MgO}$ . Прерывистые цепочки сильно повреждённых, но кристаллических областей диаметром примерно 2 нм возникли вдоль траекторий ионов в  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Полностью аморфные треки возникли в YAG.

2. Обновленная версия микроскопической модели была применена для получения распределений химической активности и скоростей жидкостного химического травления железосодержащего оливина ( $(\text{Mg}_x\text{Fe}_{1-x})_2\text{SiO}_4$ ) вдоль траекторий БТИ (1,7 ГэВ Хе и 16 ГэВ U). Это дало возможность анализа пределов применимости оптической микроскопии для определения параметров налетающей частицы путем измерения линейной скорости травления (ЛСТ) в натуральных оливиновых детекторах галактического космического излучения. Показано, что различие между пространственными масштабами ядра нанометрического трека (<10 нм) и длиной волны видимого света (> 400 нм) создает проблему для мониторинга быстрого травления этого ядра, контролируемого диффузией молекул вещества, используемых при травлении. Продемонстрирована и проблема оптического метода с распознаванием разницы между значениями ЛСТ треков, по-разному ориентированных относительно начальной поверхности травления. Показано, что применение методик с нанометрическим пространственным разрешением позволяет избежать вышеупомянутых недостатков.

Полученное фундаментальное знание, разработанные аналитические и численные модели и методы имеют мультидисциплинарный характер, поскольку могут быть применены:

1. В ядерно-энергетических технологиях при оценках радиационной стойкости материалов к облучению осколками деления, тормозящимися в режиме электронных потерь энергии.

2. При создании нового поколения детекторов заряженных частиц.

3. Для обоснования и разработки методик контролируемого производства упорядоченных наноразмерных 3D гетероструктур, путём выбора оптимальных параметров облучения БТИ, тормозящимися в режиме электронных потерь энергии.

4. При построении моделей возбуждения материалов фемтосекундными лазерными импульсами высокой интенсивности.

5. В технологиях, основанных на химической активации и травления трековых областей.

6. Полученные результаты могут быть полезны для медико-биологических приложений. В частности, при совершенствовании методик ионно-лучевой терапии.



Основой проведённых работ является использование обновлённой версии гибридной модели<sup>14</sup>, состоящей из связанных (а) оригинальной Монте-Карло модели (TREKIS) электронной кинетики и начального возбуждения ионной подсистемы в треке БТИ на временах до 100 фс после пролёта иона и (б) реализованной в рамках кода LAMMPS классической молекулярно-динамической модели релаксации начального возбуждения решетки. Подобное разделение модели на стадии обосновывается резким различием в характерных временах кинетики электронной и ионной подсистем в треке.

В рамках формализма динамического структурного фактора – комплексной диэлектрической функции (ДСФ-КДФ), применяемого в используемых сечениях взаимодействия, TREKIS учитывает коллективную реакцию электронной и ионной подсистем материала на вносимые возбуждения. Это позволяет выделить необычные эффекты этой коллективной реакции различных материалов на ультракоротких пространственно-временных масштабах треков БТИ. Модель не использует подгоночных процедур, обычных при применении основывающихся на макроскопических принципах моделей возбуждения материалов и структурных изменений в треках БТИ.

Распределение скоростей атомов решетки, полученное из данных МК моделирования, затем использовалось для моделирования кинетики возбуждения и дальнейшей релаксации атомной решетки в треке БТИ с применением классического МД кода LAMMPS и подходящих межатомных потенциалов взаимодействия.

При построении модели для определения скорости реакции материала с веществом, используемой при травлении, вокруг траектории БТИ использовалась теория активированного комплекса<sup>15</sup>. Согласно этой теории, в течение химической реакции взаимодействующие вещества проходят промежуточное барьерное состояние между начальным и конечным состояниями. Это состояние называется активированным комплексом. При этом относительная скорость реакции травления трековой области определяется разностью удельных энергий Гиббса повреждённого материала и неповреждённого.

Было выделено две характерные области химической активности вокруг траектории БТИ в оливине: нанометрическая область сильных структурных изменений, и микрометрическая окрестность траектории, в которой предполагалось восстановления катионов железа разлетающимися быстрыми электронами. Применение вышеуказанной гибридной модели позволяет определить радиальные распределения относительных скоростей травления материала в обеих областях.

Для описания жидкостного химического травления треков БТИ использовалась оригинальная микроскопическая модель. Результаты были предварительно верифицированы путём сравнения скорости травления треков БТИ в длину, определяемой экспериментально в работе<sup>16</sup> как полная длина наблюдаемого протравленного трека, разделённая на полное время травления.

---

<sup>14</sup> N.A.Medvedev, R.A. Rymzhanov, A.E. Volkov, Time-resolved electron kinetics in swift heavy ion irradiated solids. J. Phys. D. Appl. Phys. 48, 355303 (2015).

<sup>15</sup> . S.A. Gorbunov, A.I. Malakhov, R.A. Rymzhanov, A.E. Volkov, J. Phys. D. Appl. Phys. 50 (2017) 395306

<sup>16</sup> S.A. Gorbunov, R.A. Rymzhanov, N.I. Starkov, A.E. Volkov, A.I. Malakhov, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms. 365 (2015) 656–662

### 11.1.3.1 Роль рекристаллизации в образовании треков быстрых тяжёлых ионов в оксидах

Модификация, опробованная в статье<sup>17</sup>, позволила оперативно применить новую версию модели для описания в режиме реального времени кинетики возбуждения и роли рекристаллизации в образовании разупорядоченных треков БТИ в диэлектриках, интересных для технологических применений.

Результаты исследований были опубликованы в журнале первого десятилетия Scientific Reports: . R.A. Rymzhanov, N. Medvedev, J.H. O'Connell, A. Janse van Vuuren, V.A. Skuratov, A.E. Volkov, Recrystallization as the governing mechanism of ion track formation, Scientific Reports 9 (2019) 3837-1 3837-10

В этой работе был исследован отклик трёх диэлектриков MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (YAG) к облучению ионами Хе с энергией 167 МэВ. Потери энергии налетающего иона и первичное возбуждение электронной и ионной подсистем материалов очень похожи. Однако релаксация возбуждённого состояния решётки проходила по-разному, что привело к совершенно различным окончательным структурам треков 167 МэВ Хе в этих диэлектриках. Треки не появились в MgO. Прерывистая цепочка сильно повреждённых, но кристаллических областей (диаметром примерно 2 нм) возникает вдоль траекторий ионов в Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Полностью аморфные треки возникают в YAG. Моделирование показало, что рекристаллизация является критическим процессом, определяющим кинетику треков БТИ в этих оксидах.

Во время эксперимента образцы облучались при комнатной температуре (300 К) на циклотроне IC-100 ИОЯФ (Дубна). Сравнивались реакции монокристаллических образцов α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO и Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (YAG) на облучение ионами Хе 167 МэВ при 300 К. Облучения проводили при флюенсах в диапазоне от 10<sup>10</sup> до 10<sup>12</sup> см<sup>-2</sup>. Во избежание перекрытия треков; средняя плотность потока ионов Хе составляла ~ 10<sup>9</sup> см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>.

Сканирование ионного пучка в горизонтальном и вертикальном направлениях позволило сохранять однородность облучения на поверхности образца в пределах 5%.

Исследования с помощью просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (HRTEM, ПЭМ) были проведены в Центре HRTEM при Университете Нельсона Манделы (Порт-Элизабет, Южная Африка).

Пластинки для наблюдения были вырезаны с глубины в пределах 1 мкм от облученной поверхности с использованием оборудования с фокусируемым ионным пучком FEI Helios Nanolab 650 FIB. Сфокусированный пучок ионов Ga с энергией 30 кэВ использовался для фрезерования и предварительного утонения образцов, а ионы Ga с энергией 1 кэВ - для окончательной полировки. Изображения образцов получали с помощью ПЭМ JEOL ARM-200F, работающего при 200 кВ, что позволило достичь более высокого разрешения, чем в предыдущем анализе ПЭМ<sup>18</sup>.

Был осуществлён гибридный подход, состоящий из соединения двух моделей: Монте-Карло модели электронной кинетики (код MC TREKIS<sup>19</sup>) и молекулярно-динамической (МД)

<sup>17</sup> R.A. Rymzhanov, S.A. Gorbunov, N. Medvedev, A.E. Volkov, Damage along swift heavy ion trajectory. Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms 440, 25–35 (2019)

<sup>18</sup> H.J.C. Berendsen, J.P.M. Postma, W. F. van Gunsteren, A. DiNola, J.R. Haak, Molecular dynamics with coupling to an external bath. J. Chem. Phys. 81, 3684 (1984)

<sup>19</sup> R.A. Rymzhanov, N.A. Medvedev, A.E. Volkov, Effects of model approximations for electron, hole, and photon transport in swift heavy ion tracks. Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms 388, 41–52 (2016)

модели атомной динамики. TREKIS описывает временную эволюцию ансамбля возбужденных электронов, генерируемых пролётом БТИ, а также взаимодействие первичных и вторичных электронов с решеткой мишени в треке иона. Полученное в результате взаимодействия с электронами распределение энергии атомов решётки используется, как начальное условие в классическом MD-коде LAMMPS<sup>20</sup>, который моделирует релаксацию избыточной энергии решетки и дальнейшие структурные преобразования в ближайшей окрестности траектории ионов. Модель не использует подгоночных процедур.

TREKIS поэтапно моделирует следующие процессы: (а) прохождение быстрого тяжелого иона, ионизирующее мишень и генерирующее  $\delta$ -электроны и дырки; (б) распространение первичных и вторичных электронов и их рассеяние на атомах и электронах мишени; (в) пространственное перераспределение дырок в валентной зоне и их взаимодействие с коллективными атомными и электронными модами мишени; (г) генерацию вторичных электронов через оже-распады дырок на глубоких оболочках атомов; (д) распад глубоких дырок в результате испускания фотонов, а также дальнейшего переноса света и его поглощения с образованием новых вторичных электронов.

Построенные в рамках формализма динамического структурного фактора (ДСФ) и комплексной диэлектрической функции (КДФ,  $\varepsilon(\omega, \mathbf{q})$ ) используемые в TREKIS сечения взаимодействия учитывают коллективную реакцию электронной и атомной систем мишени на вносимое возбуждение. Это обеспечивает адекватное описание кинетики трека без процедуры подгонки. Дифференциальное сечение рассеяния заряженной частицы на мишени выражается в следующем виде:

$$\frac{d^2\sigma}{d(\hbar\omega)d(\hbar q)} = \frac{2(Z_e(v, q)e)^2}{n_{sc}\pi\hbar^2v^2} \frac{1}{\hbar q} \left(1 - e^{\frac{-\hbar\omega}{k_B T}}\right)^{-1} \text{Im} \left[ \frac{-1}{\varepsilon(\omega, \mathbf{q})} \right] \quad (1)$$

где  $Z_e(v, q)$  - эффективный заряд налетающей частицы в зависимости от её скорости  $v$  и переданного импульса  $q$  (для электрона  $Z_e = 1$ , для БТИ см. обсуждение  $Z_e$  в работе [4]);  $\hbar\omega$  - переданная энергия;  $e$  - заряд электрона;  $\hbar$  - постоянная Планка;  $k_B$  - постоянная Больцмана,  $T$  - температура образца;  $n_{sc}$  - плотность центров рассеяния.

КДФ может быть восстановлена с использованием оптических данных (коэффициент преломления и коэффициент экстинкции или длина затухания фотона). Чтобы извлечь аналитическую форму обратной мнимой части КДФ, экспериментальная зависимость функции потерь от переданной энергии аппроксимируется набором искусственных оптических осцилляторов<sup>21</sup>. Восстановленные функции потерь для различных каналов взаимодействия в MgO и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> можно найти в TREKIS; параметры сечений для YAG представлены в<sup>22</sup>.

Рассчитанные сечения вводятся в TREKIS с использованием распределения Пуассона для расстояния свободного полета и средней длины свободного пробега до рассеяния налетающей частицы. Пространственное распределение атомов и электронов мишени считается однородным с плотностями, соответствующими плотностям материалов. Эффекты ориентации, такие как каналирование БТИ, не учитываются. Никакие дефекты или примеси в материале не включены в моделирование. В соответствии с плотностью состояний (DOS)

<sup>20</sup> S. Plimpton, Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics. J. Comput. Phys. 117, 1–19 (1995)

<sup>21</sup> R.H. Ritchie, A. Howie, Electron excitation and the optical potential in electron microscopy. Philos. Mag. 36, 463–481 (1977)

<sup>22</sup> R.A. Rymzhanov, N. Medvedev, J.H. O’Connell, A. Janse van Vuuren, V.A. Skuratov, A.E. Volkov, Recrystallization as the governing mechanism of ion track formation, Scientific Reports 9 (2019) 3837-1 3837-10

материалов, электроны мишени рассматриваются, как однородно распределенные частицы, занимающие либо глубокие атомные энергетические уровни, либо состояния в валентной зоне или зоне проводимости. Учитывая большие скорости налетающих частиц, предполагается, что во время их обмена энергией и импульсом с налетающими частицами БТИ эти электроны мишени являются точечными частицами в фиксированных положениях (мгновенные столкновения).

После  $\sim 10^3$  МС итераций и статистического усреднения результатов получаются цилиндрически-симметричные пространственные и временные распределения плотностей и энергий электронов, валентных дырок и дырок на глубоких атомных оболочках.

Начальное возбуждение атомной подсистемы в треке БТИ определяется двумя источниками: (1) упругим рассеянием генерируемых электронов и валентных дырок на оптических фононах, что приводит к передаче энергии решетке мишени; (2) высвобождение потенциальной энергии в электронную подсистему посредством электронно-дырочной рекомбинации, такой как трехчастичная рекомбинация, позволяющая дополнительно нагревать атомы мишени. Предполагается мгновенная передача потенциальной энергии, запасенной в валентных дырах, в атомную подсистему через 100 фс после прохождения СВИ. В работе<sup>23</sup> правильность используемого подхода была доказана сравнением с экспериментом.

В цилиндрических слоях вокруг траектории БТИ скорости атомов задавались с использованием рассчитанного МС распределение начальной энергии, передаваемой в решетку релаксирующей электронной подсистемой. Предполагалось, что внутри каждого цилиндрического слоя распределение кинетической энергии по скорости ионов имеет гауссовскую форму и равномерное распределение по направлению импульсов. Эти распределения скоростей использовались в качестве входных данных для МД-кода LAMMPS, моделирующего последующую релаксацию решетки, приводящую к изменению структуры материала в треке БТИ.

Межатомные силы в YAG моделировались трёхчастичным потенциалом, разработанным в<sup>24</sup>, тогда как взаимодействие между атомами в  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{MgO}$  описывается парными потенциалами типа Букингема с параметризацией, взятой из работы<sup>25</sup>. Потенциал YAG был тщательно протестирован ранее, при этом детально изучены термодинамические свойства (температура плавления, теплопроводность и теплоемкость) этого материала. Кроме того, эти потенциалы проверялись по точкам плавления исследуемых материалов:  $T_{melt}(\text{Al}_2\text{O}_3) = 2250\text{K}$  (2345 K),  $T_{melt}(\text{MgO}) = 2560\text{K}$  (3125K),  $T_{melt}(\text{YAG}) = 3300\text{K}$  (2213K); экспериментальные значения приведены в скобках. Рассчитывались и упругие постоянные для  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{MgO}$ , которые находятся в разумном согласии с экспериментальными значениями. Хорошее воспроизведение эффектов БТИ в  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в широком диапазоне режимов облучения также подтверждает применимость используемого межатомного потенциала.

Размеры суперячеек, построенных для МД-моделирования, составляли  $24,8 \times 24,8 \times 14,5$  нм<sup>3</sup> для  $\text{MgO}$  (1008000 атомов),  $20,4 \times 20,5 \times 19,4$  нм<sup>3</sup> для  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (967500 атомов) и  $25,9$

<sup>23</sup> R.A. Rymzhanov, N.A. Medvedev, A.E. Volkov, Damage threshold and structure of swift heavy ion tracks in  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . J. Phys. D: Appl. Phys. 50, 475301 (2017)

<sup>24</sup> M.S. AlDosari, Thermal properties of yttrium aluminum garnet from molecular dynamics simulations. (Vanderbilt University, 2012).

<sup>25</sup> M. Matsui, Molecular dynamics simulation of structures, bulk moduli, and volume thermal expansivities of silicate liquids in the system  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ . Geophys. Res. Lett. 23, 395–398 (1996).

$\times 25,9 \times 16,1$  нм<sup>3</sup> для YAG (917280 атомов). Применялись периодические граничные условия во всех направлениях (объемное моделирование). Ионные траектории были параллельны направлению  $Z$ . Температура границ суперячейки, перпендикулярной оси  $X$  и  $Y$ , поддерживалась термостатом Берендсена<sup>26</sup> при 300 К со временем затухания 100 фс. Кинетика релаксации решетки мишени отслеживалась до 150 пс, после чего вся суперячейка охлаждалась до  $<400$  К. По истечении этого времени каких-либо структурных изменений не ожидалось, и моделирование прекращалось.

Визуализация состояний МД-ячеек в различные моменты времени после пролёта тяжелого иона выполнялась с использованием программного обеспечения OVITO с открытым исходным кодом<sup>27</sup> [17].

Хорошее совпадение с экспериментальными результатами подтверждает применимость представленной модели и использованных межатомных потенциалов для описания кинетики треков БТИ в этих оксидах.

Рассчитанные потери энергии иона ксенона с энергией 167 МэВ в MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и YAG составляют 21, 24,9 и 25 кэВ/нм соответственно. На *Рис. 11.9* показаны радиальные и временные зависимости энергии электронов и их плотности после воздействия Xe 167 МэВ на эти три мишени. Для различных моментов времени применяется цветовое кодирование. Видно, что кинетика электронной подсистемы в треках БТИ в MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и YAG различается незначительно, кроме малых расстояний от траектории иона ( $<1$  нм).

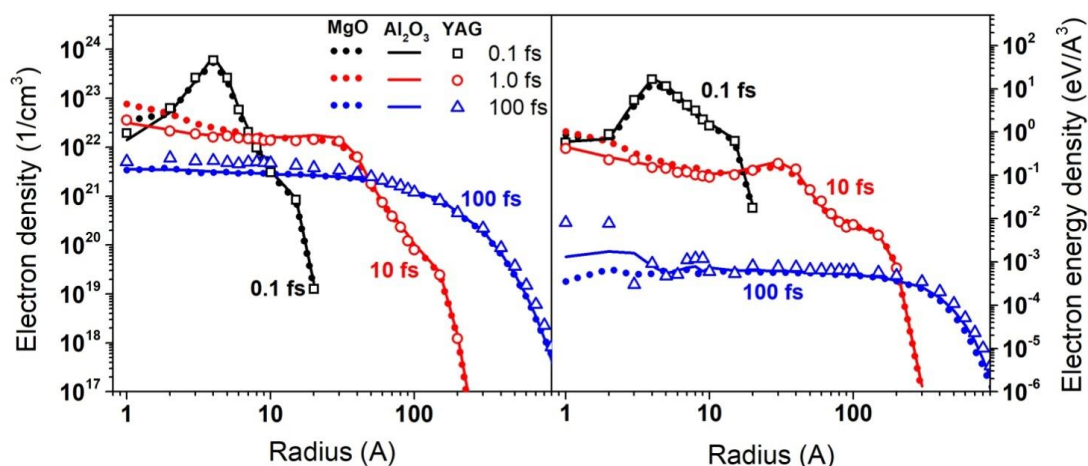


Рис. 11.9 – Радиальная плотность (левая панель) и плотность энергии (правая панель) электронов в MgO (закрашенные кружки), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (сплошные линии) и YAG (закрашенные символы) в разные моменты времени после прохождения иона Xe с энергией 167 МэВ

Радиальные распределения энергии, переданной в решетку MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и YAG к моменту релаксации избыточной энергии электронов представлены на *Рис. 11.10*. Все эти три мишени демонстрируют сходную кинетику возбуждения и релаксации электронного ансамбля в треке БТИ: образование двух фронтов распространения избыточной энергии, сравнимое энерговыделение в решетку. Немного более высокая плотность энергии в YAG в пределах  $\sim 1$  нм вокруг траектории иона вносит лишь незначительную разницу, так как

<sup>26</sup> H.J.C. Berendsen, J.P.M. Postma, W. F. van Gunsteren, A. DiNola, J.R. Haak, Molecular dynamics with coupling to an external bath. *J. Chem. Phys.* 81, 3684 (1984)

<sup>27</sup> A. Stukowski, Visualization and analysis of atomistic simulation data with OVITO—the Open Visualization Tool. *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.* 18, 015012 (2010)

объем этой области очень мал. Практически идентичная кинетика возбуждения позволяет использовать эти три системы для выделения эффекта последующей релаксации решетки на формирование треков в оксидах.

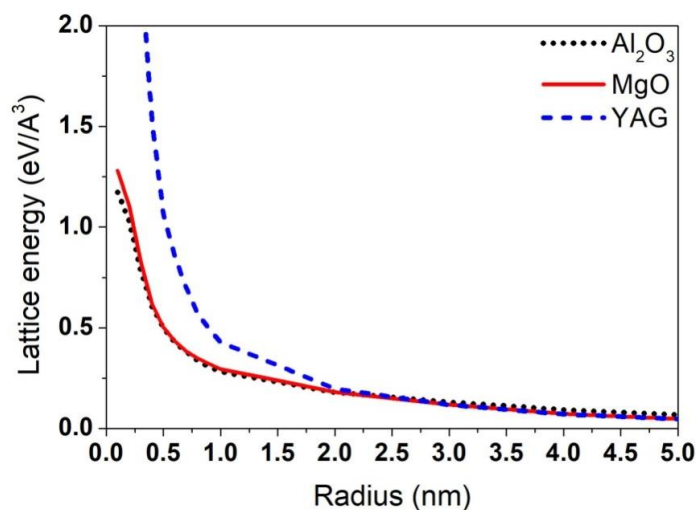


Рис. 11.10 – Радиальное распределение плотности избыточной энергии решетки вокруг траекторий иона Хе 167 МэВ в MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и YAG

Несмотря на сравнимое энерговыведение в решетку (особенно для радиусов > 1 нм), прохождение ионов Хе с энергией 167 МэВ привело к заметным различиям в формировании поврежденных структур в исследованных оксидах (Рис. 11.11). Экспериментальные фотографии показаны на вставках. Масштабы изображений MD и вставок ТЕМ одинаковы.

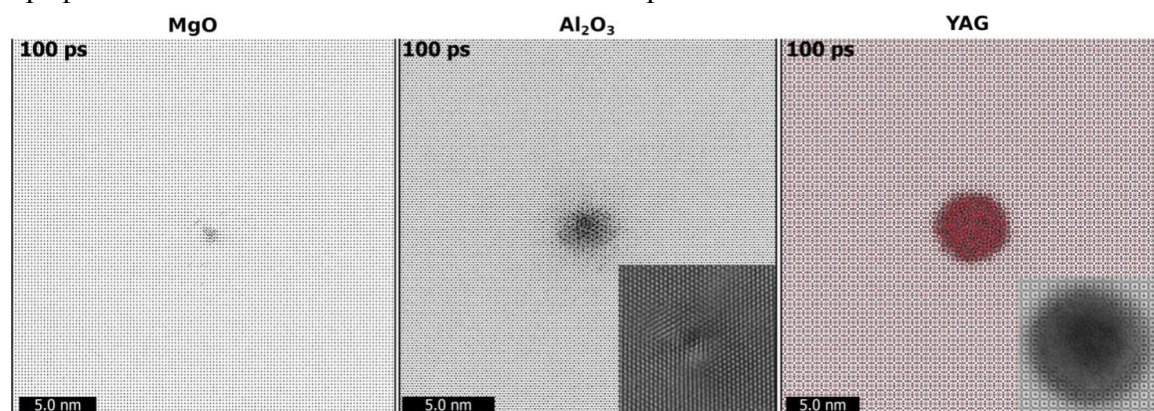


Рис. 11.11 – Моделирование треков ионов Хе с энергией 167 МэВ в трех материалах через 100 фс после прохождения иона

Наблюдаемых треков БТИ не возникает после релаксации решётки. Сверхячейка Mg в MgO содержит лишь несколько точечных дефектов в непосредственной близости от траектории иона. Аналогичная ситуация наблюдается и при облучении ионами Vi 700 МэВ. Отсутствие треков БТИ в MgO также было обнаружено и в экспериментах [18]. Отсутствие треков в этом материале иллюстрируется изображениями, полученными с помощью ПЭМ (Рис. 11.11/Рис. 11.7).

Проведённое моделирование показало, что 167 МэВ Хе в Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> образует прерывистую цепочку дефектных кристаллических кластеров диаметром ~ 2 ± 0,3 нм, что было подтверждено изображениями ПЭМ высокого разрешения. Экспериментальные

образцы были повторно проанализированы с помощью ПЭМ высокого разрешения для лучшего сравнения с предсказаниями моделирования. Типичные пластинки, обработанные фокусированным ионным пучком, имели толщину около 30-40 нм. Такие небольшие локализованные области дефектного кристалла всегда отображаются в относительно нетронутой матрице. Микрофотография HRTEM такой цепочки вдоль кристаллографического направления [0001] показана в виде вставки в том же масштабе, что и моделирование  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на Рис. 11.11. Область ядра цепочки отличается от окружающей матрицы. Деформация решётки на периферии трека видна, как небольшие локальные отклонения от идеальной структуры оси зоны, приводящие к дискретным ярким атомным рядам, сливающимся в линии яркого контраста.

Смоделированный трек в YAG имеет цилиндрическую форму с размером  $\sim 5,1 \pm 0,2$  нм и полностью аморфную структуру, что согласуется с экспериментом.

На основе 97 измеренных треков эксперимент подтверждает, что треки в YAG являются аморфными с сопоставимым диаметром  $\sim 6,5 \pm 0,6$  нм. На Рис. 11.11 показана также микрофотография HRSTEM кольцевого светлого поля (ABF) типичного трека в YAG. В этом режиме визуализации темная центральная область с относительно плоским контрастом представляет собой аморфное ядро трека. Аморфно-кристаллическая граница может быть замечена только на краю темного круга, где атомные ряды становятся видимыми. Поле деформации в кристаллической области вызывает дальнейшее затемнение вокруг периферии трека.

Таким образом, видно, что хотя начальные состояния возмущенной решетки (при  $\sim 1$  пс) в исследуемых трёх оксидах очень похожи (возникает неупорядоченная область диаметра ( $\sim 5$ -6 нм)) последующая релаксация этих областей происходит по-разному, см. Рис. 11.12.

Рассчитанные с помощью кода Дебайера [19] (конечная ширина пиков обусловлена конечным размером цилиндра) порошковые рентгенограммы для цилиндров длиной 4 нм вокруг траектории ионов показывают, что уже на ранних временах присутствует аморфная структура поврежденной области ( $< 5$  пс, правые панели на Рис. 11.12), то есть происходит плавление материалов вокруг траекторий ионов для всех рассматриваемых материалов.

Таким образом, Рис. 11.9, Рис. 11.10 и Рис. 11.12 демонстрируют, что начальная электронная кинетика, передача энергии решетке и плавление решетки в ближайшей окрестности траектории налетающего иона почти идентичны для  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и YAG. Но Рис. 11.11 и Рис. 11.12 также показывают, что структурные превращения при дальнейшем охлаждении возникших расплавленных цилиндров в  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и YAG сильно различаются (снимки для времен  $\geq 5$  пс на Рис. 11.12).

В случае  $\text{MgO}$  к моменту времени  $\sim 20$  пс аморфная область быстро эпитаксиально рекристаллизуется до почти первоначального состояния. При 100 пс порошковая дифракционная картина практически такая же, как и у неповрежденного материала. Только небольшое количество точечных дефектов все еще присутствует в ближайшей окрестности траектории БТИ. Восстановление первоначального повреждения в  $\text{Al}_2\text{O}_3$  происходит медленнее и в конечном итоге приводит к образованию цепочки небольших дефектных кристаллических кластеров. Дифракционные картины показывают, что материал восстанавливает свою структуру только частично. Размер неупорядоченной области в YAG лишь незначительно уменьшается во время охлаждения, образуя аморфный трек, что также подтверждается дифракционной картиной

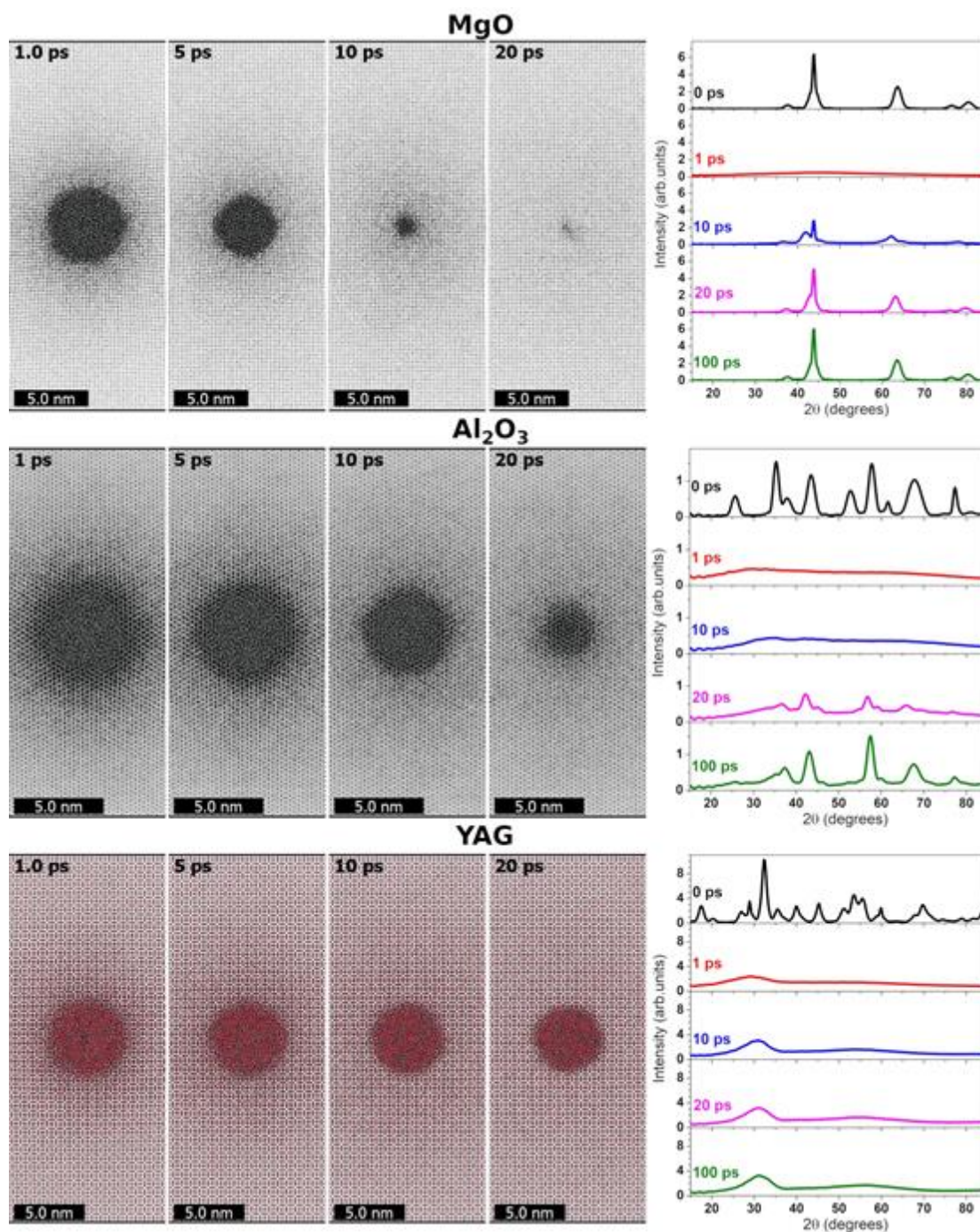


Рис. 11.12 – Снимки МД-сверхячейки (левые панели) и рассчитанные порошковые рентгенограммы (правые панели) в MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и YAG в разные моменты времени после пролёта иона Хе с энергией 167 МэВ

Полученные результаты указывают на то, что возбуждение является субдоминантным процессом по сравнению с рекристаллизацией в кинетике образования треков БТИ в исследованных оксидах.

Было проверено, существует ли какой-либо эффект упорядочения связей между атомами на начальной стадии формирования трека, который может усиливать или подавлять рекристаллизацию. Анализ парных функций распределения исследуемых материалов не выявил существенной разницы между MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и YAG в начальные моменты (при ~ 1 пс после пролёта иона) релаксации возбужденных треков (см. Рис. 11.13). Исходя из этого,



можно сделать вывод, что все эти материалы временно теряют свою структуру, и рекристаллизация начинается с подобных состояний решетки, характеризующихся одинаковыми начальными состояниями ближнего порядка в этих оксидах.

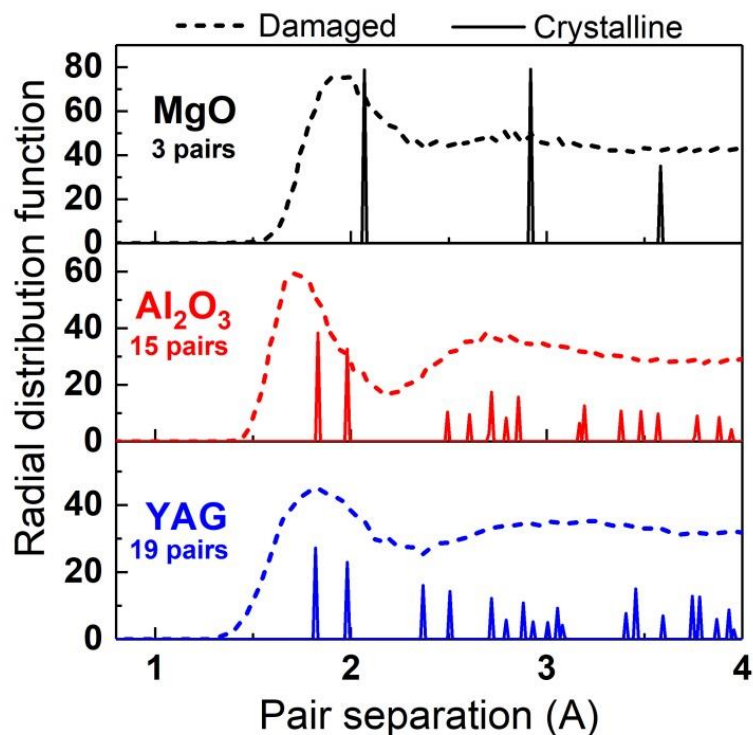


Рис. 11.13 – Смоделированные функции радиального распределения MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и YAG в состояниях неповрежденной решетки (сплошные линии) и через 1 пс после пролёта иона Xe 167 МэВ (пунктирные линии)

Следует отметить, что эффективность рекристаллизации находится в корреляции с «простотой» (или «сложностью») структуры решетки мишени, как это было предложено, например, в работе <sup>28</sup>. Чтобы дать количественную оценку этому утверждению, в простейшем случае можно определить «сложность решетки» как число пар атомов в пределах характерного межатомного расстояния. Это число может быть представлено числом пиков в парной корреляционной функции, которые приведены на Рис. 11.13. Действительно, полная и быстрая рекристаллизация наблюдается в MgO, имеющем «простую» структуру решетки с наименьшим числом пиков. Аналогичная картина наблюдалась при МД-моделировании LiF и NaCl, в которых не возникают треки БТИ<sup>29</sup>. В YAG, обладающем наиболее «сложной» структурой решетки (наибольшее количество пиков) обнаружены крупные аморфные треки. БТИ-облучение имеющего «сложную» структуру решетки Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> приводит к образованию аморфных треков, что соответствует представленной корреляции. Решетка Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> имеет промежуточную «сложность», показывая частичное формирование наблюдаемого трека. Сделан вывод о том, что «сложность» структуры может быть использована для грубой оценки ожидаемой эффективности

<sup>28</sup> F.F. Komarov, Defect and track formation in solids irradiated by superhigh-energy ions. Physics-Uspekhi 46, 1253–1282 (2003)

<sup>29</sup> S.A. Gorbunov, P.N. Terekhin, N.A. Medvedev, A.E. Volkov, Combined model of the material excitation and relaxation in swift heavy ion tracks. Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms 315, 173–178 (2013)

рекристаллизации в треках БТИ. Тем не менее, сложность структуры решетки не может рассматриваться как единственный фактор, определяющий образование повреждений в треках БТИ, но должна быть дополнена более общими предположениями, касающимися динамических свойств материалов.

Эпитаксиальная рекристаллизация представляет собой процесс перехода атомов из расплавленной области в их положения равновесия на границе раздела с кристаллической структурой. Наблюдалось, что способность аморфизации в треках БИ в этих оксидах хорошо коррелирует с вязкостью материалов в расплавленном состоянии, которая связана с эффектами динамики текучести расплавов, в которых созданы напряжения. В работе, используя молекулярную динамику и формализм Грина-Кубо, оценивалась вязкость жидких MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и YAG при температуре на 100 К выше точки плавления, (см. Табл. 11.1). Как и ожидалось, в материалах с более высокой вязкостью возникают и более крупные треки.

Табл. 11.1 Вязкости исследованных материалов в их расплавленном состоянии при температурах  $T_{\text{melt}} + 100\text{K}$

Материал	Вязкость, mPa·s
MgO	1.44
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.97
Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	6.13
YAG	9.58

Однако вязкость как макроскопическая величина не позволяет идентифицировать микроскопические эффекты, определяющие рекристаллизацию. Чтобы более детально изучить динамику рекристаллизации, рассмотрена релаксация подрешеток, показавшая, что атомы кислорода занимают свои места на эпитаксиально восстанавливающейся границе раздела кристаллической матрицы быстрее, чем атомы Mg (или Al) в MgO (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Металлические атомы приспособляются к слою кислорода, который уже построен. На Рис. 11.14 показана временная эволюция подрешеток исследуемых мишеней в разные моменты времени после прохождения ионов. На Рис. 11.14 слева показано, что диаметр поврежденной области в подрешетке кислорода меньше, чем в подрешетках Mg (Al) в случае MgO (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) в течение стадии релаксации. Временное разрешение иллюстрирует начальную стадию уменьшения размера дорожки (рекристаллизация). Серые точки - кислород, черные точки - Mg (MgO) и Al (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, YAG), красные точки - атомы Y.

Была отмечена интенсивная рекристаллизация пироклора Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> после прохождения БТИ, тогда как в Gd<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, имеющем такую же структуру, образуются аморфные треки. Кроме того, промежуточные структуры Gd<sub>2</sub>Ti<sub>x</sub>Zr<sub>(1-x)</sub>O<sub>7</sub> демонстрируют снижение эффективности перекристаллизации при увеличении содержания Ti. Это указывает на то, что прочность связи атомов кислорода оказывает существенное влияние на восстановление повреждений в треках БТИ в этих материалах.

Действительно, структуры кислородных подрешеток в Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> и Gd<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub> схожи, но существует разница между потенциалами взаимодействия Zr-O и Ti-O в этих материалах. Пары Ti-O имеют более сильную связь (минимум потенциальной энергии равен -38,8 эВ), чем связи Zr-O (-34,8 эВ). Это подавляет рекристаллизацию в подрешетке кислорода, уменьшая скорость его миграции.

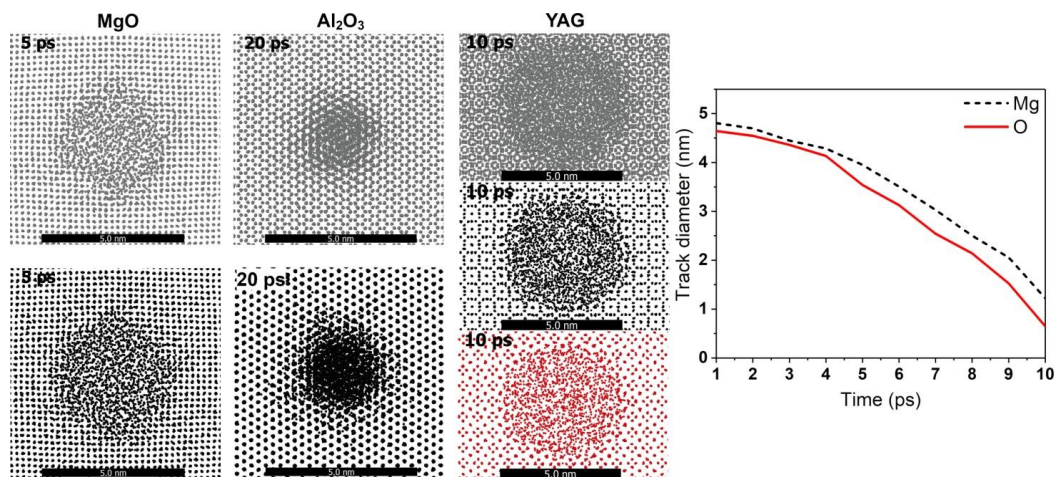


Рис. 11.14 – Левая панель – снимки подрешёток в MD-ячейках MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и YAG после прохождения иона Хе с энергией 167 МэВ; правая панель иллюстрирует эволюцию диаметров поврежденных треков в кислородных и магниевых подрешетках MgO

Чтобы проверить роль эффекта атомной подвижности в кинетике образования треков были рассчитаны коэффициенты диффузии атомов в изученных оксидах, (Рис. 11.15). Поскольку интересовало поведение атомов вблизи границы раздела между временно поврежденной (расплавленной) областью и окружающей кристаллической матрицей, скорости миграции атомов изучались как при температуре плавления, так и при температурах, отстоящих от точки плавления на  $\pm 100$  К. Температуры плавления рассчитывались для каждого конкретного межатомного потенциала, используемого для исследуемых материалов. Коэффициенты диффузии определялись как наклон среднеквадратичных смещений атомов в зависимости от времени.

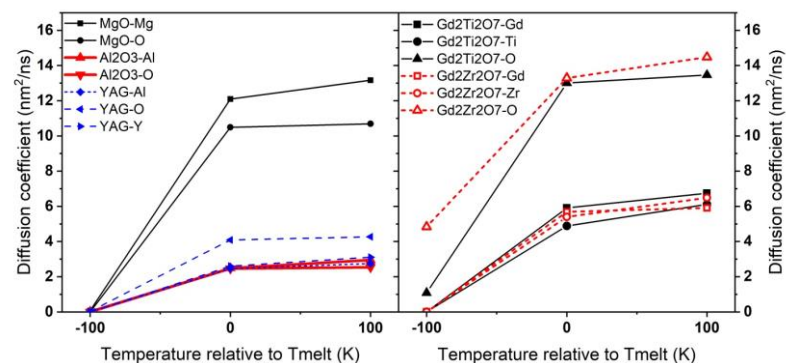


Рис. 11.15 – Коэффициенты диффузии атомов в MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и YAG (левая панель) и Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> и Gd<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub> (правая панель)

Атомы в MgO демонстрируют самые высокие коэффициенты диффузии в расплавленном режиме, а коэффициент диффузии кислорода в Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> не отличается от коэффициента диффузии в YAG. Ниже точек плавления все три мишени демонстрируют почти нулевой коэффициент диффузии. Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> имеет более высокую скорость миграции при температурах подплавления, чем Gd<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, и эта разница сильно возрастает с понижением температуры, что согласуется с результатами, представленными в<sup>30</sup> [22].

<sup>30</sup> J. Zhang, et al. Nanoscale phase transitions under extreme conditions within an ion track. J. Mater. Res. 25, 1344–1351 (2010)

Следует отметить, что межатомные потенциалы, используемые в МД, среди изученных оксидов дают самую высокую температуру плавления для YAG. Однако, несмотря на более раннее начало релаксации расплавленного трека БТИ, времени для восстановления кристаллической структуры YAG недостаточно. Это показывает, что различие в процессах рекристаллизации треков БТИ нельзя объяснить различием в их температурах плавления.

Учитывая все перечисленные факторы, можно заключить, что возможность атомов кислорода достигать своих равновесных кристаллических позиций определяет рекристаллизацию треков БТИ в представленных материалах. Быстрая диффузия кислорода способствует заполнению этими атомами кристаллических позиций при затвердевании расплавленных треков в MgO. Напротив, более медленная диффузия атомов кислорода до их положений равновесия при охлаждении нанометрической расплавленной области снижает вероятность рекристаллизации треков в Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и YAG. Видно, что при тех же коэффициентах диффузии, что и в YAG, атомы кислорода быстрее занимают свои положения равновесия в «более простой» структуре Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Это приводит к образованию прерывистых цепочек дефектных кристаллических кластеров в оксиде алюминия в отличие от появления аморфных треков в YAG. Структуры в Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> и Gd<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub> схожи, поэтому у этих мишеней не должно быть существенных различий в длинах путей атомов кислорода к их равновесным позициям. В этом случае скорость диффузии атомов кислорода становится определяющим фактором рекристаллизации треков БТИ в Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> и Gd<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub>.

Полученные результаты опубликованы в журнале первого дециля Scopus:

R.A. Rymzhanov, N. Medvedev, J.H. O'Connell, A. Janse van Vuuren, V.A. Skuratov, A.E. Volkov, Recrystallization as the governing mechanism of ion track formation, Scientific Reports (2019) 9-3837 (10pp), DOI: 10.1038/s41598-019-40239-9, WOS:000460508600067

#### 11.1.3.2 Кинетика травления треков быстрых тяжелых ионов: от микронов до нанометров

Обновлённая версия микроскопической модели была применена для получения распределений химической активности и скоростей жидкостного химического травления оливина вдоль траекторий быстрых тяжёлых ионов (БТИ, 1,7 ГэВ Хе и 16 ГэВ U), тормозящихся в режиме электронных потерь энергии.

Проведённые исследования дали возможность проанализировать пределы применимости оптической микроскопии для определения параметров налетающей тяжёлой частицы путем измерения линейных скоростей травления (ЛСТ) в натуральных оливиновых детекторах галактического космического излучения. Показано, что различие между пространственными масштабами нанометрического ядра трека (<10 нм) и длиной волны видимого света (> 400 нм) создаёт проблему для мониторинга быстрого травления этого ядра, контролируемого диффузией молекул травителя вдоль протравленного канала. Это хорошо иллюстрируется в случае коротких треков (длина <200 мкм), когда травление ядра трека происходит быстрее, чем протравленный канал начинает быть видимым в оптический микроскоп. Продемонстрирована проблема оптического метода с распознаванием разницы между значениями ЛСТ треков, по-разному ориентированных относительно начальной поверхности травления. Показано, что применение методик с нанометрическим пространственным разрешением позволяет избежать вышеупомянутых недостатков.

### 11.1.3.3 Моделирование модификации химического состояния оливина вдоль траектории БТИ.

В представленном подходе микроскопическая модель возбуждения и релаксации материала вокруг траектории БТИ используется для формирования начальных условий для количественного описания изменений химического состояния оливина в треке иона. Это обеспечивает расчёт трехмерного распределения скоростей реакции возбужденной мишени с молекулами травителя вдоль траектории ионов. Эти скорости используются в модели жидкостного химического травления треков.

Применяемая концепция возбуждения трека состоит из двух связанных подходов:

(1) Монте-Карло модель (код TREKIS), описывающая возбуждение, релаксацию электронной подсистемы мишени и ее взаимодействие с решеткой в треке БТИ до времен  $\sim 100$  фс после прохождения ионов. TREKIS обеспечивает расчёт пространственных и временных распределений параметров, характеризующих возбужденные электроны в окрестности траектории БТИ, а также энергию, которую они передают решетке мишени во время их охлаждения.

Используемые в TREKIS сечения рассеяния электронов, валентных дырок и SHI на электронной и ионной подсистемах мишени рассчитываются в рамках формализма динамического структурного фактора - комплексной диэлектрической функции (ДСФ-КДФ). Это позволяет TREKIS учитывать эффекты коллективного отклика обеих подсистем на возбуждение на ультракоротких временных и пространственных масштабах (1-100 фс, 1-10 нм) кинетики трека SHI.

(2) На основе кода LAMMPS<sup>31</sup> построена молекулярно-динамическая модель, описывающая кинетику решетки, инициируемую релаксацией избыточной энергии решётки, передаваемой из возбужденной электронной подсистемы.

Последовательное применение TREKIS и LAMMPS обеспечивает трехмерные распределения параметров, характеризующих поврежденное ядро трека, а также спектры и плотности генерируемых электронов, активирующих оливиную мишень, вплоть до микрометрических расстояний от траекторий ионов. Сопоставление этих результатов с теорией переходного состояния<sup>32,33</sup> позволяет описать распределения скоростей реакции используемого травителя с оливином на всем пути налетающей частицы.

Скорости реакций в ядре трека (диаметр  $\sim 10$  нм) рассчитывались с учетом изменения энергии Гиббса структурно-трансформированного оливина в этой области. На больших расстояниях от траектории движения ионов (до  $\sim 1$  мкм) происходят изменения энергии Гиббса оливина за счет уменьшения концентрации катионов  $Fe^+$  - при распространении электронов. Полученное трехмерное пространственное распределение относительных скоростей реакций вдоль траекторий ионов формирует начальные условия для разработанной модели жидкостного травления треков БТИ в оливине.

Сначала исследовалось травление треков, образованных ионами урана и ксенона с начальными энергиями 16 ГэВ и 1,7 ГэВ соответственно. Эти энергии ионов были выбраны так, чтобы быть близкими к тем, которые обеспечивают пороговую потерю энергии, необходимую для структурных превращений оливина быстрыми ионами ( $\sim 16$  кэВ / нм на стороне высоких энергий Брэгговской кривой электронных потерь энергии). Энергии

<sup>31</sup> S. Plimpton, Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics. J. Comput. Phys. 117, 1–19 (1995)

<sup>32</sup> K.A. Connors, New York VCH Publ. (1990).

<sup>33</sup> J. Berg, J. Tymoczko, L. Stryer, 5th Ed. New York W H Free. (2002)

моделируемых ионов и их электронные потери приведены в *Табл. 11.2*. Детали моделирования электронного возбуждения и структурных превращений, стимулированных этими ионами в оливине можно найти в<sup>34</sup>. Поскольку при моделировании не происходит заметных преобразований решетки оливина на остаточных длинах пробега, превышающих 85 мкм для ионов Хе 1,7 ГэВ и 750 мкм для ионов U 16 ГэВ, эти значения были выбраны в качестве общей длины треков.

Табл. 11.2 Энергии и электронные потери энергии в зависимости от остаточных длин пробега (см. определение RR на Рис.3.2) ионов 16 ГэВ (67,5 МэВ/н) U и 1,7 ГэВ (12,9 МэВ/н) Хе в оливине.

U ion (16 GeV)			Xe ion (1.7 GeV)			
пробег (RR), мкм	Энергия, МэВ/н	$dE/dx_e$ , кэВ/н	Пробег (RR), мкм	Энергия, МэВ/н	$dE/dx_e$ , кэВ/н	
		м				м
4.93	0.19		4.74	0.23		11
6.34	0.29		6.22	0.38		14.4
8.35	0.5		7.47	0.53		16.4
11.1	0.84		10.61	0.99		19.2
15.57	1.47		17.17	2.06		21.4
22.45	2.52		27.78	3.83		22
32.95	4.20		48.38	7.10		20.2
45.4	6.13		64.39	9.16		19.0
59.95	8.40		84.24	11.59		17.8
85.96	12.18		92.48	12.60		17.4
111.7	15.70					
160.18	21.85					
226.11	29.41					
309.59	38					
443.33	47.90					
548.02	54.62					
678.88	63.03					
750	67.5					

Расчитанные трехмерные распределения относительных скоростей реакций вдоль траекторий этих ионов представлены на *Рис. 11.16*, иллюстрирующем: (а) только 2-кратную разницу между радиусами цилиндров вокруг траекторий ионов, где химическое состояние оливина значительно изменяется, (б), но примерно в 10 раз большую разницу в длине химически активированных треков этих ионов. Синие стрелки между левой и правой цифрами указывают на разницу в длине этих треков.

Линейная скорость травления (ЛСТ) определялась, как вся регистрируемая длина протравленного канала, делённая на общее время травления, необходимое для достижения этой длины (*Рис. 11.17*). Протравленный канал диаметром 400 нм образует порог видимости для оптической микроскопии.

<sup>34</sup> R.A. Rymzhanov, S.A. Gorbunov, N. Medvedev, A.E.Volkov, Damage along swift heavy ion trajectory. Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms 440, 25–35 (2019)

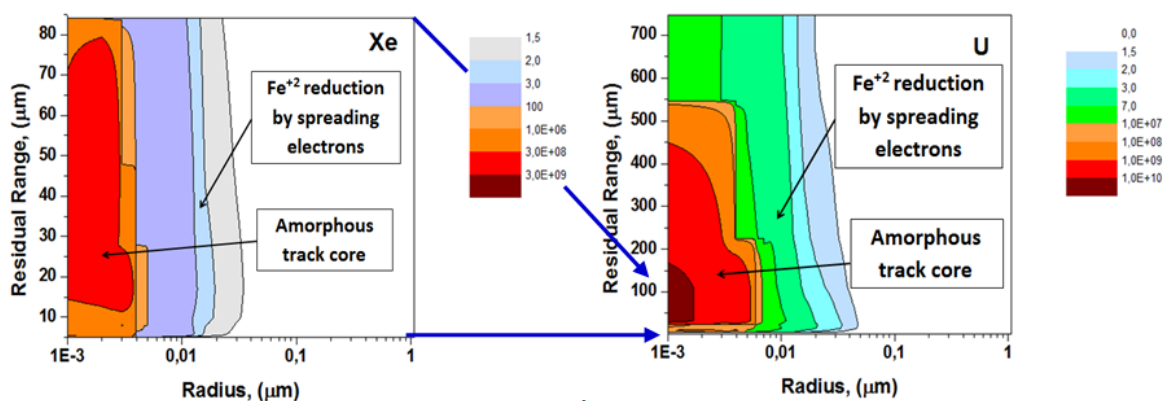


Рис. 11.16 – Распределение относительных скоростей реакции оливина с травителем в окрестностях траекторий ионов Хе 1,7 ГэВ и U 16 ГэВ

Рис. 11.17 также иллюстрирует определение остаточной длины пробега (RR) как длины части химически изменённого трека, которая доступна для травления или уже протравлена, но ещё не обнаружена на текущей стадии травления (например, оптическим микроскопом). Следует отметить, что порог различия оптической микроскопии принимался равным 400 нм во всех дальнейших расчетах, за исключением последнего раздела.

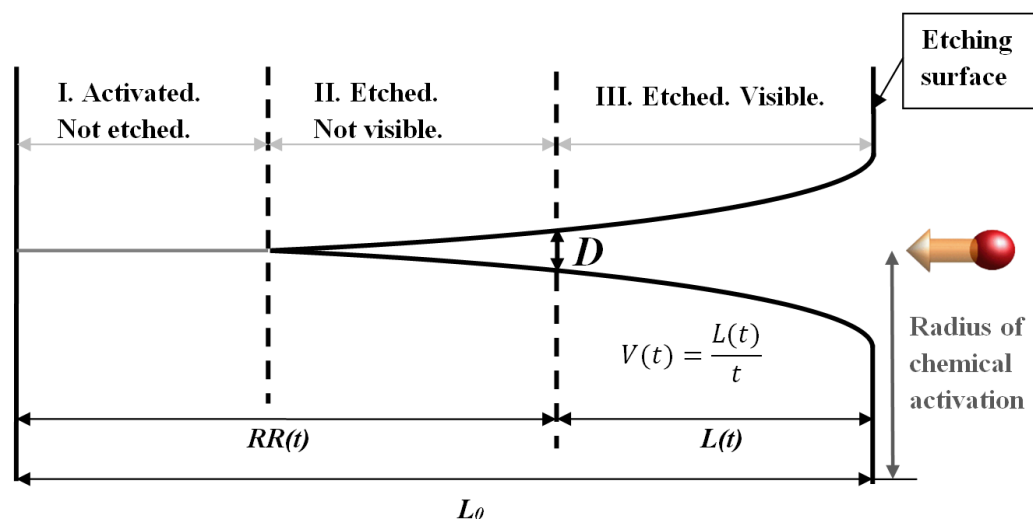


Рис. 11.17 – Скорость травления в продольном направлении ( $V$ ) как функция остаточной длины пробега ( $RR$ ).  $L$  - общая длина зарегистрированной части протравленного канала.  $T$  - общее время травления

Чтобы проверить модель, мы рассчитали продольные скорости травления (ЛСТ) вдоль траекторий ионов, сравнив эти скорости с базой данных калибровки эксперимента OLYMPIA для кристаллов оливина из метеоритов. Рис. 11.18 демонстрирует хорошее согласие между рассчитанными и экспериментальными значениями ЛСТ, когда принят порог различия 400 нм оптической микроскопии. Сплошные линии представляют ЛСТ, полученные в результате моделирования. Экспериментальные значения обозначены квадратами и ромбами. Крестики иллюстрируют погрешности эксперимента. Следует отметить, что при расчёте этих значений не применялась процедура подгонки.

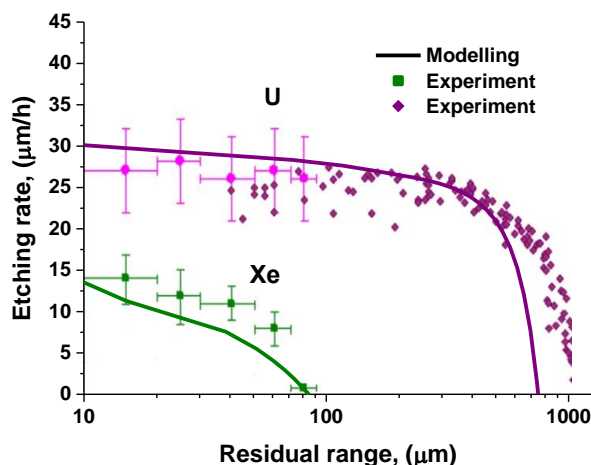


Рис. 11.18 – Скорости травления в продольном направлении в зависимости от остаточной длины пробега ионов 1,7 ГэВ Хе и 16 ГэВ U в оливине ( $(Mg_{0,11}Fe_{0,89})_2SiO_4$ )

#### 11.1.3.4 Влияние радиального распределения высаженной вдоль траектории ионов энергии на кинетику травления трека

В дополнение к Рис. 11.16 на Рис. 11.19а показано влияние скорости ионов на химическую активность оливина вокруг траекторий урана. Из-за пиковой формы зависимости электронных потерь энергии от энергии, частицы с разными скоростями могут реализовывать одни и те же электронные потери энергии. Однако разные спектры электронов, генерируемых этими ионами, в конечном итоге приводят к разным радиальным распределениям относительных скоростей реакций вокруг траекторий ионов, и, следовательно, к разной кинетике травления этих треков. Такой эффект скорости еще не был экспериментально продемонстрирован для оливина, но был обнаружен для полимера CR-39 и слюды. На Рис. 11.19б подробно представлены радиальные распределения скоростей реакций в треках ионов U с энергиями, реализующими «высокоэнергетическое» плечо кривой Брэгга электронного торможения.  $K_{Track}$  - это скорость реакции в химически модифицированном треке, а  $K_{Bulk}$  - в неповрежденном оливине.

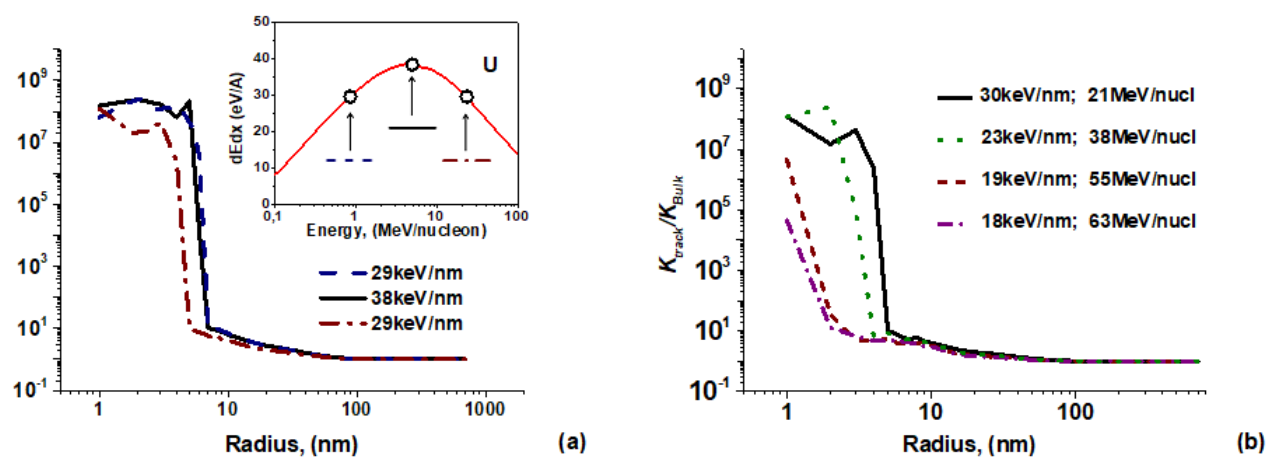


Рис. 11.19 – Относительные скорости реакции оливина с травителем в окрестности траекторий ионов U различной энергии



Представленные зависимые от скорости частицы изменения относительной скорости травления вдоль трека (Рис. 11.16 и Рис. 11.19) могут приводить к нелинейной зависимости ЛСТ от в разных точках траектории БТИ.

Чтобы проиллюстрировать способность оптической микроскопии обнаруживать зависимость ЛСТ от скорости налетающей частицы, исследовалось влияние различных ориентаций треков относительно поверхности травления. В частности, выполнялось моделирование травления треков ионов U и Xe, проникавших в кристалл оливина в противоположных направлениях к первоначально протравленной поверхности (поверхность, с которой начинается травление, см. Рис. 11.20).

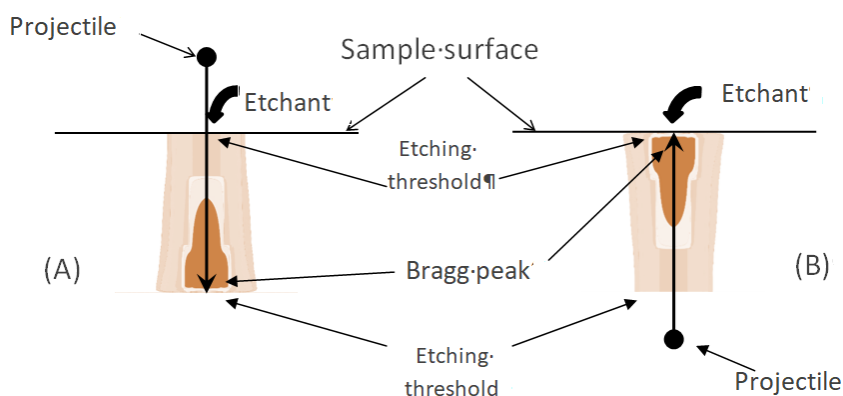


Рис. 11.20 – Реализация двух ориентаций треков быстрых тяжелых ионов: (А) точка входа в кристалл, расположена на первоначально протравленной поверхности, и (В) Брэгг пик близок к первоначально травленной поверхности

Рис. 11.21 показывает лишь небольшую разницу между зависимостями расчетного ЛСТ от остаточной длины пробега для треков ионов U и Xe, реализующих «противоположные» положения Брэгг пика электронных потерь энергии относительно поверхности травления, когда для обнаружения диаметра протравленного трека применяется порог оптической микроскопии (400 нм).

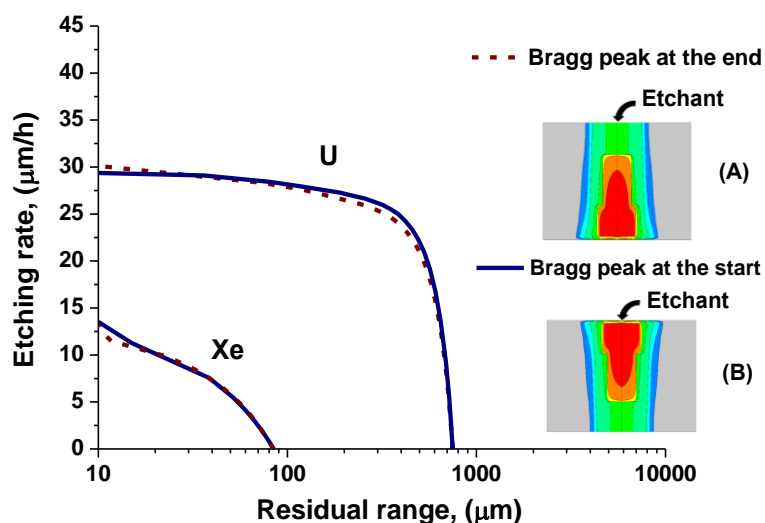


Рис. 11.21 – Продольные скорости травления треков ионов U и Xe в оливине, как функции остаточной длины пробега в зависимости от положения Брэгг пика относительно поверхности травления

С одной стороны, эти результаты показывают, что при измерении значений скорости травления с помощью оптической микроскопии не следует принимать во внимание зависимость ЛСТ от ориентации протравленного канала относительно фронта травления. Но, с другой стороны, они хорошо иллюстрируют, что исследования с помощью оптической микроскопии не могут быть применены для описания тонких эффектов травления, зависящих от радиального распределения энергии, выделяемой в электронную подсистему мишени вдоль траектории налетающей частицы. Подробный анализ этого недостатка оптической методики приведён ниже.

Регистрация налетающих частиц одного и того же типа, но разных энергий является обычным случаем для методики жидкостного травления обнаружения тяжелых ядер галактических космических лучей в небольших (1-2 мм) кристаллах оливина, содержащихся в метеоритах [5]. Действительно, прохождение такой частицы через окружающие кристаллы и металлическую матрицу снижает скорость ионов. Следовательно, при идентификации параметров ионов по данным травления выбранного кристалла необходимо учитывать не только различные ориентации траекторий ионов, но также разные начальные энергии налетающей частицы, приводящие к разным длинам регистрируемых треков. Это разнообразие протравленных треков вызывает разнообразие радиальных распределений избыточной энергии, накопленной вдоль траекторий *Рис. 11.22*. Точка входа в кристалл находится на первоначально протравленной поверхности, и (В) конец трека находится близко к первоначально протравленной поверхности.

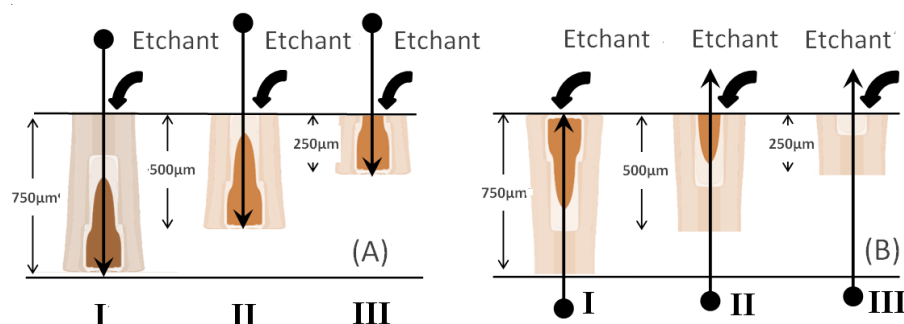


Рис. 11.22 – Травление треков ионов U различной длины в оливиновых детекторах. (А)

Чтобы исследовать влияние полного диапазона ионов на детектируемую ЛСТ, было выполнено моделирование травления треков ионов U длиной 750 мкм (начальная энергия ионов 67,5 МэВ / нук), 500 мкм (50 МэВ / нук) и 250 мкм (31 МэВ / нук)

*Рис. 11.23* () демонстрирует, что:

(а) Оптическая микроскопия может предоставить адекватную информацию об ионных параметрах только для участков треков с остаточной длиной пробега  $RR < 50-100$  мкм даже для самых длинных протравленных треков.

(b) По-всяки видимости, 250 мкм можно рассматривать как пороговую минимальную длину трека, необходимую для извлечения адекватной информации о параметрах налетающей частицы по методике жидкостного травления, когда оптическая микроскопия используется для обнаружения протравленного канала. Для таких коротких треков только протравленный отрезок соответствующий  $RR < 20$  мкм может быть проанализирован для извлечения параметров ионов.

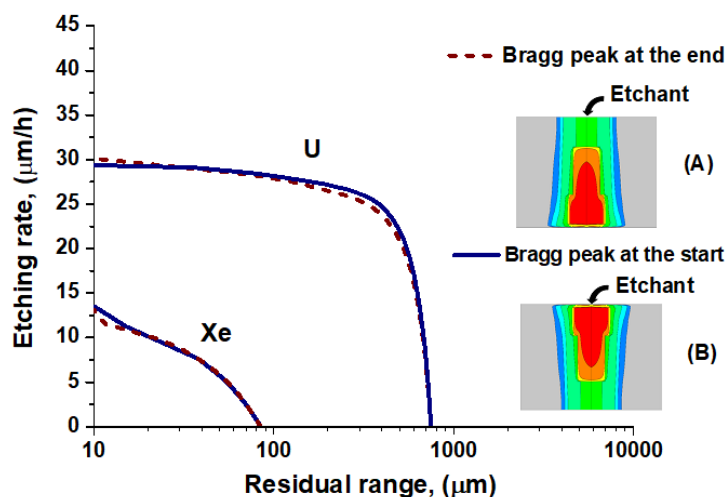


Рис. 11.23 – Скорости травления в продольном направлении треков в зависимости от остаточных длин пробега для различных длин треков урана в оливине (750, 500 и 250 мкм)

Эффект различной ориентации этих треков относительно поверхности травления показан сравнением левой панели и правой панелей. 400 нм предполагается в качестве порога видимости протравленного трека.

Чтобы дополнительно исследовать последнее утверждение, было выполнено моделирование травления треков ионов Хе 1,7 ГэВ и U 2,8 ГэВ. Имея различающиеся в два раза начальные электронные потери энергии (см. Табл. 11.1), эти ионы образуют в оливине протравленные треки одинаковой длины (85 мкм). Рис. 11.24 демонстрирует лишь незначительное различие между рассчитанными зависимостями ЛСТ от  $RR$  для треков этих ионов, когда оптическая микроскопия используется для регистрации протравленных треков. Это указывает на то, что оптическая методика не может идентифицировать ионы, образующие такие короткие треки.

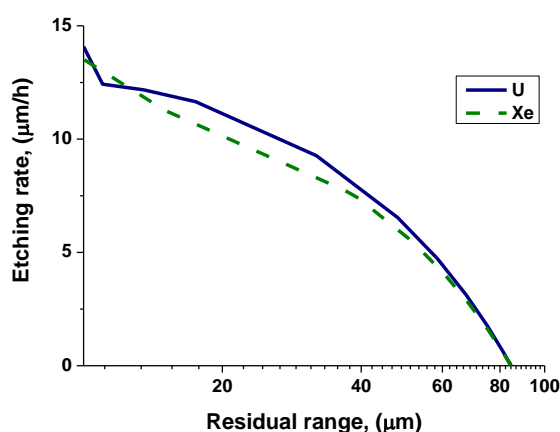


Рис. 11.24 – Скорости травления в продольном направлении треков 2,8 ГэВ U и 1,7 ГэВ Хе как функции остаточной длины пробега, в случае, когда длины треков этих ионов в оливине одинаковы (85 мкм)

Традиционная точка зрения на процессы травления треков в минералах, сформулированная в 1960-х годах<sup>35</sup> и систематизированная в 1970-х годах<sup>36</sup>, связывает значение ЛСТ с потерями энергии БТИ в данной точке траектории. Это мнение не учитывает особенностей пространственного распределения избыточной энергии вокруг траектории ионов. Моделирование продемонстрировало, что обнаруженные значения ЛСТ зависят от пространственного разрешения применяемого метода регистрации протравленных каналов. Поэтому зависимость ЛСТ от радиального распределения высвобождаемой энергии может быть распознана методами, обеспечивающими порог видимости сравнимый с характерной длиной этого распределения.

Для иллюстрации проблемы применения оптической микроскопии представлен *Рис. 11.18*, демонстрирующий различие между формами длинных (U 16 ГэВ) и коротких (Xe 1,7 ГэВ) треков к тому времени, когда длина протравленного канала, обнаруженного с помощью оптической микроскопии, равна половине от общей длины трека, которая может быть зафиксирована.

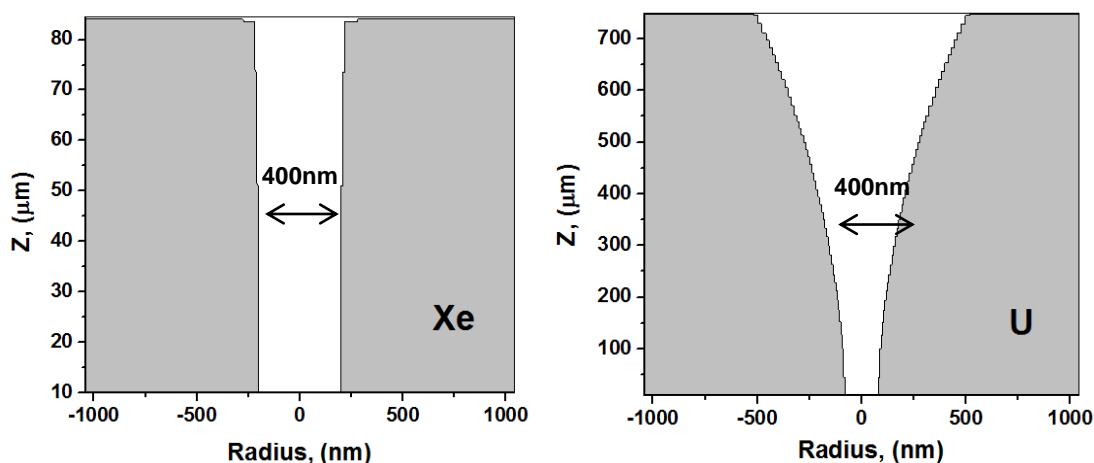


Рис. 11.25 – Формы протравленных треков ионов Хе 1,7 ГэВ и U 16 ГэВ к моменту, когда длина протравленного канала, обнаруженного оптическим микроскопом, составляет половину от общей его длины

Короткие протравленные треки (ион Хе 1.7 ГэВ, *Рис. 11.25*) имеют почти цилиндрическую форму. Это происходит из-за быстрого травления сильно химически модифицированного оливина в ядре трека. Этот процесс регулируется диффузией молекул травителя вдоль протравленного канала. После формирования узкого нанометрического структурно-изменённого ядра дальнейшее травление такого трека происходит в радиальном направлении и определяется постоянной концентрацией молекул травителя вдоль оси трека. Травление трековой оболочки ( $r > 20$  нм) контролируется скоростью реакции чистого или слегка возбужденного оливина с травителем. Такое медленное травление периферии: (а) слабо зависит от параметров налетающей частицы, и (б) требует гораздо большего времени для достижения порогового диаметра 400 нм, чем для полного протравливания ядра коротких треков. Это приводит к тому, что с помощью оптической микроскопии не может быть обнаружено разницы между продольным травлением коротких треков ионов Хе и U,

<sup>35</sup> P.B. Price, R.L. Fleischer, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 21 (1971) 295–334.

<sup>36</sup> P.F. Green, R.K. Bull, S.A. Durrani, *Nucl. Instruments Methods.* 157 (1978) 185–193

независимо от разности диаметров первоначально их протравленных ядер. Действительно, наше моделирование продемонстрировало, что параметры налетающей частицы вряд ли можно восстановить из значений ЛСТ, извлеченных из результатов травления коротких треков одинаковой длины (менее  $\sim 200$  мкм), когда оптическая микроскопия используется для измерения размера протравленных каналов.

Для более длинных треков (U-ион, правая панель на *Рис. 11.25*) из-за конечной скорости диффузии молекул травителя фронту травления требуется значительное время, чтобы достичь ядра трека на глубоких участках ионной траектории ( $> 300$ - $400$  мкм). Это приводит к гораздо большему времени, доступному для радиального травления вблизи поверхности кристалла, формируя конусообразную форму протравленного трека. Кроме этого, концентрация травителя в окрестности поверхности кристалла всегда выше, чем в более глубоких частях длинного трека из-за расхода молекул травителя в результате их реакции со стенками протравленного канала. Это увеличивает конусность формы этого канала.

Проведенное моделирование продемонстрировало недостатки применения оптической микроскопии для фиксации травления треков БТИ с различными начальными энергиями. Действительно, легко детектируемые различия в трехмерном распределении скоростей травления проявляются только внутри нанометрического цилиндра с диаметром, значительно меньшим, чем порог различимости  $400$  нм оптической микроскопии (см. *Рис. 11.17*). Управляемое диффузией травление химически сильно модифицированного оливина в ядре трека происходит и заканчивается слишком быстро, а радиальный пространственный масштаб протравленных нанометрических каналов слишком мал для распознавания с помощью оптической микроскопии.

Вышеупомянутых проблем можно избежать, применяя экспериментальные методы регистрации диаметров протравленных каналов с наноразмерным разрешением. Чтобы продемонстрировать такую возможность, были промоделированы скорости травления в продольном направлении треков ионов U и Xe одинаковой длины ( $85$  мкм), используя пороговые диаметры различимости протравленного канала в диапазоне от  $4$  до  $60$  нм (*Рис. 11.26*). Использовались пороги различимости диаметра протравленного канала ( $D$ ) (a)  $4$ , (b)  $10$ , (c)  $32$  и (d)  $60$  нм.

Если порог  $D = 4$  нм меньше диаметров ядер треков обоих ионов, то ЛСТ уменьшается, когда остаточная длина пробега уменьшается, то есть с увеличением протравленной длины (*Рис. 11.26а*). Это происходит из-за увеличения времени, необходимого молекулам травителя для диффузии к фронту травления

При пороге видимости  $D = 10$  нм больше, чем диаметр ядра трека ионов ксенона, но сравнимым с диаметром ядра трека урана, обнаруживаются два различных режима травления треков: (a) контролируемое реакцией травление гало, содержащего ионизованные атомы  $Fe^+$  в треках Xe, и (б) намного более быстрое управляемое диффузией травление ядра трека в U треках. *Рис. 11.26б* иллюстрирует эту разницу.

Увеличение порога видимости до  $D = 32$  нм означает, что контролируемое реакцией травление гало ионизованных атомов  $Fe^+$  доминирует для треков обоих ионов. Детектируемые скорости травления намного меньше, чем скорости травления, контролируемые диффузией, представленные на *Рис. 11.26а* и на *Рис. 11.26б* для урана. В треках урана концентрация атомов  $Fe^+$  больше, чем в треках ксенона, что приводит к большим значениям регистрируемой ЛСТ для треков урана.

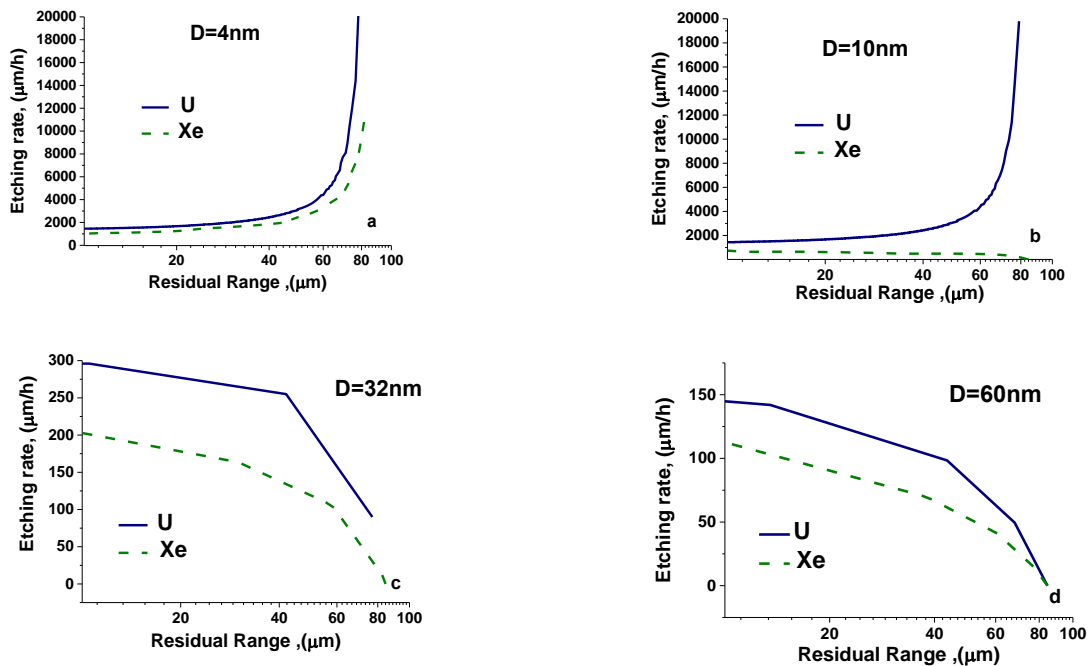


Рис. 11.26 – Скорости травления в продольном направлении одинаковых по длине (85 мкм) треков ионов U и Xe в оливине в зависимости от остаточной длины пробега

Порог видимости  $D = 60$  нм (Рис. 11.26d) приводит к фиксации травления в дальних областях гало обоих треков, где: (а) концентрация ионов  $\text{Fe}^+$  мала, что приводит к снижению регистрируемой ЛСТ, и (b) разнице между этими концентрациями в треках урана и ксенона уменьшаются по сравнению с таковыми на более коротких расстояниях от ионных траекторий. Это вызывает уменьшение разницы между обнаруженными ЛСТ для треков U и Xe. Эти тенденции сохраняются при увеличении порога видимости до  $D=400$  нм, что в итоге приводит к неразличимости линейных скоростей травления треков U и Xe, показанных на Рис. 11.26.

