

ОТДЕЛЕНИЕ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ – страницы истории

Содержание книги

Основные вехи в истории ОФВЭ <i>А.А. Воробьев</i>	3
Основные направления научной деятельности ОФВЭ (до 2016 г.) <i>Г.Д. Алхазов</i>	7
Ускорители сверхвысоких энергий – новые реалии в жизни физиков <i>А.А. Воробьев (2008 г.)</i>	21
Синхроциклотрон 1000 МЭВ ПИЯФ НИЦ «КИ» – Уникальная установка <i>Г.Ф. МИХЕЕВ</i>	42
Рассеяние протонов на ядрах, структура дейтрона и поляризация (1970 – 2010 гг.) <i>С.Л. Белостоцкий</i>	54
Лаборатория Мезонной Физики - <i>В.В. Сумачев</i>	60
Криогенная пузырьковая камера - <i>В.В. Саранцев, С.Г. Шерман</i>	64
Эксперименты на электронном синхротроне - <i>Ю.М. Волков</i>	69
Вспоминая прошедшие годы (о Б.А. Бочагове) - <i>Г.Г. Семенчук</i>	72
Сектор мезоядерных реакций - <i>К.Н. Ермаков, В.В. Пашук</i>	76
Ядерная спектроскопия в ОФВЭ - <i>Ю.Н. Новиков</i>	84
Лаборатория короткоживущих ядер - <i>В.Н. Пантелеев, А.Е. Барзах</i>	92
Исследование нуклон-нуклонного взаимодействия в ПИЯФ - <i>В.Г. Вовченко</i>	101
Реализация 2E-2V метода при исследовании деления ядер в ОФВЭ - <i>Л.Н. Андроненко</i>	106
Лаборатории мезонной физики конденсированных сред - <i>С.И. Воробьев</i>	112
Лаборатория Релятивистской Ядерной Физики - <i>М.Б. Жалов, В.М. Самсонов, А.В. Ханзадеев</i>	118
«Спиновый кризис» и эксперимент HERMES 1993 – 2019 годы - <i>С.Л. Белостоцкий</i>	123
От физики ядра и частиц до получения пучков сверхвысоких энергий-история лаборатории <i>Ю.М. Иванов</i>	129
Исследование процесса мюонного катализа ядерного dd- и dt- синтеза В ПИЯФ <i>Г.Г. Семенчук</i>	142
Эксперимент MuSun- <i>А.А. Васильев</i>	152
Лаборатория адронной физики - <i>Федин О.Л.</i>	157

Исследование фрагментации релятивистских ядер - <i>Ф.Г. Лепехин</i>	163
Отдел радиоэлектроники - история жизни и деятельности - <i>В.Л. Головцов</i>	165
Отдел мюонных камер - <i>В.С. Козлов</i>	183
Отдел трековых детекторов - <i>А.Г. Крившич</i>	189
Испытания прототипов мюонных камер CSC - <i>Г.Е. Гаврилов</i>	197
Газовые системы для газоразрядных детекторов, разработанные, созданные и Создаваемые в ЛКСТ - <i>Л.М. Коченда</i>	199
Историческое эссе на тему компьютерная инфраструктура ОФВЭ - <i>А.Е. Шевель</i>	206
Некоторые этапы создания медицинского протонного комплекса на СЦ-1000 ПИЯФ НИЦ «Курчатовский институт» - <i>Карлин Д.Л.</i>	214
Нейтронный времяпролётный спектрометр ГНЕЙС – универсальный инструмент для фундаментальных и прикладных исследований с использованием нейтронов - <i>О.А. Щербаков</i>	225
Лаборатория голографических информационно-измерительных систем – ЛГИИС ПИЯФ НИЦ «КИ» <i>Б.Г. Турухано, Н. Турухано</i>	231

ОТДЕЛЕНИЕ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ –

страницы истории

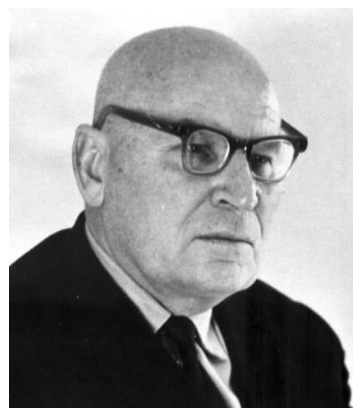
Данный сборник содержит ряд очерков по истории Отделения Физики Высоких Энергий (ОФВЭ) НИЦ КИ ПИЯФ, написанных сотрудниками института (в основном, сотрудниками ОФВЭ).

ОСНОВНЫЕ ВЕХИ В ИСТОРИИ ОФВЭ

А.А. Воробьев



Научный руководитель ОФВЭ, член-корреспондент РАН, профессор, доктор физ.-мат. наук, Алексей Алексеевич Воробьев



Первый заведующий ЛФВЭ, академик УССР, Антон Пантелеймонович Комар (1904 – 1985)

История ОФВЭ, как и всего ПИЯФ, началась в стенах Ленинградского Физико-Технического Института (ЛФТИ, “Наша альма-матер”) задолго до официального образования ПИЯФ.

В середине пятидесятых годов в Физтехе были две небольшие лаборатории, ориентировавшие свою деятельность на экспериментальные исследования с помощью ускорителей частиц. Это – циклотронная лаборатория, возглавляемая Д.Г. Алхазовым, и лаборатория рентгеновских и гамма-лучей, руководимая А.П. Комаром. Лаборатории располагали весьма скромной экспериментальной базой – циклотроном для ускорения тяжёлых ионов ($A \leq 40$) с энергией до 3 МэВ/нуклон и электронным синхротроном на энергию 100 МэВ. На базе этих установок вырос и окреп коллектив молодых физиков, горящих желанием заняться исследованием проблем ядерной физики и зарождающейся тогда физикой высоких энергий. Этот небольшой коллектив активно подпитывался новым пополнением, в основном из выпускников кафедры ядерной физики Ленинградского политехнического института, также руководимой А.П. Комаром. Почти полное отсутствие опыта исследований в области ядерной физики у руководителей и у руководимых, слабая

техническая оснащённость лабораторий, изоляция от международного сообщества компенсировались энтузиазмом и молодостью коллектива. Эти условия оказались благоприятными для развития самостоятельности и изобретательности молодых физиков и инженеров. А изобретать в ту пору приходилось буквально всё – от физического прибора до источника питания, усилителей, амплитудных анализаторов... И не только изобретать, но и изготавливать собственными силами. В то время зародилось ставшее потом исключительно важным сотрудничество с радиоинженерами. В лаборатории А.П. Комара была создана группа радиоэлектроники, руководимая С.Н. Николаевым.

Следующим этапом явилось решение об организации в Гатчине филиала ЛФТИ, специально ориентированного на исследования в области ядерной физики, и решение о сооружении там протонного синхроциклотрона (СЦ) на рекордную для этого типа ускорителей энергию 1000 МэВ. Проект СЦ был разработан в НИИЭФА с участием Д.Г. Алхазова, Д.М. Каминкера, Н.К. Абросимова и ряда других сотрудников ФТИ. Строительство СЦ было начато в 1959 году. В конце 1967 года состоялся пробный пуск ускорителя, а эксплуатация в полном объёме началась с апреля 1970 года.

Для организации исследований на синхроциклотроне в 1963 году была образована Лаборатория Физики Высоких Энергий (ЛФВЭ), основу которой составил коллектив лаборатории рентгеновских и гамма-лучей ЛФТИ (приказ о переводе сотрудников этой лаборатории в ЛФВЭ – всего 15 человек – был подписан 10 июня 1963 года.) Первым заведующим ЛФВЭ стал А.П. Комар, руководивший этой лабораторией вплоть до 1971 года. В составе ЛФВЭ были образованы следующие научные подразделения: сектор "Мезоны и мезоатомы" – зав. сектором С.П. Круглов, сектор "Структуры ядра" – зав. сектором А.А. Воробьёв, сектор "Спектроскопия ядер глубокого расщепления" – зав. сектором Э.Е. Берлович, сектор "Мезоядерные реакции" – зав. сектором М.В. Стабников, сектор "Прямые ядерные взаимодействия" – зав. сектором Б.А. Бочагов. С этого времени началась целенаправленная подготовка к экспериментам на синхроциклотроне. Разрабатывалась различная аппаратура: магнитные спектрометры, сцинтилляционные годоскопы, масс-сепаратор, водородная пузырьковая камера, тяжеложидкостная пузырьковая камера, мишень поляризованных протонов.

Следует отметить, что синхроциклотрон оказался очень удачным ускорителем, особенно для исследований ядра. Энергия протонов 1000 МэВ оптимальна для исследования структуры ядра (идеальная область применения теории Глаубера-Ситенко для количественного описания ядерных реакций). Хорошая моноэнергетичность пучка (0,3 МэВ), хорошая временная структура (коэффициент заполнения 50%), достаточно высокая интенсивность (1 мкА) делают этот ускоритель полезным и в современных ядерных исследованиях. В частности, программа получения и исследования ядер, удалённых от полосы стабильности (проект ИРИС), давшая уже много важных результатов, имеет ещё очень интересные продолжения, особенно в изучении нейтроноизбыточных ядер.

Физика элементарных частиц, имеющая свойство быстрого насыщения с появлением ускорителей более высоких энергий или более высокой интенсивности, не избежала этой участи и на нашем ускорителе. Тем не менее, за эти годы был получен целый ряд важных

результатов, в частности, в исследовании пион-протонного и протон-протонного взаимодействия. На мюонном канале синхроциклотрона была успешно выполнена серия экспериментов по исследованию мюонного катализа реакций ядерного синтеза. Мюонный пучок эффективно используется также для исследования магнитных свойств различных материалов с помощью метода вращения спина мюона.

Пучок протонов с энергией 1000 МэВ оказался также удачным для осуществления нейрохирургических операций. Разработанный в ПИЯФ совместно с ЦНИРРИ (с 2007 года называется РНЦРХТ) метод протонной терапии, получивший название «гатчинский метод», вот уже в течение 38 лет успешно используется для лечения сложнейших заболеваний головного мозга. За 1975–2013 гг. курс протонной терапии прошли 1394 пациента. (см. Видеоматериал студии НИЦ "Гатчинский метод" и Видеоролик "Медицина в ПИЯФ"). Кроме сотрудников Института, в экспериментах на синхроциклотроне принимали участие физики из многих институтов страны, а также исследователи из США, Франции, Германии, Дании, Швеции.

Практически с самого начала деятельности ЛФВЭ мы руководствовались двумя основными принципами: максимально использовать возможности собственного ускорителя и вместе с тем активно использовать ускорительную базу других ядерных центров как в нашей стране, так и за рубежом. Такое сочетание "внешней" и "внутренней" программ оказалось весьма эффективным. Участие во "внешней" программе позволяет коллективу постоянно находиться на переднем крае фундаментальных исследований. С другой стороны, "внутренняя" программа, интересная сама по себе, является питательной средой для "внешней" программы. Именно в ходе экспериментов на синхроциклотроне выросли квалифицированные специалисты и родились экспериментальные методики, составившие затем основу нашего участия в международных экспериментах.

Начало международного сотрудничества ЛФВЭ относится к 1967 году, когда было заключено двустороннее соглашение о сотрудничестве между ФТИ и Институтом Нильса Бора (Дания) и были выполнены первые совместные эксперименты (по α -спектроскопии). Затем в 1967 году аналогичное соглашение было заключено с ЦЕРН. В 1973 году началась интенсивная программа исследований структуры ядра совместно с лабораторией Saclay (Франция). Первые совместные эксперименты были выполнены в Гатчине, затем, после сооружения ускорителя SATURN, были продолжены в Saclay.

Решающим для нас этапом вхождения в мировое сообщество, занимающееся физикой высоких энергий, были эксперименты WA9 и NA8 по исследованию малоуглового рассеяния адронов, выполненные в ЦЕРН в 1978–1981 гг. с использованием разработанного в ЛФВЭ детектора ядер отдачи ИКАР.

После успешных экспериментов в ЦЕРНе география и масштаб международного сотрудничества постоянно расширялись. В настоящее время ОВФЭ участвует в 15 международных проектах, выполняемых в ведущих мировых центрах: CERN, FNAL (США), PSI (Швейцария), BNL (США), DESY (Германия), Darmstadt (Германия), Jülich (Германия),

Mainz (Германия). При этом, как правило, наше участие сопровождается серьёзным вкладом как в создание экспериментальных установок, так и в идеологию эксперимента. В ряде случаев этот вклад является определяющим: исследование редких распадов гиперонов во FNAL (эксперименты E715 и E761), исследование мезокатализа ядерного синтеза в PSI, исследование рассеяния экзотических ядер в Дармштадте и др.

С 2016 года группа сотрудников ОФВЭ ведет подготовку эксперимента на ускорителе MAMI в Майнце (Германия) по исследованию малоуглового электрон-протонного рассеяния методом детектирования протонов отдачи. Цель эксперимента – прецизионное измерение зарядового радиуса протона и решение существующей «загадки радиуса протона», связанной с наблюдаемым различием в величине радиуса, извлекаемого из данных по электрон-протонному рассеянию и из мезоатомных спектров. Также обсуждается проведение совместного аналогичного эксперимента на мюонном пучке в ЦЕРН.

Сейчас мы вступаем в эпоху "индустриальной" физики, когда стоимость экспериментов на коллайдерных установках составляет сотни миллионов долларов. Эффективное участие в таких экспериментах возможно лишь при наличии мощной технологической базы, позволяющей изготавливать крупные объёмы экспериментального оборудования. За годы деятельности ЛФВЭ такая база была создана, и мы прилагаем сейчас все усилия по её развитию. Это позволило нам принять активное участие в коллайдерных экспериментах: L3 (CERN), PHENIX (BNL), D0 (FNAL), ATLAS (CERN), CMS (CERN), ALICE (CERN), LHCb (CERN), UA9 (CERN). Таким образом, заложены основы для стабильного развития ОФВЭ в будущем.

В настоящее время получаемые в коллайдерных экспериментах результаты составляют основу современных фундаментальных знаний о физике частиц и фундаментальных взаимодействиях. Наиболее значительным достижением исследований на Большом Адронном Коллайдере в настоящий момент является открытие в 2012 году экспериментами CMS и ATLAS бозона Хиггса. Всего же по результатам исследований на Большом Адронном Коллайдере опубликовано более 1000 научных работ.

Отделение физики высоких энергий сегодня – это зрелый и дружный коллектив, состоящий из 223 сотрудников. В их числе 118 научных сотрудников (из них 17 докторов наук, 57 кандидатов наук, 5 аспирантов), 105 ведущих инженеров, инженеров, техников, рабочих и лаборантов.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОТДЕЛЕНИЯ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ (до 2016 г.)

Г.Д. Алхазов



Георгий Дмитриевич. Алхазов, д.ф.-м.н.,
заведующий Лабораторией физики
элементарных частиц

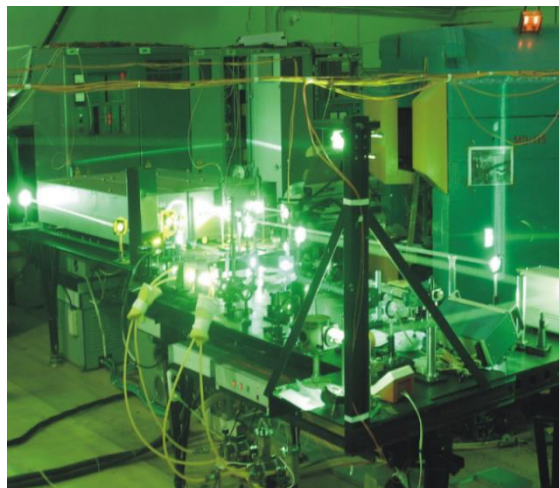
Основная научная деятельность Отделения Физики Высоких Энергий (ОФВЭ) связана с экспериментальными исследованиями на базовых установках ПИЯФ и на ускорителях российских и зарубежных центров в области ядерной физики, физики элементарных частиц и прикладных исследований.

Здесь представлена лишь краткая информация об основных направлениях научной деятельности отделения. Более подробную информацию о научных работах, которые велись и ведутся в ОФВЭ можно найти в следующих сборниках:

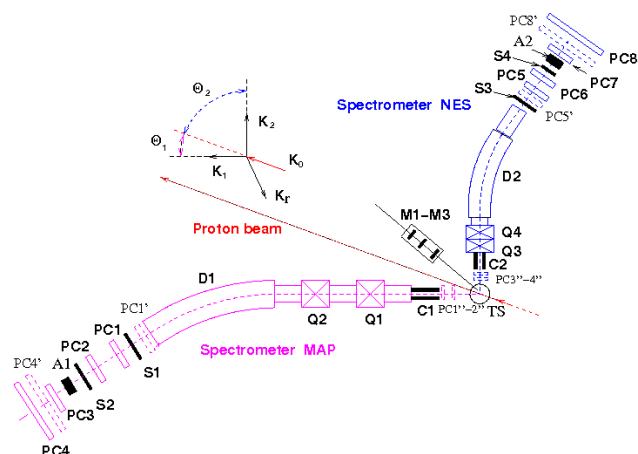
1. *ПИЯФ XXV, Основные направления научной деятельности, Отделение Физики Высоких Энергий, Гатчина, 1996;*
2. *High Energy Physics Division, Main Scientific Activities 1971–1996, Gatchina (1997);*
3. *High Energy Physics Division, Main Scientific Activities 1997–2001, Gatchina (2002);*
4. *High Energy Physics Division, Main Scientific Activities 2002–2006, Gatchina (2007);*
5. *High Energy Physics Division, Main Scientific Activities 2007–2012, Gatchina (2013);*
6. *High Energy Physics Division, Main Scientific Activities 2013–2018, Gatchina (2019).*

ИССЛЕДОВАНИЯ НА СИНХРОЦИКЛОТРОНЕ ПИЯФ

Для получения и исследования свойств короткоживущих ядер на синхроциклотроне ПИЯФ в ОФВЭ создан единственный в РФ лазерно-масс-сепараторный комплекс ИРИС, на котором измерены зарядовые радиусы и электромагнитные моменты у более сотни экзотических нейтронодефицитных ядер. Исследования ведутся в сотрудничестве с коллаборацией ISOLDE (ЦЕРН). В дальнейшем планируется создание аналогичного комплекса (проект ИРИНА) для исследования нейтроноизбыточных ядер на сооружаемом в ПИЯФ высокопоточном нейтронном реакторе ПИК. На снимке – лазерный спектрометр УЛИСС комплекса ИРИС.
(Лаб. В.Н. Пантелеева)



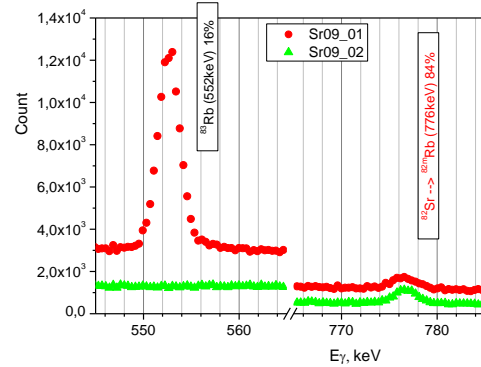
В ОФВЭ создан прецизионный двухплечевой протонный спектрометр МАП-НЭС. В проведенных с его помощью обширных исследованиях квазиупругого рассеяния протонов на ядрах получена уникальная информация о структуре ядер. В настоящее время исследуется влияние ядерной среды на свойства нуклонов, проявляющееся в модификации амплитуды протон-протонного рассеяния. На рисунке – схематическое изображение двухплечевого спектрометра МАП-НЭС.
(Лаб. С.Л. Белостоцкого)



В ОФВЭ на мюонном канале синхроциклотрона ПИЯФ создана единственная в РФ μ SR установка для исследования магнитной структуры конденсированных сред методом вращения спина мюона. С помощью μ SR метода исследовался магнетизм в материалах с памятью формы – в медно-марганцевых сплавах $\text{Cu}_{1-x}\text{Mn}_x$. Изучалось взаимодействие ферроэлектричества и ферромагнетизма в гексагональных манганитах HoMnO_3 . Исследовались магнитные свойства манганитов EuMn_2O_5 и GdMnO_5 , феррожидкостей $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{D}_2\text{O}$ и сталей марки ЕК-181. На фото – μ SR установка.
(Лаб. С.И. Воробьева)



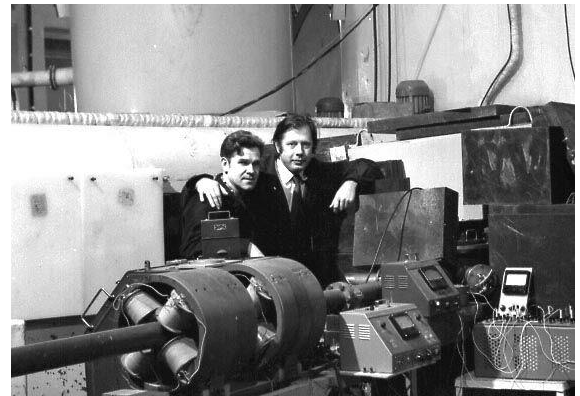
Для получения на циклотроне Ц-80 в медицинских целях генераторного радионуклида ^{82}Sr в ОФВЭ разработан новый высокотемпературный метод “сухого” выделения изотопов стронция из мишеней в виде хлористого и металлического рубидия. В предварительных экспериментах на мишенях, облученных на пучке синхроциклотрона ПИЯФ, получена эффективность выделения стронция-82 равная 90%. Также разрабатывается новый метод получения на циклотроне Ц-80 медицинских радионуклидов высокой чистоты с использованием электромагнитного масс-сепаратора. (Лаб. В.Н. Пантелеева)



Выделение стронция из облученной мишени. Гамма-спектры капсулы с облученным мишенным веществом RbCl до нагрева (точки наверху) и после нагрева (точки внизу) при температуре полного испарения мишенного вещества

ИССЛЕДОВАНИЯ НА РЕАКТОРАХ ПИЯФ

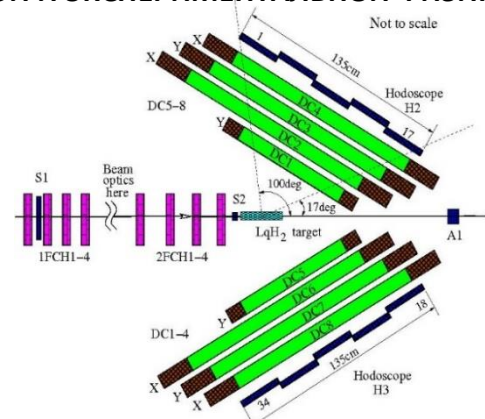
На реакторе ВВРМ было проведено детальное исследование процесса тройного деления ядер и получены важные сведения о механизме деления ядер. На строящемся реакторе ПИК планируется создать масс-сепараторный комплекс для получения экзотических ядер с большим нейтронным избытком и их изучения методами лазерной спектроскопии и прецизионной масс-спектрометрии с помощью ионных ловушек. Реализация этого проекта позволит ПИЯФ выйти в мировые лидеры по исследованию нейтроноизбыточных ядер.



Д.М. Селиверстов и И.А. Кондуров у время-пролетного спектрометра, с помощью которого на реакторе ВВРМ изучалось тройное деление

СОТРУДНИЧЕСТВО С ИНСТИТУТОМ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

Сотрудники ОФВЭ (лаб. В.В. Сумачева) проводили исследование барионных резонансов на пионных пучках как на ускорителе ПИЯФ, так и в совместных с ИТЭФ работах на ускорителе ИТЭФ. В ИТЭФ был осуществлен совместный эксперимент “ЭПЕКУР” по прецизионному измерению дифференциальных сечений упругого пион-нуклонного рассеяния. Эти исследования планируется продолжить.

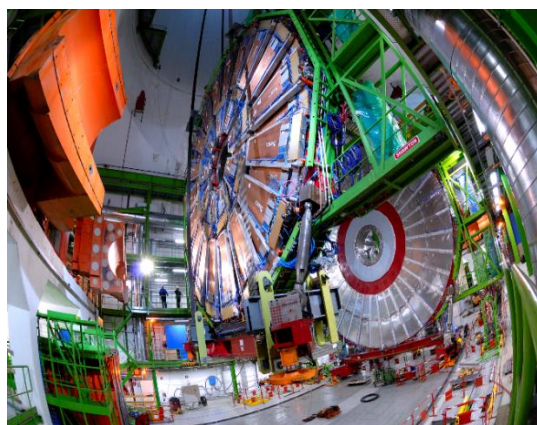


Установка ЭПЕКУР, значительная часть которой была изготовлена в ПИЯФ

СОТРУДНИЧЕСТВО С ЕВРОПЕЙСКИМ ЦЕНТРОМ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ (ЦЕРН)

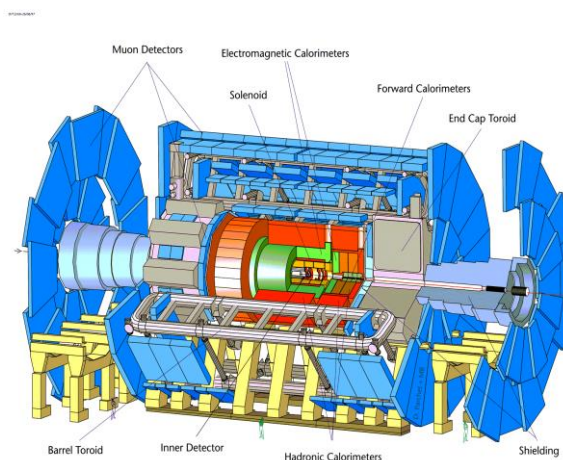
Начало участия ПИЯФ в международном сотрудничестве относится к 1967 году, когда было заключено двустороннее соглашение о сотрудничестве между ФТИ и Институтом Нильса Бора (Дания) и были выполнены первые совместные эксперименты. Затем в 1967 году аналогичное соглашение было заключено с ЦЕРН. Решающим этапом вхождения ПИЯФ в мировое сообщество, занимающееся физикой высоких энергий, были эксперименты WA9 и NA8 по исследованию малоуглового рассеяния адронов, выполненные в ЦЕРН в 1978–1981 гг. с использованием разработанного в ОФВЭ детектора ядер отдачи ИКАР. В последующем ПИЯФ участвовал в ЦЕРН в коллайдерном эксперименте L3 на электрон-позитронном ускорителе LEP. В настоящее время ПИЯФ участвует в ЦЕРН в коллайдерных экспериментах CMS, ATLAS, LHCb и ALICE и в эксперименте UA9 по коллимации пучка протонов ускорителя с помощью кристаллов. ПИЯФ участвует в ЦЕРН также в работах по исследованию свойств экзотических ядер на установке ISOLDE.

CMS – коллайдерный детектор, предназначенный для изучения физики протон-протонных соударений при энергии в системе центра масс вплоть до 14 ТэВ при полной светимости ускорителя LHC. ПИЯФ внес существенный вклад в создание детектора CMS. Для мюонной системы CMS в ПИЯФ были изготовлены 120 больших мюонных камер, 10000-канальная система высоковольтного питания мюонных камер, мюонный триггер первого уровня. Сотрудники ОФВЭ участвуют в проведении эксперимента и в анализе полученных данных, а также в выполнении программы модернизации детектора CMS. Тринадцать физиков ОФВЭ являются соавторами физических публикаций коллаборации CMS.



Мюонные камеры детектора CMS на диске (диаметра 14 м)

ATLAS – коллайдерный детектор, ориентированный на решение широкого круга вопросов физики элементарных частиц. Рассчитан на работу при полной светимости LHC. В ПИЯФ была изготовлена одна из основных подсистем установки ATLAS – детектор переходного излучения, состоящий из 372032 дрейфовых трубок. Физики ОФВЭ участвуют в проведении эксперимента, в анализе экспериментальных данных и в модернизации детектора ATLAS. Семь физиков ОФВЭ являются соавторами физических публикаций коллаборации ATLAS.



Схематическое изображение детектора ATLAS

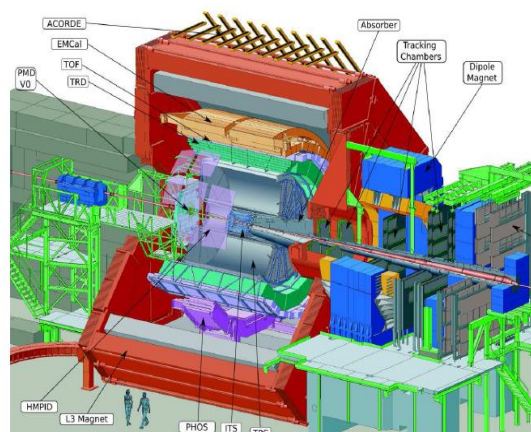
Детектор LHCb создан с целью изучения природы нарушения CP инвариантности в распадах *B*-мезонов, а также для исследования редких распадов *B*-мезонов, в которых может быть обнаружена «новая физика» за пределами Стандартной Модели. Одним из важнейших элементов детектора LHCb является мюонная система. Группа ОФВЭ предложила принципиальную схему построения мюонной системы и техническое решение ее реализации. В ПИЯФ были изготовлены 660 многопроволочных пропорциональных камер, перекрывающих площадь в 435 м². Физики ОФВЭ участвуют в проведении эксперимента и в анализе данных, а также в программе модернизации детектора LHCb. Семь физиков ОФВЭ являются соавторами физических публикаций коллаборации LHCb.

Детектор ALICE предназначен для изучения протон-ядерных и ядро-ядерных соударений при энергиях несколько ТэВ на нуклон с целью получения и исследования новой формы ядерной материи – кварк-глюонной плазмы. ПИЯФ участвовал в конструировании и изготовлении катодных пропорциональных камер для одной из основных подсистем установки ALICE – мюонного спектрометра. Физики ОФВЭ участвуют в проведении эксперимента и в анализе экспериментальных данных, а также в программе модернизации детектора ALICE. Девять физиков ОФВЭ являются соавторами физических публикаций коллаборации ALICE.

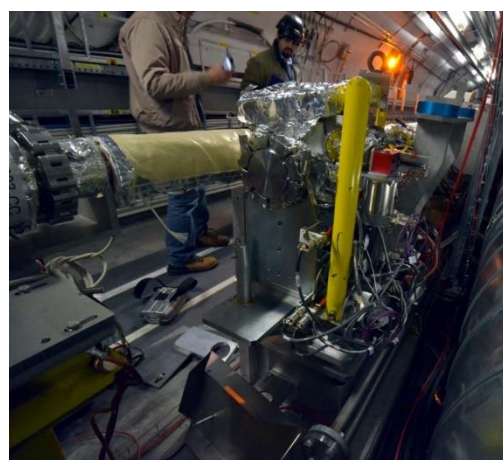
Сотрудничество ИФВЭ-ПИЯФ занимает лидирующие позиции в мире в исследовании и практическом применении кристаллов для управления протонными пучками. С участием ПИЯФ и ИФВЭ были выполнены эксперименты H8RD22 и UA9 на ускорителе SPS в ЦЕРН, подтвердившие перспективность применения кристаллов для коллимации пучков LHC. На основе полученных результатов в 2015–2016 гг. были проведены первые испытания системы кристаллической коллимации пучка непосредственно в кольце LHC.



Изготовленные в ПИЯФ мюонные камеры перед установкой в детектор LHCb



Схематическое изображение детектора ALICE



Установка в туннель коллайдера LHC гониометра с изготовленным в ПИЯФ кристаллическим дефлектором

СОТРУДНИЧЕСТВО С УСКОРИТЕЛЬНЫМИ ЦЕНТРАМИ США

Особое место в исследовательской программе ПИЯФ занимает сотрудничество с Национальной ускорительной лабораторией им. Ферми (FNAL). Первый совместный ПИЯФ-FNAL эксперимент E715 был проведен в 1983–1984 гг., сразу после запуска во FNAL ускорителя Тэватрон. Эксперимент был посвящен решению обсуждавшейся в то время проблемы бета-распада сигма-гиперонов. ПИЯФ предложил проект эксперимента и разработал и изготовил детектор переходного излучения. Эксперимент был успешно выполнен на гиперонном канале Тэватрона и получил высокую оценку в научных кругах.

В последующем во FNAL на гиперонном канале были успешно проведены эксперименты E761 и E781 по изучению свойств гиперонов и очарованных частиц. Был получен ряд новых данных, в том числе исследованы радиационные распады Σ^+ и Ξ^- гиперонов, измерены магнитные моменты Σ^- , Σ^+ и Ξ^- гиперонов и измерен зарядовый радиус Σ^- гиперона. В эти эксперименты ПИЯФ внес большой вклад как в идейном плане, так и в плане создания экспериментального оборудования. С участием ПИЯФ во FNAL был также выполнен эксперимент E853 по выводу протонного пучка из Тэватрона методом каналирования протонов в изогнутом кристалле.

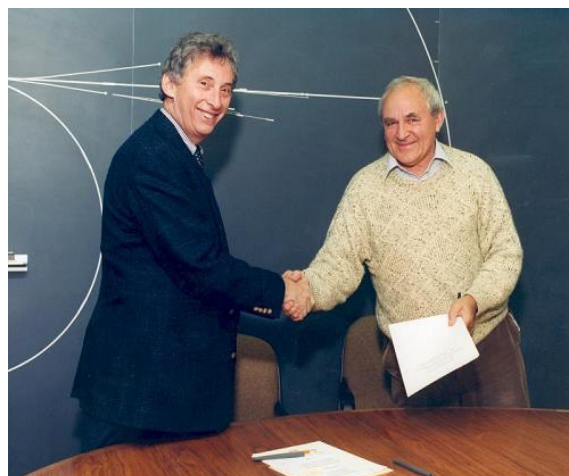
С 1997 года ПИЯФ участвует во FNAL в коллайдерном эксперименте D0. Для этого эксперимента ПИЯФ разработал и изготовил систему считывания информации с 50000 каналов мюонной системы. В эксперименте D0 был получен ряд выдающихся результатов. В частности, было осуществлено наиболее точное измерение масс t -кварка и W -бозона, впервые наблюдаются осцилляции B_s мезона (переходы B_s мезона в анти-мезон и обратно), обнаружены новые гипероны – каскадный барион Ξ_b^- и дважды странный Ω_b^- барион.



Участники эксперимента E715 после окончания измерений



Директор FNAL Леон Ледерман обсуждает в январе 1987 года с участниками коллаборации E761 проект эксперимента



Директор FNAL Джон Пиплз и директор ПИЯФ А.А. Воробьев подписывают в ноябре 1990 г. очередное соглашение о сотрудничестве ПИЯФ–FNAL

С 2000 года в Брукгейвенской национальной лаборатории (BNL) начал работать ускоритель-коллайдер тяжелых ядер RHIC. На ускорителе RHIC ПИЯФ участвует в международном эксперименте PHENIX по исследованию протон-протонных, протон-ядерных и ядро-ядерных столкновений при высокой энергии. В ПИЯФ были разработаны и созданы уникальные дрейфовые камеры для центральной трековой системы – одной из основных подсистем установки PHENIX. Группа физиков ОФВЭ участвует в проведении эксперимента и играет ведущую роль в анализе образования векторных мезонов в ядерных столкновениях.

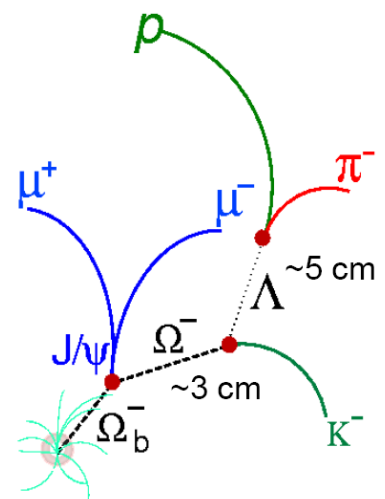


Участники эксперимента PHENIX у изготовленной в ПИЯФ центральной трековой системы перед ее установкой в детектор PHENIX

Сотрудники ОФВЭ совместно с физиками из США проводили также исследования барионных резонансов как на синхротроне ПИЯФ, так и на ускорителе RHIC в BNL с помощью многокристального детектора Crystal Ball. На фотографии – старший научный сотрудник ПИЯФ И.В. Лопатин (слева) и профессор Майкл Садлер из США в эксперименте на пимезонном канале синхротрона ПИЯФ.