Согласно Рис. 11.26 можно наблюдать два вида зависимостей ЛСТ и  $RR$  для различных порогов различимости протравленных каналов: (а) когда минимальный регистрируемый диаметр меньше диаметра ядра трека, регистрируемая скорость травления уменьшается, когда уменьшается остаточная длина пробега из-за уменьшения скорости диффузии молекул травителя с увеличением длины протравленного канала; (b) для противоположной зависимости между порогом видимости и диаметрами ядра трека, регистрируемая ЛСТ увеличивается, когда  $RR$  уменьшается. Последний случай возникает из-за того, что протравленный трек становится оптически видимым намного позже времени травления его ядра (Рис. 11.27). На Рис. 11.27 представлена зависимость от времени оптически видимой длины протравленных треков ионов U 16 ГэВ, полученных в результате моделирования. Скорость травления в продольном направлении определяется как зарегистрированная длина травления, деленная на общее время травления. На Рис. 11.27 показано, что для преодоления порога оптической видимости (400 нм) протравленного канала требуется не менее 5 часов. Это приводит к недооценке зарегистрированного усредненного ЛСТ ( $V_{\text{LER}} = L/T$ ) в начальные моменты времени. Когда время травления увеличивается, усредненная ЛСТ также увеличивается, стремясь к её стационарному значению.

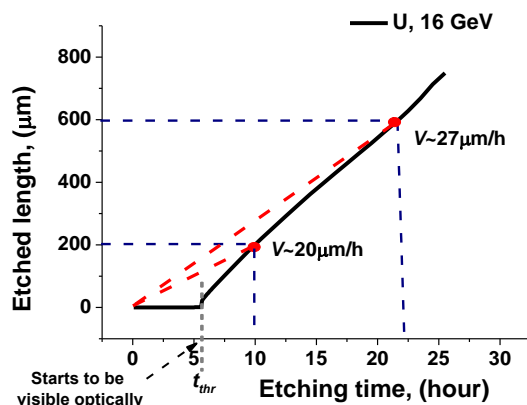


Рис. 11.27 – Полученная в результате моделирования зависимость от времени оптически видимой длины протравленного в оливине трека иона U 16 ГэВ

Все сделанные выше выводы применимы, когда реализуется диффузионно-контролируемое травление ядра трека ( $R < 10$  нм). Следует подчеркнуть, что коэффициент диффузии молекул травителя и продуктов реакции предполагался постоянным во всех представленных реализациях моделях.

Но этот коэффициент диффузии молекул травителя может варьироваться в зависимости от диаметра изначально протравленного наноразмерного канала (ядра трека). Действительно: (а) авторы<sup>37,38</sup> обсуждали изменения коэффициента диффузии жидкости в зависимости от диаметра наноразмерного канала, а (б) молекулярно-динамическое моделирование диффузии воды в углеродных нанотрубках<sup>39</sup> выявило изменение коэффициента диффузии в  $\sim 10$  раз при увеличении диаметра нанотрубок. В частности, уменьшение коэффициента диффузии травителя в нанометрических цилиндрических каналах может понизить скорость их травление.

Зависимость коэффициента диффузии от диаметра ядра нанометрического канала может привести к различию в оптически детектируемой кинетике травления коротких треков одинаковой длины ионов U и Хе. Этот эффект будет исследован позже.

Таким образом, разработанный подход, основанный на многостадийном моделировании жидкостного химического травления треков быстрых тяжелых ионов, тормозящихся в режиме электронных потерь энергии, является мощным инструментом для изучения изменений химических состояний и кинетики травления материалов вокруг траектории налетающих БТИ. Рассчитанные значения скорости травления в продольном направлении в оливине и зависимость этой скорости от остаточной длины пробега очень близки к тем, которые были обнаружены в экспериментах для ионов Хе 1,7 ГэВ и U 16 ГэВ.

Однако, было продемонстрировано, что применение оптической микроскопии вызывает проблемы для описания более сложных эффектов травления треков, обусловленных особенностями влияющего на диффузионное травление ядра трека радиального распределения избыточной энергии, высаженной вдоль траектории ионов. Эта проблема возникает из-за разницы между нанометрическими масштабами ядра трека и

<sup>37</sup> S.M. Hsu, Z.C. Ying, Nanotribology: critical assessment and research needs, London : Kluwer Academic Publishers, 2003

<sup>38</sup> H. Akiyoshi, K. Koga, J. Phys. Soc. Japan. 81 (2012) SA022

<sup>39</sup> A.B. Farimani, N.R. Aluru, J. Phys. Chem. B. 115 (2011) 12145

микрометрическим разрешением оптических методов, ограниченной длиной волны видимого света. Было продемонстрировано, что методики мониторинга с наноразмерным разрешением протравленных каналов могут исправить некоторые из этих недостатков. Для этой цели может быть применена атомная силовая или сканирующая электронная микроскопия. Также может быть применен недавно разработанный *in-situ* неразрушающий метод<sup>40</sup> определения параметров протравленных треков с нанометрическим разрешением с использованием рентгеновской диагностики.

Полученное фундаментальное знание, разработанные аналитические и численные модели и методы имеют мультидисциплинарный характер, поскольку могут быть применены:

1. В ядерно-энергетических технологиях при оценках радиационной стойкости материалов к облучению осколками деления, тормозящимися в режиме электронных потерь энергии.
2. При создании нового поколения детекторов заряженных частиц.
3. Для обоснования и разработки методик контролируемого производства упорядоченных наноразмерных 3D гетероструктур, путём выбора оптимальных параметров облучения БТИ, тормозящимися в режиме электронных потерь энергии.
4. При построении моделей возбуждения материалов фемтосекундными лазерными импульсами высокой интенсивности.
5. В технологиях, основанных на химической активации и травления трековых областей.
6. Полученные результаты могут быть полезны для медико-биологических приложениях. В частности, при совершенствовании методик ионно-лучевой терапии.

#### 11.1.4 Численное моделирование экспериментов для исследования свойств веществ в экстремальных состояниях на ускорителе FAIR

На основании ранее разработанных схем эксперимента NINEX (FAIR) продолжена работа по численному моделированию результатов воздействия пучков ионов никеля с энергией 0.5 AGeV, интенсивностью  $10^{11}$  и длительностью 100 нс (в соответствии с запланированными параметрами пучка "первого дня" - FAIR Day#1 Experiment) на свинцовые образцы, помещенные в атмосферу аргона, предварительно сжатого до давления 100 бар. Размер фокального пятна пучка варьировался в пределах  $\sigma = 0.25 \times 0.6$  мм /  $0.25 \times 1.4$  мм (FWHM =  $0.6 \times 1.4$  мм /  $0.6 \times 3.3$  мм).

Рассматривались две постановки: массивный свинцовый "столбик" и фольга толщиной 200 мкм. Ранее было показано, что для достижения наиболее интересных высоких целевых давлений необходимо наличие сдерживающего "буферного" слоя вокруг расширяющегося материала образца, который также должен оставлять возможность использования экспериментальной диагностической аппаратуры. Расчеты показали, что вариант с сапфировыми пластинами вокруг свинцовой фольги, показанный на Рис. 11.28, при использовании реалистичных и доступных в обозримое время параметров пучка недостаточно для попадания в интересующую нас область состояний свинца. Так, на Рис.

---

<sup>40</sup> A. Hadley, C. Notthoff, P. Mota-Santiago, U.H. Hossain, S. Mudie, M.E. Toimil-Molares, et al., Nucl. Inst. Methods Phys. Res. B. 435 (2018) 133–136.



11.28 на фазовой диаграмме давление-плотность для свинца зеленой линией показана траектория состояний образца при нагреве "мощным" урановым пучком ( $U$ , 2 ГэВ/н,  $10^{11}$ ) и синей линией - при использовании пучка ионов  $Ni$  "Первого дня".

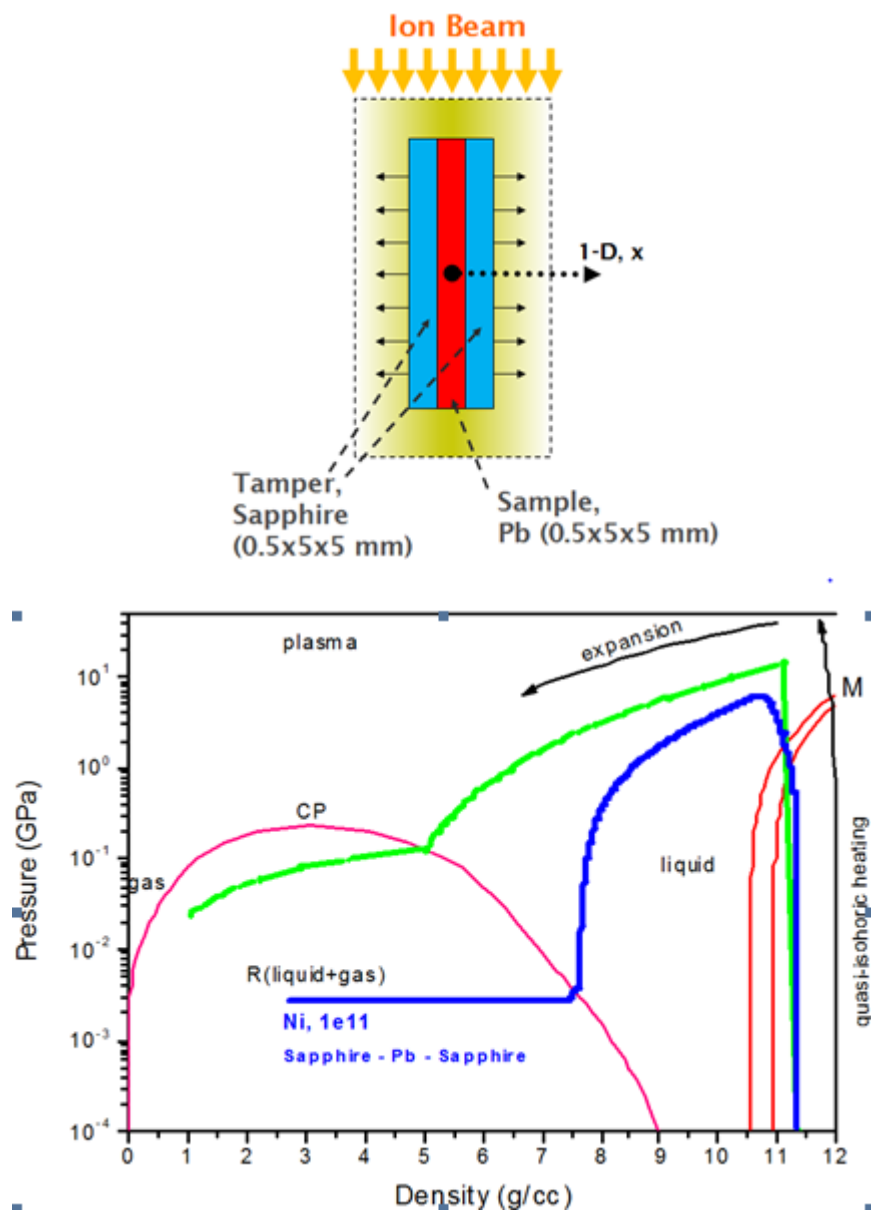


Рис. 11.28 – Схема эксперимента по нагреву свинцовой фольги, зажатой между двумя сапфировыми пластинами (слева) и области на фазовой диаграмме свинца, достижимые в этом эксперименте (справа)

В качестве альтернативы были предложены схемы с использованием газового буферного слоя: свинцовый образец в виде массивного "столбика" или фольги толщиной 200 мкм помещается в замкнутую сборку высокого давления, заполненную аргоном до давления 100 бар. Подразумевается наличие в стенках сборки прозрачных окон для использования регистрационной аппаратуры. Экспериментальные схемы показаны на Рис. 11.29.

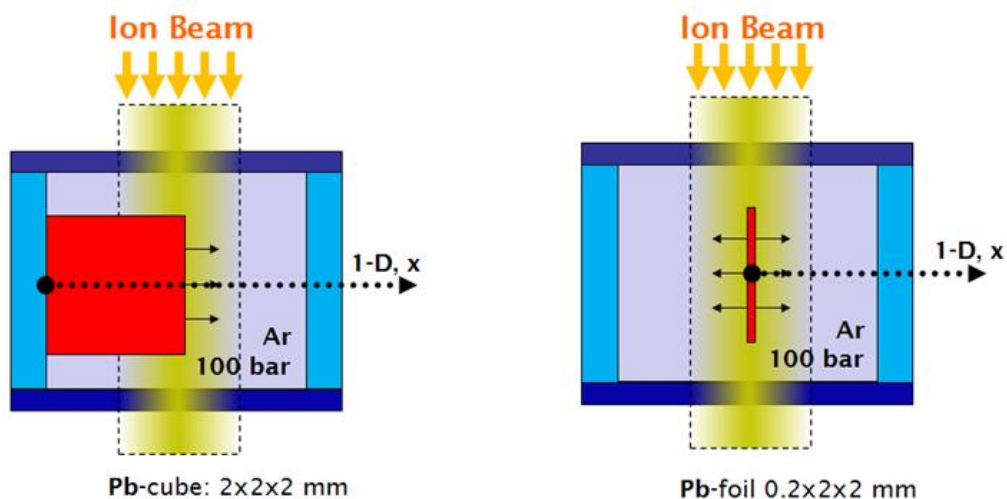


Рис. 11.29 – Схема экспериментов со свинцовым "столбиком" (слева) и свинцовой фольгой 200 мкм (справа) в атмосфере аргона с начальным давлением 100 бар

Результаты моделирования нагрева и расширения свинцового образца для двух схем показаны на Рис. 11.30. Варьировалась фокусировка пятна пучка по оси  $Y$  от  $\sigma_y=0.5$  до 1.5 мм. Зелеными кривыми показаны эволюции термодинамических состояний материала мишени на поверхности и в глубине (на оси симметрии) образца. Верхние линии в группе соответствуют меньшим значениям  $\sigma_y$ . Наблюдается отличие термодинамических параметров в центре и на поверхности мишени, что объясняется сложным газодинамическим процессом эволюции звуковых волн сжатия и разгрузки в расширяющейся мишени, образования ударной волны в аргоне и ее последующим затухании.

Количественное сравнение результатов показало, что при одинаковых исходных параметрах пучка в схеме с использованием фольги систематически достигаются более высокие давления. Также, при использовании массивного образца "столбика" после нагрева в нем образуется интенсивная ничем не скомпенсированная ударная волна, которая может усложнить технические условия для безопасного многократного проведения эксперимента. В дальнейшем рассматривалась схема с фольгой, как наиболее перспективная из двух вариантов.

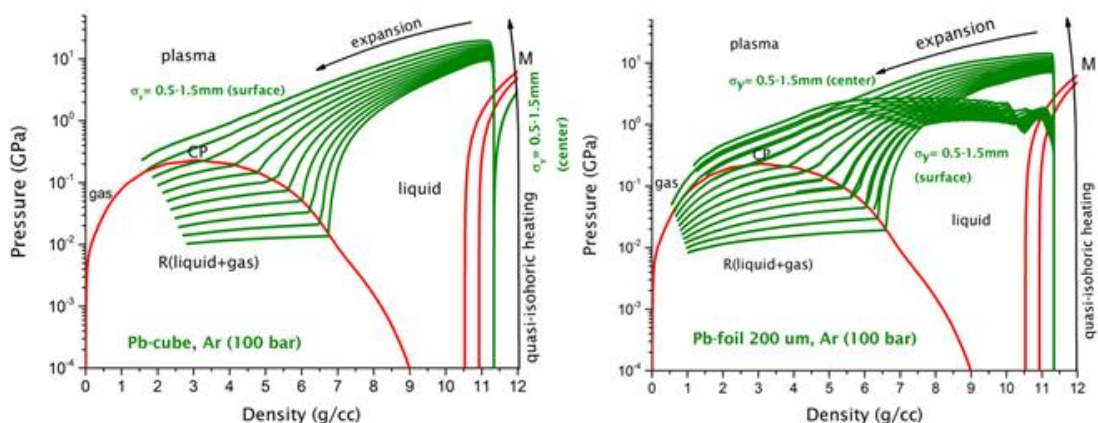
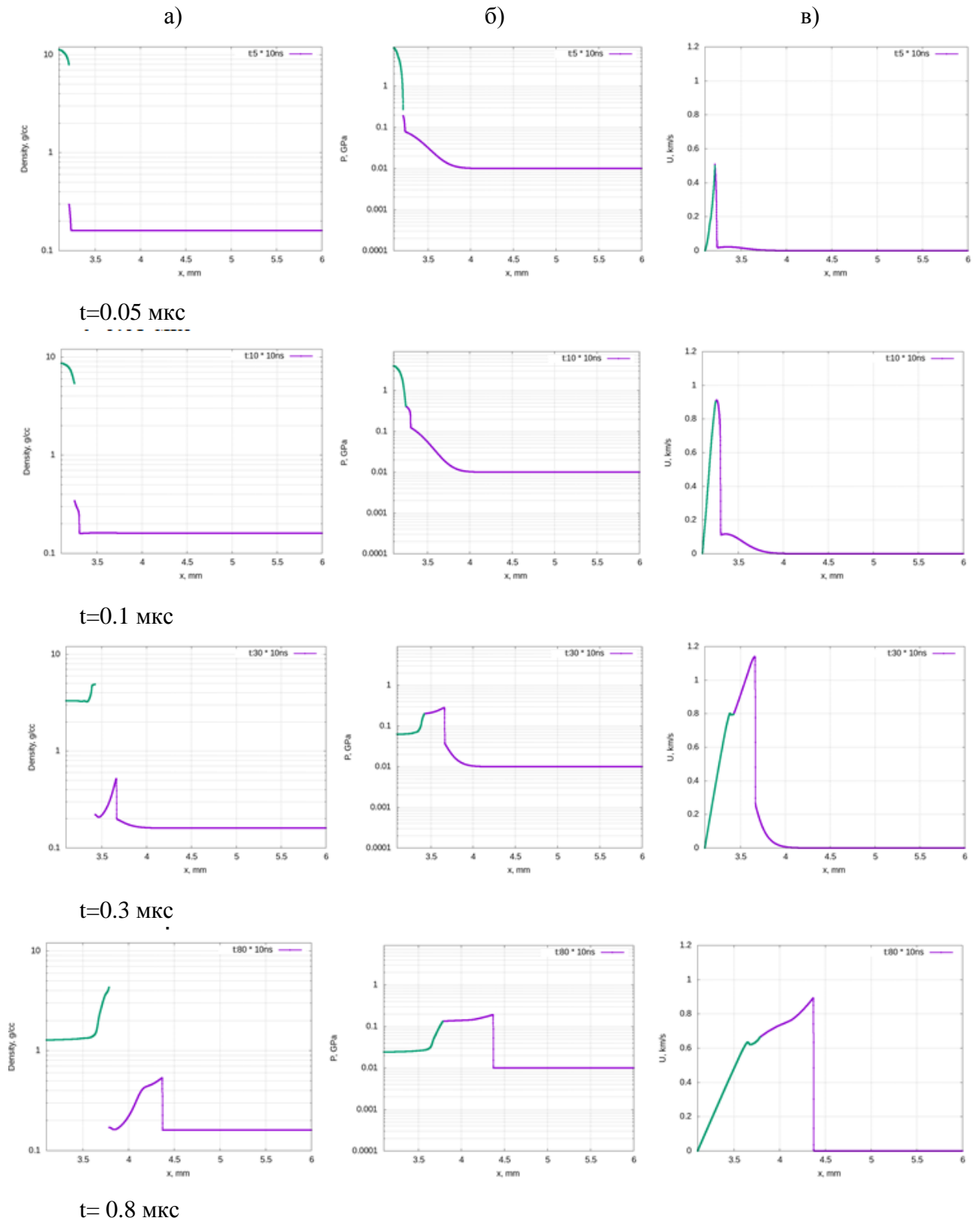


Рис. 11.30 – Траектории состояния материала мишени на фазовой диаграмме давление–плотность свинца, для случая нагрева "столбика" (слева) и фольги (справа) в атмосфере аргона

На *Рис. 11.31* приведены одномерные профили распределения плотности, давления и массовой скорости в фольге и в аргоне, вдоль основного направления расширения (ось "X" на *Рис. 11.29*) в различные моменты времени, для варианта  $\sigma_y=1.1$  мм.



**Рис. 11.31** – 1D-профили плотности (а), давления (б) и массовой скорости (в) в полу-мишени (зеленым) и аргоне (фиолетовым), в моменты времени  $t=0.05, 0.1, 0.3$  и  $0.8$  мкс

В момент времени 0.05 мкс в центре фольги достигается максимальное значение давления 8.5 ГПа, на профилях давления и массовой скорости видно начало формирования ударной волны в аргоне и движение аргона, вызванное нагревом газа пучком.

К моменту времени 0.1 мкс действие пучка заканчивается, давление в центре фольги падает до 4 ГПа, аргон разогревается пучком до 3700 К, и на глубину ~1 мм.

В момент времени 0.3 мкс хорошо видно сформировавшуюся ударную волну в аргоне, свинец продолжает расширяться с почти равномерным распределением плотности по ширине образца: 3.3 г/см<sup>3</sup>. При этом вблизи контактной границы в свинце образуется слой более плотного вещества ~5 г/см<sup>3</sup>, который наблюдается вплоть до времени 0.8 мкс.

На Рис. 11.32 показаны аналогичные профили маркера фазового состояния материала мишени; 1 - твердое тело, 2 - область плавления, 3 - жидкость, 4 - двухфазная область "жидкость-газ", 5 - газ. На них видно, к моменту времени  $t=0.03$  мкс мишень полностью плавится, и на протяжении времени от 0.18 мкс до 0.8 мкс представляет собой однородную расширяющуюся двухфазную смесь, на краях которой существует слой конденсированного жидкого свинца значительной толщины, параметры которого практически постоянны и соответствуют параметрам на кривой сосуществования "жидкость-пар".

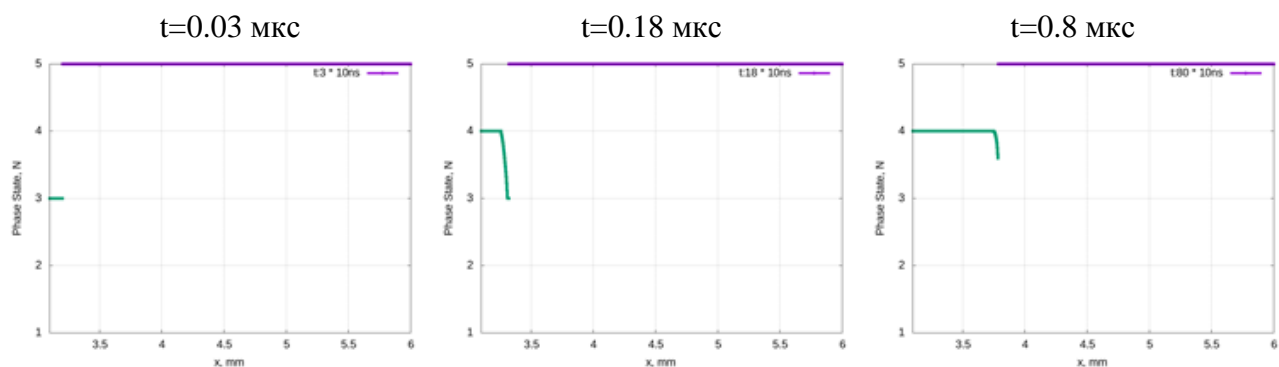


Рис. 11.32 – 1D-профили фазового состояния в полу-мишени (зеленым) расширяющейся в аргон (фиолетовым), в моменты времени  $t=0, 0.03, 0.18$  и  $0.8$  мкс

На Рис. 11.33 показаны поперечные сечения результатов 3D-расчета эксперимента в момент времени 0.22 мкс, хорошо виден слой плотного жидкого свинца на границе с аргонном.

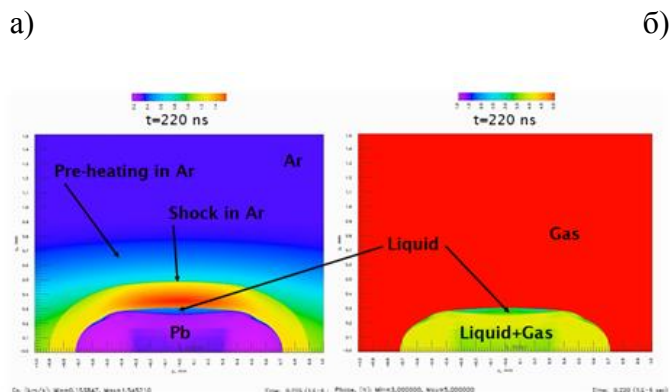


Рис. 11.33 – 2D-распределения давления (а) и фазового состояния материала (б) в горячей фольге, расширяющейся в аргон, в момент времени  $t=0.22$  мкс

Практический интерес предоставляет возможность экспериментальной регистрации моментов возникновения и пропадания этого слоя. Его возникновение сильно позже окончания фазы нагрева и большое время жизни позволяют надеяться на это.

Временная эволюция термодинамических параметров в барьерном газе по оси X показывает сложный характер газодинамического течения. В газе формируется ударная волна с типичной массовой скоростью от 0.6 до 1 км/с, которая может хорошо детектироваться стандартными методами. Далее по мере расширения вещества мишени в газ происходит сложный газодинамический процесс переотражения волн сжатия и расширения вещества на границе с расширяющимся газом, по которому распространяется ударная волна. Вопрос восстановления параметров давления на границе "свинец-аргон", необходимого для определения давления на границе мишени, оказывается чрезвычайно сложен. Вероятно, нагрев ионным пучком прилегающего слоя газа и возникновение начального пространственного распределения давления и массовой скорости, и последующая динамика взаимодействия вещества мишени и газа не допускают аналитического решения задачи и для интерпретации экспериментальной временной зависимости профиля давления на границе необходимо привлекать аппарат газодинамического численного моделирования.

Следует отметить, что параметры основной ударной волны в аргоне приводят к степени ионизации не более  $10^{-10}$  (концентрация электронов  $10^{12}$ , оценка по модели SAHA4), что говорит о сохранении оптической прозрачности аргона на всем протяжении эксперимента. Таким образом имеется возможность применения оптических методик регистрации температуры и массовой скорости (интерферометрия).

Таким образом, наиболее перспективной представляется схема эксперимента с использованием тонкой фольги, помещенной в атмосферу аргона, сжатого до давления 100 бар. Планируемой мощности пучка на этапе эксперимента "Первого дня", с варьированием параметров фокусировки пучка в допустимых пределах оказывается достаточно для достижения околоскритических параметров в свинце. Многообещающим - для регистрации момента перехода через кривую кипения - выглядит возможный режим с образованием тонкого конденсированного слоя на поверхности горячей расширяющейся двухфазной смеси свинца.

#### 11.1.5 Оптимизация источников рентгеновского излучения и ускоренных частиц для диагностики в экспериментах проекта FAIR

В соответствии с планом были проведены эксперименты по прямому лазерному ускорению электронов в протяженной плазме с плотностью электронов, близкой к критической плотности, на лазерной установке PHELIX с использованием двух лазерных импульсов: наносекундной и субпикосекундной длительности. В качестве мишеней использовались слои полимерной пены низкой плотности толщиной 300-450 мкм и комбинации пены с плоской металлической фольгой толщиной от 10 мкм до 2 мм. В пенах плазма околоскритической плотности создавалась по механизму сверхзвуковой ионизации, когда отдельный наносекундный импульс посылался на пенопластовую мишень до прихода основного релятивистского импульса.

В экспериментах использовались две различные фокусирующие параболы с фокусными расстояниями 150 см и 40 см, которые позволяли достигать интенсивностей основного субпикосекундного импульса от  $10^{19}$  Вт/см<sup>2</sup> до  $5 \times 10^{20}$  Вт/см<sup>2</sup> (см. Рис. 11.34).

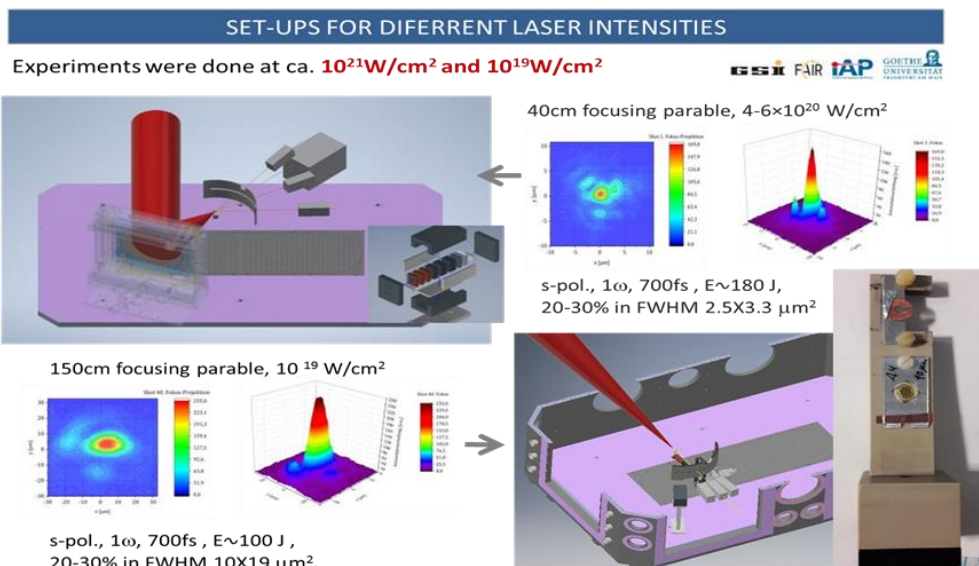


Рис. 11.34 – Схема экспериментов с различными интенсивностями лазерного импульса

Для диагностики угловых и энергетических распределений ускоренных электронов использовались электронные спектрометры с постоянным магнитным полем, положение которых изменялось для получения дополнительной информации, а также экранированные несколькими слоями 3 мм стали пластины изображения ("image plates") для получения информации в широком диапазоне углов вылета электронов (см. Рис. 11.35).

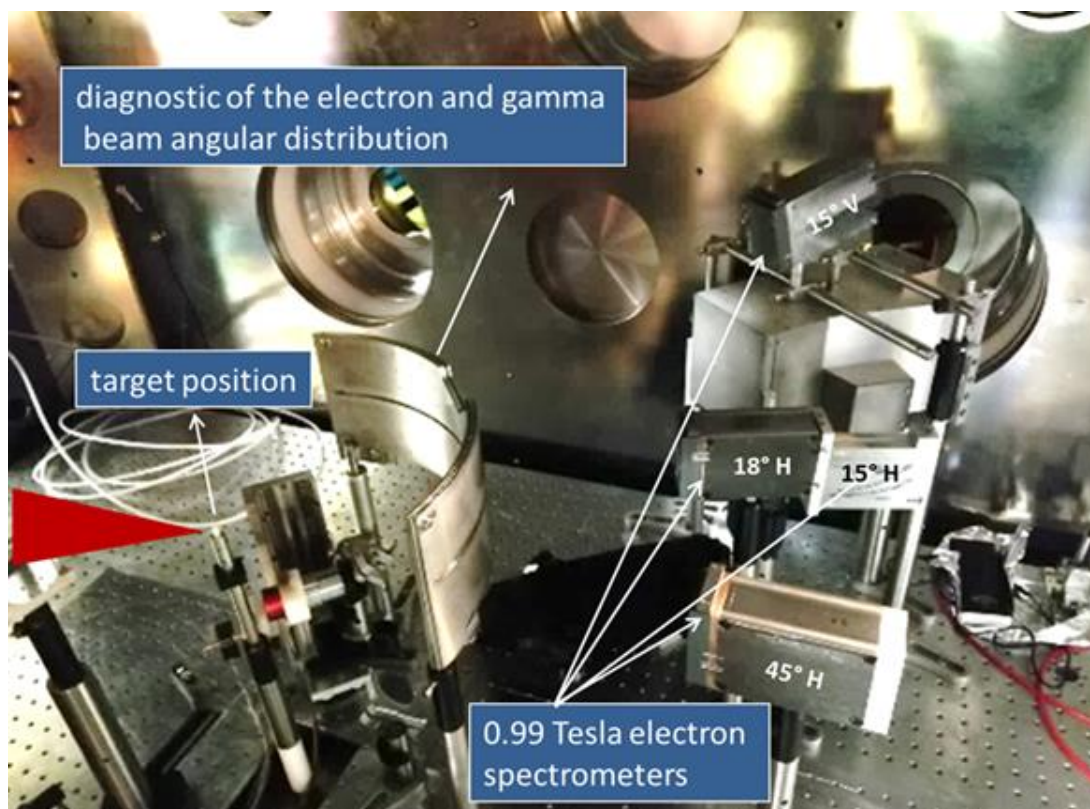


Рис. 11.35 – Диагностическое оборудование для определения угловых и энергетических распределений ускоренных электронов

Анализ экспериментальных данных показывает десятикратное увеличение характерной энергии ускоренных электронов до 12 - 14 МэВ при использовании мишеней из пены с околоритической плотностью электронов по сравнению с твердотельными металлическими мишенями. Пример энергетических распределений релятивистски-ускоренных электронов для мишеней из пены и чистых фольг из золота толщиной 10 мкм показаны на *Рис. 11.36* при интенсивности основного субпикосекундного лазерного импульса  $10^{19}$  Вт/см<sup>2</sup>. Наблюдаемая тенденция к сильному увеличению средней энергии и числа ускоренных лазером ультрарелятивистских электронов при использовании мишеней из пены подтверждается результатами измерений гамма-излучения, которые показали увеличение измеренных доз в 1000 раз.

### ELECTRON ENERGY DISTRIBUTION INSIDE RELATIVISTIC CONE

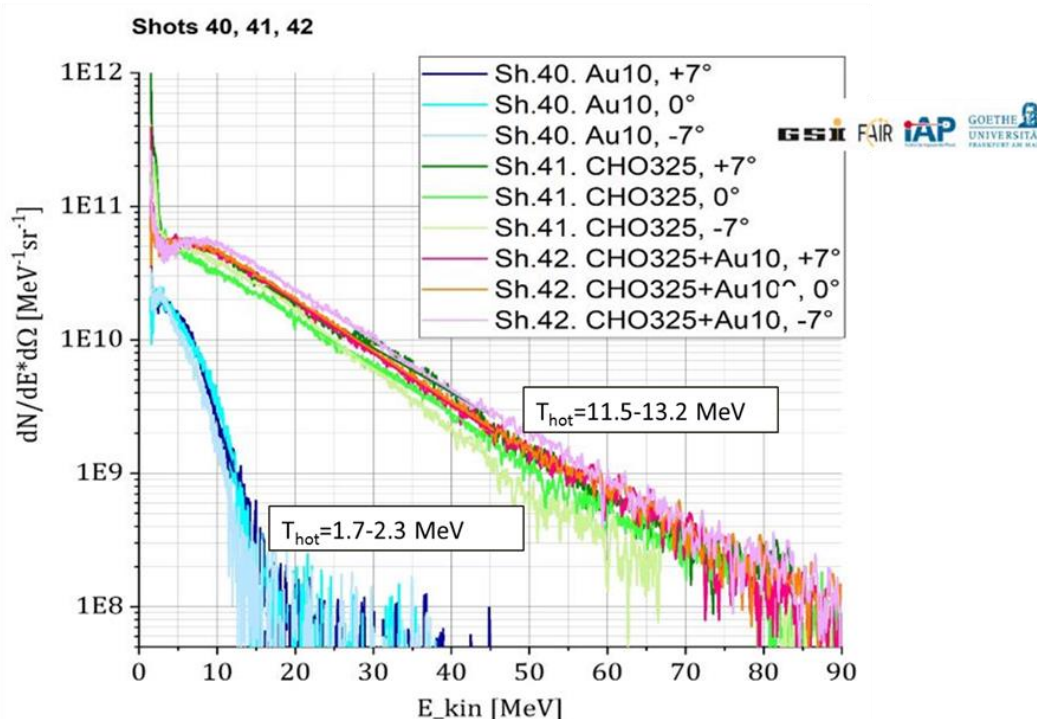


Рис. 11.36 – Энергетические распределения релятивистски-ускоренных электронов для мишеней из пены и чистых фольг из золота толщиной 10 мкм при интенсивности основного субпикосекундного лазерного импульса  $10^{19}$  Вт/см<sup>2</sup>

В настоящее время большой массив данных, полученных в эксперименте по характеристикам ускоренных электронов, жесткого излучения, а также фото-ядерным реакциям, находится в стадии обработки и анализа.

Полученные результаты указывают на высокую эффективность мишеней с околоритической плотностью для создания вторичных источников электронов высоких энергий и жесткого излучения для целей диагностики протяженных образцов вещества с высокой плотностью энергии, создаваемых пучками тяжелых ионов в рамках проекта FAIR.

## 11.2 План работ на 2020 год

1. Подготовка и проведение эксперимента по оптимизации рентгеновского диагностического метода для регистрации излучения мишени под воздействием тяжелоионного пучка.

2. Подготовка экспериментов на протонно-радиографической установке PRIOR-II.

3. Взаимодействие с веществом быстрых тяжёлых ионов (БТИ), тормозящихся в режиме электронных потерь энергии.

4. Численное моделирование постановок экспериментов с интенсивными пучками ионов по нагреву и расширению нагретой свинцовой фольги в буферный газ с варьированием параметров фокусировки пучка, толщины фольги, начального давления в аргоне, для определения оптимальных параметров мишени.

5. Оптимизация источников рентгеновского излучения и ускоренных частиц для диагностики в экспериментах проекта FAIR.

Объём финансирования на 2020 г.: 60 тыс. US\$.

Планируемые поездки:

Подготовка и проведение эксперимента на UNILAC, февраль - март – 5 чел. x мес. – 25000 US\$

Подготовка и проведение эксперимента на SIS-18, апрель – июнь - 5чел.х мес. - 25000 US\$

Подготовка эксперимента на SIS-18 – сентябрь – декабрь – 2 чел.-мес. - 10000 US\$

## 11.3 Приложение А

1. Число специалистов, участвующих в эксперименте в 2019 году - 25 чел.

2. Число молодых специалистов (<35 лет), привлеченных в эти работы - 14 чел

3. Число аспирантов и студентов –16.

4. Число диссертаций на соискание ученых степеней, защищенных в рамках участия в работах центра – 0.

5. Число публикаций в ведущих научных журналах (с указанием наименования издания, в т.ч. из базы WoS), содержащих результаты интеллектуальной деятельности, полученные в рамках участия в работах центра - 21, число докладов, сделанных российскими участниками от имени сотрудничества – 40.

Список публикаций 2019 года

1. А.А. Голубев, А.В. Канцырев, В.А. Панюшкин, О.С. Сергеева, В.С. Скачков, В.В. Васильев, Магнитный сканер для высокоэнергетичных пучков тяжёлых ионов, Приборы и техника эксперимента, 2019, № 5, с. 100–105;
2. M. Durante, A. Golubev, W.-Y. Park, C. Trautmann, Applied nuclear physics at the new high-energy particle accelerator facilities , Physics Reports, 2019, Vol. 80, pp.1-38.
3. H.Kagan ...A.Golubev, E.Grigoriev et al., Diamond detector technology, status and perspectives, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, Vol. 924, pp. 297-300;



4. D.S. Kolesnikov, A.V. Kantsyrev, A.A. Golubev, Method for Reconstructing Volume Density Distribution in Dynamic Targets in Proton Radiography Experiments, *Physics of Atomic Nuclei*, 2019, Vol. 82, No. 12, pp. 1–6;
5. A.O. Khurchiev, R.O. Gavrilin, S.A. Visotskiy, D.S. Kolesnikov, A.V. Kantsyrev, I.V. Roudskoy, S.M. Savin, A.A. Golubev, A.P. Kuznetsov, Laser interferometry for measurements of electron density and degree of ionization in a hydrogen plasma target, 2019, GSI Report 2019-2, p.7;
6. D. Kolesnikov, A. Bogdanov, A. Golubev, A. Kantsyrev, V. Mintsev, V. Panyushkin, N. Shilkin, A. Skobliakov, Density reconstruction in proton radiography experiments with shock compressed gases, GSI Report 2019-2, p.8-9;
7. O. N. Rosmej, S. Zähler, M. Gyrdymov, A. Kantsyrev, A. Skobliakov, V. Panyushkin, A. Bogdanov, XCOT-system for imaging of the heavy ion beam intensity distribution on target in Phase-0 and at FAIR, GSI Report 2019-2, p.29;
8. A. Skobliakov, O. N. Rosmej, A. Kantsyrev, A. Bogdanov, V. Panyushkin, A. Golubev, Numerical simulation of XCOT diagnostic of the heavy ion beam for upcoming HIHEX experiment, GSI Report 2019-2, p.30;
9. R.O Gavrilin, A.O. Khurchiev, D.S. Kolesnikov, S.A. Visotskiy, R.P. Kuibeda, P.A. Fedin, A.V. Bogdanov, V.A. Panyushkin A.V. Kantsyrev, I.V. Roudskoy, S.M. Savin, A.A. Golubev, Stopping power measurement for 100 keV/u Fe ions in hydrogen plasma, GSI Report 2019-2, p.38-39;
10. R.A. Rymzhanov, S.A. Gorbunov, N. Medvedev, A.E. Volkov, Damage along swift heavy ion trajectory, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B* 440 (2019) 25–35, DOI: 10.1016/j.nimb.2018.11.034, WOS:000456352200004
11. M.Yu. Karganov, I.B. Alchinova, M.V. Polyakova, V. I. Feldman, S.A. Gorbunov, O.M. Ivanov, R.A. Rymzhanov, V.A. Skuratov, A.E.Volkov, Stability of dry phage lambda DNA irradiated with swift heavy ions, *Radiation Physics and Chemistry* 162 (2019) 194–198, DOI: 10.1016/j.radphyschem.2019.04.048 WOS: 000474311900027
12. R.A. Rymzhanov, N. Medvedev, J.H. O'Connell, A. Janse van Vuuren, V.A. Skuratov, A.E.Volkov, Recrystallization as the governing mechanism of ion track formation, *Scientific Reports* (2019) 9-3837 (10pp), DOI: 10.1038/s41598-019-40239-9, WOS:000460508600067
13. S.A.Gorbunov, R.A.Rymzhanov, A.E.Volkov, Dependence of track etching kinetics on chemical reactivity around the ion path, *Scientific Reports*, (2019) 9-15325 (10pp), DOI: 10.1038/s41598-019-51748
14. R.A.Khmel'nitski, V.V.Kononenko, J.H.O'Connell, V.A.Skuratov, G.F.Syrykh, A.A.Gippius, S.A.Gorbunov, A.E.Volkov, Effect of the electronic kinetics on graphitization of diamond irradiated with swift heavy ions and fs-laser pulses, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B* 400 (2019) 47-51, DOI:10.1016/j.nimb.2018.11.021
15. O N Rosmej, N E Andreev, S Zaehter, N Zahn, P Christ, B Borm, T Radon, A Sokolov, L P Pugachev, D Khaghani, F Horst, N G Borisenko, G Sklizkov, V G Pimenov. Interaction of relativistically intense laser pulses with long-scale near critical plasmas for optimization of laser based sources of MeV electrons and gamma-rays. *New J. Phys.* 21 (2019) 043044. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/ab1047>

16. V.S. Popov, N.E. Andreev. Acceleration of electrons in the interaction of a subterawatt laser pulse with a nonuniform plasma. *Quantum Electronics* **49** (4) 307 – 313 (2019) <https://doi.org/10.1070/QEL16992>
17. G S Mishura and N E Andreev. Capture and acceleration of electrons by the ultrarelativistic wakefield. *Journal of Physics: Conf. Series* 1147 (2019) 012077. doi:10.1088/1742-6596/1147/1/012077
18. V S Popov, L P Pugachev and N E Andreev. Effect of laser pulse self-focusing on plasma wave generation in the interaction of subterawatt laser pulse with a plasma jet. *Journal of Physics: Conf. Series* 1147 (2019) 012078. doi:10.1088/1742-6596/1147/1/012078
19. M E Povarnitsyn, O N Rosmej and N E Andreev. On ionization dynamics of metal targets irradiated by high-contrast relativistic-intense laser pulses. *Journal of Physics: Conf. Series* 1147 (2019) 012079. doi:10.1088/1742-6596/1147/1/012079
20. L P Pugachev and N E Andreev. Characterization of accelerated electrons generated in foams under the action of petawatt lasers. *Journal of Physics: Conf. Series* 1147 (2019) 012080. doi:10.1088/1742-6596/1147/1/012080
21. Zhanna Samsonova, Sebastian Höfe1, Vural Kaymak, Skirmantas Ališauskas, Valentina Shumakova, Audrius Pugžlys, Andrius Baltuška, Thomas Siefke, Stefanie Kroker, Alexander Pukhov, Olga Rosmej, Ingo Uschmann, Christian Spielmann, and Daniil Kartashov. Relativistic interaction of long-wavelength ultrashort laser pulses with nanowires. *Phys. Rev. X* **9**, (2019) 021029, DOI: 10.1103/PhysRevX.9.021029 <http://arxiv.org/abs/1809.08882>

Число докладов от имени коллабораций, сделанных российскими учёными: 40

Список докладов на конференциях 2019 г., в которых были представлены результаты работ.

1. Колесников Д.С., Реконструкция протонно-радиографических изображений, 53-я Зимняя Школа Петербургского Института Ядерной Физики НИЦ "Курчатовский Институт", 02-07 марта 2019;
2. Волков В.А., Численное моделирование взаимодействия пучков быстрых тяжёлых ионов с веществом в эксперименте НИХЕХ на FAIR, 53-я Зимняя Школа Петербургского Института Ядерной Физики НИЦ "Курчатовский Институт", 02-07 марта 2019;
3. Скобляков А.В., Полномасштабное Монте-Карло моделирование экспериментов на протонном микроскопе PRIOR-II, 39th International Workshop on Physics of High Energy Density in Matter, Хиршегг Австрия, 27 января-02 февраля 2019;
4. Гаврилин Р.О., Ion stopping in hydrogen plasma experiment at linear accelerator at ИТЕР, 39th International Workshop on Physics of High Energy Density in Matter, Хиршегг Австрия, 27 января-02 февраля 2019;
5. Kantsyrev A.V., ИТЕР's activity at HED@FAIR collaboration, Annual HED@FAIR collaboration meeting 2019, Москва, 05 -07 июня 2019;
6. Kolesnikov D.S., Density reconstruction in proton radiography experiments with shock compressed gases, Annual HED@FAIR collaboration meeting 2019, Москва, 05 -07 июня 2019;

7. Bogdanov A.V., Development of ion-optical schemes of proton microscopes, Annual HED@FAIR collaboration meeting 2019, Москва, 05 -07 июня 2019;
8. Panyushkin V.A., Tomographic reconstruction at proton radiography, Annual HED@FAIR collaboration meeting 2019, Москва, 05 -07 июня 2019;
9. Volkov V.A., Residual dose rate estimate for PRIOR experiment at HHT, Annual HED@FAIR collaboration meeting 2019, Москва, 05 -07 июня 2019;
10. Skobliakov A.V., Numerical simulation of XCOT diagnostic of the heavy ion beam for upcoming HINEX experiment, Annual HED@FAIR collaboration meeting 2019, Москва, 05 -07 июня 2019;
11. Roudskoy I.V., The observation of plasma lens with discharge initiation by the electron beam, Annual HED@FAIR collaboration meeting 2019, Москва, 05 -07 июня 2019;
12. Khurchiev A.O., Laser interferometry for measurements of electron density and degree of ionization in a hydrogen plasma target, Annual HED@FAIR collaboration meeting 2019, Москва, 05 -07 июня 2019;
13. Gavrillin R.O., Stopping power measurement for 100 keV/u Fe ions in hydrogen plasma, Annual HED@FAIR collaboration meeting 2019, Москва, 05 -07 июня 2019;
14. Khurchiev A.O., Laser interferometry for measurements of electron density and degree of ionization in a hydrogen plasma target, 6-я международная научная школа FAIR, Кастильоне-делла-Пеская, Италия, 7-14 сентября 2019;
15. Kolesnikov D.S., Density reconstruction in proton radiography experiments with shock compressed gases, 6-я международная научная школа FAIR, Кастильоне-делла-Пеская, Италия, 7-14 сентября 2019;
16. Богданов А.В., Эксперимент по лазерному ускорению электронов при взаимодействии пикосекундного лазерного импульса высокой энергии с подкритической плазмой, Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике (МКТЭФ-2019), 25-28 ноября 2019, Москва;
17. Хурчиев А.О., Постановка эксперимента по исследованию торможения пучка низкоэнергетических протонов в парах металлов, Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике (МКТЭФ-2019), 25-28 ноября 2019, Москва;
18. Скобляков А.В., Численное моделирование XCOT диагностики пучка тяжелых ионов для предстоящего эксперимента HINEX, Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике (МКТЭФ-2019), 25-28 ноября 2019, Москва;
19. Колесников Д.С., Реконструкция данных протонно-радиографических экспериментов с динамическими мишенями, Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике (МКТЭФ-2019), 25-28 ноября 2019, Москва;
20. Гаврилин Р.О., Измерение тормозных потерь ионов железа с энергией 100 кэВ/а.е.м. в водородной плазме, Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике (МКТЭФ-2019), 25-28 ноября 2019, Москва;
21. Волков В.А., Радиационная безопасность эксперимента PRIOR II, Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике (МКТЭФ-2019), 25-28 ноября 2019, Москва;
22. R.A. Rymzhanov, S.A.Gorbunov, N.A. Medvedev, J.H. O'Connell, V.A. Skuratov, A. Janse van Vuuren, A.E. Volkov, Comprehensive modelling from SHI passage to observable track formation, Radiation Effects in Insulators (REI-20), Astana, 19-23 August 2019

23. R.A. Rymzhanov, M. Karlušić, N.A. Medvedev, A.E. Volkov, Track formation in insulators under grazing incidence ion impacts, Radiation Effects in Insulators (REI-20), Astana, 19-23 August 2019
24. 3. S.A.Gorbunov, S.V.Ivliev, A.E. Volkov, Dependence of electron-lattice cross sections on crystallographic orientations in dielectrics, Radiation Effects in Insulators (REI-20), Astana, 19-23 August 2019
25. 4. R.A. Voronkov, N. Medvedev, A.E. Volkov, Nonthermal melting in swift heavy ion tracks and free-electron laser spots, Radiation Effects in Insulators (REI-20), Astana, 19-23 August 2019
26. 1. R.A. Rymzhanov, N.A. Medvedev, J.H. O'Connell, A. Janse van Vuuren, V.A. Skuratov, A.E. Volkov, Picosecond surface kinetics of swift heavy ion irradiated insulators, 21st international conference on surface modification of materials by ion beams, Tomsk, 26-30 August 2019
27. 1. R.A. Voronkov, N. Medvedev, A.E. Volkov, Ab-initio modeling of an effect of enhanced electronic temperature on the band gap, SPIE 2019, Optics + optoelectronics, Prague 1-4 April 2019
28. M. Yu. Karganov, I. B. Alchinova, M. V. Polyakova, V. I. Feldman, S. A. Gorbunov, O. M. Ivanov, R. A. Rymzhanov, V. A. Skuratov, A. E. Volkov, T. Friederich, E. Nasonova, Dry DNA stability after irradiation with swift heavy ions, Biophysics Collaboration Meeting at GSI/FAIR 20-22 May 2019
29. R. A. Rymzhanov, S.A.Gorbunov, N. Medvedev, A.E. Volkov, Structure transformations along swift heavy ion trajectory in olivine, Annual HED at FAIR collaboration meeting 2-7 June 2019
30. R.A. Rymzhanov, N.A. Medvedev, J.H. O'Connell, A. Janse van Vuuren, V.A. Skuratov, A.E. Volkov, Recrystallization role in ion track formation in dielectric, Annual HED at FAIR collaboration meeting 2-7 June 2019
31. R.A. Voronkov, N. Medvedev, A.E. Volkov, Atomic and electronic properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and diamond under intense excitation of the electronic system, Annual HED at FAIR collaboration meeting 2-7 June 2019
32. N.E. Andreev<sup>1,2</sup>, N.G. Borisenko<sup>3</sup>, A. Kantsyrev<sup>4</sup>, O.N. Rosmej. Generation of relativistic electrons and gammas in the interaction of relativistic laser pulses with plasma of near critical density. Scientific-Coordination Session on "Non-Ideal Plasma Physics", Moscow November 27-28, 2019.
33. O.N. Rosmej. HED@FAIR collaboration: overview of the current experimental activities and upcoming projects with laser and particle beams at GSI. Scientific-Coordination Session on "Non-Ideal Plasma Physics", Moscow November 27-28, 2019.
34. N.E. Andreev. Laser-plasma accelerators of high energy electrons. International Conference on Ultrafast Optical Science, Moscow, September 30 - October 04, 2019, Book of Abstracts, p.17. [https://ultrafastlight.lebedev.ru/files/BookOfAbstracts\\_UltrafastLight2019.pdf](https://ultrafastlight.lebedev.ru/files/BookOfAbstracts_UltrafastLight2019.pdf)
35. N.E. Andreev, D.V. Pugacheva, M.E. Veysman. Electron beam dynamics in the laser-plasma accelerator. Laser-Plasma Acceleration Workshop, Split, Croatia, 5-10.05, 2019.
36. O.N. Rosmej, N.E. Andreev, L.P. Pugachev, N. G. Borisenko, S. Zähler, N. Zahn, D. Khaghani, B. Borm, P. Christ, F. Horst, and the PHELIX-team. Generation of super-

- ponderomotive electrons in interaction of relativistic laser pulses with long scale near critical plasmas. Laser-Plasma Acceleration Workshop, Split, Croatia, 5-10.05, 2019.
37. N.E. Andreev. Fast particles generation in intense laser-plasma interactions. International Conference "Complex Systems of Charged Particles and their Interactions with Electromagnetic Radiation 2019". Moscow, March 25-27, 2019. Book of Abstracts, p.45.
  38. O.N. Rosmej, N.E. Andreev, S. Zaehner, N. Zahn, P. Christ, B. Borm, T. Radon, L.P. Pugachev, D. Khaghani, F. Horst, N. G. Borisenko, and V. G. Pimenov. Generation of super-ponderomotive electrons in interaction of relativistic laser pulses with long scale near critical plasmas. 39th International Workshop on High Energy Density Physics with Intense Ion and Laser Beams. Hirschegg, Austria, January 27th - February 2nd, 2019.
  39. N.E. Andreev. Ultrarelativistic electrons in laser-plasma interactions. VII International Conference Frontiers of Nonlinear Physics, Nizhny Novgorod, June 28 – July 4, 2019.
  40. N.E. Andreev, L.P. Pugachev, O.N. Rosmej. Secondary sources of super-ponderomotive electrons and hard radiation in relativistic laser-matter interactions. XXXIV International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter (ELBRUS 2019), Elbrus, Kabardino-Balkaria, March 1 - 5, 2019. Book of Abstracts, p. 60. <http://www.ihed.ras.ru/elbrus19/program/restore.php?id=687>

## 12 Отчет по эксперименту 17 CBM

В данном разделе представлен отчет о научно-исследовательской работе по теме «Исследование свойств сжатой барионной материи на установке CBM в GSI (г. Дармштадт, Германия)», кратко CBM, координатор работ – доктор физ.- мат. наук, профессор Ю.М.Зайцев.

### 12.1 Введение.

Установка CBM<sup>41</sup> представляет собой магнитный спектрометр, состоящий из сверхпроводящего магнита, ряда детекторных систем для идентификации типа частиц и определения их импульсов, электромагнитного калориметра и переднего адронного калориметра как показано на Рис. 12.1.

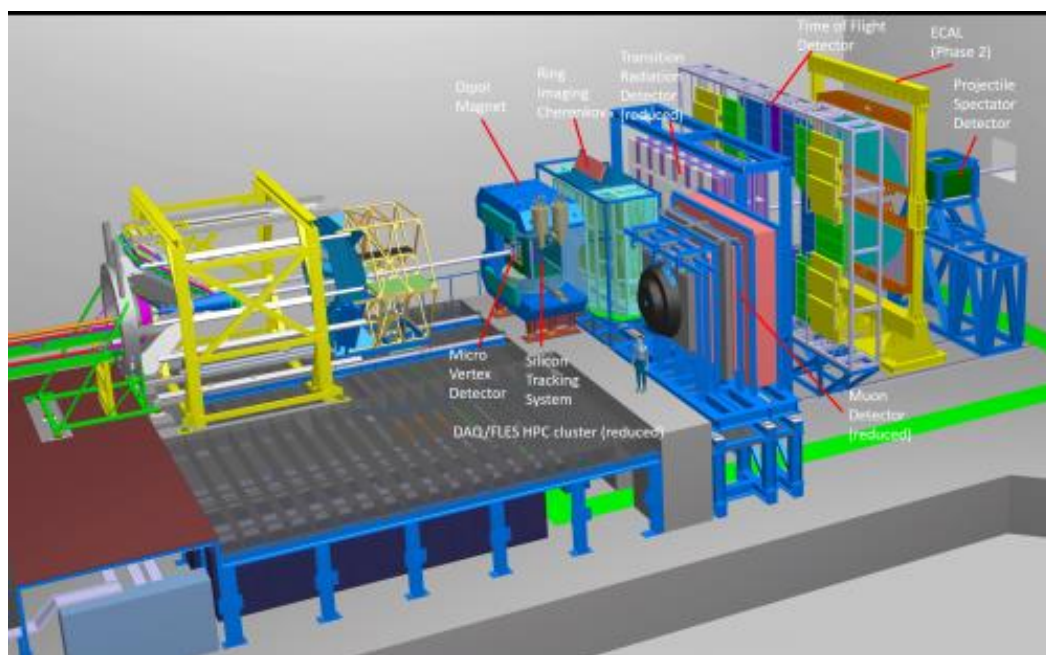


Рис. 12.1 – Общий вид установки CBM

В эксперименте принимают активное участие группы нескольких российских институтов.

Сотрудники НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ принимают активное участие в разработке центральной части времяпролетного детектора (TOF), электромагнитного калориметра (ECAL) и математического обеспечения. Координатором работ в НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ является доктор физ.-мат наук, профессор Ю.М. Зайцев.

Группа НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ участвует в работах по черенковому детектору RICH для регистрации электронов и мюонному детектору MUCH. Координатором работ в НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ является доктор физ.-мат наук, профессор В.М. Самсонов.

<sup>41</sup> [CBM Collaboration \(T. Abyazimov \(Dubna, JINR\), ..., O. Andreeva, D.Finogeev, M. Golubeva, F. Guber, A. Ivashkin, O.Karavichev, T.Karavicheva, V. Klochkov, A. Kurepin, N.Kurepin, A.Maevskaya, S. Morozov, O. Petukhov, I.Pshenichnov, A.Reshetin, A. Sadvosky, I. Selyuzhenkov, M. Strikhanov, A. Taranenko, N.Topil'skaya, E.Usenko., \*et al.\*\)](#). "Challenges in QCD matter physics --The scientific programme of the Compressed Baryonic Matter experiment at FAIR". Eur.Phys.J. A53 (2017) no.3, 60; DOI: [10.1140/epja/i2017-12248-y](https://doi.org/10.1140/epja/i2017-12248-y)

ИЯИ РАН является ответственным в коллаборации CBM за разработку, изготовление и подготовку переднего адронного калориметра фрагментов, PSD – Projectile Spectator Detector. Координатором работ в ИЯИ РАН является внс, канд. физ.-мат наук Ф.Ф. Губер.

Группа НИЦ «Курчатовский институт (руководитель работ - доктор физ.-мат. наук В.И. Манько) совместно с НИЯУ МИФИ (руководитель – канд. физ.-мат. наук И.В.Селюженков) вела разработку ПО и исследовала возможности детектора по измерению коллективных потоков странных адронов.

Группа НИИЯФ МГУ занимается разработкой кремниевой трековой системы (руководитель работ – доктор физ.-мат. наук В.И. Меркин).

В эксперименте CBM подготовлены детекторы и проведен первый сеанс на установке mCBM, в частности проведено сопряжение прототипа центральной части времяпролетной системы с интегрированной электроникой считывания, при этом считывание данных впервые для всех установленных в mCBM детекторов (mSTS, mMUCH, mTOF и mRICH) осуществлялось в потоковой моде (“free-streaming”). Текущая версия установки mCBM представлена на *Рис. 12.2*. Она включает в себя расположенные под углом 25 градусов к направлению первичного ионного пучка детекторы-прототипы систем: мишень с алмазным детектором (TO), детектор-прототип кремниевого трекера (mSTS), детектор-прототип мюонных камер (mMUCH), детектор-прототип детектора переходного излучения (mTRD), различные детекторы-прототипы системы TOF (mTOF) и детектор прототип газового черенковского детектора (mRICH).

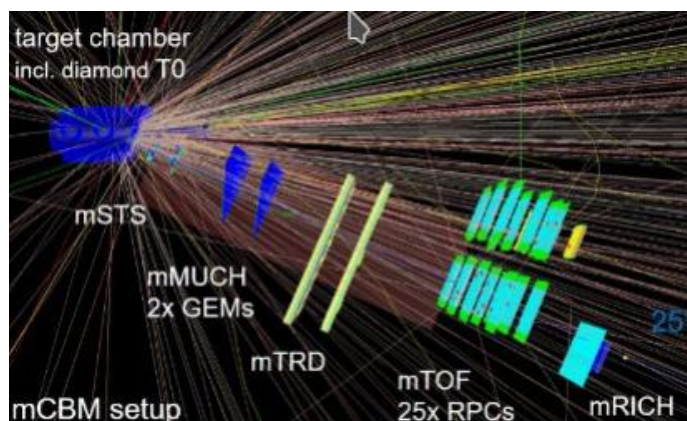


Рис. 12.2 – Расположение детекторов-прототипов на установке mCBM и визуализация треков одного из событий

Также проводилась доработка считывающей электроники для электромагнитного и адронного калориметров для использования ее в режиме потокового считывания (“free-streaming”), продолжены разработка и тестирование алгоритмов восстановления физических событий. Продолжены работы по созданию механических конструкций и газовых систем для детекторов RICH и MUCH. Проводилось моделирование адронного калориметра с целью оптимизации его геометрии. Выполнено моделирование точности определения центральности и угла плоскости реакции.

Конкретные результаты сеанса для каждого из детекторов приведены в отчетах групп, которые занимаются подготовкой и проведением работ данными детекторами.

## 12.2 Отчет НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ за 2019 г. об участии в эксперименте СВМ

Согласно решению о разделении среди институтов-участников коллаборации задач по созданию экспериментальной установки СВМ НИЦ КИ – ИТЭФ участвует в создании:

- время-пролетной системы TOF, руководитель – зам. директора А.В. Акиндинов;
- электромагнитного калориметра (ECAL), руководитель – научный сотрудник И.Е.Королько;
- математического обеспечения, руководитель – старший научный сотрудник М.А.Прокудин.

### 12.2.1 Времяпролетная система TOF

Важную роль в физике заряженных частиц, являющейся одним из ключевых направлений эксперимента СВМ, играет детектор TOF, предназначенный для идентификации пионов, каонов и протонов. В зоне ответственности ИТЭФ находится центральная часть этого детектора, к которой предъявляются наиболее жесткие требования по загрузке и радиационной стойкости. Планируется, что центральная часть детектора TOF будет реализована на основе керамических многозачерных плоскопараллельных детекторов.

#### 12.2.1.1 Проведение тестов в университете Гейдельберга

В начале года по просьбе коллег из университета Гейдельберга перед принятием решения об использовании типа интегрированной электроники считывания были проведены совместные тесты на космическом стенде. Как отмечалось в отчете за 2018 год, потеря эффективности при использовании текущей электроники PADI была подтверждена серией пучковых измерений. В начале 2019 года вновь были сделаны сравнительные измерения, чтобы принять окончательное решение о типе интегрированной электроники для работы мини-модуля на сеансе в установке mСВМ.

Как видно из Рис. 12.3, форма сигнала (усреднение по 1000 импульсам), которая была записана в ходе сеанса 2018 года в ЦЕРН и формы сигналов от источника, записанные в университете Гейдельберга, полностью совпадают (фронт сигнала, спад сигнала, длительность сигнала и обратный выброс).

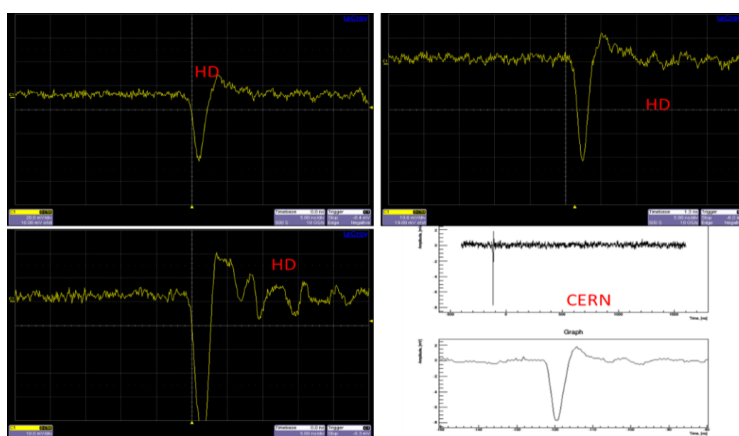


Рис. 12.3 – Измерения амплитудных сигналов с выхода мини-модуля на космическом стенде в Университете Гейдельберга (сигналы от источника  $^{60}\text{Co}$  – на черном фоне) и во время тестов в мае 2018 года в ЦЕРН (от МИЧ – на белом фоне в двух временных шкалах)



На втором этапе были подключены два дифференциальных щупа на вход и цифровой выход электроники PADI. Данные по измерениям представлены на Рис. 12.4. Как видно из набора осциллограмм (Рис. 12.4) снова была обнаружена зависимость не только длительности (вплоть до недопустимого перехода к почти треугольному импульсу), но и амплитуды выходного цифрового сигнала.

После проведенных тестов было принято решение пока отказаться от использования электроники PADI и проводить все измерения с электроникой NINO. К сожалению, первая партия новой версии электроники PADI XI (с заданием минимальной длительности выходного сигнала) содержала ошибку в одном из слоев и будет доступна после следующего технологического рана в самом конце 2019 года.

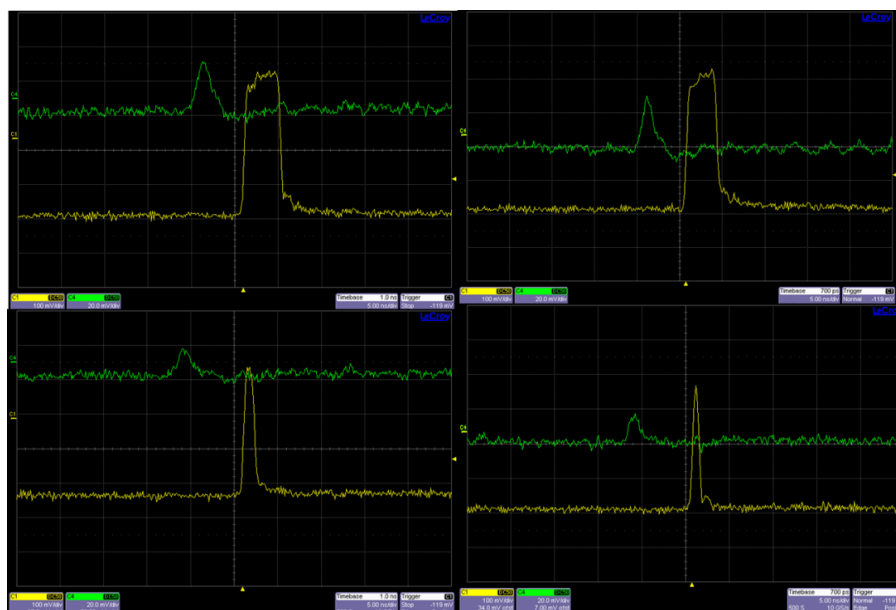


Рис. 12.4 – Форма цифрового сигнала с выхода электроники PADI (желтая линия) в зависимости от амплитуды входного сигнала (зеленая линия)

### 12.2.1.2 Проведение измерений на установке mCBM

Основным содержанием работ было проведение сеанса измерений на установке mCBM с мини-модулем на 8 камер с использованием считывающей электроникой NINO, которая используется в детекторе TOF эксперимента ALICE. Основной целью данного сеанса стала первая попытка запуска общей системы потокового считывания для максимального набора детекторов-прототипов и выявление максимального количества возникающих проблем как при самом считывании информации, так и при формировании события из потоковых данных в режиме реального времени с использованием суперкомпьютера.

Текущая версия установки mCBM представлена на Рис. 12.2. Она включает в себя расположенные под углом 25 градусов к направлению первичного ионного пучка детекторы-прототипы систем: мишень с алмазным детектором (TO), детектор-прототип кремниевого трекера (mSTS), детектор-прототип мюонных камер (mMUCH), детектор-прототип детектора переходного излучения (mTRD), различные детекторы-прототипы системы TOF (mTOF) и детектор прототип газового черенковского детектора (mRICH). На Рис. 12.5 показано расположение модулей-прототипов частей системы mTOF.

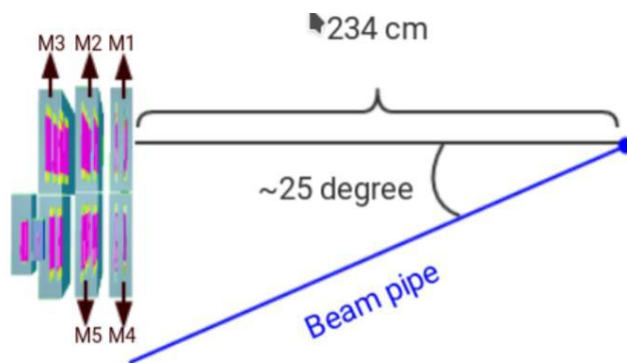


Рис. 12.5 – Расположение модулей-прототипов частей системы mTOF

Система mTOF представляла собой разделенную плоскость. В части, дальней от направления первичного пучка, были установлены три камеры внешней области большого размера, изготовленные из высокорезистивного стекла. Ближе к пучку были установлены две камеры промежуточной области, изготовленные из низкорезистивного стекла. Мини-модуль был установлен за камерами из низкорезистивного стекла (Рис. 12.6). Такое расположение камер позволяет для каждой плоскости проводить независимый от других детекторов анализ после проводки трека через все три камеры плоскости, т.к. магнитное поле отсутствует, и треки можно считать прямыми, выходящими из точечной мишени.

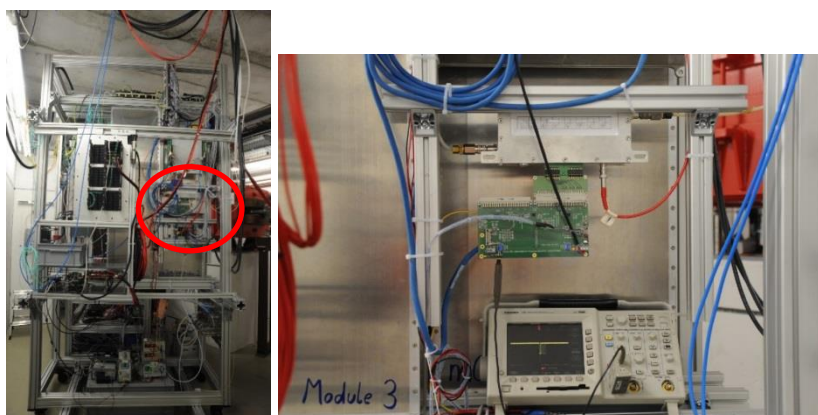


Рис. 12.6 – Фото плоскости ближней к пучку с установленным мини-модулем (справа в красном кругу) и фото интегрированной электроники NINO с подключенным кабелем для задания внешнего порога и осциллографом для записи сигналов с выхода «ИЛИ»

Перед началом измерений была проведена грубая проверка уровня шумов и наводок по счету импульсов (измерения с помощью осциллографа) с выхода «ИЛИ» в зависимости от подаваемого от внешнего источника напряжения порога на электронику NINO.

Были проведены измерения при подаче рабочего высокого напряжения 4.4 кВ и при значительно сниженном высоком напряжении 2 кВ. В первом случае регистрируются сигналы от шумов электронного тракта, наводок, а также от остаточного фона в зале и от космических частиц. Во втором случае регистрируются шумы электронного тракта и наводки, как и в первом случае, включая шумы и наводки высоковольтного источника питания. После достижения порога в 150 мВ вклад от шумов и наводок мал (менее 0.5) Гц,

что существенно меньше счета от импульсов, обусловленных фоном в зале и космическими частицами. Примерно аналогичная величина порога (даже несколько выше 180 мВ) использовалась в прошлогодних измерениях в ЦЕРН, когда были получены основные данные с электроникой NINO (эффективность регистрации МИЧ более 95% и временное разрешение  $\sim 80$  псек). Дальнейшие измерения проводились с этой величиной порога.

Были проведены наборы данных для различных интенсивностей пучка и толщин мишени. При максимальной интенсивности пучка  $^{108}\text{Ag}$  ионов/сек (1.58 АГэВ) и толщине мишени Au (2.5мм) удалось получить максимальную частоту взаимодействия около 10 МГц, которая планируется в детекторе СВМ. Во время набора практически все время система сбора потоковых данных работала стабильно и сохранялась временная синхронизация детекторов. Максимальная скорость передачи данных в прототип суперкомпьютера, расположенный, как и при реальной работе СВМ, в «Green cube», достигала 2.5 ГБ/сек. На Рис. 12.7 показана временная синхронизация детекторов при считывании и потоки данных от различных детекторных систем в ходе сбросов и в перерыве между ними.

В целом следует признать, что данный сеанс с точки зрения первой попытки работы системы потокового считывания с многих детекторов прототипов, записи и хранения данных, а также алгоритма выделения событий был достаточно удачным и показал принципиальную работоспособность этой схемы для экспериментов нового поколения в физике частиц и релятивистской ядерной физики.

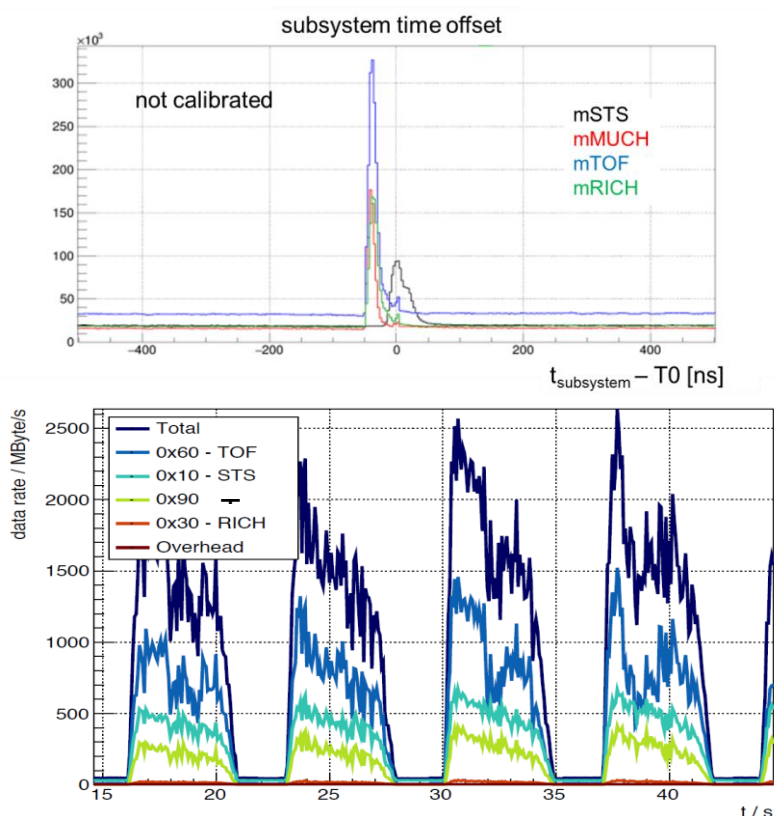


Рис. 12.7 – Предварительные данные по временной синхронизации всех детекторов при считывании (верхний рисунок) и потоки данных от различных детекторов (внизу)

### 12.2.1.3 Предварительные данные

Все предварительные оценки работы мини-модуля были получены из потоковых данных с выбором события по алгоритму наличия близких повремени в окне 50 нсек сигналов от стартового алмазного детектора и сигнала в системе mTOF. В анализе участвовало 7 каналов мини-модуля, т.к. один из каналов был использован под считывание генератора синхронизации. На *Рис. 12.8* показаны профиль пучка во времени по счету импульсов и временные спектры относительно алмазного детектора. Полученный профиль сброса использовался для оценки величины средней загрузки в каждом наборе при разных интенсивностях и толщинах мишени.

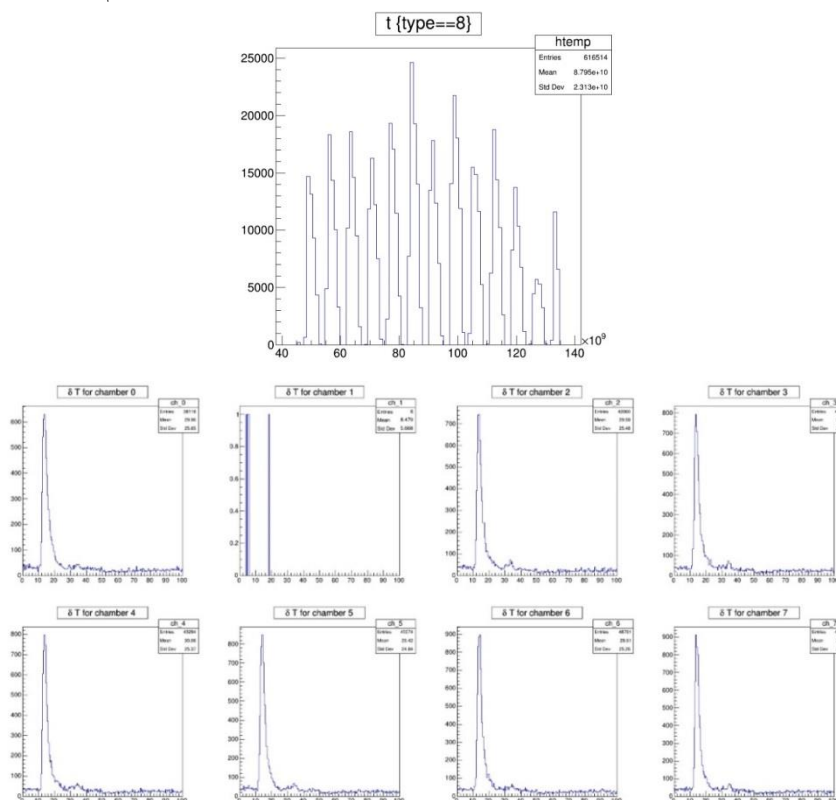


Рис. 12.8 – Профиль сброса по счету всех камер мини-модуля (верхний рисунок) и временные спектры каналов мини-модуля относительно алмазного детектора (нижний рисунок)

Поскольку предельная загрузка, при которой керамические камеры с сопротивлением (4-7)  $10^9$  Ом\*см работают без потери эффективности много больше максимальной, полученной в этом сеансе, то была проведена грубая проверка правильности определения загрузки при сравнении по счетной характеристике с камерами из высокорезистивного стекла. Как видно из *Рис. 12.9*, ожидаемое отклонение оценок происходит при величинах загрузок порядка 1 кГц/см<sup>2</sup>, что хорошо совпадает с величиной загрузки, при которой начинается падение эффективности для детекторов с сопротивлением  $\sim 10^9$  Ом\*см, в дальнейшем расхождении только растет.

Также была оценена правильность работоспособности электроники NINO. Как видно из рисунка *Рис. 12.10*, «сырой» спектр ToT (Time over Threshold), измеренный со всех 7 камер и представленный в логарифмическом масштабе, демонстрирует резкий левый край при значении шкалы 50.

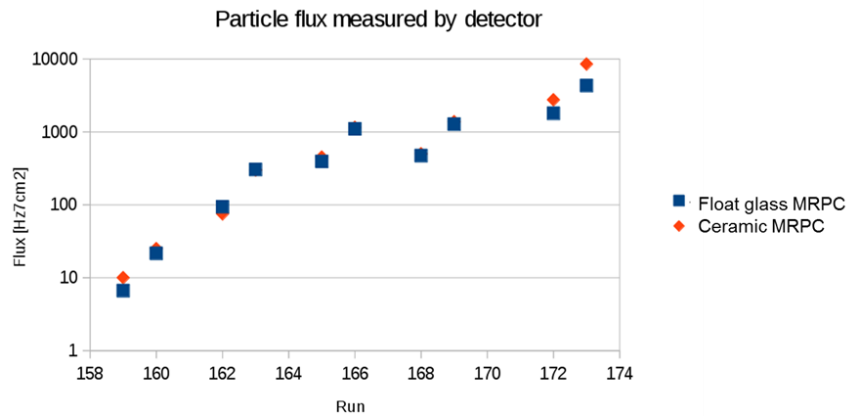


Рис. 12.9 – Оценка загрузки на плоскости детектора: синие символы – высокорезистивное стекло, красные символы – керамика

Это отвечает заданному на электронике NINO минимальному времени логического импульса (stretch time) 10 нсек, а резкий правый край распределения на значении шкалы 75 соответствует полной длительности сигнала в 5 нс, которая задается электроникой мини-модуля (см. Рис. 12.3). Также видно, что все спектры практически идентичны по форме, что соответствует высокой однородности между ячейками по усилению из-за высокого качества сборки керамических камер.

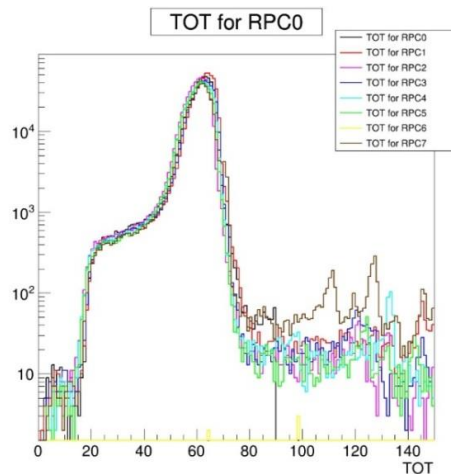


Рис. 12.10 – Спектр ТоТ для 7 камер модуля

На Рис. 12.11 представлены «сырые» двумерные распределения в координатах время-ТоТ для 7 камер мини-модуля. Как видно, все камеры имеют не только четкий пик по времени, но схожий ТоТ. Таким образом, можно сделать вывод, что электроника NINO работает надлежащим образом и не должно возникнуть проблем с эффективностью регистрации, которую мы имели с электроникой PADI.

Еще одной величиной, которая была оценена по «сырым» данным, стала множественность срабатывания в модуле (Рис. 12.12). Кроме того, она была оценена для различных загрузок от минимальной до максимальной. Средняя величина не зависела от загрузки и находилась на уровне 1.07. Это несколько больше чем величина 1.02, измеренная нами на пучке в Россендорфе при 90 градусном падении частиц, но текущая точность проводки треков не позволяет нам оценить, каков процент событий, при которых частица физически пересекает обе камеры при большом угле наклона.

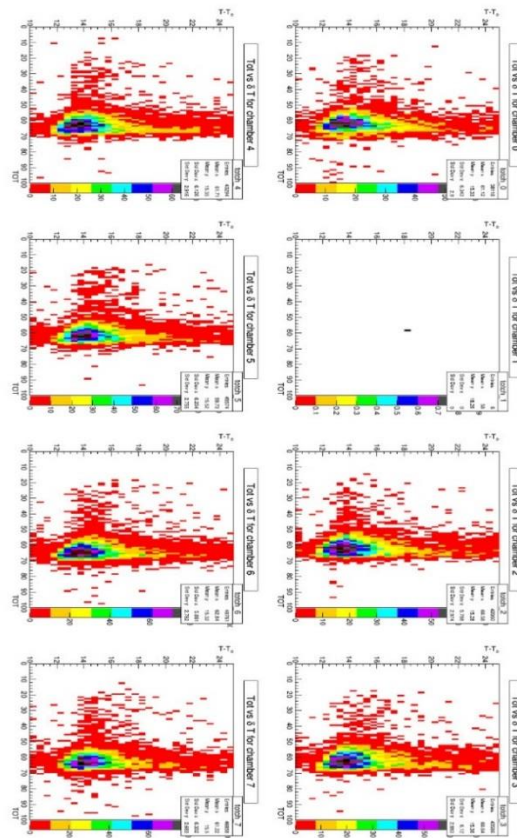


Рис. 12.11 – Двумерные распределение в координатах время-ТоТ для 7 камер мини-модуля

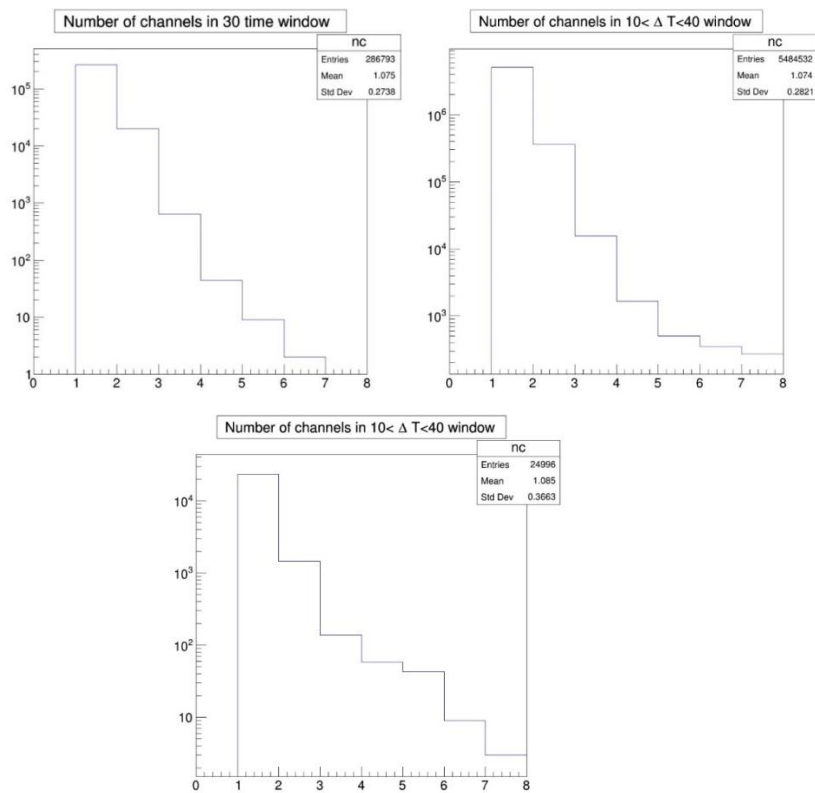


Рис. 12.12 – Множественность срабатывания каналов модуля, оцененная по сырым данным для различных интенсивностей пучка и толщин мишени (от минимальной до максимальной загрузки)

#### 12.2.1.4 Последующая обработка данных

Все набранные данные были конвертированы в формат для работы в оболочке СВМ-ROOT, и дальнейшая обработка проводилась на суперкомпьютере НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ. Была построена и внедрена в оболочку, которая осуществляла проводку треков. Затем были выбраны только те события, которые на направлении трека давали сигнал в любых двух из трех детекторов (соответствующие стрипы в больших камерах + мини-модуль). После этого проводилась процедура калибровки задержек для различных каналов временных преобразователей.

В дальнейшем эффективность регистрации оценивалась в выбранном детекторе при условии, что в двух других на треке есть сигнал с координатой, у которой отклонение менее 2 сантиметра, а отклонение по времени не превышает 200 псек. На рисунке *Рис. 12.13* приведены спектры ТоТ для отобранных событий, которые показывают правильность работы электроники.

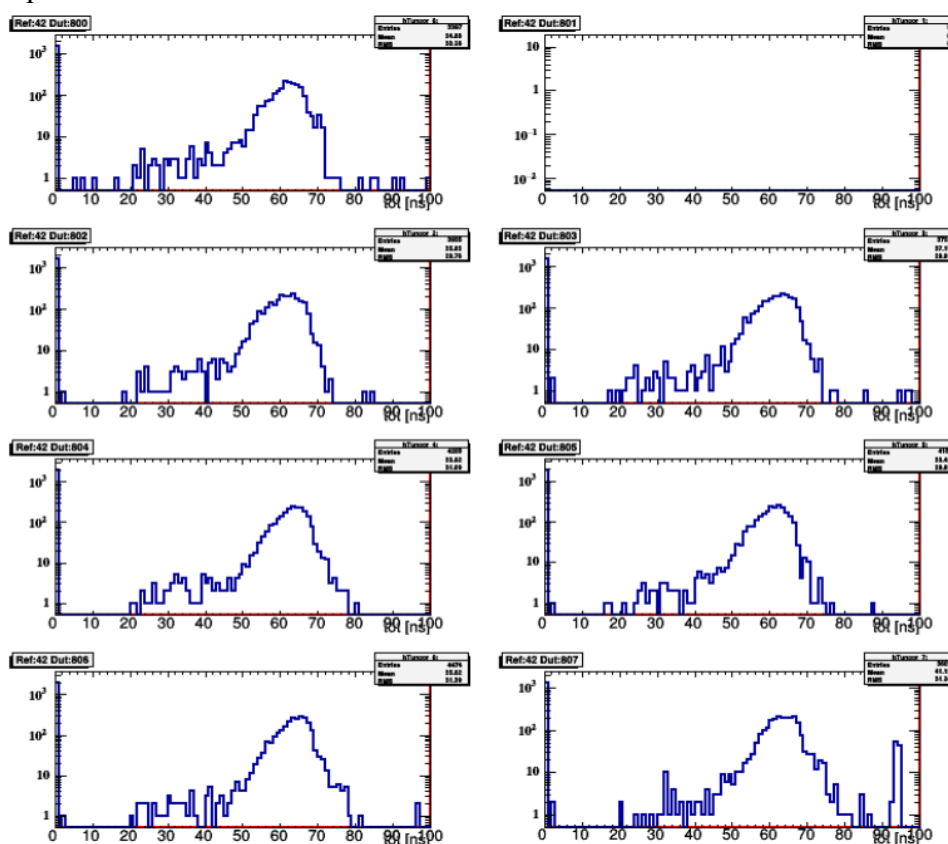


Рис. 12.13 – Спектры ТоТ после отбора событий

Полученная нами эффективность колебалась в пределах 5% для всех файлов набора и не превышала величину в 50%. При попытке оценить эффективность для стрипов из больших камер была получена почти аналогичная цифра.

Анализ, проведенный другими группами по схожей методике, для больших камер как из дальней от пучка плоскости, так и из ближней показал большой разброс в значениях эффективности.

Проведенный совместно с коллегами анализ показал, что различие в эффективности связано с тем, к какому TDC и концентратору данных подключена данная часть системы. Также было выяснено, что с ростом частоты передачи данных происходит изменение эффективности регистрации, которое связано с потерей событий. Дальнейший анализ,

проведенный ответственным за считывание, показал, что локальный концентратор на некоторое время (разное для различных TDC) перестает принимать данные с детектора.

В настоящее время группа, ответственная за съем данных, ведет интенсивные исследования и переписывает программное обеспечение как для TDC, так и для концентратора и связанного с ним канала GBTx. Дальнейший набор и анализ данных будет продолжен в 2020 году.

#### 12.2.1.5 Проведение сеанса измерений на ускорителе Эльба

Поскольку сейчас продолжается доработка программного обеспечения системы считывания и, пока еще не была получена новая версия электроники PADI XI, было решено провести достаточно важное для центральной части детектора TOF измерение – получить величину эффективности регистрации нейтронов. С этой целью были подготовлены три варианта детекторов: обычный керамический счетчик, керамический счетчик, катоды которого покрыты тонкой пленкой карбида бора и счетчик, катоды которого покрыты карбидом бора изотопа  $^{10}\text{B}$ , который имеет большое сечение реакции  $(n,\alpha)$ .

Сеанс будет проведен в специальном нейтронном зале на ускорителе Эльба с точно откалиброванным нейтронным полем (Рис. 12.14). На проведение измерений выделено шесть 8 часовых смен в период с 9 по 12 декабря. В случае успешного проведения сеанса планируется представить данные на предстоящей конференции RPC 2020.



Рис. 12.14 – Общий вид специализированного зала для нейтронных измерений на ускорителе Эльба в центре HZDR

#### 12.2.2 Электроника считывания для электромагнитного калориметра

В 2019 году группой ИТЭФ проводились работы по оптимизации алгоритмов восстановления оцифрованного электронного сигнала с фотоумножителей электромагнитного калориметра. Коллегами по коллаборации CBM был поставлен ряд вопросов, главным из которых является обоснование оптимальной с точки зрения эффективности и цены частоты оцифровки калориметрического сигнала. Ранее нами было показано, что при частоте оцифровки 250 МГц только 3% событий в электромагнитном калориметре не могут быть правильно восстановлены при максимальной планируемой частоте ионных столкновений 10 МГц.



Увеличение частоты оцифровки (до 500 МГц) ведет к существенному удорожанию считывающей электроники. Необходимые экспериментальные измерения на пучке ускорителя в настоящий момент (и в ближайшие несколько лет) невозможны, в виду отсутствия столь интенсивных пучков. Поэтому нами был разработан экспериментальный стенд, на котором выбранные для электромагнитного калориметра СВМ фотоумножители регистрируют два близких по времени световых сигнала, имитирующих попадание в ячейку калориметра двух частиц – фотонов (или электронов). Результирующий сигнал оцифровывается с заданной частотой (от 125 до 500 МГц) для исследования зависимости эффективности восстановления от разницы времен прихода двух сигналов и их амплитуд. В настоящее время производится настройка и тестирование стенда.

### 12.2.3 Разработка алгоритмов обработки данных СВМ

Поиск событий в потоке данных является важной частью процедуры реконструкции эксперимента СВМ. Событием в СВМ называются данные, относящиеся к индивидуальному ион-ионному столкновению. В 2019 году были проведены исследования эффективности работы алгоритмов выделения индивидуальных ион-ионных столкновений, разработанных в прошлом 2018 году. Алгоритм поиска событий был реализован в виде отдельного ROOT сценария, на вход которого подавался файл с экспортированной из СВМROOT информацией о сработавших каналах считывающей электроники детектора STS. Кроме смоделированных физических данных (таких как время срабатывания, номер канала и измеренный заряд), каждый сработавший канал также содержал Монте-Карло информацию о частице, вызвавшей данное срабатывание, или пометку, что данное срабатывание вызвано электронным шумом. На первом этапе работы ROOT сценария, реализующего алгоритм поиска событий, производилась сортировка входных данных по времени. После чего выполнялся поиск событий с заданными параметрами, такими как величина временного промежутка, количество срабатываний в этом промежутке, необходимое для нахождения события, и мертвое время, необходимое чтобы исключить случайные срабатывания от облака дельта электронов, образующихся после события. Для каждого найденного события составлялся список срабатываний, вошедших в расширенный временной промежуток. С использованием Монте-Карло информации восстанавливался номер Монте-Карло события, сопоставленного данному (т.е. события частицы которого вызвали максимальное количество срабатываний считывающей электроники в найденной событии), чистота события (т.е. доля срабатываний, вызванных не дельта электронами из других событий) и полнота события (т.е. доля всех срабатываний считывающей электроники из Монте-Карло события вызванных не дельта электронами и включенных в данное найденное события). Событие считалось правильно найденным, если было успешно сопоставлено с Монте-Карло событием, а его чистота была выше, чем 0.98. Дальнейшая реконструкция события (т.е. реконструкция кластеров, хитов и треков и их сопоставление с Монте-Карло информацией) не проводилась, т.к. предполагает использование программных библиотек СВМROOT. Доля правильно реконструированных событий в зависимости от необходимого количества сработавших каналов считывающей электроники и длительности временного промежутка показана на *Рис. 12.15*.

Слева на *Рис. 12.15* показаны результаты без отбора по величине заряда, справа – с требованием на значение  $A_{CP} \geq 2$ . Аналогичные зависимости для доли правильно найденных событий от необходимого количества сработавших каналов считывающей электроники и

длительности временного промежутка показаны на Рис. 12.16 (слева – без отбора по заряду, справа – с требованием на значение АЦП $\geq 2$ ).

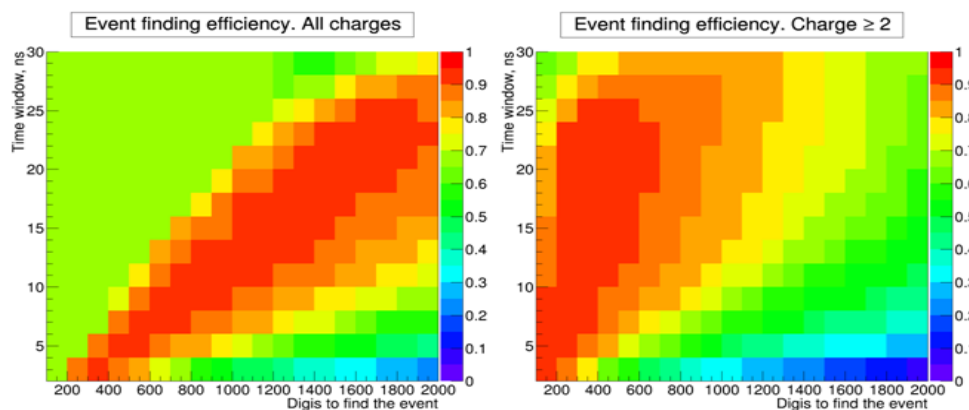


Рис. 12.15 – Эффективность нахождения событий, которые содержат 5 и более длинных треков в зависимости от необходимого количества сработавших каналов считывающей электроники (ось X) и длительности временного промежутка (ось Y)

Максимальная эффективность поиска событий совпадает в пределах ошибок при отборе по значению АЦЦ  $\geq 0, 1$  или  $2$  и составляет 93-94%. Доля правильно найденных событий среди всех реконструированных при максимизации эффективности реконструкции оказывается выше 85%. Длительность мертвого времени, при котором достигается максимальная эффективность поиска событий, в обоих случаях совпадает и составляет 50 нс. Оценка полноты реконструированных событий оказалась лишена физического смысла, так как в конечном счете должна оцениваться доля реконструированных треков, а не срабатываний считывающей электроники, которые могут быть вызваны, в частности, медленными и плохо реконструируемыми треками. Кроме того, процедура реконструкции треков необходима и для уточнения процедуры расширения временного промежутка для включения информации с трекового детектора.

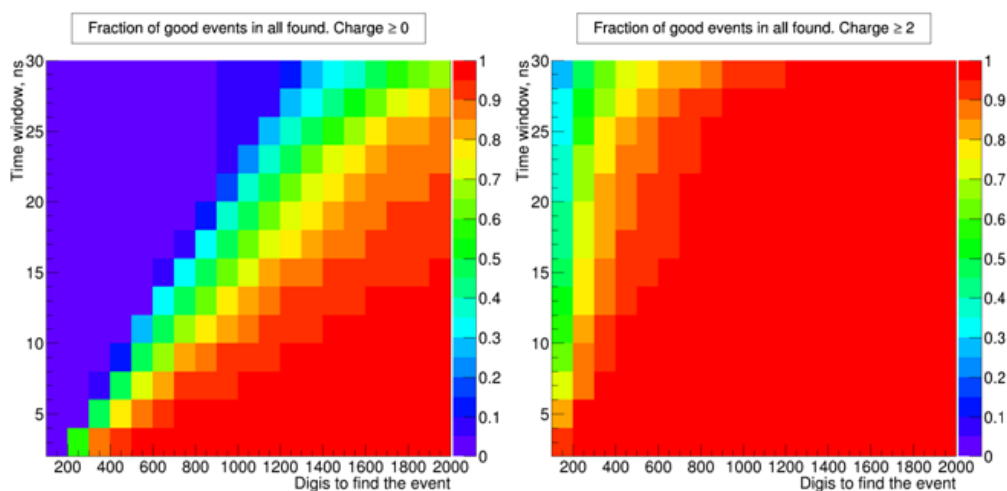


Рис. 12.16 – Доля правильно найденных событий в реконструированных в зависимости от необходимого количества сработавших каналов считывающей электроники (ось X) и длительности временного промежутка (ось Y)

Полученные результаты позволяют говорить о применимости простейшего метода компоновки событий для столкновений тяжелых ионов с частотой взаимодействий до 1 МГц с учетом временного разрешения и шумов электроники трекового детектора. Полученные в ходе исследования параметры алгоритмов будут выбраны по умолчанию для поиска событий в программных библиотеках CBMROOT. По результатам работ подготовлена публикация: «A timing RPC with low resistive ceramic electrodes», R. Sultanov, A. Akindinov, R. Beyer, J. Dreyer, X. Fan, R. Greifenhagen, B. Kämpfer, R. Kotte, A. Laso Garcia, D. Malkevich, L. Naumann, V. Plotnikov, M. Prokudin, S. Shirinkin and D. Stach, JINST14 C09007.

#### 12.2.4 Планы группы НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ на 2020 год:

- Проведение совместных измерений параметров низкорезистивной керамики в институтах IKTS и HZDR;
- Подготовка и участие в 2х пучковых сеансах на установке mCBM, которые запланированы в марте и мае 2020г.;
- Проведение сеанса пучковых измерений на ускорителе Эльба в HZDR;
- Разработка и тестирование элементов считывающей электроники электромагнитного калориметра;
- Разработка и тестирование алгоритмов восстановления физических событий CBM.

### 12.3 Отчет группы ИЯИ РАН по участию в эксперименте CBM

#### 12.3.1 Описание переднего адронного калориметра

Установка CBM представляет собой магнитный спектрометр, состоящий из сверхпроводящего магнита, ряда детекторных систем для идентификации типа частиц и определения их импульсов, электромагнитного калориметра, а также переднего адронного калориметра – PSD (Projectile Spectator Detector), (Рис. 12.1).

Передний адронный калориметр PSD<sup>42</sup> планируется использовать в экспериментах на установке CBM для пособытийного определения центральности, а также ориентации плоскости реакции в ядро-ядерных столкновениях с хорошей точностью, что необходимо для проведения исследований анизотропии азимутальных потоков частиц, образующихся в ядро-ядерных взаимодействиях, в настоящее время рассматривается конструкция PSD, состоящего из 46 отдельных модулей (Рис. 12.17 слева) с квадратным отверстием (200 x 200 мм<sup>2</sup>) в центральной части калориметра для прохождения налетающего пучка ядер. В первоначальном Техническом проекте адронного калориметра рассматривался калориметр с ромбовидным отверстием.

Однако более точный расчет радиационных условий эксперимента показал, что размер пучкового отверстия должен быть увеличен для того, чтобы избежать радиационных повреждений сцинтилляционных пластин модулей калориметра. Каждый модуль адронного калориметра (Рис. 12.17 справа) имеет поперечный размер 20 x 20 см<sup>2</sup> и состоит из 60 слоев пластин свинца с толщиной 16 мм с расположенными между ними пластинами из пластикового сцинтиллятора толщиной 4 мм. Полная длина модуля калориметра соответствует 5.6 длинам ядерного взаимодействия. Вес одного модуля порядка 500 кг.

<sup>42</sup> Guber F, et al. “Technical Design Report for the CBM Projectile Spectator”  
[https://repository.gsi.de/search?p=id:%22GSI-2015\\_02020%22](https://repository.gsi.de/search?p=id:%22GSI-2015_02020%22)

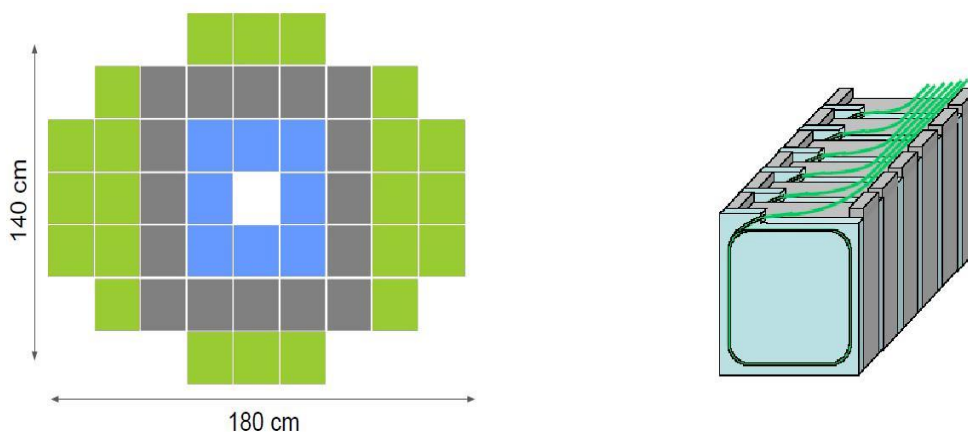


Рис. 12.17 – Схема общего вида переднего адронного калориметра (слева) и схема отдельного модуля PSD (справа)

Свет с каждой из 60 сцинтилляционных пластин в модуле собирается с помощью спектросмещающего оптоволокна Kugaгау Y11, вклеенного в канавку глубиной 1.2 мм на одной из лицевых поверхностей сцинтилляционной пластины. Все выведенные из сцинтилляторов 60 спектросмещающих оптоволокон укладываются параллельно на верхней поверхности пакета модуля. Оптоволокон с каждых шести последовательно расположенных сцинтилляционных пластин в модуле вклеиваются в соответствующие отдельные оптические разъемы, которые размещены на панели, установленной в конце короба модуля. Таким образом, на этой панели установлены 10 оптических разъемов с лавинными фотодиодами НАМАМАТСУ MPPC S12572-010P для считывания света с 10 секций модуля. Такая продольная сегментация модуля из 10 секций обеспечивает однородность сбора света по длине модуля. На этой же панели размещен дополнительный оптический разъем с установленным на нем светодиодом, свет от которого передается к лавинным фотодиодам по десяти оптическим волокнам. Один конец оптоволокна вклеен в разъем, с установленным на нем светодиодом, а другой конец - в оптический разъем фотодетектора вместе с шестью спектросмещающими волокнами от сцинтилляционных пластин калориметра с соответствующей секции модуля. Световые импульсы со светодиода используются для контроля работы фотодетекторов. Конструкция калориметра и его характеристики подробно описаны в Техническом проекте переднего адронного калориметра установки CBM. Все модули калориметра изготовлены и протестированы в ИЯИ РАН в соответствии с контрактом ФАИР-ИЯИ.

### 12.3.2 Интеграция считывания сигналов

Одна из основных задач в 2019 г. группы ИЯИ в эксперименте CBM заключалась в интеграции считывания сигналов с переднего адронного калориметра PSD в общую систему сбора данных эксперимента CBM.

Для сбора данных с калориметра PSD эксперимента CBM необходима считывающая электроника, способная обрабатывать сигналы амплитудой от 10мВ до 1В и 40-60нс. Частота дискретизации АЦП должна составлять 125МГц. Скорость передачи сигналов должна составлять не менее 1MHz на канал. Требование к скорости считывания с частотой до 1МГц накладывает ограничение на период времени, в течение которого канал электроники должен обработать на текущем событии и быть готовым к принятию следующего сигнала с секции

калориметра. Все переходные процессы, которые могут влиять на восстановление следующего сигнала, должны завершиться в течение 1мкс, чтобы система оцифровки и сбора данных была готова к приему следующего события. Это время определяет требования к каналу передачи данных и протоколам обмена данными, заложенным в цифровые схемы и элементы на основе ПЛИС (FPGA), используемых в данном виде считывающей электроники.

В качестве такой электроники выбрана плата ECAL@ADC64, разработанная для электромагнитного калориметра эксперимента PANDA, которая представляет собой 64-канальный модуль ADC на основе АЦП и ПЛИС (FPGA). Модуль ADC выполнен по схеме со считыванием модулем ПЛИС потоковых АЦП, при этом внутри ПЛИС осуществляется предварительная обработка осциллограммы и определяются основные параметры формы сигнала, наложения импульсов (pile-up), и конечные данные выдаются на выходной интерфейс. В настоящее время разработан модуль SADC, который обеспечивает оцифровку сигнала со скоростью 80 МС/с. Разрабатывается модуль со скоростью оцифровки 125 МС/с.

Плата ECAL@ADC64 для эксперимента PANDA основана на АЦП LTM9011 с частотой дискретизации до 125МГц. На данный момент используется частота 80МГц с возможностью расширения до 125МГц. Разрешение АЦП составляет 14 бит на диапазоне 2Vpp. Для увеличения динамического диапазона, 64 канала разделены по парам с усилением  $\times 1$  и  $\times 10$ . На плате установлено две микросхемы ПЛИС Kintex 7, где происходит обработка сигналов: выбор канала из пары усиления, обработка формы сигнала, формирование пакета и отправка в систему сбора данных. Так же в ПЛИС происходит предварительный отбор сигналов для подавления наложения, что позволяет разгрузить поток данных. В результате на один сигнал приходится 128 бит что позволяет достичь скорости счета до 1МГц при ограничении линии передачи 4.8Гбит/с.

Задача заключается в интеграции этой считывающей электроники в систему сбора данных эксперимента CBM. В марте 2019 года в GSI были проведены первые тесты платы ADC64@PANDA для сбора сигналов PSD@CBM калориметра на пучке mCBM в GSI, Дармштадт, Германия. В тесте ADC в качестве источников сигналов использовалась плата FEE с диодами MPPC, на которую были установлены небольшие сцинтилляторы, (Рис. 12.18 слева). Плата была установлена на расстоянии в несколько сантиметров от оси пучка, (Рис. 12.18 справа).

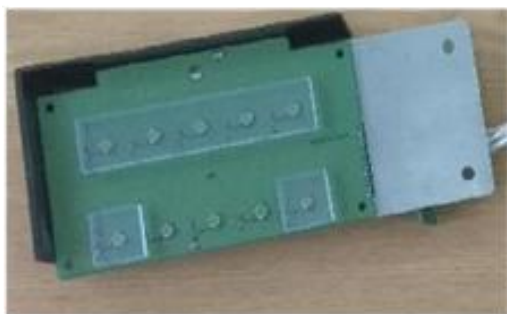


Рис. 12.18 – Слева фото платы с фотодиодами и установленными на ней сцинтилляторами, справа фото этой платы на пучке mCBM

Тест проведен на пучке ионов серебра с энергией 1.58 АГэВ и интенсивностью  $4 \times 10^7$  ионов в секунду. На Рис. 12.19 показаны сигналы оцифрованные платой PANDA/ADC64, 80 Msps (слева) и, для сравнения, CAEN Digitizer, 1Gsps (справа).

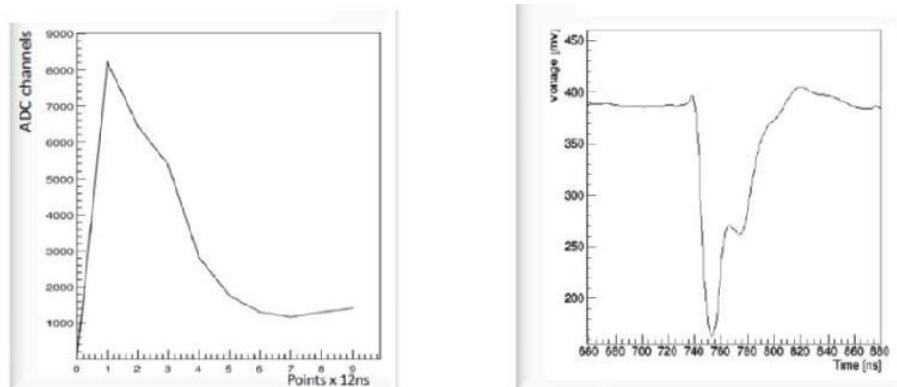


Рис. 12.19 – Один из сигналов с платы FEE, оцифрованный PANDA/ADC64 80Msps (слева), и, для сравнения, CAEN Digitizer, 1Gsps (справа)

Видно, что частоты дискретизации 80 МГц достаточно для определения заряда, времени и амплитуды сигнала. На Рис. 12.20 представлены полученные на пучке амплитудные спектры для одного из каналов считывания. Для увеличения динамического диапазона, каждый канал имеет два усиления:  $\times 1$  (красный) и  $\times 10$  (черный). При срабатывании оцифровывается один из каналов - в зависимости от превышения порога.

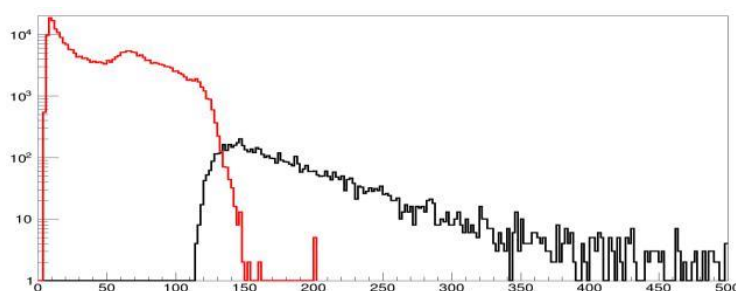


Рис. 12.20 – Амплитудные спектры для одного из каналов считывания: для усиления -  $\times 1$  (красный) и  $\times 10$  (черный)

Результаты выполненных на пучке тестов показали, что плата PANDA@ADC64 можно использовать для оцифровки сигналов калориметра PSD@CBM. Однако, для интеграции ADC64 в DAQ@CBM (mCBM) необходима разработка нового программного обеспечения как для платы ADC64, так и для платы CRI (DPB), предназначенной для сбора данных в эксперименте CBM.

Причина разработки нового программного обеспечения заключается в том, что система сбора данных электромагнитного калориметра эксперимента PANDA отличается от системы сбора данных эксперимента CBM. Схема системы сбора данных эксперимента ПАНДА представлена на Рис. 12.21. Карты ADC подключены к «дата-концентраторам», каждый из которых объединен в «SODANET» сеть. SODANET позволяет передавать клок и триггер ко всем ADC с фиксированной задержкой, а так же осуществлять управление детектором на основе команд TRB. Данные передаются по протоколу 10b8.

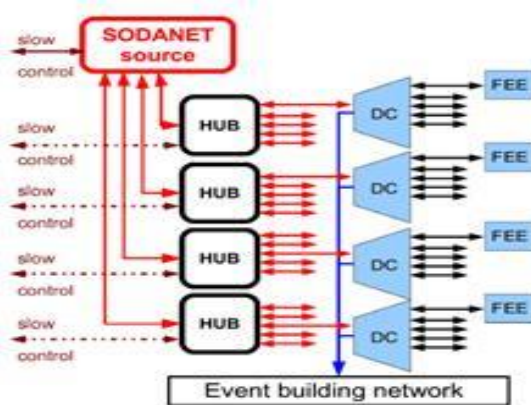


Рисунок 1 Схема системы сбора данных PANDA ECAL

Рис. 12.21 – Схема системы сбора данных PANDA ECAL

В качестве «дата-концентратора» используется плата TRB с пятью Lattice FPGA, которые используются как «дата-концентратор», SODA концентратор, UDP конвертор. «Дата-концентратор» подключен по оптической линии к ADC64, SODA концентратору и UDP конвертеру. Центральная ПЛИС подключена к PC и используется для управления. Проект LabView позволяет управлять ADC64. Команды с PC передаются по TRB-DIM протоколу. Данные с ADC64 перенаправляются на PC через «дата-концентратор» и UDP конвертер по ethernet соединению.

В эксперименте CBM@FAIR частота ядро-ядерных столкновений будет доходить до 10 МГц, что требует обеспечения скорости передачи данных до 1 ТБ в секунду. Для осуществления бестриггерного сбора данных в CBM в настоящее время разрабатывается система DAQ с применением радиационно-устойчивые интегральные микросхемы GBT, разработанных в CERN. Основными элементами системы сбора данных эксперимента CBM, в настоящее время, являются платы DPB и FLIB (Рис. 12.22).

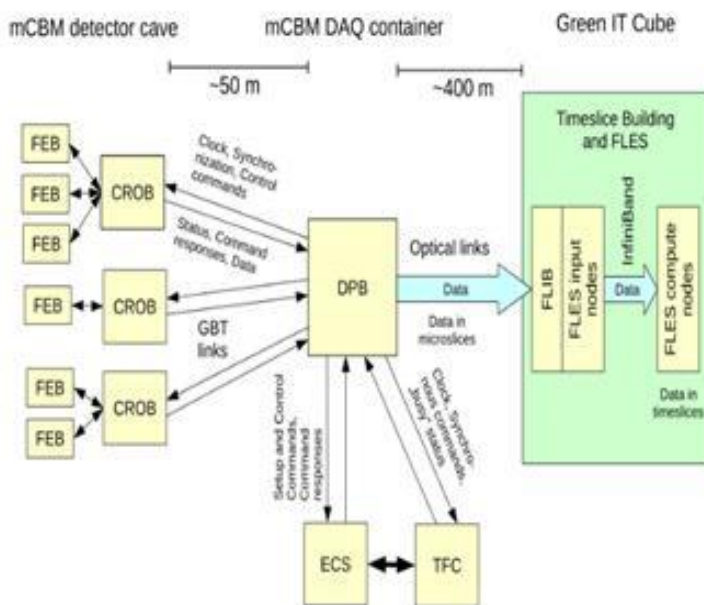


Рис. 12.22 – Схема системы сбора данных mCBM

Передача данных от детекторных подсистем на плату DPB осуществляется по протоколу GBT по оптической линии. DPB - это основанная на FPGA плата, которая обеспечивает предварительную обработку данных для подсистем. Обработанные данные передаются по оптоволокну на плату FLIB, которая обеспечивает сортировку данных со всех подсистем. Сортированные данные из платы FLIB отправляются в вычислительный комплекс по Infiniband соединению. В 2020 году платы DPB и FLIB планируется заменить одной картой CRI для приема и обработки данных детекторов.

Для интеграции ADC64 в систему сбора данных mCBM необходима модификация программного обеспечения карт ADC64 и DPB. В 2019 г. были выполнены работы по интеграции модуля GBT-FPGA в программное обеспечение ADC64 для передачи данных с модуля mPSD и синхронизации клона в mCBM DAQ.

На Рис. 12.23 представлена схема клоков с модифицированной прошивкой для mCBM DAQ. Внутренний клок 100 МГц генерируется в генераторе TD-100.000MCD-T, на основе которого в компоненте pll ПЛИС генерируется клок 120 МГц, который является опорным для генератора LMK04608. LMK04608 генерирует частоту 120 МГц для передатчика GBT и клок для аналого-цифрового преобразователя ADC 80 МГц.

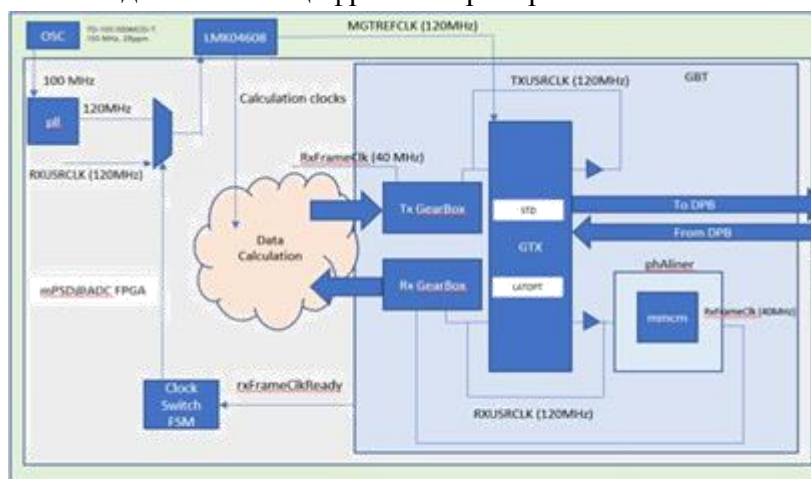


Рис. 12.23 – Схема клоков в модифицированной прошивке ADC64

После подключения mPSD@ADC к DPB и синхронизации канала передачи клок 120МГц начинает транслироваться по GBT на плату ADC с платы DPB. После стабильной передачи клона опорный клок для генератора LMK04608 переключается с внутреннего генератора на внешний клок, полученный по GBT. Таким образом, клок ADC и клок DPB во время работы карты являются синхронными, что позволяет измерять время события относительно общей временной отметки эксперимента.

Для передачи данных детектора mPSD в общий DAQ mCBM было модифицировано и программное обеспечение платы DPB. Так же было разработано программное обеспечения для мониторинга и распаковки переданных данных. Для этого, было необходимо разработать и внедрить в общую систему считывания данных программные модули, ответственные за считывание и хранение информации детектора mPSD. Данные программные модули представляют собой, во-первых, модуль онлайн мониторинга с проверкой качества полученных с детектора данных, и, во-вторых, модуль, предназначенный для распаковки



файлов, собранных общей системой считывания, с целью хранения информации детектора в виде ROOT-деревьев и обеспечения возможности последующего анализа набранных данных.

Информация с детектора mPSD передается в общую систему считывания данных mCBM при помощи платы DPB с модифицированным программным обеспечением. В настоящее время пакеты данных представляют собой набор 64-битных сообщений, содержащих информацию о временной отметке события, числе и номерах сработавших каналов, зарядах, и контроль самой переданной информации также осуществляется в режиме онлайн посредством программного модуля мониторинга данных. На Рис. 12.24 показан внешний вид разработанного онлайн мониторинга данных mPSD, запущенный в интернет браузере. Здесь поканально представлены число срабатываний каналов (слева сверху), время срабатывания (справа сверху) и амплитуда (слева снизу).

Съем сигналов ведется с восьми секций модуля адронного калориметра, причем на каждую секцию приходится по два канала считывания: с усилениями  $\times 1$  и  $\times 10$ . Дефект кабеля со второй секции может быть виден на всех показанных гистограммах. На Рис. 12.25, слева, продемонстрирована возможность отслеживать в режиме онлайн заряд в выбранном канале, для примера взят энергетический спектр космических мюонов. На Рис. 12.25, справа, показан пример формы сигнала.

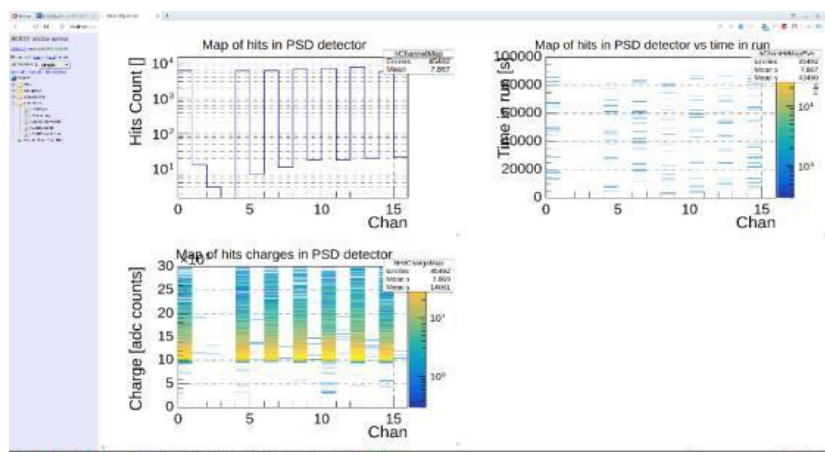


Рис. 12.24 – Внешний вид работы программного модуля онлайн мониторинга данных PSD

Для чтения DPB-пакетов используется единый алгоритм с программным модулем онлайн мониторинга. Информация о сигналах однозначно маркируется таким адресом и записывается в соответствующую ветвь ROOT-дерева. На

Рис. 12.26 представлены распределения по выделенной энергии, построенные по данным космики суммарно для всех каналов (слева) и данным с калибровочного светодиода для выделенной секции (справа).

В общей системе считывания пакеты данных mPSD записываются совместно с информацией всех остальных детекторов в общий tsa-файл. Для работы с tsa-файлами, выделения информации mPSD, чтения пакетов данных и последующей записи информации в ROOT-дерево был разработан программный модуль распаковки данных. В этом программном модуле для каждой физической секции mPSD генерируется уникальный адрес с целью сопоставить ей определенный канал электроники.

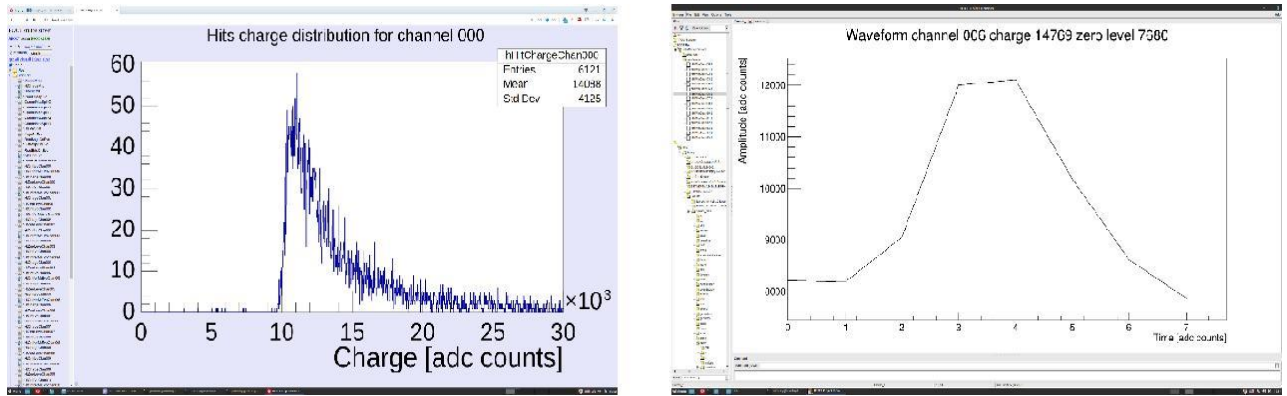


Рис. 12.25 – Слева распределение выделенной энергии в канале 000 mPSD, справа – пример осциллограммы сигнала

Для чтения DPB-пакетов используется единый алгоритм с программным модулем онлайн мониторинга. Информация о сигналах однозначно маркируется таким адресом и записывается в соответствующую ветвь ROOT-дерева. На

Рис. 12.26 представлены распределения по выделенной энергии, построенные по данным космики суммарно для всех каналов (слева) и данным с калибровочного светодиода для выделенной секции (справа).

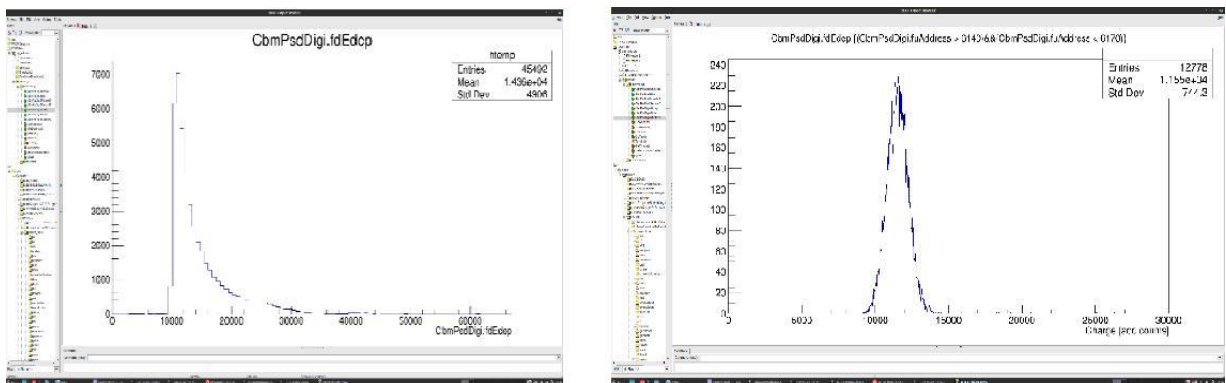


Рис. 12.26 – Распределение по выделенной энергии, амплитудные спектры набраны в общей системе сбора данных эксперимента mCBM на космических мюонах (слева) и полученные от вспышек светодиодов (справа)

Таким образом, основная часть работы по интеграции платы ADC64@ECAL PANDA в mPSD DAQ в 2019 г. была завершена, что позволит осуществить набор данных с mPSD параллельно с остальными детекторами mCBM в сеансах 2020 г. и испытать плату в реальных условиях при высоких нагрузках. В конце 2019 года планируется собрать в ИЯИ РАН стенд по сбору данных платой ADC с трех модулей CBM PSD. На данном стенде будет разработана и отлажена система управления параметрами приема и обработки данных платой ADC.

### 12.3.3 Подготовка к техническому сеансу в ноябре 2019 г. и сеансам в 2020 г. на пучке mCBM

В течение 2019 г. группа ИЯИ РАН продолжала подготовку к эксперименту mCBM в рамках программы ФАИР-фаза-0 на действующем ускорителе SIS18 в ГСИ<sup>43</sup>. Цель этого эксперимента – проведение тестовых измерений отдельных, уже изготовленных, элементов всех детекторных систем СВМ на пучках тяжелых ионов с интенсивностью до  $10^8$  ионов в секунду в условиях высоких нагрузок и радиационных условиях максимально приближенных к ожидаемым на СВМ, а также интеграция всех детекторных систем установки СВМ в общую систему сбора данных, которая будет использоваться на СВМ, отработка методов считывания и анализа полученных экспериментальных данных.

Группа ИЯИ РАН подготовила к использованию в этом эксперименте один из уже изготовленных модулей адронного калориметра (mPSD)<sup>44</sup>. Ввиду очень ограниченных размеров помещения, в котором будет размещаться установка mCBM, вопросы механической интеграции mPSD в эту установку были первоочередной задачей, которой группа ИЯИ занималась в 2019 г. Модуль mPSD будет размещаться под вакуумной трубой первичного пучка ионов на расстоянии порядка 3 м от мишени под углом 5 градусов относительно оси пучка, Рис. 12.27 слева. Так как зона эксперимента mCBM не оборудована краном, то для установки модуля предложено использовать специальную подставку на колесах. Установка на ней модуля будет производиться вне зоны mCBM и, затем, перед началом эксперимента, модуль будет закатываться на этой подставке и устанавливаться в нужное положение на пучке. Для проведения тестовых измерений с модулем калориметра на установке mCBM, один из модулей адронного калориметра PSD, изготовленный в ИЯИ РАН, был доставлен в GSI в мае 2019 г. вместе с соответствующей подставкой для его установки на mCBM (Рис. 12.27 в центре и справа).



Рис. 12.27 – Схема размещения mPSD на установке mCBM, слева: в центре фото доставленного в GSI модуля PSD: справа – тестовые испытания в ИЯИ РАН установленного на изготовленной подставке модуля калориметра перед отправкой в GSI

<sup>43</sup> C.Sturm et al. . “mCBM@SIS18” <http://www.fair-center.eu/fileadmin/fair/experiments/CBM/documents/center.eu/fileadmin/fair/experiments/CBM/documents/mcbm-proposal2GPAC-WebVersion0619-SVN7729.pdf>

<sup>44</sup> F.Guber, D.Finogeev, M.Golubeva, A.Ivashkin, and S.Morozov “mPSD at mCBM” CBM Progress Report 2017, GSI-2018-00485, p.1

После доставки модуля в GSI были проведены измерения его отклика на космических мюонах с использованием CAEN дигитайзера. На Рис. 12.28 показаны амплитудные спектры с 10 секций этого модуля, измеренные в Москве и после его транспортировки в GSI.

Во второй половине ноября 2019 г. модуль mPSD был установлен на специальной подставке, транспортирован и установлен на экспериментальной установке mCBM и аналоговая и считывающая электроника mPSD подготовлены к проведению короткого технического сеанса на mCBM в конце ноября 2019 г.

Основные два пучковых сеансах на установке mCBM в 2020 г запланированы в период 24.03. - 31.03.2020 на пучке Au(69+) с энергией 1.22 АГэВ и в период 07.05. - 15.05.2020 на пучке U(73+) с энергией 1.01 АГэВ. Во время этих сеансах планируется синхронное считывание сигналов с mPSD одновременно с другим детекторными системами mCBM.

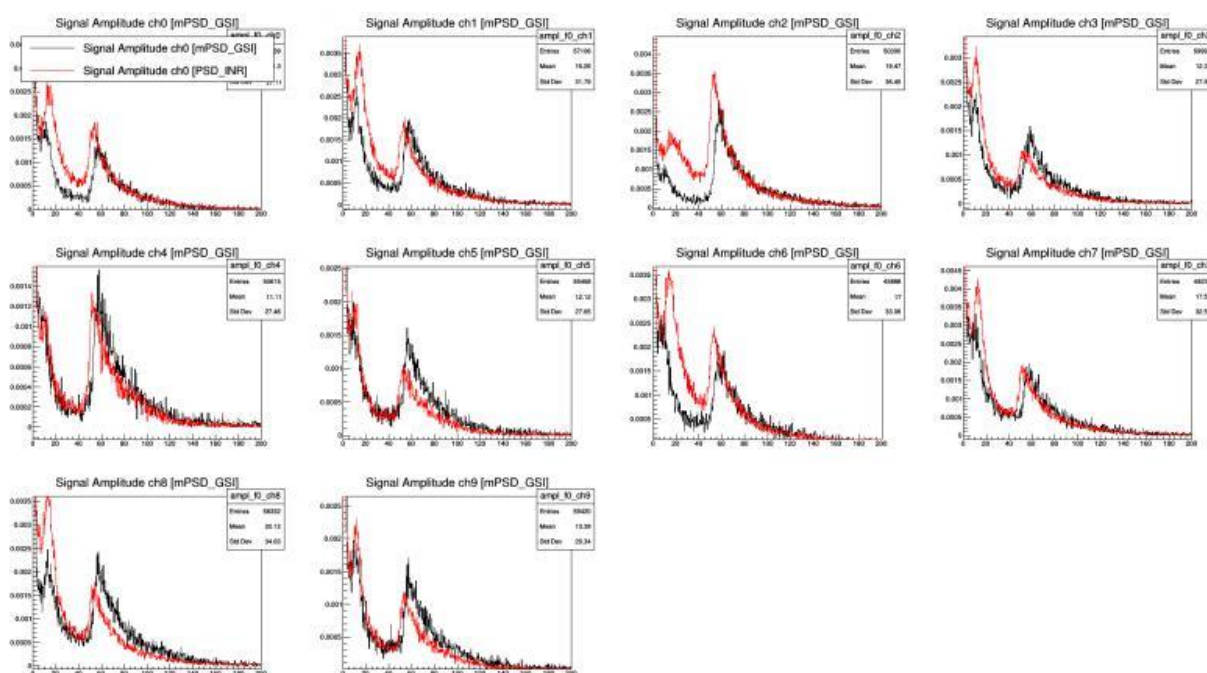


Рис. 12.28 – Амплитудные спектры секций модуля, доставленного в GSI, измеренные на космических мюонах в Москве (черные) и после его транспортировки в GSI (красные)

#### 12.3.4 Разработка метода определения центральности с помощью PSD СВ

В эксперименте СВМ для определения геометрии столкновений будет использован передний адронный калориметр PSD. Однако, наличие отверстия для пучка в центре калориметра, призванное снизить поглощенную дозу радиации, не позволяет однозначно связать энергию, выделившуюся в детекторе, с центральностью соударения. Тем не менее, определение классов центральности становится возможным, если использовать дополнительную переменную – асимметрию выделенной энергии в калориметре ( $Asymmetry = \frac{E_{in} - E_{out}}{E_{total}}$ , здесь  $E_{in}$  и  $E_{out}$  – выделенная энергия во внутренней и внешней областях калориметра, соответственно),

На Рис. 12.29 показаны схемы геометрий калориметра, для которых были выполнены расчеты. Первая геометрия соответствует калориметру из 44 модулей с ромбическим отверстием 60 x 60 мм в центре калориметра, который был изначально предложен в техническом проекте. Вторая геометрия калориметра представляет собой сборку из 46 модулей с квадратным отверстием 20x20см в центре. На Рис. 12.29 показан также и выбор внутренних и внешних частей для расчета асимметрии столкновений.

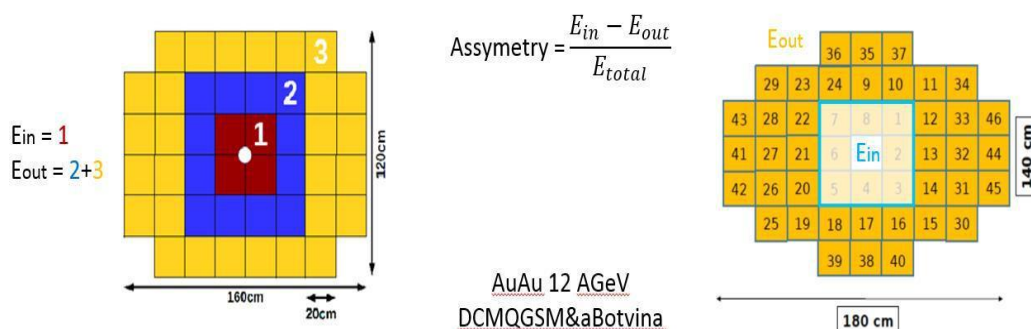


Рис. 12.29 – Схемы двух геометрий калориметра – с отверстием 60 x 60 мм, слева и 200 x 200 мм, справа (оказаны внутренние и внешние области для определения асимметрии)

В 2019 году была разработана методика разделения событий на классы центральности по двумерной зависимости выделенной энергии во всем калориметре от асимметрии выделенной энергии. В данном подходе по двумерному распределению строится профиль зависимости, который фитируется однозначной функцией. Двигаясь вдоль этого профиля и набирая необходимую долю от всех событий для заданного класса по центральности, можно определить границы классов центральности и определить полученное разрешение. Для анализа брались данные симуляции столкновения ядер золота AuAu из генератора событий DCMQGSMA&Botvina при кинетической энергии 12 АГэВ. На Рис. 12.30 показаны двумерные распределения зависимости выделенной энергии в калориметре от асимметрии выделенной энергии для калориметра из 44 модулей (слева) и 46 модулей (справа) с разбиением по классам центральности.

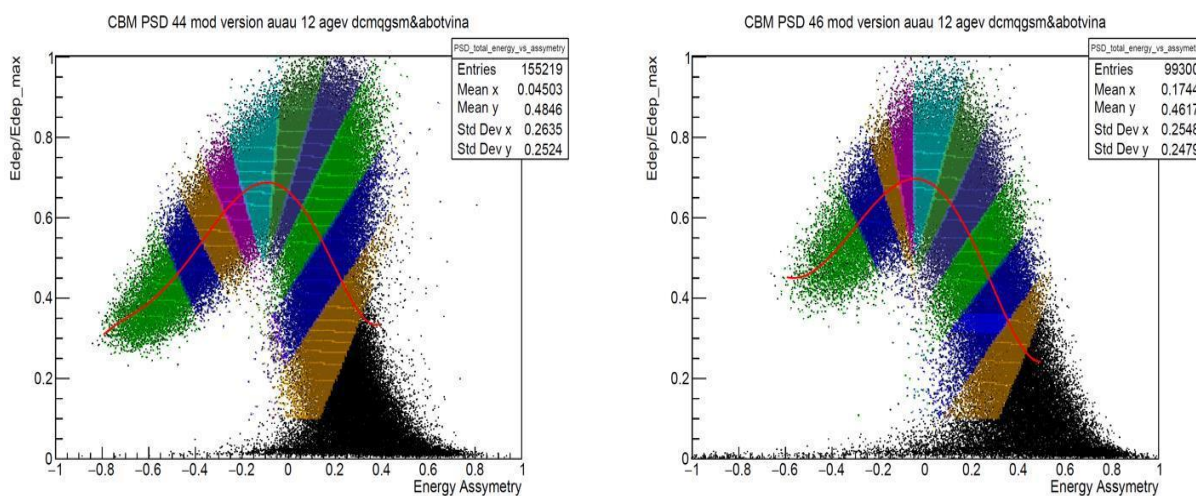


Рис. 12.30 – Двумерные распределения зависимости выделенной энергии в калориметре от асимметрии выделенной энергии для калориметра из 44 модулей (слева) и 46 модулей (справа) с разбиением по классам центральности

На Рис. 12.31 показано разрешение прицельного параметра в зависимости от класса центральности для обеих геометрий калориметра PSD, описанных выше.

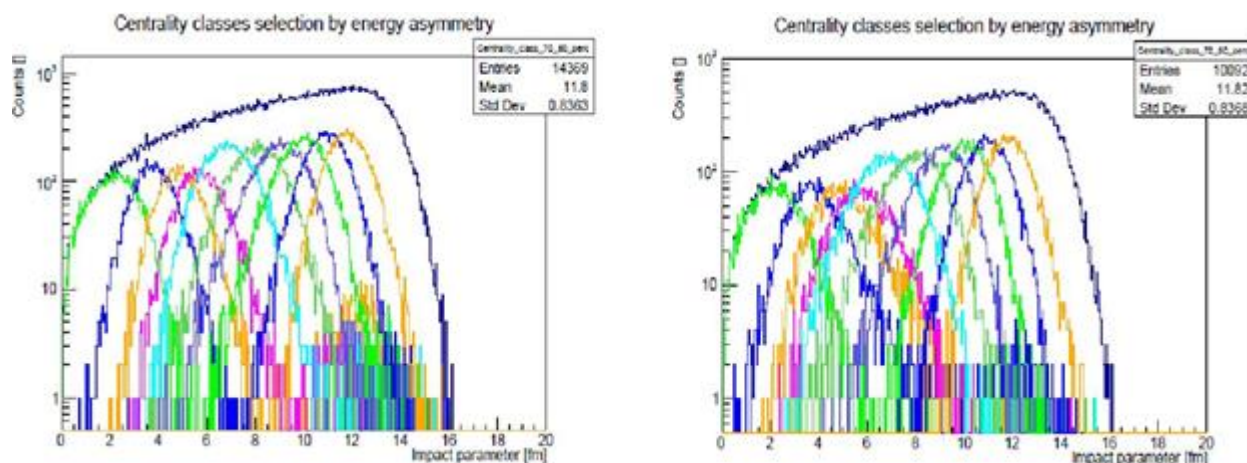


Рис. 12.31 – Разрешение по прицельному параметру для различных классов центральности для геометрий калориметра PSD с разными размерами пучкового отверстия

На Рис. 12.32 приведено сравнение разрешения по прицельному параметру для выбранных классов центральности для двух геометрий калориметра PSD. Черными точками показано разрешение по импакт параметру, полученное из генератора событий для частиц, попавших в акцептанс калориметра без пучкового отверстия, т.е. это лучшее разрешение, которое определяется только флуктуациями числа спектатора.

Проведенный анализ показывает незначительное ухудшение разрешения (порядка 15 – 20%) по прицельному параметру для центральных событий при использовании геометрии PSD с квадратным пучковым отверстием 20x20 см<sup>2</sup> по сравнению с геометрией калориметра с пучковым ромбическим отверстием 6x6 см<sup>2</sup>.

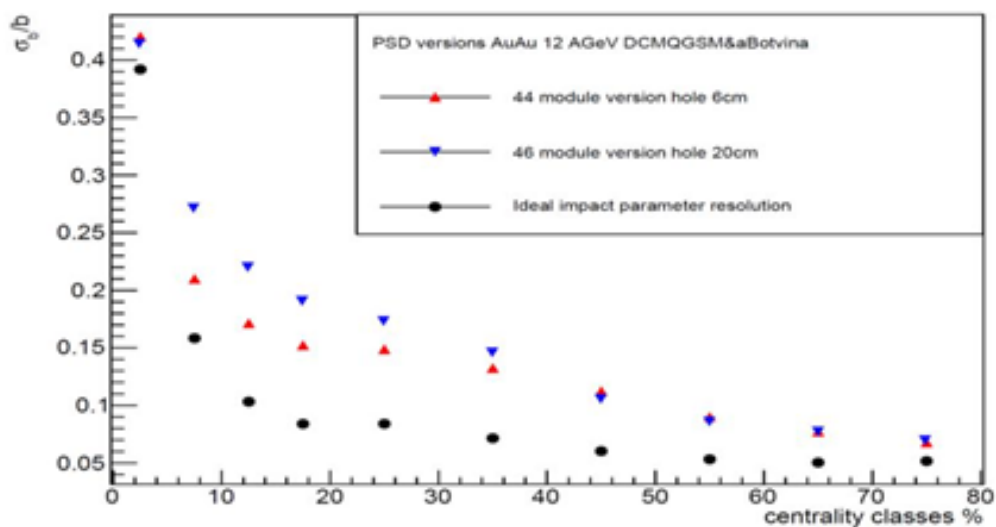


Рис. 12.32 – Сравнение разрешения по прицельному параметру для выбранного класса центральности для двух геометрий калориметра

### 12.3.5 Работы по использованию изготовленных модулей адронного калориметра СВМ в других экспериментах в рамках программы ФАИР-фаза-0

В 2019 г. в соответствии с соглашением между ИЯИ РАН, ОИЯИ и коллаборацией СВМ о временном использовании части изготовленных в ИЯИ РАН модулей калориметра PSD СВМ на установке BM@N на ускорителе НУКЛОТРОН в ОИЯИ, был собран новый передний адронный калориметр установки BM@N с использованием модулей PSD СВМ, которые предполагается использовать во внешней части FHCAL BM@N (Рис. 12.33 слева). Для этого были использованы 20 модулей изготовленных для адронного калориметра СВМ.

Для модернизации переднего адронного калориметра установки NA61 в ЦЕРНе были использованы 13 модулей калориметра СВМ (Рис. 12.33 справа). Эта работа проведена в соответствии с соглашением ИЯИ РАН с коллаборацией СВМ и коллаборацией NA61 о временном использовании части изготовленных в ИЯИ РАН модулей калориметра PSD СВМ на установке NA61. 13 модулей калориметра СВМ использованы для внутренней области и верхней частей калориметра (выделяются более светлым цветом).



Рис. 12.33 – Слева новый передний калориметр установки BM@N, справа – модернизированный калориметр установки NA61

Использование модулей адронного калориметра СВМ в экспериментах mСВМ на ускорителе SIS18 в GSI, в эксперименте BM@N на ускорителе Нуклотрон в ОИЯИ, а также в эксперименте NA61 в ЦЕРН, позволит не только получать новые физические результаты на этих действующих установках в период ФАИР-фаза-0, но и детально исследовать характеристики модулей калориметра в реальных экспериментах, разработать методики калибровки и анализа данных, позволит подготовить молодых специалистов для проведения исследований в эксперименте СВМ.

### 12.3.6 План работы ИЯИ РАН в ГСИ на 2019 г. для подготовки эксперимента СВМ

План работ ИЯИ РАН на 2020 г. включает несколько направлений:

- Проведение работ по интеграции считывающей электроники mPSD в систему сбора и передачи данных mСВМ, разработка программного обеспечения для мониторинга работы калориметра и анализа полученных экспериментальных данных;
- Подготовка и участие в 2х пучковых сеансах на установке mСВМ, которые запланированы в марте и мае 2020г.;
- Проведение работ по моделированию адронного калориметра с учетом его реальной геометрии, с учетом вакуумной системы СВМ, а также радиационных условий для размещения аналоговой и считывающей электроники;

- Проведение работ по моделированию точности определения центральности и угла плоскости реакции при использовании дополнительного кварцевого годоскопа в пучковом отверстии калориметра.

12.4 Отчет НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ по работам, выполненным в 2018 г. по программе СВМ

#### 12.4.1 Введение

Согласно решению о разделении среди институтов-участников коллаборации СВМ задач по созданию экспериментальной установки НИЦ Курчатовский институт - ПИЯФ участвует в создании Черенковского детектора RICH для регистрации электронов и мюонного детектора MUCH. Обязательства ПИЯФ, закрепленные контрактами:

- проектирование и создание механической структуры детектора MUCH;
- проектирование и создание механической структуры детектора RICH;
- проектирование и создание систем снабжения рабочими газами этих двух детекторов.

#### 12.4.2 Детектор MUCH

Детектор MUCH состоит из 5 поглотителей и 4 трековых станций (см. Рис. 12.34). Поглотители разделены 30 см воздушными промежутками, в которые помещены трековые станции. Каждая трековая станция содержит три слоя камер. Общее количество камер - 18 (по 3 на каждый поглотитель). Общая длина поглотителя составляет 2.3 м. Первый поглотитель состоит из 30 см углерода и 30 см бетона, а остальные 4 (20 + 20 + 30 + 100) см из железа.

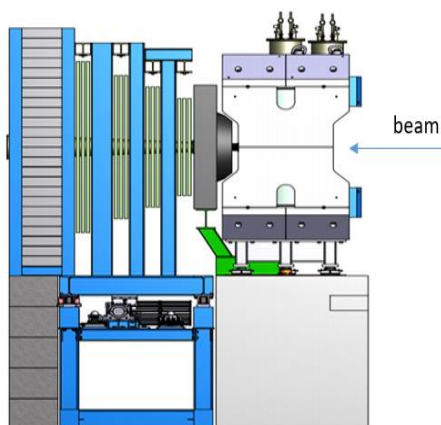


Рис. 12.34 – Схематический вид детектора MUCH

Вокруг пучковой трубы на входе первого поглотителя предусмотрена дополнительная свинцовая защита. Эту геометрию можно использовать как для идентификации чармония, так и векторных мезонов малой массы во всем диапазоне энергий FAIR. Первые две трековые станции, выполненные из камер на основе GEM, работают на 2-х компонентной газовой смеси, третья и четвертая станции собраны из камер RPC, работающих с 3-х компонентной газовой смесью, а в качестве 5-й трековой станции используется детектор TRD.



### 12.4.2.1 Механика MUCH

MUCH, регистрирующий мюонные пары должен быть как можно ближе к мишени, чтобы избежать распада пионов на мюоны, усиливающие фон димюонов. MUCH и RICH будут занимать одно и то же место на пучке на альтернативной основе, т.е. после работы в мюонной моде MUCH, установленный и закрепленный на движущейся платформе, перемещается в положение парковки, а его место на пучке занимает RICH для работы в моде регистрации электронов.

Каждая камера трековой станции состоит из двух полу-камер, которые механически независимы от своих собственных рам. Полу-камеры будут висеть с помощью подвижных механизмов на отдельных направляющих, прикрепленных к поперечным балкам и, в свою очередь, к надстройке. Поэтому есть возможность выдвинуть отдельную полу-камеру и получить доступ для ремонта или индивидуального обслуживания.

К настоящему времени была Так, например, концептуальный дизайн перемещаемой платформы был рассмотрен и принят экспертами ФАИР.

### 12.4.2.2 Система обеспечения рабочим газом

Конструкция газовой системы для детектора MUCH позволяет доставлять разные газовые смеси на разные субдетекторы. На рисунке Рис. 12.35 представлен пример системы, обеспечивающей смесь  $Ar + CO_2$ . Система работает номинально как газовая система с замкнутым контуром, при этом большая часть смеси рециркулирует через детектор. Поток рециркуляции можно регулировать в диапазоне 60-80 м<sup>3</sup>. Во время нормальной работы свежая смесь добавляется с главным контроллером массового расхода FM1 и подчиненным контроллером FM2 в диапазоне 0,1-10 SLPM.

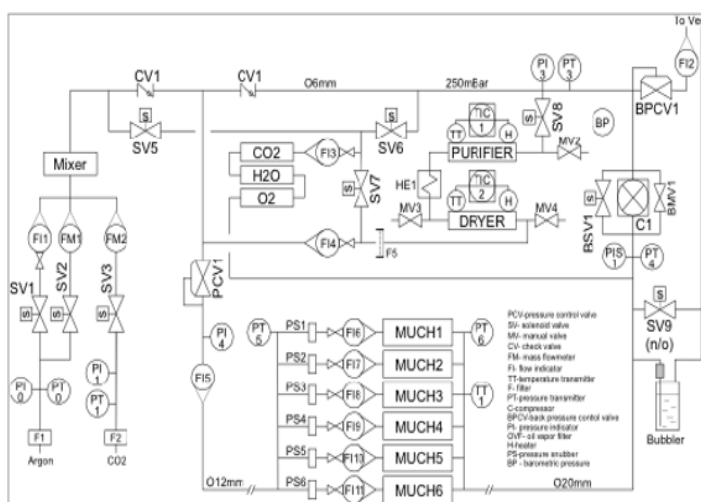


Рис. 12.35 – Газовая система детектора

Чтобы поддерживать постоянный перепад давления, измеряемый датчиком PT6, в диапазоне  $2 \pm 0,1$  мбар, система управления будет изменять поток через детектор, используя перепускной электромагнитный клапан BSV1. Переключатель индикации давления PIS1 будет поддерживать низкий (0,5 мбар) и высокий (1,5 мбар) уровни перепада давления перед компрессором C1. Газовая система предусматривает работу в открытой конфигурации для

продувки. Отрегулированный вручную перепускной клапан ВМV1 обеспечивает оптимальный расход через детектор.

Чистота и содержание рециркуляционной смеси контролируются с помощью анализаторов диоксида углерода, кислорода и влажности. Часть (до 50%) рециркуляционного газа может проходить через очиститель и осушитель для удаления кислорода и влаги. Содержание кислорода после очистителя / осушителя составляет около 2-3 промилле. Содержание воды составляет 1-2 промилле в выходном потоке осушителя при температуре 22°C.

Управляемая компьютером система сбора/контроля данных контролирует все переменные процесса, включая MUCH стабилизацию перепада давления. Компьютерная система маркирует количества, выходящие за пределы predetermined пределов, и инициирует корректирующие действия.

### 12.4.3 Детектор RICH

Идентификация электронов в эксперименте СВМ реализуется с помощью комбинации детектора Черенкова (RICH) и нескольких слоев детекторов TRD. На SIS100 детектора RICH будет достаточно для измерений векторных мезонов с малой массой. Первая станция TRD, тем не менее, все еще может заметно улучшить ситуацию. Однако, на SIS300 для изучения векторных мезонов и, возможно, также прямых фотонов посредством однократного преобразования ( $\gamma \rightarrow e + e^-$ ) внутри мишени или первого слоя детектора STS потребуется полное включение TRD.

Детектор RICH обеспечит идентификацию электронов и подавление пионов в диапазоне импульсов ниже 10 ГэВ/с. Это газообразный детектор, построенный в стандартной проективной геометрии с фокусирующим зеркалом и фотонным детектором. В качестве газа-радиатора используется CO<sub>2</sub>. Детектор, как показано на Рис. 12.36, будет расположен за дипольным магнитом примерно в 1,8 м от мишени.

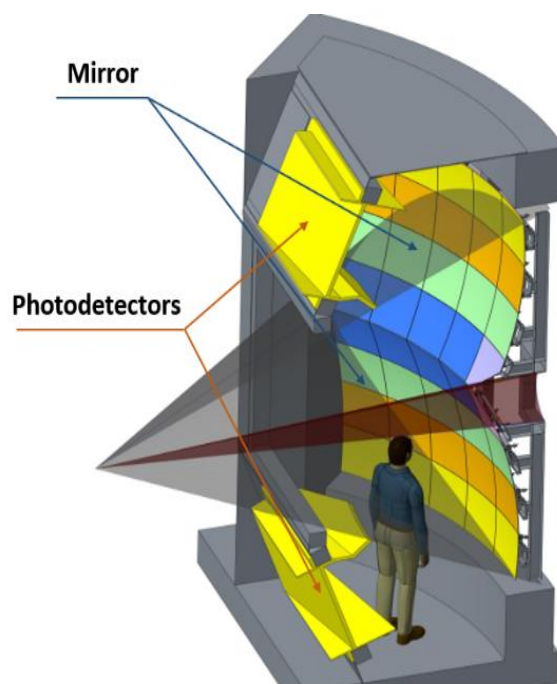


Рис. 12.36 – Схематический вид детектора RICH

Фокусировка индуцированного черенковского света достигается с помощью большой много-сегментной системы сферических зеркал площадью  $13 \text{ м}^2$  (два ползеркала над / под балкой) с радиусом кривизны 3 м (Рис. 12.36). Будут использоваться стеклянные зеркальные плитки ( $\sim 40 \times 40 \text{ см}^2$ , толщиной 6 мм) с отражающим покрытием  $\text{Al} + \text{MgF}_2$  (отражающая способность 85% в широком диапазоне длин волн).

Система обнаружения фотонов покрывает общую активную площадь  $2,4 \text{ м}^2$ . Будут использоваться многоанодные фотоумножители (Hamamatsu H12700) с прозрачным для УФ-излучения окном. Использование покрытия со сдвигом длины волны, нанесенного на окно РМТ, рассматривается для дальнейшего повышения эффективности УФ-излучения. Размер пикселя считывания составляет  $6 \times 6 \text{ мм}^2$ , что требует 55 000 каналов считывания. Остаточное магнитное поле влияет на работу фотоумножителей. Чтобы переместить детекторы фотонов в область с меньшими магнитными полями, система фокусировки зеркала была наклонена. К сожалению, такой уклон приводит к ухудшению характеристик детектора (форма колец начинает отклоняться от круга, что снижает эффективность нахождения колец). После интенсивного моделирования и расчетов был выбран оптимальный угол наклона оптической системы (около 10 градусов). Но в этом случае требуется дополнительная магнитная защита (железо) вокруг фотонных детекторов, чтобы уменьшить магнитное поле на фотокатодах до значения 1 - 2 мТл.

Для комплексной проверки выбранных компонентов был построен полномасштабный прототип детектора RICH, который был успешно испытан в ходе трех испытательных сессий на тестовом пучке в ЦЕРН. Испытания показали, что на электронное кольцо измеряется 22 фотона. В центральных  $\text{Au} + \text{Au}$  столкновениях при энергии пучка 25 AGeV видны порядка 100 колец (из-за большого материального баланса перед детектором RICH). Тем не менее, по результатам моделирования благодаря высокой гранулярности и большого количества фотонов на кольцо, ожидается, что будет достигнуто подавление пионов более чем в 100 раз.

#### 12.4.3.1 Механика RICH

В физической программе эксперимента CBM предполагается поочередное (типичный период смены раз в год) использование детекторов RICH и MUCH в одном и том же месте на пучке, т.е. механическая конструкция RICH с размерами около  $2 \text{ м} \times 5 \text{ м} \times 6 \text{ м}$  (длина  $\times$  высота  $\times$  ширина), должна обеспечивать легкую подвижность детектора RICH в целом либо с помощью крана, либо с помощью рельсов.

Аксептанс детектора RICH охватывает диапазон углов рассеяния до  $35^\circ$  в горизонтальной ( $x - z$ ) плоскости и до  $25^\circ$  в вертикальной ( $y - z$ ) плоскости относительно номинального положения мишени.

Длина газового радиатора (измеряется от входного окна до зеркальной поверхности) составляет 1,70 м (общая длина приблизительно 2 м). Оставшееся место зарезервировано для зеркал, их креплений и опорных рам.

#### 3.2.1.1 Система фокусировки зеркал

Каждая из двух половин зеркала RICH разбита на 40 прямоугольных сегментов (плиток) с четырьмя рядами по десять плиток в каждой (Рис. 12.37). Используются четыре типа плиток разных размеров. Эта схема сегментации учитывает разумные размеры стеклянных зеркальных плиток и обеспечивает приемлемые промежутки в 3 - 4 мм между плитками.

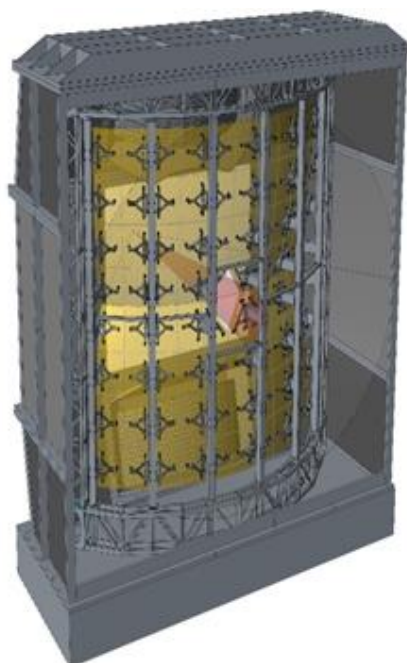


Рис. 12.37 – Схематический вид расположения зеркальных плиток

Поскольку детектор RICH будет установлен прямо за магнитом, несущая рама зеркала будет находиться внутри аксептанса последующих детекторов. Поэтому мы предъявляем дополнительные требования к механической конструкции несущей конструкции зеркала. С одной стороны, конструкция должна обеспечивать устойчивость оптической системы даже при транспортировке с помощью крана. С другой стороны, конструкция должна быть максимально радиационно-прозрачной, чтобы предотвратить влияние на работу детекторов, установленных за RICH. Для того чтобы решить эту проблему, интенсивные расчеты были проведены для порядка десяти различных вариантов конструкции рамы, поддерживающей зеркала. В результате был выбран наиболее перспективный вариант с так называемой колонной, несущей два ряда зеркальных плиток (Рис. 12.38d).

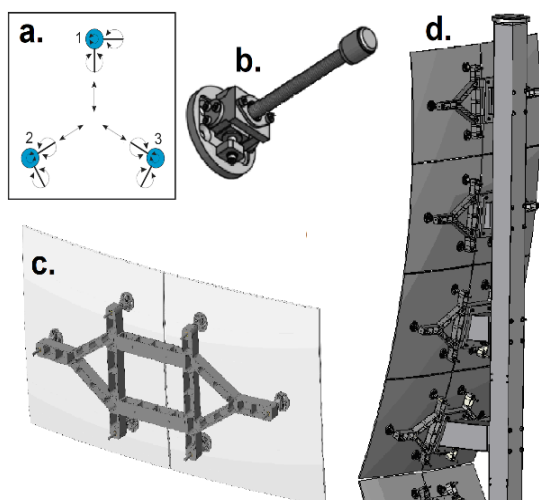


Рис. 12.38 – Система поддержки зеркальных плиток: а.- схема 3-х точечного крепления зеркала; б.- механизм поддержки и юстировки зеркал; с.- конструкция рамки крепления 2-х плиток; d.- колонна, для крепления 2-х рядов плиток

Для этой версии была выбрана 3-х точечная концепция геометрии крепления отдельных зеркальных плиток (Рис. 12.38a), при этом три точки крепления на зеркале образуют равносторонний треугольник. Эта версия позволяет достичь максимального отклонения на краях зеркала менее 5 мкм, поэтому схема монтажа компенсирует гравитационную деформацию плитки.