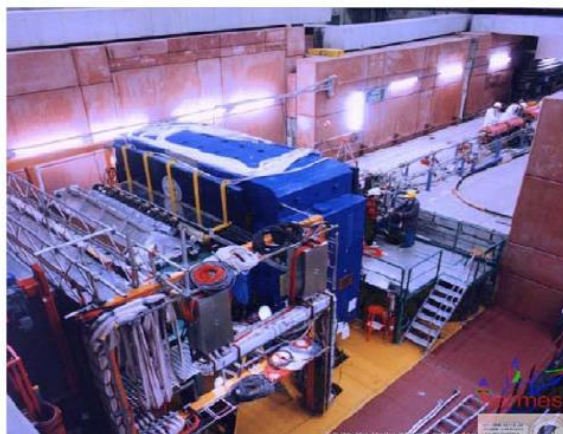


На рисунке изображена схема распада дважды странного бариона Ω_b^- , впервые наблюдавшегося в эксперименте D0.



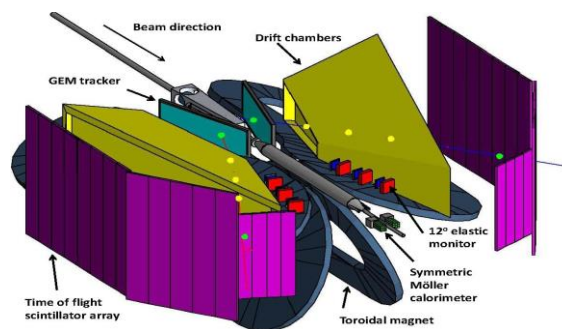
СОТРУДНИЧЕСТВО С НЕМЕЦКИМИ ЯДЕРНЫМИ ЦЕНТРАМИ

Сотрудники ОФВЭ внесли большой материальный и интеллектуальный вклад в международный эксперимент HERMES на ускорителе HERA в DESY, в котором исследовано рассеяние продольно поляризованных позитронов с энергией 27 ГэВ на поляризованных водородной и дейтериевой мишенях с целью изучения спиновой структуры нуклона. В результате были определены вклады кварков в полный спин нуклона и измерена поляризация глюонов.



Экспериментальная установка HERMES на ускорителе HERA

В международном эксперименте OLYMPUS на ускорителе DORIS в DESY с участием физиков ОФВЭ осуществлен набор данных по упругому рассеянию электронов и позитронов на протонах с целью измерения отношения электрического к магнитному формфакторов протона в зависимости от величины передаваемого импульса. Ведется анализ экспериментальных данных.



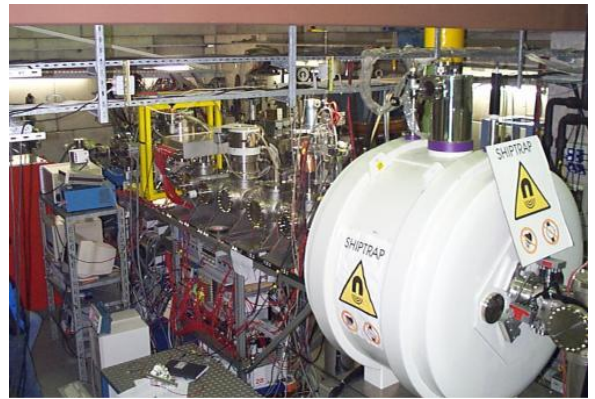
Экспериментальная установка OLYMPUS на ускорителе DORIS

В ОФВЭ был предложен новый метод измерения сечений малоуглового протон-ядерного рассеяния в инверсной кинематике, и этим методом с помощью созданного в ПИЯФ спектрометра ИКАР ведется исследование пространственной структуры легких экзотических ядер в Ядерном центре тяжелых ионов GSI.



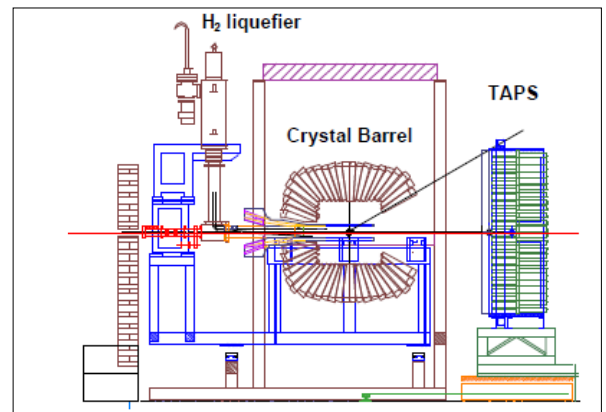
Спектрометр ИКАР в экспериментальном зале GSI

В Ядерном центре тяжелых ионов GSI в Дармштадте на установке SHIPTRAP ведутся прецизионные измерения масс экзотических тяжелых и сверхтяжелых ядер с помощью созданных с участием физиков ОФВЭ ионных ловушек.



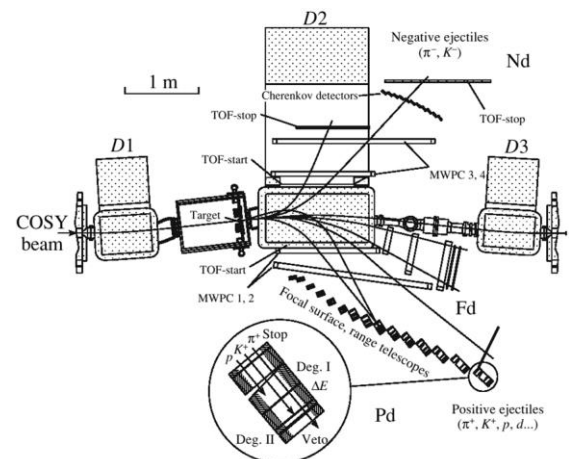
Установка SHIPTRAP в экспериментальном зале GSI

Сотрудники ОФВЭ участвовали в экспериментах по изучению фоторождения нейтральных мезонов на ускорителе ELSA Боннского университета с использованием детекторов Crystal Barrel и TAPS, а также на пучке меченых фотонов ускорителя MAMI-C в Майнце с использованием фотонного спектрометра Crystal Ball.



Схематическое изображение установки с детекторами Crystal Barrel и TAPS

В международном эксперименте ANKE на синхротроне COSY в Юлихе с участием сотрудников ОФВЭ исследовалось околопороговое и подпороговое рождение странных частиц в протон-нуклонных и протон-ядерных столкновениях. Впервые измерены сечения рождения ϕ и Ω мезонов в pp - и pn -соударениях при малых энергиях возбуждения. Исследовалось влияние ядерной среды на свойства ϕ мезона.

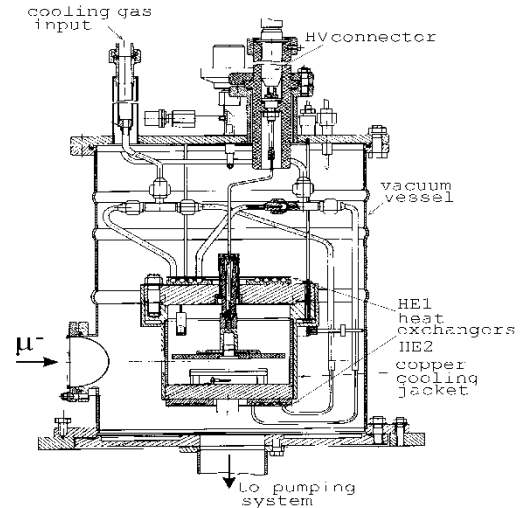


Схематическое изображение установки ANKE

ПИЯФ планирует принять участие в исследованиях на строящемся в Дармштадте новом ускорительном комплексе FAIR. В настоящее время физики ОФВЭ участвуют в создании детектора PANDA для исследования протон-антипротонных соударений при промежуточных энергиях, детектора CBM для исследования ядро-ядерных соударений при промежуточных энергиях, детектора MATS для проведения прецизионных измерений масс экзотических ядер и детектора R3B для изучения свойств удаленных от полосы стабильности ядер и ядерных реакций с участием этих ядер.

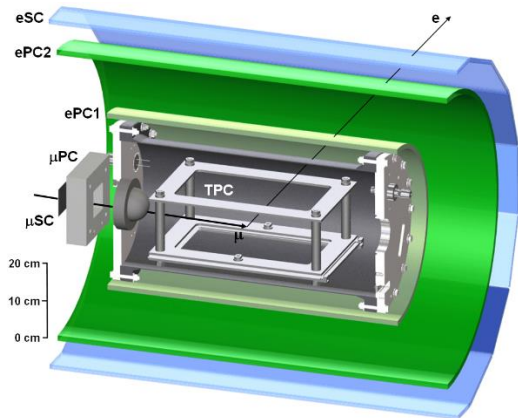
СОТРУДНИЧЕСТВО С ИНСТИТУТОМ ПАУЛЯ ШЕРРЕРА В ШВЕЙЦАРИИ

В ОФВЭ был предложен новый эффективный экспериментальный метод для изучения мезокатализа dd -синтеза. Эксперименты с использованием этого метода вначале были выполнены в ПИЯФ, а затем были продолжены на мезонной фабрике Института Пауля Шеррера. В результате были определены с высокой точностью все основные параметры мезокатализа dd -синтеза и получены данные по мезокатализу dt -синтеза.



Схематическое изображение установки для исследования мезокатализа dd -синтеза

В международном эксперименте на мезонной фабрике в институте Пауля Шеррера предложенным физиками ОФВЭ методом в эксперименте MuCap выполнены прецизионные измерения скорости мюонного захвата в водороде и впервые достаточно точно определена одна из фундаментальных характеристик протона – псевдоскалярная константа формфактора протона g_p . Измеренная величина g_p оказалась в согласии с предсказаниями Стандартной Модели.



Схематическое изображение в разрезе установки для измерения скорости мюонного захвата в водороде

На мезонной фабрике в институте Пауля Шеррера при активном участии физиков ОФВЭ были выполнены прецизионные измерения скорости мюонного захвата в ^3He . Измеренная величина скорости мюонного захвата в ^3He оказалась в согласии с теоретическими предсказаниями, основанными на гипотезе частичного сохранения аксиального тока. Недавно также были успешно проведены измерения скорости мюонного захвата в дейтерии. Полученные экспериментальные данные анализируются.

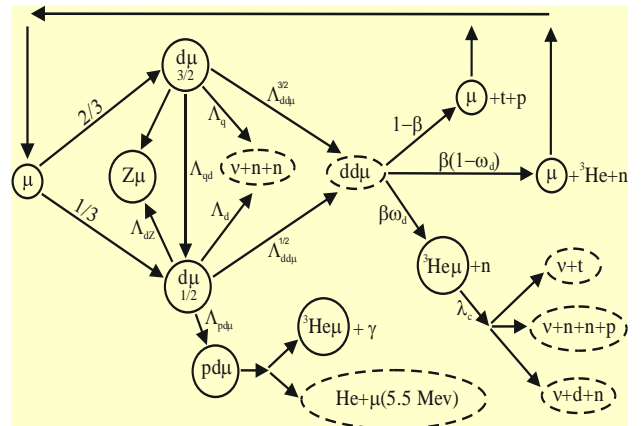


Схема реакций, которые следуют после остановки отрицательного мюона в дейтерии

СОТРУДНИЧЕСТВО С ЯДЕРНЫМ ЦЕНТРОМ САКЛЕ ВО ФРАНЦИИ

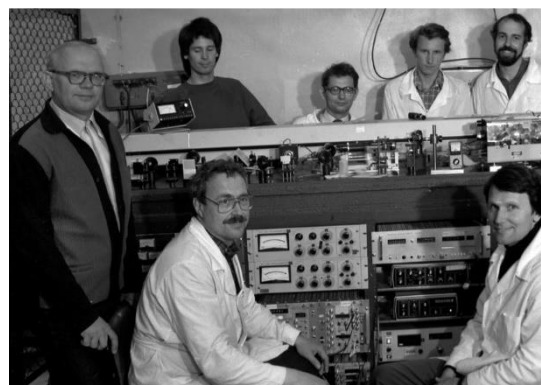
Физики ОФВЭ и физики Ядерного центра Сакле выполнили серию совместных экспериментов, как на синхроциклотроне ПИЯФ, так и на ускорителях Saturne-I и Saturne-II в Сакле. Исследовались упругое и неупругое рассеяние на ядрах протонов и альфа частиц промежуточной энергии, малоугловое рассеяние нейтронов промежуточной энергии на протонах, эксклюзивный развал дейтронов протонами с измерением всех поляризационных наблюдаемых и неупругое рассеяние альфа частиц на протонах с целью изучения Роперовского резонанса.



С.н.с. Г.Д. Алхазов и физики из Сакле обсуждают в ПИЯФ результаты совместного эксперимента

СОТРУДНИЧЕСТВО С ФИЗИКАМИ УНИВЕРСИТЕТА МАРБУРГА

Физики ОФВЭ провели на синхроциклотроне ПИЯФ несколько совместных экспериментов с физиками из университета Марбурга (Германия) по измерению зарядовых радиусов и электромагнитных моментов ядер изотопов Eu и Sm методом коллинеарной лазерной ионной спектроскопии.



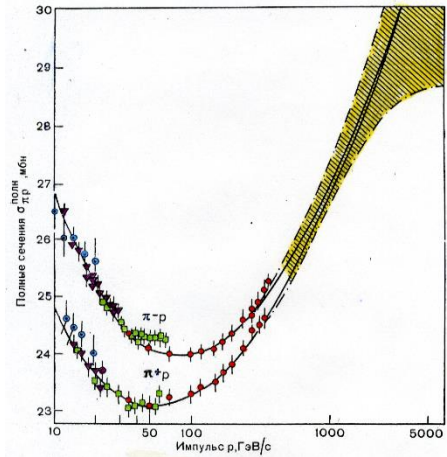
Физики ОФВЭ (В.П. Денисов, В.Н. Пантелеев, А.Г. Поляков, М.М. Трухин) и немецкие физики в ПИЯФ в экспериментальном зале ИРИС у лазерной установки, привезенной из Марбурга

СОТРУДНИЧЕСТВО С ЯДЕРНЫМ ЦЕНТРОМ ЮВЯСКЮЛЯ В ФИНЛЯНДИИ

На протяжении ряда лет физики ОФВЭ участвовали в экспериментах по исследованию свойств нестабильных нейтронодефицитных ядер на установке IGISOL, действующей “в линию” с изохронным циклотроном K-130 университета Ювяскуля в Финляндии. Измерялись периоды полураспада нуклидов, велся поиск новых изомерных состояний и проводились прецизионные измерения масс ядер с помощью ионной ловушки. Было исследовано несколько десятков ядер, расположенных вблизи или на пути астрофизического rp -процесса в районе массовых чисел $A = 80 - 100$ с $N \approx Z$.

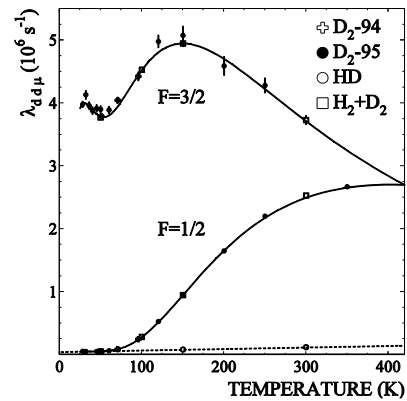
ОСНОВНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ ОФВЭ

Новым методом, предложенным проф. А.А. Воробьевым, на ускорителях Гатчины, Серпухова и ЦЕРН выполнен цикл работ по малоугловому рассеянию адронов высокой энергии с помощью созданного в ПИЯФ уникального ионизационного спектрометра ИКАР. В результате установлены важные закономерности во взаимодействии адронов высокой энергии: универсальное возрастание полных сечений и радиусов взаимодействия адронов с увеличением энергии. Эти работы в 1983 году были удостоены Государственной премии.



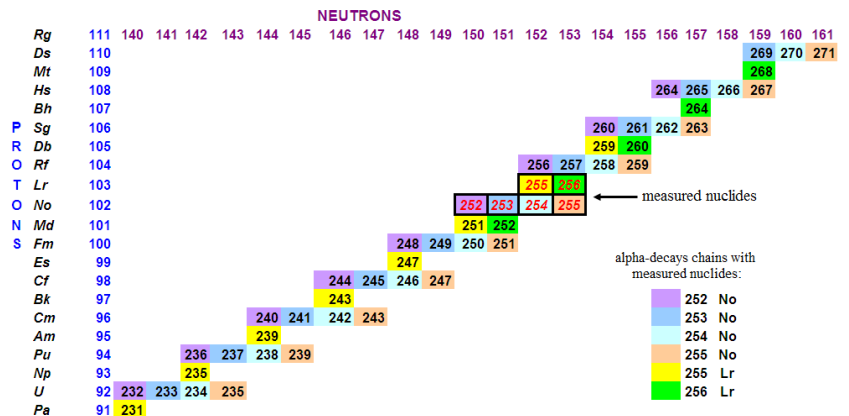
Экстраполяция сечений πp рассеяния за пределы измерений

Предложенным в ОФВЭ методом в экспериментах в ПИЯФ и на мезонной фабрике Института Пауля Шеррера детально изучен мезокатализ dd - и dt -синтеза. Эти результаты составляют современную базу данных, используемых в теории мезокатализа. Важным результатом, имеющим практическое значение, явилось измерение вероятности прилипания мюона к ядру ${}^4\text{He}$ в реакции $dt\mu \rightarrow {}^4\text{He}\mu + n$. Тем самым было определено максимальное число циклов dt -синтеза, катализируемых в среднем одним мюоном. Это число оказалось равным 178 ± 13 . В 1993 году работа была отмечена премией А.Ф. Иоффе.



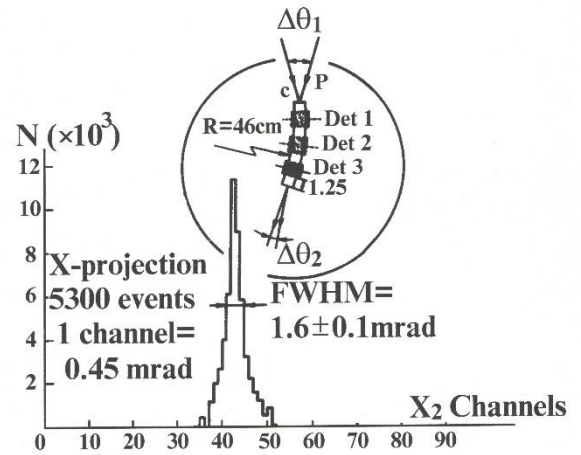
Измеренные скорости образования $dd\mu$ молекулы из двух спиновых состояний $d\mu$ атома, $F=3/2$ и $F=1/2$, в зависимости от температуры среды

В Ядерном центре тяжелых ионов GSI в Дармштадте на установке SHIPTRAP были проведены прецизионные измерения масс ядер сверхтяжелых элементов. Несколько основных участников этой работы, в том числе и ведущий научный сотрудник ОФВЭ проф. Ю.Н. Новиков, в 2013 году были удостоены Международной премии им. Г.Н. Флерова.

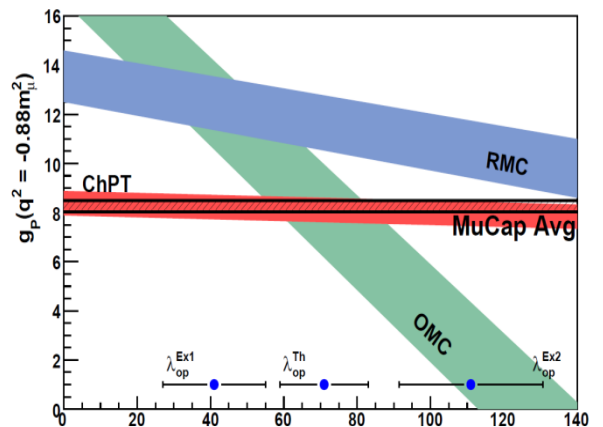


Ядра, массы которых были измерены (в прямоугольниках), и ядра, массы которых благодаря этим измерениям можно определить с использованием известных энергий α распада исследуемых ядер

В.н.с. В.М. Самсоновым и с.н.с. А.И. Смирновым с сотрудниками был выполнен цикл работ по изучению возможности изменять направление пучков заряженных частиц высокой энергии с помощью кристаллов. Эти работы были удостоены Государственной премии 1996 года. На рисунке демонстрируется эффект объемного захвата кристаллом пучка протонов. Угловой разброс протонов падающего на кристалл пучка составляет $\Delta\theta_1 = 7.2$ мрад, в то время как угловой разброс протонов повернутого кристаллами пучка значительно меньше: $\Delta\theta_2 = 1.6$ мрад.

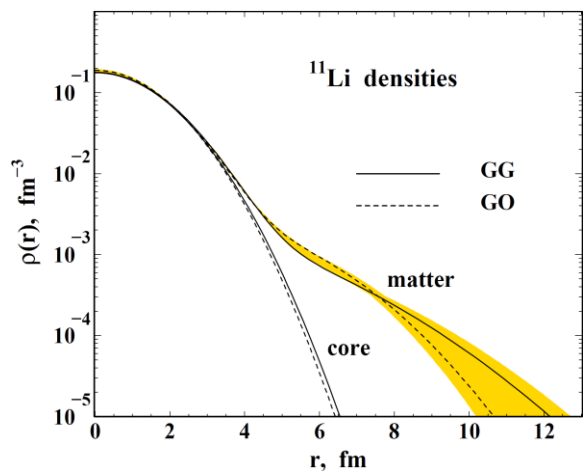


В международном эксперименте на мезонной фабрике в Швейцарии в институте Пауля Шеррера предложенным физиками ОФВЭ методом выполнены прецизионные измерения скорости мюонного захвата в водороде и впервые достаточно точно определена одна из фундаментальных характеристик протона – псевдоскалярная константа формфактора протона g_p . Измеренная величина g_p оказалась в согласии с предсказаниями Стандартной Модели.



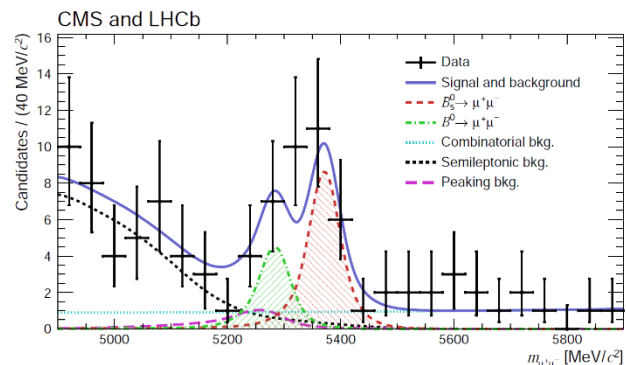
Величина g_p , определенная в данном эксперименте (красная полоса), предсказания теории (черные прямые) и результаты предыдущих экспериментов OMC (Сакле) и RMC (Триумф) в зависимости от скорости λ_{op} орто-пара переходов в $p\bar{p}$ молекуле

В ПИЯФ впервые были проведены прецизионные измерения сечений упругого рассеяния протонов промежуточной энергии на ряде ядер и с высокой точностью были определены параметры распределений ядерной материи. В дальнейшем аналогичные совместные исследования были продолжены в ядерном центре Сакле. В ПИЯФ был также исследован процесс квазиупругого рассеяния протонов на ядрах. Эти эксперименты прекрасно продемонстрировали оболочечную структуру ядер. С помощью спектрометра ИКАР в Ядерном центре тяжелых ионов (GSI) была исследована пространственная структура легких нейтроноизбыточных ядер с гало.



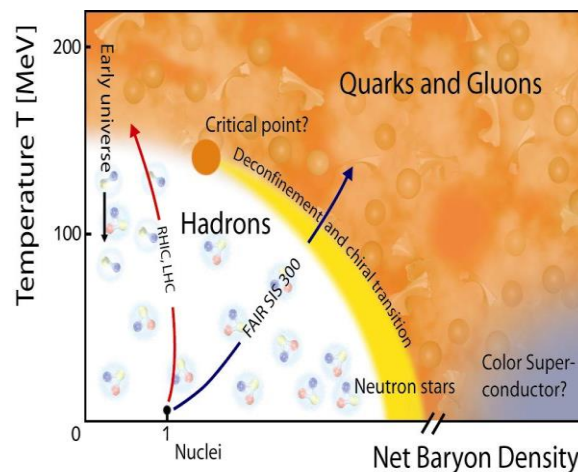
Распределения ядерной материи кора и полной материи (кор + гало) в ядре ^{11}Li . В анализе измеренных сечений использовались модельные распределения GG и GO

В эксперименте LHCb был наблюден сверхредкий распад B_s мезона на два мюона. Согласно Стандартной Модели (СМ), такой распад может происходить с очень малой вероятностью. В соответствии с новыми теориями за рамками СМ вероятность распада B_s мезона на два мюона может быть больше, чем та, что следует из СМ. Вероятность распада B_s мезона на два мюона, определенная в эксперименте LHCb и недавно подтвержденная в эксперименте CMS, согласуется со СМ. Полученный результат закрывает ряд новых теорий и является сильным аргументом в пользу расширения области применимости СМ.



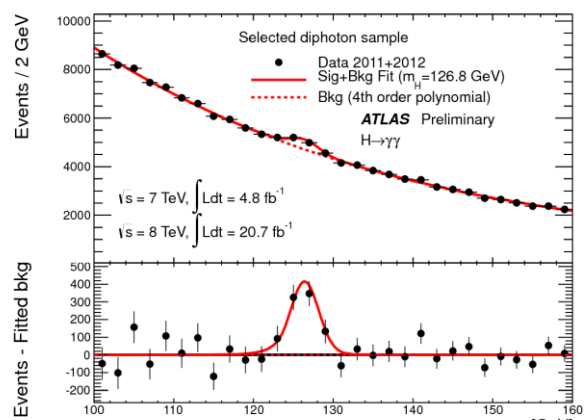
Красная пунктирная линия – сигнал от распада B_s мезона

В эксперименте PHENIX, в котором физики ОФВЭ принимают активное участие, было обнаружено новое состояние ядерной материи – кварк-глюонная плазма со свойствами почти идеальной жидкости.



Фазовая диаграмма, иллюстрирующая исследование экстремальных свойств ядерной материи при взаимодействии тяжелых релятивистских ядер

В экспериментах CMS и ATLAS был открыт бозон Хиггса – ключевая частица современной теории элементарных частиц (СМ). О важности этого открытия свидетельствует тот факт, что в связи с обнаружением бозона Хиггса теоретикам Питеру Хиггсу и Франсуа Энглеру, предсказавшим много лет назад существование этой частицы, в 2013 г. была присуждена Нобелевская премия по физике. Среди авторов публикаций об этом открытии – 21 сотрудник ОФВЭ.



Распределение по массе двух фотонов в эксперименте ATLAS. Пик при энергии ~ 126 ГэВ/ c^2 обусловлен распадом бозона Хиггса

Ускорители сверхвысоких энергий – новые реалии в жизни физиков

А.А. Воробьев (2008 г.)

Ноябрь 2006 года. Подготовлена к отправке последняя партия оборудования, изготовленного в ПИЯФ для планируемых в ЦЕРНе экспериментов на сооружаемом протонном коллайдере LHC. ПИЯФ участвует в создании четырех коллайдерных детекторов: CMS, ATLAS, ALICE и LHCb, причем это участие включает изготовление большого объема экспериментального оборудования для каждого из этих детекторов. В течение почти десяти лет более 100 физиков, инженеров, техников и рабочих института напряженно трудились над выполнением этой задачи. И вот, наконец, этот ответственный этап завершен. Все запланированное оборудование изготовлено, испытано и доставлено в ЦЕРН. Теперь основная работа переместилась в ЦЕРН – контрольные испытания аппаратуры, монтаж установок, подготовка установок к физическим измерениям. Запуск LHC и начало физических измерений намечены на середину 2008 года. И хотя вся работа еще впереди, тем не менее уже на этом этапе стоит немного оглянуться назад, оценить сделанное и попытаться представить себе нашу будущую роль в этих масштабных экспериментах, стоимость которых оценивается сотнями миллионов долларов, а число участвующих институтов из разных стран исчисляется десятками. Нравятся нам такие “индустриальные” эксперименты или нет, но серьезное продвижение в физике элементарных частиц ожидается именно с освоением сверхвысоких энергий. Поэтому нам придется научиться жить в новых условиях, если мы хотим участвовать в этом интереснейшем процессе познания Природы. Тем более, что программа LHC имеет непосредственную поддержку Правительства РФ, выделяющего на нее значительные средства. Вместе с тем и традиционная ядерная физика, как и фундаментальные исследования при низких энергиях, еще не исчерпали своих возможностей и могут быть ценным дополнением к исследованиям при сверхвысоких энергиях. Задача заключается в нахождении разумного баланса между этими направлениями.

Участие ПИЯФ в создании детекторных установок на LHC

Участие научных коллективов в проектах LHC возможно лишь при существенном вкладе этих коллективов в создание и эксплуатацию экспериментальных установок. Собственно, в данном требовании нет ничего особенного. И раньше это было необходимым условием участия в совместных экспериментах. Разница лишь в огромном количестве оборудования, необходимого для экспериментов на LHC. Тем не менее, как показывает наш опыт, эта задача вполне выполнима при наличии в институте опытного коллектива специалистов, необходимой инфраструктуры и финансовой поддержки проекта.

Здесь следует сказать несколько слов о стратегии, принятой в ПИЯФ относительно производства оборудования для экспериментов на LHC. Во-первых, мы брались, в основном, за производство такого оборудования, в разработку которого ПИЯФ внес существенный вклад. Во-вторых, мы работали в тесном сотрудничестве с западными партнерами по принципу: основные материалы и компоненты поставляются нашими партнерами, а производство и испытания оборудования осуществляются в ПИЯФ. Такая схема позволяет использовать практически все получаемые по проекту российские ресурсы на развитие инфраструктуры института и на зарплату участникам проекта. Более того, значительная часть работ осуществляется за счет контрактов и инвестиций наших партнеров. В результате создается оборудование по стоимости многократно превышающее объем российского

финансирования и в то же время укрепляется инфраструктура института и сохраняется коллектив, что очень важно в наше время.

Когда программа LHC еще только начиналась, нам приходилось слышать опасения: не слишком ли много обязательств берет на себя ПИЯФ, участвуя сразу в четырех экспериментах на LHC. Другого рода сомнения высказывались некоторыми западными коллегами, ссылавшимися на непредсказуемость экономической ситуации в нашей стране. Однако кредит доверия, накопленный нашим институтом за многие предыдущие годы, позволил нашим коллегам преодолеть эти сомнения. Что касается нас самих, то мы не сомневались в успехе. Наш оптимизм был основан на том, что мы ориентировались лишь на собственные силы и на наш опыт сотрудничества с западными научными центрами. Как видим, эта стратегия оказалась плодотворной: мы не только выполнили все наши обязательства, но и по просьбе наших партнеров изготовили в значительном объеме дополнительное оборудование, не предусмотренное первоначальными планами.

Ниже приведено краткое описание участия ПИЯФ в создании детектора CMS.

Мюонные камеры для Торцевой Мюонной Системы детектора CMS

Торцевая Мюонная Система детектора CMS (система EMU – Endcap Muons) является одной из основных подсистем детектора CMS. Детектирующими элементами этой системы являются большие многопроволочные пропорциональные камеры с катодными стрипами (мюонные камеры). Всего система EMU содержит 468 мюонных камер, размещенных на шести железных дисках-магнитопроводах диаметром 14 метров каждый. Общая площадь мюонных камер составляет около 1000 кв. метров. 120 мюонных камер должны были быть изготовлены в ПИЯФ. Каждая мюонная камера состоит из шести детектирующих слоев, так что фактически нужно было изготовить 720 однослойных камер общей площадью более 1400 кв. метров с общим числом анодных нитей около пятисот тысяч.

Здесь следует заметить, что массовое производство мюонных камер – это лишь заключительный этап создания системы EMU. Ему предшествовала многолетняя исследовательская работа, включавшая разработку конструкции мюонных камер и электроники к ним, изготовление и испытания прототипов камер на пучках частиц, исследование процесса старения камер и, наконец, разработку технологии изготовления камер. Эти работы выполнялись международным коллективом, в котором ведущую роль играли Национальная ускорительная лаборатория им. Э. Ферми (ФНАЛ, США), ПИЯФ и несколько американских университетов.

На самом деле работы по созданию коллайдерного мюонного детектора начались в ПИЯФ значительно раньше, еще в 1991 году во время начала сооружения в США протонного суперколлайдера SSC на энергию 20 ТэВ + 20 ТэВ. В это время Брукхэйвенская Национальная Лаборатория (БНЛ, США) вместе с ПИЯФ предложили проект мюонной системы для детектора GEM – одного из двух коллайдерных детекторов на SSC. Этот проект был основан на использовании многопроволочных пропорциональных камер с катодным съемом информации. В ходе разработки проекта были изготовлены и испытаны несколько прототипов камер, а также исследованы различные газовые смеси для этих камер. Было показано, что эти камеры могут обеспечить необходимое пространственное и временное разрешение и могут генерировать мюонный триггер, работая в автономном режиме.

В начале 1993 года предложенный проект был рассмотрен коллаборацией GEM вместе с двумя другими конкурирующими проектами. В результате был выбран наш проект. К сожалению, по решению конгресса США в октябре 1993 года сооружение коллайдера SSC было остановлено. После этого было принято решение об участии американских групп в проекте LHC. Так образовалась коллаборация, предложившая в феврале 1994 года создать

мюонную систему EMU для детектора CMS на основе проекта мюонной системы GEM. Естественно, что в состав коллаборации вошла и группа ПИЯФ.

Коллектив ПИЯФ имеет богатый опыт участия в международных экспериментах и в производстве различной аппаратуры для этих экспериментов. Однако изготовление мюонных камер для CMS требовало иного подхода к организации производства. Необходимо было обеспечить темп производства, позволяющий еженедельно изготавливать по одной мюонной камере. И не только изготавливать, но и оснащать камеры считывающей электроникой и выполнять весь комплекс испытаний. И этот темп должен был быть сохранен в течение трех лет непрерывной работы. Для решения этой задачи в ПИЯФ была организована группа в составе двадцати инженеров и техников. Были подготовлены отвечающие условиям производства помещения общей площадью около 500 кв. метров. Совместными усилиями коллаборации EMU было разработано и изготовлено различное технологическое оборудование для производства мюонных камер и для испытания отдельных элементов камер на всех этапах производства. Основные конструктивные элементы камер, в том числе большие анодные и катодные панели, изготавливались в США и присылались из ФНАЛ в ПИЯФ вместе с необходимыми для изготовления камер материалами. Вся электроника тоже поставлялась из ФНАЛ.



Иллюстрация процесса изготовления мюонных камер.

Верхний ряд слева направо:

Измерение натяжения анодных проволок и расстояний между ними.

Распайка анодных проволок на панелях.

Сборка мюонных камер.

Нижний ряд слева направо:

Измерение однородности газового усиления на гамма – стенде.

Испытания камер на стенде космических мюонов.

Месячная тренировка изготовленных камер в рабочих условиях.

Технологическое оборудование включало специальные столы для прецизионной клейки анодных и катодных пластин к панелям, автоматическое устройство для намотки анодных проволок, автомат для измерения натяжения проволок и расстояния между ними, столы для распайки анодных проволок, стенд для очистки анодных плоскостей потоком ионизованного

газа, столы для сборки камер, стенды для испытания камер на герметичность, на высокое напряжение, на однородность газового усиления. На камеры, прошедшие эти испытания, устанавливалась электроника, после чего они поступали на специальный измерительный стенд с использованием космических мюонов. Программа испытаний включала 36 различных тестов. Все результаты испытаний заносились в базу данных, доступную через интернет всем участникам коллаборации. На завершающем этапе камеры проходили месячную тренировку при номинальных рабочих условиях.