Предложенная конструкция механизмов крепления (Рис. 12.38b) позволяет ориентировать каждую отдельную зеркальную плитку для обеспечения хорошей оптической сходимости и качества фокусировки комбинированной зеркальной системы. Три регулируемых крепления зеркала обеспечивают связь между отдельной плиткой и алюминиевой рамой, поддерживающей плитку. Каждая опорная рама, в которой хранятся две отдельные плитки (схематично представленные на Рис. 12.38c), прикреплена к вертикальной стойке (колонне). Колонны (всего 6 штук) закреплены в жесткой раме.

Для тестирования выбранной версии был создан прототип с двумя колоннами (показан на Рис. 12.39). С помощью этого прототипа разрабатывается технология сборки, проверяются различные конструкции колонн, различные материалы, проверяется геометрия (зазоры), проводятся испытания на прочность, механические испытания (встряхивание, ускорение), проверяется поведение конструкции во времени.

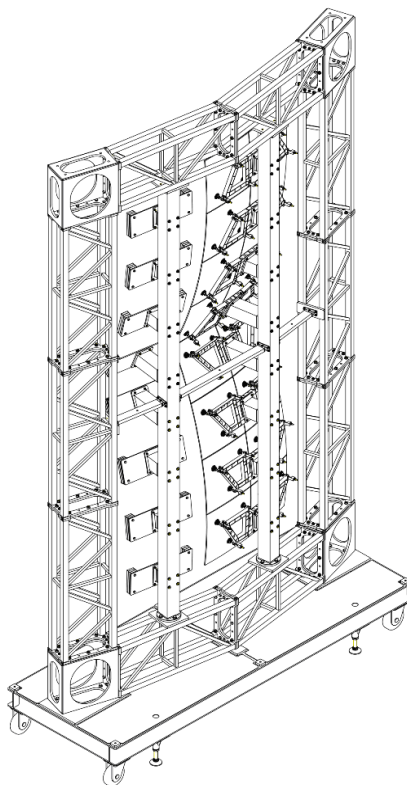


Рис. 12.39 – Прототип с двумя колоннами поддержки зеркал

#### 12.4.3.2 Газовая камера

Конструкция газовой камеры основана на решениях, протестированных на полномасштабном прототипе, и содержит усиленную раму, покрытую жесткими панелями со всех сторон (Рис. 12.39). Она должна обеспечивать герметичную и светонепроницаемую оболочку для газа-радиатора и обеспечивать механическую опору для системы фокусирующего зеркала внутри, а также монтажные фланцы для двух фотонных детекторов и их магнитного экрана. Положение и ориентация этих фланцев определяют точное

положение детектора, и их конструкция должна быть определена по согласованию с командой, ответственной за создание детекторов фотонов. Газовая камера также содержит пучковую трубу в качестве неотъемлемой части, вакуум внутри трубы будет на уровне  $10^{-4}$  мбар. Усиленная конструкция газовой камеры также необходима для возможности перемещения детектора с помощью крана. Конструкция позволяет разобрать камеру для транспортировки в стандартном контейнере. Часть одной из боковых панелей можно демонтировать для установки конструкции поддержки зеркал. Переднюю и заднюю панели также можно снять для доступа к несущей раме и детекторам фотонов. Передняя и задняя панели изготовлены из каптоновой пленки толщиной 200 мкм. В качестве альтернативы для задней панели можно использовать пластиковый лист толщиной 2 мм. Соответствующие части рамы будут иметь конструкции для поддержки пучковой трубы.

#### 12.4.3.3 Газовая система детектора RICH

Конструкция газовой системы RICH очень похожа на газовую систему MUCH (см. 12.4.2.2) с одним отличием: для RICH нам нужен только однокомпонентный газ. Системы очистки и сушки должны поддерживать максимальное содержание воды и кислорода в нескольких миллионных долях. Обе системы нуждаются в возможностях для регенерации. Газовая система должна быть расширяемой в случае, если различные газы радиатора будут использоваться позже. Температура, давление, содержание кислорода и воды должны контролироваться в системе медленного управления СВМ. Такая система была разработана для снабжения  $\text{CO}_2$  полномасштабным прототипом RICH, который был испытан на пучковой установке CERN. В ходе тестового эксперимента система показала высокую стабильность перепада давления при работе в режиме рециркуляции и высокую эффективность осушителя и очистителя газа.

В целом, газовая система обеспечивала стабильную работу и надежный контроль всех необходимых параметров газа.

#### 12.4.4 Заключение

В заключение отметим, что концептуальные разработки механики и газовых систем, проведенные в ПИЯФ, нашли полную поддержку коллаборации и прошли техническую экспертизу ФАИР.

Планы работ ПИЯФ на 2020 год включают:

- завершение концептуального проекта механики, включающего подвижную платформу для размещения детектора MUCH, абсорберы и ферму (суперструктура) для подвеса трековых станций с соответствующим сервисным оборудованием;
- согласование с немецкой стороной технического требования на фундамент в месте расположения детектора MUCH;
- разработка газовой системы для RPC камер и начало практической реализации газовой системы для камер на базе GEM для детектора MUCH;
- завершение концептуального проекта механики, включающего ферму поддержки зеркал, камеру герметичного газового объема и конструкцию для размещения фотоприемников детектора RICH;
- проведение тестовых измерений на полномасштабном прототипе фермы с размещенными на ней зеркалами детектора RICH, доставленными из Германии.

## 12.5 Работы НИЦ «КИ» по эксперименту CBM в 2019 г.

В 2019 г. были продолжены исследования потоков странных адронов в рамках подготовки физической программы эксперимента CBM. Велась разработка ПО и изучение возможностей детектора по измерению коллективных потоков странных адронов. В рамках этих работ проводились моделирования столкновений ядер золота при энергиях SIS100 (с реалистичным распределением прицельного параметра) с помощью программной среды CBMROOT. Проводились моделирования со значениями импульса пучка 3.3 и 12 ГэВ/с. Использовалась модель ядро-ядерных столкновений DCM-QGSM+SMM<sup>45</sup>, включающая в себя коалесценцию ядер и, таким образом, реалистичное моделирование ядерных фрагментов, что является существенно важным для реалистичного моделирования отклика переднего адронного калориметра PSD и центральности, измеренной с его помощью. Результаты работы предыдущего года по изучению направленных потоков ( $v_1$ ) странных и нестранных заряженных адронов были опубликованы в работе<sup>46</sup>.

В отчетный период была проведена работа по переходу ПО новый пакет DataTreeFlow, который включает в себя вычисление центральности события, плоскости события и его коррекции с помощью QnCorrections, заполнение корреляционных гистограмм и последующее вычисление поправок на разрешение различными методами.

Подготовлены программы для анализа потоков лямбда-гиперонов методом инвариантных масс: на Рис. 12.40 представлены гистограммы в различных бинах центральности: спектры инвариантных масс лямбда-кандидатов и направленные потоки ( $v_1$ ) лямбда-кандидатов в зависимости от инвариантной массы.

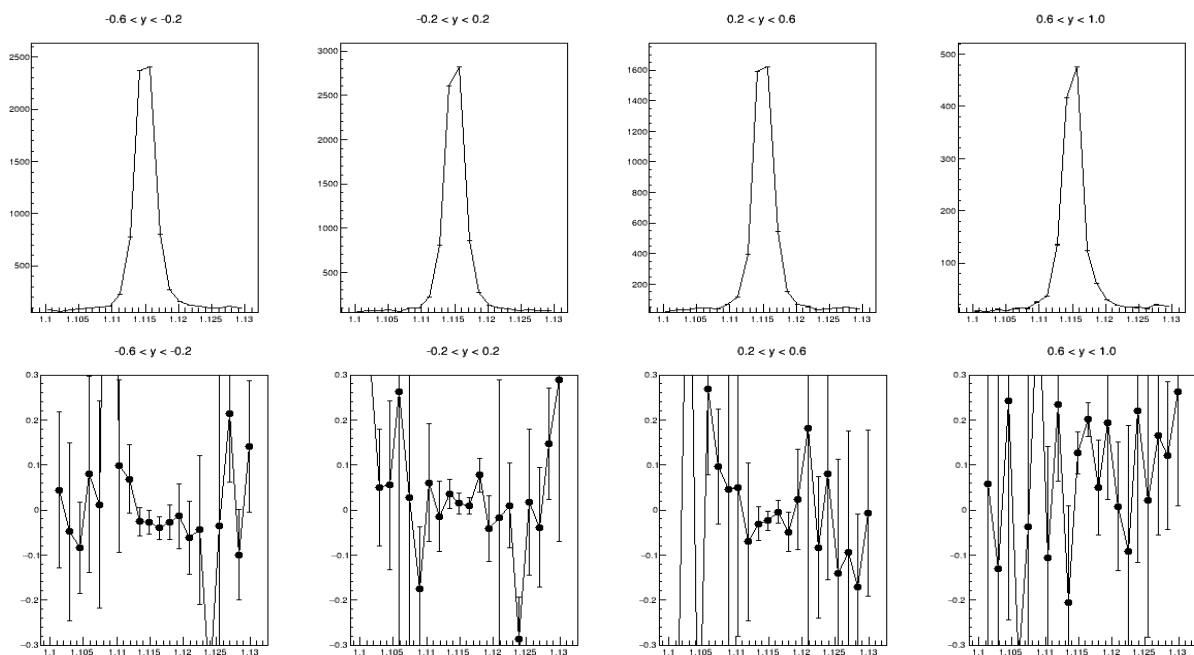


Рис. 12.40 – Вверху: Спектры инвариантных масс лямбда-кандидатов для вычисления числа лямбда гиперонов в бинах по быстройте; внизу: зависимости направленного потока лямбда-кандидатов в бинах по быстройте (центральность 0-25%)

<sup>45</sup> A.S. Botvina, K.K. Gudima, J. Steinheimer, M. Bleicher, and I. N. Mishustin, Phys. Rev. C 84 (2011) 064904

<sup>46</sup> D. Blau et. al “CBM performance for flow measurements of charged and strange hadrons”, CBM Progress Report 2018, p. 172, GSI-2019-01018, Darmstadt 2019, doi:10.15120/GSI-2019-01018

Вычисления проведены на тестовой статистике около 350 тысяч событий для энергии 12 ГэВ/нуклон, в настоящее время ведется работа по анализу данных статистики, подготовленной в новом релизе CBMROOT (OCT19).

Полученные результаты были представлены в докладах на собраниях коллаборации CBM (CBM Collaboration Meeting). Также полученные результаты вошли в обзорный доклад коллаборации CBM, представленный на Quark Matter 2019 в ноябре 2019 г.

#### 12.5.1 Работы, планируемыe на 2020 год

Планируется продолжить исследования коллективных потоков с помощью Монте-Карло моделирований в рамках подготовки эксперимента CBM на большой статистике смоделированных данных. Продолжится тестирование пакетов на статистке, сгенерированной в последнем на текущий момент релизе CBMROOT (CBMROOT OCT2019), 5M событий для энергий 12 и 3.3 ГэВ. Планируется продолжить систематический анализ влияния различных настроек KFParticleFinder (реконструкции странных частиц в CBMROOT) и фреймворка коррекции векторов потока (QnCorrections). Планируется участие во встречах коллаборации CBM.

#### 12.6 Вклад группы НИЯУ МИФИ в подготовку эксперимента CBM

Основным направлением работы группы НИЯУ МИФИ является исследование коллективных потоков заряженных частиц, образующихся в столкновениях тяжелых ядер в эксперименте CBM, который будет оперировать при импульсах пучков  $p_{\text{beam}}$  ядер в диапазоне 3.3-12 ГэВ/с на нуклон. Основная мотивация для изучения потоков в эксперименте CBM связана с исследованием уравнения состояния ядерной материи путем оценки её сжимаемости, что позволит на макроскопическом уровне поставить предел по массам нейтронных звезд, необходимый для понимания эволюции звезд.

Была разработана и внедрена процедура функционального тестирования CbmRoot - основного пакета для обработки данных, реконструкции и моделирования. Результаты представлены на собраниях коллаборации CBM в апреле и октябре 2019 года.

С помощью новой процедуры осуществлено тестирование последних версий CbmRoot (APR19 и OCT19). Для диапазона импульсов пучков ( $p_{\text{beam}} = 3.3 - 12$  ГэВ/с), ожидаемых на ускорителе SIS100, создана библиотека данных столкновений ядер золота на основе Монте-Карло генераторов событий UrQMD и DCM-QGSM-SMM с примесью дилептонных пар, полученных генератором Pluto. Для каждой из моделей и двух граничных значений  $p_{\text{beam}}$  созданы наборы по 5M событий и дополнительно ряд тестовых наборов по 100K для различных конфигураций CBM. Было обнаружено, что моделирование отклика детекторных подсистем, в особенности переднего калориметра PSD, очень требовательно к дисковому пространству и процессорному времени. В данный момент это является основным препятствием для моделирования необходимой статистики (>100M событий) для изучения редких процессов.

В окружении CbmRoot проведена симуляция отклика детектора для частиц, рожденных в этих столкновениях, а также реконструкция событий с помощью алгоритмов, планируемых к использованию в эксперименте CBM. Симуляция основывалась на пакетах GEANT3 и GEANT4.

На основе проведенного анализа качества библиотеки данных и алгоритмов реконструкции, было показано, что GEANT3 сильно занижает значения энергии,



зарегистрированной передним калориметром PSD, и его реалистичное моделирование требует использования GEANT4 (Рис. 12.41). Кроме того, уменьшение величины магнитного поля для более низких импульсов пучка ядер приводит к снижению разрешения реконструированных импульсов частиц, что проявляется, в том числе, в уширении пиков инвариантной массы для частиц, реконструированных с использованием пакета KFParticleFinder (Рис. 12.42).

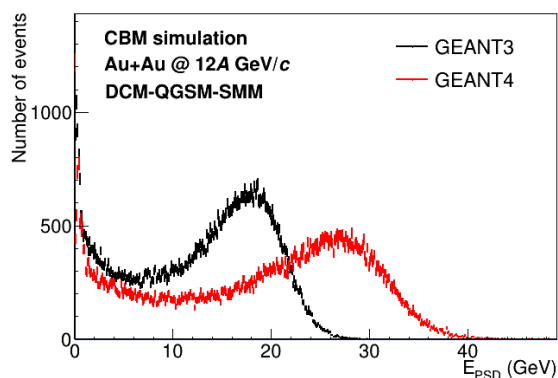


Рис. 12.41 – Сравнение распределений полной энергии, зарегистрированной передним калориметром PSD, смоделированной с использованием GEANT3 и GEANT4

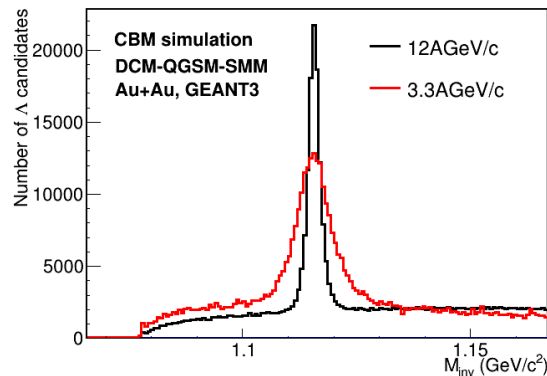


Рис. 12.42 – Сравнение пиков инвариантной массы кандидатов лямбда-гиперонов для импульсов пучка 3.3 и 12 ГэВ/с на нуклон

В рамках второго направления, проведено исследование производительности установки CBM для измерения направленного потока заряженных адронов. Исследование основано на 3х миллионах реконструированных столкновений ионов золота с помощью модели UrQMD при импульсе пучка  $p_{\text{beam}} = 10$  ГэВ/с. Моделирование взаимодействия с материалом детекторных подсистем осуществлялось с помощью пакета GEANT3. Использовалась стандартная конфигурация CbmRoot с подсистемами эксперимента CBM, планируемыми для измерений физики адронов.

Анизотропные коллективные потоки являются одной из наиболее важных наблюдаемых величин при исследовании материи, создаваемой в релятивистских ядро-ядерных столкновениях. Анизотропия в распределении импульсов рожденных в столкновении частиц крайне чувствительна к свойствам системы на самой ранней стадии ее эволюции. Количественно анизотропные потоки определяются коэффициентами  $v_n$  разложения азимутального распределения частиц относительно плоскости реакции в тригонометрический ряд Фурье<sup>47</sup>:

$$\rho(\varphi - \Psi_{RP}) = \frac{1}{2\pi} \left( 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} v_n \cos \left[ n(\varphi - \Psi_{RP}) \right] \right)$$

где  $\varphi$  - азимутальный угол импульса рожденной частицы,  $\Psi_{RP}$  - азимутальный угол плоскости реакции, который определяется направлением пучка и прицельным параметром сталкивающихся ядер. В эксперименте приблизительное направление плоскости реакции можно получить с использованием азимутального распределения рожденных в столкновении частиц или отклонения фрагментов спектаторов.

<sup>47</sup> A. Poskanzer, S. Voloshin, Phys.Rev. C58 (1998) 1671-1678

В данном анализе использовались события с высоким качеством реконструкции первичной вершины ( $\chi^2/\text{NDF} < 3$ ) и треки с высоким качеством фитирования ( $\chi^2/\text{NDF} < 3$ ). Определение центральности производилось на основании значения суммарной энергии, зарегистрированной детектором PSD в соответствии с процедурой, описанной в работе<sup>48</sup>. Распределение этой энергии и разбиение на классы центральности представлены на Рис. 12.43.

Идентификация частиц проводилась с помощью вероятностного подхода с использованием информации о полном импульсе частицы из трековых детекторов и квадрата массы из времяпролетной системы<sup>49</sup>. Распределение данных величин приведено на Рис. 12.44. В небольших интервалах по полному импульсу отдельно для частиц с отрицательным и положительным зарядом строились распределения по квадрату их массы, после чего производилось фитирование этих распределений с помощью распределений по квадрату массы для отдельных типов частиц с добавлением комбинаторного фона. На Рис. 12.45, приведен пример такого фитирования для перекрывающихся распределений по квадрату массы в области протонов, положительных пионов и положительных каонов в диапазоне импульсов треков  $p = 3.8-3.9$  ГэВ/с. Распределения по импульсу и квадрату массы для треков, идентифицированных с вероятностью 90%, представлено на Рис. 12.46.

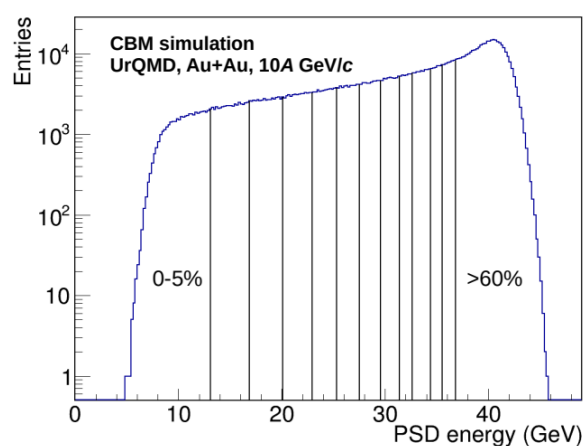


Рис. 12.43 – Распределение суммарной энергии, зарегистрированной детектором PSD, и разбиение на классы центральности

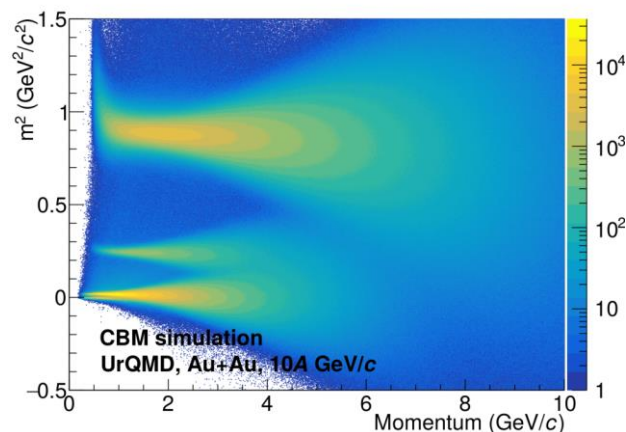


Рис. 12.44 – Распределение отобранных треков с положительным зарядом по полному импульсу и квадрату массы

<sup>48</sup> Klochov, et al. [CBM Collaboration] Centrality determination in heavy-ion collisions with the CBM experiment // J. Phys. Conf. Ser. — 2017. — V. 798, no. 1. — P. 012059

<sup>49</sup> V. Klochov, I. Selyuzhenkov, «Procedure for charged hadrons identification in the CBM experiment», CBM Progress Report 2016, p. 175

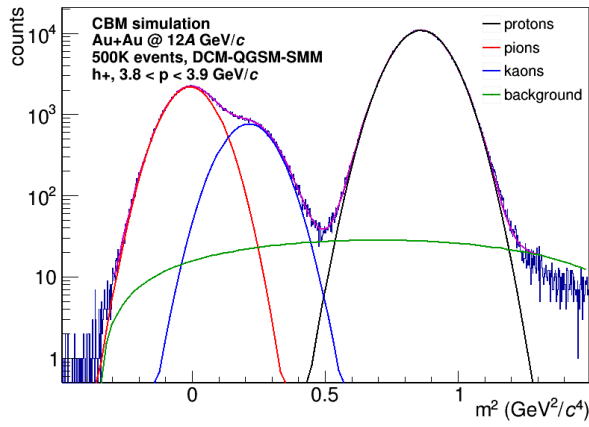


Рис. 12.45 – Пример фитирования перекрывающихся распределений по квадрату массы для протонов, положительно заряженных пионов и каонов в диапазоне импульса 3.8-3.9 ГэВ/с

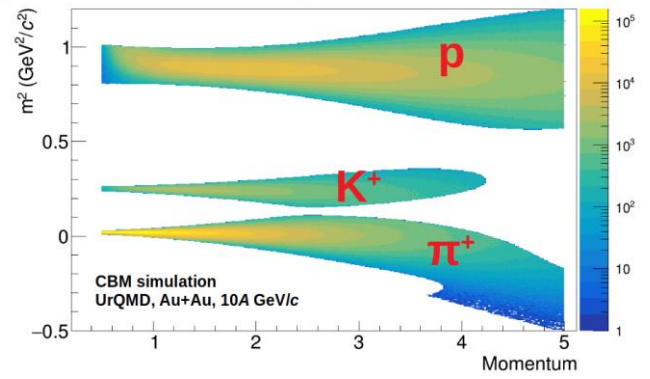


Рис. 12.46 – Распределение по полному импульсу и квадрату массы для треков, идентифицированных с вероятностью 90%

Измерение направленного потока проводилось методом скалярного произведения относительно плоскости симметрии спектров налетающего ядра, зарегистрированных детектором PSD. Для вычисления потоков и разрешения реконструкции плоскости симметрии вводится понятие  $\mathbf{u}$  и  $\mathbf{Q}$  векторов:

$$\mathbf{u}_1 = \{u_{1,x}; u_{1,y}\} = \{\cos \phi; \sin \phi\}$$

$$\mathbf{Q}_1 = \{Q_{1,x}; Q_{1,y}\} = \frac{1}{\sum_k w_k} \left\{ \sum_k w_k \cos \phi_k; \sum_k w_k \sin \phi_k \right\}$$

где  $\phi$  - азимутальный угол импульса рожденных в столкновении частиц (для  $\mathbf{u}$  вектора) или вектора, указывающего в центр модуля PSD (для  $\mathbf{Q}$  вектора),  $x$  и  $y$  - оси в плоскости, поперечной оси пучка,  $w$  - заряд в модуле PSD.

Для корректировки результатов измерений на эффекты неоднородного акцептанса установки, возникающих из-за прямоугольной формы трековых и спектрометрических детекторов или влияния магнитного поля на заряженные адроны, использовался пакет QnCorrectoins Framework<sup>50</sup>. Среди использованных поправок для  $\mathbf{u}$  и  $\mathbf{Q}$  векторов, были а) центрирование для всех детекторов, б) поворот и с) масштабирование для трековых детекторов<sup>51</sup>.

Вследствие низкой гранулярности детектора PSD важно правильно оценить поправку на разрешение реконструкции плоскости симметрии спектров налетающего ядра. Для этого модули PSD были разбиты на три группы (подсобытия) - центральные модули (PSD1), средние (PSD2) и периферические (PSD3) (Рис. 12.47).

В данной реализации метода трех подсобытий поправка на разрешение вычислялась на основе корреляций компонент Q-векторов по формуле:

$$R_{1,i}^a \{b, c\} = \sqrt{2 \frac{\langle Q_{1,i}^a Q_{1,i}^b \rangle \langle Q_{1,i}^a Q_{1,i}^c \rangle}{\langle Q_{1,i}^b Q_{1,i}^c \rangle}}, \quad i = x, y$$

<sup>50</sup> J. Onderwaater, I. Selyuzhenkov and V. Gonzalez, <https://github.com/jonderwaater/FlowVectorCorrections>

<sup>51</sup> I. Selyuzhenkov, S. Voloshin, Phys. Rev. C77 (2008) 034904

Вследствие распределения адронного ливня между соседними модулями PSD возможно возникновение дополнительных корреляций между расположенными в смежных по быстрой диапазонах подсобытиями (PSD1 и PSD2, PSD2 и PSD3).

$$R_{1,i}^A\{B, C, D\} = \sqrt{2 \frac{\langle Q_{1,i}^A, Q_{1,i}^B \rangle \langle Q_{1,i}^A, Q_{1,j}^C, q_{2,k}^D \rangle}{\langle Q_{1,i}^B, Q_{1,j}^C, q_{2,k}^D \rangle}},$$

Для устранения этого эффекта использовался метод смешанных гармоник, в котором в корреляции включается дополнительный  $\mathbf{q}$ -вектор из детектора STS: где ненулевые комбинации возможны для компонент трехчастичных корреляций  $(i, j, k) = (x, x, x), (x, x, y), (y, x, y)$  и  $(y, y, x)$ . Точность определения разрешения для двух методов оценивалась путем сравнения с истинным разрешением каждого из подсобытий, которое можно вычислить, зная угол плоскости реакции:

$$R_{1,x}^{a,MC} = \langle Q_{1,x}^a \cos \Psi_{RP} \rangle, \quad R_{1,y}^{a,MC} = \langle Q_{1,y}^a \sin \Psi_{RP} \rangle$$

На Рис. 12.48 приведено сравнение разрешения для  $y$ -компонент  $\mathbf{Q}$  векторов из центральной части детектора PSD1, вычисленного методами трех подсобытий и смешанных гармоник, с истинным значением этого разрешения. Видно, что второй метод дает гораздо более точную оценку данной характеристики, в связи с чем именно он был использован в настоящем анализе.

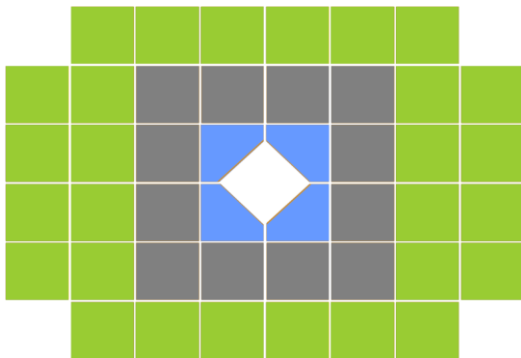


Рис. 12.47 – Схема группировки модулей PSD в подсобытия: PSD1 (голубой), PSD2 (серый) и PSD3 (зеленый)

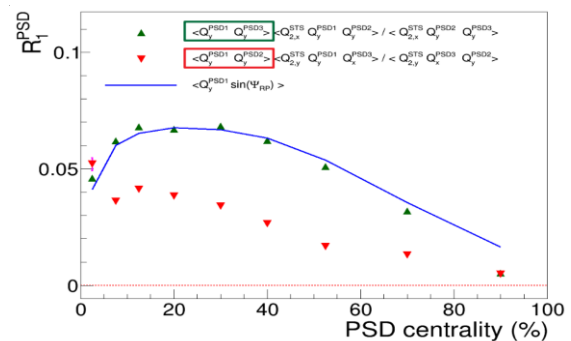


Рис. 12.48 – Сравнение разрешений, полученных методами трех подсобытий и смешанных гармоник, с истинным разрешением подсобытия PSD1

Для учета переменной эффективности реконструкции треков частиц в различных диапазонах поперечного импульса и быстрой использовалась поправка, определяемая как отношение между числом смоделированных и реконструированных частиц в данном кинематическом диапазоне:

$$C(p_T, Y) = \frac{N_{sim}}{N_{reco}}$$

Величина, обратная этой поправке, была использована в качестве веса при построении  $\mathbf{q}$ -векторов из реконструированных треков. На Рис. 12.49 представлена зависимость значения  $C(p_T, Y)$  от поперечного импульса и быстрой для положительно заряженных пионов и протонов.

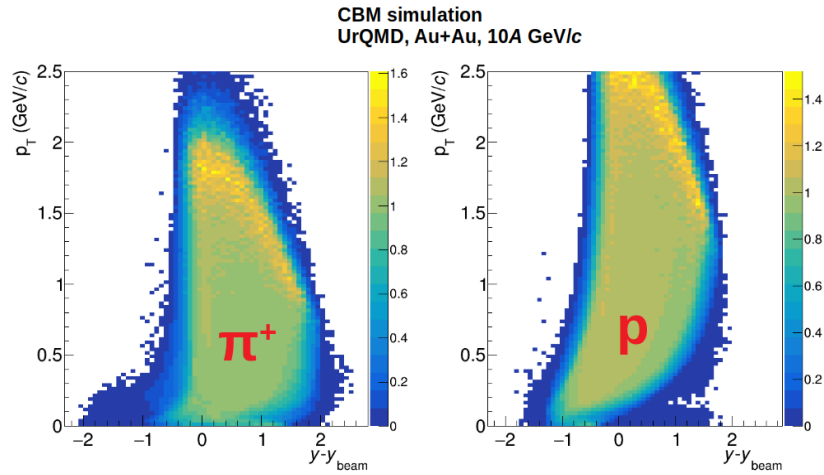


Рис. 12.49 – Эффективности регистрации положительно заряженных пионов (слева) и протонов (справа) как функция поперечного импульса и быстроты

Направленный поток вычислялся относительно каждого из трех подсобытий по формуле:

$$v_{1,i}^a(p_T, y) = \frac{2\langle u_{1,i}(p_T, y)Q_{1,i}^a \rangle}{R_{1,i}^a}, \quad i = x, y.$$

Точность вычисления направленного потока оценивалась путем измерения аналогичных величин в модели по формуле:

$$v_{1,i}^{MC}(p_T, y) = 2\langle u_{1,i}^{MC}(p_T, y)Q_{1,i}^a \rangle, \quad i = x, y.$$

В отчете приведены результаты, полученные с помощью у-компонент, как лучше определенные статистически. Измерения относительно плоскости симметрии подсобытия PSD2 не приведены вследствие высокого влияния распространения адронного ливня на корреляции между соседними подсобытиями.

На Рис. 12.50 приведено сравнение восстановленных зависимостей направленного потока положительно заряженных пионов (слева) и протонов (справа) от быстроты в системе центра масс для среднецентральных столкновений.

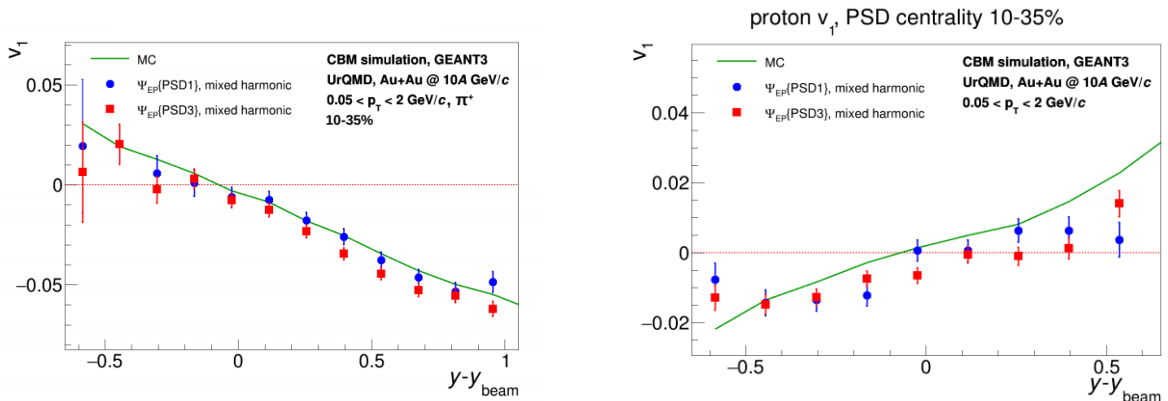


Рис. 12.50 – Зависимость направленного потока положительно заряженных пионов (слева) и протонов (справа) от быстроты для среднецентральных столкновений в сравнении с модельными значениями

На Рис. 12.51 приведено сравнение зависимости восстановленного направленного потока положительно заряженных каонов от быстроты с модельными значениями. Несмотря на высокие статистические погрешности вследствие небольшого объема симулированных данных, можно видеть качественное согласие восстановленной зависимости с данными, полученными из модели.

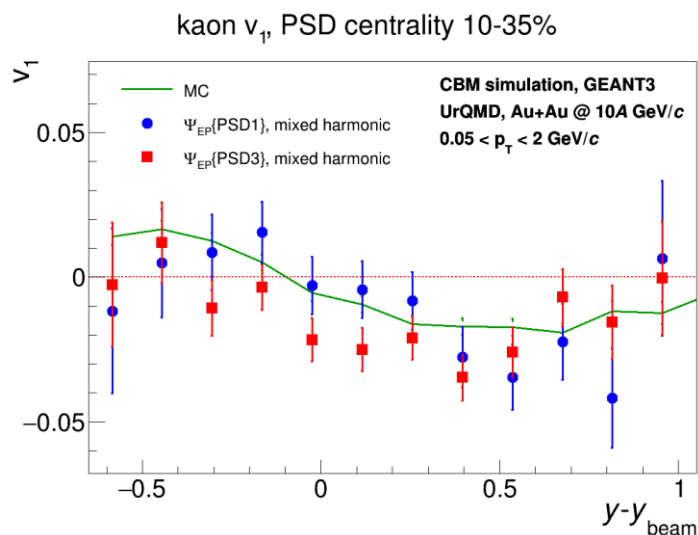


Рис. 12.51 – Зависимость направленного потока положительно заряженных каонов от быстроты для среднецентральных столкновений в сравнении с модельными значениями

Планы группы МИФИ на 2020 год можно сформулировать следующим образом:

1. Исследование возможности измерения анизотропных потоков заряженных адронов с использованием моделей с реалистичным выходом фрагментов сталкивающихся ядер, таких как DCM-QGSM-SMM.
2. Исследование возможности измерения поперечных потоков адронов со странностью.
3. Сравнительный анализ различных гармоник потоков  $v_n$  на основе Монте-Карло моделирования с использованием современных генераторов событий и различных методов для измерения  $v_n$ .
4. Исследование возможности расширения акцептанса эксперимента CBM для регистрации фрагментов налетающего ядра, вылетающих под углами близкими к направлению пучка.
5. Оптимизация скорости Монте-Карло моделирования отклика адронного калориметра PSD (быстрый симулятор) и необходимого размера для хранения библиотеки данных Монте-Карло.
6. Определение центральности с помощью модели Монте-Карло Глаубер на основе измерения множественности рожденных частиц.
7. Разработка методики определения центральности с использованием энергии спектров, измеренной передним калориметром PSD.

## 12.7 НИИЯФ МГУ - Разработка кремниевой трековой системы эксперимента СВМ

### 12.7.1 Цель работы

Основные задачи работы: разработка общей конфигурации системы STS, отладка технологии и методики сборки модулей кремниевой трековой системы, разработка систем охлаждения и контроля состояния системы STS, изготовление пилотных модулей STS, разработка методики сборки леддеров, контроль качества кремниевых детекторов.

### 12.7.2 Рабочий комплекс

Работы проводились на базе комплекса чистых комнат, специально созданных в ОИЯИ для постройки трековой системы эксперимента СВМ. Комплекс включает: две чистые комнаты класса 1000 – 10000, оснащенные всем необходимым оборудованием для сборки модулей, в частности: автоматические машины монтажа и присоединения выводов, машина прецизионной установки бескорпусных интегральных микросхем, оборудование визуального контроля, оборудования электрического контроля качества выводов, оборудование для контроля функционирования модуля и отдельных бескорпусных микросхем, шкафы сухого хранения, оборудование для вакуумной упаковки и др.

### 12.7.3 Контроль геометрии

Контроль геометрии собранных модулей проводился в чистой комнате НИИЯФ МГУ на базе оптической координатно-измерительной машины. В 2019 году разработана общая концепция трековой системы и проведена детализация большинства элементов конструкции. Общая схема устройства приведена на Рис. 12.52.

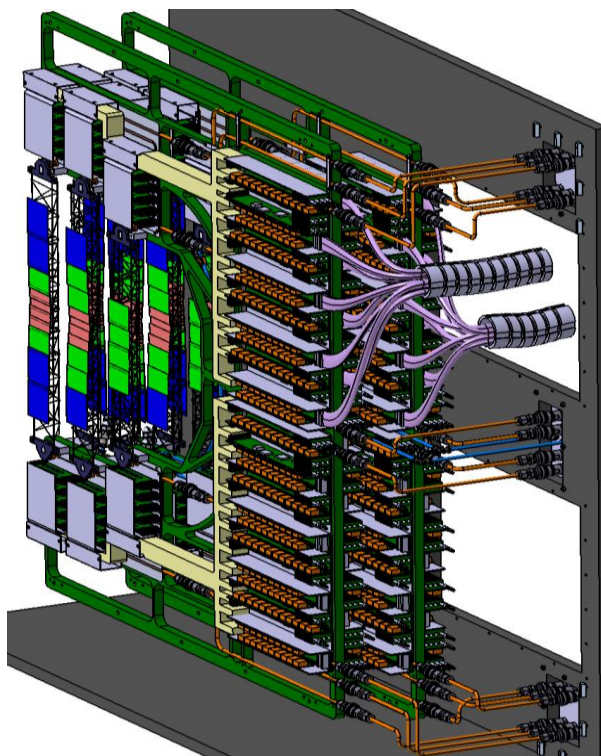


Рис. 12.52 – Общий вид конструкции кремниевой трековой системы

При детализации конструкции учтены все элементы кабельной системы, такие как кабели низковольтного питания, система распределения питания модулей, позволяющая проводить, в случае необходимости, отключение каждого модуля системы, без ущерба работоспособности всем остальным модулям. Это позволяет обеспечить минимальную потерю данных в случае выхода из строя отдельных элементов системы. Определен тип кабелей управления состоянием модуля и считывания данных. Как показали проведенные исследования, минимальные искажения в передаче сигналов, особенно в части передачи синхронизирующего тактового сигнала (частота 80/160 МГц) обеспечивает биаксиальный кабель, представляющий собой экранированную дифференциальную скрученную пару.

Разработанная механическая конструкция обеспечивает не только разводку кабелей, но и систему охлаждения и циркуляцию холодного сухого азота для обеспечения отсутствия конденсата и равномерного охлаждения детекторов в системе.

Был разработан корпус системы STS для фазы 0. Корпус STS в каркасном исполнении (Рис. 12.53) собирается из элементов углепластикового профиля 20x20мм. (толщина стенки 1,4мм, Рис. 12.54), алюминиевых соединителей (Рис. 12.55) и сэндвич-панелей, путем склеивания на специально изготовленной оснастке.

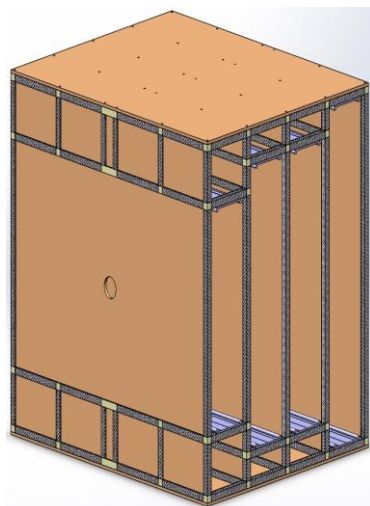


Рис. 12.53 – Корпус BM@N STS в каркасном исполнении

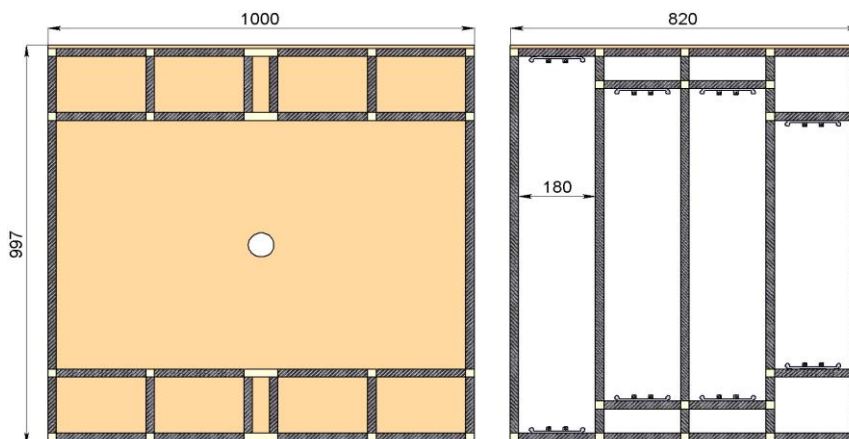


Рис. 12.54 – Габаритные размеры, без учета закрывающих боковых съемных панелей



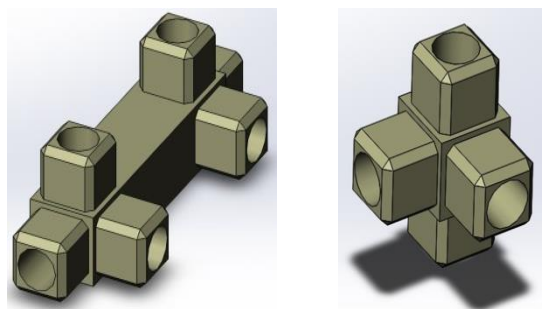


Рис. 12.55 – Алюминиевые соединители

Сэндвич-панели сверху, справа и слева съемные для возможности быстрого доступа к аппаратуре с целью обслуживания. Части станций STS заходят внутрь корпуса с боков по алюминиевым рельсам (Рис. 12.56), которые крепятся непосредственно к углепластиковому профилю каркаса. Также внутри конструкции предусмотрены упоры для последующего точного позиционирования Carbon C-frame.

Алюминиевые соединители имеют сквозные отверстия, что позволяет в связке с углепластиковым профилем прокладывать сквозь них трубки для подачи сухого азота внутрь каркаса.

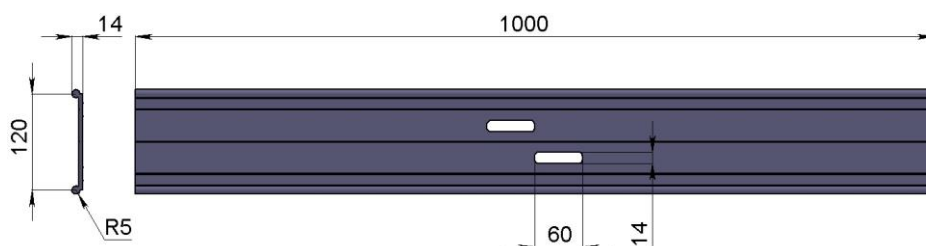


Рис. 12.56 – Алюминиевый рельс

Алюминиевые рельсы для C-frame имеют два выреза, сквозь которые свободно проходят упоры, расположенные в каркасе корпуса. В упорах крепятся рубиновые щупы (Рис. 12.57), что позволяет обеспечить высокоточное позиционирование Carbon C-frame, расчетная точность позиционирования не хуже 25 мкм.

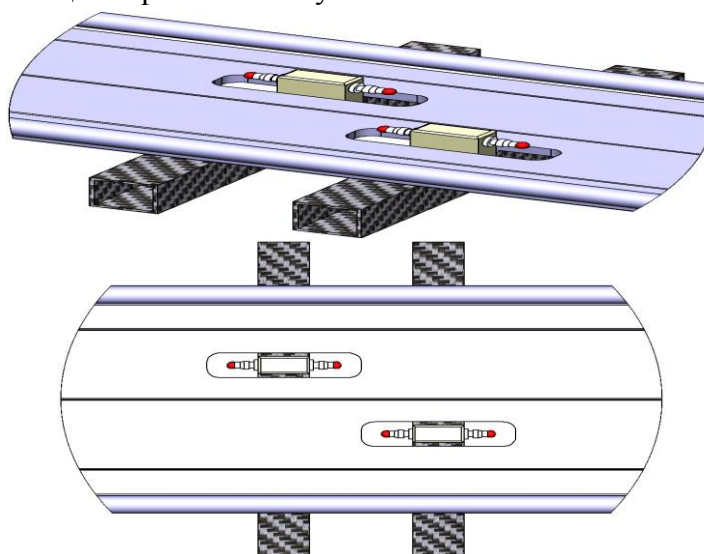


Рис. 12.57 – Система рубиновых шариков, обеспечивающая требуемую точность позиционирования

#### 12.7.4 Концепции системы контроля

В 2019 году были разработаны основные положения концепции системы контроля трекового детектора STS DCS.

1. STS DCS реализуется в едином проекте управления и контроля субдетектора с разветвлениями на отдельные локальные проекты по каждой внутренней подсистеме.
2. Все подсистемы и узлы подчиняются единой однородной схеме наименования и идентификации.
3. Управление внутренними подсистемами проводится командами с центрального проекта субдетектора.
4. Состояние каждой внутренней подсистемы описывается узлами машины конечных состояний.
5. Состояние каждого мониторируемого датчика любой внутренней подсистемы сохраняется и архивируется в базе данных.
6. Предусматривается возможность просмотра тренда любого сенсора? Модуля, супермодуля, леддера, плоскости.
7. Наборы (receives) высоковольтного и низковольтного напряжений, различных параметров управления субдетектора хранятся в конфигурационной базе данных с возможностью автоматического их применения.
8. Предусматривается локальный и удаленный доступ к системе управления субдетектором с необходимой авторизацией входа в систему.
9. Система создания и обработки аварийных сообщений должна обеспечивать безопасность работы и применяться единообразно ко всем внутренним подсистемам.

В 2019 году проведены следующие работы в рамках концепции:

1. Выбор SCADA для системы управления.
2. Определение состава вычислительной техники и телекоммуникационного оборудования.
3. Описание узлов, состояний и команд конечного автомата.
4. Определение уровней и организации управления доступом.
5. Выбор системы хранения данных (типы используемых баз).
6. Реализация системы аварийных сообщений:
  - уровни аварийных запросов
  - стандарт аварийных сообщений
  - обработка аварийных запросов
7. Создание тестовых стендов для отладки основных узлов DCS STS.
8. Связь с центральным узлом управления экспериментом.

12.8 Статистическая информация по российским специалистам, участвующим в эксперименте СВМ в 2019 г. и запрос на 2020 г.

1. Число специалистов, участвовавших в работе центра: в ЗНЦ – 17, всего 61.
2. Молодых специалистов - 17, студентов - 7.
4. Число защищенных диссертаций – 0.
5. Докладов от имени коллаборации, сделанных российскими учеными - 8.
6. Работ, опубликованных в 2019 г. и индексированных WoS - 7.

7. На 17 декабря 2019 года на эксперименты, проводимые по созданию детектора CBM, было израсходовано 47 тыс. долларов США. Остаток средств в размере 20 тыс. долларов США планируется использовать в начале 2020 года. Эти деньги были специально забронированы для подготовки сеанса в марте.

В связи с увеличением фронта работ в 2020 году по созданию установки CBM просим выделить на эти работы 72 тыс. долларов США.

Список публикаций сотрудничества CBM с участием российских ученых.

1. N. Karpushkin et al. "The Projectile Spectator Detector for measuring the geometry of heavy ion collisions at the CBM experiment on FAIR", Nucl.Instrum.Meth. A936 (2019) 156; doi:10.1016/j.nima.2018.10.054
2. R. Sultanov et al. "A timing RPC with low resistive ceramic electrodes", Journal of Instrumentation 14 (2019) C09007; doi:10.1088/1748-0221/14/09/C09007
3. N. Karpushkin et al. "Application of the Prony least squares method for fitting signal waveforms measured by sampling ADC", AIP Conf.Proc. 2163 (2019) 030006; doi:10.1063/1.5130092
4. Guber, F at al. "New forward hadron calorimeter for centrality and reaction plane determination at BM@N heavy ion experiments", EPJ Web Conf. 204 (2019) 07007; doi:10.1051/epjconf/201920407007
5. V. Mikhaylov at al. "The very forward hadron calorimeter PSD for the future CBM@FAIR experiment" EPJ Web Conf. 204 (2019) 11004; doi:10.1051/epjconf/201920411004
6. J. Adamczewski-Munsch et al. "Event reconstruction of free-streaming data for the RICH detector in the CBM experiment", EPJ Web Conf. 214 (2019) 01043; doi:10.1051/epjconf/201921401043
7. D. Blau et. al "CBM performance for flow measurements of charged and strange hadrons", CBM Progress Report 2018, p. 172, GSI-2019-01018, Darmstadt 2019; doi:10.15120/GSI-2019-01018
8. O.Golosov, V.Klochkov, E.Kashirin, I.Selyuzhenkov for CBM Collaboration "Physics performance studies for anisotropic flow measurements with the CBM experiment at FAIR" Submitted to **Particles & Nuclei**
9. V. Friese and I. Selyuzhenkov (editors) "CBM Progress Report 2018" GSI-2019-01018, Darmstadt 2019, doi:10.15120/GSI-2019-01018

Список выступлений группы на международных совещаниях и конференциях по тематике CBM в 2019 г.

1. VCI2019 - The 15th Vienna Conference on Instrumentation 18-22 February 2019, Vienna University of Technology, Vienna, Austria. Fedor Guber (poster), INR RAS, Moscow, "Transverse and longitudinal segmented forward hadron calorimeters with SiPMs light readout for future fixed target heavy ion experiment"
2. The XXIII International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2019) 15 - 19 April, JINR, Dubna, Russia, N.Karpushkin (oral), F.Guber, A.Ivashkin,

- “Application of the Prony least squares method for fitting signal waveforms measured by sampling ADC”
3. FAIRness 2019, FAIR next generation scientists - 6th Edition Workshop, 20-24 May, Arenzano, Genova, Italy, N.Karpushkin (oral), D.Finogeev, M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, A.Izvestnyy, S.Morozov. “Study of the PSD CBM response on hadron beams”
  4. Quark Matter 2019 - the XXVIIIth International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, 3-9 November 2019 Wuhan, China, “Energy calibration and signal waveform analysis of the CBM Projectile Spectator Detector”, N.Karpushkin et al. (7 authors) (poster), NICA days 2019, CZiITT, Warsaw, Poland, 21-25 October 2019
  5. The International Workshop on Radiation Imaging Detectors, July 7-12, 2019 in Kolympari, Chania, Crete, Greece, “Characterization of SiPM radiation hardness for application in hadron calorimeters at FAIR, CERN and NICA”, V. Mikhaylov et al. Submitted to JINST.
  6. XIV Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy, 3-7 June 2019, O.Golosov, V.Klochkov, E.Kashirin, I.Selyuzhenkov “Physics performance studies for anisotropic flow measurements with the CBM experiment at FAIR”
  7. Quark Matter 2019, 4-9 November 2019, O.Golosov, V.Klochkov, E.Kashirin, I.Selyuzhenkov “Physics performance studies for anisotropic flow measurements with the CBM experiment at FAIR”
  8. Strangeness in Quark Matter 2019, 9-15 June 2019, I.Selyuzhenkov “Status of the CBM experiment at FAIR”

#### Список докладов на совещаниях CBM

1. CBM Collaboration Meeting at Darmstadt, 1-5 April 2019
  - a. O. Golosov “Status of the common Monte-Carlo production”
  - b. E. Kashirin “Update on the PSD fast simulation and performance comparison with full GEANT simulations”
  - c. I. Selyuzhenkov “Common Monte-Carlo production”
2. CBM Collaboration Meeting at Kolkata, 29 September - 3 October 2019
  - d. O. Golosov “Physics performance studies for anisotropic flow measurements with the CBM”
  - e. I. Selyuzhenkov “PWG-C2F and PWG-COM status”

В данном разделе представлен отчет о научно-исследовательской работе, выполненной в рамках проекта NuSTAR Российско-Германского сотрудничества по исследованию фундаментальных свойств материи. Координатор работ – доктор физ.-мат. наук, член-корр. РАН, заместитель директора НИЦ «Курчатовский институт» Коршенинников А.А.

В 2019 году в рамках проекта NuSTAR работы проводились по шести темам:

- 1) Исследования экзотических ядер на установке R3B с использованием нейтронного время-пролетного спектрометра NeuLAND;  
координатор работы Кузнецов В.А., НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ.
- 2) Система распределения высоковольтного питания для нового широкоапертурного нейтронного детектора NeuLAND;  
координатор работы Головцов В.Л., НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ.
- 3) Создание протонного спектрометра на базе работающих в вакууме дрейфовых трубок;  
координатор работы Крившич А.Г., НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ.
- 4) Измерения в инверсной кинематике сечений упругого рассеяния протонов и неупругого рассеяния альфа-частиц на экзотических ядрах с помощью активных мишеней АСТАФ;  
координатор работы Маев Е.М., НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ.
- 5) Реакции с релятивистских пучками радиоактивных ядер;  
координатор работы Чулков Л.В., НИЦ «Курчатовский институт».
- 6) Измерения масс ионными ловушками Пеннинга следующего поколения;  
координатор работы Новиков Ю.Н., НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ.

Отчеты по каждой из шести работ представлены ниже.

Сводная статистика за 2019 год по всем шести работам:

- 1) Число специалистов, участвовавших в проекте в 2019 году, – 35 (25 - основных с выездом в Дармштадт и 10 соисполнителей).
- 2) Число молодых специалистов (моложе 35 лет), привлечённых к работам, – 6.
- 3) Число студентов, участвовавших в экспериментах – 1.
- 4) Защиты диссертаций в 2019 г. Защит не было.
- 5) Число докладов, сделанных от имени коллаборации на международных конференциях – 1.
- 6) Число совместных публикаций в реферируемых журналах – 3.
- 7) Финансирование, выделенное на 2019 год по линии Минобрнауки, – 55 700 USD, потрачено около 34 000 USD, оставшиеся средства будут потрачены в начале 2020 г.

Запрашиваемая сумма на 2020 год составляет 64 800 USD (обоснования приведены ниже после отчета по каждой теме).

### 13.1 Отчет о работе по проекту NuSTAR/R3B/NeuLAND

Представлен отчет о научно-исследовательской работе, выполненной в рамках проекта NuSTAR/R3B/NeuLAND Российско-Германского сотрудничества по исследованию фундаментальных свойств материи по теме «Исследования экзотических ядер на установке R3B с использованием нейтронного время-пролетного спектрометра NeuLAND», краткое наименование: NeuLAND.

Координатор работы – ведущий научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, канд. физ.-мат. наук Кузнецов Вячеслав Александрович.

#### 13.1.1 Введение

Ускорительный комплекс FAIR в GSI будет производить вторичные пучки радиоактивных ядер с энергией до 1,5 ГэВ/нуклон и интенсивностью на пять порядков превосходящей интенсивность ныне существующих пучков в GSI. Это открывает уникальные возможности в исследовании ядер далеких от полосы стабильности и наиболее короткоживущих экзотических ядер. Как известно, изучение экзотических ядер в настоящее время – одно из основных направлений исследований в физике атомного ядра. Одним из проектов по изучению таких ядер является эксперимент R3B коллаборации NuSTAR.

Для детального исследования этих реакций требуется детектор, который обеспечивает регистрацию всех конечных продуктов с кинематически-переопределенной информацией об их параметрах. Поскольку в изучаемых реакциях в конечном состоянии будут, как правило, один или несколько нейтронов, то требуется инструмент для их детектирования.

Одним из ключевых элементов установки R3B (Рис. 13.1) будет широкоапертурный времяпролетный спектрометр нейтронов NeuLAND. Спектрометр будет располагаться на расстоянии 10–30 м (в зависимости от требований конкретного эксперимента) от мишени. Он будет обеспечивать детектирование и идентификацию нейтронов с высокой (до 90%) эффективностью, множественностью до 6–10 нейтронов в одном событии, и с высоким энергетическим и угловым разрешением.

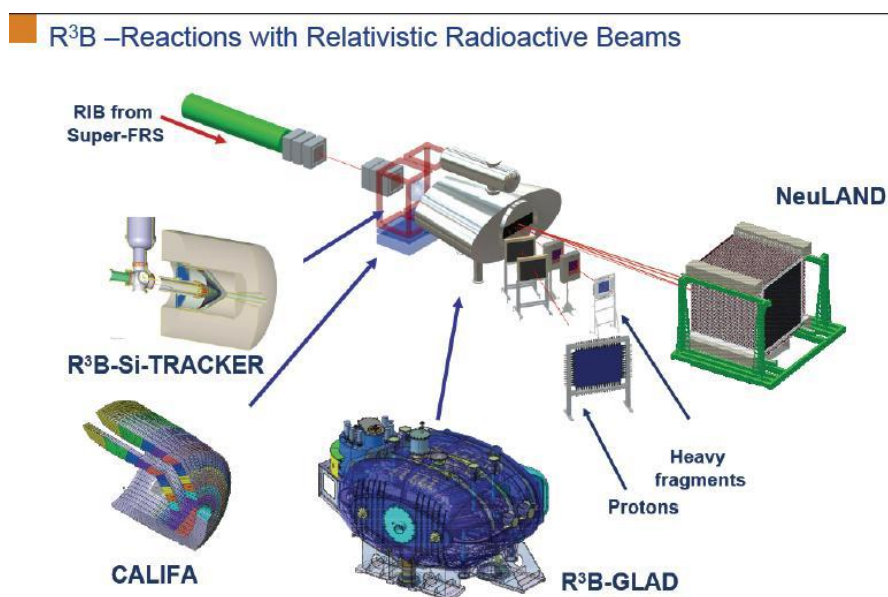


Рис. 13.1 – Общая схема установки R3B

### 13.1.2 Спектрометр NeuLAND

Спектрометр NeuLAND состоит из 3000 отдельных счетчиков размером 5 x 5 x 250 см<sup>3</sup>, объединенных в 30 двоянных плоскостей по 100 счетчиков в каждой. NeuLAND будет состоять из двух частей по 1500 счетчиков, просматриваемых с двух сторон фотоумножителями. Обе части могут устанавливаться либо вместе, образуя общий активный объем с входным размером 250 x 250 см<sup>2</sup> и глубиной 3 м, либо по отдельности на различных расстояниях от мишени для выполнения специфических условий программы эксперимента (Рис. 13.2). Первая часть должна быть введена в действие в 2020 году, вторая часть – на несколько лет позже.

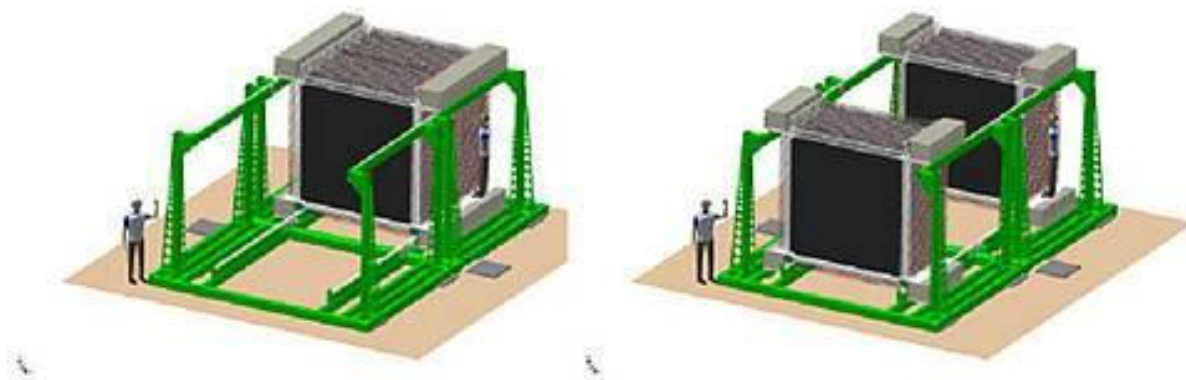


Рис. 13.2 – Схематический вид спектрометра NeuLAND

TDR проекта NeuLAND был утвержден в январе 2013 г. В нем предполагается активное участие ПИЯФ – НИЦ КИ в разработке и создании этого детектора. В 2013–2016 гг. группа ПИЯФ – НИЦ КИ предложила во второй части детектора NeuLAND использовать новые быстрые фотоумножители ФЭУ-115 МКЦ производства ООО «МЭЛЗ» и провела соответствующие испытания. Было показано, что эти фотоумножители не уступают по своим характеристикам японским R8619 производства Hamamatsu Photonics Ltd., но существенно дешевле. К сожалению, работа по второй части спектрометра приостановлена. Тем не менее, сотрудники ПИЯФ – НИЦ КИ продолжают принимать активное участие в создании первой части спектрометра и соответствующего программного обеспечения.

В настоящее время полностью подготовлены (собраны, оснащены электроникой, протестированы и калиброваны) 8 (из 15) плоскостей спектрометра. Их предполагается установить в экспериментальном зале R3В в первой половине 2020 года. Остальные 7 плоскостей находятся в стадии монтажа, тестирования, проверки электроники и т.д.

Одним из необходимых условий для успешного использования спектрометра в реальном эксперименте является наличие программного обеспечения, которое позволяет преобразовывать считываемую DAQ информацию (номера счетчиков, коды QDC и TDC и т.п.) в реальную физическую информацию: количество и угловые характеристики зарегистрированных частиц, их идентификация, выделенная энергия, время пролета ...

На данный момент используется упрощенная версия программы, основанная на простом суммировании кодов QDC со сработавших счетчиков и последующим пересчетом в энергоделение в детекторе на базе калибровки каждого счетчика. Последняя делается с использованием космического излучения.

Реальное программное обеспечение требует более сложных алгоритмов с учетом большого числа сработавших счетчиков: определение бариоцентров попаданий частиц, коррекция энерговыделения на пороги дискриминаторов, коррекция на времяпролетное время нейтронов и точки их взаимодействия внутри активных объемом счетчиков, определение времени пролета и многое другое.

Эта задача требует:

- прецизионной калибровки счетчиков;
- детального моделирования отклика детектора.

### 13.1.3 Работа по программе NeuLAND, выполненная в 2019 году

#### 13.1.3.1 Моделирование отклика детектора на нейтроны

В 2018–2019 годах проводилось моделирование отклика спектрометра на нейтроны с энергиями 200, 600, и 1000 МэВ. Работа в основном велась с использованием имеющегося программного обеспечения R3BROOT на компьютерах R3B@GSI в режиме удаленного доступа.

Имеются две версии R3BROOT. Одна написана на языке FORTRAN с пакетом GEANT3, а другая на C++ с пакетом GEANT4. Задачей данной работы была проверка и сравнение обеих версий и подготовка к разработке реалистичного программного обеспечения, которое могло бы быть использовано в условиях реального эксперимента.

Моделирование проводилось с использованием встроенных в пакеты Geant\_3 и Geant\_4 интерфейсов, описывающих взаимодействие нейтронов с веществом, и с порогами дискриминаторов на каждом канале фотоумножителей 1 и 3 МэВ. Эффект Биркса пока не учитывался. Некоторые результаты приводятся ниже. На Рис. 13.3 показано полное энерговыделение в первой части спектрометра, сгенерированное нейтронами с кинетическими энергиями 200, 600, и 1000 МэВ. Общее число сработавших счетчиков показано на Рис. 13.4. Как видно на Рис. 13.3 и Рис. 13.4, результаты, полученные с Geant\_3 и Geant\_4, различаются. В случае Geant\_4 есть события, в которых полученное энерговыделение превышает энергию налетающего нейтрона (Рис. 13.3). В этих же событиях количество сработавших счетчиков значительно больше. Можно предположить, что это связано с неправильным учетом вторичных частиц. Конкретное заключение требует дальнейшей работы, и, в частности, модификации исходных кодов программ.

Вместе с тем, очевидно, что предполагавшийся метод определения энергии нейтронов по энерговыделению в спектрометре, может не работать. По всей видимости, основным методом определения энергии нейтронов будет использование информации по их времени пролета. Это требует доработки программ, точной временной калибровки счетчиков и их привязки по времени друг относительно друга.

Сотрудники ПИЯФ – НИЦ КИ начали работу по ревизии и доработке программного обеспечения, в частности, по сравнению результатов моделирования с экспериментальными данными.



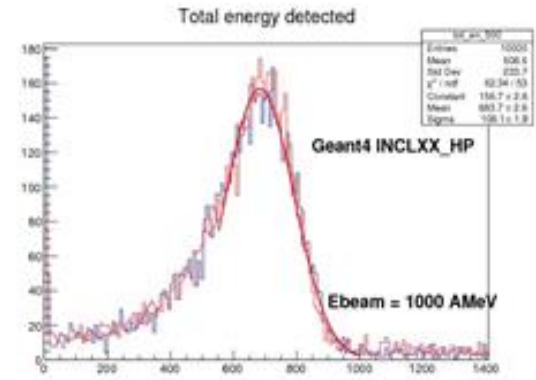
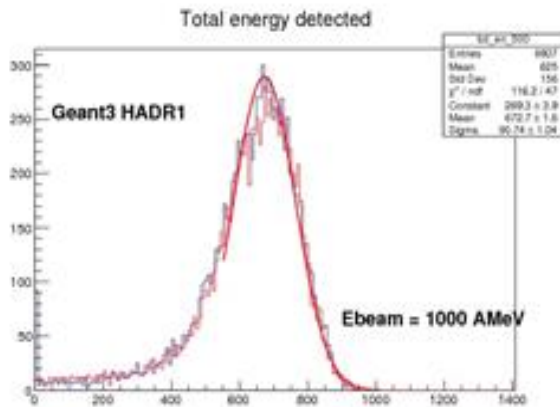
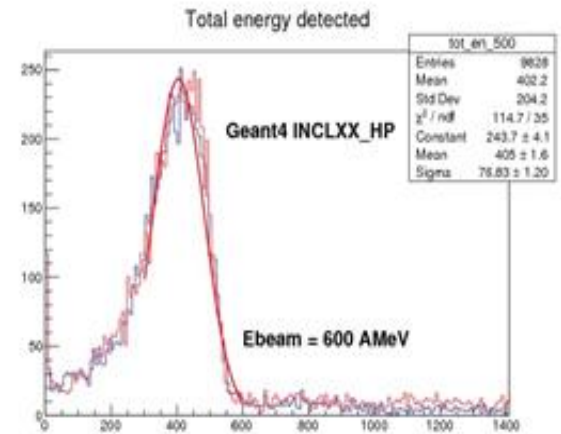
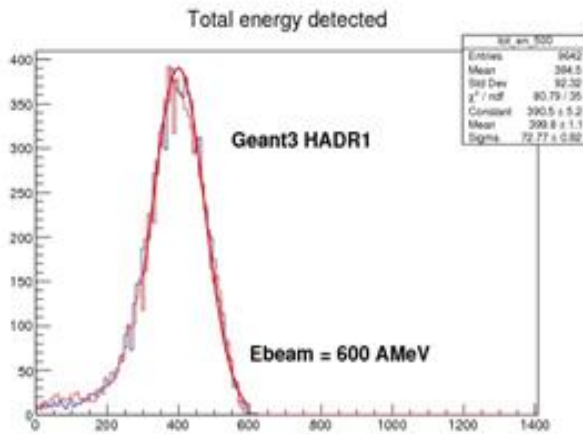
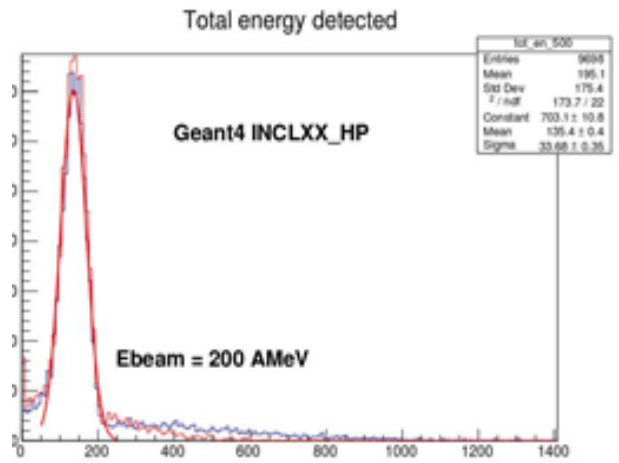
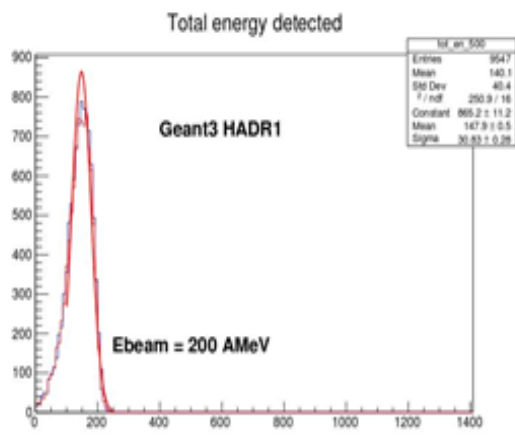


Рис. 13.3 – Полное энерговыделение в первой части NeuLand для нейтронов с энергиями 200, 600, и 1000 МэВ, рассчитанное с помощью программ GEANT3 и GEANT4

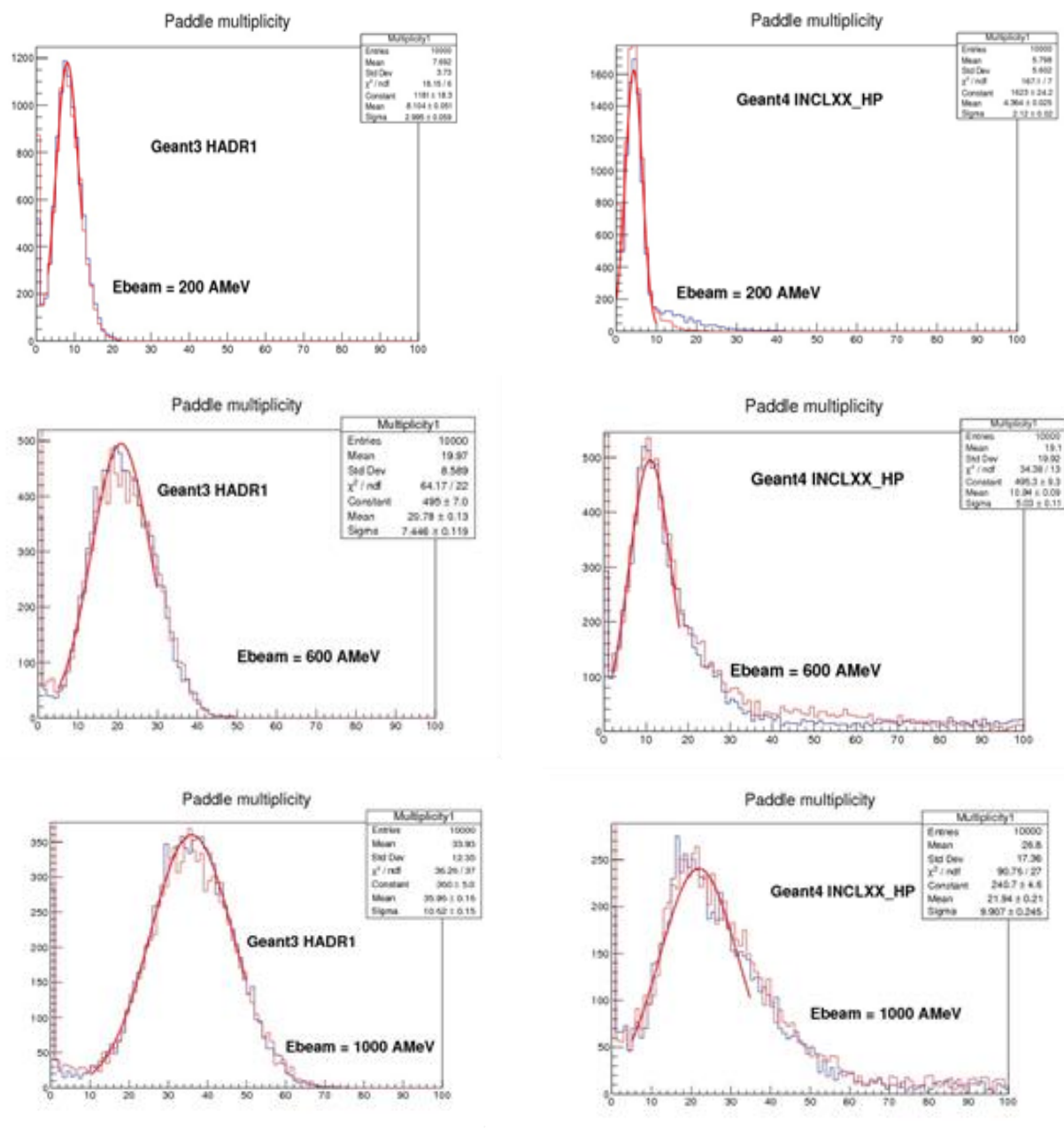


Рис. 13.4 – Общее количество счетчиков, сработавших при детектировании одного нейтрона, рассчитанное с помощью программ GEANT3 и GEANT4

### 13.1.3.2 Разработка системы калибровки NeuLand

Одним из ключевых аспектов в работе NeuLAND является система его калибровки. На данный момент для этого используется космическое излучение. Это не обеспечивает необходимой точности энергетической калибровки и не позволяет осуществить временную калибровку.

Немецкой стороной для точной калибровки и стабилизации спектрометра предложено использовать UV светодиоды, установленные на каждом из счетчиков. UV излучение светодиодами генерирует сцинтилляцию внутри активного объема счетчиков. Однако первые испытания показали высокую температурную нестабильность этих светодиодов.

Группой ПИЯФ – НИЦ КИ предложено использовать UV лазер. В этом случае ожидается более высокая стабильность. В ноябре 2019 г. в ПИЯФ – НИЦ КИ был собран тестовый стенд, состоящий из UV лазера PicoQuant PDL 800-B с лазерным излучателем

LDH-P-C-375B и сцинтилляционного счетчика (Рис. 13.5). Счетчик изготовлен из пластического сцинтиллятора BC-408, просматриваемого двумя фотоумножителями Hamamatsu Photonics R8619 (также как и в реальных счетчиках NeuLand). Сигналы считываются в on-line режиме с использованием имеющейся DAQ. Главной целью является определение возможности использования лазера для стабилизации и независимой калибровки счетчиков с использованием оптоволоконных волокон, а также его использования в качестве реперного источника UV излучения для коррекции нестабильности светодиодов. Тестовые измерения стабильности начнутся в декабре 2019.



Рис. 13.5 – Фото стенда в ПИЯФ – НИЦ КИ для разработки и тестирования системы калибровки с использованием UV лазера

### 13.1.3.3 Сборка детектора и тестирование фотоумножителей

Сотрудники ПИЯФ – НИЦ КИ приняли участие в сборке и наладке модулей детектора и тестировании фотоумножителей. Поскольку в NeuLAND будут работать 6000 фотоумножителей, важным вопросом является проверка каждого из них до сборки, отбор пар фотоумножителей для каждого счетчика и определение рабочих напряжений высоковольтного питания.

### 13.1.4 Заключение

Основные результаты в 2019 г. по проекту NeuLAND:

- Выполнено моделирование отклика спектрометра NeuLAND на нейтроны с энергиями 200, 600, и 1000 МэВ. Полученные результаты указывают на необходимость серьезной ревизии имеющегося программного обеспечения и его дальнейшего развития;
- Проведены работы по монтажу модулей спектрометра NeuLAND и тестированию сцинтилляционных полос и фотоумножителей;
- Начата разработка процедуры калибровки спектрометра с использованием UV светодиодов и UV лазера.

### 13.1.5 ПРИЛОЖЕНИЕ А

- 1) Число специалистов, участвовавших в проекте в 2019 году, - 5.
- 2) Визиты специалистов ПИЯФ в Германию (GSI) по теме NuSTAR/NeuLAND – визит Кузнецова В.А. для участия в монтаже детектора NeuLAND и обсуждения и согласования работ по программному обеспечению.
- 3) Число молодых специалистов (моложе 35 лет), привлечённых к работам - 3.
- 4) Число студентов, участвовавших в экспериментах - нет.
- 5) Защит диссертаций в 2019 г. не было.
- 6) Доклады сотрудниками ПИЯФ НИЦ КИ по теме NeuLAND на международных конференциях – нет.
- 7) Публикации в реферируемых журналах – нет. (Препринт ПИЯФ – НИЦ КИ, D. Kresan, N. Kozlenko, V. Kuznetsov “Simulation of the NeuLand response for neutrons: Phase 1” готовится к публикации).
- 8) Финансирование российскими организациями – частично работа финансировалась ПИЯФ НИЦ КИ.
- 9) Финансирование в 2019 г. по линии МинОбрНауки – \$4000.
- 10) Количество командировочных дней по теме проекта – 15

### 13.1.6 План работ на 2019 г.

- Участие в монтаже и тестировании сцинтилляционных модулей и ФЭУ детектора NeuLAND в GSI.
- Участие в работах по созданию программного обеспечения и системы калибровки спектрометра.

Запрашиваемая КВОТА на 2020 г. по проекту NeuLAND составляет 12 000 USD. Она будет израсходована на поездки в GSI основных исполнителей: К. Ившина, В.А. Кузнецова, Н.Г. Козленко, В. Ларионова и И. Цукарова с общим количеством человеко-дней в Германии около 90.

## 13.2 Отчет о работе по проекту HVDS /R3B/NuSTAR

Представлен отчет о научно-исследовательской работе, выполненной в рамках проекта Российско-Германского сотрудничества по исследованию фундаментальных свойств материи по теме «СИСТЕМА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПИТАНИЯ ДЛЯ НОВОГО ШИРОКОАПЕРТУРНОГО НЕЙТРОННОГО ДЕТЕКТОРА NeuLAND» (The High Voltage Distribution System for the Large Area Neutron Detector NeuLAND), краткое наименование HVDS. Координатор работы: зав. отделом радиоэлектроники НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, кандидат физ.-мат. наук Головцов Виктор Леонтьевич.

### 13.2.1 Введение

Многоканальная система HVDS предлагает рентабельное и надежное распределение высоковольтного питания от первичного высоковольтного источника на 6000 каналов, питающих все фотоэлектронные умножители (ФЭУ) детектора NeuLAND. Каждый канал обеспечивает регулирование пониженного выходного напряжения в пределах до 1500 В, а также мониторинг фактического напряжения на нагрузке и тока, потребляемого нагрузкой.

Научно-исследовательская работа по созданию HVDS проводится в рамках

Соглашения о сотрудничестве между FAIR GmbH и НИЦ «Курчатовский институт» –

ПИЯФ, которое подробно описывает содержание, этапы поставок, наименования и количество поставляемых ПИЯФ компонентов для HVDS как части детектора NeuLAND, и включает описания, как они определены в рабочем пакете PSP 1.2.5.1.2.5 для экспериментальной установки R3B NuSTAR.

### 13.2.2 Детектор NeuLAND

NeuLAND является нейтронным детектором нового поколения, отвечающим всем требованиям амбициозной физической программы, предложенной для установки R3B. NeuLAND показывает высокую эффективность регистрации нейтронов, высокое разрешение, в том числе для множественных срабатываний. Это достигается за счет применения высокогранулированных пластмассовых сцинтилляторов и отсутствия нечувствительного материала конвертера. Детектор состоит из 3000 отдельных модулей размером  $5 \times 5 \times 250$  см<sup>3</sup>, объединенных в 30 сдвоенных плоскостей по 100 модулей каждая. Детектор обеспечивает активную фронтальную площадь  $250 \times 250$  см<sup>2</sup> и полную глубину 3 мм.

### 13.2.3 Работа по программе HVDS, выполненная в 2019 г.

Проект системы HVDS, состоящей из двух подсистем HVDS3200, разработан таким образом, что одна подсистема HVDS3200 на 3200 каналов обеспечивает питанием половину детектора NeuLAND установки R3B. Это дает возможность разнести на значительное расстояние две половины детектора NeuLAND, как это и планируется делать при определенных конфигурациях установки R3B.