**В. Козлов,
В. Сулимов,
Н. Бондарь.**
Монтаж и испытания
прикамерной электроники



А. Денисов
за пультом управления
испытательного стенда
на космических
мюонах

Массовое изготовление мюонных камер в ПИЯФ было начато в конце 2001 года после положительного заключения специальной комиссии коллаборации EMU о готовности производства. Последняя из 120 камер была изготовлена в конце 2004 года в точном соответствии с согласованным графиком. Проведенные испытания показали, что все изготовленные камеры полностью соответствуют расчетным параметрам. Транспортировка камер в ЦЕРН осуществлялась в специально изготовленных контейнерах трейлерами с улучшенной амортизацией по наиболее безопасному маршруту С.-Петербург – Гамбург – ЦЕРН. Все камеры были благополучно доставлены в ЦЕРН.



Команда ОФВЭ, изготовившая 120 мюонных камер,
перед последней отправкой камер в ЦЕРН



Трейлер с двадцатью мюонными камерами
отправляется в ЦЕРН



Генеральный директор ЦЕРН **Р. Аутар** и Министр образования и науки РФ **А. Фурсенко** у испытательного стенда мюонных камер в ЦЕРНе. Пояснения дает **П. Левченко**

Помимо ПИЯФ, мюонные камеры для системы ЕМУ изготавливались еще в двух центрах: во ФНАЛ (США) и в Институте физики высоких энергий (Китай). Все камеры доставлялись на специально организованный в ЦЕРНе измерительный участок, где они проходили повторные испытания по той же программе, что и при изготовлении. Эти испытания проводились в основном группой специалистов из ПИЯФ. В ходе испытаний были выявлены и устранены отдельные неисправности электроники, после чего камеры были готовы к установке в детектор CMS.



Процесс установки мюонной камеры на мюонный диск в наземном зале CMS

Сборка детектора CMS осуществляется в два этапа. Сначала все системы детектора собираются в наземном зале, причем конструкция детектора позволяет раздвинуть отдельные его части (в том числе каждый из мюонных дисков) на некоторое расстояние вдоль направления пучка для облегчения доступа при проведении монтажных работ. В этом положении детектора осуществляется монтаж всех систем CMS вместе со вспомогательным оборудованием и электроникой и проводятся предварительные испытания систем.



Момент спуска одного из мюонных дисков в подземный зал CMS

Затем каждая из разборных частей детектора опускается в подземный зал, где осуществляется окончательная сборка детектора и проводятся предпусковые испытания. Группа ПИЯФ принимает активное участие в монтаже и тестировании мюонных камер ЕМУ, а также в подготовке вспомогательного оборудования (высоковольтное и низковольтное питание мюонных камер, система геометрической привязки камер). До апреля 2008 года монтаж детектора CMS должен быть завершен и детектор будет готов к работе.

Многоканальный источник высокого напряжения для системы EMU

Система EMU содержит 468 мюонных камер. Эти камеры должны обеспечить бесперебойное функционирование системы в течение, как минимум, десяти лет непрерывной работы ЛНС. Вместе с тем известно, что пропорциональная камера – весьма деликатный прибор. Она может выйти из строя по различным причинам (например, разрыв анодной нити), особенно в условиях интенсивной радиации, имеющей место в данном случае. Чтобы минимизировать последствия подобных неисправностей, каждая камера разделена по высоковольтному питанию на 18 секторов. Так что в случае неисправности отключается лишь один сектор, что не будет иметь серьезных последствий для работы всей системы EMU.

Однако такое решение потребовало создание многоканального источника высокого напряжения с числом каналов около 10000. В каждом из этих каналов должно быть независимое измерение тока и регулирование напряжения с возможностью немедленного отключения в случае необходимости. При этом высоковольтная система должна быть достаточно радиационно-стойкой. Разработка и создание такой системы известными производителями (например, компанией CAEN) оценивалась в несколько миллионов долларов. К тому же компания не могла выполнить эту работу в нужные сроки. К счастью, в ПИЯФ был предложен менее дорогостоящий проект многоканального источника высокого напряжения, отвечающий требованиям эксперимента CMS. За реализацию проекта



С. Волков у пульта управления многоканальной системы высокого напряжения

совместно специалисты ПИЯФ и Университета Флориды (США). Основные работы по изготовлению и испытаниям высоковольтной системы проводились в ПИЯФ. Часть блоков и технологического оборудования, а также основные компоненты поставлялись Университетом Флориды. В результате интенсивной работы многоканальный источник высокого напряжения для системы EMU был изготовлен и поставлен в ЦЕРН. Источник содержит 11000 независимо регулируемых каналов напряжения в диапазоне $(3,0 \div 4,0)$ кВ.

Мюонный триггер системы EMU

Важной разработкой, выполненной сотрудниками ПИЯФ совместно с Университетом Флориды, явилось создание специализированного процессора для быстрого нахождения и анализа мюонных треков на основе информации, полученной от мюонных камер системы EMU. Этот процессор, выполняя огромный объем операций, позволяет режектировать фоновые события и отбирать мюоны с заданным поперечным импульсом для триггера первого уровня. Процессор выполнен на основе современных достижений микроэлектроники. В частности, в нем используются новейшие программируемые интегральные схемы FPGA, в которых содержатся более миллиона управляемых логических элементов. В 2001 году был разработан и испытан первый прототип триггерного процессора. Это была довольно большая система, состоящая из 48 модулей типа 9U VME с глубиной модуля 400 мм. Время решения процессора было 375 наносекунд. Полученный опыт работы с этим процессором, а также появление более мощных схем FPGA, позволили авторам разработки создать новый вариант

триггерного процессора, в котором число модулей было уменьшено в четыре раза, а время решения было сокращено до 175 наносекунд. Рабочий вариант триггерного процессора был разработан в 2002 году. Изготовление процессорных блоков было выполнено в американской промышленности, а сборка и наладка осуществлялись специалистами ПИЯФ и Университета Флориды. Дальнейшая работа состояла в проведении испытаний модулей в составе собранной триггерной системы EMU и оптимизации аппаратно-программного обеспечения. В 2004 году были проведены комплексные испытания триггерной системы EMU при тестировании мюонных камер на пучке протонов, а в 2006 году триггерная система была испытана на космических мюонах в собранной в наземном зале части системы EMU. Испытания прошли успешно.



Л. Уваров и В. Головцов
демонстрируют работу триггерного процессора

Электроника для мюонных камер

Сотрудниками ПИЯФ была разработана придетекторная электроника в интегральном исполнении, содержащая предусилитель, дискриминатор и линию задержки для считывания информации с 210000 анодных каналов мюонных камер EMU. Производство этих интегральных схем было размещено в американской промышленности, а испытания и отладка осуществлялись специалистами ПИЯФ. Эта работа выполнялась в сотрудничестве с Университетом Карнеги-Меллон (Питтсбург, США).

Выстройка мюонных камер

468 камер EMU размещены на площади 1000 кв. метров. По условиям эксперимента геометрическое положение каждой камеры в абсолютной системе координат детектора CMS должно быть известно с точностью до 100 микрон в азимутальном направлении. Задача усложняется еще и тем, что при включении магнита положение камер может меняться на сантиметры вследствие деформации железных дисков магнитопровода, на которых закреплены камеры. Поэтому необходим постоянный контроль за положением камер. Для решения этой задачи разработана сложная система контроля, использующая несколько сотен позиционно-чувствительных детекторов, облучаемых лазерными пучками. Специалисты ПИЯФ в сотрудничестве с Университетом Висконсин (Мэдисон, США) принимают участие в разработке и освоении этой системы. Проведенные недавно испытания на полностью собранной первой половине системы EMU показали, что созданная система контроля обеспечивает необходимую точность измерения геометрического положения всех камер EMU.

Фотодетекторы для электромагнитного калориметра CMS

Электромагнитный калориметр CMS (ECAL) создается на основе сцинтиллирующих кристаллов $PbWO_4$, обеспечивающих оптимальные условия для регистрации гамма-квантов высоких энергий. ECAL состоит из Центрального и двух Торцевых калориметров.

Регистрация излучаемого кристаллами света потребовала создания специальных радиационно-стойких фотодетекторов. В этом отношении особо серьезные требования предъявляются к фотодетекторам для Торцевого калориметра. Было принято решение использовать в этом случае вакуумные фототриоды. ПИЯФ совместно с НИИ Электрон (С.-Петербург) провел исследования серии фотоумножителей, выпускаемых этим предприятием. В результате был создан фототриод ФЭУ-188, отвечающий условиям эксперимента CMS. Было показано, что этот фототриод обеспечивает достаточное усиление, обладая при этом высокой радиационной стойкостью и низкой чувствительностью к магнитным полям. Стоимость этих фототриодов оказалась существенно ниже стоимости аналогичных детекторов фирмы Hamamatsu (Япония). Основываясь на этих результатах, коллаборация CMS заключила контракт с НИИ Электрон на производство шестнадцати тысяч ФЭУ-188. Этот заказ был успешно выполнен. Качество изготовленных фототриодов получило высокую оценку коллаборации, а НИИ Электрон был награжден специальной Золотой Медалью CMS 2007 года за вклад индустрии в создание детектора CMS.

Участие ПИЯФ в создании детекторов ATLAS, ALICE и LHCb

Выше мы рассказали об участии ПИЯФ в проекте CMS. Сравнимым по объему и характеру является также вклад ПИЯФ в создание детекторов ATLAS, ALICE и LHCb.

Мюонная система LHCb создается по разработанному в ПИЯФ проекту. Эта система основана на использовании быстродействующих четырехслойных многопроволочных пропорциональных камер с анодным и катодным съемом информации. В ПИЯФ изготовлено 600 таких камер (50% от общего числа камер в системе). Общая площадь этих камер составляет 300 кв. метров, а число анодных нитей около полутора миллионов. Кроме того, в ПИЯФ изготовлен 2000-канальный источник высокого напряжения для питания мюонных камер.

В проекте ATLAS ПИЯФ участвует в изготовлении Торцевого Детектора Переходного Излучения, являющегося частью центральной трековой системы установки ATLAS. В этом детекторе переходное излучение регистрируется четырехмиллиметровыми трубками (straw tubes), радиально расположенными в кольцах с внешним и внутренним диаметрами 103 см и 64 см, соответственно. В ПИЯФ изготовлено 48 четырехслойных колец, содержащих около 150 тысяч трубок, что составляет 50% от общего числа трубок в этом детекторе.

В проекте ALICE ПИЯФ принимает участие в создании Мюонной системы. По предложению группы ПИЯФ, регистрация мюонов в трех самых больших станциях этой системы осуществляется с помощью специальных пропорциональных камер, обеспечивающих высокое пространственное разрешение (~70 микрон). Площадь каждой мюонной станции составляет 5×5 кв. метров. В ПИЯФ изготовлено 38 мюонных камер, что составляет четверть от общего числа камер в этих станциях.

Во всех этих проектах, как и в проекте CMS, обязательства ПИЯФ по изготовлению оборудования для детекторов полностью выполнены. Завершается монтаж оборудования и ведется подготовка детекторов к физическим измерениям.

Первые итоги

Итак, взятые ПИЯФ “по максимуму” обязательства выполнены и перевыполнены. Проведена огромная по масштабам института работа, причем на высоком техническом уровне. Внесен большой вклад в разработку и создание детекторных систем. Тем самым обеспечено равноправное участие ученых ПИЯФ в экспериментах на ЛНС.

Для ПИЯФ важным результатом стало укрепление инфраструктуры института в ходе выполнения этого проекта. Создан хороший потенциал для разработки и изготовления приборов и оборудования для будущих проектов. Возрос и профессиональный уровень наших инженеров, в немалой степени благодаря тесным контактам с зарубежными коллегами и доступу к западным технологиям.

Следует отметить, что реализация этой программы была бы невозможной без поддержки Правительства РФ. Решение Правительства РФ об участии в программе ЛНС создало необходимую правовую базу для сотрудничества. В частности, исключительно важным было освобождение от таможенных пошлин при ввозе материалов и оборудования. Министерство образования и науки РФ осуществляло непосредственное финансирование проводимых в институте работ по программе ЛНС, а также выделяло средства для командирования сотрудников института в ЦЕРН. По этой линии ПИЯФ получал ежегодно бюджетное финансирование около 8 млн. рублей, а также финансирование командировок в ЦЕРН на уровне 12 человеко-лет. Примерно столько же мы получали по контрактам с ЦЕРНом и с другими участниками проекта ЛНС. С учетом того, что основные материалы и компоненты мы получали от наших западных партнеров, это финансирование позволило реализовать все наши планы по подготовке экспериментов на ЛНС.

От циклотрона до Тэватрона

Очевидно, что активное участие научного коллектива в таких гигантских экспериментах, какими являются эксперименты на ЛНС, не может возникнуть на пустом месте. Этому предшествовала вся история развития нашего коллектива. История будущего Отделения физики высоких энергий ПИЯФ началась в середине 1950-х в стенах Ленинградского Физико-технического института еще задолго до официального рождения ПИЯФ в 1971 году. В то время в Физтехе были два действующих ускорителя: построенный еще в 1946 году циклотрон на энергию протонов 6 МэВ и электронный синхротрон на энергию 100 МэВ, введенный в эксплуатацию в 1953 году. Вокруг этих установок образовался небольшой коллектив молодых физиков, горящих желанием заниматься ядерной физикой и рождающейся физикой элементарных частиц. Серьезной мотивацией при этом служило принятое в то время решение о строительстве в филиале Физтеха в Гатчине протонного синхроциклотрона на энергию 1000 МэВ. Коллектив интенсивно пополнялся выпускниками Ленинградского Политехнического института, среди которых был и автор этой статьи.

Отсутствие секретов – это тоже секрет

В ту пору у нас не было ни опыта, ни экспериментального оборудования. Все приходилось изобретать самим – детекторы частиц, усилители, источники питания, амплитудные анализаторы... Вспоминается Выставка достижений народного хозяйства СССР 1957 года, где демонстрировался наш ионизационный спектрометр альфа-частиц с амплитудным анализатором собственного изготовления с использованием электронных ламп и механических регистраторов. В сравнении с тем, что мы делаем сейчас, это достижение

кажется забавным курьезом. Общение среди физиков было очень ограниченным. Нам даже не рекомендовали интересоваться тем, что делается в соседних лабораториях. Это удивительное стремление засекретить все и вся объясняли очень просто: “Отсутствие секретов – это тоже секрет”. Понятно, что ни о каком международном сотрудничестве тогда не могло быть и речи.

А между тем в послевоенной Европе начали развиваться совсем другие идеи. В 1949 году Нобелевский лауреат Луи де Бройль выступил с предложением о создании Европейской научной лаборатории с целью укрепления сотрудничества ученых разных стран. Эта идея нашла отклик не только среди ученых, но и среди политиков. В результате уже в сентябре 1954 года двенадцать европейских стран подписали протокол о создании Европейского Центра Ядерных Исследований (ЦЕРН) вблизи Женевы. Время показало, насколько дальновидным было это решение.

К Нильсу Бору с бутылкой водки

Постепенно ситуация начала меняться и в нашей стране. В Физтехе начали появляться делегации иностранных ученых. Это еще не было сотрудничеством, но это уже было началом общения. Правда, с выездом наших ученых за границу были большие проблемы. Я помню, как в 1960 году один из ведущих теоретиков Физтеха Лев Абрамович Слив получил, наконец, разрешение посетить Копенгаген по личному приглашению Нильса Бора. Этот визит рассматривался как большое событие для всего Физтеха. Однако при вылете у профессора Слива отобрали все статьи и материалы, которые он хотел обсудить в Копенгагене, так что к Нильсу Бору он явился лишь с бутылкой водки в чемодане, что, впрочем, не помешало успешному визиту.

Надо сказать, что Институт Нильса Бора был в те времена центром общения физиков разных стран, и там много делали для вовлечения в эту орбиту и советских физиков, используя то обстоятельство, что Дания рассматривалась как страна вполне лояльная к СССР. В Институте Нильса Бора было положено начало международному сотрудничеству и будущего коллектива ПИЯФ. Началось это с визита в Институт Нильса Бора в 1967 году делегации гатчинского филиала Физтеха в составе О.И. Сумбаева, Г.А. Петрова и А.А. Воробьева. Во время визита была достигнута договоренность о проведении совместного эксперимента по ядерной спектроскопии.

Вам следует посетить ЦЕРН

В следующем 1968 году я приехал в Институт Нильса Бора уже на более длительный срок для выполнения конкретной работы. А как раз в это время в ЦЕРНе осуществлялся запуск знаменитой теперь установки ISOLDE, в создании которой датские ученые принимали самое активное участие. В их числе был и руководитель нашей совместной работы О.Б. Нильсен. Он сказал мне: “Вам следует посетить ЦЕРН. Это – будущее мировой науки”. И вот мы вместе прилетели из Копенгагена в ЦЕРН. В это время в ЦЕРНе работали синхроциклотрон на энергию протонов 600 МэВ (запуск в 1957 году) и протонный синхротрон на энергию 28 ГэВ (с 1959 года). Кроме того, шло сооружение первого в мире протон-протонного коллайдера на энергию 30 ГэВ + 30 ГэВ и велось проектирование протонного ускорителя SPS на энергию 450 ГэВ.

Следует заметить, что по ускорительному парку СССР не уступал в то время ЦЕРНу: протонный синхроциклотрон ОИЯИ в Дубне на энергию 680 МэВ (с 1953 года), протонный синхроциклотрон в Гатчине на энергию 1000 МэВ (физ. пуск в 1967 году), протонный

синхротрон ОИЯИ на энергию 10 ГэВ (с 1957 года), протонный синхротрон ИТЭФ (Москва) на энергию 10 ГэВ (с 1961 года), протонный синхротрон ИФВЭ (Протвино) на энергию 76 ГэВ (с 1967 года). Особенно важным был запуск ускорителя в Протвино, обеспечившего нашей стране лидерство по максимальной энергии ускорителей на целых пять лет, вплоть до 1972 года. Возможно, это обстоятельство придавало нам уверенность в общении с западными коллегами.

В ЦЕРНе меня (т.е. молодого человека, не имевшего официального чина) представили Генеральному директору ЦЕРНа В. Йентчке (Willibold Jentschke). В беседе с ним я предложил заключить двустороннее соглашение о сотрудничестве между ЦЕРНом и Ленинградским Физико-техническим институтом. В. Йентчке поддержал это предложение. Так что, уезжая из ЦЕРНа, я увозил с собой подписанное Генеральным директором ЦЕРНа Соглашение. Затем оно было подписано Вице-президентом АН СССР Б.П. Константиновым и действовало в течение последующих 20 лет. Одним из пунктов этого Соглашения было согласие ЦЕРНа на оплату пребывания наших сотрудников в ЦЕРНе ежегодно в объеме одного человеко-года. Это Соглашение оказалось очень полезным. Оно помогло установить регулярные контакты сотрудников нашего института с ЦЕРНом и подготовить наш первый совместный эксперимент в ЦЕРНе (эксперимент WA9), выполненный в 1976 году сразу после запуска ускорителя SPS.

Гатчинский синхроциклотрон

Сооружение синхроциклотрона в Гатчине началось в 1959 году. Это была нелегкая задача, поскольку речь шла о достижении максимальной для этого типа ускорителей энергии 1000 МэВ. Этим объясняется довольно длительный период между физ. пуском в 1967 году и началом регулярной работы ускорителя в 1971 году. Зато, благодаря введенным во время запуска ускорителя усовершенствованиям, гатчинский синхроциклотрон превосходил сооруженные ранее синхроциклотроны не только по энергии, но и по другим параметрам (коэффициенту вывода пучка из ускорителя, моноэнергетичности пучка, коэффициенту временного заполнения пучка). Кроме основного протонного тракта, была создана разветвленная сеть вторичных пучков: π -мезонный и μ -мезонный каналы, импульсный пучок нейтронов, медицинский протонный канал. Ускоритель оказался надежным в работе. Он обеспечивал до 6000 часов работы на физический эксперимент в год.

В 1963 году для организации физических исследований на синхроциклотроне в гатчинском филиале Физтеха была создана Лаборатория физики высоких энергий под руководством академика УССР А.П. Комара. Ядром Лаборатории стала группа физиков, переведенная из Физтеха. В 1971 году А.П. Комар тяжело заболел, и руководство Лабораторией было возложено на меня. В это время филиал Физтеха стал самостоятельным Ленинградским (впоследствии Петербургским) институтом ядерной физики (ПИЯФ) АН СССР, а Лаборатория стала Отделением физики высоких энергий (ОФВЭ).

Гатчинский синхроциклотрон позволил развернуть широкую программу исследований в области физики атомного ядра и физики элементарных частиц. В экспериментах активно участвовала большая группа французских физиков из ядерного центра в Сакле, а также физики из Германии и Италии. Эти исследования сохранили свою актуальность и сегодня, о чем, в частности, говорит продолжающееся участие исследователей из Японии и Италии в экспериментах на синхроциклотроне. Особо можно отметить уникальное использование протонного пучка с энергией 1000 МэВ для селективного облучения участков головного мозга с целью лечения таких сложнейших заболеваний как артериовенозные аневризмы. Курс протонной терапии прошли уже более 1200 пациентов.

Физика элементарных частиц всегда была в центре внимания нашего коллектива. В этом направлении на синхроциклотроне был выполнен ряд важных исследований. Были измерены масса π -мезона, времена жизни π - и K -мезонов, детально исследовано пион-протонное и протон-протонное взаимодействия в доступной области энергий. Однако природа физики элементарных частиц такова, что центр тяжести исследований непрерывно перемещается вслед за освоением более высоких энергий. Поэтому мы должны были научиться использовать другие ускорители в нашей стране и за рубежом. Это означало, разумеется, участие в совместных экспериментах. Но как сделать так, чтобы наше участие в этих экспериментах было весомо? Ясно, что такие эксперименты должны опираться на солидную техническую поддержку института. С этой целью в ОФВЭ были созданы отдел электроники, отдел криогенной техники и некоторые другие инженерные группы, которые впоследствии оказали неоценимую помощь во всех наших работах. Однако для выхода на международный уровень этого было еще недостаточно. Нужна была хорошая физическая идея. И такая идея вскоре появилась.

Рождение ИКАРа

В 1969 году на Зимней школе ПИЯФ обсуждалась странная ситуация, сложившаяся в опытах по рассеянию адронов на малые углы в области интерференции кулоновского и ядерного взаимодействий. В этих экспериментах измеряется реальная часть амплитуды сильного взаимодействия при рассеянии вперед. С другой стороны, эта величина вычисляется из так называемых дисперсионных соотношений, выведенных из самых общих положений теории сильного взаимодействия. Поэтому отклонение экспериментальных данных от теоретических предсказаний могло иметь очень серьезные последствия. Например, нарушение принципа причинности при взаимодействии на малых расстояниях. Но именно такая ситуация, казалось, имела место в то время. Результаты английской группы в исследовании протон-протонного рассеяния при энергии около 700 МэВ, а также американской группы, изучавшей пион-протонное рассеяние в районе энергии 30 ГэВ, резко отличались от теоретических предсказаний. Требовалась независимая проверка экспериментальных данных. Эти обсуждения послужили для нас толчком к созданию нового экспериментального метода, который мог бы решить поставленную задачу. В таких экспериментах необходимо отобрать чистые события упругого рассеяния в диапазоне переданных импульсов $|t| = 10^{-2} \div 10^{-3} (\text{ГэВ}/c)^2$ и точно измерить этот импульс. В упомянутых выше экспериментах переданный импульс измерялся по углу Θ рассеяния частицы на жидководородной мишени: $|t| = (p\Theta)^2$, где p – импульс рассеиваемой частицы. В этом методе трудности нарастают с ростом энергии, поскольку пропорционально уменьшается угол рассеяния. Кроме того, для исключения неупругих каналов необходимо использовать громоздкие магнитные спектрометры.

Идея нашего метода заключалась в использовании наполненной водородом ионизационной камеры, которая служила бы одновременно мишенью и детектором протонов отдачи. В этом случае переданный импульс может быть определен по энергии T_R протонов отдачи: $|t| = 2mT_R$, где m – масса протона. При этом регистрация угла рассеяния имеет вспомогательное значение для режекции фона, а магнитный анализ становится вообще излишним. Все это хорошо, проблема была только в том, что таких детекторов пока не существовало. Более того, попытки получить сигнал в наполненной водородом ионизационной камере кончались неудачей, и даже высказывалось предположение, что это связано со свойством молекул водорода захватывать образованные в процессе ионизации электроны. У нас, однако, были основания считать, что все дело в чистоте газа.

И действительно, камера прекрасно заработала при нужном нам давлении 10 атмосфер, как только мы научились хорошо очищать водород. После этого началась разработка конструкции детектора. Фактически была разработана многосекционная ионизационная камера, работающая в режиме, который позднее назвали время-проекционным. Была также разработана необходимая электроника и все необходимое для первого эксперимента оборудование. Все работали с огромным энтузиазмом. В ОФВЭ эксперимент называли не иначе как “эксперимент века”, а детектор получил имя ИКАР (Ионизационная Камера Адронного Рассеяния) с намеком на своего мифологического собрата, но с надеждами на более успешный полет.

Следует особо подчеркнуть, что метод протонов отдачи применим практически при любой энергии рассеиваемых частиц. Поэтому мы сразу нацеливались на проведение эксперимента в ЦЕРНе на ускорителе SPS на пучках π -мезонов и протонов при энергиях от 20 ГэВ до 400 ГэВ. Запуск ускорителя SPS планировался на 1976 год, а нам еще предстоял довольно сложный путь освоения нового метода, создания коллаборации и подготовки эксперимента в ЦЕРНе.

А.А. Воробьев, Э.М. Спириденков и
Г.А. Королев у спектрометра ИКАР



С причинностью пока все в порядке

Наш первый эксперимент был выполнен в 1972 году на пучке протонов синхротрона ПИЯФ. В этом эксперименте мы могли изучить все нюансы нового метода и, что очень важно, осуществить прецизионную калибровку шкалы энергий протонов отдачи. В результате мы убедились, что этот метод позволяет с высокой абсолютной точностью ($\sim 1\%$) измерять дифференциальные сечения рассеяния в области кулон-ядерной интерференции и притом с отличным разрешением по переданному импульсу ($\delta t/t = 1 \div 3\%$). Физическим результатом этого эксперимента было измерение реальной части амплитуды протон-протонного рассеяния вперед в диапазоне энергий от 500 МэВ до 1000 МэВ. В отличие от упомянутых результатов английской группы, наши данные оказались в превосходном согласии с теоретическим расчетом.

В июне 1973 года в Гатчине состоялось совещание с участием физиков из шведского (Уппсала) и английского (Лондон) университетов, на котором было выражено намерение подготовить проект совместного эксперимента в ЦЕРНе. В качестве промежуточного этапа было решено провести эксперимент на π -мезонном пучке Серпуховского ускорителя при энергии 40 ГэВ. Этот эксперимент был проведен в 1975 году с участием группы ИФВЭ. Эксперимент прошел успешно, и мы убедились, что можем смело отправляться в ЦЕРН. К этому времени у нас окончательно сформировалась коллаборация в составе ПИЯФ, Университет в Уппсале, а также две группы из Франции (Университеты в Лионе и Клермон-Ферране). В июне 1974 года проект эксперимента был представлен в ЦЕРН на утверждение, а в январе 1975 года он был утвержден, и ему был присвоен номер WA9.

Оборудование для эксперимента WA9 готово к отправке в ЦЕРН. Июнь 1976 г.



Основная часть оборудования была изготовлена в ПИЯФ. Помимо детектора ИКАР со всей электроникой к нему, у нас был разработан и изготовлен быстродействующий процессор, считывающий информацию с пропорциональных камер и режестирующий события с углом рассеяния меньше заданного (beam killer). Время решения было всего лишь 250 наносекунд. По тем временам это было серьезным техническим достижением. Использование процессора позволяло более чем на порядок увеличить скорость набора статистики. Наши западные коллеги поставляли пропорциональные камеры для регистрации входящих и рассеянных частиц. Наконец, к лету 1976 года, все приготовления были закончены, и хорошо нагруженный грузовик отправился в ЦЕРН. Вместе с ИКАРом и оборудованием к нему в грузовике были баллоны с очищенным водородом, а также шесть велосипедов, самовар и сорок литров спирта. К счастью, грузовик благополучно добрался до ЦЕРНа.

Запуск ускорителя SPS осуществлялся в две очереди. В 1976 году была достигнута энергия 200 ГэВ с выводом пучков в Западный Зал. На одном из этих пучков была смонтирована наша установка. Монтаж и отладка не заняли много времени, так что наш эксперимент WA9 оказался первым экспериментом, готовым к набору статистики сразу после запуска ускорителя. Измерения проводились на пучках π -мезонов и протонов в диапазоне энергий от 30 ГэВ до 140 ГэВ.

Следует заметить, что к этому времени мы ввели некоторое усовершенствование метода измерения, позволившее увеличить максимальный регистрируемый переданный импульс. Так что теперь измерения дифференциальных сечений $d\sigma/dt$ проводились в диапазоне от $|t_{\min}| = 0.002 \text{ (ГэВ}/c)^2$ до $|t_{\max}| = 0.05 \text{ (ГэВ}/c)^2$. Это позволило не только исследовать область кулон-ядерной интерференции, но и измерить наклон дифракционного конуса, связанный с размером взаимодействующих частиц. Таким образом, при каждой энергии налетающих частиц измерялись сразу три величины: реальная часть амплитуды рассеяния частиц вперед, наклон дифракционного конуса и полное сечение взаимодействия частиц (определяемое из $d\sigma/dt (t = 0)$ по оптической теореме).



Участники эксперимента WA9 отмечают успешное начало измерений. Ноябрь 1976 г.

Поведение каждой из этих величин с ростом энергии представляет большой интерес и сегодня, а в 1960-х – 1970-х годах эти проблемы были центральными. Еще в 1961 году В.Н. Грибов, основываясь на модели померонного обмена, предсказал логарифмический рост с энергией размеров взаимодействующих адронов (сужение дифракционного конуса). В этой же модели полные сечения должны были выйти на константу. Были и другие предсказания. И конечно, важнейшим вопросом была проверка дисперсионных соотношений.

Программа эксперимента WA9 была успешно завершена в 1977 году. В это время близилась к завершению вторая очередь ускорителя SPS с выводом пучков с энергией до 400 ГэВ в Северный Зал. В октябре 1977 года Научный комитет ЦЕРНа принял решение о проведении нашего эксперимента при этих энергиях. Эксперимент получил номер NA8. В конце 1978 года установка была собрана в Северном Зале, и эксперимент вышел на набор статистики буквально через неделю после начала работы ускорителя, а в мае 1980 года эксперимент NA8 был успешно завершён. Основным результатом этих экспериментов было подробное исследование малоуглового πp - и pp -рассеяния в диапазоне энергий от 30 ГэВ до 350 ГэВ. Анализ полученных данных позволил авторам сделать следующие выводы.

- ▶ Дисперсионные соотношения выполняются с высокой точностью вплоть до энергий масштаба 100 ГэВ. Очень важно, что это доказано в случае pp -рассеяния, где расчеты с использованием дисперсионных соотношений особенно надежны. Согласно некоторым авторам, этот результат соответствует сохранению причинности во взаимодействии частиц по крайней мере до расстояний 10^{-16} см.
- ▶ Впервые установлен универсальный характер асимптотического увеличения размеров взаимодействующих адронов (протонов, π -мезонов, K -мезонов) с энергией (сужение дифракционного конуса), предсказанного в модели померонного обмена, и определен наклон траектории померона.
- ▶ Выполнен совместный анализ полученных данных о реальной части амплитуды πp -рассеяния и имеющихся данных о полных сечениях πp - и $\pi^+ p$ -взаимодействий с использованием дисперсионных соотношений (в предположении, что эти соотношения остаются справедливыми и при энергиях выше 100 ГэВ). Такой анализ позволяет предсказать поведение полных сечений за пределами ускорительных энергий. Показано, что наметившийся рост полных сечений pp -взаимодействия будет продолжаться как минимум до энергии налетающих частиц 2000 ГэВ практически с максимальной скоростью, допустимой теоремой Фруассара. Такой же вывод был сделан в 1977 году группой У. Амальди из аналогичного анализа данных о pp -рассеянии. Таким образом, можно утверждать, что наблюдаемый характер роста полных сечений с энергией является универсальным свойством сильного взаимодействия.

Эти результаты получили высокую оценку в ЦЕРНе. Эксперименты WA9 и NA8 были включены в число лучших работ, выполненных на ускорителе SPS. В нашей стране эта работа была отмечена Государственной премией 1983 года. Для нашего коллектива осуществление экспериментов WA9 и NA8 имело важное значение не только в научном, но и в психологическом плане. Мы убедились, что можем успешно участвовать в международных проектах и даже быть лидерами в таких проектах. И действительно, после этих экспериментов масштаб и география международного сотрудничества ПИЯФ непрерывно расширились.

Установка ИКАР на пучке “экзотических” ядер в GSI, Дармштадт



Что касается ИКАРа, то его жизнь на этих экспериментах отнюдь не закончилась. В настоящее время он находится в Исследовательском центре GSI в Дармштадте (Германия). С его помощью успешно изучается малоугловое рассеяние на водороде короткоживущих нейтроноизбыточных (“экзотических”) ядер типа ^8He , ^{11}Li и ряда других с целью исследования пространственного распределения материи в этих ядрах. Кроме того, родились несколько модификаций ИКАРа, позволивших нам провести уникальные исследования мюонного катализа ядерного dd - и dt -синтеза, а также ядерного мюонного захвата в водороде. Эти эксперименты были выполнены на Швейцарской мезонной фабрике в Институте Пауля Шеррера (PSI).

Фермилаб открывает эру сверхпроводящих ускорителей высоких энергий

В 1979 году в Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (ФНАЛ) началось сооружение ускорителя протонов на энергию 1000 ГэВ (Тэватрон). С пуском этого ускорителя США становились лидером по энергии ускоряемых частиц, тем более, что в дальнейшем Тэватрон должен был работать в режиме протон-антипротонного коллайдера (1 ТэВ + 1 ТэВ). Замечательно, что Тэватрон был первым крупным ускорителем, создаваемым на основе сверхпроводящих элементов. Его успешный запуск открывал путь к созданию следующего поколения ускорителей высоких энергий.

Загадки и разгадки в физике гиперонов

В июле 1978 года ПИЯФ посетил сотрудник ФНАЛ Джо Лах, с которым мы были уже знакомы в связи с экспериментом WA9. Во время этого визита он предложил нам подумать об участии в экспериментах на Тэватроне. Предложение было заманчивым: работа на самом большом ускорителе в мире, знакомство с Америкой. Правда, в тот момент мы не были готовы к каким-либо активным действиям, так как были плотно заняты подготовкой и проведением эксперимента NA8 в ЦЕРНе. Но в июле 1980 года NA8 был завершен, и по приглашению директора ФНАЛ Леона Ледермана я впервые приехал во ФНАЛ. В результате проведенных там обсуждений была сформулирована область наших интересов: физика гиперонов. В значительной мере этот выбор был сделан в связи с созданием на Тэватроне

гиперонного канала, который должен был стать уникальным источником поляризованных гиперонов (Σ , Ξ , Ω) с энергией до 600 ГэВ. Существенно также, что ответственным за создание этого канала был Джо Лах.