Принцип работы HVDS3200 заключается в регулируемом понижении входного напряжения от первичного источника высоковольтного питания (Primary HV PS) для каждого ФЭУ. Каждый регулятор напряжения расположен на отдельной дочерней плате. 50 регуляторов напряжения размещены на распределительной плате DB50 (Рис. 13.6),.

Таким образом, четыре модуля DB50 обслуживают одну сдвоенную плоскость детектора NeuLAND.



Рис. 13.6 – Модуль DB50 высоковольтной системы HVDS на 50 каналов

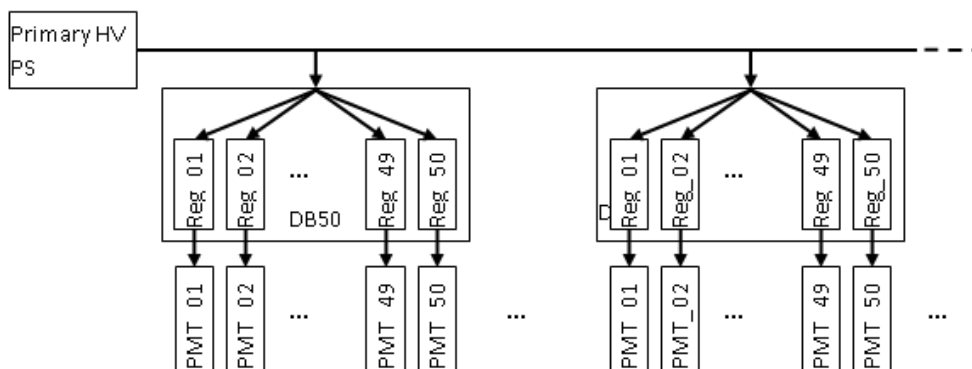


Рис. 13.7 – Структурная схема системы HVDS

Система HVDS3200 работает под управлением компьютера. Главный компьютер использует Ethernet для соединения с системной платой управления HVCB (Рис. 13.8). Системная плата HVCB подключена к магистрали контроля и мониторинга (СМВ). Всего могут быть подключены 4 магистрали СМВ.

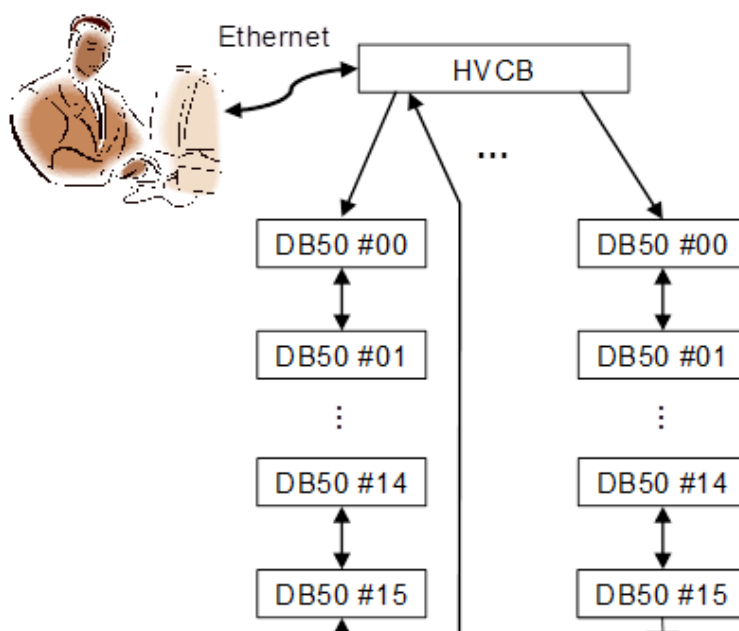


Рис. 13.8 – Управление и мониторинг системы HV3200

Вплоть до 16 модулей DB50 (или 800 PMTs) могут быть подсоединены к каждой магистрали СМВ, тогда как вплоть до 64 модулей DB50 или 3200 ФЭУ управляются одним модулем HVCB. Одна система питания HV3200 обеспечивает высоковольтным напряжением половину детектора NeuLAND (и 200 каналов остаются резервными).

В июне 2014 г. было заключено Соглашение о сотрудничестве между ПИЯФ – НИЦ КИ и FAIR GmbH по изготовлению и поставке системы распределения высоковольтного питания для детектора NeuLAND и разработке прикладного программного обеспечения EPICS IOC. Были разработаны и согласованы план и технические требования. Согласно

Соглашению, изготовление и поставку HVDS предполагалось осуществить в четыре этапа в течение 2014–2017 гг. Этап 2014 года завершился поставкой изготовленной предсерии HVDS на 200 каналов, состоящей из 4 модулей DB50 и 1 модуля HVCB. Приемочные испытания предсерии в GSI заняли гораздо больше времени, чем планировалось. Стрессовые испытания проводились, в том числе, и на значениях выходного напряжения, превышающих предельно допустимые значения понижения входного напряжения, чем те, что указаны в спецификации. Это привело к выходу из строя нескольких каналов.

Восстановление функциональности предсерии было проведено в июле 2015 г. Кроме того, было доработано программное обеспечение с целью предотвращения возможности выхода за пределы спецификации при работе оператора с HVDS.

В марте 2016 года была отправлена заказчику подсистема на 1000 каналов в составе 20 модулей DB50 и одного модуля HVCB. Оплата за поставку электроники была осуществлена только в сентябре 2016 года, что привело к задержке в начале изготовления следующей партии подсистемы HVDS на 2 000 каналов.

Согласно скорректированному графику поставок, в ноябре 2017 года было закончено изготовление подсистемы HVDS на 2000 каналов в составе 40 модулей DB50. Вся изготовленная электроника успешно прошла испытания и была подготовлена к отправке заказчику. Однако возникли формальные сложности с отправкой в связи с подготовкой необходимых документов для пересечения таможни. Электроника подсистемы 2000 каналов была отправлена в ГСИ в декабре 2017 г., а сдаточные испытания проведены в ГСИ в феврале 2018 г. В течение 2018 года производилась закупка компонентов и выпуск первой партии 3000-канальной подсистемы HVDS в составе 40 модулей. В течение 2019 года произведен выпуск второй (последней) партии модулей 3000-канальной подсистемы в составе 20 модулей, тестовые испытания и опривка всех 60 модулей 3000-канальной подсистемы в ноябре 2019 года.

#### 13.2.4 ПРИЛОЖЕНИЕ А

- 1) Число специалистов, участвовавших в проекте в 2019 году, – 14 (7 основных и 7 соисполнителей).
- 2) Число молодых специалистов (моложе 35 лет), привлечённых к работам - нет.
- 3) Число студентов, участвовавших в экспериментах - нет.
- 4) Защиты диссертаций в 2019 г. Защит по тематике HVDS не было.
- 5) Число докладов от имени коллаборации на международных конференциях – нет.
- 6) Число совместных публикаций в реферируемых журналах – нет.
- 7) Финансирование работ российскими организациями в 2019 г. – частично НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, по линии МинОбрНауки – 1 580 USD.

#### 13.2.5 Приложение Б. ПЛАН на 2020 г.

Согласно Соглашению между ПИЯФ – НИЦ КИ и FAIR GmbH, в 2020 году должны проводиться работы по окончательной приемке подсистемы на 3000 каналов. Кроме того, планируются работы по техническому обслуживанию. Всего с учетом участия основных исполнителей в окончательной приемке и техническом обслуживании планируются 70 человеко-дней пребывания в Германии. Основные исполнители и визитеры – Уваров Л.Н., Орицин Е.М., Грузинский Н.В., Бондарев С.В. Запрашиваемая квота на 2020 год составляет 10 200 USD.

Кроме того, по техническим причинам немецкие коллеги не смогли принять основных исполнителей для работ по приемке подсистемы 3000 каналов в ноябре-декабре 2019 года и просили перенести визит на январь-февраль 2020 года. Остаток средств 2019 года в связи с отменой визита составляет 8420 USD. Мы надеемся, что этот визит будет возможен в запрашиваемое немецкой стороной время (см Табл. 13.1).

Табл. 13.1 План поездок в 2020 г.

Фамилия И.О.	Должность	Период	Длительность (сутки)	Место	Цель
Уваров Л.Н.	Зам зав отд. Ст. науч. сотр.	Январь 2020	14	FAIR, GSI	Сдача подсистемы 3000 каналов
		Октябрь 2020	14		Окончательная приемка подсистемы 3000 каналов
Орищин Е.М.	Ст. науч. сотр.	Январь 2020	14	FAIR, GSI	Сдача подсистемы 3000 каналов
		Октябрь 2020	14		Окончательная приемка подсистемы 3000 каналов
Грузинский Н.В.	Ведущий инженер	Январь 2020	14	FAIR, GSI	Сдача подсистемы 3000 каналов
		Июль 2020	7		Техническое обслуживание
		Октябрь 2020	14		Окончательная приемка подсистемы 3000 каналов
Бондарев С.В.	Ведущий инженер	Январь 2020	14	FAIR, GSI	Сдача подсистемы 3000 каналов
		Июль 2020	7		Техническое обслуживание
		Октябрь 2020	14		Окончательная приемка подсистемы 3000 каналов

### 13.3 Отчет о научно-исследовательской работе по проекту PAS/R3B/NuSTAR

Представлен отчет о работе, выполненной в рамках проекта R3B/NuSTAR Российско-Германского сотрудничества по исследованию фундаментальных свойств материи по теме «Создание протонного спектрометра на базе на базе работающих в вакууме дрейфовых трубок Proton Arm Spectrometer», Краткое наименование PAS. Ответственный - зав. отделом трековых детекторов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, доктор физ.-мат. наук, Крившич Анатолий Григорьевич



### 13.3.1 Введение

Протонный спектрометр на базе дрейфовых трубок (straw tubes) размещается за магнитом GLAD внутри вакуумной камеры и предназначен для определения импульсов протонов с энергией в диапазоне  $E_p = 500 \div 700$  МэВ. Блок-схема экспериментальной установки R<sup>3</sup>B, включающей Протонный Спектрометр (PAS), представлена на Рис. 13.9.

Эта принципиально новая концепция трекового детектора по сравнению с той, которая раньше рассматривалась коллаборацией R<sup>3</sup>B, была предложена в ПИЯФ – НИЦ КИ и получила одобрение как немецкой стороной (экспертным советом мегапроекта FAIR), так и российской стороной (экспертным советом ГК «Росатом»). Проект получил высший (первый) приоритет, и теперь его реализация является международным обязательством института.

Раздел с описанием PAS полностью вошел в Technical Report for the Design, Construction and Commissioning of the Tracking Detectors for R<sup>3</sup>B, который был одобрен менеджментом FAIR в августе 2015 г.

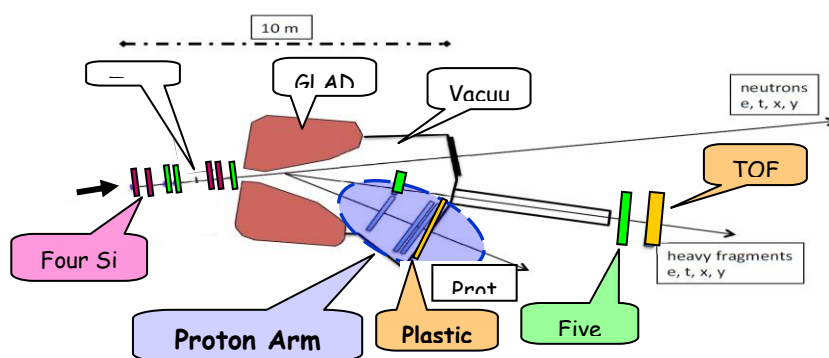


Рис. 13.9 – Блок-схема трековой системы экспериментальной установки R<sup>3</sup>B

### 13.3.2 Основные результаты работы

Принципиальные отличия нового трекового детектора от прежней версии заключаются в следующем:

1. Трековый детектор, который ранее должен был регистрировать X и Y координаты протонов в одной плоскости, т.е. был годоскопом, превратился, по существу, в протонный телескоп, который регистрирует координаты треков протонов в нескольких плоскостях и обеспечивает хорошее угловое разрешение (около 10 мрад).
2. Апертура детекторов увеличилась с  $500 \times 500$  мм<sup>2</sup> до  $2700 \times 1100$  мм<sup>2</sup>.
3. Пространственное разрешение должно быть не хуже 200 мкм.
4. Двухтрековое разрешение по коррелированным парным событиям должно быть не хуже 10 мм.
5. Протонный спектрометр должен размещаться за магнитом GLAD и работать в условиях вакуума.

#### 13.3.2.1 Подписание контракта

На основании Технической спецификации и проведенного в июне 2018 г. Technical Design Review вступило в окончательную фазу проектирование PAS.

Со стороны ПИЯФ – НИЦ КИ основным исполнителем контракта определен Отдел Трековых Детекторов (ОТД), а соисполнителями – Отдел Радиозлектроники (ОРЭ) и Отдел Криогенной и Сверхпроводящей Техники (ОКСТ).

### 13.3.2.2 Создание координатной плоскости PAS – X2 и оборудования для спектрометра PAS

Разработан и создан координатный блок PAS–X2 на базе тонкостенных алюминиевых дрейфовых трубок. Общее число каналов – 650, которые были сгруппированы в три слоя со сдвигом друг относительно друга на величину радиуса трубки (Рис. 13.10). Координатный блок X2 имеет апертуру около  $1000 \times 2000 \text{ мм}^2$ . Диаметр трубок – 10 мм, шаг размещения 10,25мм, толщина стенок – не превышает 250 мкм, диаметр проволоки-анодов – 35 мкм.



Рис. 13.10 – Дрейфовые трубки, изготовленные для станции X2

Разработана и применена система контроля работы дрейфовых трубок в вакууме (Рис. 13.11 слева). Газовая смесь содержала Ag + 8% гелия-4. Регистрируя гелий-4, мы измеряли величину утечки в вакуум. Для каждой трубочки измерялись остаточное давление и величина утечек в вакууме (Рис. 13.11 справа).

Проведенные оценки показали, что разработанная технология изготовления трубок позволяет производить трубки спектрометра PAS для работы в вакууме в пределах установленных технических спецификаций.

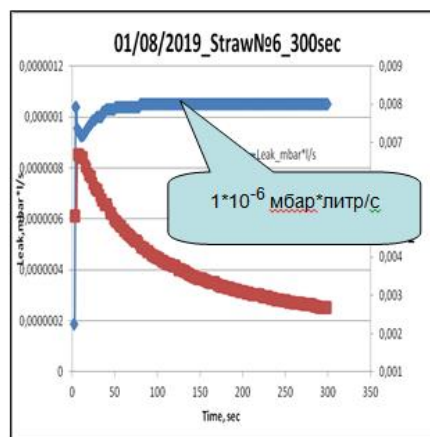
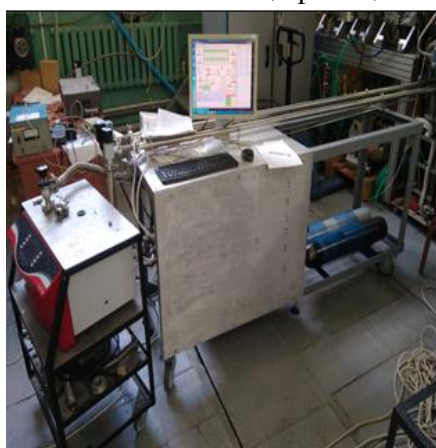


Рис. 13.11 – Слева установка для измерения величины утечек газа в вакуум, справа – типичные результаты измерений

Видно, что через 120 сек. утечки в каждой отдельной трубочке не превышают установленную величину и составляют около  $1 \cdot 10^{-6}$  мбар л/с (синяя кривая на Рис. 13.11 справа). При этом - остаточное давление не превышает  $3 \cdot 10^{-3}$  мбар (красная кривая на Рис. 13.11 справа), что вполне приемлемо.

Высоковольтные характеристики трубок измерялись на специально созданном стенде (Рис. 13.12 слева). Типичные полученные характеристики приведены на Рис. 13.12 справа. Начало плато – 1,65 кВ, конец плато – 2,35 кВ, ширина плато – не менее 700 вольт при  $P = 1$  атм.

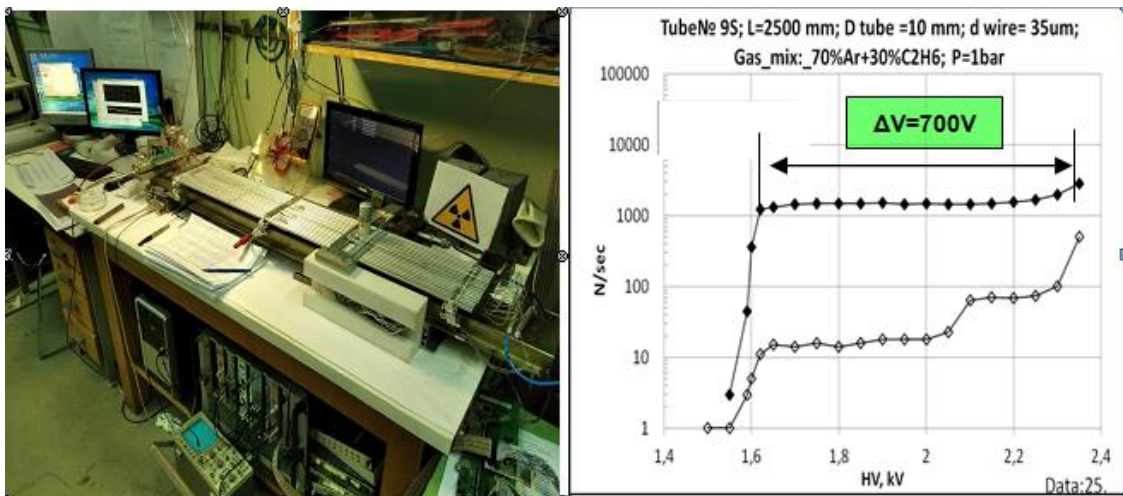


Рис. 13.12 – Слева созданный высоковольтный стенд, справа – типичные счетные характеристики с источником Fe-55 (сплошные ромбики) и без него (полые ромбики)

Исходя из размеров торцевой заглушки и необходимой точности шага, между трубками был выбран шаг 10,25 мм (Рис. 13.13 слева). Это дало возможность при склейке трубок в группы использовать специальные «гребенки» (Рис. 13.13 в центре). Трубки склеивались в группы (Рис. 13.13 справа) и далее – в координатную плоскость X2.

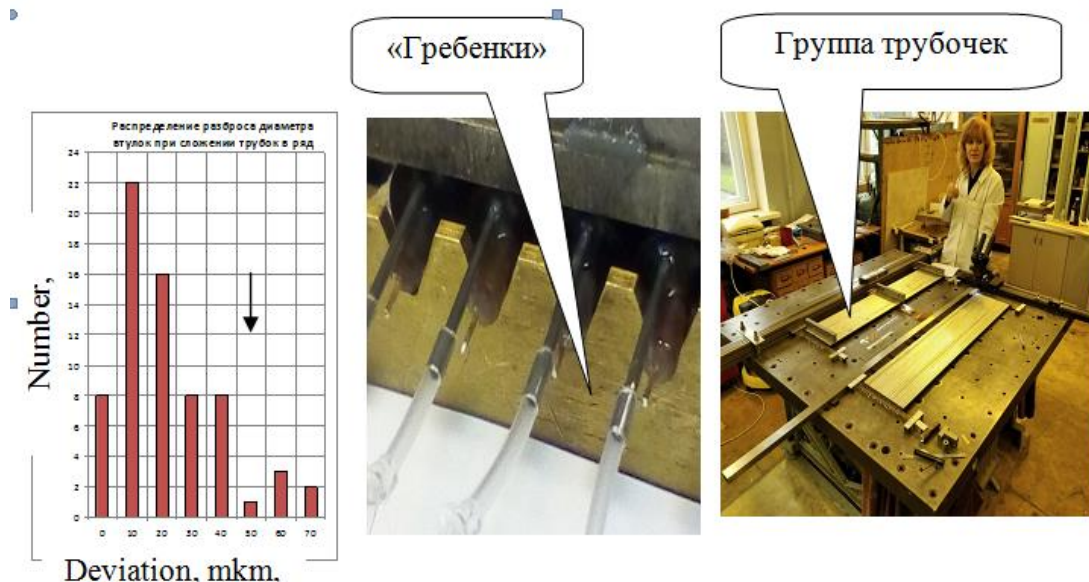


Рис. 13.13 – Слева обоснование выбора шага между трубочками и его гарантированное обеспечение с помощью точных «гребенок», в центре – специальные гребенки, справа – группы трубок

### 13.3.3 Участие Российских ученых в проекте

На этапе 2019 года российские учёные участвовали в создании протонного спектрометра PAS. Эти работы включали в себя:

- создание X2 станции спектрометра PAS, включая отработку технологии производства;
- интегрирование полученной информации в систему сбора и обработки данных R3B;

- заключение договора по производству тонкостенных (около 0,2 мм) алюминиевых трубок (с диаметром 10 мм);
- начало разработки прототипов надетекторной электроники (front-end electronics) для спектрометра PAS;
- работа по созданию газовой системы спектрометра PAS. На *Рис. 13.14* изображены внутренние элементы газовой системы спектрометра PAS.

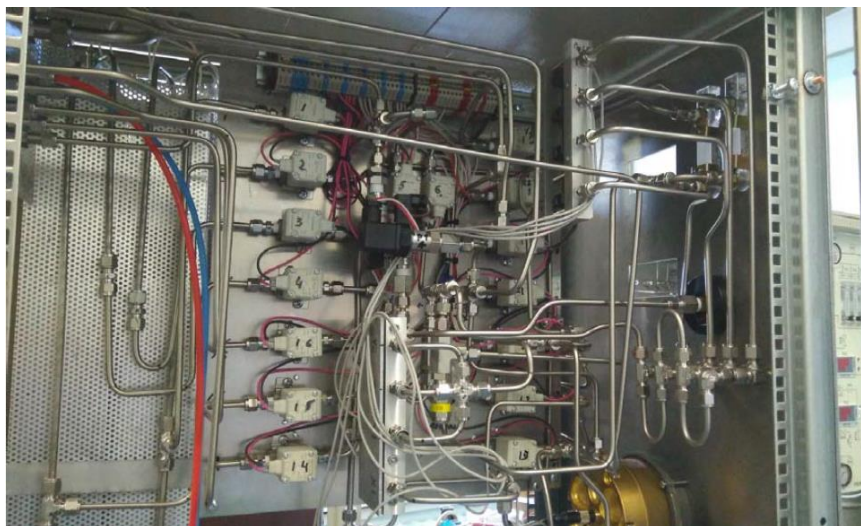


Рис. 13.14 – Элементы газовой системы спектрометра PAS

#### 13.3.4 Заключение

В результате по проекту PAS (R3B эксперимент) в 2019 г. было выполнено следующее:

- Изготовлены 650 трубок для координатной плоскости SWT-X2. Трубки проверены на высокое напряжение и на работу в вакууме.
- Изготовлена система газового обеспечения спектрометра PAS и система контроля газовой утечки трубок в вакууме. Изготовлены опытные образцы предусилителей (4 шт.) для измерительной станции. Осуществлена подготовка к массовому производству этих плат. Изготовлены опытные образцы системы подачи высокого напряжения и системы подачи низкого напряжения.

#### 13.3.5 ПРИЛОЖЕНИЕ А

1. Число специалистов, участвовавших в проекте в 2019 году, - 8 человек.
2. Число молодых специалистов (моложе 35 лет), привлечённых к работам, – нет
3. Число студентов, участвовавших в экспериментах ..... нет.
4. Защиты диссертаций в 2019 г. Защит по данной тематике ..... не было.
5. Число докладов, сделанных сотрудником ПИЯФ НИЦ КИ от имени коллаборации на международных конференциях, ... нет.
6. Число совместных публикаций в реферируемых журналах ... .. нет.
7. Финансирование работ российскими организациями в 2019 г. – частично, ПИЯФ НИЦ КИ.
8. Финансирование, выделенное и израсходованное в 2019 г. по линии Минобрнауки, 16000 USD.
9. Количество затраченных дней в 2019 г. на выполнение проекта – 110 дней с учётом поездок в первом квартале 2020 г. (см. таблицу ниже).

Ф.И.О.	Должность	Период	Длительность (сутки)	Место	Цель
Крившич А.Г.	Зав. отделом	29.11- 16.12	18	ГСИ	Участие в ресурсных испытаниях прототипа PAS на тестовом пучке в GSI
		Со 2 февраля по 16 февраля 2020	14	ГСИ	
Майсузенко Д.А.	С.н.с.	29.11- 16.12	18	ГСИ	Участие в ресурсных испытаниях прототипа PAS на тестовом пучке в GSI
		Со 2 февраля по 23 февраля 2020	21		
Яцура В.И.	С.н.с.	29.11- 16.12	18	ГСИ	Участие в ресурсных испытаниях прототипа PAS
Инглесси А.Г.	Н.с.	С 01 октября по 08 октября	7	ГСИ	Интегрирование информации PAS в общую систему сбора данных эксперимента R3B
		С 10 декабря по 16 декабря	7		
Фетисов А.А.	Н.с.	Со 9 февраля по 23 февраля 2020	14	ГСИ	Участие в ресурс-ных испытаниях прототипа PAS на тестовом пучке в GSI

#### 13.3.6 План работ на 2020 г.

– Завершение изготовления станции X2 и ее проверка. Изготовление всех трубочек для плоскости Y2 (300 штук) и их проверка.

– Завершение разработки проекта протонного спектрометра, включая системы его обеспечения,

– Интегрирование полученных данных в систему сбора данных эксперимента R3B и коррекция необходимого программного обеспечения для получения синхронизированной информации с других детекторов трековой системы эксперимента R3B.

Запрашиваемая КВОТА на весь 2020 год по проекту PAS (трековые детекторы) составляет 19 000 USD. Она будет распределена на командировочные расходы в Германию. Предполагаемое число основных исполнителей – 6 человек с общим количеством человеко-дней в Германии - около 145.

Предполагаются визиты в GSI следующих сотрудников: Крившич А.Г., Майсузенко Д.А., Фетисов А.А., Кравцов П.В., Яцура В.И., Инглесси А.Г.

#### 13.4 Отчет о работе по проекту АСТАФ

Представлен отчет о научно-исследовательской работе, выполненной в рамках эксперимента R3B/NuSTAR/АСТАФ Российско-Германского сотрудничества по исследованию фундаментальных свойств материи по теме «Измерения в инверсной кинематике сечений упругого рассеяния протонов и неупругого рассеяния альфа частиц на экзотических ядрах с помощью активных мишеней АСТАФ», краткое наименование: АСТАФ. Координатор работы – ведущий научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, канд. физ.-мат. наук Маев Евгений Михайлович.

#### 13.4.1 Введение

Ускорительный комплекс FAIR в GSI будет производить вторичные пучки радиоактивных ядер с энергией до 1,5 ГэВ/нуклон и интенсивностью на пять порядков превосходящей интенсивность ныне существующих пучков в GSI. Это открывает уникальные возможности в исследовании ядер, далеких от полосы стабильности, и наиболее короткоживущих экзотических ядер. Как известно, изучение экзотических ядер – это в настоящее время одно из основных направлений исследований в физике атомного ядра. Одним из проектов по изучению таких ядер является эксперимент R3B коллаборации NuSTAR. В эксперименте R3B планируется изучение широкого спектра ядерных процессов, таких как упругое и неупругое рассеяние, квазиупругое рассеяние, электромагнитное возбуждение, зарядовообменные реакции, реакции деления и фрагментации экзотических ядер. В результате будет получаться информация об оболочечной структуре изучаемых ядер, об их волновых функциях, о возбужденных состояниях и о многочастичных каналах распада ядер, о несвязанных состояниях и их резонансах, о нуклон-нуклонных корреляциях и кластерной структуре ядер, о радиусах и распределении ядерной материи и т.д. Детектор R3B – это универсальная установка с большим аксептансом и высокой эффективностью регистрации частиц, с высоким пространственным и энергетическим разрешением.

Предполагается, что одним из детекторов установки R3B будет активная мишень АСТАФ (ACtive TArget for Fair), т.е. ионизационная камера, в которой газ будет мишенью и рабочим веществом ионизационной камеры. Использование активной мишени позволит расширить экспериментальные возможности установки R3B. С помощью активной мишени можно будет исследовать процесс рассеяния экзотических короткоживущих ядер при малых переданных импульсах. Отметим, что метод исследования экзотических ядер посредством малоуглового рассеяния протонов в инверсной кинематике с помощью активной мишени был предложен в ПИЯФ – НИЦ КИ и до настоящего времени, насколько нам известно, использовался только группой ПИЯФ – НИЦ КИ в совместных с немецкими коллегами экспериментах в GSI.

#### 13.4.2 Детекторы АСТАФ1 и АСТАФ2

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ предлагает изготовить две активные мишени, АСТАФ1 – наполненную водородом ионизационную камеру высокого давления для исследования в инверсной кинематике упругого рассеяния протонов на экзотических ядрах и АСТАФ2 – ионизационную камеру, наполненную гелием (с добавкой водорода) для изучения в инверсной кинематике неупругого рассеяния альфа частиц на изучаемых ядрах. АСТАФ2 может помещаться в гамма-спектрометре CALIFA, и рассеянные альфа частицы могут регистрироваться на совпадение с испускаемыми ядрами гамма лучами, которые детектируются спектрометром CALIFA.

Рассмотрим кратко принцип работы активной мишени на примере АСТАФ1. В камере расположены электроды – катод, анод и экранирующая сетка. Пучок исследуемых ядер проходит через объем камеры перпендикулярно электродам камеры. При рассеянии исследуемых ядер на протонах (ядрах атомов водорода) протоны отдачи летят, в основном, под углами к пучку близкими к  $90^\circ$  и тормозятся в газе. Электроны, освобождающиеся при ионизации газа протонами отдачи, дрейфуют в сторону анода и собираются на нем.

Величина заряда, собираемого анодом, пропорциональна энергии протонов отдачи, т.е. величине квадрата передаваемого импульса. Прототипом детектора АСТАФ1 может служить

ионизационная камера ИКАР, предложенная и изготовленная в ПИЯФ – НИЦ КИ. Камера ИКАР успешно использовалась на пучках экзотических ядер в GSI для изучения в инверсной кинематике упругого рассеяния протонов с энергией  $\sim 700$  МэВ на ядрах изотопов He, Li, Be, B и C (G.D. Alkhasov *et al.*, Nucl. Phys. A **712** (2002) 269; A.V. Dobrovolsky *et al.*, Nucl. Phys. A **766** (2006) 1; S. Ilieva *et al.*, Nucl. Phys. A **875** (2012) 8; G.A. Korolev *et al.*, Phys. Lett. B **780** (2018) 200.). Камера АСТАФ1 отличается от камеры ИКАР тем, что у нее больший диаметр (1 м), она может наполняться до большего давления (20 бар), и ее анод секционирован. В результате по сравнению с камерой ИКАР камера АСТАФ1 позволит исследовать более тяжелые ядра и проводить измерения при больших значениях передаваемых импульсов.

#### 13.4.3 Работа по программе АСТАФ, выполненная в 2019 г.

Начато изготовление корпуса малой активной мишени АСТАФ2 (Рис. 13.15) для изучения неупругого рассеяния экзотических ядер на ядрах гелия.

Начата подготовка в GSI инфраструктуры (вакуумной, газовой и высоковольтной систем) для будущих экспериментов с активной мишени АСТАФ2.

Завершен анализ данных, полученных в экспериментах с прототипом активной мишени, наполненным гелием, на высокоинтенсивном электронном пучке ускорителя МАМІ (ИКР) в 2017 г.



Рис. 13.15 – Элементы корпуса малой активной мишени АСТАФ2 (крышка с высоковольтными разъемами и цилиндрическая обечайка)

Проведены тестовые измерения на электронном пучке ускорителя МАМІ (ИКР) с прототипом активной мишени АСТАФ2, наполненным водородом (Рис. 13.16). Спектр получен в тестовых измерениях на электронном пучке ускорителя МАМІ с прототипом активной мишени, наполненным водородом при давлении 1,25 атм.

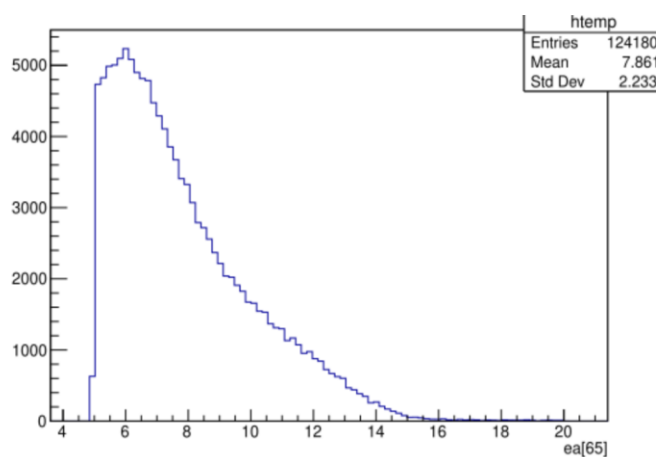


Рис. 13.16 – Энергетический спектр протонов отдачи на центральном аноде прототипа активной мишени АСТАФ2. Цена канала – 30 кэВ

#### 13.4.4 Приложение А

- 1) Число специалистов ПИЯФ НИЦ КИ, участвовавших в проекте АСТАФ в 2019 г. – 2.
- 2) Визиты специалистов ПИЯФ НИЦ КИ в Германию (GSI) в 2019 г. по теме АСТАФ

ФИО	Должность	Период	Длительность	Место	Цель
Маев Е.М.	Ведущий научный сотрудник	19.05 – 6.06	19 дней	GSI	Подготовка прототипа АСТАФ2 к эксперименту
Инглесси А.Г.	Научный сотрудник	11.08 – 23.08	13 дней	GSI	Подготовка прототипа АСТАФ2 к эксперименту
Инглесси А.Г.	Научный сотрудник	9.10 – 8.11	31 день	GSI, ИКР Mainz	Подготовка и проведение эксперимента на пучке электронов
Маев Е.М.	Ведущий научный сотрудник	29.11 – 16.12	18 дней	GSI	Тестирование электроники и анализ данных
Инглесси А.Г.	Научный сотрудник	29.11 – 8.12	10 дней	GSI	Тестирование электроники

- 3) Число молодых специалистов (моложе 35 лет) – нет.
- 4) Участие студентов – не было
- 5) Защит диссертаций – не было.
- 6) Доклады сотрудниками ПИЯФ НИЦ КИ по теме АСТАФ на международном митинге R3B — 2 доклада (Е. Маев и А. Инглесси).
- 7) Публикации в реферируемых журналах – одна публикация: G. Korolev *et al.*, Nucl. Phys. A **989** (2019) 40.
- 8) Финансирование российскими организациями – частично работа финансировалась НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ.
- 9) Финансирование в 2019 г. – \$ 12 000, Израсходовано – 12 000, Количество командировочных дней – 91.



#### 13.4.5 План работ на 2020 г.

1. Завершить изготовление корпуса активной мишени АСТАФ2.
2. Начать изготовление внутренних элементов (катода, сетки и сегментированной анодной плоскости) активной мишени АСТАФ2.
3. Завершить подготовку в GSI инфраструктуры (вакуумной, газовой высоковольтной систем) для будущих экспериментов с активной мишенью АСТАФ2.
4. Начать анализ данных, полученных в эксперименте на высокоинтенсивном электронном пучке ускорителя MAMI (ИКР) в 2019 г.
5. Продолжить тестовые измерения на электронном пучке ускорителя MAMI (ИКР) с прототипом активной мишени АСТАФ2, наполненной водородом.

Запрашиваемая КВОТА на 2020 г. по проекту АСТАФ составляет: 12000 USD. Она будет израсходована на поездки в GSI и ИКР (Mainz) трех участников проекта АСТАФ: Е. Маева, Г. Петрова и А. Инглесси с общим количеством человеко-дней в Германии около 90.

#### 13.5 Отчет по проекту R<sup>3</sup>B/NuSTAR

Представлен отчет о работе “Реакции с релятивистских пучками радиоактивных ядер“, выполненной в рамках проекта R<sup>3</sup>B/NuSTAR Российско-Германского сотрудничества по исследованию фундаментальных свойств материи. Краткое наименование: R<sup>3</sup>B. Координатор работы – ведущий научный сотрудник КЯФК НИЦ КИ, к.ф.м.н. Чулков Леонид Владимирович.

##### 13.5.1 Введение

Работы нацелены на подготовку программы исследований и создание нового экспериментального оборудования в коллаборации R<sup>3</sup>B – одной из главных, первенствующих составляющих проекта NuSTAR. Этот проект посвящен изучению на строящемся в Дармштадте (Германия) ускорительном комплексе FAIR структуры ядер вблизи границ ядерной стабильности и механизмов реакции с этими ядрами. В настоящее время исследования структуры экзотических ядер стали центральным направлением развития экспериментальной и теоретической ядерной физики. Знание сечений различных ветвей ядерных реакций с изотопами, удаленными от линии стабильности, исключительно важны и в астрофизике для понимания процессов синтеза элементов во Вселенной и эволюции звезд. До завершения создания ускорительного комплекса FAIR планируется использование существующего ускорителя SIS18 при проведении экспериментов в 2018 -2019 годах с испытанием уже созданных элементов детекторных систем и для получения физически значимых результатов. Не менее актуальным является завершение анализа данных проведенных ранее экспериментов с использованием пучков радиоактивных изотопов с релятивистскими энергиями и подготовка публикаций по результатам этих экспериментов

##### 13.5.2 Работа по программе R<sup>3</sup>B, выполненная в 2019 году

13.5.2.1 Спектроскопия ядра <sup>13</sup>Be Сечение реакции <sup>12</sup>C(α,γ)<sup>16</sup>O посредством кулоновской диссоциации <sup>16</sup>O на <sup>4</sup>He и <sup>12</sup>C

В апреле 2019 на синхротроне SIS18 проведен эксперимент S454. Изучалась реакция кулоновского расщепления <sup>16</sup>O на α-частицу и <sup>12</sup>C. Целью эксперимента S454 является определение величины скорости астрофизической реакции синтеза <sup>12</sup>C(α,γ)<sup>16</sup>O посредством кулоновской диссоциации <sup>16</sup>O на <sup>4</sup>He и <sup>12</sup>C. Результаты эксперимента анализируются.

### 13.5.2.2 Одночастичная структура нейтронно-избыточных изотопов Ca: эволюция оболочки вдоль $Z = 20$

Проведена подготовка к экспериментам S444 (Ввод в эксплуатацию основных детекторов R<sup>3</sup>B) и S467 (Одночастичная структура нейтронно-избыточных изотопов Ca: эволюция оболочки вдоль  $Z = 20$ ), проведение которых намечено на февраль 2020 года.

### 13.5.2.3 Квазисвободное выбивание протона из ядра $^{12}\text{C}$ на углеродной мишени при 398 МэВ/нуклон

Механизм выбивания протона в реакции  $^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{B}$  на углеродной мишени изучался в измерениях тройных совпадений продуктов реакции: ядра  $^{11}\text{B}$  и двух протонов. Обнаружено, что наблюдаемые двухнуклонные угловые корреляции согласуются с квазисвободным рассеянием протона в налетающем ядре на нуклоне в ядре мишени.

Измеренные сечения одноступенчатых pp и pn-взаимодействий равны  $\sigma_{pp} = 17.2$  (12) мб и  $\sigma_{pn} = 18,2$  (18), соответственно. Компонент квазисвободного pp рассеяния составляет до 58 (4)% от общего сечения удаления протона. Результаты, полученные из эксперимента, сравниваются с полными сечениями удаления протонов, полученными в теоретических расчетах в эйкональном приближении.

Результаты опубликованы в Physics Letters B **797**, 134802 (2019), “Quasi-free proton knockout from  $^{12}\text{C}$  on carbon target at 398 MeV/u”.

### 13.5.2.4 Реакции квази-свободного выбивания протонов из изотопов углерода.

Реакции квазисвободного рассеяния  $^{11}\text{C}(p,2p)$  и  $^{10-12}\text{C}(p,pn)$  были изучены в обратной кинематике при энергиях пучка 400 МэВ/нуклон. Пары протон-протон и протон-нейтрон детектировались в совпадении с фрагментами реакции. Экспериментальные сечения и распределения импульсов были получены и сопоставлены с расчетами в импульсном приближении с искаженными волнами. Результаты проведенного эксперимента анализировались совместно с ранее опубликованными сечениями квазисвободного рассеяния на изотопах кислорода и азота (Рис. 13.17). Зависимость, обнаруженная в Tostevin, Gade, Phys. Rev. C **90**, 057602 (2014) обозначена серой областью. Горизонтальные полосы показывают средний коэффициент уменьшения для каждого типа реакции.

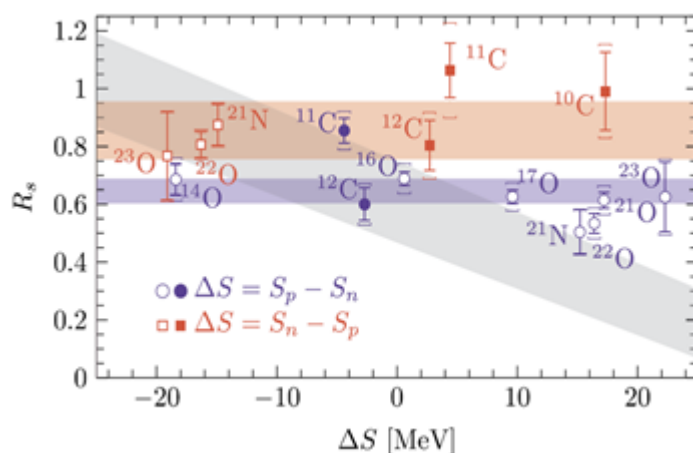


Рис. 13.17 – Коэффициент  $R_s = \sigma_{\text{exp}}/\sigma_{\text{th}}$  как функция разности в энергии связи нуклонов  $\Delta S$ . Кружки обозначают результаты из (p,2p), квадраты из (p,pn)

Совместный анализ позволил провести систематическое сравнение экспериментальных одночастичных спектроскопических факторов с предсказаниями модели оболочки в широком диапазоне нейтронно-протонной асимметрии. Найдено, что спектроскопические факторы демонстрируют слабую зависимость или не зависят от изоспина, в отличие от сильной зависимости, отмеченной в реакциях удаления нуклонов, вызванных ядерными реакциями при более низких энергиях J. A. Tostevin, A. Gade, Phys. Rev. C **90**, 057602 (2014). Однако оказалось, что величины спектроскопических факторов полученные в реакции (p,2p) значительно меньше, чем для (p,pn) реакций для всех исследованных ядер. Результаты опубликованы в Physics Letters B **795** (2019) 682–688, “Quasi-free neutron and proton knockout reactions from light nuclei in a wide neutron-to-proton asymmetry range”.

13.5.2.5 Исследование надежности магического числа  $Z = 6$  подоболочек  $0s_{1/2}$ - $0p_{3/2}$  с помощью реакции квазисвободного рассеяния (p,pn).

В реакции квазисвободного рассеяния  $^{17,19,21}\text{N}(p,pn)$  исследовалась устойчивость спин-орбитального зазора подоболочек  $0p_{1/2}$  -  $0p_{3/2}$  при приближении к границе нейтронной стабильности. Для этого проводились измерения протонной составляющей в механизме возбуждения состояния  $2^+$  ядер  $^{16,18, 20}\text{C}$ . Полученные экспериментальные данные подтверждают представление об уменьшенном расщеплении подоболочек  $0p_{1/2}$  -  $0p_{3/2}$ , что противоречит недавним утверждениям о преобладающем магическом числе  $Z = 6$  при приближении к линии нейтронной стабильности D.T.Tran et al., Nature Communications 9,1594(2018). Подготавливается публикация в реферируемом журнале.

### 13.5.3 Заключение

В результате по программе R<sup>3</sup>V в 2019 г. было выполнено следующее:

1. Проведен эксперимент S454 по кулоновскому расщеплению  $^{16}\text{O}$  на  $\alpha$ -частицу и  $^{12}\text{C}$ .
2. Проведена подготовка к экспериментам S444 и S467, запланированным на февраль 2020 года
3. Закончен анализ данных и опубликованы статьи:
  - а) по механизму реакций  $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, 2p)^{11}\text{B}$ .
  - б) по измерению одночастичных спектроскопических факторов в реакциях квазисвободного рассеяния  $^{11}\text{C}(p,2p)$  и  $^{10-12}\text{C}(p,pn)$ .
4. Закончен анализ экспериментальных данных, полученных в реакциях квазисвободного рассеяния  $^{17,19,21}\text{N}(p,pn)$ .

### 13.5.4 Приложение А

- 1) Число специалистов, специалистов, участвовавших в проекте в 2019 году, – 3 (1 основной – Л.В.Чулков, и 2 соисполнителя: А. Н. Данилов и В. И. Старостин).
- 2) Число молодых специалистов (моложе 35 лет), привлечённых к работам, – 2
- 3) Число студентов, участвовавших в экспериментах – нет.
- 4) Защиты диссертаций в 2019 г. Защит по тематике R<sup>3</sup>V не было.
- 5) Число докладов, сделанных от имени коллаборации на международных конференциях, – 1, Indirect methods in nuclear astrophysics, ECT\* workshop, Тренто, Италия,, 5-9 ноября 2018. <https://indico.ectstar.eu/event/27/contributions/689/>.
- 6) Число совместных публикаций в реферируемых журналах – 2.
- 7) Количество затраченных дней в 2019 г. на выполнение проекта – 32 дня.

### 13.5.5 Планы группы на 2020 г.

- Участие в проведении экспериментов S444 (Ввод в эксплуатацию основных детекторов R<sup>3</sup>B) и S467 (Одночастичная структура нейтронно-избыточных изотопов Ca: эволюция оболочки вдоль Z = 20).
- Участие в подготовке обзорной публикации об исследованиях, проведенных по проекту R<sup>3</sup>B коллаборации NuSTAR.
- Подготовка публикации по исследованию устойчивости спин-орбитального зазора подболочек 0p<sub>1/2</sub>-0p<sub>3/2</sub> в эксперименте по квазисвободному рассеянию <sup>17,19,21</sup>N(p,pn).  
Запрашиваемая квота на 2020 год по проекту составляет 6,000 \$

### 13.5.6 Приложение Б. Список публикаций

1. “Quasi-free proton knockout from <sup>12</sup>C on carbon target at 398 MeV/u”,  
V.Panin, M.Holl, J.T.Taylor, Y.Aksyutina, H.Alvarez-Pol, T.Aumann, C.A.Bertulani, K.Boretzky, C.Caesar, M.Chartier, L.V.Chulkov, D.Cortina-Gil, J.Enders, O.Ershova, H.Geissel, R.Gernhäuser, M.Heil, H.T.Johanssoni, B.Jonson, A.Keli’c-Heil, O.Kiselev, C.Langer, T.LeBleis, R.Lemmon, T.Nilsson, S.Paschalis, M.Petri, R.Plug, R.Reifarh, D.Rossi, H.Scheit, H.Simon, F.Wamers, H.Weick, C.Wimmer,  
Physics Letters B 797 (2019) 134802.
2. “Quasi-free neutron and proton knockout reactions from light nuclei in a wide neutron-to-proton asymmetry range”,  
M.Holl, V.Panin, H.Alvarez-Pol, L.Atar, T.Aumann, S.Beceiro Novo, J.Benlliure, C.A.Bertulani, J.M.Boillos, K.Boretzky, M.Caamano, C.Caesar, E.Casarejos, W.Catford, J.Cederkall, L.Chulkov, D.Cortina-Gil, E.Cravo, I.Dillmann, P.Diaz Fernandez, Z.Elekes, J.Enders, L.M.Fraile, D.Galaviz-Redondo, R.Gernhäuser, P.Golubev, T.Heftrich, M.Heil, M.Heine, A.Heinz, A.Henriques, H.T.Johansson, B.Jonson, N.Kalantar-Nayestanaki, R.Kanungo, A.Kelic-Heil, T.Kroll, N.Kurz, C.Langer, T.Le Bleis, S.Lindberg, J.Machado, E.Nacher, M.A.Najafi, T.Nilsson, C.Nociforo, S.Paschalis, M.Petri, R.Reifarh, G.Ribeiro, C.Rigollet, D.M.Rossi, D.Savran, H.Scheit, H.Simon, O.Sorlin, I.Syndikus, O.Tengblad, Y.Togano, M.Vandebrouck, P.Velho, F.Wamers, H.Weick, C.Wheldon, G.L.Wilson, J.S.Winfield, P.Woods, M.Zhukov, K.Zuber,  
Physics Letters B 795, 682 (2019).

### 13.6 Отчет по проекту MATS

Представлен отчет по проекту «ИЗМЕРЕНИЯ МАСС ИОННЫМИ ЛОВУШКАМИ ПЕННИНГА СЛЕДУЮЩЕГО ПОКОЛЕНИЯ» (Mass measurements with the Advanced Trap System). Краткое наименование: MATS. Координатор работы зав. лабораторией Физики Экзотических Ядер НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, доктор физ.- мат. наук, профессор Новиков Юрий Николаевич.

#### 13.6.1 Введение

НИЦ КИ – ПИЯФ им. Б.П. Константинова включился в проект MATS с момента его зарождения в середине первой декады столетия. Основной частью проекта является комплекс из двух ионных ловушек Пеннинга, установленных на пучке экзотических продуктов реакции обратной фрагментации, планируемой на комплексе FAIR. Установка MATS позволит с высокой точностью прямым методом измерять массы нуклидов с необычным (асимметричным) составом протонов и нейтронов, располагающихся на нуклидной карте

далеко от полосы бета-устойчивости. TDR проекта MATS был утверждён дирекцией FAIR в мае 2010 г. и опубликован в журнале Eur. Phys. J., 183, 1-123 (2010).

На этапе 2019 года сотрудники НИЦ КИ – ПИЯФ участвовали в дальнейшем развитии методики измерения, которая будет реализована на MATS, используя в качестве полигона действующую установку SHIPTRAP в ГСИ, а также возможности института М. Планка по ядерной физике в Гейдельберге. Кроме этого, на протяжении всего 2019 г. продолжалось поддержание коллаборационных связей с участниками проекта. Ю.Н. Новиков участвовал в работе недели NuSTAR, Учёного Совета NuSTAR и собрании комитета представителей институтов коллаборации MATS, прошедших в феврале-марте 2019 г.

### 13.6.2 Установка MATS

Наряду с установками FAIR: HISPEC, DESPEC, LASPEC установка MATS будет базироваться в специально отстроенном корпусе для низкоэнергетических пучков. Продукты обратной фрагментации релятивистских ядер урана и других ускоряемых ядер тяжёлых элементов от ускорителя SIS-100 на мишени бериллия будут транспортироваться через SuperFRS и сепарироваться им. После этого они будут попадать в газовую камеру для их торможения и нейтрализации. Пучки ионов низких энергий и малой степени ионизации из газовой камеры будут разводиться по указанным выше установкам, базирующимся на низкоэнергетической ветви продуктов реакций.

Как предполагается, установка MATS будет состоять из традиционного тандема двух ловушек типа Пеннинга: подготовительной (очищающей) и измерительной. Для производства ионов высокого заряда с целью повышения точности измерений можно использовать специально разработанную систему ионизации электронным ударом от интенсивного электронного пучка. Различные варианты такого электронного бридера всё ещё обсуждаются. Более того, даже подвергается сомнению целесообразность его использования. При всех вариантах выбора ионизатора, направляемые в ловушку ионы удерживаются в ней скрещенным магнитным и электрическими полями в малом объёме с диаметром области удержания около 100 микрон. Очищенные от примесей в подготовительной ловушке, единичные ионы направляются в измерительную ловушку, где подвергаются возбуждению внешним радиочастотным полем и электростатически выводятся наружу. В такой схеме циклотронная частота возбуждённого иона определяется по резонансу в кривой времени пролёта ионов к детектору. Эта резонансная частота непосредственно связана с отношением заряда иона к его массе (полной энергии связи). Такая классическая схема определения резонансной частоты используется в существующих в мире ионных ловушках Пеннинга, установленных на пучках радиоактивных ядер. Однако в ловушке MATS предполагается использовать новаторский метод, предложенный и опробованный на установке SHIPTRAP С.А. Елисеевым (ПИЯФ - НИЦ КИ), заключающийся в измерении фазы циклотронного вращения по его отображению на позиционно-чувствительном детекторе за пределами ловушки, существенно увеличивающую разрешающую способность прибора. Более того, нашей группой предложена идея создания принципиально новой комбинированной ионной ловушки, сочетающей функции очищающей и измерительной в одной камере. Для развития этого предложения были использованы мощности института М. Планка (МПИ) в Гейдельберге. Такой альтернативный подход сулит упрощение и удешевление конструкции измерительного узла при сохранении прочих параметров всей системы.

### 13.6.3 Работа по программе MATS, выполненная в 2019 году

В 2019 году проводилось исследование возможности создания комбинированной ионной ловушки Пеннинга для масс-спектрометрических измерений в ловушках следующего поколения (MATS).

Работа с ионами, и особенно с высокозарядными, требует создания условий поддержания сверхвысокого вакуума в системе ионных ловушек. Однако можно альтернативно использовать одно- или двукратно заряженные ионы без критических требований к вакууму, но при этом добиться выигрыша в разрешении, используя метод фазового отображения резонансной кривой возбуждения на позиционно-чувствительном детекторе. Этот метод в приложении к будущей системе MATS был успешно опробован в 2018 г.

В то же время, появилась идея разработки новой комбинированной (совмещённой) однокамерной ловушки, которая бы работала в режиме и очищения (с введением «очищающего» буферного газа) и измерения (с удалением этого газа за короткий промежуток времени).

В разработке этого проекта однокамерной ионной ловушки с одним (а не двумя, как обычно) полем высокой однородности магнита был предложен вариант коллинеарного потока запускаемого газа. Однако произведённые оценки показали, что такой вариант не сулит заметного выигрыша, хотя окончательное решение может быть получено только в планируемом эксперименте. Другим вопросом была проблема быстроты откачки запускаемого газа. Симуляции (Molflow+) (см. Рис. 13.18) показали, что нужный перепад в давлении для двух режимов на уровне двух порядков величины может быть достигнут примерно за 100 мс, что открывает возможности исследований многих экзотических нуклидов.

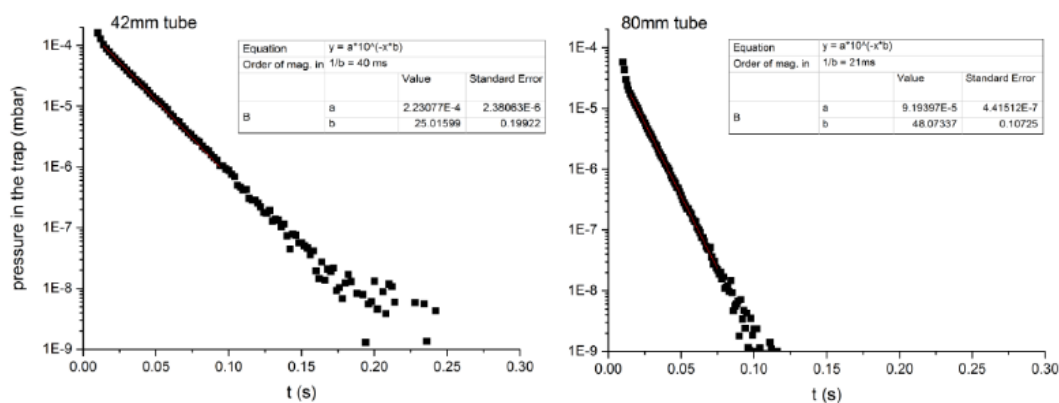


Рис. 13.18 – Симуляция откачки газа из однокамерной ионной ловушки

В мастерских МПИ (также входящем в проект MATS) по нашим чертежам были изготовлены детали узлов установки (см. систему электродов с дрейфовой трубкой на Рис. 13.19).

Однако из-за квенчинга магнита, предназначенного для однокамерного проекта, эксперимент провести не удалось. Он отложен на следующий год, после того, как будет произведено восстановление магнита (зарядка, шиммирование и т.д.). Расходы по этим процедурам МПИ (Гейдельберг) берёт на себя. Фото тора магнита с ионным трактом и детектором, которые подготовлены для эксперимента, показаны на Рис. 13.20.



Рис. 13.19 – Изготовленные узлы установки



Рис. 13.20 – Подготовленный для эксперимента тор магнит с ионным трактом и детектором

Ю.Н. Новиков принял участие в совещании коллаборации MATS, на котором обсуждались текущие проблемы. Как известно, реализация проекта MATS во времени во многом зависит от готовности корпуса низкоэнергетичных частиц, в котором должен быть установлен комплекс MATS. Этот корпус не был предусмотрен в cost-book проекта FAIR, и хотя имеются устные заверения дирекции о том, что на строительство будут выделены финансы, сроки такого строительства пока не известны. В связи с этим возникают неопределённости в стартовом режиме работы подгрупп, в том числе и НИЦ КИ – ПИЯФ.

Кроме того, некоторые позиции в проекте, разработанные и утверждённые более десяти лет назад, уже устарели. Появились новые предложения по структуре отдельных узлов. Так, например, в прошлом году наша группа выступала с предложением использовать электронный бридер с высокой плотностью электронного пучка типа MaMFIS, разработанного в ОИЯИ, для генерации устойчивого высокозарядного пучка ионов. Это предложение обсуждается коллаборацией. Кроме того, НИЦ КИ – ПИЯФ совместно с МПИ выступает за разработку проекта комбинированной ловушки, кстати, весьма подходящего и для проекта ПИТРАП, ионной ловушки на реакторе ПИК в Гатчине.

#### 13.6.4 Заключение

В результате по проекту MATS в 2019 г. было выполнено следующее :

- Произведены оценки возможности создания новой ловушки-комбинированного типа, в которой совмещены функции очищающей и измерительной ловушек. Показаны пути осуществления этого проекта.
- Изготовлены узлы такой системы, готовые к проведению проверочного эксперимента.

Сотрудники лаборатории физики экзотических ядер ПИЯФ – НИЦ КИ приняли участие в рабочем совещании коллаборации MATS. Ю. Новиков участвовал в ежегодной конференции NuSTAR и заседании Учёного Совета NuSTAR.

#### 13.6.5 ПРИЛОЖЕНИЕ А

- 1) Число специалистов, участвовавших в проекте в 2019 году, - **3** (2-основных и 1 соисполнитель).
- 2) Число молодых специалистов (моложе 35 лет), привлечённых к работам, – 1. (О.Безроднова).
- 3) Число студентов, участвовавших в экспериментах – 1 (О. Безроднова).
- 4) Защиты диссертаций в 2019 г. по тематике MATS не было.
- 5) Число докладов, сделанных сотрудником ПИЯФ от имени коллаборации на международных конференциях, – нет
- 6) Число совместных публикаций в реферируемых журналах – нет.
- 7) Финансирование работ российскими организациями в 2019 г. не планировалось.
- 8) Финансирование, выделенное на 2019 г. по линии Министерства науки и высшего образования – 5600

#### 13.6.6 План работы группы на 2020 г.

- Участие в экспериментах по созданию комбинированной ловушки,
- Участие в создании текущего технического задания коллаборации MATS,
- Участие в рабочих совещаниях коллаборации MATS, а также в ежегодной конференции NuSTAR в 2020 г. и работе Учёного совета NuSTAR.

Запрашиваемая квота на командировочные расходы на 2020 год по проекту MATS составляет 5600 USD. В эту сумму не входит финансирование по квоте 2019 г. поездок в феврале-марте 2020 г. на эксперимент в ГСИ.

Предполагаемое число основных исполнителей 2-3 человека с общим количеством человеко-дней в Германии около 45.



## 14 Отчет по эксперименту 19 ПАНДА

Представлен отчет о научно-исследовательской работе, выполненной в рамках проекта Российско-Германского сотрудничества по исследованию фундаментальных свойств материи по теме «Аннигиляция антипротонов в Дармштадте (“anti-Proton Annihilation at Darmstadt“))», краткое наименование ПАНДА. Ответственный – главный научный сотрудник, д. ф.-м. н., профессор А.Н. Васильев.

Список российских институтов, участвующих в эксперименте.

Институт Ядерной Физики им. Будкера (Новосибирск), Объединённый Институт Ядерных Исследований (Дубна), Московский Энергетический, НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ (Протвино), НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ (Москва), НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ (Санкт-Петербург).

Последние три института входят в Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский институт». Так как только эти три института имеют Соглашение с ФАИР и пользуются командировочными средствами из Министерства Образования и Науки, дальнейший отчет посвящен только результатам, полученным этими тремя институтами по своим направлениям деятельности в рамках проекта ПАНДА.

### 14.1 Введение

Эксперимент PANDA одобрен и принят к постановке в научном центре GSI (Дармштадт, Германия). Целью эксперимента является поиск новых форм материи, а именно наблюдение и изучение новых адронных состояний, таких как глюонные возбуждения, гибриды (комбинации глюонов и кварков), многокварковые системы, изучение с беспрецедентной точностью спектров масс чармония, странных и чарм ядер. Эта физическая программа реализуется с помощью детектора PANDA, который предполагается установить на пучке антипротонов с энергиями 1-15 ГэВ накопительного кольца антипротонов HESR с уникально высоким импульсным разрешением пучка и высокой интенсивностью Рис. 14.1. Накопительное кольцо HESR создаётся как часть ускорительного комплекса FAIR в Дармштадте.

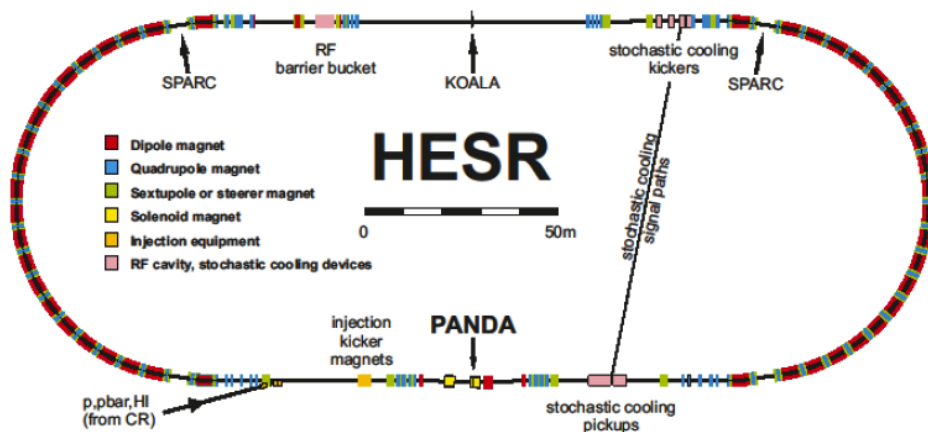


Рис. 14.1 – Расположение эксперимента ПАНДА на накопительном кольце HESR

Физическая программа эксперимента ПАНДА нацелена на поиск новых экстремальных форм материи, а именно, экзотических адронов, таких как глюболы, гибриды. Программа включает в себя спектроскопию состояний чармония выше порога образования пар  $D\bar{D}$  - мезонов, исследования гипер-ядер (в том числе – двойных) и чарм-ядер, когда странная (одна или две) или очарованная частица «вживляется» в ядро вместо обычного нуклона. Исследования предполагается проводить на антипротонном пучке накопительного кольца с электронным и стохастическим охлаждением (HESR) с энергией до 15 ГэВ. Ожидается рекордная в мире интенсивность чистого антипротонного пучка, обеспечивающая до  $2 \times 10^7$  взаимодействий в секунду на внутренней водородной мишени. Помимо высокой интенсивности пучок антипротонов будет беспрецедентным по степени монохроматичности, ожидаемой на уровне  $10^{-4}$  -  $10^{-5}$ , что позволит проводить исследования сильного взаимодействия с высокой точностью. При аннигиляции протонов и антипротонов на установке ПАНДА не будет никаких ограничений на квантовые числа прямо рождающихся частиц в отличие от  $e^+e^-$  - коллайдеров, где могут рождаться только частицы с квантовыми числами  $1^-$ .

Спектрометр эксперимента ПАНДА представлен на Рис. 14.2.

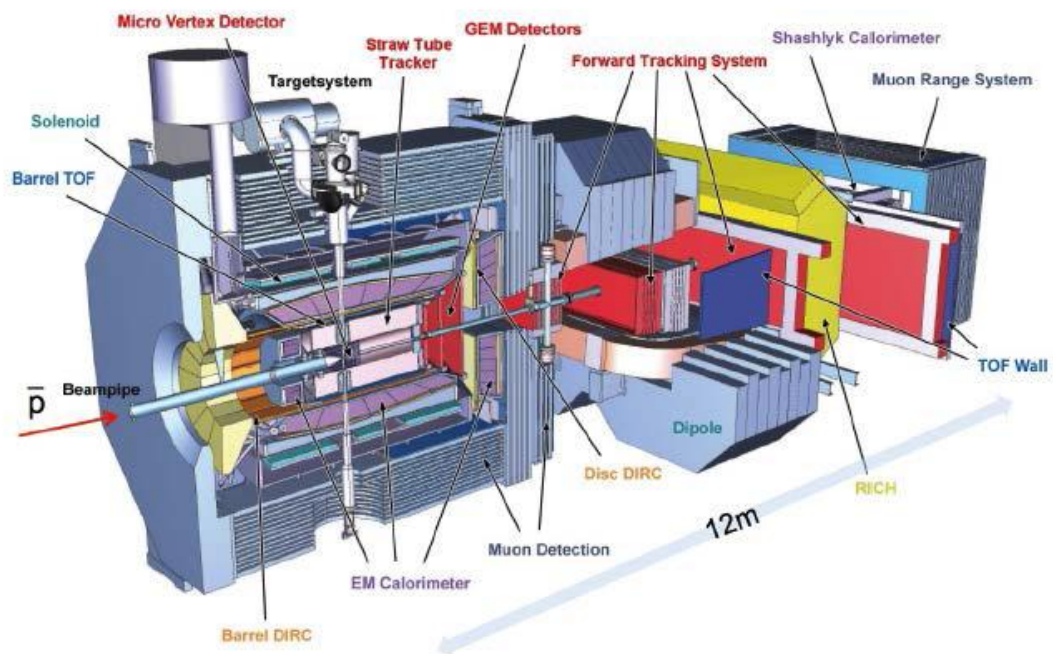


Рис. 14.2 – Схема детектора ПАНДА

Он состоит из баррельной части, собранной на базе сверхпроводящего соленоида (Target spectrometer, TS) и переднего спектрометра на базе магнитного диполя (Forward spectrometer, FS). Циркулирующий пучок после взаимодействия с мишенью проходит через FS, где отклоняется должным образом магнитным диполем. Наиболее полное описание детектора представлено в работе<sup>52</sup>.

<sup>52</sup>Physics Performance Report for PANDA: Strong Interaction Studies with Antiprotons PANDA Collaboration (M.F.M. Lutz et al.). Mar 2009. e-Print: arXiv:0903.3905 [hep-ex]

Основные характеристики детектора приведены ниже:

- Возможность сканирования масс резонансов с шагом 100 кэВ
- Характерные счетные загрузки  $2 \times 10^7$
- 4л аксептанс
- Разрешение по импульсу 0.01
- Восстановление старта события на уровне 100 пс
- Высокое разрешение определения вершины (требуется для регистрации D-мезонов)
- Широкий диапазон регистрации  $\gamma$ -квантов (от 1 МэВ до 10 ГэВ)

Одной из важнейших частей установки ПАНДА является система электромагнитных калориметров, позволяющая иметь практически 4л геометрию для регистрации нейтральных частиц. Система электромагнитных калориметров ПАНДА состоит из центрального электромагнитного калориметра и калориметра переднего спектрометра, регистрирующего частицы, летящие из точки взаимодействия под небольшими углами ( $\pm 5^\circ$  по вертикали и  $\pm 10^\circ$  по горизонтали). Передний калориметр в ПАНДЕ будет сделан по технологии «шашлык». Т.е. тонко-сегментированный калориметр с перемежающимися слоями сцинтиллятора и поглотителя (свинца) и светосбором с помощью спектро-смещающих волокон, проходящих внутри слоев сцинтиллятора и свинца через отверстия. Технология производства таких детекторов разработана и освоена в НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ.

Чтобы выполнить намеченную физическую программу, детектор должен обеспечить идентификацию частиц (лептонов, мюонов, пионов, каонов, протонов, и т.д.) в широком диапазоне телесного угла и энергий частиц. Детектор PANDA обладает практически полным угловым захватом: Спектрометр мишени Target Spectrometer (FS) обеспечивает регистрацию частиц, вылетающих из мишени под углами  $\Theta_{\text{Lab}} = 10^\circ - 140^\circ$ , Передний спектрометр Forward Spectrometer (FS) регистрирует частицы, вылетающие под углами менее  $10^\circ$ . В FS используются дипольный магнит, трековая система, многоканальный детектор черенковского излучения (RICH), время-пролетный детектор, электромагнитный калориметр.

НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ является ответственным и единственным исполнителем проекта время-пролетного детектора высокого разрешения (FTOF).

Задачей группы НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ является разработка и создание корпускулярной мишени эксперимента.

Научно-исследовательские работы

В рамках проекта в 2019 г. проходили работы по трем основным направлениям:

- Разработка и тестирование электромагнитных калориметров эксперимента ПАНДА и моделирование физических процессов эксперимента ПАНДА.
- Разработка и тестирование переднего времяпролетного детектора эксперимента и подготовка Технического Задания на данный детектор.
- Разработка и исследование корпускулярной мишени эксперимента.

Каждое из направлений представлено в соответствующем разделе отчета.

14.2 Работы ИФВЭ по подготовке электромагнитных калориметров и по моделированию физических реакций в эксперименте ПАНДА

#### 14.2.1 Исследование чувствительности измерения ширины и формы X (3872)

В коллаборации ПАНДА ведутся работы по подготовке к проведению исследований на пучке антипротонов. Одним из основных направлений является изучение чувствительности эксперимента при измерении ширины экзотического состояния X(3872), природа которого неизвестна. Для успешного проведения исследований необходимо создание детекторов с рекордными показателями по энергетическому разрешению, одним из которых является электромагнитный калориметр с решающим вкладом НИЦ «Курчатовский институт» ИФВЭ.

Были предложены различные интерпретации природы XYZ, в том числе молекулярные, гибридные, многокварковые состояния, а также другие объяснения. Природа этих состояний, однако, все еще неясна. Например, для X (3872), на сегодняшний день измеренная масса неотличима от порога рождения пар  $DD^*$ . Не ясно, лежит ли масса этого состояния ниже или выше этого порога, и, из-за довольно узкой естественной ширины распада, измерено только значение верхнего предела (1,2 МэВ) при уровне достоверности 90%. Понять характер и различить различные теоретические модели можно измерив абсолютную ширину состояния с точностью заметно лучше 1 МэВ.

Для состояний с JPC, отличным от  $1^-$ , такая точность измерения может быть достигнута только в эксперименте ПАНДА.

Проведено моделированием методом Монте-Карло прецизионного резонансного сканирования по энергии резонанса X(3872). На *Рис. 14.3* представлен принцип метода резонансного сканирования.

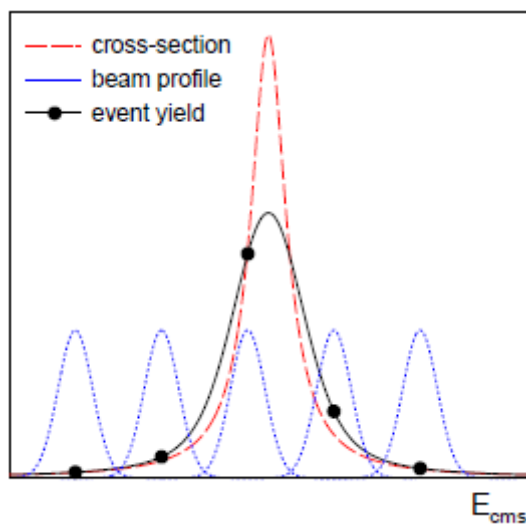


Рис. 14.3 – Рисунок, иллюстрирующий метод сканирования

В этом случае детекторы нужны только для того, чтобы определить наличие искомого состояния, а энергия системы определяется только энергией пучка. Таким образом, если мы знаем энергию ускоренного пучка с точностью  $10^{-4}$ , с такой же точностью мы можем построить зависимость сечения резонанса от энергии системы. В моде с высоким разрешением планируется достичь разрешения пучка по энергии лучше 40 кэВ.

На *Рис. 14.4* показаны массовые спектры состояния X(3872) полученные при моделировании в предположении, что естественная ширина составляет 130 кэВ.

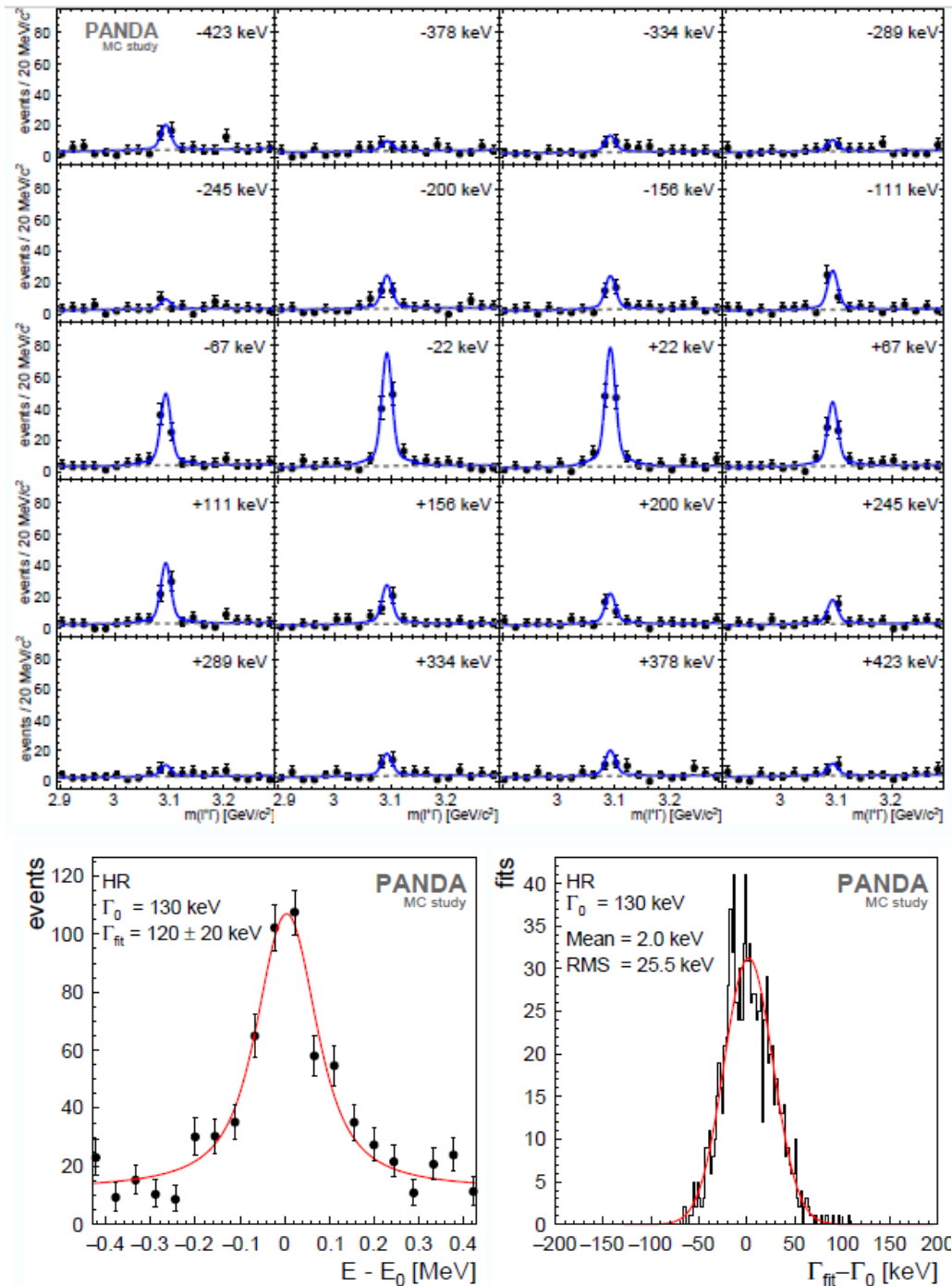


Рис. 14.4 – Массовые спектры в зависимости от энергии и результаты исследований

Подобные исследования были проведены при различных предполагаемых ширинах состояния для трех режимов работы ускорителя (высокая интенсивность, высокое разрешение и «день 1»). На *Рис. 14.5* показаны полученные значения чувствительности в зависимости от предполагаемой естественной ширины распада для шести различных предположений о сечении сигнала, каждое для трех режимов работы ускорительного комплекса HESR.

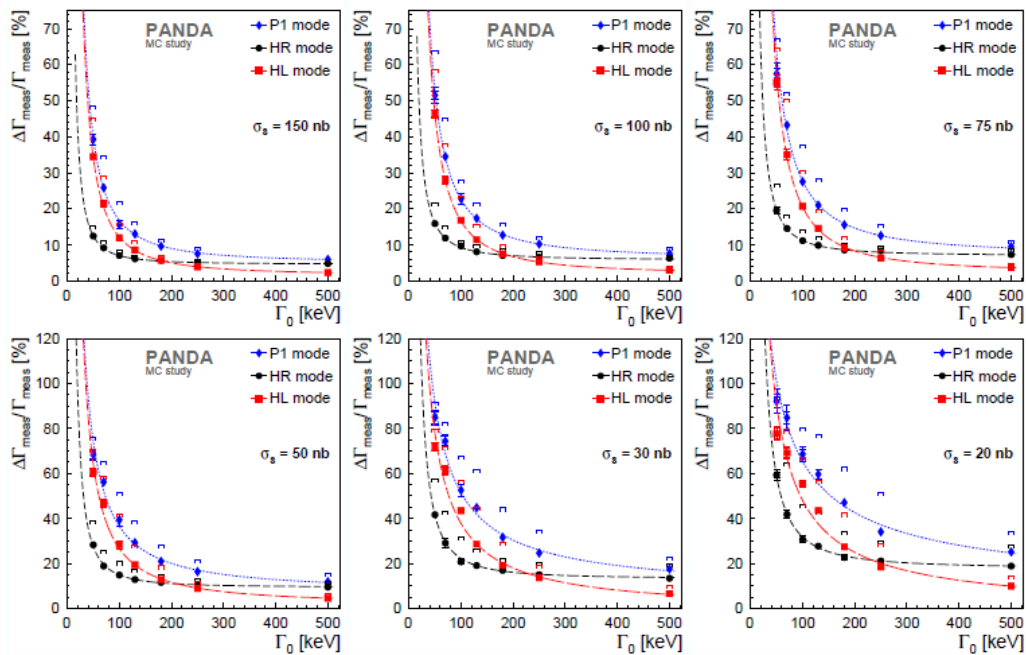


Рис. 14.5 – Чувствительность измерения ширины состояния X(3872) в зависимости от предполагаемой естественной ширины распада для шести различных предположений о сечении сигнала, каждое для трех режимов работы ускорительного комплекса HESR

Точность относительного измерения ширины  $\Delta\Gamma_{\text{meas}}/\Gamma_{\text{meas}}$  для состояния X(3872) на уровне  $3\sigma$  достигается для предполагаемой ширины естественного распада, начиная примерно с 40 кэВ (в режиме с высоким разрешением), что позволит определить, является ли данное состояние много-кварковым или молекулой.

#### 14.2.2 Тестирование и оптимизация дизайна силовой структуры центрального электромагнитного калориметра типа баррель

В 2019 году проводились работы как по подготовке к тестам на пучке полномасштабного прототипа, так и по оптимизации дизайна силовой конструкции барреля ЦЭМК. Ранее на созданном совместно с немецкими партнёрами рабочем участке в Университете г. Гиссена были собраны все 18 модулей различной геометрии, составляющие сектор барреля, которые с помощью специальных высокоточных приспособлений, сконструированных в ИФВЭ, были аккуратно закреплены на общей несущей балке, изготовленной из высокопрочного алюминиевого сплава. При разработке конструкции балки было необходимо найти компромиссное решение для двух противоречащих друг другу технических условий: минимальные деформации балки под нагрузкой модулями с тяжёлыми кристаллами, общим весом  $\sim 1$  тонна, при максимально возможном свободном пространстве внутри неё для размещения электронного оборудования и кабелей. В ИФВЭ были выполнены прочностные расчёты этой балки, на основании которых стало понятно, что при одновременном выполнении столь жёстких требований отдельный сектор, закрепленный с торцов, будет испытывать опасные деформации, и для дальнейшей работы с ним необходимо дополнительное его усиление. В то же самое время, деформации секторов, скрепленных между собой в составе барреля, находятся в допустимых пределах. Было принято решение произвести дополнительные прочностные расчёты, по результатам которых разработать, изготовить и испытать так называемую технологическую балку, представляющую собой усиленный швеллер, который на время окончательной сборки и испытания сектора крепится

к силовой балке вместо крышки и остаётся в присоединённом состоянии до момента полного окончания сборки барреля.