Надо сказать, что в то время физика гиперонов была ещё мало изученной областью, и там было много интересных вопросов. Но одна проблема обсуждалась особенно широко. Её называли загадкой (enigma) в бета-распаде сигма-гиперонов ($\Sigma^- \rightarrow nev$). Дело в том, что измеренная в четырех (!) экспериментах асимметрия в бета-распаде поляризованных Σ^- -гиперонов не совпадала по знаку с теоретическим предсказанием, сделанным на основе SU(3)-симметрии (модель Кабиббо), тогда как другие предсказания этой модели хорошо подтверждались экспериментально. Анализируя эту проблему, мы предположили, что в предыдущих экспериментах могла быть допущена ошибка, связанная с плохим выделением реакции $\Sigma^- \rightarrow nev$ на фоне в 1000 раз более интенсивной реакции $\Sigma^- \rightarrow n\pi^-$. К тому же статистика событий в этих экспериментах была очень мала (350 событий в сумме по четырем экспериментам). Решение этой задачи требовало разработки метода регистрации, в котором электроны регистрировались бы с близкой к 100 процентам эффективностью, а вероятность регистрации π -мезонов была бы подавлена как минимум в 10^4 раз.

Мы рассмотрели различные методы детектирования электронов и остановились на использовании переходного излучения, возникающего при прохождении заряженной частицы высокой энергии через неоднородную среду. Теория этого явления была хорошо разработана, хотя опыта практического применения в требуемых для нас масштабах еще не было. Проблема здесь заключалась в том, что при прохождении, например, пленочного радиатора из 100 слоев электрон излучает в среднем лишь один фотон. Поэтому возникали сомнения, может ли этот фотон быть зарегистрирован в реальных условиях эксперимента. Тем не менее, мы решили, что это есть оптимальное решение поставленной задачи. Обычно разделение π -мезонов и электронов делалось с помощью электромагнитного калориметра. Однако коэффициент разделения в этом случае не может быть больше 10^3 . Наше предложение сводилось к постановке перед электромагнитным калориметром специально разработанного детектора переходного излучения. По оценкам, такой детектор мог дать дополнительный коэффициент π/e режекции не менее 100.

В феврале 1982 года было подготовлено официальное предложение о постановке эксперимента, а в июне 1982 года эксперимент был принят и получил номер E715. Помимо ФНАЛ и ПИЯФ, в коллаборацию E715 вошли также группы из трех американских университетов. В сентябре 1982 года было заключено соглашение ФНАЛ-ПИЯФ сроком на пять лет, согласно которому ФНАЛ оплачивал пребывание сотрудников ПИЯФ в объеме трёх человеко-лет ежегодно. С нашей стороны эксперимент получил официальную поддержку Президиума АН СССР и был включен в Протокол совместной СССР-США Координационной комиссии по исследованию фундаментальных свойств материи. Дата начала эксперимента была намечена на октябрь 1983 года, сразу после пуска Тэватрона.

Детектор переходного излучения был разработан и изготовлен в ПИЯФ. Он состоял из двенадцати независимых секций размером $0,6 \times 1,0$ м². Каждая секция включала многослойный (200 слоев) пленочный радиатор и наполненную ксеноном дрейфовую камеру для регистрации фотонов. В ПИЯФ было изготовлено также и другое оборудование для эксперимента. Летом 1983 года все оборудование, включая баллоны с ксеноном высокой чистоты, было доставлено во ФНАЛ, и к намеченному сроку мы были готовы к приему пучка. Но будет ли пучок? А если и будет, то какого качества? Ведь впервые в мире запускался сверхпроводящий ускоритель более чем с тысячей сверхпроводящих магнитов и ускоряющих элементов. Вспоминается заседание Ученого совета ПИЯФ в декабре 1982 года с обсуждением нашего проекта. На этом заседании один очень уважаемый ученый сказал, что

мы зря стараемся, так как сверхпроводящий ускоритель – это техническая авантюра. Он никогда не сможет стабильно работать.

А Тэватрон заработал и притом точно в назначенный срок. В октябре 1983 года мы получили первый пучок, а через месяц качество пучка стало достаточным для проведения основных измерений. На эти измерения нам было выделено пять месяцев пучкового времени. К весне 1984 года набор статистики был полностью завершен. Все получилось как нельзя лучше. Самое главное – это то, что детектор переходного излучения вместе с электромагнитным калориметром обеспечили π/e режекцию на уровне $5 \cdot 10^4$ при 94 % вероятности регистрации электронов. Иначе говоря, мы получили практически чистые события бета-распада Σ^- -гиперонов, причем таких событий было зарегистрировано 50000 с полным восстановлением кинематики процесса. Что касается электронной асимметрии в этом распаде, то она оказалась равной α_e (эксп) = $-0,519 \pm 0,104$ в точном соответствии с теоретическим предсказанием α_e (теор) = $-0,51 \pm 0,04$.

В этом эксперименте был также измерен магнитный момент Σ^- -гиперонов. До этого его не удавалось измерить с хорошей точностью, так как используемая для определения направления спина гиперона асимметрия распада в основном канале распада $\Sigma^- \rightarrow n\pi^-$ очень мала ($\alpha_\pi = 0,07$). Мы же использовали реакцию $\Sigma^- \rightarrow nev$ с коэффициентом асимметрии $\alpha_e = 0,519$. Это дало возможность измерить магнитный момент с точностью 1%.

Результаты эксперимента были встречены во ФНАЛ с большим энтузиазмом. Да и не только во ФНАЛ. Мы получили телеграмму от Н. Кабиббо, в которой было только одно слово: “Браво”. Заметка с заголовком “Загадка бета-распада решена” появилась в CERN Courier (Май 1985 г.). А вот как Леон Ледерман оценил эту работу в письме на имя Вице-Президента АН СССР Е.П. Велихова.

Дорогой академик Велихов,

я хотел бы сообщить Вам о некоторых очень положительных аспектах в отношениях США-СССР. Речь идет о научном сотрудничестве между Ленинградским институтом ядерной физики и нашей лабораторией в исследовании бета-распада сигма-минус гиперона (эксперимент E715). Сейчас, когда набор статистики успешно завершен, я хотел бы поблагодарить Вас и Академию наук за поддержку этих усилий. Этот эксперимент явился выдающимся примером в сотрудничестве между нашими странами в области физики элементарных частиц. Детектор переходного излучения, сконструированный в Ленинградском институте ядерной физики, играл решающую роль в эксперименте, и работал он превосходно. Можно поздравить ленинградских физиков, руководимых профессором А. Воробьевым, спроектировавших и изготовивших такой детектор, а также сыгравших определяющую роль в ходе эксперимента. Пожалуйста, передайте мою признательность всем, кто сделал этот эксперимент возможным.

*С уважением, Леон Ледерман,
директор ФНАЛ,
23 февраля 1984 года.*

Надо сказать, что находясь в США мы остро ощущали, что наши дружеские отношения с американскими физиками являются пусть небольшим, но важным вкладом в улучшение отношений между нашими странами, которые в тот период были хуже некуда. Афганистан, бойкот Московской олимпиады 1980 года. Авиасообщение между нашими странами ограничивалось двумя полетами в неделю полупустых самолетов Аэрофлота. Спрашивается, как в такой ситуации мог состояться наш эксперимент? Ответ заключается в твердой позиции лидеров нашей и американской науки, желающих во что бы то ни стало сохранить научные связи между нашими странами. Один пример для иллюстрации. В сентябре 1983 года эксперимент был на грани срыва из-за резкого ухудшения политической ситуации. Первого сентября был сбит корейский самолет. И без того плохие отношения между нашими странами

настолько ухудшились, что были отменены все полеты в США. В это время я как раз был в Москве, ожидая вылета в США. Часть нашего оборудования еще тоже не была отправлена. Казалось, это конец. Кроме Президента АН СССР А.П. Александрова никто не смог бы оказать нам помощь. Я обратился к нему, и он лично занимался этим вопросом почти целый день. Думаю, что это было очень трудное решение. В конце концов ему удалось получить разрешение на вылет через соц. страну.

Успешное завершение эксперимента E715 заложило прочную основу дальнейшего сотрудничества ПИЯФ с ФНАЛ, продолжающегося вот уже более двадцати лет. За это время были выполнены еще два эксперимента на гиперонном канале (E761 и E781), а также эксперимент E853 по выводу протонного пучка из Тэватрона методом каналирования в изогнутом кристалле. Начиная с 1997 года ПИЯФ принимает участие в коллайдерном эксперименте D0. Получено много важных результатов. Например, в эксперименте E761 было показано, что радиационный распад $\Sigma^+ \rightarrow p\gamma$ идет с сильным нарушением SU(3)-симметрии. Эта очередная загадка в физике гиперонов была разгадана теоретиками ПИЯФ, нашедшими механизм нарушения этой симметрии.

А вот другой результат до сих пор не имеет теоретического объяснения. Речь идет о поляризации рождающихся гиперонов. Дело в том, что вопреки наивным теоретическим ожиданиям оказалось, что поляризованными рождаются не только гипероны, но и антигипероны. Этот факт разрушил имевшееся представление о механизме возникновения поляризации гиперонов, а другого механизма пока не предложено.

Выполненные измерения магнитных моментов семейства гиперонов значительно превосходят по точности результаты теоретических расчетов и могут служить стимулом для развития теории.

Можно отметить также результаты опытов с каналированием частиц в изогнутых кристаллах. Во-первых, было показано, что этим методом можно обеспечить вывод протонов из Тэватрона. Во-вторых, было продемонстрировано вращение спина Σ -гиперона в изогнутом кристалле подобно тому, как это происходит в магнитном поле. Только величина эффективного магнитного поля в кристалле огромна (~50 Тесла). Это открывает возможность измерения магнитных моментов короткоживущих частиц с малой длиной пролета.

ОФВЭ сегодня и планы на будущее

Отделение физики высоких энергий ПИЯФ сегодня – это крупный научный коллектив, включающий 91 кандидата наук и 18 докторов наук. Помимо проведения экспериментов на синхротронном ПИЯФ и подготовки экспериментов на ЛНС, в настоящее время сотрудники ОФВЭ участвуют в ряде совместных экспериментов в ведущих ускорительных центрах Европы и США. Среди них эксперимент PHENIX в Брукхэйвенской Национальной лаборатории (БНЛ, США), эксперимент D0 на Тэватроне ФНАЛ (США), эксперимент HERMES в Исследовательском центре DESY (Гамбург, Германия), эксперимент ANKE в Исследовательском центре в Юлихе (Германия), эксперименты на электронных ускорителях в немецких университетах в Майнце, в Бонне и в Дармштадте, эксперименты на установке ISOLDE в ЦЕРНе, эксперименты на пучках короткоживущих ядер в Исследовательском центре GSI (Дармштадт, Германия), эксперимент ЭПЕКУР на ускорителе ИТЭФ (Москва), эксперимент МЮОНИИ на ускорителе ОИЯИ (Дубна).

Во всех этих экспериментах ПИЯФ внес (или вносит) существенный вклад в создание установок. Например, для эксперимента PHENIX в ПИЯФ была разработана и изготовлена одна из основных подсистем установки PHENIX – центральный трекер, созданный на основе дрейфовых камер специальной конструкции, способных регистрировать события с очень

большой множественностью. Для установки D0 инженерами ПИЯФ была разработана оригинальная система считывания информации с 50000 каналов мюонных камер. Аналогичная ситуация и в других экспериментах.

Очень важным для нас является сотрудничество с Институтом Пауля Шеррера (PSI, Швейцария), обладающим лучшим в мире сильноточным ускорителем протонов на энергию 600 МэВ с уникальными по интенсивности и качеству мюонными пучками (“мезонная фабрика”). Это сотрудничество началось в 1987 году. За это время нами была выполнена серия экспериментов, в которых было подробно исследовано одно из самых интересных явлений в ядерной физике – мюонный катализ ядерного синтеза. А в последнее время удалось решить важную проблему в области физики слабого взаимодействия нуклонов: была с высокой точностью измерена скорость мюонного захвата в газообразном водороде и впервые определена константа псевдоскалярного взаимодействия. Все эксперименты в PSI выполнены с помощью новых экспериментальных методов, разработанных в ПИЯФ.

ПИЯФ является признанным авторитетом в вопросах каналирования в кристаллах частиц высоких энергий. С помощью изготовленных в ПИЯФ кристаллов до сих пор осуществляется вывод протонов из ускорителя ИФВЭ (Серпухов). А в самое последнее время было обнаружено новое явление в кристаллооптике частиц, названное объемным отражением. Это открытие вызвало большой интерес в ЦЕРНе. Сейчас интенсивно исследуется возможность использовать это явление для коллимации циркулирующего внутри ЛНС пучка, а также для исследования на ЛНС малоуглового протон-протонного рассеяния в области интерференции кулоновского и ядерного взаимодействий.

В наших ближайших планах приоритет имеют исследования на синхроциклотроне ПИЯФ, исследования на ЛНС, а также эксперимент PHENIX в БНЛ и исследования на Швейцарской мезонной фабрике. В более отдаленной перспективе мы планируем также участие в проектах на модернизированном ускорительном комплексе GSI (Дармштадт), где будут созданы уникальные условия для исследований в области ядерной физики.

Каким будет наше участие в экспериментах на ЛНС?

Уже меньше года остается до включения ускорителя ЛНС. Весь научный мир с нетерпением ожидает открытий, которые могли бы вывести процесс познания нашего Мира на новый уровень. Результаты исследований на ЛНС могут быть определяющими для дальнейшего развития физики элементарных частиц. От этих результатов зависит также, будут ли строиться ускорители следующего поколения и какие именно.

А для нас вопрос стоит прежде всего в практической плоскости: каким конкретно будет наше участие в этих экспериментах? Правда, мы уже имеем некоторый опыт участия в коллайдерных экспериментах. Это эксперимент L3 на электрон-позитронном коллайдере в ЦЕРНе, а также эксперименты D0 на протон-антипротонном коллайдере ФНАЛ и эксперимент PHENIX на коллайдере релятивистских ядер в Брукхэйвене. Но все-таки эти эксперименты по своему масштабу и по числу участников значительно уступают экспериментам на ЛНС.

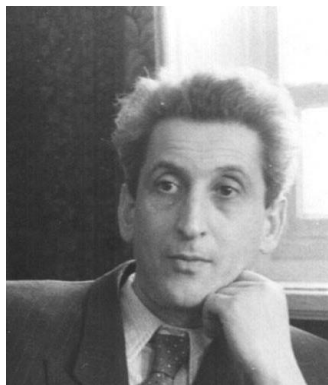
Итак, какую же роль мы сможем играть в экспериментах на ЛНС? Частично на этот вопрос есть простой ответ. ПИЯФ внес большой вклад в создание детекторных установок, включая монтаж и подготовку оборудования к работе. Понятно, что созданные сложные системы и устройства потребуют внимания и участия наших специалистов во время эксплуатации детекторов. Поэтому эксплуатация детекторов и поддержание

работоспособности созданной аппаратуры будут обязанностью нашего института. Это нас не пугает, поскольку в институте есть опытные специалисты, которые справятся с этой задачей. В этом отношении ПИЯФ сильнее многих западных групп, участвующих в экспериментах на ЛНС. Здесь наше участие является совершенно необходимым, и оно высоко оценивается в коллаборациях.

Сложнее обстоит дело с участием в анализе экспериментальных данных. С этой целью в ПИЯФ, как и в других российских центрах, создан вычислительный кластер, включенный в интернациональную систему GRID. Так что, в принципе, можно анализировать данные, находясь в ПИЯФ. Это совершенно новый подход, не применявшийся в предыдущих экспериментах, и пока неясно, насколько эффективным он будет в нашей реальной действительности. Для этой работы необходимы специалисты высокого класса, работающие вместе со способными молодыми физиками. Эта схема вполне реализуема, но она требует выполнения одного важного условия: зарплата этих специалистов и молодых ученых должна быть на уровне зарплаты тех же специалистов, командированных в ЦЕРН. Пока что это далеко не так, хотя некоторые шаги в этом направлении делаются. Более того, как показывает опыт, для эффективного участия в анализе экспериментальных данных необходим постоянный живой контакт с другими участниками этого процесса, участие в дискуссиях и т.д. Это можно сделать, только находясь в ЦЕРНе. Поэтому наши планы заключаются в создании небольших (например, по четыре человека) групп анализа данных в каждом из ЛНС экспериментов так, чтобы все участники группы работали попеременно в ЦЕРНе и в ПИЯФ. Понятно, что на фоне огромного числа специалистов из разных стран, которые будут заняты в анализе данных, мы можем рассчитывать здесь лишь на достаточно скромный вклад в общее дело. Хотя многое будет зависеть от персоналий. Мы также рассчитываем на идейную поддержку наших теоретиков. Так или иначе, мы придаем большое значение участию в анализе экспериментальных данных, которые будут получены на ЛНС. Это позволит коллективу института быть непосредственным участником важных событий в мире науки, ожидаемых в следующем десятилетии.

СИНХРОЦИКЛОТРОН 1000 МЭВ ПИЯФ НИЦ КИ – УНИКАЛЬНАЯ УСТАНОВКА РОССИИ

Г.Ф. МИХЕЕВ



*Д.Г. Алхазов,
д.ф.-м.н., научный рук.
сооружения СЦ-1000*



*Н.К. Абросимов,
д.т.н., зав. Ускорительным
отделом ПИЯФ в 1957 –
2011 гг.*



*Е.М. Иванов
к.т.н., зав. Ускорительным
отделом, дважды лауреат
премии им. И.В. Курчатова*

Вместо предисловия

Из Протокола: «Научно-Технический Совет Ускорительного отдела ПИЯФ НИЦ КИ поздравляет коллектив ОФВЭ и его руководителей чл. корр. АН РФ А.А. Воробьева и д.ф.-м.н. О.Л. Федина с 50-летним Юбилеем, желает новых успехов и дальнейшего продолжения нашего совместного сотрудничества».

А вот так сотрудники УО представляют себе, как физики ОФВЭ пытаются найти «темную материю».



Председатель НТС УО Е.М. Иванов.
Секретарь НТС УО Г.Ф. Михеев.

I. История Вопросы

В 1996 году Решением Мин. Пром. Науки синхроциклотрону ПИЯФ было присвоено официальное название: «Уникальная установка Российской Федерации национального значения». Насколько обосновано такое громкое название? Так ли это на самом деле?

В середине 50-х годов было принято правительственное решение о сооружении в ФТИ АН СССР «крупнейшего в мире» ускорителя типа синхроциклотрон на энергию протонов 1000 МэВ (СЦ-1000). Как впоследствии выяснилось, принятое решение оказалось «технически недостаточно обоснованным», и выполнение его было «на грани срыва». Сроки запуска СЦ не выполнялись, и в 1965 году комиссия АН СССР под руководством чл. корр. АН СССР В.П. Дзелепова предлагала остановить выполнение проекта из-за его «неосуществимости». «Эта груда железа никогда не сможет работать» – заявил он, ознакомившись с состоянием дел по сооружению СЦ, а член комиссии акад. Г.Н. Флеров добавил: «Давайте, пока не поздно, переделаем его в циклотрон тяжелых ионов».

В чем была причина срыва запуска СЦ? Не вдаваясь в подробности, проблема лежала в принципиальных радиотехнических проблемах обеспечения на дуанте ускоряющего напряжения ~ 10 кВ при вариации его частоты от 30 до 13 МГц, которая требовалась для ускорения протонов до энергии 1000 МэВ. И хотя кому-то принадлежит крылатое выражение, что «радиотехника это всего лишь комбинация из трех элементов R, L и C, а это проще, чем игра в покер», по первоначальному проекту было невозможно запустить ускоряющую систему СЦ на 1000 МэВ, состоящую из дуанта, вариатора частоты, фидера связи и генератора ВЧ.

Дирекция и руководство ЛИЯФ были поставлены в исключительно трудное положение. Непрерывные совещания, заседания парткома: «что делать?» Комиссия АН СССР предлагает приостановить выполнение проекта. НИИФА – конструктор ускорителя – уклоняется от работ по запуску. Партком ЛИЯФ – половина за поддержку вывода комиссии, другая «воздерживается». Директор ФизТеха академик В.М. Тучкевич не считает себя арбитром в вопросах ускорительной техники. И что же произошло? Как утверждает «история» (в моем изложении) и протокол профсоюзного собрания УО: «Ускорительный отдел в лице его руководителя Н.К. Абросимова берет на себя ответственность и обязательство довести наладку СЦ своими силами». Кто же эти «авантюристы»? Это, несомненно, А.В. Куликов и полностью поддержавший его Н.Н. Чернов. Они убедили «примкнувшего к ним» Н.К. Абросимова, который как зав. Ускорительного отдела сильно рисковал административно-партийными выводами в случае неудачи. Я тогда был оппортунистом и очень сомневался в успехе, правда, тогда в принятии этого решения меня никто и не спрашивал. А им поверили!! Это что?! Результат оттепели или безответственность руководства, до сих пор не знаю. «Безумству храбрых поем мы песню».

В результате коллектив УО, проработав круглосуточно еще два года, в ночь со 2-го на 3 ноября 1967 года получил пучок ускоренных протонов с энергией 750 МэВ. Проблема была решена путем разработки и создания новой схемы симметричной связи дуанта и высокочастотного генератора и получения ускоряющего напряжения 10 кВ. (Авторское свидетельство Н.К. Абросимова, С.П. Дмитриева, А.В. Куликова, Г.Ф. Михеева, Н.Н. Чернова).

Н.К. Абросимов разбудил телефонным звонком Д.Г. Алхазова, Алхазов разбудил директора ФТИ академика В.М. Тучкевича, Тучкевич, дождавшись утра, позвонил президенту АН СССР М.В. Келдышу.

Несмотря на то, что проектная энергия 1000 МэВ не была достигнута, наш успех широко отмечался в научном и общественном мире. О запуске синхроциклотрона сообщили практически все газеты, в том числе и центральный печатный орган ЦК КПСС газета «Правда». На первой странице, под рубрикой «К Юбилею Великого Октября», была помещена статья о нашем синхроциклотроне с фотографиями руководителей запуска: Д.Г. Алхазова и Н.К. Абросимова. Нелепые газетные заголовки сочинялись в редакциях и звучали так: «Снаряды атомной артиллерии – подарок к Великому Октябрю», «Штурмующие атом», «Крупнейший синхроциклотрон – Октябрьский подарок ленинградским физикам», «Есть пучок», «Ленинградский синхроциклотрон» и др. Нас поздравили ведущие коллективы физиков всей страны.

Вот как выглядела правительственная телеграмма Президента АН СССР в те далекие, некомпьютерные времена.

МИНИСТЕРСТВО СВЯЗИ СССР		ПРАВИТЕЛЬСТВЕННАЯ ТЕЛЕГРАММА	
ДЛЯ ЗАМЕТОК АДРЕСАТА:			
ПРИЕМ: 5 01 01 го ч. м.	ПЕРЕДАЧА: го ч. м.	Адрес: =ПРАВИТЕЛЬСТВЕННАЯ	
Бланк № 385	№ связи	ЛЕНИНГРАД К-21 ФТИ ПРОФЕССОРУ	
Принял:	Перезал:	В М ТУЧКЕВИЧУ Г А ГУКАСОВУ Г Е	
Из: МОСКВЫ 71/001 51 5 1945:		КОГАРОВУ=	
сл.	го	ч.	м.
=ПРЕЗИДИУМ АКАДЕМИИ НАУК СССР ПОЗДРАВЛЯЕТ КОЛЛЕКТИВ			
ЛЕНИНГРАДСКОГО ФИЗИКО ТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА С БОЛЬШИМ			
НАУЧНЫМ ДОСТИЖЕНИЕМ ФИЗИЧЕСКИМ ПУСКОМ СИНХРОЦИКЛОТРОНА			
ЖЕЛАЕМ НОВЫХ УСПЕХОВ РАБОТЕ=ПРЕЗИДЕНТ АКАДЕМИИ НАУК СССР			
АКАДЕМИК КЕЛДЫШ ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ПРЕЗИДИУМА			
АКАДЕМИИ НАУК СССР АКАДЕМИК ПЕЙВЕ 4291-			

Как реально происходил запуск СЦ, я вместе с художником И.Н. Полоцким изобразил на этой картине.



В 1970 году после получения проектной энергии 1000 МэВ, монтажа и наладки выводной системы пучка СЦ был сдан в постоянную эксплуатацию для проведения программы физических экспериментов на его пучках.

Акт приемки в эксплуатацию синхроциклотрона ФТИ им. А.Ф. Иоффе АН СССР от 27 февраля 1970 года подписала государственная комиссия, в состав которой входили председатель член-корр. АН СССР В.П. Желепов, член-корр. АН СССР дир. ФТИ В.М. Тучкевич, д.ф.-м.н. зам. дир. ФТИ АН СССР Д.М. Каминкер, главный инженер ФТИ АН СССР Н.К. Абросимов, д.т.н. дир. НИИЭФА Е.Г. Комар и др. Акт утвержден вице-президентом АН СССР акад. М.Д. Миллиончиковым.

В 1973 году Н.Н. Чернов доложил на Международной конференции в Сан-Франциско о запуске и работе ускорителя в г. Гатчина.

II. «СЦ ПИЯФ – уникальная установка России»

В 1996 г. Решением Мин. Пром. Науки РФ синхроциклотрон получил статус: «Уникальная установка Российской Федерации национальной значимости». «Обоснование» было представлено в АН СССР А.А. Воробьевым и Н.К. Абросимовым. Для подтверждения этого статуса ежегодно я составлял «Отчет» в АН, привлекая работы сотрудников ОФВЭ на пучках СЦ.

К выражению «Уникальный ускоритель России» часто добавляется «Крупнейший в мире». В 1965 году, когда Правительством СССР было подписано Решение о строительстве СЦ на энергию 1000 МэВ, в мире уже работало три синхроциклотрона: Беркли – 740 МэВ, Дубна – 680 МэВ, ЦЕРН, Женева – 600 МэВ. Естественно, ускоритель в СССР должен был стать самым большим и выбор энергии в 1000 МэВ был продиктован на самом

высоком академическом и правительственном уровне и не подлежал обсуждению.

Позже в своей докторской диссертации Н.К. Абросимов написал: «повидимому, предельной энергией для ускорителей типа синхроциклотрон является энергия 1000 МэВ». Этот вывод был обоснован принципиальными трудностями создания дуантной ускоряющей системы на 1000 МэВ, для которой требуется перестройка вариатором частоты в 2,3 раза от 30 до 13 МГц и напряжение ~ 10 кВ. Достигнутая интенсивность 3 мкА внутреннего пучка также является предельной из-за уровня наведенной радиоактивности и возможности ремонтного обслуживания ускорителя техническим персоналом без использования робототехники.

Перечислим основные особенности СЦ-1000 для обоснования термина «уникальный».

- Самый большой в мире электромагнит со сплошным полюсом. Размеры $\sim 17 \times 10 \times 8$ м³, масса 7800 тонн, ток 6000 А, мощность питания ~ 1 МВт, магнитное поле 1,9 Тл. (Спроектирован в НИИЭФА и изготовлен на заводе «Электросила» в Ленинграде).
- Распределение азимутально-симметричного магнитного поля в зазоре электромагнита выполнено с рекордной точностью 10^{-4} . Предполагалось, что будем ускорять и поляризованные протоны (Г.А. Рябов, И.А. Петров, В.А. Елисеев, И.И. Ткач).
- ВЧ-резонансная ускоряющая система с рекордным перекрытием по частоте. (Авторское свидетельство Н.К. Абросимова, С.П. Дмитриева, А.В. Куликова, Г.Ф. Михеева, Н.Н. Чернова).
- Разработана и изготовлена в ПИЯФ новая конструкция вариаторов частоты, позволившая довести надежность его работы до 6000 часов в год.
- Высокоэффективная система вывода пучка с коэффициентом вывода $\sim 30\%$. У существовавших синхроциклотронов было $\sim 5\%$ (Г.А. Рябов, В.А. Елисеев).
- Оригинальная система увеличения длительности выведенного пучка – система растяжки. (Два авторских свидетельства Н.К. Абросимова, А.В. Куликова, Г.Ф. Михеева, Н.Н. Чернова).



*Г.А. Рябов,
в.н.с, к.т.н., зав. лаб. Физики
и Техники Ускорителей,
дважды лауреат Премии
им. И.В. Курчатова*



*И.А. Петров,
зам. гл. инж. Ускоритель-
ного комплекса*



В.А. Елисеев, к.т.н., с.н.с.

- Импульсный дефлектор для однооборотного сброса протонов на нейтронообразующую мишень системы ГНЕЙС. (Авт. Свидетельство: А.В. Куликов, Г.Ф. Михеев, Н.Н. Чернов).
- Оригинальная трехэлектродная система импульсной электростатической фокусирующей системы в центре СЦ (Авт. свид.: Н.К. Абросимов, А.В. Куликов, Г.Ф. Михеев, Г.А. Рябов).
- Уникальный комплекс протонно-лучевой терапии (6 авт. свидетельств и патентов, к.б.н. Д.Л. Карлин провел ~1600 сеансов протонно-лучевой терапии больных).
- Разработка и создание многочисленных трактов для протонного пучка и вторичных частиц: три тракта p -пучков, π -мезонный канал на внешней мишени, тракт поляризованных протонов, нейтронный тракт, ИРИС, медицинский тракт и др.
- Единственные в РФ и Европе уникальные стенды для испытаний интегральной радиотехники авиа-космического назначения на протонном и нейтронном пучках (Четыре патента: Н.К. Абросимов, С.А. Артамонов, Е.М. Иванов, Г.Ф. Михеев, Г.А. Рябов).
- Всего в процессе модернизации СЦ и новых решений было получено 25 авторских свидетельств и патентов, ~200 научных публикаций. Наши статьи регулярно помещались в сборнике PNPI, Main scientific activates, и даже на его первых страницах.
- Мало кто знает, что разработка и создание СЦ на энергию 1000 МэВ в 70-х годах были номинированы на Ленинскую Премию СССР.
- И, наконец, последним доказательством уникальности СЦ-1000 является письмо-обращение чл. корр. А.А. Воробьева к коллективу Ускорительного отдела в связи с 30-летием запуска СЦ 6 ноября 1997 года. Привожу его полностью.



*С.П. Дмитриев,
к.т.н., гл. инж. УО*



*Г.Ф. Михеев,
с.н.с., член УС ПИЯФ,
дважды лауреат Премии им.
И.В. Курчатова*

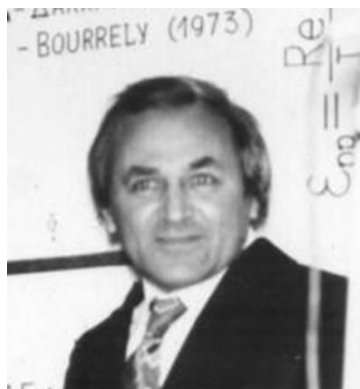


*Д.Л. Карлин,
к.б.н., вед.н.с., пом. зам. дир.
по персп. разраб.*



*С.А. Артамонов,
к.ф.-м.н., зав. лаб. Физики и
Техн. Ускорителей, лауреат
Премии им. И.В. Курчатова*

Синхроциклотрон – уникальная установка России



*А.А. Воробьев,
проф., чл.-корр.
Российской АН*

Гатчинский синхроциклотрон знают во всем физическом мире благодаря многим выдающимся исследованиям, выполненным на пучках этого ускорителя. Это рассеяние на малые углы (ИКАР), дифракционное и квазиупругое рассеяние на ядрах, гатчинский метод исследования экзотических атомов, гатчинский метод исследования времени жизни мезонов, работы по мюонному катализу, получение и исследование ядер, удаленных от полосы стабильности (ИРИС), исследование пион-нуклонных и нуклон-

нуклонных взаимодействий, исследование магнитных свойств вещества (μ SR-метод) и ряд других исследований. Эти работы стали возможными благодаря некоторым уникальным особенностям нашего ускорителя: удачный диапазон энергий (1 ГэВ), монохроматичность и хорошая временная структура пучка, высокая надежность ускорителя. Мировую известность получили работы по протонной терапии: многие сотни спасенных жизней – лучшая иллюстрация успеха этого направления. В ходе подготовки и проведения экспериментов родились многие методы и, главное, родился и возмужал коллектив физиков и инженеров, которым теперь по плечу участие практически в любых международных программах. Почти все наши кандидаты и доктора наук защитили диссертации по материалам работ, выполненных на синхроциклотроне. Надежная работа ускорителя (до 6 500 часов в год), его постоянная модернизация – это результат самоотверженного творческого труда сотрудников Ускорительного отдела, их высокой профессиональной квалификации. Синхроциклотрон и сегодня остается основной базой нашего отделения. Его возможности еще далеко не исчерпаны. Ускоритель занесен в число уникальных установок России и особо поддерживается Министерством науки и технологий Российской Федерации. Мы должны сделать все возможное, чтобы ускоритель продолжал активно работать, обеспечивая физические исследования, лечение больных и тестирование оборудования для международных экспериментов.

Ниже на рисунке (на переднем плане) показан общий вид комплекса зданий СЦ-1000 ПИЯФ. На заднем плане – комплекс зданий реактора ПИК.



Общий вид синхроциклотрона ПИЯФ 1000 МэВ

Надеюсь, достаточно «доказательств уникальности СЦ». От себя добавлю, что если бы наш СЦ, как «паровоз братьев Черепановых» находился в Политехническом музее, то это естественно был бы «уникальный экспонат», а наш «паровоз» непрерывно вот уже в течение половины века все работает и работает, в отличие от других аналогичных ускорителей вопреки «закону сохранения» и «второму началу». Логично предположить, что это заслуга коллектива и руководителей УО в лице Н.К. Абросимова и Е.М. Иванова.

Среди сотрудников УО три сотрудника дважды Лауреаты Премии им. И.В. Курчатова. Это: Е.М. Иванов, Г.Ф. Михеев, Г.А. Рябов и один раз Лауреат С.А. Артамонов.

III. А.П. Комар - основатель ОФВЭ и УО



А.П. Комар.

Академик АН УССР, дир. ФТИ, зав. лаб. рентг. и γ -лучей, создатель первых в СССР ускорителей: бетатрона и электронного синхротрона

Бесспорно, идейным и реальным создателем ОФВЭ являлся директор ФТИ, академик УССР А.П. Комар. Именно он воспитал выдающуюся первую команду физиков-исследователей во главе с А.А. Воробьевым. В то же время А.П. Комара следует считать и реальным создателем и прародителем Ускорительного отдела и его первой команды (наряду с д.ф.-м.н. Д.Г. Алхазовым, из циклотронной лаборатории которого пришли в УО Н.К. Абросимов и С.П. Дмитриев).

Вспомним состав сотрудников лаборатории А.П. Комара, которые «переехали» в Гатчину, условно разделив их на две группы: «физики» – А.А. Воробьев, С.П. Круглов, Г.А. Королев, В.А. Королев, Ю.М. Волков, М.В. Стабников, И.В. Лопатин, Г.Е. Солякин, Б.А. Бочагов, М.Ф. Соболевская и другие – всего около 15 человек; «ускорительщики»: Н.Н. Чернов, С.Н. Николаев, А.В. Куликов, В.П. Фоминенко, Г.Ф. Михеев, В.П. Чижов, О.П. Коровин, Л.К. Наумов, Б.К. Щербаков, В.Н. Николаева, Е.Ф. Королева – 11 человек.

Все это ученики и воспитанники А.П. Комара, внесшие существенный вклад в развитие ускорительной техники в нашем институте и среди них такие выдающиеся личности, как главный инженер ЛИЯФ С.Н. Николаев, зам. дир. ЛИЯФ Н.Н. Чернов. Есть все основания считать, что А.П. Комар воспитал, организовал и направил в Гатчину как первую команду физиков-исследователей во главе с А.А. Воробьевым, так и команду ускорительщиков во главе с Н.Н. Черновым, А.В. Куликовым и С.Н. Николаевым.



С.Н. Николаев
гл. инж. ПИЯФ



Н.Н. Чернов
д.т.н., зам. дир. ПИЯФ,
гл. инж УО



В.А. Куликов
гл. инж. ОФВЭ и УО

В эти годы отношение к ускорительной технике в стране было «достаточно уважительным» – от «народной» песни В. Высоцкого про «синхрофазотроны» до регулярных всесоюзных и международных конференций по ускорителям, участниками которых постоянно были ускорительщики УО. Международные конференции проходили в Москве, а проживали мы в супер-гостинице «Москва» в двухместных номерах с видом на Кремль.