В феврале 2019 в Университете г. Гиссена была впервые проведена операция перемещения частично собранного сектора с помощью технологической балки (Рис. 14.6) на специальное поворотное устройство, предназначенное для его окончательной сборки. Окончательная сборка включает установку оптических волокон мониторинговой системы, переднего термостабилизирующего экрана и некоторых других компонентов, которые невозможно установить при нахождении сектора в сборочном стапеле.

Испытания прототипа с использованием космических мюонов также планируется проводить на данном поворотном устройстве.



Рис. 14.6 - Перенос сектора в сборе с технологической балкой на поворотное устройство для тестов

Поскольку как мониторинговая система, так и система охлаждения сектора находятся в стадии разработки, главной целью на данном этапе была верификация прочностных расчётов отдельного сектора в сборе с технологической балкой. Для этой цели была разработана специальная процедура измерений геометрии сектора по узлам измерительной сетки с помощью бесконтактной контрольно-измерительной машины (КИМ). Измерения проводились при различных угловых положениях сектора (Рис. 14.7).

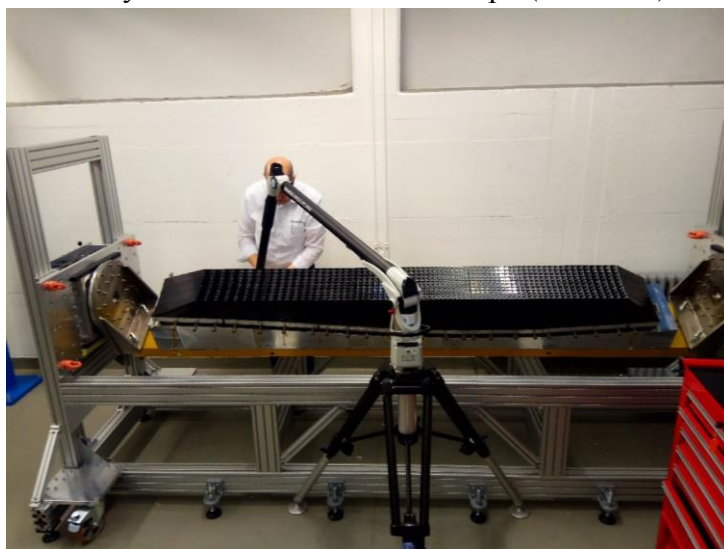


Рис. 14.7 – Измерения геометрии сектора с помощью КИМ

По результатам измерений был составлен протокол (Рис. 14.8), содержащий анализ полученных данных, который подтвердил правильность предварительных расчётов напряжённо-деформированного состояния сектора, зафиксированного на технологической балке.

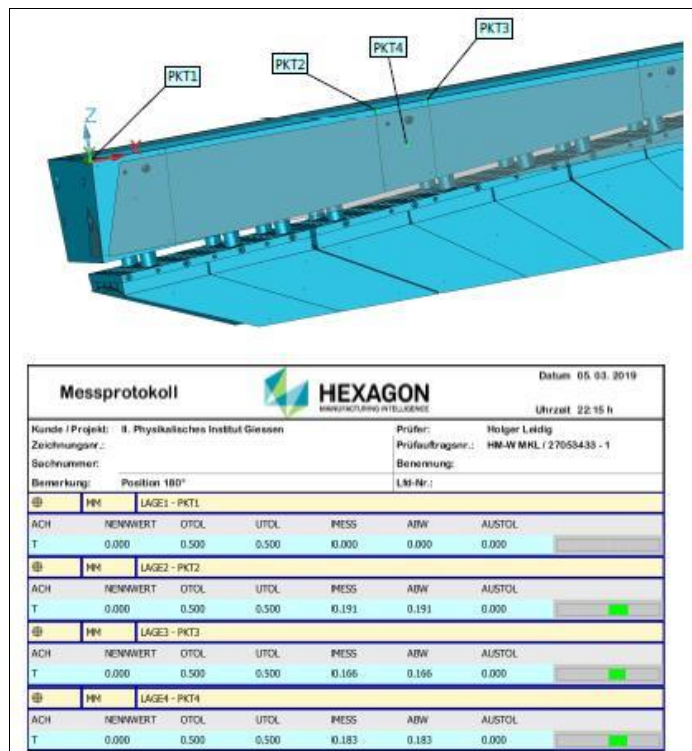


Рис. 14.8 – Одна из страниц протокола измерений.

Таким образом, проведённые испытания показали, что как конструкция балки, реализованная в прототипе, так и способ перемещения сектора для его окончательной сборки, тестов и хранения, являются удачными.

В структуре барреля есть два сектора, отличающиеся от остальных тем, что через них будет проходить труба мишенной станции. Предложение по техническому решению данной задачи представлено на Рис. 14.9.

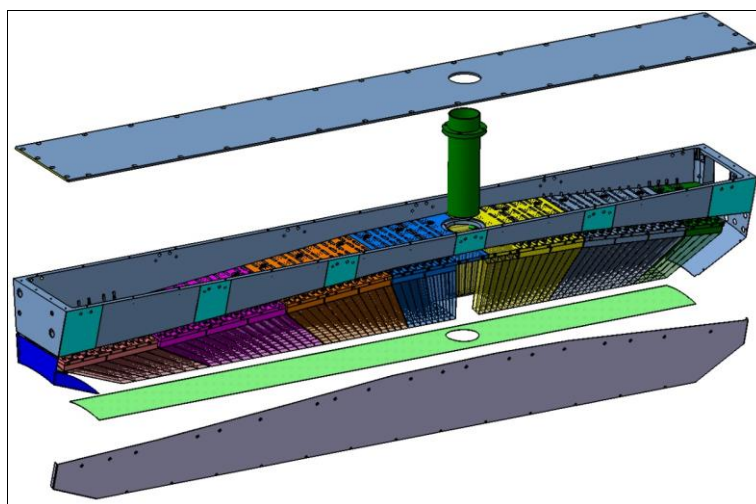


Рис. 14.9 – Сектор барреля с отверстием для трубы мишенной станции



Основная конструктивная проблема заключается в том, что труба пересекает тёплую и холодную зоны сектора, при этом, кроме теплоизоляции, необходимо предусмотреть герметичность уплотнений на границах продуваемого сухим азотом холодного объёма с кристаллами.

Для решения этих задач в конструкцию сектора вводится труба с внутренним диаметром 100 мм с уплотнительным фланцем, при этом два центральных модуля с кристаллами предлагается не устанавливать совсем. Таким образом, внутри несущей балки в этом месте появится пространство для укладки вокруг трубы кабелей, идущих из дальнего конца сектора. Материал трубы должен обладать высоким тепловым сопротивлением для минимизации тепловых потерь. Таковым может служить, например, стекловолоконный пластик.

В отчётном году в мастерских Университета г. Гиссена был изготовлен полный составной макет балки из пластиковых листов, 3D-модель которого и рабочие чертежи были разработаны в конструкторском отделе ИФВЭ ранее (Рис. 14.10).



Рис. 14.10 – Макет балки из пластиковых листов закреплён на модулях с кристаллами

Целью создания макета являлось практическое решение задачи по оптимизации расположения сквозных пазов в днище балки, предназначенных для вывода гибких печатных плат усилителей сигналов с полупроводниковых лавинных фотодиодов, с учётом требований по теплоизоляции балки и размещения внутри неё плат электроники.

Немецкие коллеги разработали адаптеры для крепления коммутационных печатных плат внутри балки (Рис. 14.11). Эти адаптеры имеют довольно сложную конструкцию, так как их дополнительной функцией является герметизация пазов для предотвращения потерь сухого азота, циркулирующего в холодном объёме сектора. Конструкция макета балки учитывает требование возможности крепления этих адаптеров по всей длине сектора. При установке адаптеров в разных местах макета было наглядно показано, что для практической

реализации данного технического решения потребуется сильно уменьшать толщину боковых стенок балки на периферии, существенно ослабляя её механическую прочность. Более того, для герметизации пазов в этих местах разработанная конструкция адаптера не подходит. Это происходит в силу того, что из-за проекционной геометрии расположения кристаллов в барреле, ширина днища балки уменьшается от центральных модулей к периферийным.

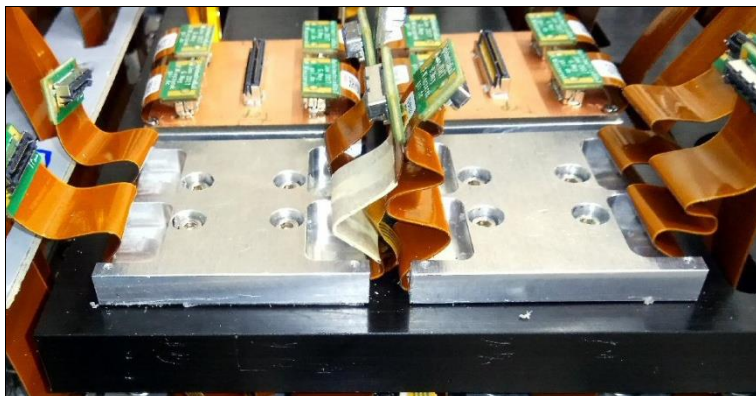


Рис. 14.11 – Адаптеры для крепления коммутационных печатных плат внутри силовой балки

Инженеры ИФВЭ предложили разработать и изготовить заглушки в виде колец из мягкой резины (Рис. 14.12), которые легко помещаются в пазы на определённую глубину и сверху дополнительно фиксируются силиконовым герметиком вровень с плоскостью днища балки. Таким образом, пазы с проходящими через них гибкими платами оказываются полностью герметизированными, а сами гибкие платы будут иметь достаточную свободу при коммутации.

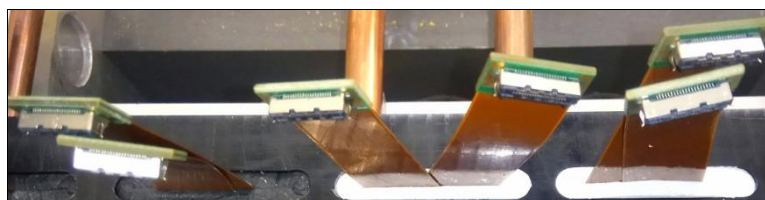


Рис. 14.12 – Вариант герметизации пазов заглушками из мягкой резины

Обсуждение и тестирование предложенного способа с использованием различных материалов для выбора наиболее подходящего было проведено инженерами из ИФВЭ совместно с немецкими партнёрами в Университете г. Гиссена. Принятие окончательного технического решения, которое имеет влияние на дизайн силовой балки, ожидается в ближайшее время. После этого все сложные задачи, связанные с верификацией конструкции несущей балки сектора барреля, будут считаться решёнными, и Конструкторский отдел ИФВЭ сможет начать работы по подготовке рабочих чертежей силовой балки для массового производства.

Особое внимание в 2019 году Сотрудничество ПАНДА уделяло вопросам интеграции детекторов. В июне во время очередного совещания Сотрудничества обсуждению данной проблемы был посвящён отдельный рабочий семинар, на котором руководители групп, ответственных за создание детекторов установки ПАНДА, представляли подробные планы сборки своих детекторов в экспериментальном зале установки ПАНДА, расположенного на

накопительном кольце антипротонов HESR. В ходе этого мероприятия были определены требования различных групп по необходимым сервисам, предоставляемым ФАИР, ресурсам рабочей силы, пространственным ограничениям. Результатом семинара стало составление предварительного детального плана сборки установки ПАНДА с указанием последовательности операций, порядка взаимодействия между группами и оценкой необходимого времени. В дальнейшем данный план будет только корректироваться с учётом вновь появляющихся требований.

Во всех мероприятиях Сотрудничества ПАНДА принимали участие сотрудники ИФВЭ, четверо из которых входят в различные руководящие структуры эксперимента ПАНДА. На сессиях электромагнитной калориметрии, интеграции и механики регулярных совещаний Сотрудничества ПАНДА были представлены презентации о ходе работ, за которые отвечает ИФВЭ. На заседаниях Совета Сотрудничества ПАНДА представители ИФВЭ принимали активное участие в обсуждении насущных проблем, возникающих в ходе работы большого международного коллектива над проектом. Двое сотрудников ИФВЭ, входящих в состав менеджмента ПАНДА, приняли участие в мероприятии, регулярно проводимом в начале очередного календарного года для развития общего стратегического плана работ.

#### 14.3 Работы ПИЯФ по подготовке времяпролетного детектора высокого разрешения

Чтобы выполнить намеченную физическую программу, детектор эксперимента ПАНДА должен обеспечить идентификацию частиц (лептонов, мюонов, пионов, каонов, протонов, и т.д.) в широком диапазоне телесного угла и энергий частиц. Информация о старте события является абсолютно необходимой для восстановления топологии события, идентификации частиц и дальнейшего offline анализа.

В эксперименте ПАНДА детектором, фиксирующим момент регистрации частицы (time stamp) в FS с точностью лучше 100 пс, является стенка сцинтилляционных счетчиков FToF wall. Группа ПИЯФ несет ответственность за разработку и поставку этого детектора.

Ниже перечислены основные требования, которым должен отвечать FToF wall детектор:

- Располагаться на расстоянии 7.5 м от мишени
- Иметь временное разрешение не хуже 100 пс
- Полностью перекрывать аксептанс FS. Отсюда размеры стенки 5.6 м (ширина) x 1.4 м (высота)
- Устойчиво работать при максимальной светимости ( $2 \times 10^{32}$ )
- Иметь широкий динамический диапазон регистрации от релятивистских частицы до медленных протонов с энергией 50 МэВ.

НИЦ «Курчатовский Институт» - ПИЯФ является ответственным и единственным исполнителем проекта времяпролетного детектора высокого разрешения (FToF). Координатор работ от НИЦ «Курчатовский Институт» - ПИЯФ – доктор физ. мат. наук, профессор Белостоцкий Станислав Львович.

Исходя из технических условий, было принято решение построить детектор из коммерчески доступных элементов: быстрых ФЭУ и высококачественных пластических сцинтилляторов. FToF wall имеет модульную структуру (Рис. 14.13). Каждый модуль состоит

из пластикового сцинтиллятора 1.4 м высотой, 2.5 см толщиной (вдоль пучка ускорителя) и шириной 5 см (центральная часть стенки) или 10 см (левая и правая части стенки). Выбор размеров пластиковых сцинтилляторов оптимизировался в процессе испытания прототипов модулей на протонном пучке в основном исходя из требований к временному разрешению. Поперечный размер модуля (5 см или 10 см) выбирался, следуя условию допустимой счетной загрузки на модуль не более 1 МГц. В качестве материала сцинтилляторов выбран Bicron-408 (или EJ200) со следующими основными характеристиками: время нарастания сигнала 0.9 пс, ширина световой вспышки 2.5 пс, длина затухания 210 см.

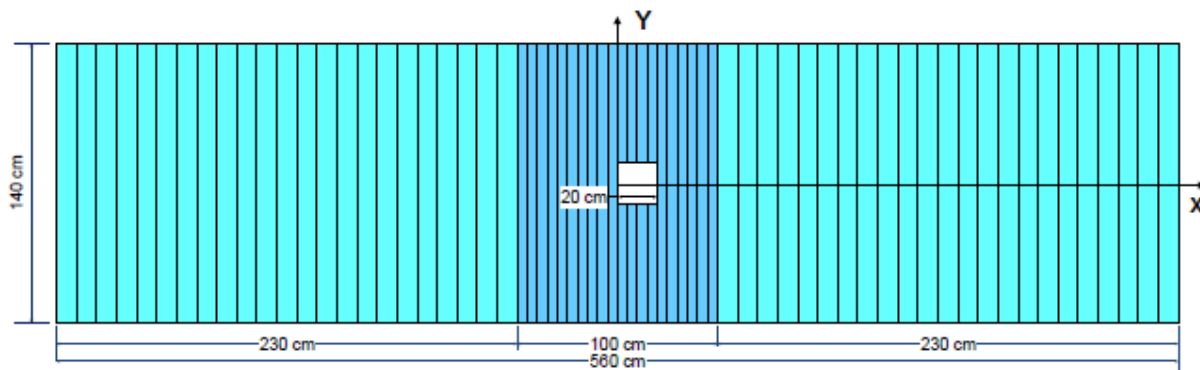


Рис. 14.13 – Схематический вид сцинтилляционной стенки FToF wall, ось X перпендикулярна к пучку ускорителя NESR, ось Y-вертикальная, перпендикулярная к оси пучка и X

Испытания прототипов фотодетекторов производились на тест станции с помощью радиоактивного источника  $^{90}\text{Sr}$ . Наилучшее собственное временное разрешение (около 40 пс) было получено для ФЭУ фирмы Хамаматсу: Hamamatsu R4998 1'' и R2083. 2''.

Модуль в сборе представлял собой сцинтилляционную пластину, световая вспышка в которой регистрировалась двумя ФЭУ, установленными на каждом конце пластины. Испытания модулей-прототипов производились на протонных пучках ускорителей ПИЯФ (1 ГэВ) и ИКР в Юлихе (3 ГэВ).

На ускорителе в ПИЯФ сцинтиллятор облучался узким пучком с шириной пятна 1-2 мм. Облучение производилось в разных точках вдоль длины сцинтиллятора с шагом 20 см. Временное разрешение в каждой точке определялось как среднее взвешенное по измерениям на каждом конце сцинтиллятора. Среднее взвешенное практически не зависело от положения пучка. Основные выводы относительно практического использования прототипов в эксперименте даны ниже.

- Оба прототипа могут обеспечить временное разрешение существенно лучше 100 пс.
- Оптимальная толщина пластика - 2.5 см была определена экспериментально.
- Была измерена средняя скорость распространения фотонного сгустка: 0.169 мм/пс; время пройти от одного края сцинтиллятора до другого (1400 мм) 8273 пс. Для обеспечения высокого временного разрешения положение трека частицы (hit position) должно независимо определяться с разрешением не хуже 2 мм. Эта задача решается в детекторе ПАНДА с помощью трековой системы Forward Tracking.
- В варианте *mean time* предыдущее требования можно опустить, но при этом временное разрешение может ухудшиться до 100пс.

Окончательные результаты испытания прототипов представлены в Табл. 14.1.

Табл. 14.1 – Результаты испытания прототипов.

Scintillation slab dimensions (cm)	PMT	Timing resolution $\sigma$ (ps)	Comment
140 × 10 × 2.5	Hamamatsu R2083 (both ends)	63	Recommended for a prototype for the FToF wall
140 × 5 × 2.5	Hamamatsu R4998 (both ends)	60	Recommended for a prototype for the FToF wall
140 × 2.5 × 2.5	Hamamatsu R4998 (both ends)	43	Variant of prototype with smaller scintillator width
140 × 5 × 1.5	Hamamatsu R4998 (both ends)	≈ 88	Projected originally for the FToF wall

Проект пикосекундного сцинтилляционного детектора, основные идеи которого изложены выше, был представлен в виде Технического проекта (TDR). Подготовленный документ был одобрен сотрудничеством ПАНДА в декабре 2017 года. Весной 2019 года после доработки он был официально одобрен научным советом и администрацией ФАИР.

Работы по временным испытаниям больших пластических сцинтилляторов, а также по оптимизации электроники продолжаются. Для получения пикосекундных импульсов используется UV лазер PiLas, технические характеристики которого приведены в Табл. 14.2.

Табл. 14.2 – Характеристики пикосекундного UV лазера

	PiLas
Center wavelength	375 nm - 2 $\mu$ m
Pulse duration	20 ps - 1 ns variable
Pulse peak power	25 - 1000 mW
Pulse repetition rate	single shot - 120 MHz
Output	free space or fiber output
PER	> 23 dB
Timing Jitter	< 3 ps rms
Warm-up time	< 5 minutes
Size laser head	95 × 31 × 147 mm <sup>3</sup>
Size control unit	235 × 88 × 326 mm <sup>3</sup>
Power consumption	< 15 W
Weight laser head	0.45 kg
Weight controller	2.5 kg

Великолепные параметры лазера предоставляют возможности прецизионных исследований на пикосекундном уровне. Существенно, что структура световой вспышки, производимой UV лазером в сцинтилляторе, практически тождественна той, которая возникает при облучении релятивистскими частицами. Предполагается, что лазер будет использоваться при массовом производстве модулей детектора.

На Рис. 14.14 показано экспериментальное оборудование для исследования временных характеристик сцинтилляторов.

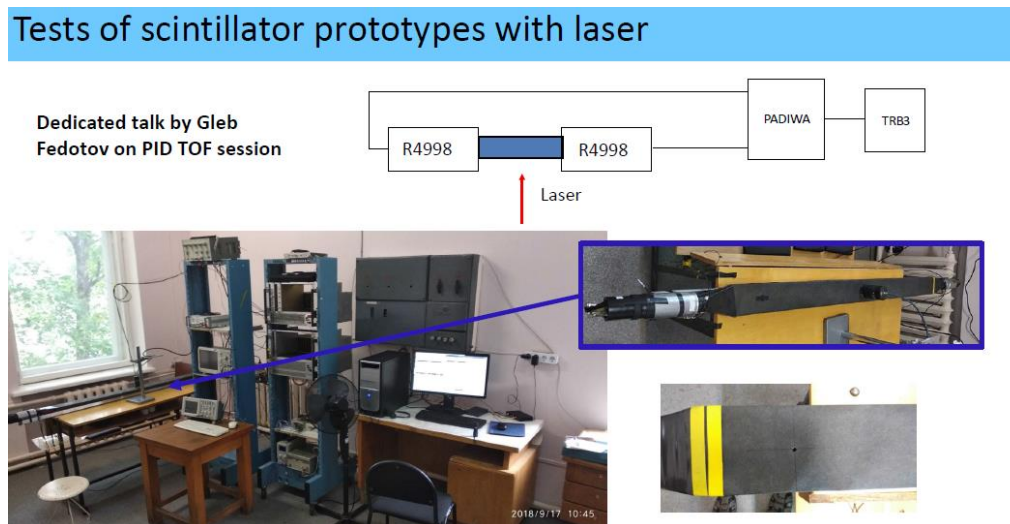


Рис. 14.14 – Экспериментальное оборудование для исследования временных характеристик сцинтилляторов

Первые измерения с лазером подтвердили результаты испытаний прототипов, полученные ранее.

#### 14.4 Работы 2019 г по оптимизации детектора FToF

В 2019 году в работах по оптимизации детектора FToF wall с помощью стенда на базе пикосекундного лазера получены следующие результаты:

- Тест пластины BC408 размером 140x10x2.5 см<sup>3</sup> с использованием пикосекундного лазера закончен. Измерения с новой пластиной EJ-200 с большой длиной затухания подготовлены. EJ-200 предполагается использовать для массового производства.
- Оптимальные (цена/ качество) ФЭУ Hamamatsu R13435 испытаны. Показано, что для пластины, оснащенной двумя ФЭУ R13435, разрешение лучше 60 ps может быть получено, если положение трека, проходящего через пластину, измерено с точностью до 2 мм.
- Показано, что разрешение 90 ps может быть получено без информации о положении трека – meantime вариант.
- Готовится проект договора на изготовление детектора FToF wall.

Таким образом, завершён большой этап работы по проектированию прецизионного сцинтилляционного детектора FToF wall. TDR переднего времяпролетного детектора одобрен сотрудничеством ПАНДА и принят к исполнению администрацией ФАИР. Работы по оптимизации детектора с помощью пикосекундного лазера продолжаются в ПИЯФ. Произведен окончательный выбор ФЭУ и типа пластического сцинтиллятора для детектора FToF wall. Группа практически готова к построению детектора в полном объеме.

#### 14.5 Предложение поиска легкого пентакварка в эксперименте ПАНДА.

Группой НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ подготовлено предложение поиска легкого пентакварка в эксперименте ПАНДА. Интерес группы ПИЯФ к поиску такого легкого пентакварка неслучаен, именно работы ученых ПИЯФ легли в основу прогнозов и программ исследования этого состояния (D. Diakonov, V. Petrov, M. Polyakov. “Exotic anti-decuplet of baryons: prediction from chiral solitons”, Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei, 1997, Vol. 359, no.3, p.305-314). Предыдущие исследования этого состояния дали противоречивые ответы (в эксперименте в SPRING-8 обнаружено указание на существование пентакварка  $\Theta(1540)$ , а в эксперименте CLAS данное состояние не обнаружено), тогда как ЛНСб обнаружил кандидата в тяжелые пентакварки.

Предложена модель реакции эксклюзивного рождения пентакварка (В.Петров, С. Манаенков) и дана оценка сечения. Подготовлен генератор для этого процесса и проведено моделирование методом Монте-Карло с целью изучения эффективности регистрации и оценки выходов этой реакции. На Рис. 14.15 показан полученный при моделировании массовый спектр кандидатов в пентакварк (моделирование выполнено для эксклюзивного рождения пары пентакварков).

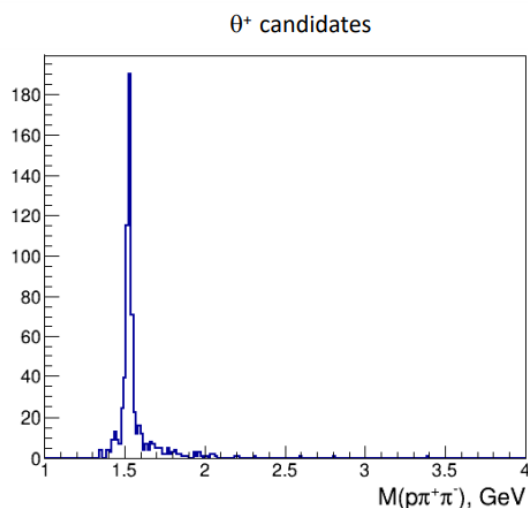


Рис. 14.15 –Массовый спектр кандидатов в пентакварк, полученный при моделировании

Предсказано достаточно большое сечение рождения (примерно 1.8  $\mu\text{b}$  для ширины  $\Gamma = 1$  МэВ). Эффективность регистрации составляет 6%.

#### 14.6 Работы ИТЭФ по подготовке корпускулярной мишени

В рамках участия в международном проекте ПАНДА/ФАИР в ИТЭФ создается криогенная корпускулярная мишень Pellet Target (Рис. 14.16). Данная мишень предназначена для эксперимента на пучке антипротонов. Эффективная плотность мишени должна быть  $> 10^{15}$  atoms/cm<sup>2</sup>, диаметр пеллетов 15-20 мкм, частота генерации  $\geq 150$  кГц.

В 2019 году проводились регулярные испытания установки с целью улучшения конструкции и определения оптимальных параметров для устойчивых режимов генерации микромишеней. В результате проведенных тестов набрана большая статистика данных по температурным распределениям в зависимости от давлений и режимов работы.

В результате оптимизации параметров получены режимы в камере тройной точки, позволившие получить монодисперсный распад при многочасовой работе установки на сопле диаметром 20 мкм, частотой 465 кГц (Рис. 14.17).



Рис. 14.16 – Фотография прототипа криогенной корпускулярной мишени Pellet Target

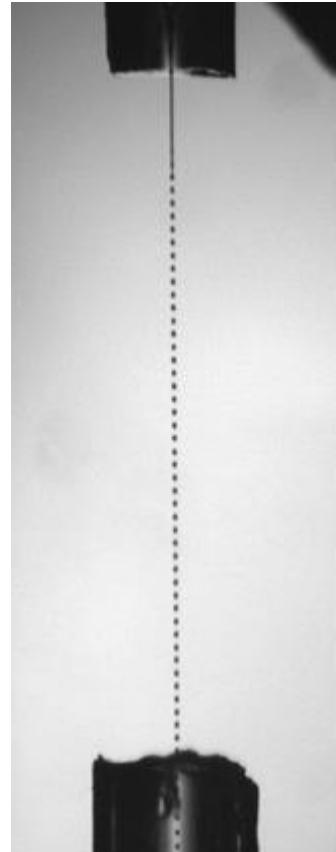


Рис. 14.17- Монодисперсная струя жидкого водорода

По результатам обработки полученных данных определено направление дальнейшего улучшения конструкции. Проведена подготовка к проведению измерений в камере рассеяния (Рис. 14.18) изготовлены скиммер, опускной участок, система диагностики в области камеры рассеяния, ловушка.



Рис. 14.18 – камера рассеяния с системой диагностики



Проводится подготовка материалов для Технического проекта (TDR). Для подготовки проекта TDR проводится 3-Д моделирование криостата (Рис. 14.19) и математическое моделирование процессов тепломассопереноса в камере тройной точки методом Монте-Карло.

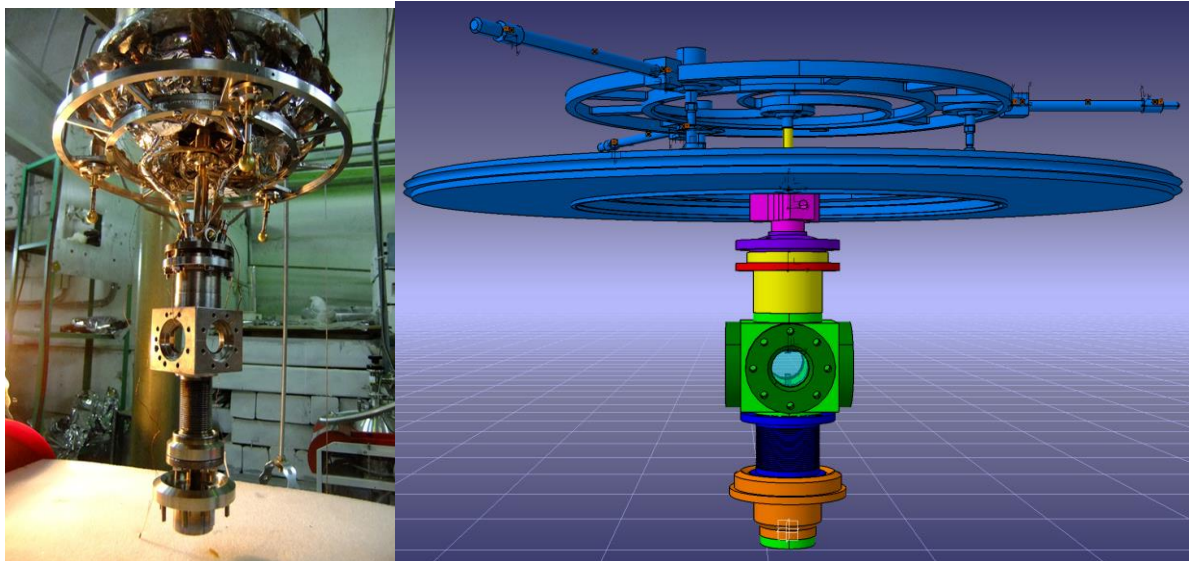


Рис. 14.19 – 3D модель камеры тройной точки с системой юстировки и фотография действующей модели

На Рис. 14.20 показаны расчеты данного моделирования.

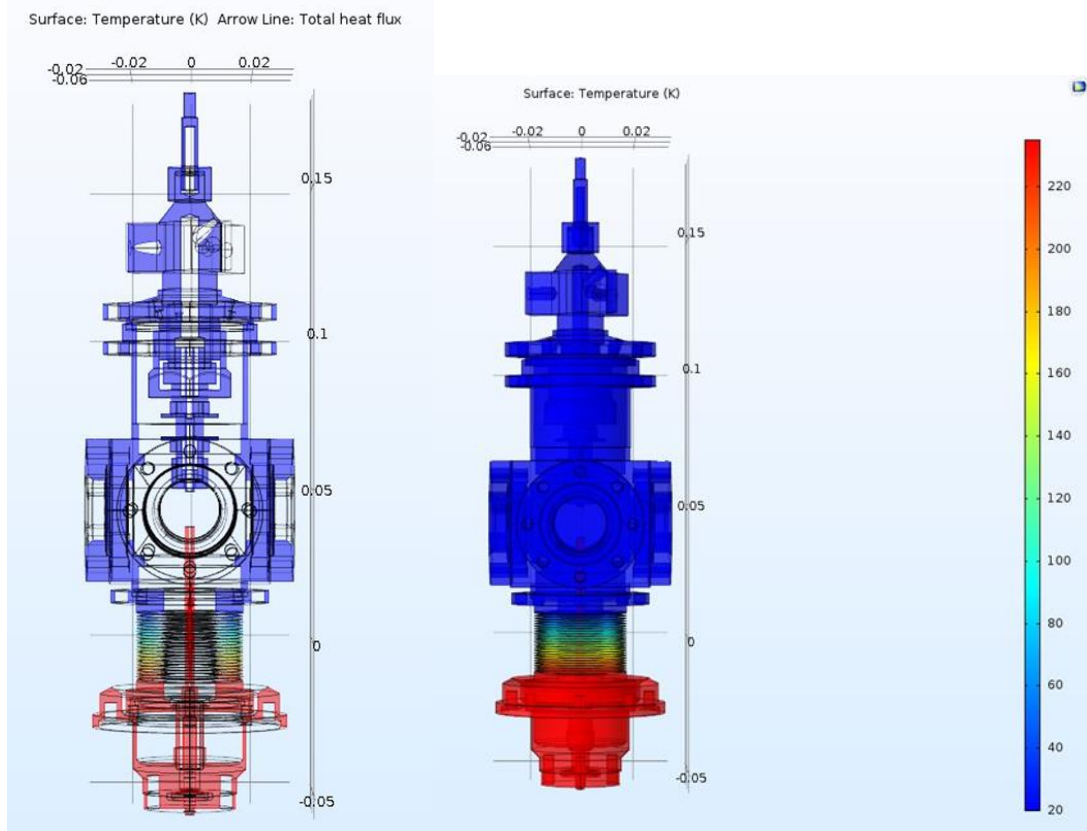


Рис. 14.20 – Расчеты поля температур

## 14.7 Приложение А.

Достиженные при выполнении работ по проекту показатели отражены в Табл. 14.3

Табл. 14.3 Показатели работ по проекту

	ИФВЭ	ПИЯФ	ИТЭФ	ИТОГО
Всего участвовало в работах	23	7	14	44
Из них молодых	7	1	6	14
Всего участвовало в работах в Германии	9	2	2	13
Из них молодых	0	1	0	1
Число студентов и аспирантов	3	0	2	5
Число диссертаций	0	0	0	0
Число докладов	1	0	0	1
Число публикаций	1	0	0	1

Список докладов на Международных конференциях от имени сотрудничества ПАНДА в 2019 г. - три:

1. В. Кристи Н.М., Панюшкина А.Н., Панюшкин В.А., Герасимов А.С., Чернецкий В.Д.; Расчет распределения температур конденсатора и камеры тройной точки криогенной корпускулярной мишени для эксперимента PANDA; МКТЭФ-2019, НИЦ “Курчатовский Институт” - ИТЭФ, Москва 25-28 ноября 2019 г
2. Панюшкин В.А., Балануца П.В., Богданов А.В., Канцырев А.В., Герасимов А.С.; Разработка системы оптической диагностики и системы юстировки корпускулярной капельной мишени эксперимента PANDA; МКТЭФ-2019, НИЦ “Курчатовский Институт” - ИТЭФ, Москва 25-28 ноября 2019 г
3. Панюшкина А.Н., Чернецкий В.Д., Панюшкин В.А., Герасимов А.С., Кристи Н.М.; Разработка и оптимизация конструкции криогенной корпускулярной капельной мишени для эксперимента PANDA; МКТЭФ-2019, НИЦ “Курчатовский Институт” - ИТЭФ, Москва 25-28 ноября 2019 г

Список опубликованных статей в 2019 г. - четыре:

1. Studying Technical design report for the P<sup>-</sup>ANDA Barrel DIRC detector, B. Singh (Aligarh Muslim U.) et al.. 2019. 155 pp., Published in J.Phys. G46 (2019) no.4, 045001, DOI: 10.1088/1361-6471/aade3d
2. Precision resonance energy scans with the PANDA experiment at FAIR: Sensitivity study for width and line-shape measurements of the X(3872), PANDA Collaboration (G. Barucca (Ancona, Politech. U. delle Marche) et al.). Published in Eur.Phys.J. A55 (2019) no.3, 42, DOI: 10.1140/epja/i2019-12718-2

3. The Electromagnetic Calorimeter for the  $P^-$  ANDA Target Spectrometer, PANDA Collaboration (Markus Moritz et al.). 2019. 8 pp. Published in J.Phys.Conf.Ser. 1162 (2019) no.1, 012025, DOI: 10.1088/1742-6596/1162/1/012025
4. Data Acquisition and Diagnostic System for Prototype of PANDA Pellet Target., A.V. Kantsyrev, V.A. Panyushkin, P.V. Balanutsa, A.V. Bogdanov, A.S. Gerasimov, A.A. Golubev, V.I. Demekhin, A.G. Dolgolenko, N.M. Kristi, E.M. Ladygina, E.V. Lushchevskaya, P.V. Fedorets, V.D. Chernetskii, A.N. Panyushkina, V.V. Vasiliev, M. Büscher. Physics of Atomic Nuclei, 2019, Vol. 82, No. 12, pp. 1–7.

На рабочих совещаниях Сотрудничества ПАНДА сделано более 20 докладов по тематике проекта.

#### 14.8 План работ в 2020 г. и запрашиваемые ресурсы

Основными задачами 2020 года будут:

- тестирование прототипов центрального и переднего электромагнитного калориметров и времяпролетного детектора;
- тестовые сборки детектора в Германии и исследование его механических и температурных свойств;
- интеграция центрального электромагнитного калориметра в общую инфраструктуру детектора, что требует совместных работ с различными экспериментальными группами;
- подготовка текста Технического проекта (TDR) корпускулярной мишени.
- 

Четыре участника проекта от ИФВЭ входят в различные руководящие структуры эксперимента ПАНДА, что требует их участия в Рабочих совещаниях сотрудничества ПАНДА и работе Совета по экспериментам ФАИР (ResourceReviewBoard).

Суммарное запрашиваемое количество ресурсов на проект ПАНДА на 2020 год составляет \$42 500.

Представлен отчет о выполненной работе группой НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ, участвующей в международном эксперименте по теме «Исследование свойств гиперонов в ядерной материи» на ускорителе COSY Исследовательского центра Юлих (Германия) за 2019 г. в эксперименте ANKE.

Целью совместного эксперимента НИЦ КИ-ИТЭФ и Института Ядерной физики (Юлих, Германия) является изучение модификации свойств странных мезонов и барионов в ядерной среде. Полученные до настоящего времени экспериментальные результаты по поиску эффектов модификации свойств адронов в барионной среде ограничены сектором легких псевдоскалярных и векторных мезонов. Дальнейшим развитием этих исследований является изучение свойств странных барионов (гиперонов) в ядерной материи. Согласно современным представлениям, модификация свойств адронов в сильно взаимодействующей среде связана с частичным восстановлением киральной симметрии КХД в плотной и (или) горячей барионной материи. Изменение масс и ширин адронов предсказано правилами сумм КХД, кирально-унитарной теорией и целым рядом феноменологических моделей. Особый интерес представляет изменение свойств странных мезонов и гиперонов. Их исследование может дать новую информацию о нетривиальных свойствах ядерной материи, связанных с кварковой структурой ядер. В сотрудничестве с Институтом Ядерной Физики Исследовательского центра Юлих (Германия) на установке ANKE был выполнен цикл экспериментов по изучению изменения свойств мезонов с открытой ( $K^-$ ) и скрытой ( $\phi$ ) странностью, образованных при облучении ядерных мишеней протонным пучком ускорителя COSY. В этих экспериментах также были получены данные о рождении странных барионов (гиперонов), информация о свойствах которых в ядерной среде полностью отсутствуют.

В 2019 году закончена обработка данных по образованию протонами легких гиперонов  $\Lambda(1116)$  на ядрах углерода, меди, серебра и золота, направленная на получение первых экспериментальных результатов о модификации свойств  $\Lambda$  гиперонов с ненулевыми импульсами в ядерной среде. Анализировались события совместного рождения  $\Lambda$  гиперонов и  $K^+$  мезонов в реакции  $pA \rightarrow K^+ \Lambda X$  при кинетической энергии протонов 2.83 ГэВ. Для идентификации гиперонов использовался канал их распада  $\Lambda \rightarrow p\pi^-$  ( $BR=64\%$ ). Двумерное распределение Армента-Подоланского (Рис. 15.1) демонстрирует высокое качество выделения гиперонов.

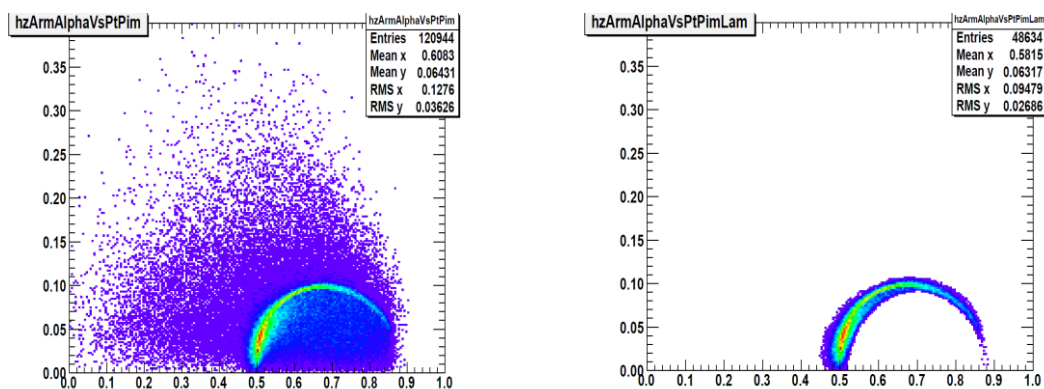


Рис. 15.1 – Идентификация распадов  $\Lambda \rightarrow p\pi^-$  до (слева) и после (справа) применения критериев отбора

В левой панели Рис. 15.1 показаны "сырые" данные, в которых события, соответствующие двухчастичному распаду  $\Lambda$ , видны на большом фоне неверно идентифицированных событий. Применение критериев отбора практически полностью удаляет фон, оставляя истинные события на половине эллипса с параметрами, соответствующими распаду  $\Lambda \rightarrow p\pi^-$  (правая панель Рис. 15.1).

Проведенное сравнение экспериментальных данных с предсказаниями модели [Paryev, E. Ya.; Hartmann, M.; Kiselev, Yu. T. *Chinese Physics C* 41, 124108 (2017) [Medium effects in  \$\Lambda K^+\$  pair production by 2.83 GeV protons on nuclei](#)] показало, что модель описывает дифференциальные сечения образования  $\Lambda$  гиперонов в области малых импульсов и переоценивает высокоимпульсную часть спектров, где основной вклад в сечения вносит канал прямого рождения пар  $K^+\Lambda$  на нуклонах ядра  $pN \rightarrow K^+\Lambda N$ .

Для описания образования пар  $K^+\Lambda$  на немассовых ядерных нуклонах в качестве входных данных в модели используются сечения их рождения на свободных протонах и нейтронах. Полное сечение реакции  $pp \rightarrow \Lambda K^+ p$  хорошо известно, в то время как экспериментальные данные о сечении  $pn \rightarrow \Lambda K^+ n$  в интересующей нас области энергий отсутствуют.

Модельные оценки отношения  $R$  сечений этих реакций лежат в широких пределах от 0.25 до 10. Первые вычисления сечений образования гиперон-каонных пар были выполнены с величиной  $R = 2.5$ , следующей из модели однопионного обмена. Дальнейшие расчеты показали, что наилучшее согласие с экспериментом достигается при значении  $R = 1$ , что может служить оценкой величины сечения  $pn \rightarrow \Lambda K^+ n$ .

Затем, после интегрирования по кинематическим параметрам регистрируемых  $K^+$  мезонов, были получены импульсные зависимости дифференциальных сечений образования  $\Lambda$  гиперонов на разных ядрах, приведенные на Рис. 15.2. Приведенные ошибки включают статистические и все систематические ошибки. Кривыми показаны результаты расчетов в модели спектральной функции с полными сечениями взаимодействия  $\Lambda$  гиперонов с ядерными нуклонами 22(fit), 30 и 50 мб.

Наблюдается неплохое согласие во всем измеренном импульсном диапазоне 1.2 - 2.95 ГэВ/с, кроме узкой области самых больших импульсов. Пик в этой области не удается объяснить ни взаимодействием продуктов реакции в конечном состоянии, ни так называемыми кинематическими отражениями.

Одним из возможных объяснений является образование двухнуклонных состояний. В системе центра масс реакции  $pN \rightarrow \Lambda K^+ N$  событиям образования  $\Lambda$  гиперонов с предельно большими импульсами у кинематической границы реакции соответствуют конфигурации, когда гиперон движется преимущественно по направлению падающего пучка протонов, а  $K^+$  мезон и нуклон  $N$  - в противоположном направлении с близкими скоростями.

Инвариантная масса таких конфигураций находится в пределах 2.32 - 2.42 ГэВ/с<sup>2</sup>, что с хорошей точностью совпадает с массой дибариона  $D^*$  равной 2.37 ГэВ/с<sup>2</sup>. Такой дибарион, как S-канальный резонанс, был недавно надежно наблюден коллаборацией WASA-at-COSY [Phys. Rev. Lett. 106, 242302 (2011); arXiv: 1402.6844 nucl-ex].

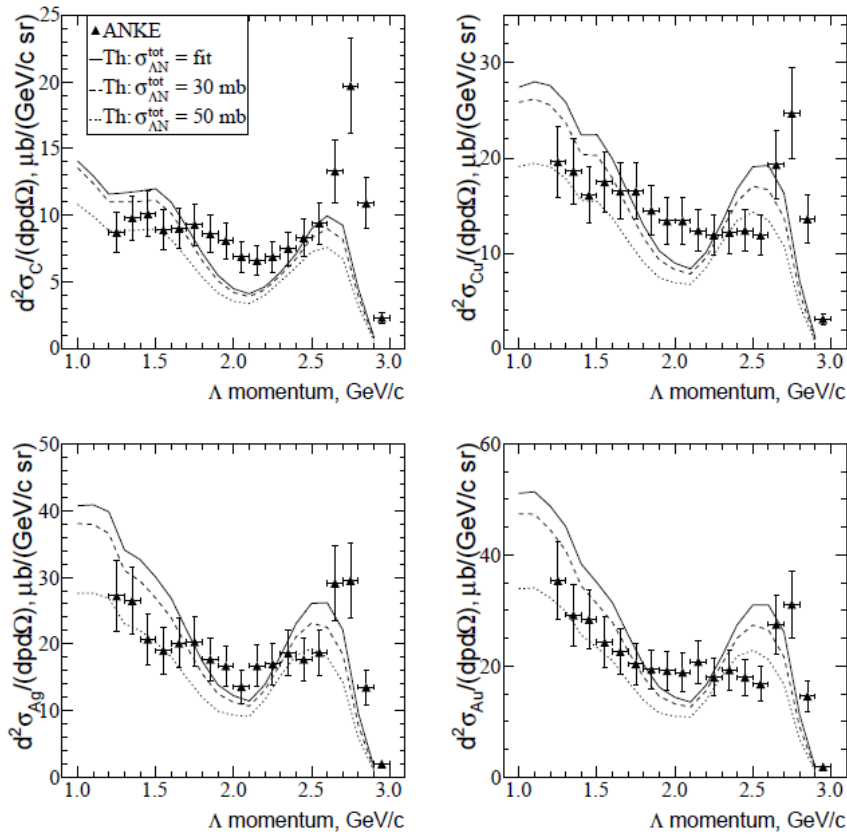


Рис. 15.2 – Импульсные спектры  $\Lambda$  гиперонов, образованных протонами с энергией 2.83 ГэВ на ядрах углерода, меди, серебра и золота

Зависимость сечений от массового числа ядра-мишени  $A$  содержит информацию о механизме реакции. Во всех импульсных интервалах эта зависимость хорошо описывается степенной функцией  $d\sigma/dpd\Omega = CA^\alpha$  с величиной показателя  $\alpha$  от 0.5 до 0.25. На Рис. 15.3 представлена проинтегрированная по измеренному диапазону импульсов зависимость сечений образования протонами гиперонов  $\Lambda(1116)$  на ядрах  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{108}\text{Ag}$  и  $^{197}\text{Au}$ , нормированная на сечение на ядре  $^{12}\text{C}$ . Среднее значение  $\alpha=0.313$ , что указывает на преимущественное рождение пар  $\Lambda K^+$  на периферии ядер.

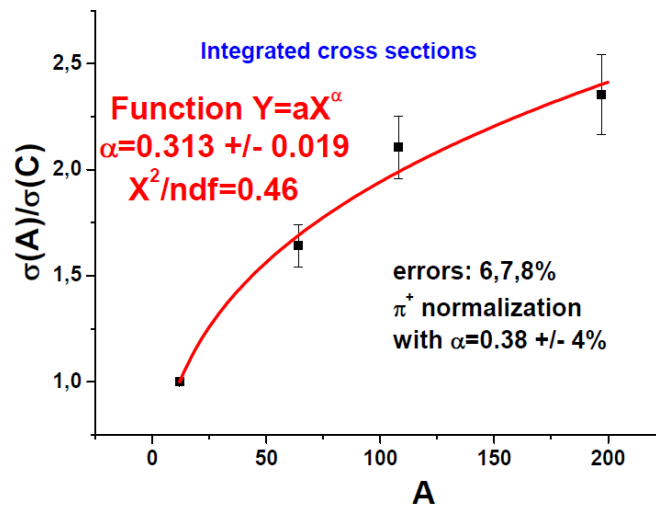


Рис. 15.3 – Зависимость интегральных сечений образования протонами гиперонов  $\Lambda(1116)$  на ядрах  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{108}\text{Ag}$  и  $^{197}\text{Au}$ , нормированная на сечение на ядре  $^{12}\text{C}$

В реакциях образования адронов на ядрах ядро одновременно служит и мишенью, и анализатором свойств рожденных частиц. При нормальной ядерной плотности влияние окружающей сильно взаимодействующей среды на свойства  $\Lambda$  гиперонов может быть описано комплексным оптическим потенциалом  $U=ReU+iImU$ , действительная часть которого определяет сдвиг их массы, а мнимая – их уширение в ядерной среде. Удвоенная мнимая часть потенциала  $2ImU= \Gamma$ . Ожидаемый сдвиг массы  $\Lambda$  мал и главный эффект среды состоит в увеличении ширины гиперонов. В приближении низкой плотности (low density approximation) ширина  $\Gamma$  в ядерной среде связана с сечением их взаимодействия с ядерными нуклонами  $\sigma_{\Lambda N}$  соотношением  $\Gamma=(h/2\pi)c\beta\sigma_{\Lambda N}\rho$ , где  $h$ -постоянная Планка,  $c\beta$ -скорость гиперона в системе покоя ядра,  $\rho$ - ядерная плотность.

Сравнение методом  $\chi^2$  экспериментальных сечений с модельными расчетами, приведенными на Рис. 15.2, показывает, что сечение  $\sigma_{\Lambda N}$  и, следовательно, ширина  $\Gamma$  гиперонов  $\Lambda(1116)$ , рожденных и распространяющихся в ядрах больше соответствующих величин в свободном пространстве. Количественная оценка величины эффекта модификации ширины гиперона  $\Lambda(1116)$  в ядерной среде находится в стадии уточнения. После некоторой доработки статья, содержащая результаты эксперимента, будет направлена в один из реферируемых журналов.

Основные работы на ускорителе COSY Исследовательского центра Юлих (Германия) завершены, однако программу физических исследований планируется продолжить в национальном исследовательском центре GSI (Германия) в рамках коллаборации HADES. Установка HADES (High Acceptance Di-Electron Spectrometer), расположенная на пучке ускорителя SIS-18 (Дармштадт, Германия), состоит из шести секторов сверхпроводящих магнитов, каждый из которых содержит детектор черенковских колец, электромагнитный калориметр, детекторы для трековых и временных измерений. Они обеспечивают идентификацию заряженных и нейтральных частиц в широком диапазоне импульсов, что позволяет изучать широкий круг процессов физики сильных взаимодействий, связанных с непertурбативной КХД. HADES будет частью установки CBM (Compressed Baryonic Matter), планирующей начало измерений на 2025 год после запуска ускорителя SIS-100.

На XXXVII митинге коллаборации HADES (Краков, сентябрь 2019) нами было представлено предложение по изучению модификации ширины тяжелого гиперона  $\Lambda(1520)$  в ядерной среде. Вычисление сечений инклюзивного образования  $\Lambda(1520)$  пионами на ядрах углерода и вольфрама было выполнено в рамках развитой нами модели рождения адронов на ядрах, основанной на ядерной спектральной функции. Показано, что величины как дифференциальных, так и полных сечений обладают достаточно высокой чувствительностью к полной ширине гиперона  $\Gamma$  в ядерной среде. Изменение сечений в зависимости от ширины достаточно сильное, что делает возможным её извлечение из имеющихся данных. Для этого планируется использовать имеющуюся статистику  $3 \cdot 10^8$  событий столкновений пионов с ядрами углерода и вольфрама. В середине 2019 года группа ИТЭФ получила доступ к данным и программам коллаборации. В 2020 году мы планируем получить первую оценку ширины  $\Lambda(1520)$  в ядерной среде.

Исследование свойств сильно взаимодействующей материи, находящейся в разных фазах, является одной из приоритетных задач физики сильных взаимодействий. Основным методом получения информации об этих свойствах является изучение реакций столкновений тяжелых ионов в широком диапазоне энергий от нескольких ГэВ (GSI) до ТэВ (LHC). В то время, как при высоких энергиях изучается область фазовой диаграммы, соответствующая

высокой температуре ( $T \approx 200$  МэВ) и барионному химическому потенциалу  $\mu \approx 0$ , эксперименты при низких энергиях направлены на исследование области низких температур ( $T \approx 20-30$  МэВ) и величин  $\mu$ , соответствующих барионной плотности, в 2-3 раза превышающей нормальную ядерную плотность  $\rho_0 = 0.16$  фм<sup>-3</sup>. Получение данных в неизученной области фазовой диаграммы при ещё больших плотностях является актуальной задачей современной физики сильных взаимодействий, поскольку в этой области ожидается переход холодной адронной материи в кварк-глюонную фазу.

На XXXVI митинге коллаборации HADES (Дармштадт, март 2019) группой ИТЭФ было представлено предложение о расширении исследований в область сверхвысокой барионной плотности в ядро-ядерных столкновениях, где динамика процессов определяется свойствами ядерной материи на малых ( $< 1$  ферми) межнуклонных расстояниях. Показано существование трех различных кинематических областей образования странных пар  $\Lambda K^+$  и  $\Lambda K^0_S$  во взаимодействиях ядер золота при энергии 2.4 ГэВ. Первая соответствует рождению пар в столкновениях одиночных ядерных нуклонов с нормальными ферми-импульсами  $\sim 250$  МэВ/с, вторая - случаю, когда нуклон одного из сталкивающихся ядер имеет нормальный ферми-импульс, а его партнер имеет импульс больше 250 МэВ/с. Наибольший интерес представляют события в третьей области, где их появление возможно только в случае, когда оба нуклона сталкивающихся ядер имеют импульсы, превышающие фермиевские. В этом случае оба нуклона входят в состав компактных двухнуклонных корреляций, и пар образование  $\Lambda K$  происходит в зоне, плотность которой больше плотности (2-3)  $\rho_0$ , ожидаемой при рождении пар нуклонами с нормальными ферми-импульсами. Ожидается, что при таких плотностях выходы странных частиц и их распределения по поперечному импульсу будут существенно отличаться от соответствующих характеристик в первой кинематической области. Рождение странных пар  $\Lambda K$  в столкновениях компактных двухнуклонных корреляций является редким процессом, однако проведенные оценки показывают, что использование огромной статистики ( $> 10^{10}$  событий), набранной в эксперименте HADES при изучении столкновений ядер золота, позволит найти достаточное количество сигнальных событий и получить новую важную информацию о свойствах сверхплотной ядерной материи и роли КХД в генерации ядерных сил на малых межнуклонных расстояниях. Такая информация не может быть получена ни в электрон-ядерных, ни в адрон-ядерных взаимодействиях. Более подробное описание предложений содержится в отчете российской группы коллаборации HADES.

Основные результаты, полученные в 2019 году:

- закончен анализ данных эксперимента по образованию  $\Lambda$  гиперонов протонами на ядерных мишенях и проведено их сравнение с расчетами в модели столкновений, описывающей свойства ядер спектральными функциями. Статья, содержащая результаты выполненного исследования, находится в стадии подготовки;

- на XXXVI митинге коллаборации HADES (Дармштадт, март 2019) представлено предложение о расширении исследований в область сверхвысокой барионной плотности в ядро-ядерных столкновениях, где динамика процессов определяется свойствами ядерной материи на малых ( $< 1$  ферми) межнуклонных расстояниях. Проведенные оценки показывают возможность изучения этой области путем анализа уже набранного большого количества событий столкновений ядер золота.

- на XXXVII митинге коллаборации HADES (Краков, сентябрь 2019) представлено предложение по изучению модификации ширины тяжелого гиперона  $\Lambda(1520)$  в ядерной



среде. Вычисления сечений образования  $\Lambda(1520)$  на ядрах, выполненные в рамках развитой нами модели рождения адронов в пион-ядерных взаимодействиях, показало достаточно высокую чувствительностью сечений к полной ширине гиперона  $\Gamma$  и продемонстрировало возможность её извлечения из имеющихся данных.

.Исследования по данной программе на ускорителе COSY Исследовательского центра Юлих (Германия) завершены.

Программа физических исследований группой НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ будет продолжаться в национальном исследовательском центре GSI (Германия) в рамках коллаборации HADES. Данная программа согласована, как с руководством и физическим сообществом сотрудничества HADES, так и с российскими участниками эксперимента.

### 15.1 Приложение А

- 1) Число специалистов ИТЭФ, участвовавших в проекте ANKE в 2019 г. – 3, из них в Германии – 2.
- 2) Число молодых специалистов (моложе 35 лет) – 1, из них в работах в Германии – 1.
- 3) Студенты не участвовали.
- 4) Число диссертаций, защищенных в рамках участия в работах центра – 0
- 5) Число докладов на международных конференциях от имени коллаборации, сделанных российскими учеными, – 0
- 6) Публикации в реферируемых журналах – 3, подготовленных статей – 1.
- 7) Количество дней в командировках: Ю.Т.Киселев-18, Э.Я.Парьев -35, А.Ю.Полянский-10.

Публикации 2019 года:

1. Yu.T.Kiselev, E.Ya.Paryev *Physics of Atomic Nuclei* 82, №6 551 (2019) Structure of nuclear matter at short distances.
2. E.Ya.Paryev, Yu.T.Kiselev *Nucl. Phys.* A992, 121622 (2019) Pion-induced production of  $\Lambda(1520)$  on nuclei near threshold.
3. E.Ya.Paryev *Nucl. Phys.* A988, 24 (2019) Near threshold  $\eta'$  meson production in  $\pi^-A$  reactions.

Представлен отчет о научно-исследовательской работе, выполненной в рамках проекта Российско-Германского сотрудничества по исследованию фундаментальных свойств материи по теме «KArlsruhe TRItium Neutrino experiment», краткое наименование KATRIN. Ответственный – зав. лабораторией, канд. физ.-мат. наук Н.А. Титов.

### 16.1 Эксперименты по поиску эффективной массы электронного нейтрино

Исследования направлены на решение фундаментальной проблемы измерения массы нейтрино. Цель работы – поиск эффективной массы электронного антинейтрино в бета-распаде трития. Впечатляющий прогресс исследования нейтринных осцилляций надежно продемонстрировал отличие от нуля массы нейтрино и позволил измерить расщепление массовых состояний нейтрино. При этом абсолютная шкала масс, т.е. общий сдвиг массовых состояний, остаётся неизвестной. Установление абсолютной шкалы массовых состояний нейтрино представляет важнейшее значение как для физики частиц, поскольку их малая масса указывает на новую физику за пределом Стандартной модели, так и для космологии, где сумма масс всех типов нейтрино играет заметную роль в эволюции крупномасштабных структур во Вселенной.

При исследовании абсолютной шкалы масс в лабораторных экспериментах, в обсуждаемом в настоящее время диапазоне выше 0,1 эВ, все типы нейтрино имеют одинаковую массу (см. Рис. 16.1) и наибольшую чувствительность имеют эксперименты с электронным нейтрино.

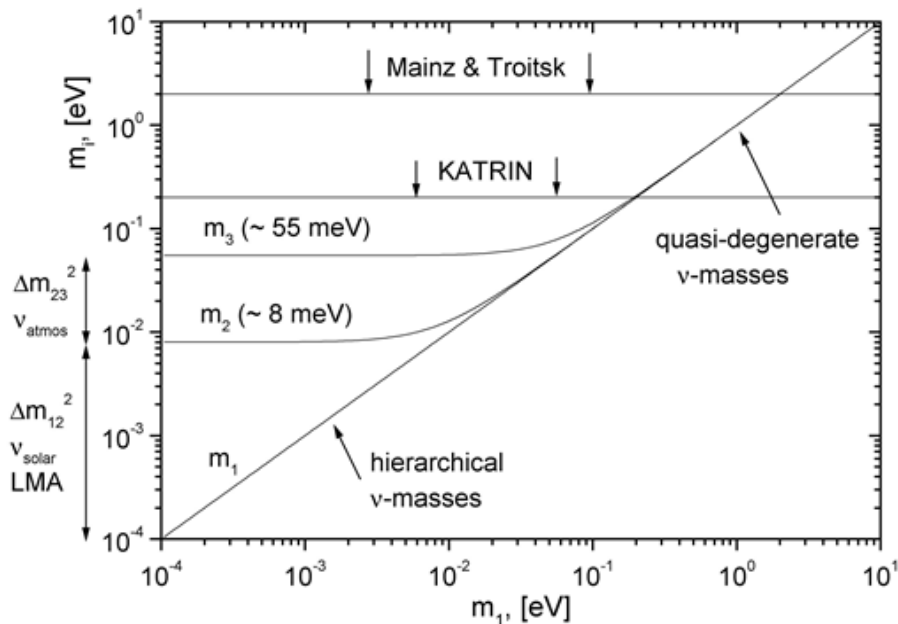


Рис. 16.1 – Масса «массовых состояний» нейтрино как функция массы легчайшего из них (прямая иерархия)

Наиболее продвинутыми в экспериментальном отношении лабораторными методами поиска массы электронного нейтрино является поиск двойного бета-распада (Майорановские нейтрино) и исследование кинематических ограничений в спектре одиночного бета-распада (Майорановские и Дираковские нейтрино). В свою очередь, в поиске массы нейтрино по

кинематическим ограничениям в конце спектра бета-распада лучшая чувствительность достигнута в экспериментах с тритием в Майнце и Троицке. Опубликованы близкие ограничения на верхний предел массы на уровне примерно 2 эВ.

Альтернативный подход к измерению массы электронного нейтрино основан на применении болометрических детекторов для регистрации полного энергосвечения в процессах бета-распада и К-захвата. Группа эксперимента MARE изучала возможность исследования бета-распада в рении-187. Принципиальной проблемой такого эксперимента является образование метастабильных состояний, искажающее наблюдаемый спектр бета-распада. В настоящее время группа эксперимента MARE переключилась на проект HOLMES по поиску массы электронного нейтрино в К-захвате в гольмии-163 (E. Ferri et. al. The status of the MARE experiment with  $^{187}\text{Re}$  and  $^{163}\text{Ho}$  isotopes. Physics Procedia 61 ( 2015 ) 227 – 231). Этот же процесс исследуется в эксперименте ECHO Collaboration (<https://www.kip.uni-heidelberg.de/echo/>).

Новый подход предложен в Project8 (<http://www.project8.org/>). Предлагается исследовать энергетический спектр распадных электронов путем измерения частоты их циклотронных колебаний в магнитной ловушке. В 2018 году в рамках Project8 удалось зарегистрировать единичные электроны из  $\beta$ -распада трития и представить результаты двухнедельных измерений спектра на [5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan.](#)

По состоянию на конец 2019 г. в классе экспериментов по поиску кинематических эффектов массы нейтрино, только проект КАТРИН по-прежнему ближе остальных к возможности улучшить ограничение на массу электронного антинейтрино.

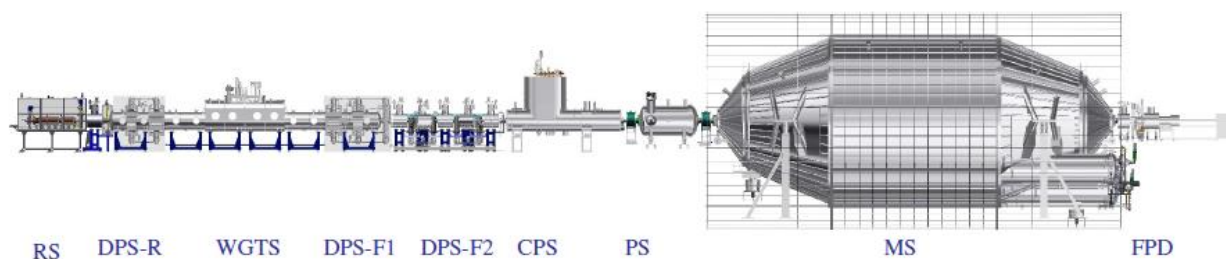
Следует упомянуть новую большую программу, предложенную для установки КАТРИН. Она состоит в поиске сигнала стерильных нейтрино в диапазоне масс от примерно  $1\text{эВ}/c^2$  до нескольких  $\text{кэВ}/c^2$  (<http://arxiv.org/abs/1409.0920>). В настоящее время, в результате обнаружения осцилляций нейтрино, считается установленным, что активные нейтрино представляют собой смесь трех состояний с определенной массой. Кроме того, есть основания предполагать существование дополнительных состояний, не участвующих во взаимодействиях в рамках Стандартной модели и называемых поэтому «стерильными». Эти состояния являются смесью массовых состояний отличных от входящих в состав активных нейтрино. Одновременно, естественно предположить существование небольшой примеси стерильных состояний в активных нейтрино. Общепринято, хотя и не подтверждено экспериментально, что в случае бета-распада на три активных массовых состояния, спектр электронов распада представляет собой взвешенную сумму спектров распада на каждое из этих трех состояний. Если в активных нейтрино существует примесь стерильных массовых состояний, то суммарный спектр бета-распада должен включать дополнительно соответствующие вклады. Так, примесь четвертого массового состояния должна проявляться в изломе  $\beta$ -спектра трития в точке, отстоящей от границы спектра на величину массы этого состояния (<http://arxiv.org/abs/1204.5379>). Установка КАТРИН предоставляет для поиска стерильных нейтрино, прежде всего уникальный безоконный источник газообразного трития активностью 100 ГБк (примерно 3 Ки). В тоже время, ее система регистрации электронов бета-распада должна быть кардинально пересмотрена. При наборе данных в течение трех лет КАТРИН имеет возможность вести поиск вклада стерильных нейтрино с массой несколько  $\text{кэВ}$  на уровне, не исключенном существующими астрофизическими наблюдениями.

## 16.2 Проект КАТРИН

В основе установки КАТРИН лежит электростатический спектрометр с адиабатической магнитной коллимацией, предложенный в 1983 году советскими физиками, членами - корреспондентами АН СССР, В.М.Лобашевым и П.Е. Спиваком (V.M. Lobasev, P.E. Spivak Nucl. Instr. Meth. A240 (1885) 305). Новый подход позволил сочетать высокое разрешение спектрометра и неограниченную площадь безоконного газового источника молекулярного трития. На его основе, группой В.М. Лобашева, в ИЯИ РАН была создана установка «Троицк ню-масс» и в ходе измерений в 1994 – 2003 гг. было получено ограничение на эффективную массу электронного антинейтрино на уровне 2,05эВ. (V.M.Lobashev, Nucl. Phys.Av.719 (2003), c153-c160). До самого последнего времени этот результат был лучшим в мире.

В конце 1990-х, в связи с исчерпанием потенциала установки «Троицк ню-масс», использующей источник трития активностью 0,6 ГБк, группа В.М. Лобашева приступила к разработке проекта, получившего позднее название КАТРИН, и вошла в первоначальный состав участников, который был сформирован в 2001 году. Сейчас коллектив проекта КАТРИН, базирующегося в Институт технологий Карлсруэ, Германия включает примерно 150 исследователей из 20 институтов 7 стран (<http://www.katrin.kit.edu/>).

Структура установки КАТРИН повторяет схему «Троицк ню-масс» (см. Рис. 16.2),



RS-задняя стенка, DPS-R- задняя дифференциальная откачная станция, WGTS- безоконный газовый источник трития, DPSF-1- передняя откачная станция-1, DPSF-2 передняя откачная станция-2, CPS- криогенная откачная станция, PS- предварительный спектрометр, MS- основной спектрометр, FPD- основной детектор электронов.

Рис. 16.2 – Установка КАТРИН

Группа ИЯИ РАН участвует в проекте КАТРИН с момента формирования предложения эксперимента, основываясь на опыте работы с установкой «Троицк ню-масс», которая является прототипом установки КАТРИН ([arXiv:hep-ex/0109033v1](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0109033v1)).

Чтобы поддерживать постоянное количество распадов в источнике, обязателен замкнутый цикл трития с высокой пропускной способностью. Для работы этого беспрецедентного источника активностью примерно 100 ГБк требуется использовать всю инфраструктуру тритиевой лаборатории в Карлсруэ, внутри которой расположены собственно источник трития и система рециркуляции рабочего вещества. Находящийся в смежном здании огромный электростатический спектрометр длиной 24 м и диаметром 10 м действует как прецизионный фильтр для пропускания электронов с энергией выше тормозящего потенциала спектрометра. Только очень малая доля электронов вблизи граничной точки спектра несет информацию о массе нейтрино. Измерение переменного тормозящего электрического потенциала в диапазоне от 16 до 35 кэВ проводится на уровне

точности в несколько ppm, что позволяет получить беспрецедентную точность в спектроскопии электронов распада трития.

Создание установки такого масштаба потребовало решения множества технических и даже логистических задач (см. Рис. 16.3).



Рис. 16.3 – 25-е ноября 2006 года: корпус спектрометра КАТРИН доставляется в Технологический институт Карлсруэ

В 2018 году завершена подготовка установки к проведению исследований спектра трития в проектном режиме. Этому факту была посвящена связанная с первым напуском трития в систему «Инаугурация КАТРИН», состоявшаяся 11.06.2018 (см.Рис. 16.4).



Рис. 16.4 – Запуск трития в установку КАТРИН. Участвуют известные ученые и организаторы науки, в том числе Нобелевские лауреаты 2015 года Артур Макдоналд и Такааки Кадзита. Россию представляет директор ОИЯИ, многолетний директор ИЯИ РАН, академик В.А.Матвеев

Первый тритий был запущен в систему 11.06.2018 на уровне 1% от номинальной величины. Далее количество трития в источнике постепенно увеличивалось, одновременно велась проверка надежности работы системы дифференциальной откачки с целью не допустить загрязнения спектрометра тритием. Проводились различные технологические и физические исследования: проверялась стабильность толщины источника, его температуры измерялась функция потерь энергии электронами при столкновениях с молекулами трития.

Весной 2019 года был проведен четырехнедельный цикл измерения массы нейтрино. На *Рис. 16.5* Спектр электронов распада трития вблизи граничной точки, измеренный в первом сеансе КАТРИН. Вверху: абсолютные единицы; внизу: отклонения от теоретического спектра деленные на экспериментальные ошибки.

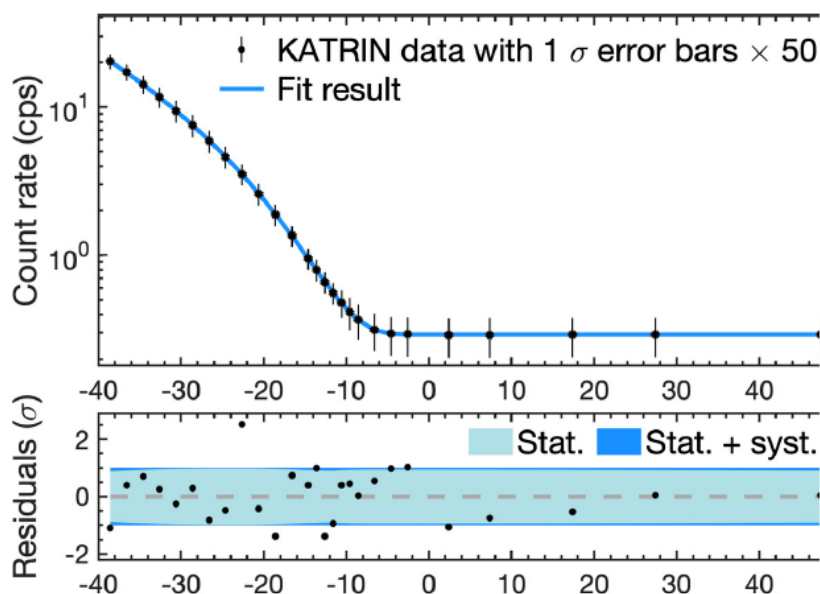


Рис. 16.5 – Спектр электронов распада трития вблизи граничной точки, измеренный в первом сеансе КАТРИН

Несмотря на то, что содержание трития в источнике составляло только 25% от номинального, анализ данных позволил получить ограничение на эффективную массу электронного антинейтрино  $m_{\nu} < 1$  эВ, что превосходит по точности в 2 раза предыдущие лабораторные результаты [M. Aker *et al.* (KATRIN Collaboration) *Phys. Rev. Lett.* **123**, 221802 (2019)] .

В настоящее время на установке КАТРИН продолжается набор статистики и в самом ближайшем будущем следует ожидать дальнейшего улучшения предела на эффективную массу электронного антинейтрино.

### 16.3 Работы по проекту КАТРИН в ИЯИ РАН

#### 16.3.1 Измерения спектра потерь энергии при рассеянии электронов на молекулах дейтерия D<sub>2</sub>.

Функция потерь энергии при рассеянии электронов на молекулах трития в источнике КАТРИН является одним из важнейших компонентов модели интегрального спектра электронов, измеряемого в эксперименте. Рассеяние электронов модифицирует функцию отклика экспериментальной установки (см. Рис. 16.6). Экспериментальные и теоретические неопределённости функции потерь энергии дают вклад в неопределённость измеренной массы нейтрино. Измерение функции потерь стало одной из ключевых задач технического сеанса КАТРИН осенью 2018 года. Обработка данных, полученных в ходе калибровочных измерений этого сеанса, дала возможность существенно уменьшить статистические неопределённости функции потерь.

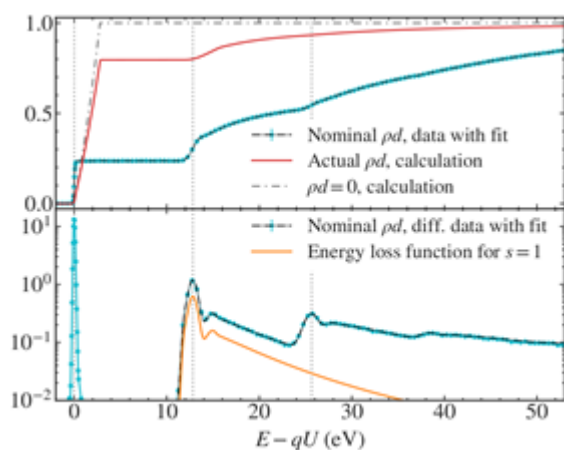


Рис. 16.6 – Функция отклика эксперимента КАТРИН (вверху), измеренная функция потерь (внизу)

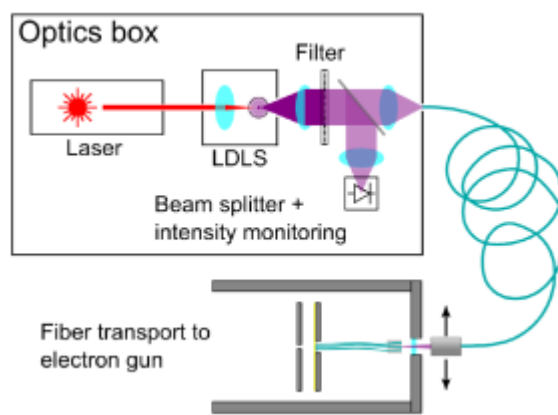


Рис. 16.7 – Схема устройства электронной пушки

Для измерения функции потерь был использован источник моноэнергетических фотоэлектронов с энергиями порядка 18 кэВ (электронная пушка, Рис. 16.7), смонтированный в задней части тритиевого источника КАТРИН. Пушка имеет два режима работы: режим постоянного тока электронов (с помощью постоянного источника ультрафиолетового излучения с различными длинами волн) и режим импульсной генерации электронов с помощью ультрафиолетового лазера (с частотой импульсов 20-100 кГц, длина волны 266 нм). Оба режима были использованы при измерении функции потерь. Моноэнергетические электроны от пушки проходят через источник КАТРИН с газом одного из изотопов водорода (для калибровочных измерений был использован дейтерий  $D_2$ ), часть из них рассеивается на молекулах газа и теряет энергию. Модифицированный спектр электронов измеряется с помощью основного спектрометра КАТРИН. Фитирование полученного спектра позволяет извлечь информацию о функции потерь (вероятности потерять данное количество кинетической энергии в процессе рассеяния). Плотность газа в источнике влияет на вероятность рассеяния за время прохождения всего газового источника КАТРИН.

Импульсный режим работы электронной пушки допускает использование дополнительной информации о времени пролёта электронов через все компоненты установки КАТРИН ( $\sim 70$  м). При этом электроны с энергией, близкой к запирающему напряжению, будут существенно замедляться в основном спектрометре, и их время пролёта будет существенно превышать время пролёта электронов с энергией, сильно отличающейся от величины запирающего напряжения. Такая схема позволяет получить информацию об энергии электронов, измеряя дифференциальный спектр энергий. Для фиксирования информации о времени пролёта проводится синхронизация времени импульсов лазера и времени детектирования электронов в детекторе. Пример преобразования времени пролёта электрона через основной спектрометр в энергию приведён на Рис. 16.8.

Три линии на графике представляют собой три различных способа калибровки (время-энергия): упрощённая модель потенциала (постоянный потенциал в некоторой области спектрометра), полноценное моделирование потенциала и времени пролёта с помощью специализированного программного пакета KASSIOPEIA, а также калибровка на основе самих данных (используя нерассеянные, т.е. прошедшие источник без рассеяния, электроны).

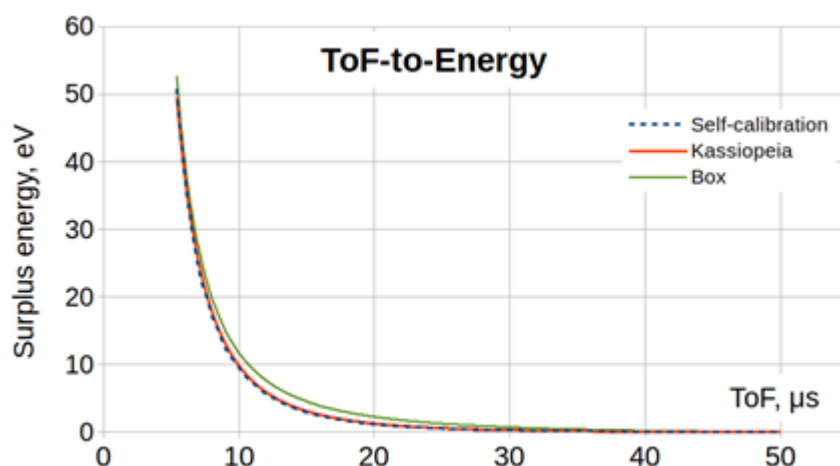


Рис. 16.8 – Соответствие между временем пролёта электрона через спектрометр КАТРИН и превышением энергии электрона над запирающим напряжением (калибровка на данных, упрощённая и полная модели)

Для каждого запирающего напряжения, таким образом, измеряется наблюдаемое время пролёта электронов. Пример распределения электронов по времени приведён на Рис. 16.9 (для запирающего напряжения на 15 В меньшего, чем начальная энергия электронов). Для получения модели распределения электронов по времени необходимо провести преобразование функции потерь (см. Рис. 16.10).

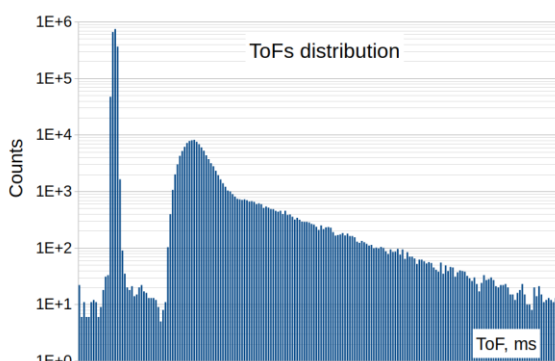


Рис. 16.9 – Распределение электронов по времени пролёта для стартовой энергии электронов, превышающей запирающее напряжение на 15 В

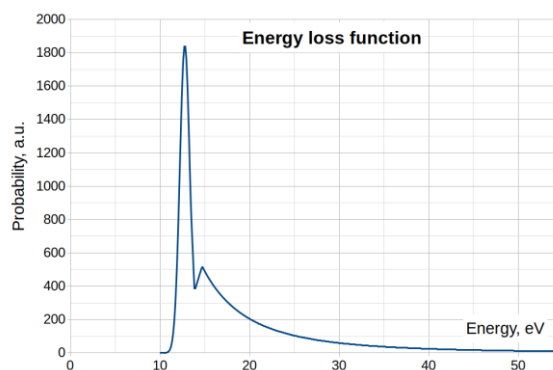


Рис. 16.10 – Модель функции потерь энергии электронов при однократном рассеянии на молекуле D<sub>2</sub>

Следуя правилам перехода к новым переменным в распределении и используя функцию Рис. 16.8, получим модель для распределения времён пролёта. На Рис. 16.11 приведён пример суперпозиции модели и экспериментальных точек. В рассуждениях выше не учитываются некоторые эффекты, приводящие к дополнительной размазке распределений. Такими эффектами могут быть неопределённость начальных энергий электронов и начального времени, временное разрешение детектора и другие. Эти эффекты приводят к уширению пика нерассеянных электронов до 0.7 мкс (см. Рис. 16.9).



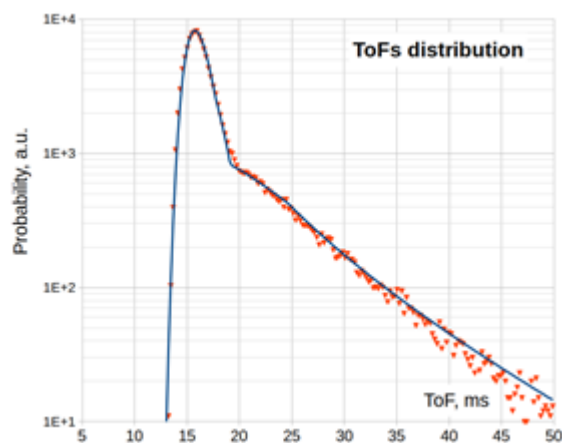


Рис. 16.11 – Распределение электронов по времени прилёта: модель и данные

В ходе обработки данных калибровочных измерений функции потерь с электронной пушкой в режиме времени пролёта получены следующие результаты:

- достигнуто максимальное использование всех данных;
- проверяется соответствие результатов, полученных в других методах измерения функции потерь;
- отклонения модели от данных при больших энергиях электронов можно связать с неточным знанием функции преобразования времени пролёта в энергии электронов.
- интегро-дифференциальный спектр электронов, полученный с помощью импульсного источника электронов и синхронизации импульсов и времени детектирования электронов, позволяет получать данные о функции потерь с беспрецедентной точностью (см. Рис. 16.6).

### 16.3.2 Уменьшение фона спектрометра КАТРИН с помощью специальных конфигураций электромагнитных полей в спектрометре

Фоновые события при измерении спектра электронов бета-распада трития в эксперименте КАТРИН уменьшают чувствительность к массе нейтрино. Фоновые электроны имеют два основных источника: это вторичные электроны от распада радона-219 в объёме спектрометра и ионизация атомов водорода, находящихся в сильно возбуждённых, так называемых ридберговских, состояниях.

Распад радона в спектрометре сопровождается появлением высокоэнергетических электронов, которые оказываются запертыми в объёме спектрометра, представляющего собой электромагнитную ловушку. Такие электроны постепенно теряют энергию при рассеянии на остаточном газе в спектрометре, порождают множество вторичных электронов при ионизации газа. Электроны могут потерять большую часть кинетической энергии и попасть в детектор.

Атомы водорода в ридберговских состояниях образуются из-за радиоактивных распадов свинца-210 в стенках спектрометра и, являясь нейтральными частицами, могут свободно двигаться в объёме спектрометра, где они ионизируются тепловым излучением, образуя низкоэнергетические электроны, которые ускоряются электрическим полем и попадают в детектор.

Поскольку плотность ридберговских атомов примерно одинакова во всём спектрометре, основным способом уменьшения их вклада в фон эксперимента оказывается уменьшение объёма спектрометра, проецируемого на детектор. Для этого можно, например, увеличить магнитное поле в центре спектрометра, «сжав» тем самым эффективный объём. Однако, увеличение поля ухудшает энергетическое разрешение эксперимента, снижая чувствительность к массе нейтрино (см. Рис. 16.12).

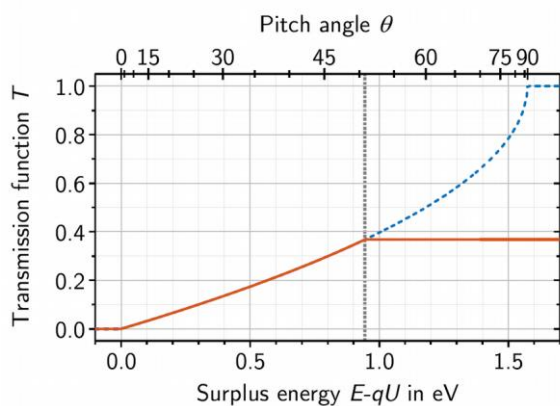


Рис. 16.12 – Функция пропускания спектрометра КАТРИН, зависящая от магнитных полей в анализирующей плоскости

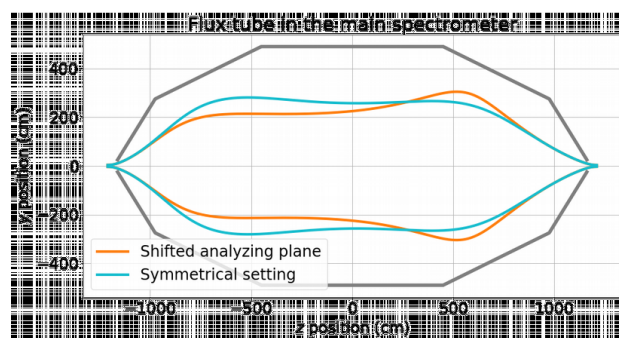


Рис. 16.13 – Схематическое изображение объёма трубки тока электронов в спектрометре КАТРИН для номинальной симметричной конфигурации (AP) и конфигурации со смещённой анализирующей плоскостью (SAP)

Объём спектрометра, который проецируется на детектор, можно уменьшить, смещая поверхность с наибольшим потенциалом (анализирующую плоскость) в сторону детектора. В этом случае объём после анализирующей плоскости оказывается существенно меньше, а разрешение по энергии оказывается сопоставимым или даже лучшим, чем для немодифицированной конфигурации. Метод проиллюстрирован на Рис. 16.13, он получил название метода смещённой анализирующей плоскости (shifted analyzing plane, SAP).

Изменение конфигурации полей производится с помощью специальных теплых соленоидов (см. Рис. 16.14) и электродов внутри спектрометра КАТРИН. Поля настраиваются таким образом, чтобы минимум магнитного поля совпадал в пространстве с минимальным потенциалом (см. Рис. 16.15). Это гарантирует оптимальные условия для функции пропускания спектрометра и разрешения по энергии.

Для демонстрации эффективности этого подхода к уменьшению фона была проведена серия измерений числа фоновых событий в ряде конфигураций электромагнитных полей со смещённой анализирующей плоскостью. На Рис. 16.16 приведены результаты измерения скорости счёта фоновых событий для стандартной конфигурации КАТРИН (0) и для модифицированных конфигураций (1-18). Рис. 16.16 показывает, что фон может быть уменьшен в 2.3 раза при использовании смещённой анализирующей плоскости.

Используя данные о скорости счёта в различных конфигурациях полей, можно изучать зависимость числа фоновых событий от параметров. Параметризация для числа фоновых событий позволяет находить оптимальные конфигурации с минимальным фоном и наилучшим энергетическим разрешением.

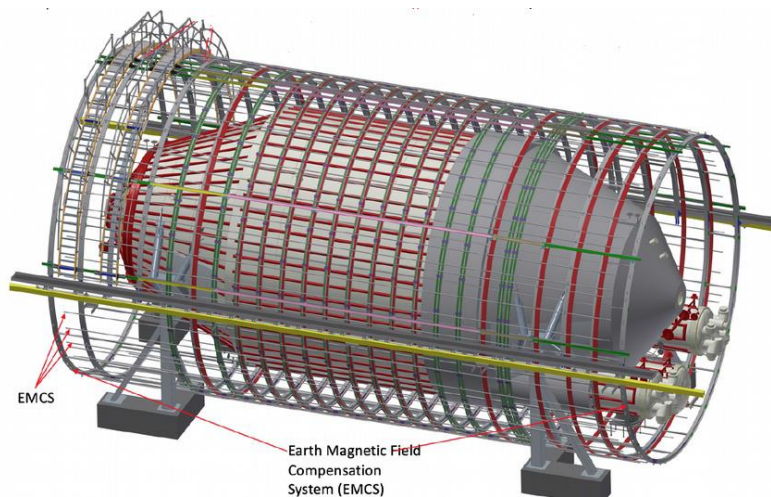


Рис. 16.14 – Система теплых магнитов для формирования магнитного потока внутри спектрометра КАТРИН

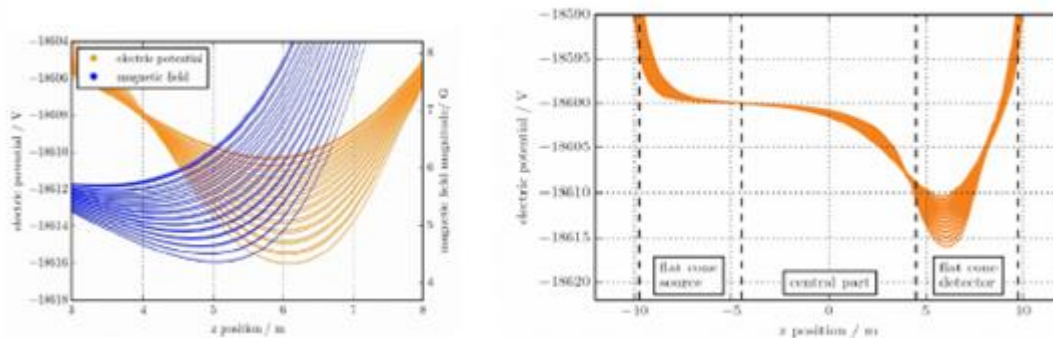


Рис. 16.15 – Потенциал и магнитное поле для конфигурации со смещённой анализирующей плоскостью, смещение составляет примерно 6 м в направлении детектора

а

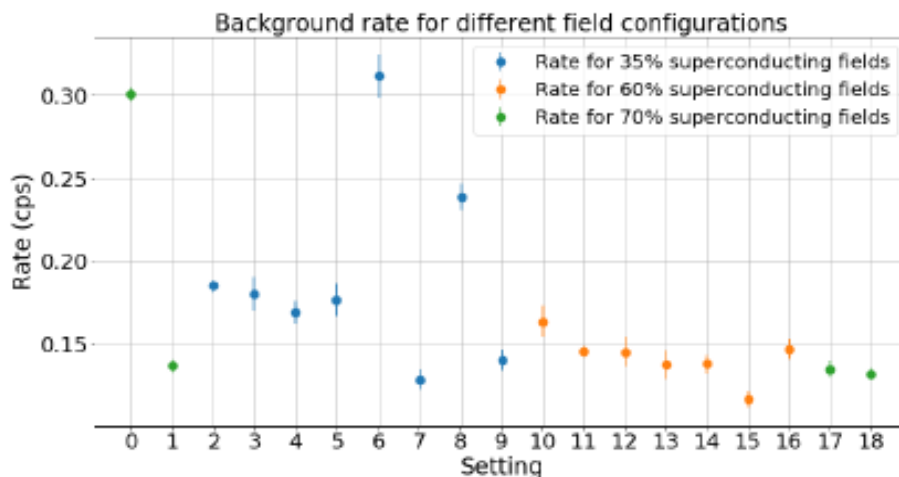


Рис. 16.16 – Результаты измерения скорости счёта фоновых событий в различных конфигурациях электромагнитных полей в спектрометре КАТРИН

Скорость счёта зависит от объёма спектрометра после анализирующей плоскости.

Рис. 16.17 иллюстрирует сильную связь между объёмом и скоростью счёта. Однако зависимость не является прямо пропорциональной. Для исследования влияния других параметров были предложены и протестированы несколько параметризаций, наилучшее согласие достигнуто в модели с линейной зависимостью от объёма и экспоненциальной зависимостью от величины магнитного поля в анализирующей плоскости (величина магнитного поля определяет форму трубки тока электронов, а также условия для магнитной экранизации). Все полученные результаты хорошо описываются данной моделью, различия между моделью и данными согласуются со статистическими флуктуациями (см. Рис. 16.18).

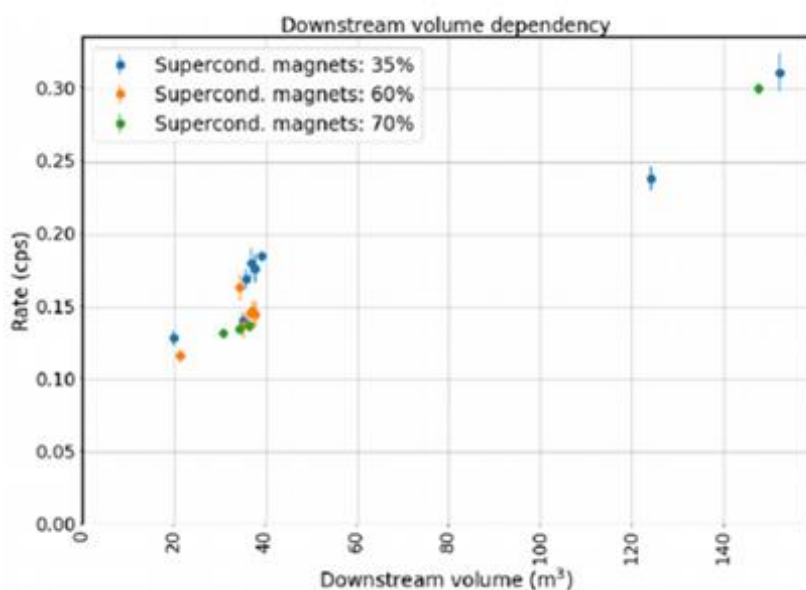


Рис. 16.17 – Зависимость скорости счёта фоновых электронов от объёма спектрометра, проецируемого на детектор

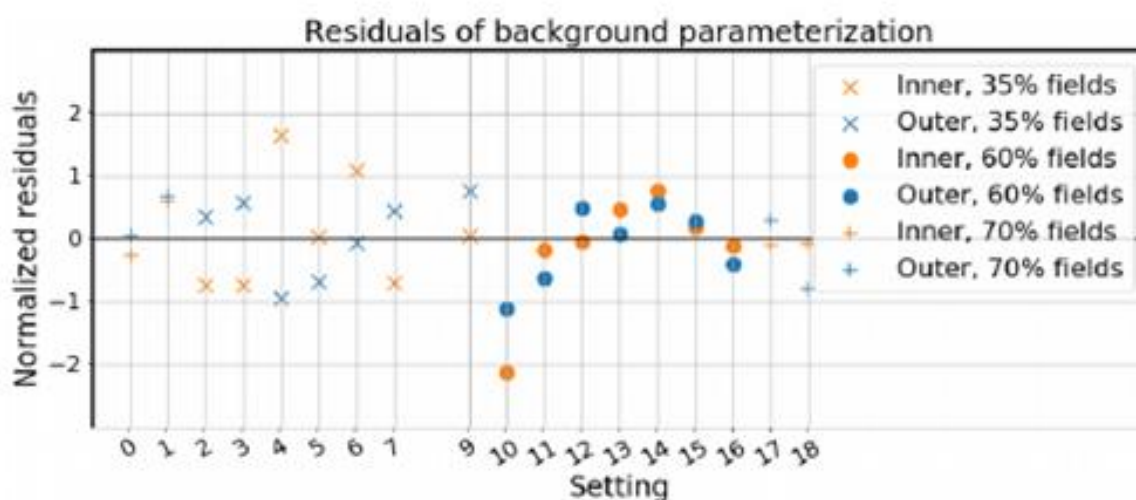


Рис. 16.18 – Нормированные на величину статистической неопределённости отклонения модели для скорости счёта от измеренного её значения

### 16.3.3 Исследование новых детекторов для поиска вклада стерильных нейтрино

Одной из основных проблем проведения эксперимента по поиску тяжелых стерильных нейтрино является необходимость регистрировать с разумным уровнем просчетов высокие потоки электронов с энергией от единиц кэВ до 30-35 кэВ детектором диаметром 100 мм. Верхний предел по энергии электронов определяется необходимостью детектировать линии 30.5 и 32.1 кэВ криптона  $^{83m}\text{Kr}$ , которые используются при исследовании параметров спектрометров [К. Altenmüller “High-resolution spectroscopy of gaseous  $^{83m}\text{Kr}$  conversion electrons with the KATRIN experiment”, arXiv:1903.06452v2]

Частично задача решается за счет секционирования детектора и организации независимой регистрации сигналов от каждой секции. Тем не менее, состоит задача обеспечить скорость счета  $10^6 \dots 10^7$  в секунду для каждого единичного сектора.

Изначально в качестве детектора предполагалось использовать газонаполненный счётчик с тонким входным окном [С. Н. Балашов, Е. В. Гераскин, А. А. Голубев, Н. А. Голубев, В. В. Ишкин, О. В. Казаченко, В. М. Лобашев, И. В. Секачев, П. Е. Спивак, Б. Е. Штерн. «Детектор мягких электронов для работы в сильных магнитных полях». Препринт ИЯИ АН СССР, П-0616. –Москва. –1989]. Позднее он был заменён на более подходящий для работы в условиях сильного магнитного поля и высокого вакуума полупроводниковый детектор, на котором были набраны все экспериментальные данные [А. И. Берлёв, С. В. Задорожный, О. В. Казаченко, В. М. Лобашев, В. С. Пантуев, Н. А. Титов. «Система сбора данных в эксперименте по поиску массы электронного антинейтрино в бета-распаде трития на установке "Троицк ню-масс"» // Препринт ИЯИ РАН, Р-1103/2003. Москва, 2003]. В основном, это были изготовленные в ПИЯФ (Гатчина) по нашему заказу плоские Si(Li) детекторы с диаметром чувствительной области 17 мм, ёмкостью порядка 15 пФ со слоем золота (позже – палладия)  $20 \text{ мкг/см}^2$ , охлаждаемые до температуры жидкого азота.

Данные детекторы вполне удовлетворяли требованиям, предъявляемым при поиске массы нейтрино (диапазон энергий 18 ... 18.6 кэВ и темп счёта до 3...5 кГц), но для поиска стерильных нейтрино требуется снижать регистрируемую энергию как минимум, до 12 кэВ и ниже. Темп счёта при измерении бета-спектра при уменьшении энергии возрастает квадратично, а в случае нашего интегрального спектрометра как кубическая функция. Соответственно, существующий детектор не соответствовал новым предъявляемым требованиям.

В качестве возможных кандидатов на роль нового детектора подходят экспериментальные образцы микропиксельных лавинных фотодиодов (МЛФД) без защитного покрытия, с очень тонким входным окном [Z. Sadygov et al., Technology of Manufacturing Micropixel Avalanche Photodiodes and a Compact Matrix on Their Basis, Phys. Part. Nuclei Lett. 10 (2013) 780]. Была проведена серия тестовых измерений [Берлев А. И., Голубев А.А., Задорожный С. В., Титов Н.А. “Исследование возможности создания детектора электронов низких энергий на основе микропиксельного лавинного фотодиода”. Препринт ИЯИ РАН 1432/2017, Август 2017 г.], разработаны и испытаны несколько моделей предусилителей, а также методика вывода быстрого сигнала из вакуумного объёма. Однако данный тип детекторов показал невысокое энергетическое разрешение и недостаточную надёжность из-за полного отсутствия защитного покрытия (оно не наносилось, чтобы исключить поглощение в нечувствительном слое низкоэнергетичных электронов). К особенностям МЛФД можно отнести резкое увеличение коэффициента усиления при незначительном изменении напряжения смещения или при изменении температуры [К.

Ogasawara et al. “Temperature dependence of the thin dead layer avalanche photodiode for low energy electron measurements”. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A611 (2009) 93–98.]. Подбор близких по усилению детекторов для многосекционной сборки возможен, но несколько затруднён из-за разброса параметров отдельных детекторов в пределах одной пластины.

Поиск возможных кандидатов на роль будущего детектора привёл к другим полупроводниковым приборам. Это детекторы отраженных электронов (ДОЭ), которые представляют собой кремниевые фотодиоды с мелкозалегающим p-n-переходом [Yu.A. Goldberg et al. // Semiconductors, 1999, 33, 343], применяемые в электронных микроскопах [А. В. Гостев и др. «Характеризация полупроводниковых детекторов монокинетических и отражённых электронов с энергией 1-30 кэВ». Известия РАН. Серия физическая, 2008. Том 72, № 11, стр. 1539-1544.]. Принцип работы кремниевого детектора электронов основан на поглощении электронов в приповерхностной области детектора, генерации этими электронами неосновных носителей заряда в кремнии, с последующей регистрацией токового сигнала трансимпедансным (transimpedance amplifier, TIA) или зарядочувствительным (charge-sensitive preamplifier, CSP) усилителями (см. Рис. 16.19). На этом рисунке цифры обозначают следующее: 1 – металлический контакт, 2 – p++ слой толщиной 30 нм, 3 – база p-типа толщиной 320 мкм, 4 – p+ слой формирующий условия для лавинного умножения толщиной 10 мкм, 5 – n++ слой толщиной 0.5 мкм, 6 – диоксид кремния.

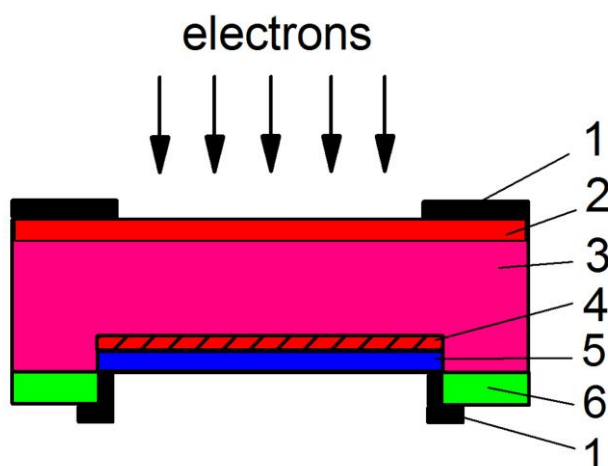


Рис. 16.19 – Структура детектора электронов на основе Si APD

Детектор был протестирован при помощи электронной пушки, изготовленной в ИЯИ РАН для совместного проекта в Исследовательском центре Карлсруэ (KIT), а так же на стенде непосредственно в ИЯИ РАН. Использовался предварительный усилитель собственной разработки на базе операционных усилителей ОРА657 в первом каскаде и ОРА695 во втором. Схема одного из вариантов усилителя приведена на Рис. 16.20. Мы его испытывали как снаружи вакуумной камеры, так и внутри. Естественно, что при коротком расстоянии, когда детектор припаян непосредственно к плате усилителя, соотношение сигнал/шум является максимальным, однако и при выносе усилителя из вакуумного объёма на расстояние до 100...200 мм оно так же остаётся приемлемым. При этом полностью убираются проблемы как вывода лишнего тепла из вакуума, так и ухудшение вакуума за счёт развитой поверхности платы и смонтированных элементов.

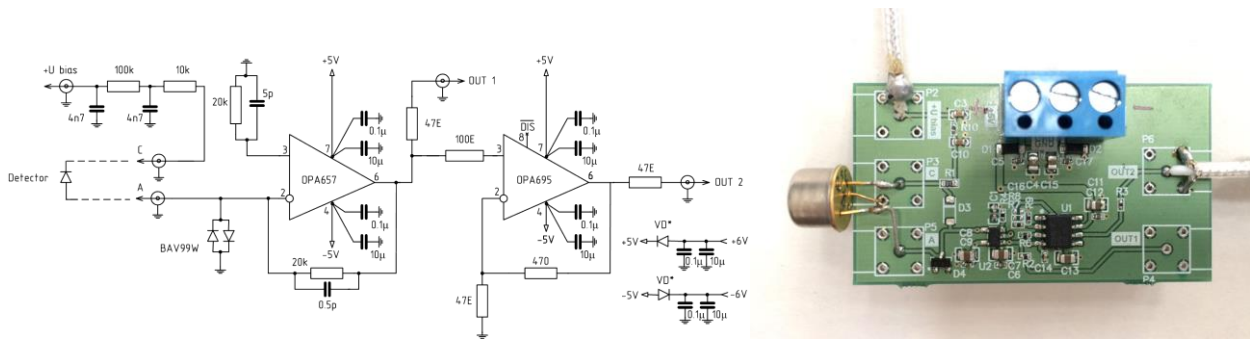


Рис. 16.20 – Усилитель PA-5, вторая версия

В КИТ детектор был подключен на расстоянии 20 см от предусилителя и просканирован пучком электронов, сформированным на стенде, состоящем из электронной пушки и магнитно-фокусирующей системы. Уверенный сигнал на фоне шумов был виден, начиная от 4 кэВ (Рис. 16.21-Рис. 16.22).

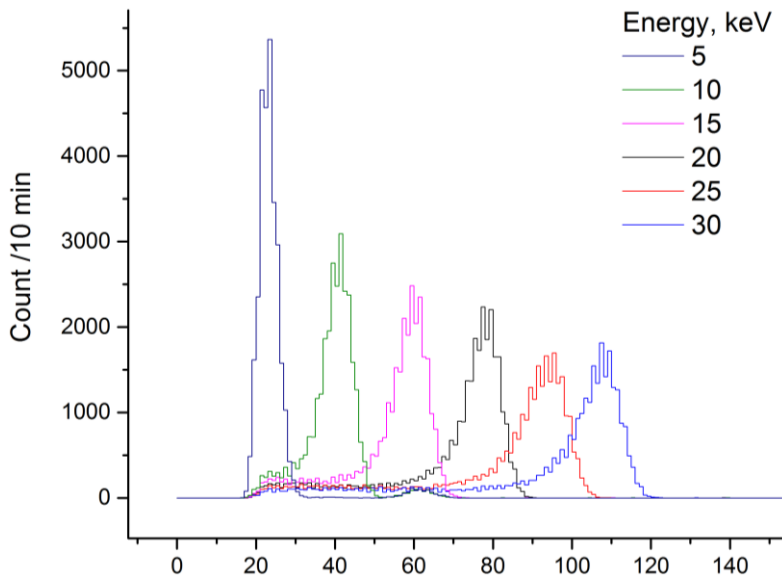


Рис. 16.21 – Спектр от электронов с энергией 5...30 кэВ, полученный в КИТ на стенде с электронной пушкой

На Рис. 16.22 показан сигнал от единичного электрона с энергией 20 кэВ от электронной пушки в КИТ. Предусилитель вынесен из вакуумного объёма на расстояние около 20 см от детектора. Длительность импульса ~40 нс, амплитуда ~60 мВ.

Таким образом, результаты исследований показали, что исследованные детекторы отраженных электронов с внутренним усилением являются весьма перспективными и для других видов применений в тех областях, где требуется регистрация большого потока электронов с энергиями больше 500 эВ, в частности, при измерениях бета-спектра трития в широком диапазоне. К преимуществам следует отнести достаточную чувствительность, работу при комнатных температурах, слабую зависимость сигнала от напряжения смещения на детекторе. Вопросы температурной стабильности и радиационной стойкости еще не рассматривались и требуют изучения.

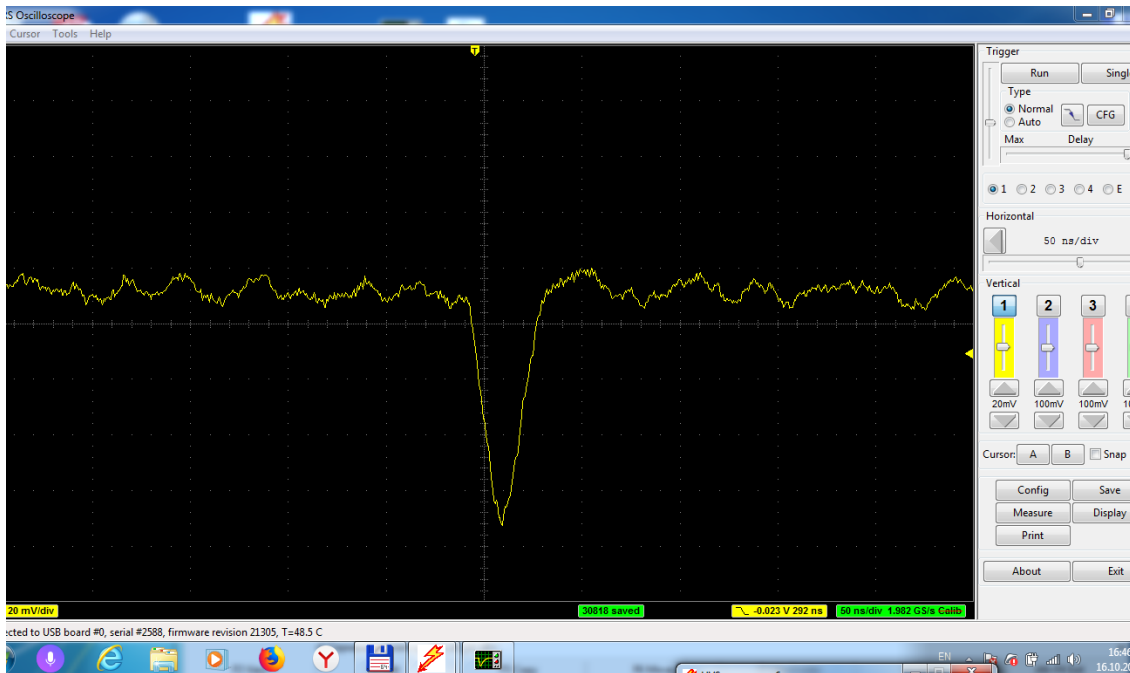


Рис. 16.22 – Сигнал от единичного электрона с энергией 20 кэВ от электронной пушки в КИТ

Более подробное описание выполненных работ содержится в статье П. Н. Аруев, А. И. Берлёв, В. В. Забродский, С. В. Задорожный, А. В. Николаев, Н. А. Титов, Е. В. Шерстнев Исследование свойств детектора отраженных электронов (ASPD) как перспективного детектора для установки «Троицк ню-масс» в диапазоне энергий 5-30 кэВ. Статья принята к опубликованию в Журнале технической физики в апреле 2020.

#### 16.4 Выступления на конференциях, рабочих совещаниях и подготовка публикаций

Доклады на конференциях – 1: Alexey Lokhov (for KATRIN collaboration) пленарный доклад на тему: «KATRIN experiment: first neutrino mass result and future prospects» Международная конференция EINN-2019, Пафос, Кипр (<http://einnconference.org/2019/wp-content/uploads/2019/11/Lokhov-KATRIN-EINN2019-Slides.pdf>)

Выступления на рабочих совещаниях коллаборации КАТРИН, Карлсруэ, Германия:

1. A.Lokhov «Update on the energy loss ToF-to-Energy mode» Февраль 2019
2. A.Lokhov «Shifted analyzing plane: measurements and simulations». Ноябрь 2019
3. A.Lokhov «Confidence intervals with a priori parameter bounds: Feldman-Cousins VS sensitivity limit» Июль 2019

Доклады на международных семинарах – 2:

Международный семинар фонда Хареус, Бад-Хоннеф, Германия Июль 2019:

- стендовый доклад на тему: A.Lokhov «Energy losses and other components of the KATRIN response function»
- устный и стендовый доклад на тему: A.Lokhov «Background reduction with the shifted analyzing plane configuration in KATRIN»



#### Публикации – 4

1. An improved upper limit on the neutrino mass from a direct kinematic method by KATRIN, M. Aker et. al (katrin-all), Phys. Rev. Lett. 123, 221802, November 2019, doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.221802, arxiv: 1909.06048

2. Gamma-induced background in the KATRIN main spectrometer, K. Altenmüller et. al, Eur. Phys. Journal C, September 2019, 79:807, doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-7320-4

3. Muon-induced background in the KATRIN main spectrometer, K. Altenmüller et. al, Astroparticle Physics, Volume 108, March 2019, 40-49, doi:10.1016/j.astropartphys.2019.01.003

4. Исследование свойств детектора отраженных электронов (ASPD) как перспективного детектора для установки «Троицк ню-масс» в диапазоне энергий 5-30 кэВ. П. Н. Аруев, А. И. Берлёв, В. В. Забродский, С. В. Задорожный, А. В. Николаев, Н. А. Титов, Е. В. Шерстнев Препринт ИЯИ 1441-2019, принят к опубликованию в ЖТФ в 2020 г.

#### 16.5 Приложение А.

1. От ИЯИ в эксперименте участвует 6 человек, в работах за рубежом принимало участие 5 человек.

2. Число молодых (< 35 лет) специалистов, привлеченных в эти работы – 1

3. Число студентов - участников экспериментов – 1

4. Число диссертаций на соискание ученых степеней – 0

5. Число докладов от имени коллабораций – 1

6. Число публикаций в ведущих научных журналах – 4

7. Объем финансирования российскими организациями – 200 тыс. руб.

8. В 2019 на работы по проекту выделено 21,6 тыс. долларов потрачено 10,0 тыс. долларов и зарезервировано 11,0 тыс. долларов на работы в январе – марте 2020 г. Всего 6 командировок на срок от одной до четырех недель, частично оплачивались принимающей стороной.

#### 16.6 Приложение Б. План работ российской группы на 2020 г.

1. Участие в проведение сеансов по поиску массы электронного антинейтрино.

2. Обработка данных, оптимизация обработки по чувствительности к массе нейтрино.

3. Подготовка предложений по проведению сеанса по поиску стерильных нейтрино с массой несколько кэВ.

4. Исследование перспективных детекторов для поиска стерильных нейтрино.

Финансирование, запрашиваемое на 2020 год.

Для работ по проведению измерений и обработке данных в январе марте 2020 г. (2 командировки по 1 неделе, 2 командировки по 2 недели, 2 командировки по 3 недели) – 11,0 тыс. долларов из бюджета 2019

Участие в проведении измерений в апреле - декабре (2 командировки по 1 неделе, 2 командировки по 2 недели, 2 командировки по 3 недели) - 10,0 тыс. долларов

Итого – 21,0 тыс. долларов (в том числе 11,0 тыс. долларов из бюджета 2019 г.)

## 17 Отчет по эксперименту 22 «Деление»

Представлен отчет о научно-исследовательской работе, выполненной в рамках проекта Российско-Германского сотрудничества по исследованию фундаментальных свойств материи по теме «измерений эффекта вращения делящегося ядра», краткое наименование «Деление». Координатор – чл.-корр. РАН Г.В. Данилян.

В коллаборации ЛНФ ОИЯИ – ИТЭФ – ПИЯФ – FRM2 была продолжена деятельность по изучению Т-нечетных эффектов в излучении мгновенных  $\gamma$ -квантов и нейтронов при бинарном делении ядер  $^{235}\text{U}$  и  $^{233}\text{U}$  поляризованными холодными нейтронами. Работы ведутся на установке POLI на реакторе FRM2 (Гархинг, Германия). В 2019 году на эксперимент по делению не было выделено пучкового времени, тем не менее, велась работа по подготовке новых измерений в 2020 и последующих годах.

### 17.1 Введение

Поиски Т-нечетных асимметрий в угловых распределениях продуктов тройного деления тяжелых ядер холодными поляризованными нейтронами были начаты в последние годы 20-го века с надеждой на обнаружение при анализе этих асимметрий эффектов нарушения Т-инвариантности в процессах деления ядер, следуя идее, предложенной К. Шрекенбахом. Хотя эта надежда не была реализована, поскольку существование этой асимметрий не мог быть неоспоримым доказательством нарушения временной инвариантности из-за существенного влияния взаимодействия между продуктами деления в конечных состояниях и из-за интерференции амплитуд реакции, относящихся к соседним компаунд-состояниям. Итогом указанных поисков к настоящему времени явилось обнаружение Т-нечетных асимметрий TRI- и ROT- типов в тройном делении ряда ядер-актинодов с вылетом в качестве третьих частиц как заряженных частиц –  $\alpha$ -частиц и тритонов, так и нейтральных частиц – нейтронов и  $\gamma$ -квантов. Оба эффекта, TRI и ROT-эффект, формально Т-нечетны, но не имеют прямой связи с нарушением инвариантности относительно обращения времени.

На установке POLI реактора FRM2 в Гархинге, который обеспечивает необходимый поляризованный монохроматический пучок нейтронов, в 2016-2018 гг. были проведены эксперименты по измерению Т-нечетного ROT-эффекта в делении  $^{235}\text{U}$  поляризованными нейтронами в низколежащем резонансе  $^{235}\text{U}$  (0.27 эВ), а также для промежуточной энергии нейтронов (0.06 эВ). В резонансе в пределах статистической точности эксперимента эффект не был наблюден, а для промежуточной энергии был наблюден эффект, сравнимый с эффектом на холодных нейтронах. Перспективы дальнейших исследований связаны с измерениями эффекта во втором резонансе  $^{235}\text{U}$  (1.14 эВ), где согласно предсказаниям теории эффект должен быть максимальным, а также сравнительное измерение знаков эффекта для ядер  $^{235}\text{U}$  и  $^{233}\text{U}$

### 17.2 Разработка и усовершенствование системы управления нейтронной поляризацией

В экспериментах по изучению Т-нечетных эффектов с использованием поляризованных нейтронов обычно требуется периодически менять в определенной области пространства, занимаемой пучком, направление вектора поляризации нейтронного пучка. Для этой цели обычно используются устройства, так называемые спин-флипперы, которые с

некоторой эффективностью обращают по отношению к магнитному полю поляризацию нейтронного пучка, пересекающего флиппер. В настоящее время существуют различные типы спин-флипперов, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки, которые включают такие факторы, как зависимость эффективности переворачивания от скорости нейтрона, его зависимость от места пересечения флиппера с нейтронами, наличие или отсутствие материала в пучке, и скорость переключения состояний флиппера и т. д. Следовательно, использование определенного типа флиппера в экспериментальной установке определяется как физическими задачами, так и конструктивными особенностями установки.

В процессе работы с поляризованными нейтронами также становится необходимым вводить нейтроны в определенные области пространства без изменения их поляризации. Известно, что существует вероятность деполяризации нейтронного пучка, связанная с возможной ларморовской прецессией спинов нейтронов в посторонних возмущающих магнитных полях. Например, магнитное поле всего 0,5 Гс (магнитное поле Земли находится в диапазоне от 0,25 до 0,65 Гс) может привести к вращению спина на  $21^\circ$  на расстоянии всего 30 см от поляризатора для нейтронов с энергией 0,3 эВ. Соответственно, чем дальше расположены устройства для сброса спина поляризованных нейтронов от исследуемого объекта, тем больше вероятность деполяризации. Задача сохранения ориентации вектора поляризации нейтронного пучка решается с помощью специально подобранных магнитных полей вдоль пути нейтрона.

В рамках проекта Российско-Германского сотрудничества по исследованию Т-нечетных эффектов в делении было разработано устройство для поляризованных нейтронов, состоящее из трех прямоугольных катушек в магнитном экране, расположенных коаксиально. Устройство позволяет путем варьирования тока в катушках плавно изменять относительно ведущего магнитного поля степень поляризации поляризованного нейтронного пучка, прошедшего через устройство, в диапазоне от  $-P_0$  до  $+P_0$ , где  $P_0$  – поляризация пучка на входе в устройство.

Основным преимуществом этого спин-флиппера является высокая однородность магнитного поля в сочетании с небольшими размерами, большим поперечным сечением нейтронного пучка, скоростью (частота инверсии 1 кГц, что важно при измерении слабых эффектов) и простотой управления. Простая конструкция флиппера показана на *Рис. 17.1*.

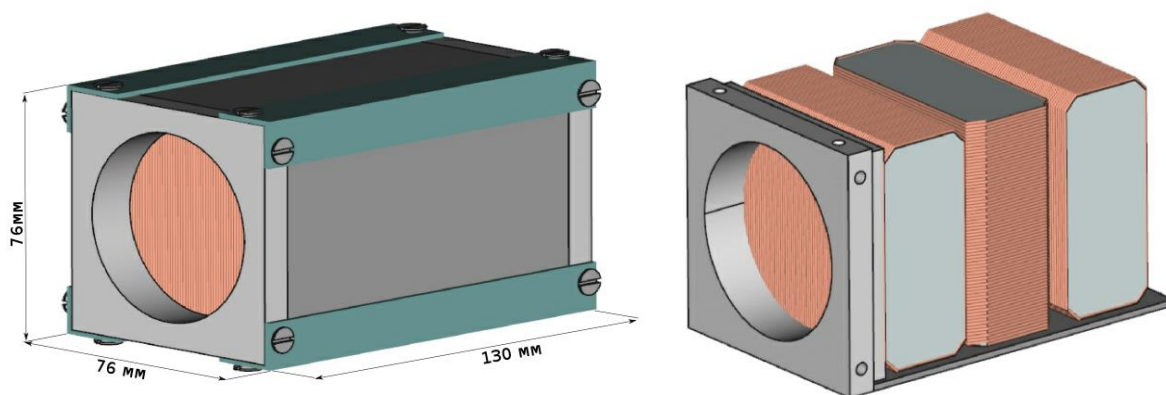


Рис. 17.1 – Слева - общий вид спин-флиппера, справа - расположение катушек внутри ферромагнитного экрана

Спин-флиппер представляет собой сборку из трех одинаковых прямоугольных плоских катушек прецессии, через которые пропускается постоянный ток. Каждая катушка состоит из прямоугольного корпуса с канавками для обеспечения высокоточной намотки алюминиевых проволок диаметром 1 мм с тонким электроизоляционным покрытием, имеющим низкое сечение поглощения и рассеяния нейтронов. Корпус катушки изготовлен из полиамида и имеет обмотку сечением  $70 \times 70 \text{ мм}^2$  на 65 витков. Катушки снабжены высокопроницаемой ферромагнитной сеткой (пермаллой) марки толщиной 2 мм для возврата флюса. Флиппер размещен в пучке нейтронов так, что его ось перпендикулярна направлению движения нейтрона. Когда нейтроны проходят через прецизионные катушки, их спины вращаются на определенный угол относительно вектора магнитного поля внутри катушек. Такое устройство подходит для моноэнергетических нейтронов.

Этот спин-флиппер был испытан на пучке поляризованных нейтронов на приборе POLI реактора FRM-2 в Гархинге (Германия) и может быть использован в эксперименте для измерения Т-нечетных эффектов при делении тяжелых ядер. Схема эксперимента показана на Рис. 17.2. Стрелками указаны направления начальной поляризации  $P_0$  и два возможных направления поляризации после спин-флипперов. Из рисунка видно, что в эксперименте использовались два флиппера, один перед камерой деления с делящейся мишенью, а другой перед анализатором.

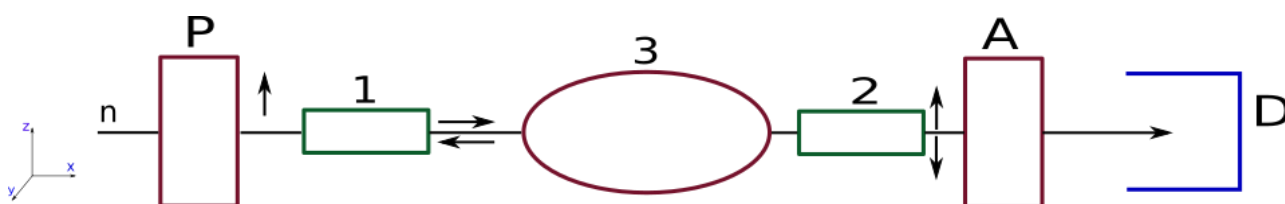


Рис. 17.2 – Схема эксперимента: P - поляризатор, 1 и 2 - спиновые флипперы, 3 – положение камеры деления с мишенью, A - анализатор, D - детектор нейтронов

Для управления вектором поляризации нейтронного пучка, во-первых, магнитные поля на входных катушках флипперов выбираются таким образом, чтобы при выходе спин нейтрона становился параллельным или антипараллельным оси X (продольная поляризация, необходимая для физического измерения), и поле анализатора (для измерения поляризации) соответственно. На Рис. 17.3 показана экспериментальная зависимость скорости счета детектора от тока в корректирующей катушке флиппера.

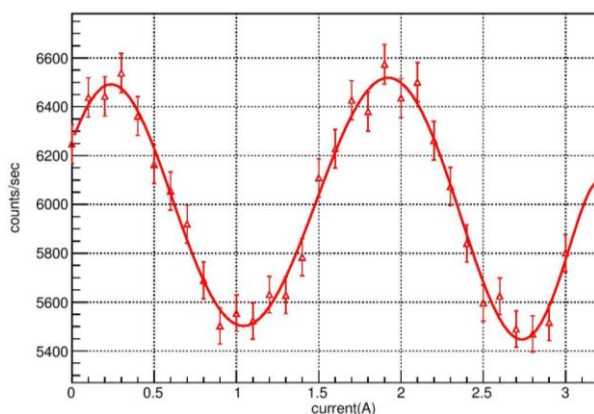


Рис. 17.3 – Зависимость отсчета детектора от тока в катушке

Эта кривая может быть подогнана функцией  $N = a + b \cdot \cos(2\pi l / d + c)$ , которая показана на графике. Параметры функции определяются по подгонке, здесь:  $b$  - амплитуда косинуса;  $c$  - отклонение поляризации от направления луча;  $d$  - основной параметр, ток для вращения на  $360^\circ$ .

Использование такого устройства имеет определенные преимущества. Устройство имеет простой дизайн и компактные размеры. Это позволяет при заданной степени поляризации  $P_0$  нейтронов, падающих на устройство, путем изменения величины тока в катушках получать нейтронный пучок с любым значением степени поляризации в диапазоне от  $-P_0$  до  $+P_0$ . Компенсируя влияние внешних магнитных полей на поляризацию, не происходит уменьшения интенсивности потока поляризованных нейтронов в нужном месте.

### 17.3 Работы по созданию пучка поляризованных нейтронов с энергией до 1.5 эВ на установке POLI реактора FRM-II

Установка POLI на реакторе FRM-II в Гархинге использует нейтроны из горячего источника, установленного вблизи зоны реактора, и позволяет получить пучки поляризованных монохроматических нейтронов с энергиями от 0.06 эВ до 0.27 эВ. Схематическое изображение экспериментальной установки показано на Рис. 17.4. Монохроматор, выполненный из мозаики кристаллов Cu или Si, используется для выделения узкого пучка нейтронов с заданной средней энергией. Монохроматор также позволяет одновременно фокусировать пучок нейтронов в заданном положении, обеспечивая максимальную интенсивность неполяризованных нейтронов до  $1,6 \cdot 10^7$  н/см<sup>2</sup>/сек. Для поляризации нейтронов используется спин фильтр на основе <sup>3</sup>He.

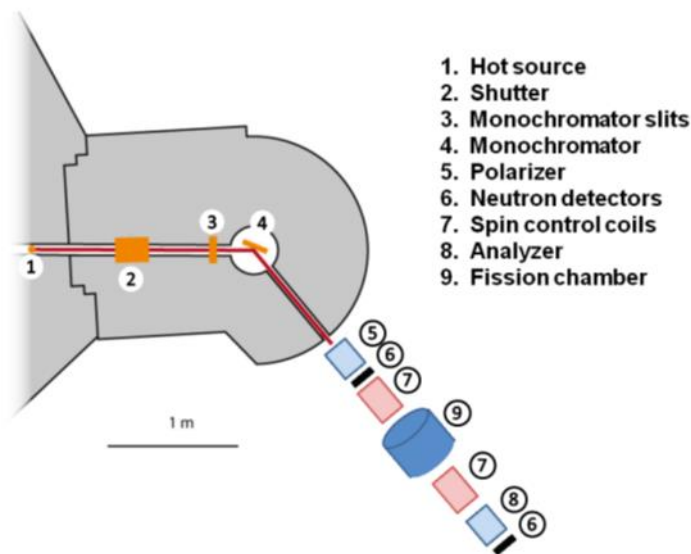


Рис. 17.4 – Схематическое изображение экспериментальной установки на инструменте POLI реактора FRM-II

В существующем варианте установки POLI имеющиеся коллиматоры-вставки позволяют вывести отраженные пучки под углом  $41^\circ$  (0.12 эВ) и  $25^\circ$  (0.3 эВ). Коллиматоры конструктивно выполнены в виде самостоятельных узлов и размещены в отдельном, съемном корпусе.

В случае, если корпус коллиматоров будет перевернут на  $180^\circ$ , то появляется возможность использовать новое положение для коллиматора с углом  $14.3^\circ$  (0.88 эВ).

Имеющиеся два типоразмера коллиматоров (шириной 160 мм и 170 мм, соответственно) выполнены с симметричными отверстиями. Это ограничивает диапазон рабочих энергий установки POLI.

Было предложено разработать новый коллиматор-вставку с несимметричным (смещенным) отверстием для вывода отраженного пучка. В имеющихся геометрических размерах вставки (на ширине 170 мм) получить максимально возможный угол смещения, что позволит расширить диапазон рабочих энергий. Общий вид нового коллиматора-вставки показан на *Рис. 17.5*.

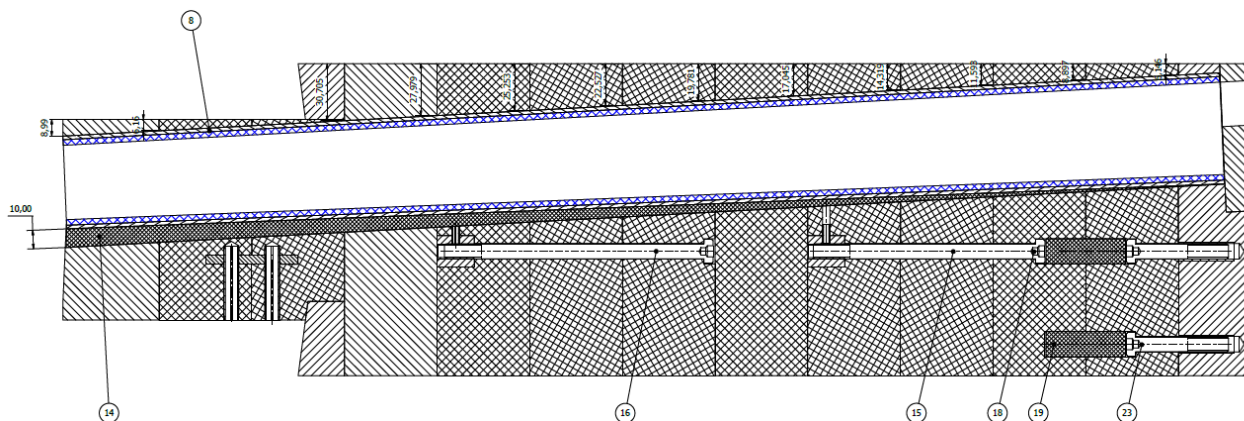


Рис. 17.5 – Схематическое изображение сечения коллиматора-вставки в горизонтальной плоскости

Была выполнена коррекция положения корпуса коллиматоров относительно основного отверстия самой установки POLI, а также привязка по возможным «базам», с целью построения правильной геометрии при проектировании и получения корректных углов для оценочных расчетов.

В конструктивных пределах нового коллиматора-вставки был определен диапазон отклонения в  $1.2^\circ$  при угле смещения от оси симметрии, максимально на  $3.2^\circ$ . Таким образом, появляется возможность работы на углах в  $11^\circ$  (1.47 эВ), в  $11.6^\circ$  (1.33 эВ) и  $12.2^\circ$  (1.2 эВ) с минимальными перенастройками (только смена защитного экрана на вставке).

Применение нового коллиматора-вставки позволит расширить рабочий диапазон до  $\sim 1.5$  эВ и возможность работать в других дискретных диапазонах, на меньших энергиях, которые раньше были не возможны.

#### 17.4 Приложение А

##### 1. В Германии работала бригада из двух специалистов

В работе принимали участие аспирант Университета Гумилева (Астана, Казахстан), и аспирант Технического университета Мюнхена

##### 2. В России над указанным проектом работали 6 специалистов (1 из них моложе 30 лет)

##### 3. Число подготовленных диссертаций – 0

##### 4. Число докладов на Международных конференциях (ISINN-27, Ядро-2019, Theory5, ICNFP2019) – 4

- Kopatch Yu.N., Novitsky V.V., Ahmadov G.S., Gagarsky A.M., Berikov D.B., Danilyan G.V., Hutanu V., Klenke J., Masalovich S., Deng H., "Measurement of the ROT-effects in fission of  $^{235}\text{U}$  induced by monochromatic polarized neutrons with the energy of 60 meV.", 27-th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei: «Fundamental Interactions & Neutrons, Nuclear

Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics» (ISINN27), 10-14.06.2019, Dubna, Russia.

- Berikov D.B., "Measurement of the ROT-effect in fission of  $^{235}\text{U}$  induced by monochromatic cold polarized neutrons with an energy of 60 MeV", LXIX International Conference "Nucleus-2019" on Nuclear Spectroscopy and Nuclear Structure. "Fundamental Problems of Nuclear Physics, Nuclei at Borders of Nucleon Stability, High Technologies", Dubna, Russia, 1–5 July 2019

- Yu.N. Kopatch, D.B. Berikov, G.S. Ahmadov, A.M. Gagarsky, V.V. Novitsky, G.V. Danilyan, H. Deng, V. Hutanu, J. Klenke, S. Masalovich, and K.Sh. Zhumadilov, "Investigation of the T-odd effects in the emission of prompt gamma-rays and neutrons from fission of uranium nuclei induced by polarized neutrons", International Conference on New Frontiers in Nuclear Physics (ICNFNP 2019) October 14-17, 2019, BHU, Varanasi

- Yu.N. Kopatch, G.S. Ahmadov, D.B. Berikov, A.M. Gagarsky, V.V. Novitsky, G.V. Danilyan, H. Deng, V. Hutanu, J. Klenke, and S. Masalovich, "Measurements of the rot-effect in the emission of prompt gamma-rays and neutrons in fission of  $^{235}\text{U}$  induced by polarized neutrons with energies of 4, 60 and 270 meV", THEORY-5 Scientific Workshop on "Nuclear Fission Dynamics and the Emission of Prompt Neutrons and Gamma Rays", Castelvechio Pascoli, Barga, Italy, 24 - 26 September 2019.

5. Число публикаций в журналах – 1: D. Berikov, V. Hutanu, Yu. Kopatch, G. Ahmadov, A. Gagarski, V. Novitsky, G. Danilyan, S. Masalovich, J. Klenke, and H. Deng, An instrument for measuring T-odd asymmetries in the fission of heavy nuclei, принято к публикации в JINST.

6. Израсходовано 6640 долларов США

17.5 Заявка на финансирование работ в 2020 году

Полученные результаты показали, что на установке POLI реактора FRM-II в Гархинге возможно успешное измерение T-нечетных эффектов в делении. Наиболее перспективными возможностями дальнейших экспериментов являются измерения эффекта во втором резонансе  $^{235}\text{U}$  (1.14 эВ), для которого эффект должен быть существенно выше, чем наблюдаемые ранее, а также сравнительные измерения знака эффекта для ядер  $^{235}\text{U}$  и  $^{233}\text{U}$ . Подготовка к проведению измерений планируется в 2020 г. Конкретная дата проведения эксперимента может зависеть от готовности установки POLI к проведению измерений при этой энергии.

Предполагается командирование 4 человек в Гархинг для подготовки и проведения экспериментов на 2 месяца.

Для выполнения подготовительных работ и проведения экспериментов необходимо финансирование на 2020 год в объеме приблизительно 25 тысяч долларов США.

Представлен отчет о научно-исследовательской работе, выполненной в рамках проекта Российско-Германского сотрудничества по исследованию фундаментальных свойств материи по теме «Байкальский глубоководный нейтринный телескоп», краткое название БАЙКАЛ. Координатор – член.-корр. РАН, доктор физ.-мат. наук Домогацкий Григорий Владимирович.

В 2019 году в период зимней экспедиции на оз. Байкал группой российских институтов (головная организация - ИЯИ РАН) в сотрудничестве с DESY- Zeuthen, Германия, выполнены работы по анализу состояния, ремонту, частичной замене и модернизации глубоководной аппаратуры и подводных линий кабельной связи трех первых кластеров нейтринного телескопа Baikal-GVD содержащих в общей сложности 864 оптических модуля (ОМ) с фотодетекторами и успешно функционировавших в течение 2018 года на оз. Байкал. В результате работ, выполненных в зимнюю экспедицию 2019 г., в дополнение к первым трем кластерам телескопа, развернуты и введены в эксплуатацию в режиме долговременного набора данных четвертый и пятый кластеры нейтринного телескопа Baikal-GVD.

Установка 2019 года содержит в общей сложности 1440 оптических модуля, размещенных на 40 вертикальных гирляндах (по 8 гирлянд в каждом кластере) в интервале глубин от 750 до 1275 метров. Каждый кластер связан с береговым центром управления и системой сбора данных гибридным глубоководным кабелем длиной около 6 км, включающим в себя оптоволоконные линии передачи данных и медные жилы для электропитания установки. Временная синхронизация измерительных каналов каждого кластера осуществляется засветкой оптических модулей световыми вспышками калибровочных светодиодных источников излучения, расположенных на центральной и одной из периферийных гирлянд кластеров, а также с использованием световых импульсов калибровочных светодиодов размещенных в каждом оптическом модуле. Временная синхронизация кластеров установки между собой осуществляется при помощи двух альтернативных систем синхронизации с общими часами в береговом центре сбора данных и управления телескопом. Пространственное положение фотодетекторов установки контролируется с помощью акустической системы позиционирования разработанной фирмой EvoLogics (Германия).

Нейтринный телескоп Baikal-GVD в конфигурации 2019 г., является в настоящее время, наиболее крупным нейтринным телескопом в Северном полушарии с эффективным объемом  $\sim 0.25 \text{ км}^3$ , что уже составляет порядка 60% от эффективного объема IceCube в задаче регистрации ливней от нейтрино астрофизической природы. Оптические модули установки включают в себя фотоэлектронные умножители Hamamatsu R7081-100 с повышенной квантовой чувствительностью и сопутствующую электронику, а также по два калибровочных светодиода. Каждая из гирлянд содержит 36 ОМ расположенных на расстоянии 15 м друг от друга и формирующих три секции по 12 ОМ в каждой. Системы сбора, обработки и передачи данных измерительных каналов расположены в электронных блоках каждой секции и позволяют регистрировать временную форму сигнала.

В течение 2019 года осуществлялась эксплуатация телескопа Baikal-GVD в режиме непрерывного набора данных и в тестовых режимах. Проведена калибровка временных и амплитудных измерительных каналов установки, выполнен предварительный анализ экспериментальных данных и ведется формирование банка качественных событий для последующего физического анализа. Осуществлен непрерывный мониторинг уровня



собственного свечения водной среды и временного поведения параметров оптических модулей и других функциональных систем установки в течение 2019 года. Проведены долговременные измерения (с периодом в 40 секунд) относительного смещения фотодетекторов установки с помощью акустической системы позиционирования.

В течение 2019 года были продолжены работы по разработке и усовершенствованию программного обеспечения моделирования отклика и анализа данных нейтринного телескопа Baikal-GVD. В рамках работ по развитию комплекса вычислительных и служебных программ BARS разработана процедура экспресс анализа данных телескопа при получении алерт-сигнала от нейтринных телескопов, детекторов электромагнитного излучения, либо от гравитационных антенн.

В течение 2019 г. велся анализ экспериментальных данных, накопленных в 2018 и начале 2019 гг. В результате анализа экспериментальных данных 2016, 2018 и 2019 года за 1364 дня эффективного набора данных одним кластером выделено в общей сложности шесть ливневых событий с энергией выше 100 ТэВ — кандидатов на события от нейтрино астрофизической природы. Количество выделенных событий соответствует ожидаемому числу событий от диффузного потока нейтрино астрофизической природы, зарегистрированного в эксперименте IceCube.

В течение 2019 года выполнена комплектация сборка и испытание в лабораторных условиях оптических модулей и измерительных систем двух последующих (шестого и седьмого) кластеров телескопа Baikal-GVD содержащих в общей сложности порядка 600 ОМ. Шестой кластер будет развернут на оз. Байкал в 2020 году, что позволит увеличить детектирующий объем установки до 0.3 км<sup>3</sup>.

Байкальский нейтринный телескоп является в настоящее время одним из трех действующих и самым крупным в Северном полушарии нейтринным телескопом по своей эффективной площади и эффективному объему по отношению к регистрации природных потоков нейтрино высоких энергий.

. Важнейшим научным результатом, полученным за отчетный период, является развертывание и запуск в эксплуатацию на оз. Байкал четвертого и пятого кластеров нейтринного телескопа Baikal-GVD. С вводом в эксплуатацию этих двух кластеров число оптических модулей составило в общей сложности 1440, а эффективный объем телескопа Baikal-GVD достиг значения 0.25 км<sup>3</sup>, что уже составляет порядка 60% от эффективного объема IceCube в задаче регистрации ливней от нейтрино астрофизической природы

## 18.1 ПРИЛОЖЕНИЕ А

Общая сумма финансирования в 2019 году – 9680.0 \$.

Количество затраченных дней – 86 дней.

1. Число специалистов, участвовавших в работах в 2019 году – 70 человек, из них 4 человека были командированы в DESY (Германия).
2. Число молодых специалистов (до 35 лет), участвовавших в работах в 2018 году, – 25 специалистов, из них 2 специалиста были командированы в DESY.
3. Число студентов, участвовавших в работах в 2018 году – 4 студента. Из них 0 были командированы в DESY.
4. Число диссертаций, защищенных в 2019 году – 1.
5. Число докладов от имени коллаборации представленных российскими учеными –

6 докладов.

6. Число публикаций в ведущих научных изданиях (2019 г.) - опубликовано или принято к публикации 14 работ:

- 1) A.D. Avrorin et al.. "Data Quality Monitoring system in the Baikal-GVD experiment", <https://pos.sissa.it/358/874/pdf>
- 2) A.D. Avrorin et al., "Search for cascade events with Baikal-GVD", <https://pos.sissa.it/358/873/pdf>.
- 3) A.D. Avrorin et al., « A positioning system for Baikal-GVD», <https://pos.sissa.it/358/874/pdf>
- 4) A.D. Avrorin et al.. "Neutrino Telescope in Lake Baikal: Present and Future", <https://pos.sissa.it/358/1011/pdf>.
- 5) A.D. Avrorin et al., "The Baikal-GVD neutrino telescope: First results of multi-messenger studies", <https://pos.sissa.it/358/1013/pdf>.
- 6) A.D. Avrorin et al., "The inter-cluster time synchronization systems within the Baikal-GVD detector", <https://pos.sissa.it/358/877/pdf>.
- 7) A.D. Avrorin et al., "The Baikal-GVD detector calibration", <https://pos.sissa.it/358/878/pdf>.
- 8) A.D. Avrorin et al., "Baikal-GVD: first results and prospects", EPJ Web Conf. 209 (2019) 01015.
- 9) A.D. Avrorin et al., "Environmental studies in Lake Baikal: basic facts and perspectives for interdisciplinary research", EPJ Web of Conferences 207, 09001 (2019).
- 10) A.D. Avrorin et al., "Luminescence of water in Lake Baikal observed with the Baikal-GVD neutrino telescope", EPJ Web of Conferences 207, 09002 (2019).
- 11) A.D. Avrorin et al., "Spatial positioning of underwater components for Baikal-GVD", EPJ Web of Conferences 207, 07004 (2019).
- 12) A.D. Avrorin et al., "Time calibration of the neutrino telescope Baikal-GVD", EPJ Web of Conferences 207, 07003 (2019).
- 13) A.D. Avrorin et al., "Baikal-GVD: cascades", EPJ Web of Conferences 207, 05001 (2019).
- 14) A.D. Avrorin et al., "Status of the Baikal-GVD Neutrino Telescope", EPJ Web of Conferences 207, 01003 (2019).

Доклады на Российских и международных конференциях и рабочих совещаниях

1. O.Suvorova. XVIII International Workshop on Neutrino Telescopes, 18-22 March 2019, Venice, Italy.
2. O.Suvorova. "Seminar in CPPM - Centre de Physique des Particules de Marseille, and meeting on the research projects KM3Net and GVD-Baikal", 24 June 2019, Marseille, France.
3. O.Suvorova. "The European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP)", 10-17 July 2019, Ghent, Belgium.
4. F.Simkovic. "36th ICRC 2019", July 24 - August 1st, Madison, WI, USA.
5. R.Dvornicky. "36th ICRC 2019", July 24 - August 1st, Madison, WI, USA.
6. L.Fajt. "36th ICRC 2019", July 24 - August 1st, Madison, WI, USA.
7. B.Shoibonov. "PAHEN 2019", September 25-27, Berlin, Germany.
8. M.Sheleпов. "Международная школа-конференция «Evolution of galaxies and stars», Сочи, 16-26 Июля 2019.
9. O.Suvorova. "4th Uppsala workshop on Particle Physics with Neutrino Telescopes (PPNT2019)", 7-9 October 2019, Uppsala, Sweden.

## 19 Отчет по эксперименту 24 «Протон»

Представлен отчет по теме «Прецизионное измерение радиуса протона в упругом электрон–протонном рассеянии» (краткое наименование ПРОТОН), координатор работ – научный руководитель Отделения физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, член-корреспондент РАН, профессор, доктор физ.-мат. наук Алексей Алексеевич Воробьев.

### 19.1 Введение

Протон является одним из основных элементов материи. Точное определение его характеристик — одна из ключевых задач в области адронной физики. Зарядовый радиус протона, т.е. распределение плотности заряда в пространстве – одна из наиболее важных характеристик протона, которые должны быть точно определены в эксперименте.

На данный момент существует значительное (4.5%) расхождение в результатах измерения зарядового радиуса протона, полученных в опытах по упругому электрон–протонному рассеянию и в экспериментах с мюонными атомами. Предыдущие экспериментальные данные по ер-рассеянию были получены в так называемых инклюзивных экспериментах, в которых детектировался только рассеянный электрон. В 2015 году группа сотрудников ПИЯФ под руководством проф. А.А. Воробьева предложила новый экспериментальный метод исследования малоуглового ер-рассеяния, в котором детектируются обе частицы в конечном состоянии — электрон и протон отдачи. Метод обладает рядом преимуществ позволяющих планировать прецизионное измерение дифференциального ер-сечения в области малых переданных импульсов, причем впервые будет измерено абсолютное сечение. Еще одним достоинством метода является относительно малая величина радиационных поправок к измеренному дифференциальному ер-сечению.

Эксперимент планируется выполнить на пучке электронов с энергией 720 МэВ ускорителя МАМІ (Майнц, Германия). В 2017 году Программный Комитет (РАС) одобрил это предложение с высшим приоритетом. Основной целью эксперимента является измерение зарядового радиуса протона с субпроцентной точностью.

### 19.2 Работы по проекту, выполненные в 2019 году

Ключевым элементом эксперимента «Протон» является детектор, состоящий из двух частей: время-проекционной камеры, регистрирующей протоны отдачи, и прецизионного детектора рассеянных электронов. На Рис. 19.1 схематически представлена структура экспериментальной установки. Электрон рассеивается на протоне в активной мишени – водородной время-проекционной ионизационной камере (TRC). Ионизационная камера позволяет измерять энергию протона отдачи и координату точки рассеяния вдоль электронного пучка. Координаты рассеянных электронов измеряются передним трекером (FT, Forward Tracker) на основе массива пропорциональных камер. Комбинация всех измерений позволяет восстановить полную кинематику упругого рассеяния электронов на протонах. Проект предполагает измерение дифференциального сечения электрон-протон упругого рассеяния в диапазоне переданных импульсов  $0,001 \text{ ГэВ}^2 < Q^2 < 0.04 \text{ ГэВ}^2$  с 0,1%

относительной и 0,2% абсолютной точностью. Таким образом, зарядовый радиус протона будет измерен с точностью лучше процента.

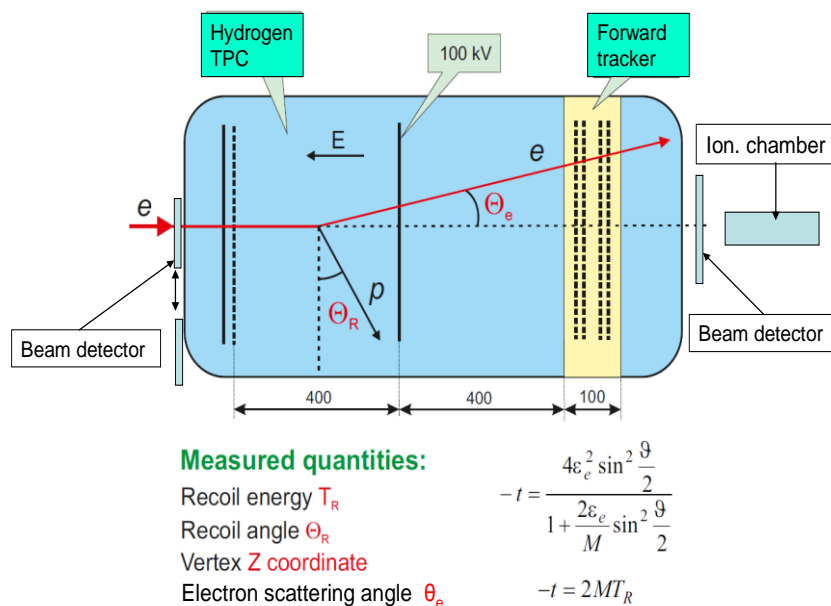


Рис. 19.1 – Общая схема эксперимента «Протон»

Абсолютные измерения упругого  $ep$ -рассеяния требуют измерения потока налетающих электронов с точностью лучше 0.1%. Соответствующая система мониторинга пучка в эксперименте «Протон» будет состоять из сцинтилляционных счетчиков, которые позволяют считать число электронов в пучке, и ионизационной камеры, измеряющей средний ток пучка.

Основной проблемой абсолютного мониторинга пучка является то, что при предполагаемых скоростях счета электронов (2 -2.5 МГц) в сцинтилляционных счетчиках возникают наложения импульсов, вследствие чего два пришедших электрона регистрируются электроникой как один. Соотношение между измеренным и реальным количеством электронов можно представить следующим выражением:

$$N_{meas} = N_{real}(1 - \tau N_{real}),$$

где  $N_{meas}$  – измеряемая скорость счета,  $N_{real}$  – реальная скорость счета,  $\tau$  – временное расстояние между двумя импульсами, когда они начинают разделяться электроникой. Так, при запланированном потоке 2 МГц и  $\tau = 5$  нс, число ожидаемых просчетов будет 1%. Соответственно, необходимо вводить поправку на число просчетов с точностью не хуже 10%. В эксперименте «Протон» эта поправка будет определяться с помощью специальной ионизационной камеры регистрирующей пучок электронов одновременно со сцинтилляционными счетчиками. Поправка на вероятность просчетов будет получена из сравнения скорости счета счетчиков с током ионизационной камеры в зависимости от варьируемой интенсивности пучка электронов. При этом используется тот факт, что ток в ионизационной камере строго пропорционален интенсивности пучка. Основной задачей тестового сеанса на ускорителе МАМІ в 2018 году была отработка метода измерения абсолютной интенсивности электронного пучка. В 2019 году проводились опытно-

конструкторские работы по конструированию и тестированию элементов основного детектора эксперимента «Протон».

### 19.2.1 Изготовление и тестирование корпуса основного детектора

В ПИЯФ был сконструирован и изготовлен корпус основного детектора. Рабочее давление в детекторе (время-проекционная ионизационная камера и трекер) составляет 20 атм (абсолютных). Корпус детектора рассчитывался и тестировался при давлении 40 атм. На *Рис. 19.2* представлена схема критических (до 40 атм.) испытаний корпуса детектора.

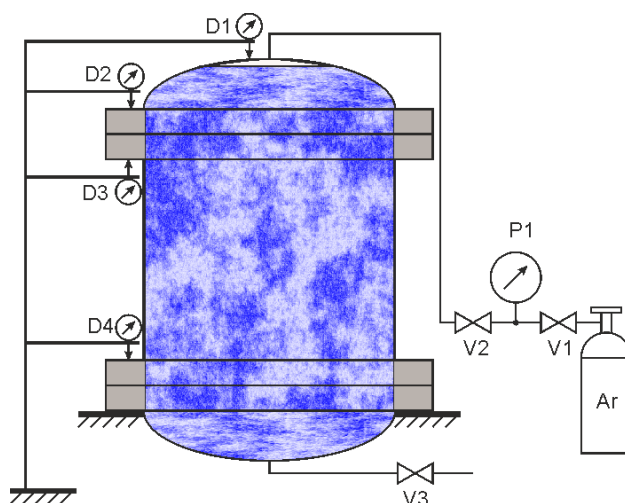


Рис. 19.2 – Схема критических испытаний корпуса детектора при заполнении водой

Для гарантии безопасной работы были проведены измерения линейных деформаций корпуса детектора в точке D1 (см. *Рис. 19.2*) как функция давления внутри корпуса. Результаты измерений представлены на *Рис. 19.3*.

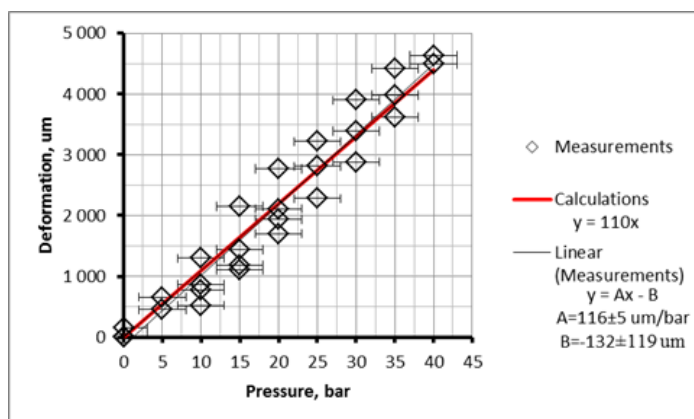


Рис. 19.3 – Деформация корпуса детектора в точке D1, как функция давления

Измерения деформаций проводились при 4-х циклах поднятия и сброса давления. Установлено:

1. Деформация носит линейный характер, т.е. мы находимся в области упругих деформаций.

2. При сбросе давления деформации возвращаются к нулевому положению. Это означает отсутствие остаточных деформаций.
3. Расчетные деформации с хорошей точностью соответствуют измеренным. Это подтверждает правильность расчетной модели.

На основании этих измерений мы можем гарантировать возможность использования корпуса детектора для длительной работы в экспериментальных условиях. На *Рис. 19.4* представлен процесс проведения критических испытаний корпуса детектора.



Рис. 19.4 Проведение критических испытаний корпуса детектора на давление

#### 19.2.2 Изготовление и тестирование прототипа трекера

Ключевым элементом эксперимента является трекер – набор пропорциональных камер высокого давления. Камеры измеряют координаты электронов после упругого рассеяния на протоне. Особенности трекера являются:

1. Работа пропорциональной камеры при 20 атм.
2. Требования к линейности шкалы измерения координат рассеянных электронов на уровне 0,02%.

Пропорциональных камер, работающих при давлении 20 атм., на сегодняшний день в мире не существует. В ПИЯФ был собран первый рабочий образец. На *Рис. 19.5* приводится фотография опытного образца одной станции трекера (всего в детекторе восемь станций).

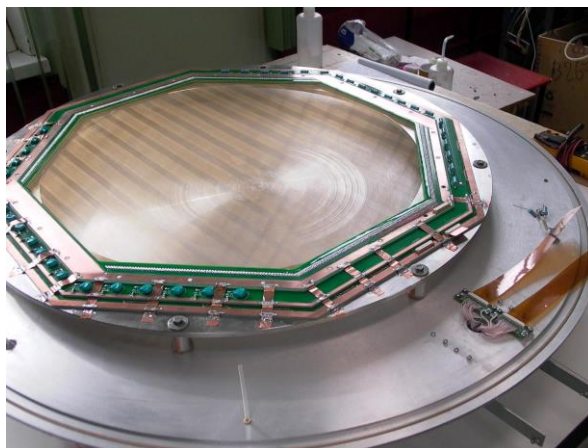


Рис. 19.5 – Опытный образец одной станции трекера

На Рис. 19.6 приводится фотография установки для измерения положения проволочек трекера. Диаметр области детектирования 600 мм. Координаты проволочек трекера измеряются с помощью микрофотографирования и измерения положения микроскопа с точностью лучше 10  $\mu\text{м}$ .

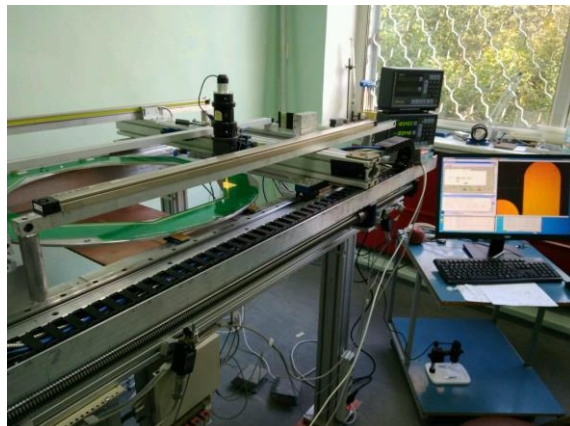


Рис. 19.6 – Установка для измерения положения проволочек трекера

Основной задачей измерения положения проволочек трекера является гарантия линейности шкалы измерения координат рассеянного электрона. Данная величина входит в погрешность определения радиуса протона. На Рис. 19.7 приводится фотография проволочек, а на Рис. 19.8 – распределение отклонения положения проволочек от «идеального». Ширина распределения на половине высоты составляет 0,02 мм при допустимой 0,12 мм.

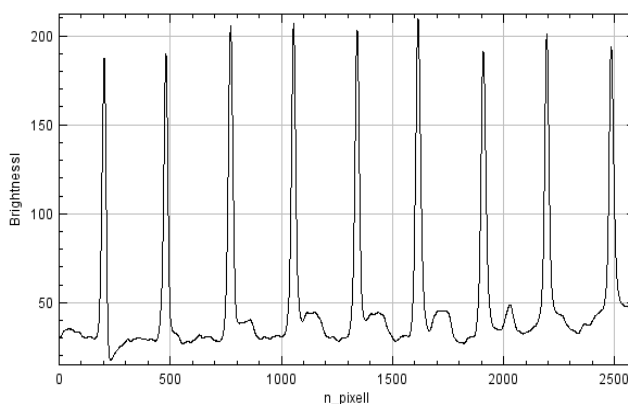
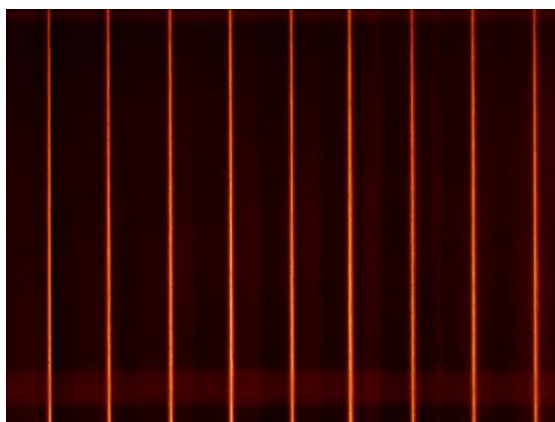


Рис. 19.7 – Фотография и оцифрованная фотография 50  $\mu\text{м}$  проволоч, расположенных с шагом 0.5 мм

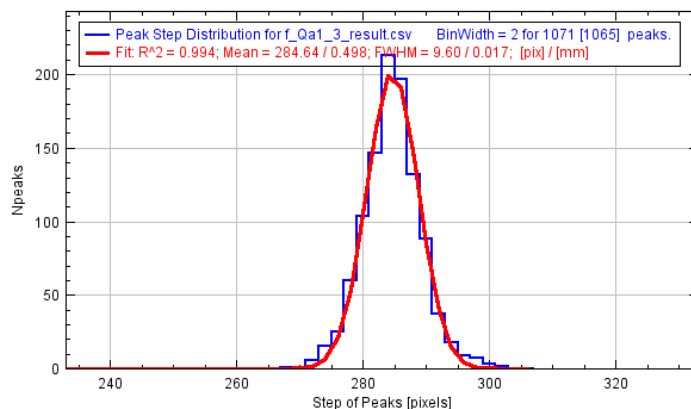


Рис. 19.8 – Распределение отклонения положения проволочек от «идеального»

Можно констатировать, что прототип станции трекера существенно превышает заложенные в проекте характеристики по линейности шкалы.

В настоящий момент проводятся испытания прототипа станции трекера при атмосферном давлении рабочего газа с регистрацией космических мюонов. Фотография установки представлена на Рис. 19.9. Верхний и нижний сцинтилляционные детекторы регистрируют прохождение космического мюона через станцию трекера.



Рис. 19.9 – Тестирование прототипа станции трекера при атмосферном давлении рабочего газа

### 19.2.3 Тестовый сеанс на ускорителе МАМІ

По решению администрации Института ядерной физики Университета г. Майнца в ноябре 2019 года было выделено две недели пучкового времени на ускорителе МАМІ. Главной задачей была наладка и тестирование системы мониторинга тока пучка.