Между прочим, интересно, что молодым ускорительщикам Н.Н. Чернову, В.П. Фоминенко и Г.Ф. Михееву пожимал руку сам «великий физик» Эмилио Сегре из Калифорнии США. Эта встреча произошла на 1-ой международной конференции по ускорителям заряженных частиц в Москве в мае 1956 года. К нам в перерыве между докладами подошел какой-то иностранец и поинтересовался кто мы и откуда. И когда мы произнесли слова: Ленинград, ФТИ, Иоффе, синхроциклотрон, он сказал «О!» и пожал нам руки. Позднее мы узнали, что это был Сегре.

IV. Настоящее и будущее Ускорительного отдела

*«Прошлое замечательно,
настоящее великолепно.
А будущее столь прекрасно,
что самое смелое воображение
не может себе его представить».*
Александр Христофорович
Бенкендорф. Ответ П. Чаадаеву на
его «Философические письма». 1836 г.

После смерти Н.К. Абросимова с 2011 года Ускорительным отделом успешно руководит к.т.н. Евгений Михайлович Иванов. Кратко перечислю основные достижения этого периода.

- Разработка и создание изохронного циклотрона отрицательных ионов на энергию 80 МэВ – Ц-80, предназначенного для производства изотопов для медицины и лечения в области онко-офтальмологии. (Премия и медаль им. И.В. Курчатова: С.А. Артамонов, Е.М. Иванов, Г.Ф. Михеев, Г.А. Рябов).

- Разработка и создание стендов для испытания интегральной авиационно-космической радиотехники на протонном и нейтронном пучках синхроциклотрона. (4 патента: Е.М. Иванов, С.А. Артамонов, Г.Ф. Михеев, Г.А. Рябов, премия и медаль им. И.В. Курчатова).
- Разработка проекта онко-офтальмологического центра и второго медицинского пучка на базе Ц-80 совместно с ИТЭФ: Е.М. Иванов, С.А. Артамонов, Г.А. Рябов, Г.Ф. Михеев.
- Разработка проекта модернизации оборудования СЦ и его вакуумной системы. Замена электромашинного оборудования питания магнита и трактов пучков СЦ на современные источники питания с управлением от РС.

Более подробно об Ускорительном отделе и СЦ можно ознакомиться в монографии «Радиотехнические системы синхроциклотрона ПИЯФ», Н.К. Абросимов, Г.Ф. Михеев, Гатчина 2012 г., написанной мной в память о Николае Константиновиче Абросимове, – сокурснике по физико-механическому факультету ЛПИ им. М. И. Калинина.

Много сведений об УО и синхроциклотроне ПИЯФ содержатся также в докладе к.т.н. Г.А. Рябова на Ученом Совете ПИЯФ в 2018 году по поводу 50-летия синхроциклотрона ПИЯФ. Обе эти публикации находятся на сайте ОФВЭ.



Изохронный циклотрон Н⁻ионов Ц-80

Будучи много лет руководителем одной из основных в УО радиотехнических служб (РТС), хочу отметить вклад в разработку СЦ и последующую его модернизацию нач. службы А.С. Покровского, инженеров А.Г. Котова, В.И. Юрченко, В.С. Новикова, Г.И. Горкина, Л.М. Крышень.



Сотрудники Ускорительного отдела ПИЯФ – 2017 год

Рассеяние протонов на ядрах, структура дейтрона и поляризация (1970 – 2010 гг.)

С.Л. Белостоцкий



Станислав Львович
Белостоцкий, д.ф.-м.н.,
заведующий Лабораторией
малонуклонных систем

Метод временной «привязки»

Как хорошо известно, для изучения структуры микрообъектов требуются пучки частиц соответствующих энергий. Энергия 1 ГэВ протонов синхроциклотрона ПИЯФ оказалась оптимальной для исследования распределений плотности материи и оболочечной структуры атомных ядер.

Итак, все началось в 1970 году, когда был осуществлён запуск синхроциклотрона с требуемой энергией 1 ГэВ. Само создание этого ускорителя было сложнейшей научно-технической задачей (см. статью Г.Ф. Михеева в данном сборнике). Замечательным свойством выведенного пучка ускорителя была его хорошая временная структура – большое достижение А.В. Куликова с сотрудниками Ускорительного отдела. Но была и проблема. Выведенный протонный пучок имел относительно большой энергетический разброс (до 8 МэВ), а для надежного отбора событий упругого рассеяния требовалось, чтобы суммарное энергетическое разрешение измерительного комплекса, включая пучок, было на уровне 1 МэВ, или лучше. Несмотря на пессимистические прогнозы экспертов, оказалось, что проблема эта решается достаточно просто и практически «бесплатно». Как известно, энергетический разброс пучка, циркулирующего внутри ускорителя, мал (не более 0,3 МэВ), Это следствие процесса автофазировки, открытого академиком Векслером. «Размазывание» энергии выведенных из синхроциклотрона протонов было связано с их дополнительным ускорением в процессе вывода. Для компенсации этого эффекта достаточно ввести т.н. «привязку» момента вывода протона к фазе ускорителя. Идея «привязки», высказанная автором этой статьи, была полностью поддержана в Ускорительном отделе А.В. Куликовым и Н.К. Абросимовым и, главное, нашим научным руководителем А.А. Воробьевым. Результативность «метода привязки» была подтверждена экспериментально. С помощью привязки было достигнуто разрешение 1,05 МэВ при рассеянии на ядрах свинца. Все дальнейшие измерения – цикл работ по дифракционному рассеянию на ядрах, квазиупругое (p, pM) рассеяние протонов на ядрах, поляризационные измерения, изучение короткодействующих корреляций и пр. проводились и проводятся до сих пор с использованием этого метода.

Прецизионный магнитный спектрометр МАП

Измерения дифференциальных сечений упругого рассеяния на ядрах требуют не только высококачественного пучка, но и прецизионного спектрометра для регистрации

рассеянного протона. В нашем распоряжении оказалась система из стандартных магнитных элементов, которая вовсе не была предназначена для тонких измерений. Таким образом, нам предстояло «доработать» эту систему до магнитного спектрометра с разрешением на уровне 0,015% – нетривиальная задача, если учесть, что анализировались протоны с энергиями 800–1000 МэВ. Прежде всего пришлось заменить имевшийся магнитный диполь на другой с радиусом поворота, рассчитанным на 1 ГэВ протонов. Но главное, необходимо было выйти за рамки линейной (магнитной) оптики и попробовать «победить» абберрации второго порядка. В этой работе участвовали, С. Белостоцкий, Г. Алхазов, Г. Амальский, Ю. Доценко, Ю. Залите.

Неоценимый вклад в эту работу внес механик А.И. Алексеев, человек исключительного трудолюбия и удивительной изобретательности. Фактически необходимая для подавления аббераций корректировка магнитного поля в спектрометре была выполнена с помощью разработанной им уникальной по точности системы трассировки траекторий в спектрометре методом нити с током. С помощью фокусирующих элементов траектории собирались в «пучок» в фокальной плоскости спектрометра. Далее, путем тщательного подбора корректирующих шимм «подправлялось» магнитное поле диполя так, чтобы поперечные размеры пучка были не более 0,2 мм. Последнее соответствовало разрешению по импульсу 0,014%, близкому к расчетному импульсному разрешению для точечной мишени с учетом аббераций третьего порядка.

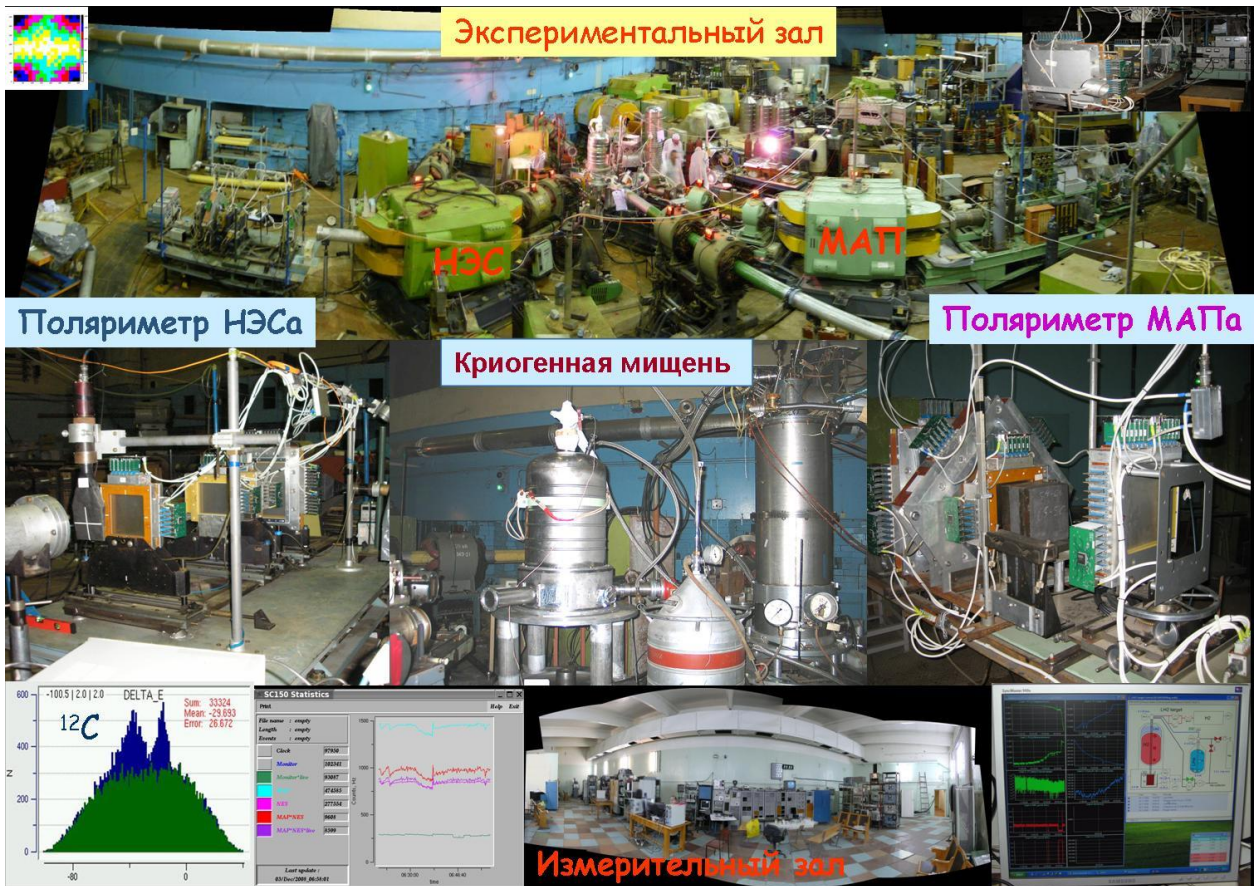
Реально эксперименты проводились с разрешением по энергии 1,5–3 МэВ, что определялось в основном эффективными размерами мишени спектрометра. В спектрометре могли использоваться твердые, жидкие, газообразные, а также криогенные мишени. Спектрометр помещался на подвижную платформу. Угол рассеяния фиксировался с высокой точностью и мог варьироваться в диапазоне от 5-ти до 33-х град. Созданный спектрометр получил название МАП¹⁾.

В 1972 году были начаты первые физические измерения – эксперименты по исследованию распределений плотности ядерной материи путем дифракционного рассеяния протонов с энергией 1 ГэВ. В дальнейшем в развитие метода привязки спектрометр был дополнен корректирующей катушкой, которая компенсировала «размазывание» фокального пятна из-за хода энергии выведенного пучка (Г.Д. Алхазов, С.Л. Белостоцкий – *авторское свидетельство*). Это устройство очень упростило анализ данных по поляризации в дифракционном рассеянии протонов на ядрах. Соответственно, повысилась и точность измерений.

В экспериментах по квазиупругому ($p,2p$) и (p,pn) рассеянию МАП детектировал рассеянный протон на совпадение с протоном или нейтроном отдачи. Нейтронный детектор был разработан и построен Ю.В. Доценко. Он фактически руководил этими экспериментами, а также обработкой и анализом экспериментальных данных.

В поляризационных измерениях ($p,2p$) МАП работал на совпадение с вновь построенным магнитным спектрометром НЭС, который детектировал протоны отдачи с импульсами до 1 ГэВ/с. Поляризация вторичных протонов измерялись поляриметрами с помощью пропорциональных камер. В отделе радиоэлектроники была разработана новая (быстрая) система съема информации с пропорциональных камер. Таким образом, был разработан и построен двухплечевой магнитный спектрометр с возможностью измерения поляризации в каждом канале, обладающий высокой эффективностью набора данных. Лидирующую роль в этой работе, которая потребовала больших организаторских и интеллектуальных усилий, сыграл О.В. Миклухо. В настоящее время двухплечевой спектрометр представляет собой уникальный измерительный комплекс для прецизионных исследований ядерной структуры и спина в протон-ядерных взаимодействиях при энергии 1 ГэВ.

1) МАП – историческое название, принадлежащее нашему научному руководителю А.А. Воробьеву, предложившему создание этого спектрометра.



Двухплечевой спектрометр МАП-НЭС

Дифракционное рассеяние протонов на ядрах и теория Глаубера

Распределения заряда в ядрах достаточно точно измерялись в экспериментах по рассеянию электронов. Распределения плотности материи в ядрах изучались путем рассеяния адронов. Однако точность этих экспериментов была невысокой, а их интерпретация проводилась в рамках феноменологических моделей рассеяния частиц на ядре. С другой стороны, хорошее знание распределений ядерной материи было исключительно важно для понимания природы ядерных сил и структуры ядра. Важнейшую роль в этом отношении сыграла теория многократного рассеяния Глаубера. Первоначально Рой Глаубер разработал свой микроскопический подход для исследования оптической когерентности. Эта работа была удостоена Нобелевской премией по физике 2004 года. Оказалось, что этот формализм великолепно применим также для описания протон-ядерного рассеяния, которое представлялось в виде когерентной последовательности взаимодействий налетающей протонной волны с рассеивающими центрами – нуклонами ядра. При этом, дифференциальные сечения рассеяния оказывались непосредственно связанными с параметрами распределения плотности ядерной материи и амплитудами взаимодействия налетающего протона с нуклонами ядра. Отсюда возможность прямого измерения параметров ядерной плотности. Следует отметить, что в те же годы аналогичный подход был независимо разработан украинским теоретиком А.Г. Ситенко.

Прецизионные эксперименты по измерению дифференциальных сечений упругого рассеяния протонов с энергией 1 ГэВ на ядрах были начаты в ПИЯФ в 1972 году под научным руководством А.А. Воробьева, заведующего сектором "Структура ядра", в котором был разработан и построен спектрометр МАП. Эта работа продолжалась в течение ряда лет. Были измерены дифференциальные сечения упругого рассеяния на ядрах ^3He , ^4He , ^9Be , ^{11}B , ^{12}C , ^{13}C , ^{14}N , ^{16}O , ^{28}Si , ^{32}S , ^{34}S , ^{39}K , ^{40}Ca , ^{48}Ca , ^{90}Zr , ^{208}Pb . На первых этапах работы теоретический анализ данных проводился В.Е. Стародубским. Большой вклад в эти работы также внесли Ю.В. Доценко, Н.П. Куропаткин, О.А. Домченков и В.В. Никулин.

В 1973 году были начаты эксперименты в Исследовательском ядерном центре в Сакле (Франция), где на ускорителе САТУРН изучалось упругое и неупругое (с возбуждением отдельных ядерных уровней) рассеяние протонов с помощью спектрометра с супервысоким разрешением (150 кэВ). Практически параллельно развивалась аналогичная программа исследований в Лос-Аламосе на поляризованном пучке протонов с энергией 800 МэВ.

Исследование дифракционного рассеяния проводилось в тесном контакте между группами ПИЯФ и ядерного центра в Сакле. Во многих случаях набор данных и их анализ производились совместно. Это сотрудничество оказалось исключительно плодотворным и нашло свое продолжение в целой серии совместных экспериментов. Из данных по упругому рассеянию были получены параметры распределений ядерной плотности для всех исследованных ядер. Особый интерес представлял эксперимент по сравнению распределений плотности ядер ^{40}Ca и ^{48}Ca . Проводилось также сравнение распределений зарядовой плотности, плотности ядерной материи и нейтронной плотности. Разница в среднеквадратичных радиусах протонной и нейтронной плотностей в ядре ^{48}Ca оказалось равной 0,2 фм. Интересное явление – заполнение дифракционных минимумов в случае деформированных ядер – также было тщательно изучено и нашло естественное объяснение в теории Глаубера.

Новый этап исследований был связан с измерением дифракционного неупругого рассеяния, что сделало возможным изучение переходных ядерных плотностей. Лидирующую роль в этих экспериментах, в обработке данных, и их анализе сыграл Г.Д. Алхазов, Следует отметить также большой вклад Г.Д. Алхазова в рассмотрение разных эффектов в сечениях рассеяния, рассчитываемых по теории Глаубера, таких как корреляции центра масс, нуклонные короткодействующие корреляции и др.

Поляризация в дифракционном рассеянии

Теория Глаубера идеально описывала дифференциальные сечения рассеяния. Возможно ли столь же успешное описание поляризации рассеянных протонов?

При рассеянии на ядрах матрица pN рассеяния сильно упрощается: спин-спиновые члены можно не учитывать, и «в игре» остаются лишь скалярная (спин-независимая) и спин-орбитальная амплитуды. Формализм Глаубера легко обобщался на случай измерения спиновых переменных. Однако, это требовало экспериментальной проверки. Эксперимент по измерению поляризации проводился на спектрометре МАП, мишень-анализатор поляриметра устанавливалась в фокальной плоскости спектрометра. Простой и надежный поляриметр, основанный на сцинтилляционных счетчиках, с возможностью исключения ложной асимметрии был разработан М.А. Шуваевым. Была измерена поляризация протонов, рассеянных на ядрах ^2H , ^{12}C , ^{16}O , ^{40}Ca , ^{90}Zr , ^{208}Pb . Полученные данные очень хорошо описывались в формализме Глаубера, обобщенном на случай рассеяния частиц со спином. Важно, что в анализе использовался единый для всех исследованных ядер набор pN амплитуд. Это подтверждало адекватность используемого формализма (теорема Левинтова-Келлера).

Цикл работ по дифракционному рассеянию на ядрах при энергии 1 ГэВ, выполненный под руководством профессора А.А. Воробьева, был представлен в обзорной статье в Physics Reports (G.D. Alkhazov, S.L. Belostotsky and A.A. Vorobyov, Physics Reports, v. 42С, № 2 (1978)).

Исследование структуры дейтрона на малых расстояниях

Дейтрон является простейшей ядерной системой, состоящей из двух слабосвязанных нуклонов. Нерелятивистская структура дейтрона хорошо изучена. Протон и нейтрон в дейтроне считаются точечными. Их движение описывается волновой функцией. Дейтрон – деформированное ядро со спином единица. Волновая функция дейтрона содержит D-волну. Очевидно, что нерелятивистское описание дейтрона должно нарушаться на малых расстояниях, сравнимых с размерами нуклонов, т.е. на расстояниях около 0,8 фм, или при ~200 МэВ/с на языке внутридейтронных импульсов. Существенную роль в этой области могут

играть нуклон-нуклонные корреляции, кварковые степени свободы и пр. К сожалению, теоретическое описание этой переходной области из первых принципов пока отсутствует, и, как всегда в таких случаях, требуются детальные экспериментальные исследования. Следует отметить, что во многом эти исследования были мотивированы работами М.И. Стрикмана и Л.Л. Франкфурта.

Поляризованный пучок дейтронов ускорителя Сатурн-2 в Сакле предоставлял идеальные условия для изучения структуры дейтрона в этой переходной области. Здесь уже проводились исследования инклюзивного развала дейтрона с участием физиков из ПИЯФ.

С.Л. Белостоцким было разработано и реализовано предложение постановки эксперимента по исследованию развала поляризованного дейтрона в эксклюзивном варианте (эксп. № 145). Предлагалось измерять набор поляризационных параметров при полном восстановлении кинематики реакции при энергии пучка дейтронов 2 ГэВ. Таким образом, научное сотрудничество ПИЯФ – Центр ядерных исследований в Сакле было успешно продолжено. С.Л. Белостоцкий был со-руководителем эксперимента. Со-руководителем от Франции был профессор Алан Будар – лидер французской группы. К работе присоединилась исключительно квалифицированная группа физиков из ЦИФИ (Будапешт) под руководством профессора Яноша Эре. До этого они уже участвовали в наших совместных экспериментах по измерению поляризации кумулятивных протонов на синхроциклотроне ПИЯФ. Кроме того, американские физики – эксперты по инклюзивному развалу дейтрона – профессор Чарльз Пердрисат и Вина Пунджаби («William and Mary» колледж) также присоединились к эксперименту № 145.

В предложенном эксперименте быстрый протон от развала дейтрона регистрировался магнитным спектрометром SPES-4, его поляризация измерялась поляриметром РОММЕ. Протон отдачи регистрировался изготовленным в ПИЯФ детектором отдачи (системой сцинтилляционных детекторов и пропорциональных камер). Впервые в эксклюзивном варианте были измерены все возможные поляризационные наблюдаемые в диапазоне внутренних импульсов до 450 МэВ/с.

В дополнение к измерениям поляризационных параметров мы проводили тщательные измерения распределения плотности нуклонов в дейтроне в Гатчине, детектируя в реакции $pd \rightarrow ppn$ при энергии 1 ГэВ оба рассеянных протона на совпадение.

В результате совместного теоретического анализа экспериментов, проведенных на ускорителе Сатурн и на синхроциклотроне ПИЯФ (О.Г. Гребенюк, профессор М. Лаже и др.), был сделан важный вывод о том, что структура дейтрона на умеренно малых расстояниях (до внутренних импульсов 400 МэВ/с) может описываться в рамках парижского потенциала с помощью волновой функции без привлечения эффектов перерасеяния или нуклонных корреляций. Описание поляризационных наблюдаемых в импульсном приближении остается адекватным лишь до сравнительно небольших внутренних импульсов (около 130–150 МэВ/с). При больших импульсах импульсное приближение «тонет» в перерасеяниях и не описывает поляризационные параметры.

Квазиупругое ($p,2p$) и (p,pn) рассеяние и оболочечная структура ядра

Эксперимент по исследованию ядер с помощью реакций ($p,2p$) и (p,pn) при энергии протонов 1 ГэВ был предложен и реализован Ю.В. Доценко. Эксперимент проводился в течение 1982–1996 годов. Быстрый рассеянный протон детектировался с помощью спектрометра МАП. Энергия выбитых нейтронов и протонов измерялась по времени пролета с помощью многоканального сцинтилляционного детектора с рекордным разрешением в 1 МэВ.

Детектор был разработан и построен Ю.В. Доценко. Таким образом были продолжены прецизионные исследования ядерной структуры на синхроциклотроне ПИЯФ. Было исследовано более 20 ядер в широком диапазоне масс от ${}^6\text{Li}$ до ${}^{208}\text{Pb}$. Была получена важная информация о движении нуклонов, принадлежащих протонным и нейтронным оболочкам. Соответственно, измерены параметры пространственных распределений плотности нуклонов на оболочках, параметры деформации. Существенный вклад в анализ и интерпретацию полученных результатов внес А.А. Воробьев. Трудно переоценить значение этих экспериментов для ядерной физики.

Эффективная поляризация, перенормировка pp взаимодействия в ядрах и ядерные корреляции

В первом эксперименте на двухплечевом магнитном спектрометре МАП + НЭС, начатом в 1993 году, исследовалась спин-орбитальная структура легких ядер ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$ путем измерения т.н. «эффективной поляризации» протонов на внешних оболочках ядер. Было показано, что в отличие от ядра ${}^7\text{Li}$ спин-орбитальная структура ядра ${}^6\text{Li}$ не может быть объяснена в рамках оболочечной модели с jj -связью. Другой важный результат состоял в том, что в рассеянии на протонах S -оболочек наблюдалось заметное уменьшение поляризации в обоих каналах спектрометра по сравнению с ее величиной в свободном pp рассеянии. Этот дефицит поляризации невозможно было объяснить тривиальными перерассеяниями выбитого из ядра протона на нуклонах ядра.

Подобные эксперименты при более низких энергиях протонов проводились в Исследовательском центре ядерной физики RCNP (Осака, Япония). С 2000 года группы ПИЯФ и RCNP объединились в совместном эксперименте на гатчинском спектрометре, экспериментальная оснащенность которого была очень высокой. Группой ПИЯФ руководил О.В. Миклухо, группой RCNP – профессор Т. Норо.



Российско-японская группа, проводившая эксперименты на двухплечевом спектрометре (2000–2006 годы)

«Дефицит» поляризации в реакции $(p,2p)$ мог быть связан с эффектом модификации протонной волны (нуклонного спинора Дирака) в ядерной среде. В рамках этого предположения удалось описать поляризацию протонов, рассеянных в высокоэнергетический канал спек-

трометра, но оказалось невозможным объяснить разницу наблюдаемых поляризаций. Слишком большим было падение поляризации в низкоэнергетичном канале спектрометра НЭС. Дальнейшие исследования стали более эффективными в результате создания в ПИЯФ новой быстрой электроники CROS-3 для считывания информации с пропорциональных камер поляриметров. Благодаря этому в экспериментах 2007–2010 гг. на ядрах ${}^4\text{He}$ и ${}^{12}\text{C}$ измерялись с достаточно высокой статистической точностью не только поляризации обоих вторичных протонов в реакции $(p,2p)$, но и корреляционные спин-спиновые параметры МАП-НЭС. Большой вклад в эти эксперименты внес А.Ю. Киселев.

Дальнейшая программа. После тщательного анализа всей совокупности данных О.В. Миклухо высказал предположение, что возможное объяснение дефицита поляризации в канале НЭС состоит в том, что выбитый с относительно невысокой энергией протон отдачи не только испытывает взаимодействие в конечном состоянии, но и дополнительно теряет поляризацию, рассеиваясь на нуклонных корреляциях в ядре.

В настоящее время попытки обнаружить эффекты ядерных корреляций стали руководящей идеей в этой группе. Ориентируясь на высокую скорость набора данных, эксперименты ведутся инклюзивно. С помощью спектрометра МАП изучаются инклюзивные сечения и поляризация в реакции (p,p') . Наблюдена «ступенчатая» структура в экспериментальных данных, которая, возможно, связана с рассеянием на ядерных двухнуклонных, трехнуклонных и четырехнуклонных корреляциях в ядрах.

Лаборатория Мезонной Физики

В.В. Сумачев



Викторин Владиславович Сумачев, д.ф.-м.н.,
заведующий Лабораторией мезонной физики



05.04.1929 – 20.01.2014 гг.

Сергей Павлович Круглов, д.ф.-м.н.,
в течение многих лет был заведующим
Лабораторией мезонной физики

История коллектива, образовавшего в дальнейшем Лабораторию мезонной физики (ЛМФ), началась в стенах Ленинградского Физико-Технического Института в 1956 году. Основателем и бессменным руководителем лаборатории вплоть до 2002 года был доктор физ.-мат. наук, заслуженный деятель науки РФ Сергей Павлович Круглов. Во время работы в ЛФТИ основным направлением работы коллектива вначале было создание различных типов квантометров – приборов для измерения полной энергии пучков и интенсивности тормозного излучения. Исследование характеристик созданных приборов проводилось на пучках тормозного излучения электронных ускорителей в Ленинграде, Москве, Харькове, Ереване в интервале энергий от 10 МэВ до 5 ГэВ. Результаты этих исследований были суммированы в монографии «Измерение полной энергии пучков тормозного излучения от электронных ускорителей», вышедшей в 1972 году. Квантометры, разработанные коллективом под руководством С.П. Круглова, и сегодня успешно используются в России и за рубежом при изучении фотоядерных реакций.

Следующим этапом в истории коллектива явилось решение об организации в Гатчине филиала ЛФТИ, специально ориентированного на исследования в области ядерной физики, и решение о сооружении в Гатчине протонного синхротрона на рекордную для этого типа ускорителей энергию 1000 МэВ. Строительство СЦ было начато в 1959 году. В конце 1967 года состоялся пробный пуск ускорителя, а эксплуатация в полном объеме началась с апреля 1970 года. Для организации исследований на синхротроне в 1963 году была создана Лаборатория Физики Высоких Энергий (ЛФВЭ). В составе ЛФВЭ были образованы научные подразделения, одним из которых стал сектор "Мезоны и мезоатомы", куда вошли сотрудники, работавшие под руководством С.П. Круглова. В 1970 году под его руководством был запущен пионный канал, в его монтаже и настройке активное участие принимали все сотрудники лаборатории. По инициативе

С.П. Круглова на синхроциклотроне был создан и мюонный канал. В реализации этого проекта также активно участвовали сотрудники сектора "Мезоны и мезоатомы".

После создания пионного пучка научная деятельность сектора "Мезоны и мезоатомы" была посвящена изучению пион-нуклонного взаимодействия как на пионном канале ПИЯФ, так и в других научных центрах. Была выполнена целенаправленная подготовка к экспериментам на синхроциклотроне. В коллективе разрабатывалась и создавалась различная аппаратура: искровые камеры с магнитоотрицательным и телевизионным съемом информации, жидководородная мишень, углеродный поляриметр, магнитный спектрометр, сцинтилляционные годоскопы, криогенная поляризованная водородная мишень. С использованием пучков положительных и отрицательных пионов был проведен ряд экспериментов в области низколежащих пион-нуклонных резонансов. Выполнены измерения дифференциальных сечений, поляризационного параметра P и параметров вращения спина A и R для упругого пион-протонного рассеяния на многих импульсах налетающих пионов в области низколежащих пион-нуклонных резонансов. Всего было получено более 500 новых экспериментальных значений измеряемых величин. С использованием полученных данных выполнен новый парциально-волновой анализ (ПВА) ПИЯФ-94; одним из фундаментальных результатов анализа явилось обнаружение зарядового расщепления P_{33} -резонанса, что дало возможность определить в отдельности массы и ширины различных зарядовых состояний этого резонанса.

Полученные новые экспериментальные результаты явились значительным вкладом в мировую базу данных по пион-нуклонному взаимодействию. Это подтверждается тем фактом, что в апреле 1989 года в Гатчине на базе ПИЯФ состоялся третий международный симпозиум «Пион-нуклонные и нуклон-нуклонные взаимодействия», в котором участвовали около 150 физиков из ведущих научных центров СССР, Англии, Бельгии, Венгрии, Канады, США, Финляндии, Франции, ФРГ, Швейцарии, Югославии, Японии. Всего на симпозиуме было сделано 80 сообщений. Во время симпозиума состоялся «круглый стол» по проблемам исследования и описания пион-нуклонного взаимодействия. С.П. Круглов был председателем Гатчинского оргкомитета этой конференции.

Начиная с 1989 года, программа исследования пион-нуклонного взаимодействия была продолжена на пионном пучке ускорителя ИТЭФ (г. Москва), имеющем более высокую энергию. Туда была перевезена использовавшаяся в ПИЯФ аппаратура. Для выполнения программы исследований пион-нуклонного взаимодействия была создана коллаборация ПИЯФ-ИТЭФ, куда вошли также сотрудники ОИЯИ (Дубна).

Созданная в ИТЭФ установка СПИН-ЛМ состояла из поляризованной протонной мишени, проволочных искровых камер и системы сцинтилляционных счетчиков для выработки триггера. Мишень располагалась в области высокооднородного магнитного поля напряженностью 2,45 Тл, получаемого с помощью пары сверхпроводящих катушек Гельмгольца. Рабочая температура мишени 0,5 К достигалась с помощью криостата испарения ^3He . Трековая система установки включала проволочные искровые камеры с магнитоотрицательным считыванием информации и гибридные искровые камеры, позволявшие регистрировать частицу входного пучка при потоках до $\sim 2 \times 10^6$ частиц в секунду. Интенсивность падающего на мишень пионного пучка составляла до 300 тысяч отрицательных и 500 тысяч положительных пионов за сброс в диапазоне импульсов от 0,9 до 2,1 ГэВ/с. Идентификация положительных пионов на фоне протонов осуществлялась по времени пролета. Проволочные камеры были выполнены в виде отдельных плоскостей, что позволяло собирать установку в различных конфигурациях согласно целям конкретного эксперимента. Кроме того, имелась возможность установки блока углерода для измерения поляризации протонов отдачи.

На этой установке была выполнена большая программа измерений параметров вращения спина A и R в нескольких кинематических областях, что позволило выбрать правильные ветви решения ПВА упругого пион-нуклонного рассеяния и существенно

улучшить наши знания о барионных резонансах. Затем на установке были выполнены измерения параметра нормальной поляризации P в области малых сечений. Ранее существовавшие в этой области данные имели слишком большие ошибки, что сильно затрудняло проведение ПВА и приводило к дополнительным неоднозначностям в экспериментальном спектре барионных резонансов.

По результатам, полученным на установке СПИН-ЛМ, защищено две диссертации кандидата наук и одна доктора наук. В настоящее время на новом уникальном пионном пучке ускорителя ИТЭФ осуществляется совместный эксперимент «ЭПЕКУР».

В начале 90-х годов с участием сотрудников ЛМФ началась реализация программы измерения дифференциальных сечений реакции перезарядки в Брукхейвенской национальной лаборатории (США) путём детектирования двух фотонов от распада π^0 -мезона с помощью детектора Crystal Ball. В настоящее время эта установка находится в городе Майнц (Германия).

Начиная с 1998 года, сотрудники ЛМФ принимают участие в исследовании реакции фоторождения на ускорителе ELSA (Бонн, Германия). Сотрудники ЛМФ приняли активное участие в подготовке аппаратуры, проведении эксперимента и обработке полученных данных. В настоящее время на пучке «меченых» фотонов электронного ускорителя ELSA в Бонне проводится цикл исследований фоторождения нейтральных мезонов. В этих экспериментах измеряются дифференциальные сечения и поляризационные параметры для таких реакций как $\gamma p \rightarrow \pi^0 p$, $\gamma p \rightarrow \eta p$, $\gamma p \rightarrow \pi^0 \pi^0 p$, $\gamma p \rightarrow \pi^0 \eta p$. Будучи использованными при проведении ПВА, новые экспериментальные данные по фоторождению мезонов позволят улучшить наше знание характеристик барионных резонансов. Особо важную роль играют измерения двойных поляризационных параметров в реакциях фоторождения нейтральных мезонов.

Для проведения этих измерений была создана сложная экспериментальная установка, основным компонентом которой является многокристальный (1380 кристаллов CsI(Tl)) спектрометр фотонов Crystal Barrel с углом захвата, близким к 4π , во внутреннюю полость которого помещена поляризованная мишень. Существенные элементы установки – два дополнительных форвардных детектора, позволяющие регистрировать фотоны и заряженные частицы, вылетающие под малыми углами.

В 2009 году была создана коллаборация B1, которая предполагает использовать на ускорителе ELSA (Бонн, Германия) новый S пучок (благодаря этому второму пучку становится возможным выполнение экспериментов на двух установках посредством переключения направления пучка). Сотрудники ЛМФ приглашены для участия в B1-коллаборации. Для планируемых этой коллаборацией исследований в Отделе мюонных камер ОФВЭ были изготовлены и доставлены в Бонн 8 больших дрейфовых камер.

В настоящее время Лаборатория мезонной физики осуществляет выполнение экспериментальной программы «Барионная спектроскопия с использованием пучков пионов с энергией до 2000 МэВ». Дальнейшим развитием вышеописанных экспериментов по изучению упругого пион-нуклонного рассеяния является изучение пион-протонных реакций с образованием нейтральных мезонов в конечном состоянии. Для выполнения этих исследований в Лаборатории мезонной физики спроектирован и изготовлен новый прибор – спектрометр нейтральных мезонов, состоящий из двух электромагнитных калориметров полного поглощения, по 24 кристалла CsI(Na) в каждом из калориметров. С помощью этого спектрометра измерены сечения пион-протонного рассеяния с перезарядкой для углов вылета нейтрального пиона, близких к 0° . Измерения выполнены в той области импульсов налетающих пионов (от 417 до 585 МэВ/с), где опубликованные ранее результаты других экспериментов были фрагментарны, противоречивы и неточны. Новые измерения произведены с высокой точностью при десяти значениях импульса налетающих пионов в указанном выше диапазоне. В настоящее время с использованием спектрометра нейтральных мезонов на пионном канале ПИЯФ проводятся эксперименты по измерению дифференциальных и полных сечений процесса образования η -мезона при

импульсах налетающих пионов в области вблизи порога реакции (685 МэВ/с). Измерения направлены на выяснение механизма этого процесса, характеризующегося тем, что его порог находится очень близко по отношению к положению резонанса $S_{11}(1535)$. Эксперименты проводятся на пионном канале синхроциклотрона ПИЯФ в диапазоне импульсов налетающих пионов от 700 до 740 МэВ/с. Результаты измерений при импульсах налетающих пионов 700, 710, 730 и 740 МэВ/с опубликованы в журнале ЯФ, 2012 г., том 75, № 8, сс. 982–991.

Закончены обработка и анализ полученных данных по рождению η -мезона. Показано, что если процесс рождения η -мезона непосредственно вблизи порога идёт преимущественно через образование резонанса $S_{11}(1535)$ с его последующим распадом, то с ростом импульса η -мезонов становится всё более существенной роль D -волны. Проведённый детальный анализ этого эффекта свидетельствует о том, что он обусловлен возрастающим вкладом резонанса $D_{13}(1520)$. Вероятность распада этого резонанса по каналу ηn считается очень малой ($BR \approx 0,2\%$), однако эффект усиливается благодаря S - D интерференции с доминирующим резонансом $S_{11}(1535)$.

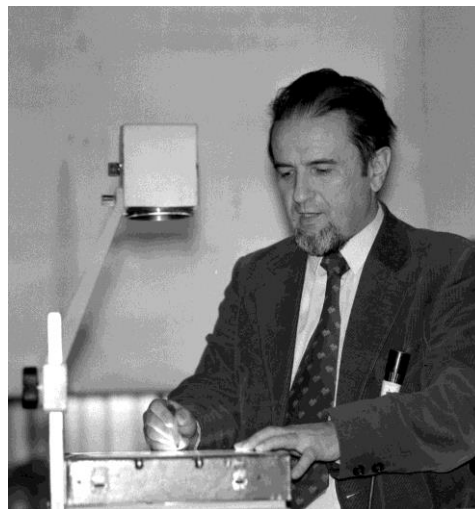
Физика элементарных частиц, имеющая свойство быстрого насыщения с появлением ускорителей более высоких энергий или более высокой интенсивности, не избежала этой участи и на нашем ускорителе. Тем не менее, за прошедшие годы был получен целый ряд важных результатов, в частности, в исследовании пион-протонного взаимодействия. Очевидно, что продолжение активных исследований пион-нуклонного взаимодействия необходимо для изучения структуры нуклона и его возбужденных состояний.

Криогенная пузырьковая камера

В.В. Саранцев, С.Г. Шерман



Виктор Владимирович Саранцев, к.ф.-м.н., ученый секретарь ОФВЭ, лидер по анализу информации с пузырьковой водородной камеры



Михаил Михайлович Макаров (07.12.1934 – 05.12.1987), д.ф.-м.н., заведующий Сектором ядерных реакций

В 1955 году, развивая успех ядерной программы, советское правительство постановило построить в Ленинградской области новый ядерный научный центр. Основными установками этого центра должны были стать реактор нейтронов и ускоритель протонов с параметрами, превосходящими на уже имеющихся в Дубне аналогичных установках.

Первая очередь была отдана реактору, вторая ускорителю. В 1958 году, когда реактор приближался к физическому пуску, началось интенсивное строительство синхротронного ускорителя. Для координации этих работ был создан ускорительный отдел, научными руководителями которого были назначены доктор физ.-мат. наук Дмитрий Георгиевич Алхазов и Николай Константинович Абросимов.

Будучи опытным научным работником, Дмитрий Георгиевич был абсолютно убежден, что параллельно со строительством ускорителя надо начинать и создание экспериментальных установок, которые должны были бы быть готовы к работе к моменту запуска ускорителя.

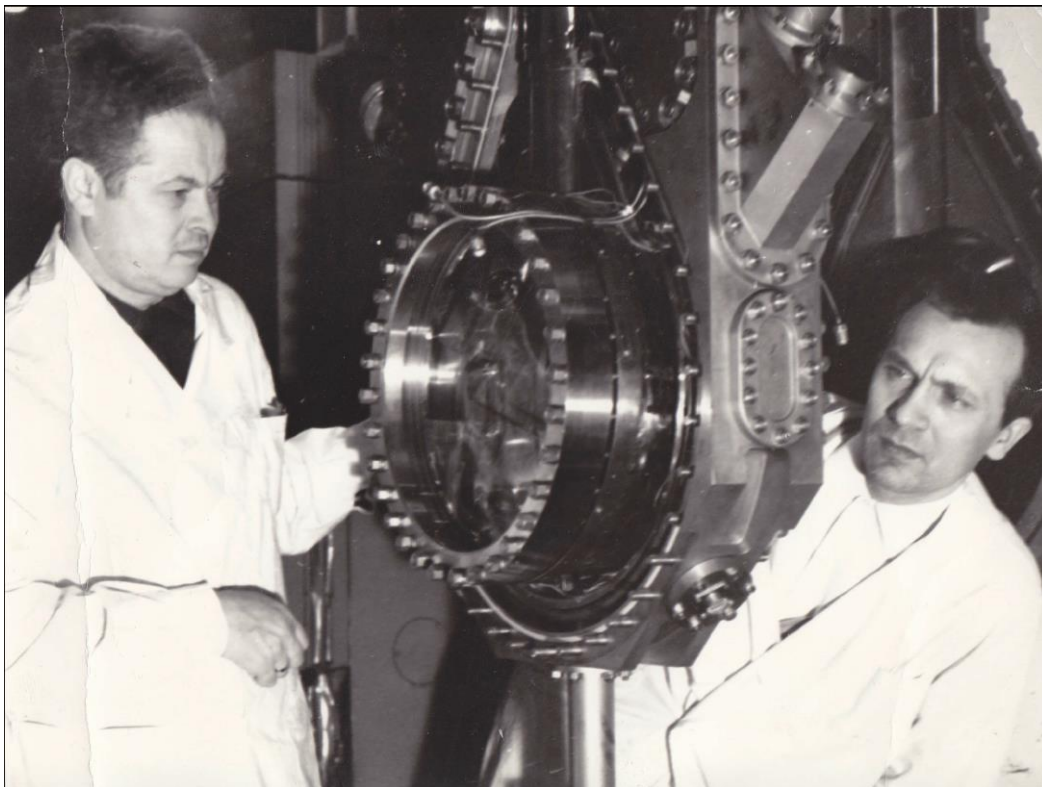
Никакого отдела физических исследований тогда не было и поручить эту работу было некому. И Дмитрий Георгиевич решил и сумел убедить в этом директора ФТИ Бориса Павловича Константинова, что создание хотя бы двух-трех установок может взять на себя ускорительный отдел. Выбор пал на поляризованную мишень, искровую камеру и жидководородную пузырьковую камеру.

В то время пузырьковые камеры работали на всех ускорителях в мире. Информация с них благодаря полной кинематике всех заряженных продуктов реакции чрезвычайно высоко ценилась теоретиками. Однако имелся и недостаток – низкая статистика получаемых физических данных. Камеры работали медленно (получение одного снимка занимало десятки секунд, а то и минут) и не выдерживали длительных экспозиций. И Дмитрий Георгиевич поставил перед молодыми выпускниками Ленинградского политехнического института Соколовым Германом Львовичем, Медведевым Владимиром Ивановичем и Поромовым Владиславом Ивановичем задачу создания камеры, превышающей по этим параметрам мировую практику. В качестве “гуру” молодым людям был определен Селиванов Георгий Иванович, построивший незадолго до этого в Дубне водородную пузырьковую камеру, которая, к сожалению, обладала всеми упомянутыми выше недостатками, и поэтому Селиванов хорошо понимал, чего делать не нужно.

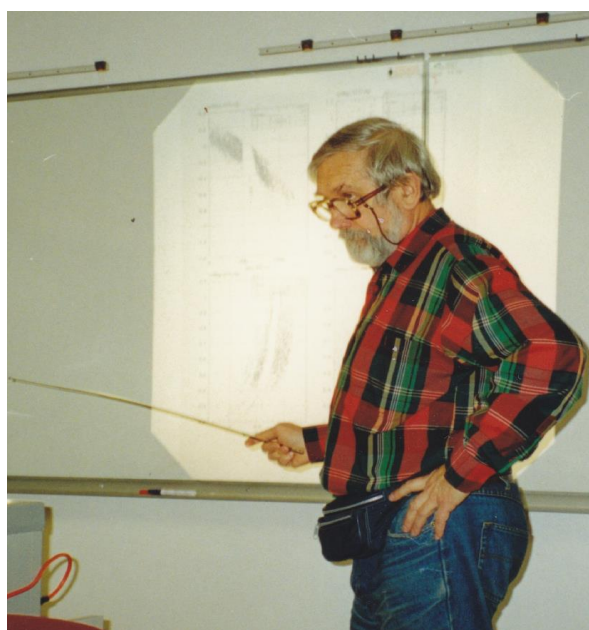
Проектирование а затем и строительство камеры заняло несколько лет, и в результате был создан прибор, который по скорости позволял на порядок увеличить количество получаемых стереоснимков изучаемых событий. Ключевым моментом здесь

было создание расширительного устройства поршневого типа, которое стабильно срабатывало два раза в секунду, так что набор статистики (продолжительность работы камеры на пучке) определялся только выделенным на эксперимент временем. К тому же камера могла без переделок работать и с жидким дейтерием, который в два раза плотнее водорода.

Металлический корпус камеры был изготовлен на заводе в Нарве, большие плоскопараллельные стёкла диаметром 40 см и толщиной 5 см - в Лыткарино. Стереофотоаппарат делали в мастерских нашего тогдашнего филиала под руководством Генриха Карловича Кунстмана, систему освещения создал Андрей Владимирович Кравцов.



Монтаж пузырьковой камеры основными ее создателями Г.Л. Соколовым (слева) и В.И. Медведевым



Один из участников создания водородной пузырьковой камеры А.В. Кравцов

Поначалу слабым местом была сложная электроника, согласующая работу всех элементов камеры. Ускоритель выдает протоны мелкими ступками по 50 раз в секунду. Система управления должна была, выбрав один из них и подавив лишние, запустить начало движения поршня так, чтобы к моменту попадания протонов в камеру давление в ней упало до значения, обеспечивающего перегрев водорода настолько, чтобы создать условия для быстрого роста пузырьков до того, как ударная волна, возникающая около поверхности поршня, достигнет фотографируемого объёма. Затем необходимо было подать сигнал на запуск мгновенной вспышки осветителя, когда пузырьки станут хорошо видны, но до того, как они сольются в толстую непрерывную линию. Затем приказать поршню начать обратное движение, чтобы подготовить водород к следующему циклу, и проташить фотоплёнку на один кадр. Вначале блок электроники на электронных лампах создал Владимир Михайлович Сирин. Позже Евгений Александрович Лобачёв передал управление камерой на ЭВМ СМ-4. С появлением новой элементной базы всё совершенствовалось и, наконец, Виктор Алексеевич Трофимов перевёл всё на микросхемы, сделав блок совершенно надёжным и легко управляемым.

Параллельно с изготовлением и сборкой "железа" Семён Григорьевич Шерман создал комплекс программ для ЭВМ, необходимый для определения кинематических параметров зарегистрированной частицы по измерению координат точек на нескольких проекциях трека. Таким образом, к моменту сдачи ускорителя в эксплуатацию камера была бы готова к установке на пучок, если бы не одно но – после заливки жидкого водорода со временем стёкла камеры запотевали. В то время создание уплотнений на стыках разных элементов установки не было такой простой задачей, как сейчас, поэтому создатели камеры неоднократно разбирали и собирали камеру, пока не догадались, что в одной из толстых прижимных шпилек спряталась микротрещина. На поиски этого досадного дефекта ушло много времени, так что честь оказаться первой физической установкой, заработавшей на пучке, досталась другим. Камера впервые встала на пучок в 1972 году на p -мезонном канале синхроциклотрона, и тогда были получены снимки для изучения реакции $p \rightarrow p \pi^+ \gamma$.

В определении первоочередных задач, которые могли быть поставлены для нового прибора решающую роль сыграл зав. сектором ядерных реакций ОФВЭ Михаил Михайлович Макаров, чей сектор активно включился в физические исследования, которые могли быть выполнены с помощью пузырьковой камеры. Таким образом Отделение физики высоких энергий приняло самое активное участие в использовании этого прибора. М.М. Макаров создал группу просмотра плёнок и отбора событий нужной топологии, тогда как под руководством Владислава Вениаминовича Добырна была создана измерительная приборная база и обучена группа координатографистов, выполнявшая измерения координат точек на треках. В свою очередь, Михаил Иванович Трухин организовал в фотолаборатории проявку плёнок. Он же договорился о приобретении фотоплёнки на фабрике военно-промышленного комплекса. Качество этой плёнки оказалось поразительно высоким – спустя 30 лет её прочностные свойства не изменились, и она и по сей день спокойно выдерживает все нагрузки, связанные с измерениями.

Камера вторично вышла для работы на пучке p -мезонов в 1974 году, когда было проведено её облучение с дейтериевым наполнением. В этой экспозиции было взято около 8×10^5 стереокадров, т.е. камера показала себя в техническом отношении отличным устойчивым прибором.



Коллектив криогенного отдела, создавший водородную пузырьковую камеру и обеспечивавший ее работу в экспериментах

Целью того эксперимента было измерение сечений рождения π^- -мезонов на нейтроне при нескольких энергиях в околороговой области. Уже в 1976 году были проведены еще две экспозиции камеры, наполненной дейтерием на идентичных по энергии пучках π^+ - и π^- -мезонов с целью определения разности масс изобар Δ^- и Δ^{++} . Результаты этого эксперимента легли в основу докторской диссертации М.М. Макарова. Полученные в этой экспозиции снимки (4×10^5) позволили позже также изучить как процессы упругого рассеяния пионов на дейтроне, так и процесс развала последнего.

В 1979 году камера, наполненная дейтерием, была экспонирована на протонном пучке синхроциклотрона (было взято 4×10^5 снимков). Первичной целью этого эксперимента было получение сечений рождения π^- -мезонов в $p\pi$ -соударениях в области энергий налетающих протонов 600-1000 МэВ. В результате была впервые измерена с шагом 50 МэВ энергетическая зависимость сечения рождения мезонов при рассеянии протонов на нейтронах. Эти же снимки позже использовались при исследовании поведения кумулятивных нуклонов в развале дейтрона протонами и в изучении двойного рождения пионов.

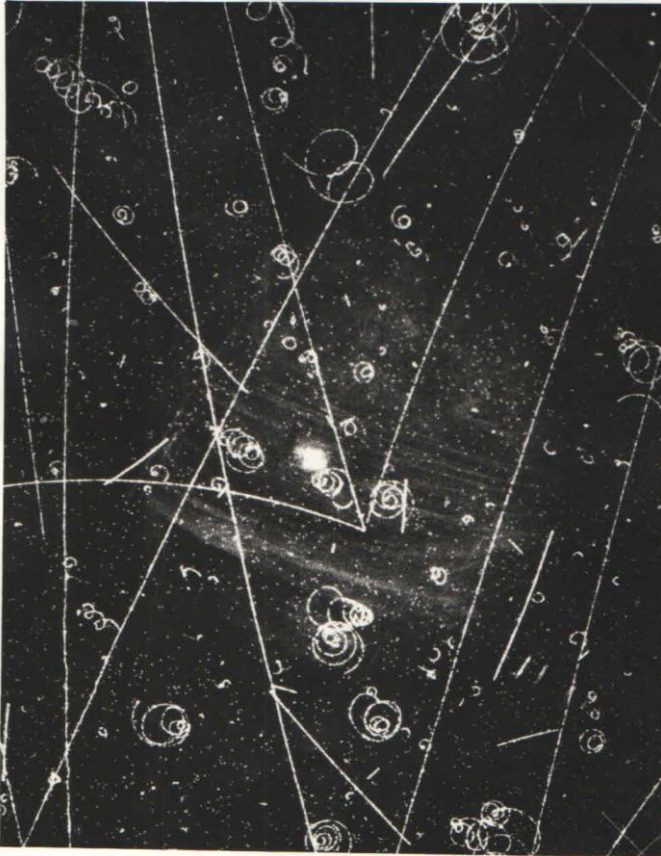
В 1982 году камера экспонировалась с водородным наполнением на протонном пучке при 10 энергиях последнего в диапазоне 500-1000 МэВ. Целью этого эксперимента было получение энергетической зависимости сечения реакции $pp \rightarrow p\pi p^0$ в области 600-1000 МэВ при десяти значениях энергии протона. Было взято $5,5 \times 10^5$ стереокадров и после измерений и обработки экспериментальных данных были получены значения сечений рождения нейтральных пионов в области энергий ниже 1 ГэВ. Позже эти снимки использовались при изучении дифференциальных характеристик рождения как нейтральных, так и заряженных пионов.

Последняя экспозиция камеры с водородным наполнением была проведена в 1985 году на нейтронном пучке, полученном при бомбардировке жидкодейтериевой мишени протонным пучком с энергией 1000 МэВ (было получено 10^5 стереоснимков). Целью этого эксперимента было исследование дифференциальных характеристик процесса рождения отрицательных пионов в $p\pi$ -соударениях. Расформирование лаборатории М.М. Макарова после его кончины и сокращение координатографистов в группе В.В. Добырна привело к длительной задержке в публикации полученных результатов,

которые увидели свет только после организации новой научной группы по измерениям и обработке экспериментальных данных в 2010 году.

Таким образом, криогенная пузырьковая камера успешно функционировала свыше 10 лет на пионных и нуклонных пучках синхроциклотрона ПИЯФ с дейтериевым и водородным наполнением, взяв за это время свыше 2,5 миллионов стереоснимков. Коллектив криогенного отдела во главе с Г.Л. Соколовым, создавшим камеру, обеспечил ее устойчивую, стабильную работу на протяжении всех этих лет.

Решающую роль в экспериментальной обработке данных с пузырьковой камеры, получении физических результатов и их опубликовании сыграли М.М. Макаров, В.П. Андреев, Л.Г. Дахно, А.В. Кравцов, Г.З. Обрант, В.В. Саранцев, А.Б. Сокорнов и С.Г. Шерман.



Типичный пример фотоснимка с водородной пузырьковой камеры, находящейся в магнитном поле и облученной пучком нейтронов. На снимке хорошо просматривается событие реакции $n + p \rightarrow p + p$

ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ЭЛЕКТРОННОМ СИНХРОТРОНЕ ПИЯФ

Ю.М. Волков

Синхротрон на энергию электронов 100 МэВ был запущен в 1953 году в Лаборатории рентгеновских и гамма лучей ФТИ им А.Ф. Иоффе, возглавляемой А.П. Комаром. Основой послужил один из электромагнитов, изготовленных в Москве для сооружения синхротронов под руководством В.И. Векслера. За два года группа молодых сотрудников Н.Н. Чернов, А.В. Куликов, Г.Ф. Михеев, В.П. Фоминенко, Б.К. Щербаков и В.П. Яшуков осуществили запуск и вывод ускорителя на эксплуатационный режим. В конце каждого цикла ускорения электроны, ускоренные до энергии 100 МэВ, сбрасывались на мишень, установленную внутри ускорительной камеры. Получавшийся пучок тормозного излучения непрерывного спектра с максимальной энергией 100 МэВ выводился наружу. С этого времени началось исследование фотоядерных реакций. С.П. Круглов и И.В. Лопатин создали аппаратуру, с помощью которой осуществили измерение энергии и интенсивности пучка излучения ускорителя. Другая группа сотрудников, включавшая Е.Б. Бажанова, Ю.М. Волкова, А.В. Куликова, Л.А. Кульчицкого, Е.Д. Махновского, В.П. Чижова и И.П. Явора, создала методики для регистрации продуктов фотоядерных реакций. В частности, были созданы телескопы детекторов, состоящие из тонкого первого детектора, в котором регистрируемая частица оставляет часть энергии и второго, в котором оседает вся оставшаяся энергия. Сравнение сигналов первого и второго детекторов позволяло идентифицировать тип частиц.

Исследовательские работы были начаты с выяснений механизма взаимодействия гамма излучения с ядрами. Так, Е.Б. Бажанов и другие, сделав градуировку сцинтилляционных счетчиков по протонам на циклотроне ФТИ, показали, что при взаимодействии гамма квантов с энергией $E > 50$ МэВ с ядрами углерода и более тяжелыми испускаются фотопротоны в результате квазидейтронного механизма поглощения. Результаты работы с использованием телескопов сцинтилляционных счетчиков Ю.М. Волковым и др. говорили в пользу того, что процесс испускания высокоэнергетичных фотодейтронов из ядер бора и бериллия сопровождается вылетом нуклона. И.П. Явором и др. с помощью созданной ими методики управления работой камеры Вильсона сигналами от телескопов счетчиков это было подтверждено при анализе стереоснимков камеры. Б.А. Бочаговым и др. был выполнен цикл работ по фотоделению.

В.П. Денисовым, Л.А. Кульчицким и И.Я. Чубуковым был разработан метод выделения парциальных каналов сечений реакций на основании сравнения результатов измерений, полученных при разных максимальных энергиях тормозного спектра гамма квантов. Ими был выполнен ряд экспериментов, направленных на проверку теории конфигурационного расщепления гигантских дипольных резонансов легких ядер 1р-оболочки.

В 1967 году синхротрон был перевезен в ПИЯФ и через два года он стал снова работать вплоть до 1986 года. Е.Д. Махновский, О.Б. Степанова и Е.А. Котиков разработали метод загрузки ядер ${}^7\text{Li}$ и ${}^6\text{Li}$ в фотоэмульсии и получили большое количество случаев фоторасщепления с обилием результатов, ограниченных только несовершенством тогдашних методов по обработке звезд. Интерес к этим данным вызвал привлечение других методов регистрации, в частности, создание установки из двух телескопов полупроводниковых детекторов для регистрации протонов, дейтронов, тритонов, альфа частиц и частиц гелия три. Для изучения угловых распределений телескопы располагались под различными углами по отношению к направлению пучка гамма излучения. В работе по созданию приборной базы, проведению исследований и обработке данных в конце семидесятых и в начале восьмидесятых годов принимали участие сотрудники Ю.М. Волков, А.И. Игнатьев, Г.А. Коломенский, Е.Ф. Лаковичев, Е.Д. Махновский, А.В. Надточий и В.В. Попов.

Начальником службы ускорителя был В.П. Фоминенко. Заведующим лабораторией – В.П. Чижов. Лаборатория фотоядерных реакций, возглавляемая в течение многих лет В.П. Чижовым, получила ряд новых результатов по распаду гигантских мультипольных резонансов в ядрах ${}^{27}\text{Al}$, ${}^{40}\text{Ca}$, ${}^{58}\text{Ni}$ и ${}^{60}\text{Ni}$. С целью проверки трех теорий – теории прямого фотоэффекта, теории прямого фоторасщепления кластеров и теории конфигурационного расщепления электрического дипольного гигантского резонанса легких ядер 1р- и 1s-оболочек (ядер ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$) – был

поставлен эксперимент по определению состава частиц продуктов реакций и угловых корреляций между ними. Результаты работы свидетельствовали, что доминирует кластерный механизм поглощения фотонов ядрами.

Стремление повысить уровень исследований привели к созданию установки для использования внутреннего электронного пучка синхротрона. В этом случае, в отличие от стандартного, когда мишень исследуемого изотопа располагалась за пределами камеры ускорителя в пучке тормозного гамма излучения, тонкая мишень исследуемого изотопа помещалась внутри камеры и через нее, по окончании цикла ускорения, электроны проходили многократно. Многократность прохождения и расположение телескопов детекторов поблизости от мишени внутри ускорительной камеры давало выигрыш по регистрируемому выходу продуктов электроядерных реакций. Расположить телескопы полупроводниковых детекторов внутри ускорительной камеры, где действует сильное переменное магнитное поле и источники электрических помех, казалось невозможным. Однако эта методика была реализована, и на нее Ю.М. Волкову, В.П. Фоминенко и В.П. Чижову было выдано Авторское свидетельство. С помощью этой методики был получен ряд интересных результатов. Сравнение электропоглощения и фотопоглощения давало возможность определять мультипольность изучаемых переходов. В области ядер среднего веса при исследовании фотопоглощения ядрами ^{58}Ni и ^{60}Ni были обнаружены гигантские электрические квадрупольные резонансы, распадающиеся в основном с испусканием альфа частиц.

В 1969 году в лаборатории было предложено построить новый ускоритель электронов – так называемый разрезной микротрон. Предполагалось, что магнит микротрона будет состоять из двух половин, между которыми будет расположен линейный ускоритель. С помощью ЭВМ были рассчитаны траектории для 30 прохождений и доказана устойчивость движения и фокусировка. Состояние техники линейных электронных ускорителей в то время было таково, что микротрон мог бы иметь ток на выходе до 600 мкА при скважности пучка 10% с энергиями электронов вплоть до 400 МэВ. Предложение лаборатории не получило одобрения в Академии Наук СССР. Ведущей фигурой в деле непринятия предложения строительства микротрона в Гатчине оказалась Л.Е. Лазарева – руководитель лаборатории ФИАНа, которая не захотела поиметь конкурентов с уникальным ускорителем, и через мужа М.А. Маркова, который в то время был академиком-секретарем Отделения ядерной физики АН СССР, добилась отклонения проекта. Дело даже дошло до подмены положительного отзыва Р.М. Воронкова. А С.П. Капица в своем отзыве написал, что предлагаемый микротрон очень хорош, но важно кто его будет строить и где строить. Разрезные микротроны такого типа для исследовательских целей или как инжекторы для более сложных систем были построены в Швеции, Дании, Италии. Даже в Москве в НИИЯФ МГУ в 2000–2001 годах был запущен разрезной микротрон на энергию 70 МэВ.



Н.Н. Чернов за пультом синхротрона

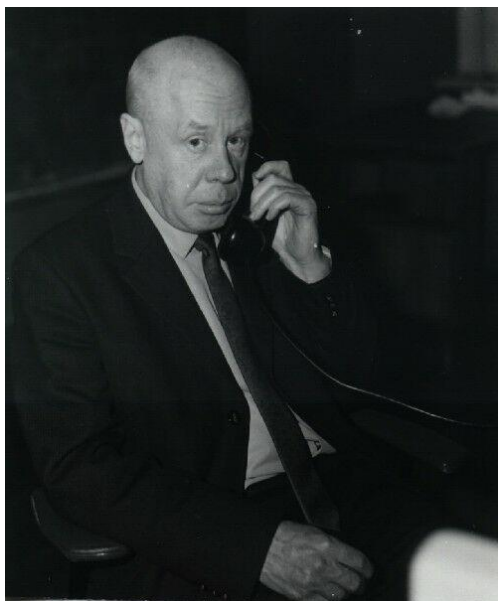


Ю.М. Волков (слева) и заведующий сектором д.ф.-м.н. В.П. Чижов

Вспоминая прошедшие годы

(о Б.А. Бочагове)

Г.Г. Семенчук



Борис Архипович Бочагов
(1923–1979), к.ф.-м.н.,
заведующий сектором
“Прямые ядерные реакции”

Борис Архипович Бочагов принадлежал к поколению, на долю которого выпали суровые дни Великой Отечественной Войны. Окончив школу, он в 18 лет ушел на фронт, откуда демобилизовался в 1946 г, будучи награжденным медалью «За победу над Германией».

Затем была учеба на Физическом факультете МГУ и поступление в ЛФТИ. Борис Архипович входил в состав первой группы сотрудников Лаборатории Физики Высоких Энергий, созданной в 1963 году А.П. Комаром для проведения исследований на строящемся в Гатчине ускорителе СЦ-1000. Поскольку до запуска этой машины было еще далеко, сотрудники сектора «Прямых ядерных реакций», руководимые Б.А. Бочаговым, интенсивно использовали существовавшие ускорители. Такими были электронный синхротрон ЛФТИ (с энергией 100 МэВ), циклотрон НИИ ЯФ МГУ (с энергией альфа-частиц 26,5 МэВ), циклотрон У-150 ЛЯР ОИЯИ (Дубна), линейный электронный ускоритель У-250 (Харьков). Столь широкий охват различных агентов деления потребовал развития различных методик и создания на их основе новых физических установок.

Как большое научное достижение следует рассматривать создание и запуск Б.А. Бочаговым двойной импульсной ионизационной камеры с аргоновым наполнением, которая позволяла регистрировать парные осколки деления. Эта работа легла в основу его кандидатской диссертации, которую он защитил в 1956 году: «Новый метод исследования угловых и энергетических распределений тяжелых заряженных частиц и осколков деления, основанный на использовании импульсной ионизационной камеры с электронным собиранием». Дальнейшие исследования показали, что область применения импульсных ионизационных камер в физике очень широка, о

чем свидетельствуют эксперименты по *pp*-рассеянию на малые углы и по мюонному катализу. В упомянутых экспериментах камеры наполнялись сверхчистым водородом, что существенно расширяло область исследуемых процессов.

Дальнейшие исследования, проводимые в секторе Б.А. Бочагова, были связаны с изучением и применением в экспериментальной практике новых приборов – кремниевых полупроводниковых детекторов (ППД). Их характеристики идеально подходили для регистрации альфа-частиц и осколков деления. Первыми экспериментами, выполненными с помощью ППД, были длившиеся несколько лет (1966–1969 гг.) исследования процесса деления ядер урана ^{238}U и тория ^{232}Th гамма-квантами высоких энергий ($E_{\gamma\text{max}} = 250\text{--}1000$ МэВ) на линейных ускорителях в Харькове. Их целью было исследование массовых распределений осколков деления указанных ядер в зависимости от вносимой энергии. Как оказалось, массовое распределение осколков деления тяжелых ядер остается асимметричным, будучи вызванным в основном гамма-квантами из области «гигантского резонанса» (12–18 МэВ). В этих экспериментах были впервые исследованы более легкие ядра – висмут ^{209}Bi , свинец ^{208}Pb и золото ^{197}Au , имеющие согласно теории высокий барьер деления в диапазоне $\sim 25\text{--}30$ МэВ. Как следствие этого, указанные ядра имели малые сечениями деления, что требовало специальных мер защиты от фоновых процессов. Измеренные массовые распределения осколков имели симметричный характер в полном соответствии с теоретическими расчетами Никса-Святецкого. Результаты харьковских опытов, проводившихся при непосредственном участии Б.А. Бочагова, были отмечены в институте премией Президиума РАН (совместно с экспериментом по тройному делению, выполнявшемуся под руководством А.А. Воробьева).

Дальнейшие исследования (1969–1973 гг.) в секторе Б.А. Бочагова были связаны с изучением деления ядер среднего веса на пучке протонов нашего ускорителя СЦ-1000. Для этого на новой элементной базе был собран спектрометр осколков деления, представлявший собой набор из 9-ти ППД, из которых 6 были расположены на подвижной горизонтальной по отношению к пучку раме и 3 ППД на неподвижной вертикальной раме. Площадь каждого детектора составляла $3,5\text{ см}^2$. Спектрометр размещался в вакуумной камере рассеяния, которая позволяла осуществлять управление мозаикой, не нарушая вакуума. Установка получила название ПУСЭК1/2, что означало: Прибор для измерения Угловых, Скоростных и Энергетических Корреляций парных осколков деления (1/2–означало возможность увеличения измеряемых параметров).

Отметим основные результаты, полученные на ПУСЭК1/2.

– Измерены кинетические энергии и угловые корреляции парных осколков деления ядер ^{238}U , ^{209}Bi , ^{197}Au , ^{184}W , естУ и ^{165}Ho , методом ($E_1 \times E_2$) совпадения двух осколков деления и измерения их энергий.

– Определено среднее значение продольных составляющих импульсов $\langle P_{11} \rangle$ делящихся ядер.

– На основании распределений угловых корреляций осколков получены полные сечения деления и делимости ядер.

– Полученное значение делимостей демонстрирует наличие особенностей в области редкоземельных элементов.

– При переходе от ядер Bi к ядрам $\text{W}-\text{Yb}$ обнаружено резкое возрастание ширин массовых распределений, что интерпретировалось как приближение к области неустойчивости Бусинаро-Галлоне (ответственные – Г.Г. Семенчук, А.А. Котов, Г.Г. Ковшевный, Л.Н. Андроненко, Б.Л. Горшков).

Измеренные выше параметры не давали полного ответа на основной вопрос – когда и сколько нуклонов участвуют во внутриядерном каскаде. На эти вопросы должен был ответить разработанный Г.Е. Солякиным прибор ПУСЭК2, позволявший одновременно измерять время пролета осколков известных расстояний и их энергию, давая значение масс осколков согласно соотношению $M \sim E \times T^2$.

ПУСЭК2 представлял собой двухплечевой времяпролетный спектрометр, измерявший энергии, скорости и углы разлета парных осколков (метод $2E-2V$).

Наиболее сложными элементами установки являлись независимый «нуль времени», расположенный вблизи мишени и испытывавший большую фоновую нагрузку, и 2 мозаики из 33 ППД, требовавшие тщательной экранировки и настройки. Прибор проработал на пучке несколько смен, накопив тестовые массивы многопараметрической информации по делению ядер ^{238}U , ^{209}Bi и ^{184}W . (ответственные – Г.Е. Солякин, В.Е. Шашмин, В.Р. Резник, М.Н. Андроненко, Ю.А. Честнов).

Надо отметить, что в планах сектора также намечались и велись следующие прикладные исследования:

– исследование угловых распределений альфа-частиц тройного деления ядер ^{252}Cf в диапазоне углов $0^\circ-50^\circ$ относительно направления движения осколков (отв. – А.П. Граевский);

– изучение ионизационного дефекта в полупроводниковых детекторах методом рассеяния осколков на фольгах (Ni, Al) (отв. – Н.К. Терентьев);

– исследование светового отклика полупроводниковых материалов на тяжелые заряженные частицы с целью изучения ионизационного дефекта (отв. – С.А. Кассиров);

– для совместных экспериментов с Радиевым институтом подготовка к работе цилиндра Фарадея и проведение калибровки мониторных камер ЛФВЭ (отв. – В.А. Удод).

Представленная здесь программа исследований достаточно интересна. Однако значительным ее минусом была неравномерная нагрузка на участников основного эксперимента и просто нехватка инженеров-электронщиков.

В начале 1973 года была проведена реорганизация сектора, вызванная переводом Б.А. Бочагова в другое подразделение института. Одной из причин такого перехода было ухудшение здоровья Бориса Архиповича...". Он уволился из института в марте 1979 года и вскоре скончался в возрасте 56

лет. Его ранний уход из жизни несомненно был вызван годами пережитого на фронте.

Вспоминая Б.А. Бочагова, надо отметить прежде всего его мягкость в отношениях с сотрудниками сектора. Борис Архипович давал возможность каждому высказать свою точку зрения в различных спорах и дискуссиях. Он был из поколения, привыкшего делать все своими руками, и всячески поддерживал самостоятельные действия молодежи.



В зимней школе ЛИЯФ:
Г.Г. Ковшевский,
Г.Г. Семенчук,
Г.Е. Солякин,
А.А. Котов



Двумерное распределение осколков деления ядер ^{238}U под воздействием пучка ионов ^4He (на экране монитора ОК-17). Координаты точек соответствуют энергиям осколков. Измерения 1963 г.