Ионизационная камера (Рис. 19.10) была установлена на оси пучка. Сцинтилляционные счетчики были зафиксированы на переднем фланце камеры.

Ионизационная камера находится внутри цилиндра (диаметр 222 мм, длина 700 мм) заполненным чистым (99,99%) аргоном при давлении 20 бар. Напряжение между анодом и катодом до 30 кВ. При прохождении электронного пучка с интенсивностью 2 МГц между электродами появляется ток около 40 нА. Этот ток может быть измерен с точностью 4 пА.

Были сконструированы два счетчика, состоящих из супербыстрых пластических сцинтилляторов ВС-420 размером 40 x 40 x 20 мм<sup>3</sup>, которые просматриваются с двух сторон фотоумножителями R4998 производства Hamamatsu Photonics Ltd. Время нарастания анодного сигнала ФЭУ R4998 0,7 нс, ширина сигнала на полувысоте менее 3 нс. Изготовленные счетчики прошли предварительные испытания на измерительном стенде в ПИЯФ.



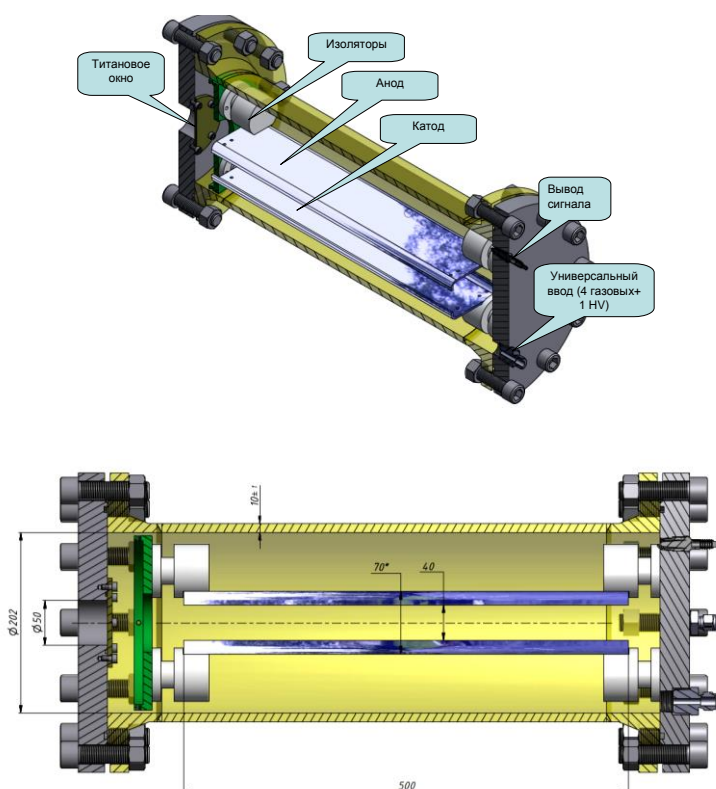


Рис. 19.10 – Схема ионизационной камеры высокого давления для мониторинга интенсивности электронного пучка

#### Результаты работы на электронном пучке

1. Была протестирована и откалибрована ионизационная камера. Темновой ток стабилен при напряжении на катоде 5 кВ и не превышает 0.1 пА. Калибровка тока ионизационной камеры с использованием сцинтилляционных счетчиков при малых интенсивностях пучка обеспечивает абсолютные измерения интенсивности пучка с погрешностью менее 0,1%.

2. Исследование парного времени сцинтилляционных счетчиков с использованием ионизационной камеры дали результаты, совпадающие с расчетными. Отмечается необходимость тщательной настройки элементов сцинтилляционных счетчиков перед началом эксперимента.

3. Сцинтилляционный счетчик, находящийся вне оси пучка, может быть использован для контроля интенсивности пучка с большими интенсивностями. Эта техника должна дополнительно изучаться и калиброваться.

4. Временная структура интенсивности пучка измерялась с помощью обоих сцинтилляционных счетчиков и ионизационной камерой показывает хорошее согласие обоих методов.

#### 19.2.4 Решение о проведении следующего тестового сеанса

В соответствии с планом подготовки эксперимента «Протон» администрацией Института ядерной физики Университета Майнца выделено 2 недели пучкового времени в сентябре-октябре 2020 года для проведения следующего тестового сеанса. В этом сеансе будут оптимизироваться характеристики электронного пучка в месте расположения эксперимента и тестироваться средства автоматической стабилизации положения пучка.

### 19.2.5 Работы по созданию основного детектора

Практически вся работа по созданию установки «Протон» ведется в ПИЯФ. В 2020 году основной детектор должен быть изготовлен и транспортирован в Майнц, где должна быть осуществлена сборка детектора и проведены стендовые испытания (без пучка). Для этого следует предусмотреть командирование группы сотрудников ПИЯФ осенью 2020 года.

### 19.2.6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты в 2019 г. по проекту Протон:

- Создан и протестирован корпус детектора;
- Создан и протестирован прототип станции трекера;
- Создана установка для измерения координат проволочек трекера;
- Проведен сеанс на пучке ускорителя МАМІ для определения основных характеристик токового монитора. Результаты обрабатываются.

19.3 Приложение Соответствие планам исследований в проектах ЗНЦ и статус реализации проекта

Число специалистов ПИЯФ, участвовавших в проекте Протон в 2019 г. – 15

- Визиты специалистов ПИЯФ в Германию (Майнц) по теме из денег МинОбрНауки по теме «Протон» представлены в таблице ниже.

ФИО	Должность	Период	Длительность (сутки)	Место	Цель
Васильев Александр Анатольевич	Зам. Рук. Отделения	23.09-16.10. 2019 г.	24	Майнц	Работа на пучке ускорителя МАМІ
Взнуздаев Марат Евгеньевич	Старший научный сотрудник	23.09-15.10. 2019 г.	23	Майнц	Работа на пучке ускорителя МАМІ
Ившин Кузьма Александрович	Научный сотрудник	22.09-15.10. 2019 г.	24	Майнц	Работа на пучке ускорителя МАМІ
Кравцов Петр Андреевич	Начальник управления	18.03-29.03 2019 г.	12	Майнц	Работа на пучке ускорителя МАМІ
Кузнецов Вячеслав Александрович	Ведущий научный сотрудник	17.03-10.04 2019 г.	25	Майнц	Работа на пучке ускорителя МАМІ
Петров Геннадий Егорович	Старший научный сотрудник	10.03-10.04 2019 г.	32	Майнц	Работа на пучке ускорителя МАМІ
Трофимов Виктор Алексеевич	Старший научный сотрудник	18.03-31.04 2019 г.	14	Майнц	Работа на пучке ускорителя МАМІ
Инглесси Александр Георгиевич	Научный Сотрудник	10.03 - 10.04	32	Майнц	Работа на пучке ускорителя МАМІ

- Число молодых специалистов (моложе 35 лет) – 3.
- Студенты - 2.
- Защит диссертаций Ившин К.А. кандидатская диссертация.
- Доклады сотрудников ПИЯФ по теме «ПРОТОН» на международных конференциях: Vasilyev A et al. Detector for precision measurement of the proton charge radius. The 3rd international Workshop on Gaseous Detectors and Systems. January, 2019. Orsay, France.
- Публикации в реферируемых журналах – нет.
- Финансирование российскими организациями – частично работа финансировалась ПИЯФ НИЦ КИ.
- Финансирование в 2019 г. по линии МинОбрНауки ~ \$ 29600. Израсходовано ~ \$ 29600
- Количество командировочных дней по теме проекта – 186.

#### 19.4 План на 2020 год

- Проведение в сентябре-ноябре 2020 г. двухнедельного тестового сеанса на ускорителе МАМІ
- Изготовление в ПИЯФ и сборка в Майнце элементов основного детектора.
- Подготовка к проведению основных измерительных сеансов в 2021 году

Запрашиваемая КВОТА на 2020 г. по проекту Протон составляет 40 000 USD.

Она будет израсходована на поездки в Майнц основных исполнителей: Васильева А.А., Взнуздаева М.Е., Ившина К.А. и исполнителей: Соловьева И., Соловьева А., Трофимова В.А. и др. с общим количеством человеко-дней в Германии около 300.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2019 году в рамках сотрудничества российских институтов с научными центрами Германии были продолжены эксперименты, поддерживаемые Департаментом государственной научной, научно-технической и инновационной политики Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Основная часть работ проходит в крупнейших научных центрах Германии: в научном центре Немецкий синхротрон (DESY) в г. Гамбург (включая исследования с использованием рентгеновского лазера на свободных электронах – XFEL) и в научном центре Сообщество Тяжелых Ионов (GSI) в Дармштадте (включая подготовку к экспериментам по программе ФАИР). В 2018 г. были получены новые результаты по всем проектам.

В рамках эксперимента 3 (ОЛИМПУС/ГЕРМЕС) в 2019 году завершена обработка данных по передаче спина  $\Lambda$ -гиперону. Полученный результат совместим с нулем, что свидетельствует о том, что выбитый из мишени  $u$ - кварк, наследующий поляризацию пучка, не оказывается в составе  $\Lambda$ - гиперона, который рождается, в основном, в центральной части фрагментационной струны.

Основным результатом работ в 2019 в рамках проекта 4 «Ускорительные технологии» является успешная работа и развитие ускорительного комплекса ДЕЗИ, включая XFEL.

В 2019 году проведены работы:

- Отклоняющая система и волноводный тракт системы TDS BC1 настроены и готовы к работе.
- Высокочастотная система питания большой мощности смонтирована на экспериментальном стенде, налажена и испытана.
- Изменена форма поверхности резонатора в области фотокатода для снижения на ней величины электрического поля. По результатам расчетов, модификация формы поверхности резонатора приведет к уменьшению величины темнового тока на 40%.
- Совместно с сотрудниками группы PIZ начата разработка резонатора группирователя, работающего на частоте 1,3 ГГц в непрерывном режиме.
- было продолжено сотрудничество с DESY по определению облика нового источника синхротронного излучения PETRA IV, в частности проведены исследования, направленные на выбор параметров электромагнитов и их оптимизацию с учётом взаимного влияния на создаваемые ими магнитные поля. В ходе проведения исследований выполнено 2D и 3D-моделирование итерационные 2D и 3D-расчёты электромагнитов.

Основные работы по проекту 6 «Фотон» выполняются российскими учеными на источнике Синхротронного Излучения (СИ) PETRAIII в центре DESY (Гамбург) и Европейском рентгеновском лазере на свободных электронах. Сегодня экспериментальные возможности ЕРЛСЭ позволяют находиться на переднем фронте наноструктурных рентгеновских исследований с беспрецедентным временным разрешением до 20-100 фс. В 2019 г. выполнены следующие основные работы:

- Начаты работы по созданию инструментов диагностики рентгеновского пучка на каналах SASE1 и SASE2.

– Выполнена серия теоретических исследований, посвященных дифракционному рассеянию лазерного рентгеновского излучения на кристаллах с резонансными ядерными переходами.

– Проведена характеристика фокуса жесткого рентгеновского излучения. Впервые получены экспериментальные данные по порогам абляции детектора LiF при воздействии фемтосекундных рентгеновских импульсов.

В рамках проекта 7 по подготовке к исследованиям на линейном коллайдере проведена оценка чувствительности процессов одиночного рождения топ кварка к аномальным операторам. Установлено, что влияние оператора  $O_{\phi Q}$  остается неизменным при переходе от 14 до 27 ТэВ, так как его эффект заключается только в перемасштабировании параметра взаимодействия SM. Подготовлен обзор современного состояния физики топ кварка. На основе созданных Монте-Карло генераторов сделана оценка чувствительности процессов одиночного рождения топ кварка к векторным и тензорным аномальным взаимодействиям на планируемом коллайдере FCCee в зависимости от его интегральной светимости. С использованием результатов моделирования физических процессов при непосредственном участии наших сотрудников были сформулированы требования на физические параметры электрон-позитронного коллайдера коллайдера FCCee, способного измерить характеристики процессов на один-два порядка величины превосходящей измерения доступные на коллайдере LHC/HL-LHC

При подготовке к исследованиям на линейном коллайдере было выполнено моделирование процесса  $e+e- \rightarrow HZ$ ,  $H \rightarrow ZZ^*$ ,  $Z \rightarrow jj$ ,  $Z^* \rightarrow \mu+\mu-/e+e-$  при  $\sqrt{s} = 500$  ГэВ, определена точность измерения соответствующего произведения сечения процесса и относительной вероятности распада бозона Хиггса на интегральной светимости  $2 \text{ аб}^{-1}$ . С помощью моделирования был проведен анализ различных алгоритмов реконструкции струй на детекторе ILD коллайдера ILC, наилучшей точностью обладает алгоритм Valencia.

В рамках проекта 8 в 2019 году была продолжена обработка данных, полученных при испытаниях прототипа адронного калориметра детектора ILD. Показано, что для энергий пионов 10, 20, 40 и 80 ГэВ энергетическое распределение и другие характеристики согласуются, с учетом корректировки, в двух режимах работы.

Руководство ДЕЗИ выступило с инициативой расширить сотрудничество с группой ФИАН (включая МИФИ, МФТИ и другие) по созданию цифрового детектора нового поколения, удовлетворяющего требованиям экспериментов на LHC с высокой светимостью.

В серии экспериментов по исследованию легких экзотических ядер (проект 9), которые были проведены на пучках ускорителя Ядерного центра тяжёлых ионов (GSI, Дармштадт), завершён анализ данных по упругому малоугловому рассеянию протонов на нейтронно-избыточных изотопах углерода  $^{14-17}\text{C}$  и стабильном  $^{12}\text{C}$ . С точностью абсолютной нормировки 2-3 % были измерены дифференциальные сечения упругого рассеяния протонов на стабильных ядрах  $^4\text{He}$ ,  $^6\text{Li}$ ,  $^{12}\text{C}$ , на ядрах с избытком нейтронов –  $^6,8\text{He}$ ,  $^{8,9,11}\text{Li}$ ,  $^{12,14}\text{Be}$ ,  $^{14,15,16,17}\text{C}$  и ядрах с избытком протонов –  $^7\text{Be}$ ,  $^8\text{B}$  при энергии 0,7 ГэВ/нуклон в диапазоне переданных импульсов  $0,002 \leq |t| \leq 0,05$  (ГэВ/c)<sup>2</sup>. Из анализа измеренных сечений были определены параметры распределения ядерной материи для этих ядер. Были обнаружены новые свойства ядерной материи у нейтронно-избыточных ядер – существование нейтронной шубы и гало, а в протонно-избыточном ядре  $^8\text{B}$  – наличие протонного гало.

В 2019 г. в проекте 10 SHIPTRAP была произведена тщательная обработка и анализ полученных данных по прямому измерению масс трансформированных элементов, выполненных в прошлом году. Полученные значения масс нуклидов  $^{251-254}\text{No}$ ,  $^{254-256}\text{Lr}$  и  $^{257}\text{Rf}$  позволили по известным цепочкам альфа-распадов воспроизвести часть ландшафта сверхтяжёлых нуклидов вплоть до элемента дармштадтия ( $Z=110$ ). Полученные данные свидетельствуют о существовании «малых островов стабильности» в области сверхтяжёлых элементов.

В экспериментах на запущенной недавно установке PENTATRAP был получен рекордный результат по точности в масс-спектрометрии. В частности, увеличена на порядок величины по сравнению с нашим предыдущим результатом на SHIPTRAP, точность определения разности масс пары нуклидов рения-осмия с массовым числом  $A=187$ , достигшая 3 эВ.

В 2019 г. коллаборация ХАДЕС отмечает 25-летие с момента своего образования. За эти годы на широкоапертурном магнитном спектрометре ХАДЕС был выполнен целый ряд экспериментов по исследованию свойств ядерной материи при энергиях налетающих ядер порядка 1 – 2 ГэВ на нуклон в лабораторной системе. Физическая программа этих экспериментов направлена на поиск и исследование явлений, связанных со спонтанным нарушением киральной симметрии – фундаментальной симметрии сильных взаимодействий. Выполнены следующие основные работы:

В феврале-марте 2019 г. на установке ХАДЕС был проведен первый сеанс набора данных. С 27 февраля по 29 марта исследовались столкновения ядер серебра при энергии пучка 1,58 ГэВ, а с 29 марта по 01 апреля – при энергии пучка 1,23 ГэВ. К началу (Ag-Ag)-сеанса на ХАДЕС в феврале-марте 2019 г. были полностью собраны 4 сектора ECAL со 163 модулями в каждом секторе и проведено их тестирование, временная и амплитудная калибровка. Выполнена работа по монтажу переднего годоскопа на установку ХАДЕС, проведена проверка работоспособности всех 288 сцинтилляционных детекторов этого годоскопа и их калибровка на космических мюонах.

В 2019 году проведена работа по анализу коллективных потоков и азимутальных корреляций заряженных частиц в экспериментальных данных по столкновениям ионов золота Au+Au при энергии налетающего пучка 1.23 ГэВ на нуклон с фиксированной мишенью, полученных на установке NADES в 2012 г.

Представлено предложение о возможном расширении исследований, направленных на изучение в ядро-ядерных столкновениях свойств ядерной материи на малых ( $< 1$  ферми) межнуклонных расстояниях и предложение по изучению модификации ширины тяжелого гиперона  $\Lambda(1520)$  в ядерной среде в реакциях взаимодействия  $\pi^-$  мезонов с импульсом 1.7 ГэВ/с с ядрами углерода и вольфрама.

Знаменательным событием в 2019 г. стала публикация в журнале Nature Physics статьи коллаборации ХАДЕС «Probing dense baryon-rich matter with virtual photons» (см. <https://doi.org/10.1038/s41567-019-0583-8>), соавторами которой является группа ученых из Института ядерных исследований РАН, НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ и НИЯУ «Московский инженерно-физический институт». В этой статье обсуждаются результаты эксперимента на установке ХАДЕС по исследованию свойств ядерной материи, которая образуется в столкновениях ядер золота при энергии в системе центра масс сталкивающихся нуклонов 2.4 ГэВ.

В рамках эксперимента 13 (ГАЛО) проведен эксперимент S454 «Изучение скорости астрофизической реакции  $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ ». Эксперимент послужил тестом работоспособности всех экспериментальных установок во время одновременной работы. На начало следующего года предполагается проведение двух экспериментов: S444 и S467 (одночастичная структура нейтронно-избыточных изотопов Ca: эволюция оболочки вдоль  $Z = 20$ ).

В проекте 14 (КОМПТОН) продолжена подготовка эксперимента по прецизионному измерению поляризуемостей нуклонов, подписано соглашение о сотрудничестве между Университетом Майнца (ИКР) и ПИЯФ по подготовке эксперимента по комптоновскому рассеяния на ускорителе MESA. Запуск ускорителя MESA намечен на 2021–2022 годы.

Значительные работы были выполнены по подготовке к проведению экспериментов ФАИР.

В рамках деятельности по проекту APPA (проект 17) в 2019 году были успешно проведены следующие работы:

1. Подготовка и проведение эксперимента по разработке рентгеновского диагностического метода для регистрации излучения мишени под воздействием тяжелоионного пучка. Для тестирования диагностической методики на ускорителе UNILAC в GSI проводился эксперимент с пучком ионов  $\text{Au}^{+26}$  с энергией 11,4 МэВ/н при облучении тонкой медной сетчатой мишени

2. Подготовка и проведение экспериментальных исследований энергетических потерь ионов в ионизованном веществе. Экспериментальная установка позволяет достигать больших значений энерговклада в плазму (до 50 кДж) однако для достижения этих параметров требуются дополнительные работы по защите измерительной аппаратуры от влияния электромагнитных наводок возникающих при работе высоковольтной схемы мишени. Также, планируется повысить трансмиссию тока пучка через мишень.

3. Взаимодействие с веществом быстрых тяжёлых ионов (БТИ), тормозящихся в режиме электронных потерь энергии. Экспериментально и теоретически был исследован отклик трёх диэлектриков  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  (YAG) на облучение ионами Xe с энергией 167 МэВ. Обновленная версия микроскопической модели была применена для получения распределений химической активности и скоростей жидкостного химического травления железосодержащего оливина ( $(\text{Mg}_x\text{Fe}_{1-x})_2\text{SiO}_4$ ) вдоль траекторий БТИ (1,7 ГэВ Xe и 16 ГэВ U). Проведенное моделирование продемонстрировало недостатки применения оптической микроскопии для фиксации травления треков БТИ с различными начальными энергиями. Вышеупомянутых проблем можно избежать, применяя экспериментальные методы регистрации диаметров протравленных каналов с наноразмерным разрешением.

4. Численное моделирование экспериментов для исследования свойств веществ в экстремальных состояниях на ускорителе FAIR. Наиболее перспективной представляется схема эксперимента с использованием тонкой фольги, помещённой в атмосферу аргона, сжатого до давления 100 бар. Планируемой мощности пучка на этапе эксперимента "Первого дня", с варьированием параметров фокусировки пучка в допустимых пределах оказывается достаточно для достижения околоскритических параметров в свинце.

5. Оптимизация источников рентгеновского излучения и ускоренных частиц для диагностики в экспериментах проекта FAIR. Анализ экспериментальных данных показывает десятикратное увеличение характерной энергии ускоренных электронов до 12 - 14 МэВ при

использовании мишеней из пены с околоритической плотностью электронов по сравнению с твердотельными металлическими мишенями.

В рамках подготовки к проведению эксперимента CBM (проект 17) проводились работы по следующим основным направлениям:

В эксперименте CBM подготовлены детекторы и проведен первый сеанс на установке mCBM, были сделаны сравнительные измерения, чтобы принять окончательное решение о типе интегрированной электроники для работы мини-модуля на сеансе в установке mCBM.

В рамках работ по центральной части времяпролетного детектора (TOF) принято решение пока отказаться от использования электроники PADI и проводить все измерения с электроникой NINO. Выполнена первая попытка запуска общей системы потокового считывания для максимального набора детекторов-прототипов. Были проведены наборы данных для различных интенсивностей пучка и толщин мишени. При максимальной интенсивности пучка  $^{108}\text{Ag}$  ионов/сек (1.58 АГэВ) и толщине мишени Au (2.5мм) удалось получить максимальную частоту взаимодействия около 10 МГц, которая планируется в детекторе CBM. Проводится обработка данных.

Выполнены работы по оптимизации алгоритмов восстановления оцифрованного электронного сигнала с фотоумножителей электромагнитного калориметра электромагнитного калориметра (ECAL)

В марте 2019 года в GSI были проведены первые тесты электроники для сбора сигналов PSD@CBM калориметра на пучке mCBM в GSI. Тест проведен на пучке ионов серебра с энергией 1.58 АГэВ и интенсивностью  $4 \times 10^7$  ионов в секунду. Результаты выполненных на пучке тестов показали, что плата PANDA@ADC64 можно использовать для оцифровки сигналов калориметра PSD@CBM. Однако, для интеграции ADC64 в DAQ@CBM (mCBM) необходима разработка нового программного обеспечения. Таким образом, основная часть работы по интеграции платы ADC64@ECAL PANDA в mPSD DAQ в 2019 г. была завершена, что позволит осуществить набор данных с mPSD параллельно с остальными детекторами mCBM в сеансах 2020 г. и испытать плату в реальных условиях при высоких нагрузках.

Проделана интенсивная работа над концептуальным дизайном механики MUCH. В настоящее время ведутся реальные дизайнерские работы. Для комплексной проверки детектора RICH был построен полномасштабный прототип, который был успешно испытан в ходе трех испытательных сессий на тестовом пучке в ЦЕРН. Испытания показали, что на электронное кольцо измеряется 22 фотона. По результатам моделирования благодаря высокой гранулярности и большого количества фотонов на кольцо, ожидается, что будет достигнуто подавление пионов более чем в 100 раз.

В 2019 г. были продолжены исследования потоков странных адронов в рамках подготовки физической программы эксперимента CBM. Велась разработка ПО и изучение возможностей детектора по измерению коллективных потоков странных адронов. В рамках этих работ проводились моделирования столкновений ядер золота при энергиях с помощью программной среды CBMROOT.

В 2019 проведена работа по созданию общей для всей Коллаборации библиотеки данных Монте-Карло, необходимой для изучения возможности проведения физического анализа в эксперименте CBM, которая содержит результаты моделирования методом Монте-Карло столкновений тяжелых ядер, GEANT симуляции отклика детекторных подсистем CBM и реконструкции продуктов взаимодействия ядер.



Проведено исследование возможностей эксперимента CBM для измерений направленного потока заряженных адронов.

Выполнены работы по разработке концепции кремниевой трековой системы.

В 2019 году в рамках проекта 18 NuSTAR работы проводились по шести темам:

- В рамках исследования экзотических ядер на установке R3B с использованием нейтронного времяпролетного спектрометра NeuLAND выполнено моделирование отклика спектрометра NeuLAND на нейтроны с энергиями 200, 600, и 1000 МэВ. Полученные результаты указывают на необходимость серьезной ревизии имеющегося программного обеспечения и его дальнейшего развития. Проведены работы по монтажу модулей спектрометра NeuLAND и тестированию сцинтилляционных полос и фотоумножителей. Начата разработка процедуры калибровки спектрометра с использованием UV светодиодов и UV лазера.
- В течение 2019 года произведен выпуск второй (последней) партии модулей 3000-канальной подсистемы в составе 20 модулей, тестовые испытания и опривка всех 60 модулей 3000-канальной подсистемы системы распределения высоковольтного питания для нового широкоапертурного нейтронного детектора NeuLAND.
- В работах по созданию протонного спектрометра на базе работающих в вакууме дрейфовых трубок изготовлены 650 трубок для координатной плоскости SWT-X2 (трубки проверены на высокое напряжение и на работу в вакууме), изготовлены система газового обеспечения спектрометра PAS и система контроля газовой утечки трубок в вакууме. Изготовлены опытные образцы преусилителей (4 шт.) для измерительной станции. Осуществлена подготовка к массовому производству этих плат. Изготовлены опытные образцы системы подачи высокого напряжения и системы подачи низкого напряжения.
- Начато изготовление корпуса малой активной мишени АСТАФ2 для изучения неупругого рассеяния экзотических ядер на ядрах гелия. Начата подготовка в GSI инфраструктуры (вакуумной, газовой и высоковольтной систем) для будущих экспериментов с активной мишени АСТАФ2.
- По программе R<sup>3</sup>B в 2019 г. проведен эксперимент S454 по кулоновскому расщеплению <sup>16</sup>O на  $\alpha$ -частицу и <sup>12</sup>C, проведена подготовка к экспериментам S444 и S467, запланированным на февраль 2020 года. Закончен анализ данных и опубликованы статьи по механизму реакций <sup>12</sup>C(<sup>12</sup>C, 2p)<sup>11</sup>B и по измерению одночастичных спектроскопических факторов в реакциях квазисвободного рассеяния <sup>11</sup>C(p,2p) и <sup>10-12</sup>C (p,pn). Закончен анализ экспериментальных данных, полученных в реакциях квазисвободного рассеяния <sup>17,19,21</sup>N(p,pn).
- Произведены оценки возможности создания новой ловушки комбинированного типа, в которой совмещены функции очищающей и измерительной ловушек. Показаны пути осуществления этого проекта. Изготовлены узлы такой системы, готовые к проведению проверочного эксперимента

Основными результатами работ по эксперименту 19 (ПАНДА) стало принятие утверждение технического проекта (TDR) времяпролетной системы и успешное испытание механической конструкции прототипа сектора. Испытания сектора центрального электромагнитного калориметра полностью подтвердили правильность расчетов и решений

группы ИФВЭ. Выполнена значительная часть работ по подготовке Технического проекта корпускулярной мишени.

В рамках подготовки эксперимента проведено моделирование сканирования экзотического состояния X(3872). Показано, что эксперимент позволяет измерить ширину этого состояния лучше 100 кэВ, что позволит определить природу этого состояния.

Завершены работы по эксперименту 20 АНКЕ в Юлихе. В 2019 году закончена обработка данных по образованию протонами легких гиперонов  $\Lambda(1116)$  на ядрах углерода, меди, серебра и золота, направленная на получение первых экспериментальных результатов о модификации свойств  $\Lambda$  гиперонов с ненулевыми импульсами в ядерной среде. Основные работы на ускорителе COSY Исследовательского центра Юлих (Германия) завершены, однако программу физических исследований планируется продолжить в национальном исследовательском центре GSI (Германия) в рамках коллаборации HADES

В проекте 21 KATRIN был проведен четырехнедельный цикл измерения массы нейтрино. Несмотря на то, что содержание трития в источнике составляло только 25% от номинального, анализ данных позволил получить ограничение на эффективную массу электронного антинейтрино  $m_{\nu} < 1$  эВ, что превосходит по точности в 2 раза предыдущие лабораторные результаты.

Проведен поиск новых детекторов для уменьшения фона, результаты исследований показали, что исследованные детекторы отраженных электронов с внутренним усилением являются весьма перспективными и для других видов применений в тех областях, где требуется регистрация большого потока электронов с энергиями больше 500 эВ, в частности, при измерениях бета-спектра трития в широком диапазоне.

По проекту 22 (Деление) в коллаборации ЛНФ ОИЯИ – ИТЭФ – ПИЯФ – FRM2 была продолжена деятельность по изучению T-нечетных эффектов в излучении мгновенных  $\gamma$ -квантов и нейтронов при бинарном делении ядер  $^{235}\text{U}$  и  $^{233}\text{U}$  поляризованными холодными нейтронами. Работы ведутся на установке POLI на реакторе FRM2 (Гархинг, Германия). В 2019 году на эксперимент по делению не было выделено пучкового времени, тем не менее, велась работа по подготовке новых измерений в 2020 и последующих годах

В течение 2019 года по проекту 23 (Байкал) осуществлялась эксплуатация телескопа Baikal-GVD в режиме непрерывного набора данных и в тестовых режимах. Были продолжены работы по разработке и усовершенствованию программного обеспечения моделирования отклика и анализа данных нейтринного телескопа а Baikal-GVD. В рамках работ по развитию комплекса вычислительных и служебных программ BARS разработана процедура экспресс анализа данных телескопа при получении алерт-сигнала от нейтринных телескопов, детекторов электромагнитного излучения, либо от гравитационных антенн.

В течение 2019 г. велся анализ экспериментальных данных, накопленных в 2018 и начале 2019 гг. В результате анализа экспериментальных данных 2016, 2018 и 2019 года за 1364 дня эффективного набора данных одним кластером выделено в общей сложности шесть ливневых событий с энергией выше 100 ТэВ — кандидатов на события от нейтрино астрофизической природы. Количество выделенных событий соответствует ожидаемому числу событий от диффузного потока нейтрино астрофизической природы, зарегистрированного в эксперименте IceCube.

В 2019 г. по проекту 24 ПРОТОН был сконструирован и изготовлен корпус основного детектора, изготовлен и проверен прототип трекера. Можно констатировать, что прототип станции трекера существенно превышает заложенные в проекте характеристики по линейности шкалы. В ноябре 2019 года было выделено две недели пучкового времени на ускорителе МАМІ, в результате которого получены удовлетворяющие требования эксперимента характеристики детектора и принято решение о проведения следующего тестового сеанса.

По результатам исследований в 2019 г. опубликовано 78 статей, индексируемых Web of Science и/или Scopus. На Международных конференциях представлено 79 докладов. Список публикаций приведен в Приложении А.

В Приложении Б приведены запросы координаторов экспериментов на 2019 год. Общий запрос на финансирование сотрудничества с Германией в 2019 году составлял около 642 100 долларов США (реально выделено 563 120). Запрос на 2020 г. составляет 670 000 долларов США

## ПРИЛОЖЕНИЕ А. СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Список публикаций, индексируемых Web of science или Scopus

### 03. ОЛИМПУС/HERMES

- 1 Beam-helicity asymmetries for single-hadron production in semi-inclusive deep-inelastic scattering from unpolarized hydrogen and deuterium targets HERMES Collaboration (A. Airapetian (Giessen U. & Michigan U.) et al.). Mar 20, 2019. 29 pp. Phys.Lett. B797 (2019) 134886
- 2 Longitudinal double-spin asymmetries in semi-inclusive deep-inelastic scattering of electrons and positrons by protons and deuterons, HERMES Collaboration (A. Airapetian (Giessen U. & Michigan U.) et al.). Published in Phys.Rev. D99 (2019) no.11, 112001 DOI: 10.1103/PhysRevD.99.112001.

### 04-Ускорительные технологии

- 3 V. Paramonov, A. Skasyrskaya, B. Militsyn. Parameters Stability of S-Band RF Gun Cavity Due to Effects of Pulsed RF Heating, Nuclear Instruments and Methods A, v. 940, p. 337, 2019;
- 4 V. Paramonov, V. Danielyan, K. Floettmann, A. Simonyan, V. Tsakanov. Design, construction and tuning of an RF deflecting cavity for the REGAE facility. Journal of Physics, V. 1238, n1, p. 012069, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1238/1/012069>, 2019

### 06-ФОТОН

- 5 Makarov Sergey, Pikuz Sergey, Ryazantsev Sergey, Pikuz Tatiana, Buzmakov Alexey, Rose Max, Lazarev Sergey, Senkbeil Tobias, Gundlach Andreas von, Stuhr Susan, Rumancev Christoph, Dzhigaev Dmitry, Skopintsev Petr, Zaluzhnyy Ivan, Viefhaus Jens, Rosenhahn Axel, Kodama Ryosuke and Vartanyants Ivan / Soft x-ray diffraction patterns measured by LiF detector with sub-micron resolution and ultimate dynamic range / Journal of Synchrotron Radiation, 2020.

### 07-Ускоритель ILC

- 6 Top Quark: Results and Prospects, E. Boos, L. Dudko, P. Mandrik and S. Slabospitskii, Phys. Part. Nucl. 50, no.3, 231 (2019), Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra 50, no.3 (2019).
- 7 FCC Physics Opportunities : Future Circular Collider Conceptual Design, Report Volume 1, A. Abada {et al.} [FCC Collaboration], Eur. Phys. J. C 79, no. 6, 474 (2019).
- 8 FCC-ee: The Lepton Collider : Future Circular Collider Conceptual Design, Report Volume 2, A. Abada {et al.} [FCC Collaboration], Eur. Phys. J. ST 228, no. 2, 261 (2019).

### 08-ILD

- 9 А.Г. Друцкой, Эксперименты на линейном коллайдере ILC: ожидаемые результаты физических исследований, УФН, **189**, 478–493 (2019).
- 10 Е.С. Антонов, Первые результаты Монте-Карло моделирования процесса  $e^+e^- \rightarrow H(ZZ^*)$ ,  $Z \rightarrow jj$  и  $Z^* \rightarrow \mu^+\mu^-/e^+e^-$  при энергии 250 ГэВ на ILC, "Труды МФТИ", Том 11 №4(44), 47-51, (2019).
- 11 CALICE Collaboration (V. Bocharnikov, M. Chadeeva, M. Danilov et al.), Characterisation of different stages of hadronic showers using the CALICE Si-W ECAL physics prototype, Nucl.Instrum.Meth. A937 (2019) 41-52, arXiv:1902.06161.

12 CALICE Collaboration (V. Bocharnikov, M. Chadeeva, M. Danilov et al.) Analysis of Testbeam Data of the Highly Granular RPC-Steel CALICE Digital Hadron Calorimeter and Validation of Geant4 Monte Carlo Models., Nucl.Instrum.Meth. A939 (2019) 89-105, arXiv:1901.08818

09 – Экзотические ядра

13 “Nuclear-matter distribution in the proton-rich nuclei  ${}^7\text{Be}$  and  ${}^8\text{B}$  from intermediate energy proton elastic scattering in inverse kinematics” (Nuclear Physics A 989 (2019) 40–58).

12-HADES

14 Probing dense baryon-rich matter with virtual photons, J. Adamczewski-Musch (Darmstadt, GSI) et al.. Nature Phys. 15 (2019) no.10, 1040-1045, DOI: 10.1038/s41567-019-0583-8

15 Time-Like Baryon Transitions studies with HADES, HADES Collaboration (B. Ramstein) et al.) EPJ Web Conf. 199 (2019) 01008 DOI: 10.1051/epjconf/201919901008

16 Sub-threshold production of K0s mesons and  $\Lambda$  hyperons in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.4$  GeV, HADES Collaboration (J. Adamczewski-Musch et al.). Phys.Lett. B793 (2019) 457-463, DOI: 10.1016/j.physletb.2019.03.065

17 Strong absorption of hadrons with hidden and open strangeness in nuclear matter , HADES Collaboration (J. Adamczewski-Musch et al.),. Phys.Rev.Lett. 123 (2019) no.2, 022002 , DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.022002

18 Identical pion intensity interferometry in central Au + Au collisions at 1.23 A GeV , HADES Collaboration (J. Adamczewski-Musch et al.), Phys.Lett. B795 (2019) 446-451 DOI: 10.1016/j.physletb.2019.06.047

19 Calibration of the electromagnetic calorimeter ECal of the HADES experiment, A. Shabanov, D. Borisenko , P. Chudoba , T. Galatyuk, F.Guber, M. Gumberidze, A. Ivashkin, A. Kugler, R. Lalik, S. Morozov, V.Pechenov, O. Petukhov, J. Pietraszko, A. Prozorov, N. Rathod, A. Reshetin, A. Rost, O. Svoboda, P. Salabura, P. Tlusty submitted to Open Access Journal of Physics: Conference Series (JPCS)

20 Tests of Cherenkov Electromagnetic Calorimeter for the HADES experiment. O. Petukhov, P. Chudoba, T. Galatyuk, F. Guber, A. Ivashkin, A. Kugler, A. Reshetin, A. Rost, O. Svoboda and

21 A. Shabanov, D. Borisenko , P. Chudoba , T. Galatyuk , F.Guber, M. Gumberidze, A. Ivashkin, A. Kugler, R. Lalik, S. Morozov, V.Pechenov, O. Petukhov, J. Pietraszko, A. Prozorov, N. Rathod, A. Reshetin, A. Rost, O. Svoboda, P. Salabura, P. Tlusty Calibration of the electromagnetic calorimeter ECal of the HADES experiment, submitted to Open Access Journal of Physics: Conference Series (JPCS)

13 - ГАЛО

22 S. P. Goncharov, R. V. Sukhorukov, A. A. Ogloblin, A. S. Demyanova, A. N. Danilov, S. V. Dmitriev, V. I. Starostin, Analysis of  $\alpha + {}^9\text{Be}$  Scattering with a Semimicroscopic Potential, Moscow University Physics Bulletin 74 (2019) 137–143, DOI: 10.3103/S0027134919020061

16-APPA

23 А.А. Голубев, А.В. Канцырев, В.А. Панюшкин, О.С. Сергеева, В.С. Скачков, В.В. Васильев, Магнитный сканер для высокоэнергетических пучков тяжёлых ионов, Приборы и техника эксперимента, 2019, № 5, с. 100–105;

- 24 M. Durante, A. Golubev, W.-Y. Park, C. Trautmann, Applied nuclear physics at the new high-energy particle accelerator facilities, *Physics Reports*, 2019, Vol. 80, pp.1-38.
- 25 H.Kagan ...A.Golubev, E.Grigoriev et al., Diamond detector technology, status and perspectives, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, Vol. 924, pp. 297-300;
- 26 D.S. Kolesnikov, A.V. Kantsyrev, A.A. Golubev, Method for Reconstructing Volume Density Distribution in Dynamic Targets in Proton Radiography Experiments, *Physics of Atomic Nuclei*, 2019, Vol. 82, No. 12, pp. 1–6;
- 27 A.O. Khurchiev, R.O. Gavrilin, S.A. Visotskiy, D.S. Kolesnikov, A.V. Kantsyrev, I.V. Roudskoy, S.M. Savin, A.A. Golubev, A.P. Kuznetsov, Laser interferometry for measurements of electron density and degree of ionization in a hydrogen plasma target, 2019, GSI Report 2019-2, p.7;
- 28 D. Kolesnikov, A. Bogdanov, A. Golubev, A. Kantsyrev, V. Mintsev, V. Panyushkin, N. Shilkin, A. Skobliakov, Density reconstruction in proton radiography experiments with shock compressed gases, GSI Report 2019-2, p.8-9;
- 29 O. N. Rosmej, S. Zähler, M. Gyrdymov, A. Kantsyrev, A. Skobliakov, V. Panyushkin, A. Bogdanov, XCOT-system for imaging of the heavy ion beam intensity distribution on target in Phase-0 and at FAIR, GSI Report 2019-2, p.29;
- 30 A. Skobliakov, O. N. Rosmej, A. Kantsyrev, A. Bogdanov, V. Panyushkin, A. Golubev, Numerical simulation of XCOT diagnostic of the heavy ion beam for upcoming HIHEX experiment, GSI Report 2019-2, p.30;
- 31 R.O Gavrilin, A.O. Khurchiev, D.S. Kolesnikov, S.A. Visotskiy, R.P. Kuibeda, P.A. Fedin, A.V. Bogdanov, V.A. Panyushkin A.V. Kantsyrev, I.V. Roudskoy, S.M. Savin, A.A. Golubev, Stopping power measurement for 100 keV/u Fe ions in hydrogen plasma, GSI Report 2019-2, p.38-39;
- 32 R.A. Rymzhanov, S.A. Gorbunov, N. Medvedev, A.E. Volkov, Damage along swift heavy ion trajectory, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B* 440 (2019) 25–35, DOI: 10.1016/j.nimb.2018.11.034, WOS:000456352200004
- 33 M.Yu. Karganov, I.B. Alchinova, M.V. Polyakova, V. I. Feldman, S.A. Gorbunov, O.M. Ivanov, R.A. Rymzhanov, V.A. Skuratov, A.E.Volkov, Stability of dry phage lambda DNA irradiated with swift heavy ions, *Radiation Physics and Chemistry* 162 (2019) 194–198, DOI: 10.1016/j.radphyschem.2019.04.048 WOS: 000474311900027
- 34 R.A. Rymzhanov, N. Medvedev, J.H. O’Connell, A. Janse van Vuuren, V.A. Skuratov, A.E.Volkov, Recrystallization as the governing mechanism of ion track formation, *Scientific Reports* (2019) 9-3837 (10pp), DOI: 10.1038/s41598-019-40239-9, WOS:000460508600067
- 35 S.A.Gorbunov, R.A.Rymzhanov, A.E.Volkov, Dependence of track etching kinetics on chemical reactivity around the ion path, *Scientific Reports*, (2019) 9-15325 (10pp), DOI: 10.1038/s41598-019-51748
- 36 R.A.Khmelnitski, V.V.Kononenko, J.H.O’Connell, V.A.Skuratov, G.F.Syrykh, A.A.Gippius, S.A.Gorbunov, A.E.Volkov, Effect of the electronic kinetics on graphitization of diamond irradiated with swift heavy ions and fs-laser pulses, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B* 400 (2019) 47-51, DOI:10.1016/j.nimb.2018.11.021
- 37 O N Rosmej, N E Andreev, S Zaehter, N Zahn, P Christ, B Borm, T Radon, A Sokolov, L P Pugachev, D Khaghani, F Horst, N G Borisenko, G Sklizkov, V G Pimenov. Interaction of relativistically intense laser pulses with long-scale near critical plasmas for optimization of laser based sources of MeV electrons and gamma-rays. *New J. Phys.* 21 (2019) 043044. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/ab1047>

- 38 V.S. Popov, N.E. Andreev. Acceleration of electrons in the interaction of a subterawatt laser pulse with a nonuniform plasma. *Quantum Electronics* **49** (4) 307 – 313 (2019) <https://doi.org/10.1070/QEL16992>
- 39 G S Mishura and N E Andreev. Capture and acceleration of electrons by the ultrarelativistic wakefield. *Journal of Physics: Conf. Series* 1147 (2019) 012077. doi:10.1088/1742-6596/1147/1/012077
- 40 V S Popov, L P Pugachev and N E Andreev. Effect of laser pulse self-focusing on plasma wave generation in the interaction of subterawatt laser pulse with a plasma jet. *Journal of Physics: Conf. Series* 1147 (2019) 012078. doi:10.1088/1742-6596/1147/1/012078
- 41 M E Povarnitsyn, O N Rosmej and N E Andreev. On ionization dynamics of metal targets irradiated by high-contrast relativistic-intense laser pulses. *Journal of Physics: Conf. Series* 1147 (2019) 012079. doi:10.1088/1742-6596/1147/1/012079
- 42 L P Pugachev and N E Andreev. Characterization of accelerated electrons generated in foams under the action of petawatt lasers. *Journal of Physics: Conf. Series* 1147 (2019) 012080. doi:10.1088/1742-6596/1147/1/012080
- 43 Zhanna Samsonova, Sebastian Höfel, Vural Kaymak, Skirmantas Ališauskas, Valentina Shumakova, Audrius Pugžlys, Andrius Baltuška, Thomas Siefke, Stefanie Kroker, Alexander Pukhov, Olga Rosmej, Ingo Uschmann, Christian Spielmann, and Daniil Kartashov. Relativistic interaction of long-wavelength ultrashort laser pulses with nanowires. *Phys. Rev. X* 9, (2019) 021029, DOI: 10.1103/PhysRevX.9.021029 <http://arxiv.org/abs/1809.08882>

#### 17 – CBM

- 44 N. Karpushkin et al. “The Projectile Spectator Detector for measuring the geometry of heavy ion collisions at the CBM experiment on FAIR”, *Nucl.Instrum.Meth.* A936 (2019) 156; doi:10.1016/j.nima.2018.10.054
- 45 R. Sultanov et al. “A timing RPC with low resistive ceramic electrodes”, *Journal of Instrumentation* 14 (2019) C09007; doi:10.1088/1748-0221/14/09/C09007
- 46 N. Karpushkin et al. “Application of the Prony least squares method for fitting signal waveforms measured by sampling ADC”, *AIP Conf.Proc.* 2163 (2019) 030006; doi:10.1063/1.5130092
- 47 Guber, F at al. “New forward hadron calorimeter for centrality and reaction plane determination at BM@N heavy ion experiments”, *EPJ Web Conf.* 204 (2019) 07007; doi:10.1051/epjconf/201920407007
- 48 V. Mikhaylov et al. “The very forward hadron calorimeter PSD for the future CBM@FAIR experiment” *EPJ Web Conf.* 204 (2019) 11004; doi:10.1051/epjconf/201920411004
- 49 J. Adamczewski-Munsch et al. “Event reconstruction of free-streaming data for the RICH detector in the CBM experiment”, *EPJ Web Conf.* 214 (2019) 01043; doi:10.1051/epjconf/201921401043
- 50 D. Blau et. al “CBM performance for flow measurements of charged and strange hadrons”, *CBM Progress Report 2018*, p. 172, GSI-2019-01018, Darmstadt 2019; doi:10.15120/GSI-2019-01018

#### 18-NuSTAR

- 51 *Physics Letters B* **797**, 134802 (2019), “Quasi-free proton knockout from  $^{12}\text{C}$  on carbon target at 398 MeV/u”, V.Panin, M.Holl, J.T.Taylor, Y.Aksyutina, H.Alvarez-Pol, T.Aumann, C.A.Bertulani, K.Boretzky, C.Caesar, M.Chartier, L.V.Chulkov, D.Cortina-Gil, J.Enders, O.Ershova, H.Geissel, R.Gernhäuser, M.Heil, H.T.Johanssoni, B.Jonson, A.Keli’c-Heil, O.Kiselev, C.Langer, T.LeBleis, R.Lemmon, T.Nilsson, S.Paschalis, M.Petri, R.Plug, R.Reifarth, D.Rossi, H.Scheit, H.Simon, F.Wamers, H.Weick, C.Wimmer,
- 52 *Physics Letters B* 797 (2019) 134802. Quasi-free neutron and proton knockout reactions from light nuclei in a wide neutron-to-proton asymmetry range”, M.Holl, V.Panin, H.Alvarez-Pol,

L.Atar, T.Aumann, S.Beceiro Novo, J.Benlliure, C.A.Bertulani, J.M.Boillos, K.Boretzky, M.Caamano, C.Caesar, E.Casarejos, W.Catford, J.Cederkall, L.Chulkov, D.Cortina-Gil, E.Cravo, I.Dillmann, P.Diaz Fernandez, Z.Elekes, J.Enders, L.M.Fraile, D.Galaviz-Redondo, R.Gernhauser, P.Golubev, T.Heftrich, M.Heil, M.Heine, A.Heinz, A.Henriques, H.T.Johansson, B.Jonson, N.Kalantar-Nayestanaki, R.Kanungo, A.Kelic-Heil, T.Kroll, N.Kurz, C.Langer, T.Le Bleis, S.Lindberg, J.Machado, E.Nacher, M.A.Najafi, T.Nilsson, C.Nociforo, S.Paschalis, M.Petri, R.Reifarh, G.Ribeiro, C.Rigollet, D.M.Rossi, D.Savran, H.Scheit, H.Simon, O.Sorlin, I.Syndikus, O.Tengblad, Y.Togano, M.Vandebrouck, P.Velho, F.Wamers, H.Weick, C.Wheldon, G.L.Wilson, J.S.Winfield, P.Woods, M.Zhukov, K.Zuber

#### 19-PANDA

- 53 Technical design report for the  $P^-$  ANDA Barrel DIRC detector, B. Singh (Aligarh Muslim U.) et al.. 2019. 155 pp., Published in J.Phys. G46 (2019) no.4, 045001, DOI: 10.1088/1361-6471/aade3d
- 54 Precision resonance energy scans with the PANDA experiment at FAIR: Sensitivity study for width and line-shape measurements of the  $X(3872)$ , PANDA Collaboration (G. Barucca (Ancona, Politech. U. delle Marche) et al.). Published in Eur.Phys.J. A55 (2019) no.3, 42, DOI: 10.1140/epja/i2019-12718-2
- 55 The Electromagnetic Calorimeter for the  $P^-$  ANDA Target Spectrometer, PANDA Collaboration (Markus Moritz et al.). 2019. 8 pp. Published in J.Phys.Conf.Ser. 1162 (2019) no.1, 012025, DOI: 10.1088/1742-6596/1162/1/012025
- 56 Data Acquisition and Diagnostic System for Prototype of PANDA Pellet Target., A.V. Kantsyrev, V.A. Panyushkin, P.V. Balanutsa, A.V. Bogdanov, A.S. Gerasimov, A.A. Golubev, V.I. Demekhin, A.G. Dolgolenko, N.M. Kristi, E.M. Ladygina, E.V. Lushchevskaya, P.V. Fedorets, V.D. Chernetskii, A.N. Panyushkina, V.V. Vasiliev, M. Büscher. Physics of Atomic Nuclei, 2019, Vol. 82, No. 12, pp. 1–7.

#### 20 ANKE

- 57 Yu.T.Kiselev, E.Ya. Paryev Physics of Atomic Nuclei 82, №6 551 (2019) Structure of nuclear matter at short distances.
- 58 E.Ya.Paryev, Yu.T.Kiselev Nucl. Phys. A992, 121622 (2019) Pion-induced production of  $\Lambda(1520)$  on nuclei near threshold.
- 59 3. E.Ya.Paryev, Nucl. Phys. A988, 24 (2019) Near threshold  $\eta'$  meson production in  $\pi^-A$  reactions.

#### 21 KATRIN

- 60 An improved upper limit on the neutrino mass from a direct kinematic method by KATRIN, M.Aker et. al, Phys. Rev. Lett. 123, 221802, doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.221802, arxiv: 1909.06048
- 61 Gamma-induced background in the KATRIN main spectrometer, Altenmüller et. al, Eur. Phys. Journal C, September 2019, 79:807, doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-7320-4
- 62 Muon-induced background in the KATRIN main spectrometer, K. Altenmüller et. al, Astroparticle Physics, Volume 108, Pages 40-49, doi:10.1016/j.astropartphys.2019.01.003
- 63 Исследование свойств детектора отраженных электронов (ASPD) как перспективного детектора для установки «Троицк ню-масс» в диапазоне энергий 5-30 кэВ. П. Н. Аруев, А.



И. Берлёв, В. В. Забродский, С. В. Задорожный, А. В. Николаев, Н. А. Титов, Е. В. Шерстнев Препринт ИЯИ 1441-2019, принят к опубликованию в ЖТФ в 2020 г.

## 22 - Деление

- 64 D. Verikov, V. Hutanu, Yu. Kopatch, G. Ahmadov, A. Gagarski, V. Novitsky, G. Danilyan, S. Masalovich, J. Klenke, and H. Deng, An instrument for measuring T-odd asymmetries in the fission of heavy nuclei, принято к публикации в JINST

## 23 БАЙКАЛ

- 65 A.D. Avrorin et al., "Data Quality Monitoring system in the Baikal-GVD experiment", <https://pos.sissa.it/358/874/pdf>
- 66 A.D. Avrorin et al., "Search for cascade events with Baikal-GVD", <https://pos.sissa.it/358/873/pdf>.
- 67 A.D. Avrorin et al., « A positioning system for Baikal-GVD», <https://pos.sissa.it/358/874/pdf>
- 68 A.D. Avrorin et al. "Neutrino Telescope in Lake Baikal: Present and Future", <https://pos.sissa.it/358/1011/pdf>.
- 69 A.D. Avrorin et al., "The Baikal-GVD neutrino telescope: First results of multi-messenger studies", <https://pos.sissa.it/358/1013/pdf>.
- 70 A.D. Avrorin et al., "The inter-cluster time synchronization systems within the Baikal-GVD detector", <https://pos.sissa.it/358/877/pdf>.
- 71 A.D. Avrorin et al., "The Baikal-GVD detector calibration", <https://pos.sissa.it/358/878/pdf>.
- 72 A.D. Avrorin et al., "Baikal-GVD: first results and prospects", EPJ Web Conf. 209 (2019) 01015.
- 73 A.D. Avrorin et al., "Environmental studies in Lake Baikal: basic facts and perspectives for interdisciplinary research", EPJ Web of Conferences 207, 09001 (2019).
- 74 A.D. Avrorin et al., "Luminescence of water in Lake Baikal observed with the Baikal-GVD neutrino telescope", EPJ Web of Conferences 207, 09002 (2019).
- 75 A.D. Avrorin et al., "Spatial positioning of underwater components for Baikal-GVD", EPJ Web of Conferences 207, 07004 (2019).
- 76 A.D. Avrorin et al., "Time calibration of the neutrino telescope Baikal-GVD", EPJ Web of Conferences 207, 07003 (2019).
- 77 A.D. Avrorin et al., "Baikal-GVD: cascades", EPJ Web of Conferences 207, 05001 (2019).
- 78 A.D. Avrorin et al., "Status of the Baikal-GVD Neutrino Telescope", EPJ Web of Conferences 207, 01003 (2019).

Список докладов, представленных на конференции:

#### 04-Ускорительные технологии

- 1 S. Lal, Y. Chen, H. Qian, S. H. Shaker, G. Shu, F. Stephan, V. Paramonov. RF Design Studies of a 1.3 GHz Normal Conducting CW Buncher for European X-FEL. Proc. IPAC 2019, p. 3109, 2019, <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2019/papers/wepts012.pdf>

#### 07-ILC

- 2 Differences in fully differential production cross section and decay width of polarized top-quark depending on various anomalous  $Wtb$  couplings. Авторы: Боос Э.Э., Буничев В.Е. The XXIV International Workshop High Energy Physics and Quantum Field Theory (QFTHEP'2019), г. Сочи, Россия, 22-29 сентября 2019
- 3 Recommendations for the search of the Anomalous  $Wtb$  interactions in the  $tW$  -associated Single Top Quark Production. Авторы: Баскаков А.В., Боос Э.Э., Буничев В.Е., Дудко Л.В., Волков П.В., Перфилов М.А. The XXIV International Workshop High Energy Physics and Quantum Field Theory (QFTHEP'2019), г. Сочи, Россия, 22-29 сентября 2019
- 4 SMEFT approach to BSM physics. Автор: Боос Э.Э. INTERNATIONAL BOGOLYUBOV CONFERENCE PROBLEMS OF THEORETICAL AND MATHEMATICAL PHYSICS dedicated to the 110th anniversary of N.N.Bogolyubov's birth, Moscow-Dubna, Russia, Россия, 9-13 сентября 2019
- 5 Поиск тёмной материи в процессах с топ-кварком. Автор: Боос Э.Э. ЛБО - 90! Конференция, посвящённая 90-летию со дня рождения Л.Б. Окуня, Федеральное государственное бюджетное учреждение "Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И.Алиханова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт", Россия, 8 июля 2019
- 6 Модельно-независимые ограничения на ширину топ-кварка из комбинации резонансных и безрезонансных сечений. Авторы: Баскаков А.В., Боос Э.Э., Дудко Л.В. «Ломоносовские чтения - 2019». Секция «Ядерная физика», Москва, МГУ, Россия, 15-25 апреля 2019
- 7 Поиск аномальных связей во взаимодействии топ кварка с  $W$  бозоном и  $b$ -кварком в процессах  $tW$ -ассоциированного рождения одиночных топ-кварков. Авторы: Перфилова М.А., Баскакова А.В., Бооса Э.Э., Буничева В.Е., Воротникова Г.А., Дудко Л.В., Волкова П.В. «Ломоносовские чтения - 2019». Секция «Ядерная физика», Москва, МГУ, Россия, 15-25 апреля 2019
- 8 Поиск нейтральных токов меняющих аромат кварков в событиях одиночного рождения топ кварка в эксперименте CMS. Авторы: Воротников Г.А., Баскаков А.В., Боос Э.Э., Буничев В.Е., Дудко Л.В., Мандрик П.С., Перфилов М.А., Попов А.А., Слабоспитский С.Р., Сковпень К., Чернодед А. «Ломоносовские чтения - 2019». Секция «Ядерная физика», Москва, МГУ, Россия, 15-25 апреля 2019
- 9 Специфический сценарий МССМ. Авторы: Дубинин М.Н., Федотова Е.Ю. «Ломоносовские чтения - 2019». Секция «Ядерная физика», Москва, МГУ, Россия, 15-25 апреля 2019

#### 08-ILD

- 10 M. Chadeeva, "Pion shower characteristics with and without power pulsing", CALICE collaboration meeting at CERN, 30 Sep – 2 Oct 2019.
- 11 S. Korpacev, "Impact of detector effects on the response of highly granular ILD hadron

calorimeter to single hadrons”, Moscow international school of physics, HSE study Center, 20-27 February 2019.

- 12 С. Корпачев, “Влияние детекторных эффектов на отклик высокогранулярного адронного калориметра ILD на одиночные адроны”, VIII Межинститутская молодежная конференция Физика элементарных частиц и космология 2019, МФТИ, Москва, 11-12 апреля 2019.
- 13 С. Корпачев, “Использование технологии нейронных сетей для улучшения разрешения высокогранулярного адронного калориметра”, Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике МКТЭФ-2019, ИТЭФ, Москва, 25-28 ноября 2019.
- 14 А. Drutskoy, “Higgs width measurement using  $H \rightarrow Z^*Z$  decay at ILC”, Annual Meeting “Physics at the Terascale”, DESY, Hamburg, 25 November 2019.
- 15 Е. Антонов, “Первые результаты Монте-Карло моделирования процесса  $e^+e^- \rightarrow H(ZZ^*)$ , где  $Z \rightarrow jj$  и  $Z^* \rightarrow \mu\mu / ee$ , при энергии 250 ГэВ”, VIII Межинститутская молодежная конференция Физика элементарных частиц и космология 2019, МФТИ, Москва, 11-12 апреля 2019.

#### 10-SHIPTRAP

- 16 S. Eliseev. “Penning-trap mass spectrometry and neutrino mass”, MEDEX- international conference, Prague, 31 May, 2019.
- 17 S. Eliseev. “Penning-trap mass spectrometry (PENTATRAP) and neutrino mass (ECHO project)”, WE-Heraeus seminar “Massive neutrinos”, Bad Honnef, 11 July, 2019.
- 18 Ю. Нечипоренко. «Цифровая электроника в исследованиях тяжёлых ядер». Конференция Open Science, Gatchina, November 13, 2019.

#### 12- HADES

- 19 XXIII International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2019), 15 - 19 April 2019, Dubna, Russia Arseniy Shabanov (Oral) First tests of the ECAL detector at HADES experiment,
- 20 FAIR next generation scientists - 6th Edition Workshop, 20-24 May 2019 Genova, Italy Arseniy Shabanov (oral), Segmented Cherenkov Electromagnetic Calorimeter (ECAL) of the HADES experiment on SIS18 (GSI)
- 21 FAIR next generation scientists - 6th Edition Workshop, 20-24 May 2019, Genova, Italy A. Shabanov, D. Borisenko, P. Chudoba, T. Galatyuk, F.Guber, M. Gumberidze, A. Ivashkin, A. Kugler, R. Lalik, S. Morozov, V.Pechenov, O. Petukhov, J. Pietraszko, A. Prozorov, N. Rathod, A. Reshetin, A. Rost, O. Svoboda, P. Salabura, P. Tlusty, Calibration of the electromagnetic calorimeter ECal of the HADES experiment

#### 16-APPA

- 22 А. Колесников Д.С., Реконструкция протонно-радиографических изображений, 53-я Зимняя Школа Петербургского Института Ядерной Физики НИЦ "Курчатовский Институт", 02-07 марта 2019;
- 23 Волков В.А., Численное моделирование взаимодействия пучков быстрых тяжёлых ионов с веществом в эксперименте NINEХ на FAIR, 53-я Зимняя Школа

- Петербургского Института Ядерной Физики НИЦ "Курчатовский Институт", 02-07 марта 2019;
- 24 Скобляков А.В., Полномасштабное Монте-Карло моделирование экспериментов на протонном микроскопе PRIOR-II, 39th International Workshop on Physics of High Energy Density in Matter, Хиршегг Австрия, 27 января-02 февраля 2019;
  - 25 Гаврилин Р.О., Ion stopping in hydrogen plasma experiment at linear accelerator at ИТЕР, 39th International Workshop on Physics of High Energy Density in Matter, Хиршегг Австрия, 27 января-02 февраля 2019;
  - 26 Kantsyrev A.V., ИТЕР's activity at HED@FAIR collaboration, Annual HED@FAIR collaboration meeting 2019, Москва, 05 -07 июня 2019;
  - 27 Kolesnikov D.S., Density reconstruction in proton radiography experiments with shock compressed gases, Annual HED@FAIR collaboration meeting 2019, Москва, 05 -07 июня 2019;
  - 28 Bogdanov A.V., Development of ion-optical schemes of proton microscopes, Annual HED@FAIR collaboration meeting 2019, Москва, 05 -07 июня 2019;
  - 29 Panyushkin V.A., Tomographic reconstruction at proton radiography, Annual HED@FAIR collaboration meeting 2019, Москва, 05 -07 июня 2019;
  - 30 Volkov V.A., Residual dose rate estimate for PRIOR experiment at ННТ, Annual HED@FAIR collaboration meeting 2019, Москва, 05 -07 июня 2019;
  - 31 Skobliakov A.V., Numerical simulation of XCOT diagnostic of the heavy ion beam for upcoming НИНEX experiment, Annual HED@FAIR collaboration meeting 2019, Москва, 05 -07 июня 2019;
  - 32 Roudskoy I.V., The observation of plasma lens with discharge initiation by the electron beam, Annual HED@FAIR collaboration meeting 2019, Москва, 05 -07 июня 2019;
  - 33 Khurchiev A.O., Laser interferometry for measurements of electron density and degree of ionization in a hydrogen plasma target, Annual HED@FAIR collaboration meeting 2019, Москва, 05 -07 июня 2019;
  - 34 Gavrilin R.O., Stopping power measurement for 100 keV/u Fe ions in hydrogen plasma, Annual HED@FAIR collaboration meeting 2019, Москва, 05 -07 июня 2019;
  - 35 Khurchiev A.O., Laser interferometry for measurements of electron density and degree of ionization in a hydrogen plasma target, 6-я международная научная школа FAIR, Кастильоне-делла-Пеская, Италия, 7-14 сентября 2019;
  - 36 Kolesnikov D.S., Density reconstruction in proton radiography experiments with shock compressed gases, 6-я международная научная школа FAIR, Кастильоне-делла-Пеская, Италия, 7-14 сентября 2019;
  - 37 Богданов А.В., Эксперимент по лазерному ускорению электронов при взаимодействии пикосекундного лазерного импульса высокой энергии с подкритической плазмой, Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике (МКТЭФ-2019), 25-28 ноября 2019, Москва;
  - 38 Хурчиев А.О., Постановка эксперимента по исследованию торможения пучка низкоэнергетических протонов в парах металлов, Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике (МКТЭФ-2019), 25-28 ноября 2019, Москва;
  - 39 Скобляков А.В., Численное моделирование XCOT диагностики пучка тяжелых ионов для предстоящего эксперимента НИНEX, Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике (МКТЭФ-2019), 25-28 ноября 2019, Москва;

- 40 Колесников Д.С., Реконструкция данных протонно-радиографических экспериментов с динамическими мишенями, Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике (МКТЭФ-2019), 25-28 ноября 2019, Москва;
- 41 Гаврилин Р.О., Измерение тормозных потерь ионов железа с энергией 100 кэВ/а.е.м. в водородной плазме, Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике (МКТЭФ-2019), 25-28 ноября 2019, Москва;
- 42 Волков В.А., Радиационная безопасность эксперимента PRIOR II, Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике (МКТЭФ-2019), 25-28 ноября 2019, Москва;
- 43 R.A. Rymzhanov, S.A.Gorbunov, N.A. Medvedev, J.H. O'Connell, V.A. Skuratov, A. Janse van Vuuren, A.E. Volkov, Comprehensive modelling from SHI passage to observable track formation, Radiation Effects in Insulators (REI-20), Astana, 19-23 August 2019
- 44 R.A. Rymzhanov, M. Karlušić, N.A. Medvedev, A.E. Volkov, Track formation in insulators under grazing incidence ion impacts, Radiation Effects in Insulators (REI-20), Astana, 19-23 August 2019
- 45 3. S.A.Gorbunov, S.V.Ivliev, A.E. Volkov, Dependence of electron-lattice cross sections on crystallographic orientations in dielectrics, Radiation Effects in Insulators (REI-20), Astana, 19-23 August 2019
- 46 4. R.A. Voronkov, N. Medvedev, A.E. Volkov, Nonthermal melting in swift heavy ion tracks and free-electron laser spots, Radiation Effects in Insulators (REI-20), Astana, 19-23 August 2019
- 47 1. R.A. Rymzhanov, N.A. Medvedev, J.H. O'Connell, A. Janse van Vuuren, V.A. Skuratov, A.E. Volkov, Picosecond surface kinetics of swift heavy ion irradiated insulators, 21st international conference on surface modification of materials by ion beams, Tomsk, 26-30 August 2019
- 48 1. R.A. Voronkov, N. Medvedev, A.E. Volkov, Ab-initio modeling of an effect of enhanced electronic temperature on the band gap, SPIE 2019, Optics + optoelectronics, Prague 1-4 April 2019
- 49 M. Yu. Karganov, I. B. Alchinova, M. V. Polyakova, V. I. Feldman, S. A. Gorbunov, O. M. Ivanov, R. A. Rymzhanov, V. A. Skuratov, A. E. Volkov, T. Friederich, E. Nasonova, Dry DNA stability after irradiation with swift heavy ions, Biophysics Collaboration Meeting at GSI/FAIR 20-22 May 2019
- 50 R. A. Rymzhanov, S.A.Gorbunov, N. Medvedev, A.E. Volkov, Structure transformations along swift heavy ion trajectory in olivine, Annual HED at FAIR collaboration meeting 2-7 June 2019
- 51 R.A. Rymzhanov, N.A. Medvedev, J.H. O'Connell, A. Janse van Vuuren, V.A. Skuratov, A.E. Volkov, Recrystallization role in ion track formation in dielectric, Annual HED at FAIR collaboration meeting 2-7 June 2019
- 52 R.A. Voronkov, N. Medvedev, A.E. Volkov, Atomic and electronic properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and diamond under intense excitation of the electronic system, Annual HED at FAIR collaboration meeting 2-7 June 2019
- 53 N.E. Andreev<sup>1,2</sup>, N.G. Borisenko<sup>3</sup>, A. Kantsyrev<sup>4</sup>, O.N. Rosmej. Generation of relativistic electrons and gammas in the interaction of relativistic laser pulses with plasma of near critical density. Scientific-Coordination Session on "Non-Ideal Plasma Physics", Moscow November 27-28, 2019.

- 54 O.N. Rosmej. HED@FAIR collaboration: overview of the current experimental activities and upcoming projects with laser and particle beams at GSI. Scientific-Coordination Session on "Non-Ideal Plasma Physics", Moscow November 27-28, 2019.
- 55 N.E. Andreev. Laser-plasma accelerators of high energy electrons. International Conference on Ultrafast Optical Science, Moscow, September 30 - October 04, 2019, Book of Abstracts, p.17. [https://ultrafastlight.lebedev.ru/files/BookOfAbstracts\\_UltrafastLight2019.pdf](https://ultrafastlight.lebedev.ru/files/BookOfAbstracts_UltrafastLight2019.pdf)
- 56 N.E. Andreev, D.V. Pugacheva, M.E. Veysman. Electron beam dynamics in the laser-plasma accelerator. Laser-Plasma Acceleration Workshop, Split, Croatia, 5-10.05, 2019.
- 57 O.N. Rosmej, N.E. Andreev, L.P. Pugachev, N. G. Borisenko, S. Zähler, N. Zahn, D. Khaghani, B. Borm, P. Christ, F. Horst, and the PHELIX-team. Generation of super-ponderomotive electrons in interaction of relativistic laser pulses with long scale near critical plasmas. Laser-Plasma Acceleration Workshop, Split, Croatia, 5-10.05, 2019.
- 58 N.E. Andreev. Fast particles generation in intense laser-plasma interactions. International Conference "Complex Systems of Charged Particles and their Interactions with Electromagnetic Radiation 2019". Moscow, March 25-27, 2019. Book of Abstracts, p.45.
- 59 O.N. Rosmej, N.E. Andreev, S. Zaehter, N. Zahn, P. Christ, B. Borm, T. Radon, L.P. Pugachev, D. Khaghani, F. Horst, N. G. Borisenko, and V. G. Pimenov. Generation of super-ponderomotive electrons in interaction of relativistic laser pulses with long scale near critical plasmas. 39th International Workshop on High Energy Density Physics with Intense Ion and Laser Beams. Hirschegg, Austria, January 27th - February 2nd, 2019.
- 60 N.E. Andreev. Ultrarelativistic electrons in laser-plasma interactions. VII International Conference Frontiers of Nonlinear Physics, Nizhny Novgorod, June 28 – July 4, 2019.
- 61 N.E. Andreev, L.P. Pugachev, O.N. Rosmej. Secondary sources of super-ponderomotive electrons and hard radiation in relativistic laser-matter interactions. XXXIV International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter (ELBRUS 2019), Elbrus, Kabardino-Balkaria, March 1 - 5, 2019. Book of Abstracts, p. 60. <http://www.ihed.ras.ru/elbrus19/program/restore.php?id=687>

#### 17-CBM

- 62 VCI2019 - The 15th Vienna Conference on Instrumentation 18-22 February 2019, Vienna University of Technology, Vienna, Austria. Fedor Guber (poster), INR RAS, Moscow, "Transverse and longitudinal segmented forward hadron calorimeters with SiPMs light readout for future fixed target heavy ion experiment"
- 63 The XXIII International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2019) 15 - 19 April, JINR, Dubna, Russia, N.Karpushkin (oral), F.Guber, A.Ivashkin, "Application of the Prony least squares method for fitting signal waveforms measured by sampling ADC"
- 64 FAIRness 2019, FAIR next generation scientists - 6th Edition Workshop, 20-24 May, Arenzano, Genova, Italy, N.Karpushkin (oral), D.Finogeev, M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, A.Izvestnyy, S.Morozov. "Study of the PSD CBM response on hadron beams"
- 65 Quark Matter 2019 - the XXVIIIth International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, 3-9 November 2019 Wuhan, China, "Energy calibration and signal waveform analysis of the CBM Projectile Spectator Detector", N.Karpushkin et al. (7 authors) (poster), NICA days 2019, CZiITT, Warsaw, Poland, 21-25 October 2019
- 66 The International Workshop on Radiation Imaging Detectors, July 7-12, 2019 in Kolympari, Chania, Crete, Greece, "Characterization of SiPM radiation hardness for application in hadron

- calorimeters at FAIR, CERN and NICA”, V. Mikhaylov et al. Submitted to JINST.
- 67 XIV Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy, 3-7 June 2019, O.Golosov, V.Klochkov, E.Kashirin, I.Selyuzhenkov “Physics performance studies for anisotropic flow measurements with the CBM experiment at FAIR”
- 68 Quark Matter 2019, 4-9 November 2019, O.Golosov, V.Klochkov, E.Kashirin, I.Selyuzhenkov “Physics performance studies for anisotropic flow measurements with the CBM experiment at FAIR”
- 69 Strangeness in Quark Matter 2019, 9-15 June 2019, I.Selyuzhenkov “Status of the CBM experiment at FAIR”

#### 18-NuSTAR

- 70 “Experimental aspects in studies of drip-line nuclei”, 4th International Workshop on Quasi-Free Scattering with Radioactive-Ion Beams, Маресиас, Бразилия, 13-18.10.2019  
<https://sites.google.com/view/quasifree/program>

#### 19-ПАНДА

- 71 Кристи Н.М., Панюшкина А.Н., Панюшкин В.А., Герасимов А.С., Чернецкий В.Д.; Расчет распределения температур конденсатора и камеры тройной точки криогенной корпускулярной мишени для эксперимента PANDA; МКТЭФ-2019, НИЦ “Курчатовский Институт” - ИТЭФ, Москва 25-28 ноября 2019 г
- 72 Панюшкин В.А., Балануца П.В., Богданов А.В., Канцырев А.В., Герасимов А.С.; Разработка системы оптической диагностики и системы юстировки корпускулярной капельной мишени эксперимента PANDA; МКТЭФ-2019, НИЦ “Курчатовский Институт” - ИТЭФ, Москва 25-28 ноября 2019 г
- 73 Панюшкина А.Н., Чернецкий В.Д., Панюшкин В.А., Герасимов А.С., Кристи Н.М.; Разработка и оптимизация конструкции криогенной корпускулярной капельной мишени для эксперимента PANDA; МКТЭФ-2019, НИЦ “Курчатовский Институт” - ИТЭФ, Москва 25-28 ноября 2019 г

#### 21 – KATRIN

- 74 Alexey Lokhov (for KATRIN collaboration) пленарный доклад на тему: «KATRIN experiment: first neutrino mass result and future prospects» Международная конференция EINN-2019, Пафос, Кипр (<http://einnconference.org/2019/wp-content/uploads/2019/11/Lokhov-KATRIN-EINN2019-Slides.pdf>)
- 75 Международный семинар фонда Хареус, Бад-Хоннеф, Германия Июль 2019, стендовый доклад на тему: A.Lokhov «Energy losses and other components of the KATRIN response function»
- 76 Международный семинар фонда Хареус, Бад-Хоннеф, Германия Июль 2019– устный и стендовый доклад на тему: A.Lokhov «Background reduction with the shifted analyzing plane configuration in KATRIN»

#### 22 – Деление

- 77 Kopatch Yu.N., Novitsky V.V., Ahmadov G.S., Gagarsky A.M., Berikov D.B., Danilyan G.V., Hutanu V., Klenke J., Masalovich S., Deng H., "Measurement of the ROT-effects in fission of  $^{235}\text{U}$  induced by monochromatic polarized neutrons with the energy of 60 meV.", 27-th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei: «Fundamental Interactions &

Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics» (ISINN27), 10-14.06.2019, Dubna, Russia.

- 78 Berikov D.B., "Measurement of the ROT-effect in fission of  $^{235}\text{U}$  induced by monochromatic cold polarized neutrons with an energy of 60 MeV", LXIX International Conference "Nucleus-2019" on Nuclear Spectroscopy and Nuclear Structure. "Fundamental Problems of Nuclear Physics, Nuclei at Borders of Nucleon Stability, High Technologies", Dubna, Russia, 1–5 July 2019
- 79 Yu.N. Kopatch, D.B. Berikov, G.S. Ahmadov, A.M. Gagarsky, V.V. Novitsky, G.V. Danilyan, H. Deng, V. Hutanu, J. Klenke, S. Masalovich, and K.Sh. Zhumadilov, "Investigation of the T-odd effects in the emission of prompt gamma-rays and neutrons from fission of uranium nuclei induced by polarized neutrons", International Conference on New Frontiers in Nuclear Physics (ICNFNP 2019) October 14-17, 2019, BHU, Varanasi
- 80 Yu.N. Kopatch, G.S. Ahmadov, D.B. Berikov, A.M. Gagarsky, V.V. Novitsky, G.V. Danilyan, H. Deng, V. Hutanu, J. Klenke, and S. Masalovich, "Measurements of the rot-effect in the emission of prompt gamma-rays and neutrons in fission of  $^{235}\text{U}$  induced by polarized neutrons with energies of 4, 60 and 270 meV", THEORY-5 Scientific Workshop on "Nuclear Fission Dynamics and the Emission of Prompt Neutrons and Gamma Rays", Castelvechio Pascoli, Barga, Italy, 24 - 26 September 2019.

#### 23-Байкал

- 81 V. O.Suvorova. XVIII International Workshop on Neutrino Telescopes, 18-22 March 2019, Venice, Italy.
- 82 O.Suvorova. "Seminar in CPPM - Centre de Physique des Particules de Marseille, and meeting on the research projects KM3Net and GVD-Baikal", 24 June 2019, Marseille, France.
- 83 O.Suvorova. "The European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP)", 10-17 July 2019, Ghent, Belgium.
- 84 B.Shoibonov. "PAHEN 2019", September 25-27, Berlin, Germany.
- 85 M.Sheleпов. "Международная школа-конференция «Evolution of galaxies and stars», Сочи, 16-26 Июля 2019.
- 86 O.Suvorova. "4th Uppsala workshop on Particle Physics with Neutrino Telescopes (PPNT2019)", 7-9 October 2019, Uppsala, Sweden.

#### 24-ПРОТОН

- 87 Vasilyev A et al. Detector for precision measurement of the proton charge radius. The 3rd international Workshop on Gaseous Detectors and Systems. January, 2019. Orsay, France



ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Запрос финансирования на 2020 г. (в тыс. долларов США)

Эксперимент	Запрос на 2019	Выделено в 2019	Остаток на 17 декабря 2019	Запрос на 2020 г.
Эксп. 3 ГЕРМЕС	3,0	3,52	0,0	3,5
Эксп. 4 Ускорительные технологии	29,7	29,7	4,83	28,0
Эксп. 6 Фотон	49,0	39,80	13,50	40,0
Эксп. 7 Ускоритель	7,0	3,89	3,89	7,0
Эксп. 8 ИС Детектор	16,0	16,71	0,0	64,0 <sup>53</sup>
Эксп. 9 Экз. ядра	4,5	4,90	0,76	4,5
Эксп. 10 SHIPTRAP	20,0	22,5	5,56 <sup>54</sup>	25,0
Эксп. 12 HADES	66,0	64,0	2,76	84,0
Эксп. 13 ГАЛЮ	11,0	4,44	0,0	7,5
Эксп. 14 Комптон	9,0	9,10	0,0	9,0
Эксп. 16 АРРА	60,2	55,2	15,63 <sup>55</sup>	60,0
Эксп. 17 СВМ	78,0	63,0	16,88 <sup>56</sup>	72,0
Эксп. 18 Nustar	55,5	55,70	22,64 <sup>57</sup>	64,8
Эксп. 19 ПАНДА	52,5	42,5	10,85 <sup>58</sup>	42,5
Эксп. 20 АНКЕ	12,0	12,70	0,0	0,0
Эксп. 21 КАТРИН	26,2	21,60	11,6 <sup>59</sup>	21,0
Эксп. 22 ДЕЛЕНИЕ	25,0	6,64	0,0	25,0
Эксп. 23 БАЙКАЛ	8,0	9,70	0,02	9,7
Эксп. 24 Протон	29,6	29,6	0,57	40,0
Резерв	10,5	11,22	11,22 <sup>60</sup>	5,5
Эксп 0 – ДЕЗИ (Юшманов)	58,9	56,7	4,3	57,0
ИТОГО	642,1	563,12	127,2	670,0

<sup>53</sup> С учетом запроса на создание детектора на основе разработок CALICE

<sup>54</sup> Зарезервировано на сеанс в первом квартале 2020 г.

<sup>55</sup> Зарезервировано на сеанс в первом квартале 2020 г.

<sup>56</sup> Зарезервировано на подготовку к сеансу в первом квартале 2020 г.

<sup>57</sup> Зарезервировано на подготовку к сеансу в первом квартале 2020 г., частично перенесены командировки с декабря на январь по просьбе немецкой стороны

<sup>58</sup> Зарезервировано по просьбе немецкой стороны на работы с детектором в январе-феврале 2020 г.

<sup>59</sup> Зарезервировано на сеанс в первом квартале 2020 г.

<sup>60</sup> Зарезервировано на сеанс в эксперименте HADES в первом квартале 2020 г.