СЕКТОР МЕЗОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

К.Н. Ермаков, В.В. Пашук



Марк Васильевич Стабников
(1930–2005),
д.ф.-м.н., зав. сектором
мезоядерных реакций

Лицо коллектива, его деятельность, как правило, определяет лидер. Таким был организатор сектора мезоядерных реакций Марк Васильевич Стабников. Окончив аспирантуру на кафедре экспериментальной ядерной физики физ.-меха ЛПИ (руководитель – академик Украинской Академии Наук А.П. Комар), в 1956 г. он был принят на работу в ФТИ им. А.Ф. Иоффе в лабораторию А.П. Комара для исследований на синхротроне с помощью диффузионной камеры. Диффузионная камера представляла собой довольно сложное сооружение, размещенное в магнитном поле. Настройка такой установки требовала большой отдачи сил от сотрудников. Руководил этой работой с.н.с. С.Я. Явор, а Марк Васильевич был основным исполнителем. Проектирование установки, создание, изучение ее возможностей и эксперименты, выполненные на синхротроне, завершились защитой М.В. Стабниковым в 1960 г. кандидатской диссертации. К этому времени вокруг него уже образовалась небольшая группа сотрудников: В.Д. Лебедев, Л.В. Баканов, А.П. Граевский, С.П. Мельников и Е.Н. Соловьев. В 1962 г группа пополнилась В.В. Пашуком, Б.Г. Турухано, К.Н. Ермаковым.

После перевода лаборатории А.П. Комара в филиал ФТИ в начале 1964 г. группа была преобразована в сектор мезоядерных реакций в составе ЛФВЭ, а М.В. Стабников был избран заведующим сектором. В секторе были разработаны и реализованы трековые детекторы нового на тот период поколения:

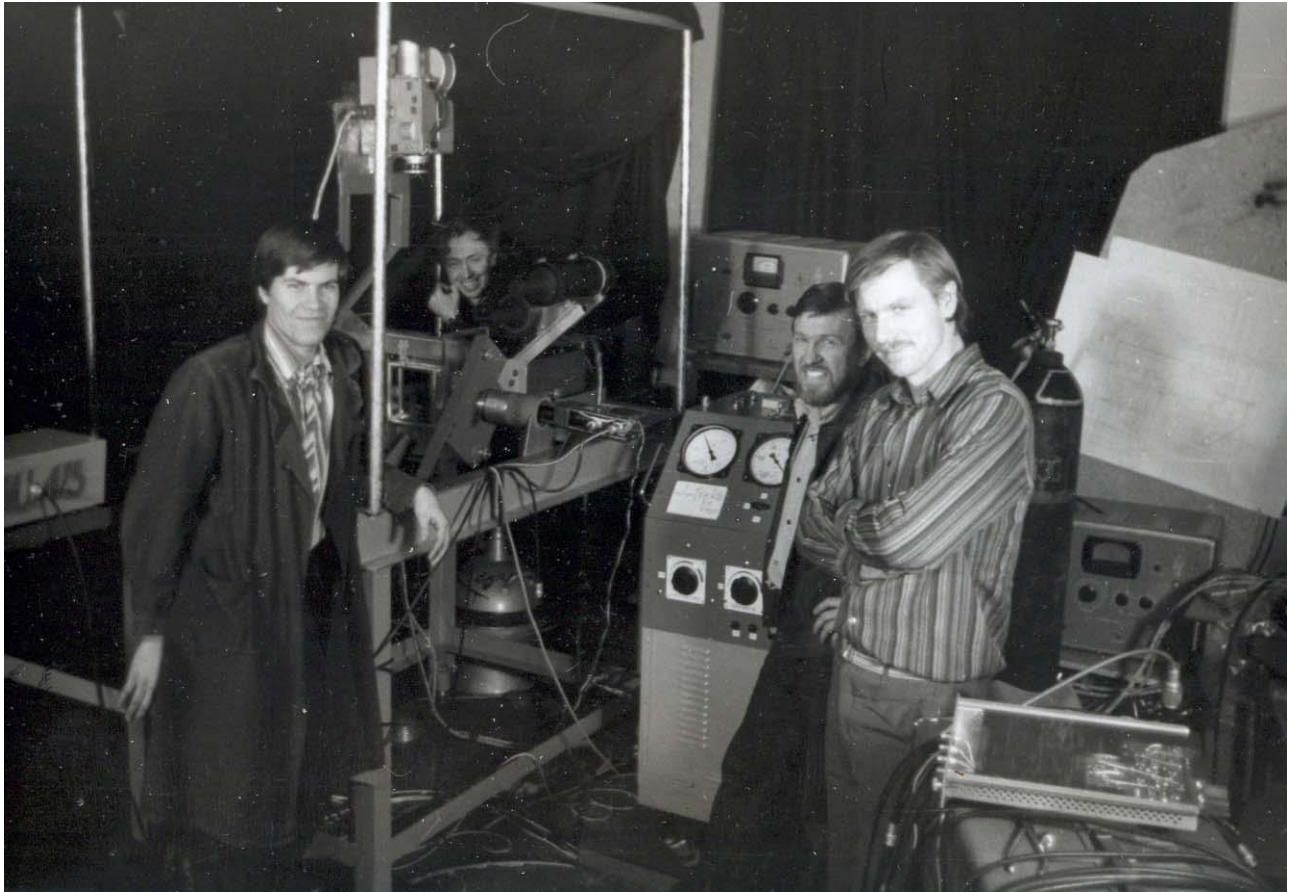
пузырьковая пропановая камера, тяжеложидкостная пузырьковая камера, оснащенная вершинным детектором в виде камеры Вильсона, который был размещен в объеме пузырьковой камеры, автономная пузырьковая камера (основные исполнители – М.В. Стабников, В.Д. Лебедев, Л.В. Баканов, К.Н. Ермаков, В.В. Пашук, Е.Н. Соловьев), голографическая пузырьковая камера и голографические стримерные камеры с различным, в т. ч. водородным, наполнением (основные исполнители – Б.Г. Турухано, Н. Турухано, В.Д. Лебедев, Л.В. Баканов, В.В. Добырин).

На ряд этих установок были получены авторские свидетельства, а некоторые из них были отмечены медалями ВДНХ СССР.

В 1962 г М.В. Стабниковым было организовано сотрудничество с Камерным отделом ЛВЭ ОИЯИ (рук. М.И. Соловьев). Оно развивалось как по линии совместной обработки экспериментального материала (сначала с 24 л пропановой пузырьковой камеры, а затем с 2-метровой камеры), так и в направлении оказания методической помощи при конструировании и изготовлении в филиале ФТИ пропановой камеры.



Группа М.В. Стабникова (фото от 7 ноября 1962 г.). Слева направо: А.П. Граевский, супруга В.В. Иванова, Г.В. Стабникова, М.В. Стабников, Татьяна Степановна (будущая Ермакова), В.Д. Лебедев, родственница В.Д. Лебедева, В.В. Иванов, Н. Турухано, Б.Г. Турухано, К.Н. Ермаков (присел), Л.В. Баканов (с дочкой), И.М. Баканова, Лилиан Исааковна (будущая Пашук), В.В. Пашук



Сотрудники сектора мезоядерных реакций: (слева направо)
А.Г. Калимов, О.В. Лобанов, В.И. Тараканов, В.С. Козлов
у стенда испытаний лазерной стримерной камеры



Л.В. Баканов (слева), В.Д. Лебедев и К.В. Черкунова у гибридной газожидкостной пузырьковой камеры (ГГЖПК)



Участники сборки ГГЖПК: (слева направо) И.И. Иванов, Е.Н. Соловьев, В.С. Олейник, В.П. Крыков, А.Ф. Найденков, П.М. Савоненко, К.В. Черкунова, А.С. Иванищев, О.В. Лобанов, В.В. Царьков, А.М. Стуглев, Л.В. Баканов, В.Д. Лебедев

Поскольку методики, на которые ориентировался коллектив, были следовыми, это вызвало необходимость разработки устройств для просмотра и измерений отобранных фотоснимков. Для решения задач по этому направлению деятельности было организовано в 60–70-е гг. сотрудничество с ЛВТА ОИЯИ (Мороз В.И. и др.). В результате этого сотрудничества усилиями наших сотрудников (В.В. Добырин, Б.Г. Турухано, А.И. Платунин, Д.А. Асфендиаров и др.) был создан просмотрово-измерительный центр и соответствующее программное обеспечение, адаптированное к нашим экспериментальным установкам (К.Н. Ермаков, Т.Я. Родд, Е.А. Котиков и др.). На этом оборудовании обрабатывались материалы как с наших камер, так и материалы с упомянутых камер ЛВЭ ОИЯИ (К.Н. Ермаков, Т.Я. Родд, М.Г. Тверской и др.).



Р.А. Монастырная в измерительном центре

Сектор длительное время участвовал в международной коллаборации 2-метровой пропановой пузырьковой камеры (председатель – М.И. Соловьев). Целью совместных исследований являлось изучение адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий в разных аспектах при использовании камерной методики. В дальнейшем это оборудование было использовано при обработке filmовой информации, полученной на водородно-дейтериевой камере ЛФВЭ при облучении ее на синхроциклотроне ЛИЯФ.

В 1965 г. по предложению академика Б.П. Константинова в секторе была начата работа научно-практического характера, связанная с изучением радиационных процессов, сопровождающих прохождение заряженных частиц высокой энергии через разные материалы и различные изделия, а также с исследованием радиационной стойкости электронной аппаратуры, разработкой моделей для оценки вероятностей отказов в разных микросхемах, облучаемых быстрыми адронами (В.В. Пашук, В.В. Мирошкин, М.Г. Тверской, Э.И. Аницой, В.В. Лысенко, О.В. Лобанов). До пуска нашего ускорителя при решении задач научно-практического характера широко использовались ускорительные возможности ОИЯИ и Харькова (В.В. Пашук, В.С. Олейник, В.В. Мирошкин, Э.И. Аницой).

В секторе также была разработана и реализована аппаратура для анализа различных газовых смесей и взрывчатых веществ; разработана и применена для дефектоскопии листовая пузырьковая камера (В.С. Олейник, В.Д. Лебедев, Л.В. Баканов, А.Ф. Найденков).



А.Ф. Найденков, М.Г. Тверской, Е.А. Котиков и В.В. Пашук (слева направо) за обсуждением текущих результатов

В традиционных стримерных камерах (СК) регистрация трека заряженной частицы, прошедшей через объем камеры, обеспечивается за счет собственного излучения стримера путем его фотографирования на фотопленку. Из-за флуктуации плотности электронов не все стримеры развиваются одинаково: их яркость может отличаться на несколько порядков, что приводит к уменьшению пространственного разрешения СК и ограничивает набор рабочих газов в качестве ядерных мишеней, в частности, водорода. Для преодоления этих недостатков в 1970 г. М.В. Стабников и М.А. Томбак предложили альтернативный способ регистрации, освещая СК внешним источником света – лазером.

В течение 1971–1972 гг. отработывалась методика получения голограмм искровых разрядов в воздухе. Динамика развития искры изучалась как теньевым методом (однолучевая голограмма), так и получением двухлучевых голограмм. На основе полученного опыта к началу 1973 г. удалось осуществить голографическую регистрацию треков электронов в СК, наполненной гелием. Надо отметить, что в этот период работа по разработке методики голографической СК проводилась в тесном сотрудничестве с ЛЯП ОИЯИ (лаборатория Ю.А. Щербакова). Эта работа явилась, в определенном смысле, пионерской и показала принципиальную возможность регистрации стримеров методами голографии.

Следует отметить, что, судя по воспоминаниям М.В. Стабникова, в формировании программы деятельности сектора и ее реализации в первые годы становления сектора очень значимой была роль Б.П. Константинова. Именно он дал разрешение на проектирование пропановой пузырьковой камеры в КБ ФТИ, а при возникшей трудности с ее изготовлением на Ижорском заводе разрешил ее через председателя Ленинградского Совнархоза. С ним обсуждалась идея о применении лазерной техники и голографии для регистрации заряженных частиц в следовых приборах.

Коллектив сектора умел не только трудиться, но хорошо и дружно отдыхал. Были выезды на берег Финского залива, на Валдай, на совхозные поля и др..



М.В. Стабников (четвертый слева) с сотрудниками сектора в подшефном колхозе

В секторе зародилось увлечение подводной охотой и возникла идея организации воднолыжной секции. При поддержке Б.П. Константинова был приобретен катер, поставлен на Белое озеро в Гатчине. Инициативная группа (М.В. Стабников, К.А. Коноплев, Б.Г. Туруханов, С.П. Дмитриев, С.П. Мельников) быстро организовала секцию, которая в течение нескольких лет успешно работала.

В 1969 г. сектор изменил название и стал именоваться сектором радиационной физики высоких энергий ЛФВЭ. Данное изменение было вызвано тем, что в секторе расширилась работа научно-прикладного характера, связанная с радиационной физикой. Значительный крен в эту сторону явился одной из причин преобразования в 1972 г. сектора в отдел и вывода его по решению дирекции института из состава ЛФВЭ.



М.В. Стабников (в центре наверху) с сотрудниками
Отдела радиационной физики высоких энергий

Ядерная спектроскопия в ОФВЭ

Ю.Н. Новиков



Юрий Николаевич Новиков, д.ф.-м.н.,
заведующий Лабораторией физики
экзотических ядер



10.04.1910 - 09.01.1992 гг.

Эммануил Ефремович Берлович, д.ф.-м.н.,
создатель комплекса ИРИС

Временем отсчёта существования сектора Ядерной спектроскопии в ОФВЭ следует считать 1964 год, когда сформировалась группа физиков, начавшая работать в этой области под руководством Эммануила Ефремовича Берловича, перебазировавшегося из Физтеха в ЛИЯФ (тогда ещё филиал ФТИ им. А.Ф. Иоффе). В начале этого года в её состав входили В.В. Головин, Л.М. Куцентов, Ю.Н. Новиков, А.Г. Поляков, В.Г. Флейшер и механик В. Кочкин. Чуть позднее в состав сектора вошли Л.А. Вайшнене, П.П. Вайшнис, В.В. Лукашевич и В.К. Тарасов. Хотя ядерная спектроскопия в те далёкие времена ещё занимала видные позиции в ядерной науке, Эммануил Ефремович позволял себе заниматься и «посторонними» проблемами. Так, В. Лукашевич развивал близкую Э. Берловичу методику измерения времён жизни возбуждённых состояний ядер, перекочевавшую из Физтеха, тогда как В. Флейшер с химиком Л. Куцентовым занимался проблемами атома, а Ю. Новиков был занят разработкой физической программы сектора, готовившегося к работам на планировавшемся синхроциклотроне ЛИЯФ.

Планам сектора скоро было суждено измениться после того, как была получена информация от посетившего СССР в 1966 году датского физика

О.Б. Нильсена, обратившего наше внимание на строительство в ЦЕРНе (в Женеве) он-лайн электромагнитного масс-сепаратора, получившего название ISOLDE и базирующегося на ускорителе, аналогичном нашему строившемуся синхроциклотрону на энергию протонов 1 ГэВ. Когда же была получена информация о прошедшей в 1966 году конференции в Швеции под девизом «Почему и как нужно изучать ядра, удалённые от полосы бета-устойчивости», а затем в 1967 году были получены первые экспериментальные результаты на ISOLDE, стало очевидным, что мы не только можем, но и должны построить у себя аналогичную систему. В то время профессор Берлович был одержим идеей измерения свойств нуклидов, интересных для астрофизики. Он предложил даже озаглавить наш будущий проект именем «Краб», но на обсуждении его на Учёном совете ЛФВЭ (предшественницы ОФВЭ) А.А. Воробьёв предложил последовать модному тогда примеру других проектов, названия которых отвечают аббревиатурному принципу. Тут же предложенное название ИРИС (Исследование Радиоактивных Изотопов на Синхроциклотроне) представилось самым уместным, и Алексей Алексеевич даже пошутил, что скоро мы будем ожидать от Эммануила Ефремовича вкусную Ириску.

Но чтобы получить эту Ириску нужно было заручиться финансовой и кадровой поддержкой этого начинания. Тогдашний директор Физтеха академик Б.П. Константинов рекомендовал заслушать предложение проекта на заседании бюро Отделения Ядерной физики Академии Наук. Он переговорил по этому вопросу с Академиком-секретарём Отделения М.А. Марковым, и доклад о проекте ИРИС был включён в повестку дня одного из заседаний. Было понятно, что академиком прежде всего будет интересоваться, каким физическим задачам посвящён проект, поэтому данному вопросу при подготовке к докладу было посвящено основное внимание. Совместно с Ю. Новиковым Э. Берлович разработал физическую программу исследований на ИРИС, в выгодном свете отличающуюся от задач на ISOLDE, и включающей такие поисковые измерения, как предсказанные явления запаздывающего деления ядер, запаздывающего испускания ядер гелия и трития. Обращалось внимание на возможность испускания двух нейтронов вблизи границы нейтронной устойчивости. Отмечалась необходимость исследования тяжёлых нейтроноизбыточных ядер на предмет выяснения возможности образования сверхтяжёлых нуклидов в результате астрофизического r -процесса. Перечисленные исследования на ISOLDE не планировались. О наборе этих и других интересных физических ноу-хау Эммануилом Ефремовичем было доложено в мае 1968 г. на заседании бюро

Отделения ядерной физики РАН, в работе которого приняли участие ассы нашей науки академики М.А. Марков, А.И. Алиханов, С.Н. Вернов, В.П. Джелепов, Я.Б. Зельдович, Г.Н. Флёров, И.М. Франк. ЛИЯФ представляли В.М. Тучкевич, Л.А. Слив и Ю.Н. Новиков.

Удачное представление доклада и атмосфера доброжелательности открыли путь финансированию проекта в размере 2 млн. рублей на строительство специальной пристройки ко 2-му корпусу в ЛИЯФ и 70 тысяч долларов на покупку масс-сепаратора, а также существенному притоку новых сотрудников: В.Д. Витмана, Е.И. Игнатенко, Ю.Я. Сергеева, Ф.В. Мороза, Г.Г. Лемешко, к которым чуть позднее присоединились Л.Х. Батист, К.А. Мезилев и В.Н. Пантелеев. Участок электроники был существенно усилен приходом Ю.В. Ёлкина и Ю.С. Блинникова.

Как только был запущен синхроциклотрон, еще до окончания строительства пристройки ИРИС были начаты работы по спектроскопическому исследованию ряда короткоживущих нуклидов осмия и рения с использованием пневмопочты. Выбор этих элементов был predetermined тем, что они как тугоплавкие не могли быть получены на он-лайн установке ISOLDE в ЦЕРНе. Радиохимическими работами взялся руководить Евгений Иванович Игнатенко. Его способности руководить развились в дальнейшем на Мурманской АЭС, куда он перешёл работать, а оттуда он был взят в Росатом, где дослужился до чиновника очень высокого ранга (начальника Главка). К огорчению, его жизнь оборвалась в расцвете творческих и физических сил в результате ДТП. Со стороны физики работами на пневмопочте непосредственно руководил В.Д. Витман, опытный спектроскопист, перешедший к нам на работу из ВНИИМа. К этим же работам были привлечены Ф. Мороз и П. Вайшнис. Последний впоследствии, пройдя службу на Мурманской АЭС, занял пост в ранге министра в Литве. Оба молодых человека защитили кандидатские диссертации по этой тематике.

Пневмопочта, которая представляла собой систему из шлангов, через которую из главного зала ускорителя в измерительную комнату сжатым воздухом на расстояние многих десятков метров перегонялась облучённая мишень, была использована для поиска запаздывающего деления – явления, предсказанного на ИРИСе и впоследствии открытого экспериментально в ОИЯИ. Этими работами были заняты Л. Батист, Ю. Новиков и С. Орлов.

К концу 1974 года пристройка ИРИС была готова, и купленный масс-сепаратор был «утоплен» в многометровой защитной стене. При

непосредственном участии сотрудников Ускорительного отдела (И.А. Петрова и др.) был проведён пучок протонов в корпус ИРИС. Это событие было отмечено в канун нового года (см. фотографию). В двухэтажной пристройке разместились химические комнаты и лаборатория электроники, кабинеты для физиков и мехмастерская, а в измерительном зале начала монтироваться спектрометрическая аппаратура. На штатную единицу инженера-менеджера по запуску всего комплекса был принят Н.Д. Щиголев. Появились и окончившие вузы В.Г. Конев, Л.А. Левченко, С.Ю. Орлов и несколько позднее А.В. Попов. С отъездом Е. Игнатенко место химика занял В. Тихонов, который вместе с Ю.Я. Сергеевым и С.Д. Голос с энтузиазмом занялся созданием кипящей мишени раствора соли цезия, из которой выделялся ксенон. Первый же он-лайн эксперимент на установке ИРИС был осуществлён с использованием этой мишени. Был идентифицирован изотоп ^{118}Xe и измерено время его жизни – 3,8 минут. Это был большой успех, знаменовавший рождение первой и единственной в СССР он-лайн масс-спектрометрической системы. Об этом Ю.Н. Новиков от имени коллектива ИРИС сделал доклад на пленарном заседании всесоюзной конференции по ядерной физике в Баку в начале 1976 года.

Несомненный и быстрый успех в работе с масс-сепаратором начал притягивать различные группы исследователей из других лабораторий. Группа из Ленинградского университета (Ю.В. Наумов и А.А. Быков) предложила и осуществила установку больших кристаллов из Na(J) для измерений полного поглощения гамма-распада нуклидов с целью определения силовых функций бета-распада. Эта работа, проводимая на ИРИС с ведущим участием В. Витмана и Ф. Мороза, привела к обнаружению пигми-резонансов в структуре силовых функций.

Работой на масс-сепараторе заинтересовалась и группа из ОИЯИ (Дубна). С середины 70-х годов там началась реконструкция синхроциклотрона, приведшая к его многолетней остановке, и группа из отдела ядерной спектроскопии Лаборатории Ядерных Проблем, возглавляемая профессорами К.Я. Громовым и В.Г. Калининским, начала активное сотрудничество с группой ИРИС. Дубненцы внесли материальный вклад в виде «полого» ионного источника – сердца масс-сепаратора и движущегося коллектора (сначала «махалки», а затем и автоматического лентопротяжного устройства). На эксперименты в Гатчину приезжали группы сотрудников ОИЯИ в составе иностранных учёных из Польши, Чехословакии, Венгрии и Монголии. В совместных экспериментах были впервые открыты 15 новых нейтронодефицитных изотопов редкоземельных элементов и впервые

идентифицирован участок границы протонной устойчивости ядер. Материалы этих исследований вошли в кандидатскую диссертацию К.А. Мезилева и в докторскую диссертацию Ю.Н. Новикова, с успехом защищённых в Учёном совете ЛИЯФ.

Профессор Э. Берлович слыл в ЛИЯФ научным фантазёром (в хорошем смысле). Это свойство было под стать задачам изучения экзотических нуклидов, которыми занимался его сектор. И эта предрасположенность к необычным исследованиям привела его к мысли пригласить группу профессора В.С. Летохова из Института Спектроскопии РАН для создания лазерной установки по измерению изотопических сдвигов в ядрах методом резонансной ионизации, предложенного в ИСАН. Эта идея сослужила ключевую роль в будущей судьбе сектора, повлекшая за собой создание в ЛИЯФ первого (и пока единственного) в России он-лайн лазерно-ядерного комплекса, опыт работы на котором позволил группе ИСАН воспроизвести аналогичную установку в ЦЕРН (Женева) на ISOLDE. Она работает там и по сей день, и в исследованиях активно участвуют сотрудники ИРИС А.Е. Барзах, П.Л. Молканов, М.Д. Селиверстов и Д.В. Фёдоров.

С самого начала к работам с лазерным комплексом в ЛИЯФ приобщился В.Н. Пантелеев. Помимо самой лазерной установки, которую монтировали сотрудники ЛИЯФ и ИСАН, надо было создать соответствующий узел мишени-ионизатора на масс-сепараторе. В. Пантелеев принял решение использовать вариант комбинированной мишени, разработанный в ЦЕРНе, где он стажировался до этого пару месяцев. В дальнейшем этот вариант многократно усовершенствовался, и сейчас ИРИС является обладателем набора различных модификаций оригинальных массивных мишенных устройств. Один из вариантов планируется установить на реакторе ПИК в рамках проекта ИРИНА.

Весьма продуктивное развитие работ на лазерно-ядерном комплексе ИРИС было связано с приходом в сектор Георгия Дмитриевича Алхазова в качестве его руководителя. Оно происходило в коллаборации с группой немецких физиков-лазерщиков из Университета Марбурга. Они приезжали многократно и подолгу оставались в ЛИЯФ, охватывая своим присутствием не только интервал пучкового времени. Для укрепления «местного» контингента участников к работам был привлечён В.П. Денисов, который влился в коллектив ИРИС, перейдя из группы синхротрона ЛИЯФ вместе с Ю.М. Волковым и В.В. Ивановым. В. Денисов занимался каждодневной координацией работы группы. Позднее в физической группе появились

М.М. Трухин и И.Я. Чубуков, а в группе масс-сепаратора трудились Л.В. Крышень и А.А. Ахмонен.

Изменения, происходящие в стране на пороге 80-х – 90-х годов, не могли не коснуться судеб научных исследований в ПИЯФ, переименованного из ЛИЯФ.

От некоторых начинаний приходилось отказываться. Это касалось, например, планов участия сектора в исследовательских работах на строящемся реакторе ПИК. Авторским коллективом в составе А.Г. Дернятина, К.А. Мезилева, Ю.Н. Новикова и А.В. Попова был предложен проект «СОЛЯРИС»- установки масс-сепаратора на реакторе для получения и разделения продуктов деления. В отличие от реализуемого в настоящее время проекта ИРИНА, проект СОЛЯРИС предполагал использование «холодной» мишени в канале реактора в идеологии IGISOL, разработанной в Университете Ювяскюля (Финляндия), с которым была достигнута договорённость о сотрудничестве в проекте. Хотя СОЛЯРИС обсуждался на специальной сессии на школе физиков ПИЯФ, посвящённой предлагаемым исследованиям на реакторе ПИК, этим дело ограничилось, и его пришлось забыть.

В то же время перестроечные тенденции способствовали интенсивному развитию сотрудничества с зарубежными лабораториями. Первой ласточкой была Ускорительная лаборатория Университета Ювяскюля, с которой с 1990 г. началась весьма продуктивная многолетняя совместная работа. Затем последовала лаборатория на реакторе в Студсвике (Швеция) и ряд научных центров в Германии (Университет Гиссена, ГСИ в Дармштадте, Институт Макса Планка в Гейдельберге). В отличие от упомянутого ранее Университета Марбурга, из которого к нам в ЛИЯФ до перестроечных времён приезжала на эксперименты группа немецких лазерщиков, в новой волне международных научных связей явно преобладала обратная тенденция: наши сотрудники начали направляться в командировки в зарубежные страны. При этом основным вкладом Российской стороны оставались физические идеи, методические разработки, участие в экспериментах в зарубежных лабораториях, обработка и представление полученных результатов на конференциях и в публикациях. Первым проектом, в котором координатором (spokesperson) в совместной работе был Ю.Н. Новиков и который был одобрен Программным Комитетом ISOLDE в 1994 г., было предложение об идентификации протонного излучения нуклидом ^{73}Rb , важной для решения вопроса о протяжённости процесса

быстрого захвата протонов в астрофизических условиях (*rp*-процесса). Эксперимент был выполнен на установке ISOLDE (ЦЕРН) в 1996 г. В нём приняли участие Ю. Новиков и А. Попов. Соавтором публикации был и Д.М. Селиверстов, возглавивший лабораторию ИРИС, а затем и группу, выделившуюся из лаборатории. Судьбу последней взял в свои руки В.Н. Пантелеев, успешно руководящий ею и по сей день.

За последние два десятилетия многое изменилось и в структуре научных исследований по ядерной физике, и в самом содержании этих исследований. От сектора ИРИС отпочковались две лаборатории: «Короткоживущих ядер» (рук. В.Н. Пантелеев) и «Физики Экзотических ядер» (рук. Ю.Н. Новиков). У каждой имеется своя исследовательская программа и свои специфические планы на будущее. Их описанию может быть посвящена специальная статья наподобие этой. Целью же представленной работы было отразить мнение автора о том, как зарождалась ядерная спектроскопия в ОФВЭ, как она развивалась и преобразовывалась и каков был базис-научный и кадровый-который привёл нас к тому, что мы имеем сейчас. Отмечу лишь, что этот «базис» был востребован и признан, широко представлен в престижных изданиях, высоко оценён различными премиями, в том числе и международными. По результатам исследований были защищены одна докторская и десяток кандидатских диссертаций. ОФВЭ, как и институт, могут гордиться тем, что заложенные когда-то семена исследовательского процесса дали прекрасные всходы



На верхнем фото – отмечается запуск установки ИРИС. Слева направо- Э. Берлович (стоит слева), Л. Левченко, В. Витман, К. Мезилев (фотографирует), Ю. Ёлкин, А. Поляков, Т. Кольцова, В. Пантелеев, Ю. Новиков.

На нижнем фото – у пульта управления ИРИС С. Смольский, Ю. Блинников, Ю. Новиков и К. Мезилев.

Лаборатория короткоживущих ядер

В.Н. Пантелеев, А.Е. Барзах

Временем создания Лаборатории короткоживущих ядер ОФВЭ можно считать май 1964 года, когда под руководством Эммануила Ефремовича Берловича в составе Лаборатории Физики Высоких Энергий (ЛФВЭ) филиала Ленинградского Физико-Технического Института был образован Сектор ядерной спектроскопии. Как следует из первоначального названия лаборатории, Э.Е. Берлович считал главной задачей созданного им научного коллектива спектроскопические исследования ядер, удаленных от полосы бета-стабильности, которые предполагалось получать на пучке протонного синхроциклотрона, строившегося в филиале ЛФТИ в Гатчине. Строительство синхроциклотрона с энергией протонов 1 ГэВ было начато в 1959 году, а в конце 1967 года состоялся пробный пуск ускорителя. Эксплуатация синхроциклотрона для проведения физических экспериментов началась с апреля 1970 года. Работы группы ядерной спектроскопии сектора Э.Е. Берловича начались под руководством Владимира Давидовича Витмана на пучке ускорителя практически с самого начала его работы. Радиохимической группой сектора под руководством Е.И. Игнатенко был разработан метод, позволяющий осуществлять выделение производимых на пучке радионуклидов из жидких нагреваемых мишеней с быстрой их транспортировкой пневмопочтой в специальное помещение для измерений соответствующих гамма-спектров. Результатами этих работ, являвшихся одними из первых на пучке нашего синхроциклотрона, были построение до этого неизвестных схем распада нейтронно-дефицитных радионуклидов Ta, W, Re, Os, а также обнаружение и идентификация новых изотопов ^{170}Re , ^{171}Re , ^{172}Re , ^{173}Re .

Э.Е. Берлович был также автором идеи создания на пучке синхроциклотрона ЛИЯФ (с 1971 г. институт стал самостоятельной организацией, получившей название Ленинградский Институт Ядерной Физики) ISOL установки, использующей “в линию” на пучке ускорителя масс-сепаратор для электромагнитного разделения получаемых радиоизотопов и последующего их экспрессного исследования. Подобный метод уже успешно использовался с середины шестидесятых годов для получения и исследования экзотических короткоживущих ядер на установке ISOLDE (CERN). Также подобные on-line системы строились в Германии, США, Швеции и Канаде. Для осуществления этой идеи по инициативе Э.Е. Берловича в 1973 г. в Швейцарии был закуплен электромагнитный масс-сепаратор, подобный использовавшемуся на установке ISOLDE. Усилиями сотрудников Лаборатории короткоживущих ядер данный масс-сепаратор был собран и запущен на пучке синхроциклотрона ЛИЯФ в декабре 1975 г. Главным координатором работ по запуску и наладке on-line установки на пучке ускорителя был Н.Д. Щиголов. В то время это была единственная в СССР (а в настоящее время это единственная в России) ISOL установка, работающая в линию на пучке. Установка получила и до настоящего времени сохранила название ИРИС (Исследование Радиоактивных Изотопов на Синхроциклотроне). Первые результаты по on-line производству и исследованию нейтронно-дефицитных ядер ксенона были получены и опубликованы в 1976 г. В это время началось и в течение следующих нескольких лет продолжилось интенсивное сотрудничество с Лабораторией Ядерных Проблем (Дубна) по исследованию на установке ИРИС нейтронно-дефицитных ядер области редкоземельных элементов. Научным руководителем и организатором совместных с Дубной работ был Ю.Н. Новиков. На установке ИРИС была использована очень “быстрая” конструкция совмещенной мишени – ионного источника, разработанная в ЛЯП ОИЯИ. Наиболее важными результатами данного сотрудничества было определение масс большого количества нейтронно-дефицитных радионуклидов редкоземельной области по измеренным впервые энергиям альфа-линий, идентификация в этой области границы протонной устойчивости, обнаружение и идентификация свыше десятка новых изотопов.

В 1978 г. заведующим лабораторией, которая тогда стала называться Лабораторией короткоживущих ядер ОФВЭ ПИЯФ, стал Георгий Дмитриевич Алхазов. С приходом Г.Д. Алхазова в лаборатории начались интенсивные исследования силовых функций β^+ распада с помощью спектрометра полного поглощения γ -лучей. Руководителем спектроскопической группы был Владимир Давидович Витман. Были измерены силовые функции β^+ -распада десятков нейтронно-дефицитных изотопов редкоземельной области. Было показано, что силовые функции имеют хорошо выраженные максимумы, структура которых может быть проанализирована на основе расчетов по оболочечной модели. Также на основе использования данного спектрометра была разработана методика измерений энергий β -распада нейтронно-дефицитных ядер. С помощью этого метода были измерены граничные энергии β -распада нескольких десятков ядер нейтронно-дефицитной области.

Задуманная Э.Е. Берловичем идея использования лазерных методов для исследования получаемых в режиме on-line удаленных ядер была в полной мере осуществлена под руководством Г.Д. Алхазова. В 1979 г. было начато сотрудничество с Институтом Спектроскопии РАН (Троицк) по строительству “в линию” с установкой ИРИС лазерной установки для измерения изотопических сдвигов и сверхтонкой структуры получаемых на установке ИРИС удаленных от полосы бета-стабильности радиоактивных изотопов. Метод резонансной многоступенчатой ионизации, предложенный в Институте Спектроскопии для детектирования отдельных атомов, был впервые использован в ПИЯФ на установке ИРИС для получения и исследования радиоактивных изотопов. Для этого была изготовлена и установлена на одном из ионных трактов специальная камера, где в танталовой капсуле, нагретой до высокой температуры, происходило переиспарение имплантированных радиоактивных ионов в виде нейтральных атомов и где происходило их взаимодействие с лазерным излучением. Руководителем группы лазерной спектроскопии был В.П. Денисов.



Сотрудники ИРИС у лазерной установки. Слева направо: Г.Д. Алхазов, Э.Е. Берлович, В.П. Денисов, В.С. Иванов, Ю.С. Блинников, А.Г. Дерягин, А.Е. Барзах.

Результатом данного плодотворного сотрудничества явилось исследование изотопической зависимости поведения среднеквадратичных зарядовых радиусов, а также

электромагнитных моментов цепочек нейтронно-дефицитных изотопов редкоземельных элементов $^{132-143}\text{Nd}$, $^{138-145}\text{Sm}$, $^{146-152}\text{Gd}$, $^{138-151, 155-159}\text{Eu}$, $^{147-159}\text{Tb}$, $^{152-165}\text{Ho}$, $^{157-172}\text{Tm}$.

Параллельно на масс-сепараторе установки ИРИС в сотрудничестве с группой из Марбургского Университета под руководством проф. Г. Хюнерманна методом коллинеарной лазерно-ионной пучковой спектроскопии высокого разрешения проводились исследования зарядовых радиусов и электромагнитных моментов ядер изотопов Eu, Pm и Sm в районе скачка деформации вблизи числа нейтронов $N = 90$. В частности, для ^{154}Eu был обнаружен инверсный четно-нечетный эффект в зарядовых радиусах (радиус нечетно-нейтронного ядра ^{154}Eu оказался больше среднеарифметического значения радиусов его четно-нейтронных соседей, ^{153}Eu и ^{155}Eu). Интерпретация данного результата как указания на возможность присутствия октупольной деформации в изотопах европия вызвала оживленную дискуссию. В ходе дальнейших исследований с помощью метода резонансной ионизации на масс-сепараторе ИРИС было установлено, что возможная область октупольной нестабильности в нейтронно-избыточных ядрах европия ограничена только областью массовых чисел $A = 153-155$, и уже при $A = 156$ инверсный четно-нечетный эффект не наблюдается. Систематические исследования зарядовых радиусов и электромагнитных моментов нейтронно-дефицитных изотопов в редкоземельной области обеспечили возможность изучить изотопическую и изобарическую зависимость среднеквадратичных зарядовых радиусов при пересечении оболочки с магическим числом нейтронов $N = 82$ и вблизи точки «фазового перехода» от сферических к деформированным ядрам при $N = 90$. Оказалось, что характер этого «фазового перехода» – плавный или скачкообразный – непосредственно связан с влиянием подоболочки с атомным числом $Z = 64$ и зависит от удаленности числа протонов в рассматриваемой изотопической цепочке от $Z = 64$. Теоретический анализ полученных экспериментальных данных (расчет по методу Хартри-Фока и в рамках макроскопически-микроскопического подхода с использованием метода оболочечной поправки Струтинского) показал, что изотопическая зависимость зарядовых радиусов очень чувствительна к выбранному варианту сил Скирма и поэтому полученные данные целесообразно учитывать при фиксации оптимальной параметризации эффективных сил.

С момента запуска установки ИРИС в масс-сепараторной и радиохимической группах под руководством В.Н. Пантелеева и В.И. Тихонова начались разработки мишенно-ионных устройств для эффективного получения радиоизотопов большого числа элементов Периодической Системы. Начало наиболее заметному прогрессу в области разработки и внедрения новых мишеней и ионных источников на установке ИРИС было положено в 1979 г., после поездки Г.Д. Алхазова и В.Н. Пантелеева под руководством директора ОФВЭ А.А. Воробьева в ЦЕРН на установку ISOLDE, в результате которой началось сотрудничество ИРИС–ISOLDE. Наиболее значительным результатом данной поездки были ознакомление с мишенно-ионными устройствами на ISOLDE и работа с ними, в результате чего в рамках установленного сотрудничества одно из мишенно-ионных устройств установки ISOLDE было передано в наш институт для его запуска и использования на масс-сепараторе ИРИС. Запуск нового мишенно-ионного устройства, имеющего достаточно сложную конструкцию, послужил толчком к интенсивным разработкам новых мишеней и ионных источников для on-line получения удаленных ядер. К настоящему времени на установке ИРИС разработаны мишени и ионные источники, позволяющие получать радиоизотопы большинства элементов Периодической системы от Li до Ra.

В 1984 г. В.Н. Пантелеевым, Г.Д. Алхазовым и Э.Е. Берловичем был предложен и запатентован метод лазерного ионного источника для селективного получения радиоактивных изотопов. Впервые в экспериментах с радиоактивными изотопами было показано, что использование метода многоступенчатой лазерной резонансной ионизации в полости высокотемпературного источника обеспечивает значительное (до нескольких

порядков) увеличение эффективности ионизации. При этом, в отличие от большинства источников иного типа, лазерный ионный источник обеспечивает высокую селективность разделения изобар благодаря резонансному характеру ионизации. Спустя несколько лет метод лазерного ионного источника впервые был использован на установке ИРИС для лазерно-спектроскопических исследований радиоактивных ядер – измерений сверхтонкой структуры и изотопических сдвигов. В настоящее время метод лазерного ионного источника и резонансной лазерной спектроскопии в лазерном источнике, предложенный в нашем институте, используется на ведущих мировых ISOL системах ISOLDE (ЦЕРН) и TRIUMF (Ванкувер, Канада). Аналогичные лазерные установки строятся на ISOL системах в Японии, Китае, Италии, Франции.

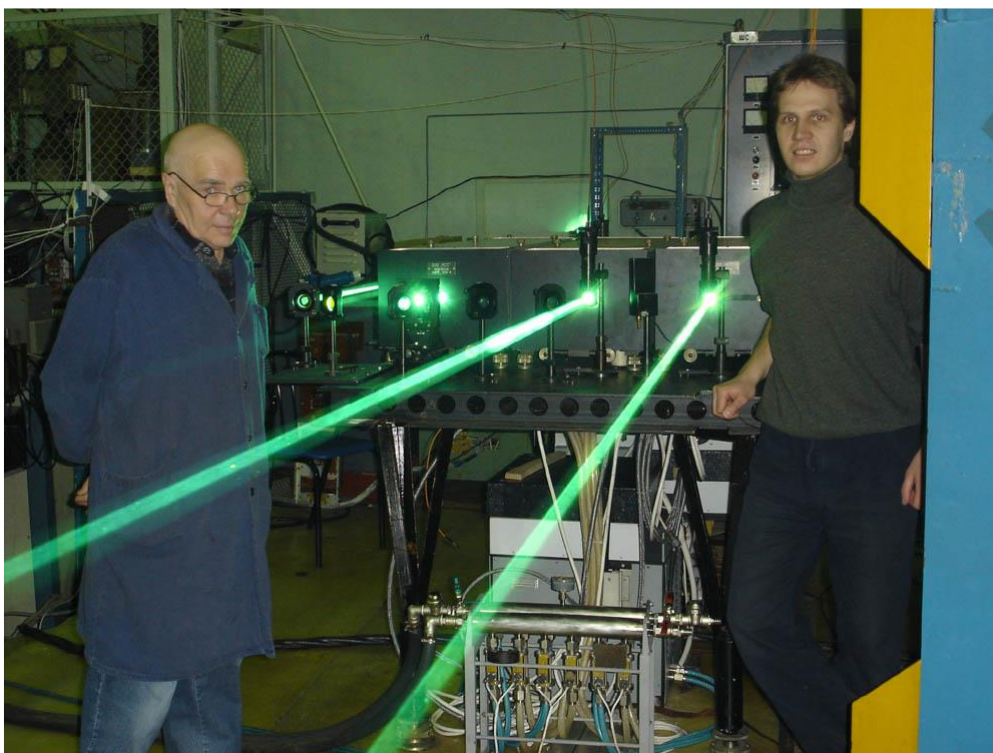
В 1993 г. заведующим Лабораторией короткоживущих ядер стал Дмитрий Михайлович Селиверстов. С приходом Д.М. Селиверстова был придан дополнительный импульс сотрудничеству ИРИС–ISOLDE. Сотрудникам Лаборатории короткоживущих ядер принадлежала и до настоящего времени принадлежит одна из ведущих ролей в международной коллаборации ISOLDE. При участии сотрудников лаборатории на установке ISOLDE был запущен метод лазерной спектроскопии в лазерном ионном источнике. Вплоть до настоящего времени научная группа ИРИС (ОФВЭ, ПИЯФ) участвует в большинстве экспериментов с использованием лазерного ионного источника и во всех работах, использующих метод лазерной спектроскопии в лазерном ионном источнике для исследования зарядовых радиусов и электромагнитных моментов удаленных ядер. Научное руководство лазерно-спектроскопическими работами на ISOLDE осуществляет А.Е. Барзах.

В период 1996–2002 гг. в Лаборатории короткоживущих ядер были проведены и успешно завершены два МНТЦ проекта по разработке и исследованию различных мишеней из фольг тугоплавких металлов, а также из карбида урана высокой плотности. Работы по исследованию мишеней из карбида урана высокой плотности, приготовленных методом порошковой металлургии, были продолжены на установке ИРИС в сотрудничестве с учеными из лабораторий INFN (Леньяро, Италия), GANIL (Каен, Франция), ISOLDE (ЦЕРН). Руководителем работ по исследованиям мишенных материалов и разработке новых тугоплавких мишеней был В.Н. Пантелеев. В результате проведенных работ были исследованы тугоплавкие мишенные материалы на основе монокарбида урана высокой плотности, имеющие рекордно высокие температуры плавления (2600 °С). Также были изготовлены и протестированы рабочие прототипы мишенных устройств на основе исследованных мишенных материалов. В ходе проведенных исследований была разработана методика измерения эффективности ионизации и времени задержки изучаемых изотопов в мишени. Была доказана ее адекватность и точность в определении этих важнейших параметров, определяющих возможности мишеней для получения наиболее удаленных от полосы стабильности короткоживущих ядер. В частности, было продемонстрировано, что для производства таких ядер (в нейтронно-избыточной области) определяющей является реакция вторичных нейтронов с веществом мишени. Результаты проведенных исследований будут использованы при разработке мишеней для установок на пучках бомбардирующих частиц высокой интенсивности.



В.Н. Пантелеев (второй слева) с представителями лабораторий INFN (Леньяро, Италия), GANIL (Каен, Франция) и ISOLDE (ЦЕРН). Обсуждение результатов экспериментов по исследованию мишеней на установке ИРИС

В 2003 г. Лабораторию короткоживущих ядер возглавил В.Н. Пантелеев. В это время на установке ИРИС активно продолжались работы по исследованию новых типов ионно-мишеневых устройств (высокотемпературная совмещенная мишень-источник, высокотемпературная мишень из монокарбида урана, высокотемпературная мишень из карбонитрида урана) и завершались лазерно-спектроскопические исследования нейтронно-дефицитных радионуклидов редкоземельной области, близких к “полумагическому” ядру ^{146}Gd ($^{153-155}\text{Yb}$, $^{153-154}\text{Tm}$, $^{143-145}\text{Gd}$, $^{137-138}\text{Eu}$). Для перехода в другие интересные для физики ядра области было необходимо создание новой лазерной системы с каналами ультрафиолетового излучения, позволяющего ионизовать атомы изотопов элементов с потенциалами ионизации более 6 эВ. Для этой цели в 2004 г. был разработан проект, а в 2006 г. началось строительство новой высокоэффективной лазерной установки, имеющей канал в области ультрафиолетового излучения. В 2009 г. был произведен физический запуск данной установки, получившей название Универсальная Лазерная Ионизационно-Спектроскопическая система (УЛИСС).



Сотрудники Лаборатории короткоживущих ядер В.С. Иванов и П.Л. Молканов за настройкой системы лазеров накачки установки УЛИСС

В 2010–2012 гг. на новой установке УЛИСС в режиме “on-line” были проведены измерения выходов, изотопических сдвигов и сверхтонкой структуры цепочки нейтронно-дефицитных изотопов $^{183-209}\text{Tl}$. Определены изменения среднеквадратичных зарядовых радиусов и магнитные моменты для этих изотопов. Особо следует отметить обнаружение деформированности изомерного состояния ^{186}Tl со спином $I = 10$, тем самым впервые было доказано сосуществование «нормальных» (сферических) и «внедренных» (деформированных) состояний в нечетно-нечетном ядре. В 2012 г. была разработана новая мишень из монокарбида урана высокой плотности для получения нейтронно-дефицитных изотопов висмута. В 2014–2017 гг. на установке ИРИС были получены новые результаты для 17 изотопов и изомеров Вi. Была продемонстрирована деформированность «внедренных» состояний со спином $I = 1/2$ в $^{193, 195, 197}\text{Bi}$. Обнаружено заметное отклонение хода зарядовых радиусов у изотопов висмута с $N < 110$ от аналогичной изотопической зависимости для сферических изотопов свинца, что указывает на плавный рост деформации для $^{193-187}\text{Bi}$. Этот вывод, не предсказанный теорией и не предполагавшийся исходя из анализа полученных ранее экспериментальных данных, вызвал большой интерес к продолжению изучения цепочки изотопов висмута, в результате чего соответствующие эксперименты были запланированы и проведены на ISOLDE при активном участии сотрудников лаборатории короткоживущих ядер.

Параллельно с работами на установке ИРИС продолжалась активная работа в коллаборации с ISOLDE. В 2006–2018 гг. были получены и частично опубликованы данные по изотопическим сдвигам и сверхтонкой структуре изотопов $^{182-190}\text{Pb}$, $^{191-218}\text{Po}$, $^{179-184}\text{Tl}$, $^{194-218}\text{At}$, $^{177-185, 207-208}\text{Hg}$, $^{187-201, 212-218}\text{Bi}$ и $^{176-182}\text{Au}$. Из результатов, полученных в этих экспериментах, особо выделим следующие.

1. Плавный ход зарядовых радиусов изотопов свинца как до, так и после середины нейтронной оболочки ($N = 104$), указывающий на сохранение сферической формы в этих ядрах, несмотря на наличие низколежащих деформированных структур.
2. Неожиданно ранний (при $N < 114$) и плавный рост деформации для изотопов полония и астата, интерпретируемый как результат смешивания сферических и деформированных

конфигураций и требующий для своего описания выхода за рамки метода Хартри-Фока (Beyond Mean Field).

3. Инверсный четно-нечетный эффект в радиусах ядер $^{217-219}\text{At}$, свидетельствующий о влиянии октупольных степеней свободы на размеры и форму этих ядер. Ранее считалось, что эти ядра астата лежат вне области октупольной нестабильности.

4. Указание на неаксиальную форму ядер $^{177,179}\text{Au}$, полученное из анализа магнитных моментов этих ядер, а также факторов задержки альфа распада материнских ядер таллия.

5. Исчезновение эффекта чередования формы для изотопов ртути с $N < 101$: если $^{181,183,185}\text{Hg}_{101,103,105}$ сильно деформированы, а $^{182,184,186}\text{Hg}$ имеют форму, близкую к сферической, то при $N < 101$ как четные, так и нечетные ядра ртути близки к сферическим.

6. Эффект изменения порядка заполнения оболочек, обнаруженный в результате анализа спинов и магнитных моментов ^{176}Au , ^{170}Tl и $^{177,179}\text{Hg}$, и т.д.

Помимо экспериментов по лазерной спектроскопии (измерение изотопических сдвигов и сверхтонкой структуры атомных переходов), на установке ISOLDE было проведено большое количество иных работ с использованием лазерного ионного источника, в которых активное участие приняли сотрудники Лаборатории. Особо отметим обнаружение нового неожиданного явления – асимметричного запаздывающего деления ядра ^{180}Tl . Впервые было определено массовое распределение осколков, образующихся при делении, показывающее, что осколки группируются в районе массовых чисел $A = 80$ и $A = 100$. Эта асимметрия противоречит всем имеющимся данным по низкоэнергетичному делению ядер легче $A_с$. Объяснение наблюдаемой аномалии требует создания динамической модели деления с детальным учетом как макроскопических, так и микроскопических степеней свободы. Эксперименты по исследованию запаздывающего деления в этой области нуклидной карты были продолжены, получены данные для ^{178}Tl , ^{196}At , ^{188}Bi , ^{200}Fr , свидетельствующие о мультимодальном характере деления этих ядер – деление происходит как по симметричному, так и по асимметричному каналам.

Лаборатория короткоживущих ядер также занимается разработкой двух новых проектов. На одном из горизонтальных каналов реактора ПИК разрабатывается проект уникальной ISOL установки с интенсивностью потока нейтронов на мишени до 5×10^{13} н/см²с. Использование ISOL комплекса ИРИНА (Исследование Радиоактивных Изотопов на Нейтронах) на канале высоко-поточного реактора ПИК обеспечит самые высокие в мире выходы нейтронно-избыточных ядер, что позволит значительно расширить область исследуемых изотопов, в частности, продвинуться в малоисследованную область изотопов с максимальным избытком нейтронов, что важно как для теории, так и для уточнения астрофизических моделей. Использование ионной ловушки ПИТРАП на одном из ионных трактов установки ИРИНА позволит измерять с высокой точностью (несколько кэВ) массы большого массива ядер, удаленных от полосы бета-стабильности в нейтронно-избыточную область. С использованием высокочувствительного метода резонансной лазерно-ионизационной спектроскопии будут проводиться измерения зарядовых радиусов и электромагнитных моменты большого числа ядер в наиболее интересных для ядерной физики областях – области дважды магического ядра ^{132}Sn и области ядер с магическим числом нейтронов $N = 50$ (нейтронно-избыточные изотопы Ge, Ga, Zn, Cu и Ni). Кроме того, на радиоизотопном комплексе ИРИНА планируется разработка новых методов получения сверхчистых радионуклидов для медицинского применения.

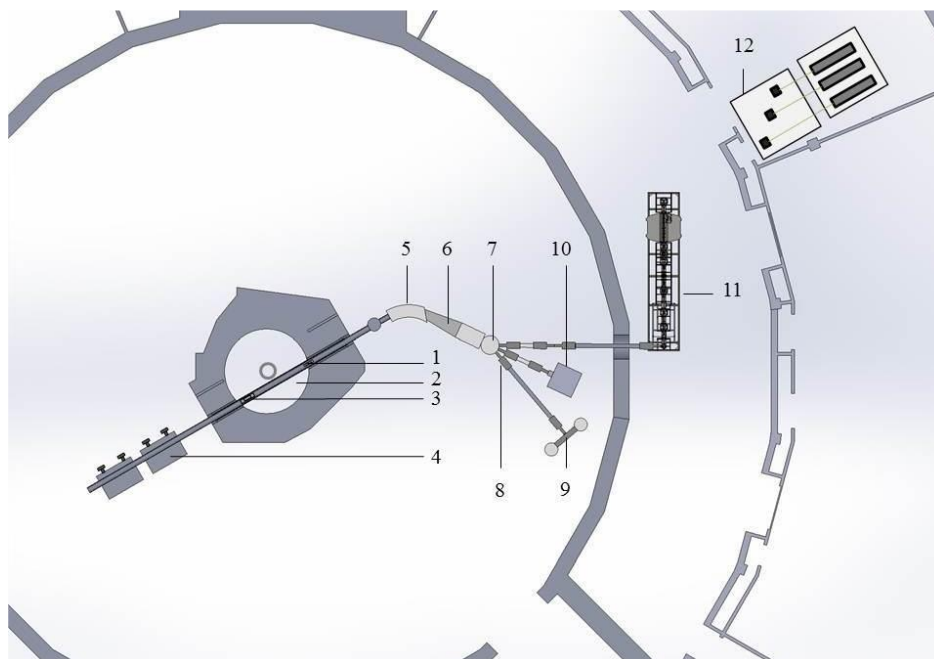


Схема масс-сепараторного лазерно-ядерного комплекса ИРИНА в экспериментальном зале реактора ПИК

1- система электростатических фокусирующих линз; 2 – водяной бак реактора; 3 – мишень-ионный источник; 4 – горячие камеры; 5 – магнит масс-сепаратора; 6 – дисперсионная и коллекторная камеры; 7 – камера разводки ионных пучков; 8 – ионные тракты с электростатическими фокусирующими линзами; 9 – лентопротяжное устройство; 10 – нейтронный детектор; 11 – система ловушек Пеннинга; 12 – лазерная установка

Лаборатория короткоживущих ядер принимает самое непосредственное участие в разработке на пучке циклотрона Ц-80, строительство которого завершено в ПИЯФ в 2014 г., проекта радиоизотопного комплекса РИЦ-80 (Радиоактивные Изотопы на циклотроне Ц-80) для производства широкого спектра медицинских радионуклидов. Данный комплекс будет иметь три мишенные станции, на одной из которых будет установлен электромагнитный масс-сепаратор для получения сверхчистых медицинских радиоизотопов. Энергия выведенного протонного пучка 40–80 МэВ и интенсивность до 200 мкА обеспечит самые широкие возможности получения медицинских радионуклидов и радиофарм-препаратов для диагностики и терапии, которых до настоящего времени не было на других российских установках. По своим параметрам и возможностям РИЦ-80 будет соответствовать самым лучшим зарубежным центрам по производству радиоизотопов для медицины. По возможности получения сверхчистых радионуклидов данная установка не будет иметь мировых аналогов. В настоящее время в лаборатории с использованием установки ИРИС разрабатываются инновационные методы получения изотопов Cu-64,67, Ge-68, Sr-82, Mo-99, Lu-177, Ra-223,224, Ac-225, а также других медицинских радионуклидов, используемых для диагностики и терапии.



Циклотрон Ц-80. На переднем плане виден поворотный магнит, направляющий протонный пучок вниз в подвал экспериментального зала к мишенным станциям радиоизотопного комплекса РИЦ-80



Подвал экспериментального зала с тремя протонными трактами к мишенным станциям РИЦ-80

Исследование нуклон-нуклонного взаимодействия в ПИЯФ

В.Г. Вовченко



Руководитель группы нуклон-ядерных взаимодействий, д.ф.-м.н.

Виль Григорьевич Вовченко

(1931 – 2017)

В 1966 г. в ЛФВЭ была организована группа «Нуклон-нуклонных взаимодействий» под руководством В.Г. Вовченко. В 1980 г. эта группа была преобразована в сектор «Нуклон-нуклонных взаимодействий». В 1992 г. была организована лаборатория «Поляризационных эффектов» (ЛПЭ). В 2003 г. из части ЛПЭ была создана Группа нуклон-ядерных взаимодействий, рук. В.Г. Вовченко.

Исследование нуклон-нуклонного взаимодействия является одним из основных источников получения количественной информации о ядерных силах. Из опытов по упругому рассеянию нуклонов с помощью развитого формализма матрицы рассеяния могут быть восстановлены силы, описывающие взаимодействие при различных ориентациях спинов нуклонов. Надежным инструментом восстановления матрицы рассеяния является фазовый анализ экспериментальных данных.

Для реализации программы исследования упругого pp -рассеяния на синхроциклотроне ПИЯФ был создан поляризованный протонный пучок с тремя направлениями вектора поляризации (А. Жданов, О. Федоров, А. Шведчиков). На основе измерений поляризации протонов, рассеянных на ядрах бериллия, углерода и др., была разработана модель расчета анализирующей способности углерода, которая была измерена в диапазоне 600–1000 МэВ. Результаты этих измерений и расчетов применяются в экспериментах ПИЯФ и других лабораторий.

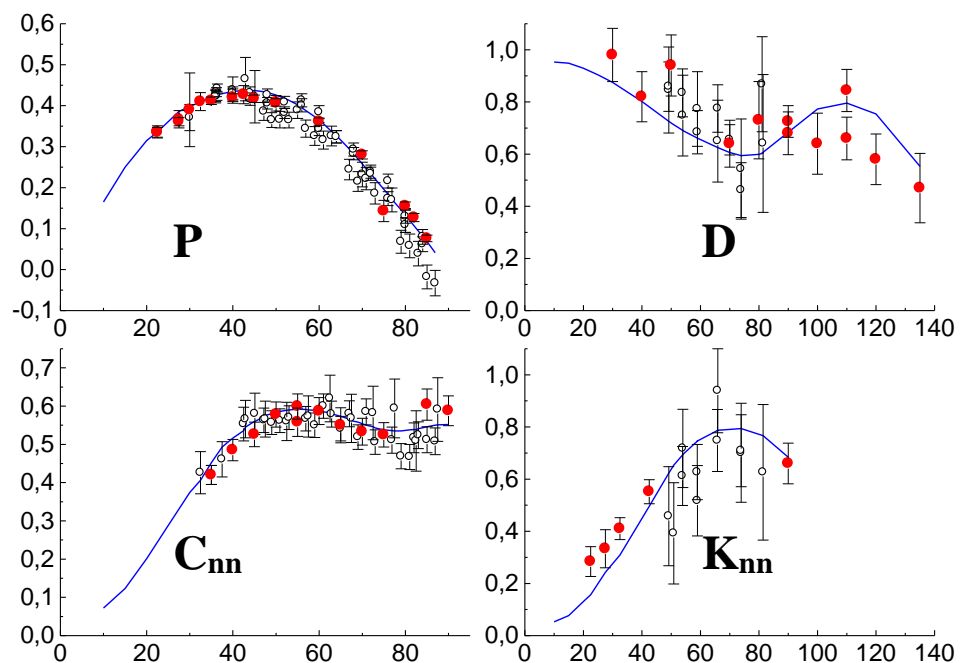
Впервые в области энергии протонов 1 ГэВ на жидководородной мишени были измерены поляризационные параметры тройного рассеяния D , R и A , что соответствует измерениям 6 независимых характеристик pp -рассеяния в диапазоне углов 0 – 90° с.ц.м.

В опытах по исследованию поляризационных характеристик нуклон-нуклонного рассеяния кроме поляризованного пучка протонов применялась поляризованная протонная мишень (Ю. Казаринов, А. Ковалёв). Это позволило с высокой точностью измерить коэффициенты корреляции поляризаций второго и третьего ранга. Благодаря поляризованной протонной мишени был измерен ряд поляризационных параметров при меньших энергиях протонов, начиная с 690 МэВ, что позволило связать данные ПИЯФ с результатами других научных центров – Дубны (Россия) и Лос-Аламоса (США).

В мировую базу данных вклад ПИЯФ составляет 540 точек, из них на долю поляризационных параметров приходится 160 точек. Данные ПИЯФ использовались в фазовых анализах, выполненных как в ПИЯФ, так и в других научных центрах. Благодаря развитию методики восстановления амплитуды NN -рассеяния и накоплению экспериментальных данных был проведен окончательный анализ данных по pp -рассеянию в интервале 100–1300 МэВ (А. Поляков, О. Федоров).

По результатам работ по исследованию нуклон-нуклонного взаимодействия было опубликовано более 15 работ в журналах ЯФ, ЖТЭФ, Письма ЖТЭФ, Phys. Rev. Lett., Phys. Rev. Результаты работ докладывались на Международных конференциях и семинарах. Защищены 5 диссертаций к.ф-м.н. и 1 диссертация д.ф-м.н.

В качестве примера на рисунке приведены результаты отдельных измерений ПИЯФ в сравнении с мировыми данными.



Результаты измерений зависимости от угла рассеяния в с.ц.м. поляризационных параметров pp -рассеяния в области энергий 1 ГэВ. Сплошные кружки (красные) – результаты измерений ПИЯФ, полые кружки – данные других научных центров. Сплошные линии – результаты фазового анализа

Исследование деления тяжелых ядер протонами промежуточных энергий

В. Вовченко, А. Котов, Л. Вайшнене, Ю. Честнов

Потребность в информации о процессе деления тяжелых ядер частицами промежуточных энергий и по сей день остается актуальной. Интерес к делению вытекает как с точки зрения фундаментальных, так и прикладных проблем ядерной физики. Экспериментальные исследования энергетической зависимости сечений деления тяжелых ядер протонами промежуточных энергий важны для понимания как процесса деления, так и механизма нуклон-ядерного взаимодействия. Они позволяют получить информацию о свойствах высоковозбужденных ядер, таких как температурная зависимость параметров плотности уровней ядер и барьеров деления. Из прикладных задач физики эти данные наиболее необходимы для разработки новых концепций производства энергии с помощью подкритичных реакторов, управляемых ускорителями протонов (ASD-метод), а также для разработки технологий трансмутации ядерных отходов и радиационной защиты ускорителей и космических аппаратов. В области промежуточных энергий протонов данные по сечениям деления крайне фрагментарны и противоречивы, а для таких ядер как ^{239}Pu и ^{233}U , практически отсутствуют.

Для решения этих задач на синхроциклотроне ПИЯФ РАН был создан пучок протонов переменной энергии от 200 до 1000 МэВ с шагом 100 МэВ (Г. Рябов, Е. Иванов). Впервые единой методикой измерены энергетические зависимости полных сечений деления широкого спектра ядер от золота до плутония: ^{197}Au , ^{205}Te , ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , естPb, ^{209}Bi , ^{232}Th , ^{233}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{239}Pu (сечения деления ^{233}U и ^{239}Pu определены впервые). Сечения деления ядер измерялись с помощью разработанного в ПИЯФ нового оригинального метода, основанного на использовании плоскопараллельных лавинных счетчиков (ППЛС), помещенных вместе с исследуемой мишенью в пучок протонов.

Расчеты, выполненные в рамках каскадно-испарительной модели с использованием единого для всех ядер набора параметров, позволили удовлетворительно воспроизвести энергетические зависимости полных сечений деления ядер-актинилов в измеренном диапазоне энергий.

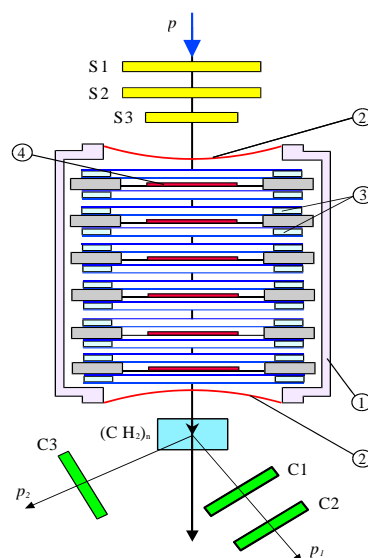
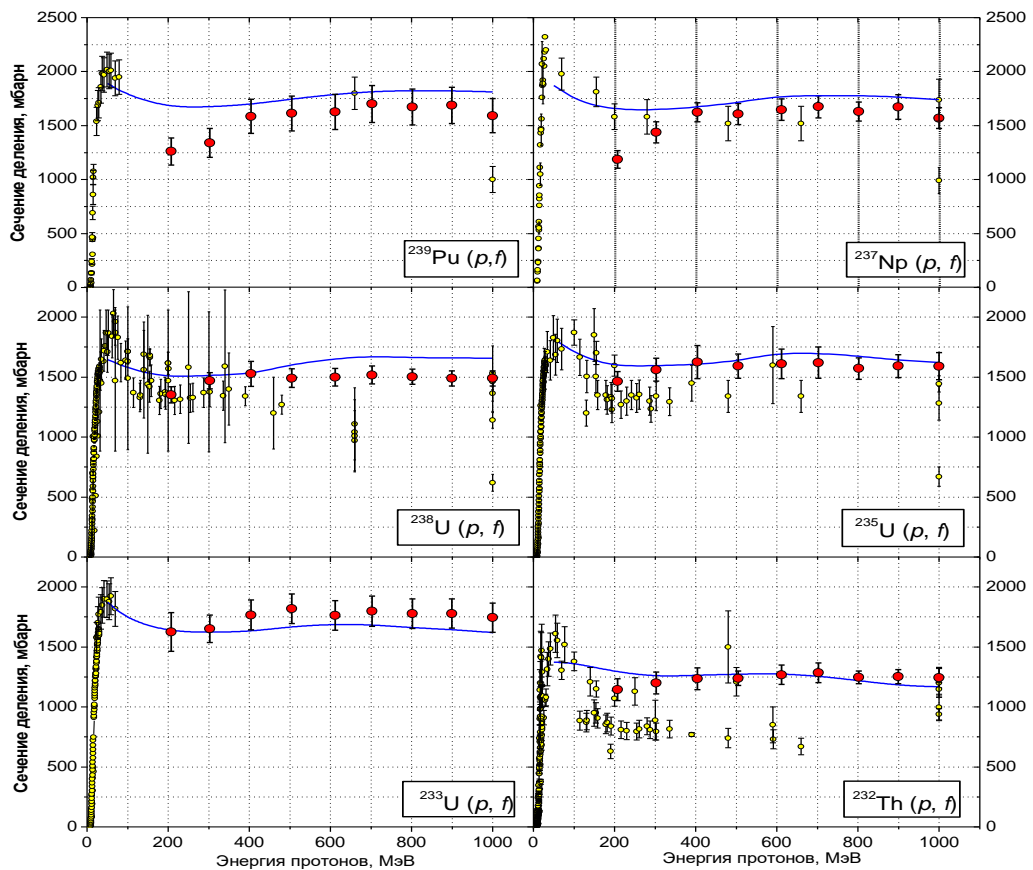


Схема установки. 1 – камера, 2 – входные окна, 3 – ППЛС, 4 – мишени, S1-S3 – сцинтилляционные счетчики



Энергетическая зависимость сечений деления. Сплошные кружки (красные) – наши данные, полые (маленькие) кружки – данные других работ, сплошные кривые – результаты расчетов в рамках каскадно-испарительной модели

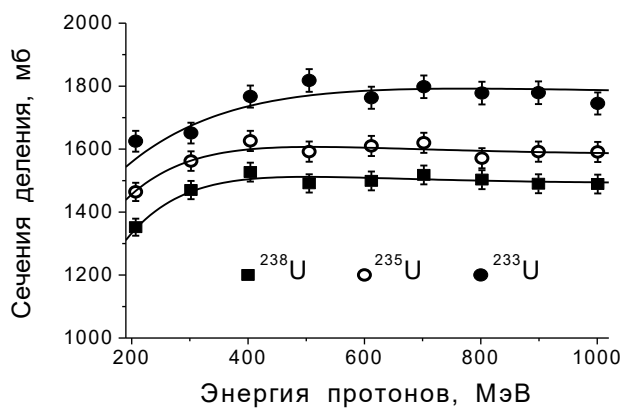
Вместе с тем, в случае доактинидных ядер (Bi, изотопы Pb) эти расчеты не позволяют добиться даже качественного согласия. Поэтому был проведен феноменологический анализ энергетической зависимости полных сечений деления ядер в диапазоне энергий 50 МэВ – 30 ГэВ на основании представления о существовании двух мод деления ядер релятивистскими частицами. Результат этого анализа показал, что энергетическая зависимость сечений деления тяжелых ядер имеет два максимума. Первый максимум в районе $E_p \approx 50$ МэВ обусловлен быстрым прямым делением, которое было исследовано еще 60 лет назад. Второй максимум в области 500–1000 МэВ обусловлен рождением и поглощением внутри ядра пионов, а также нуклонами отдачи с энергией порядка 50–60 МэВ после квазиупругого рассеяния протона на нуклонах ядра. В результате энергетическая зависимость полных сечений деления тяжелых ядер повторяет энергетическую зависимость полных сечений нуклон-нуклонного взаимодействия: минимум в области 100–200 МэВ, рост сечения и выход на максимум в области 500 МэВ и выше, затем медленный спад после 1000 МэВ. Результаты измерений сечений деления актинидов при больших энергиях (до 10 000 МэВ) подтвердили представленную картину энергетической зависимости сечений деления.

Возрастание сечений деления по мере уменьшения массового числа изотопа называется изотопическим эффектом. Было показано, что

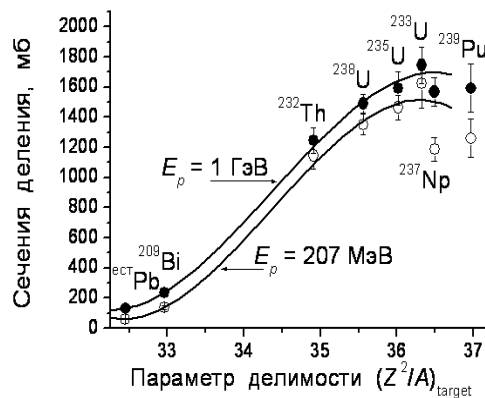
изотопический эффект для урана составляет $(3 \pm 1)\%$ на нуклон, а по абсолютной величине (20–30) мбн/нуклон. Для изотопов свинца эффект примерно в 10 раз больше, чем для урана, так как по абсолютной величине изотопический эффект составляет те же (20–30) мбн/нуклон, но полные сечения деления изотопов свинца в 10 раз меньше.

На примере анализа сечений деления ядер свинца, урана и др. было показано, что изотопический эффект в значительной мере является следствием зависимости сечений от параметра делимости Z^2/A .

Результаты всех измерений и анализы данных доложены на Международных конференциях, опубликованы в более 15 статей в журналах Physical Review C, Ядерная физика и Известия РАН (Ф), а также в ~20 препринтах ПИЯФ.



а)



б)

- а) Энергетическая зависимость сечений деления. изотопов урана.
 б) Зависимость сечений ядер от параметра делимости Z^2/A

Реализация $2E-2V$ метода при исследовании деления ядер в ОФВЭ

Л.Н. Андроненко

Заявленная в названии цель была достигнута с созданием в ОФВЭ прибора ПУСЭК2, использовавшегося на ускорителе ЛИЯФ почти полвека назад в экспериментах, проводимых по делению ядер протонами с энергией 1 ГэВ.

Появлению ПУСЭК2 предшествовали десятилетия освоения методик регистрации продуктов деления, доступных на соответствующих своему времени этапах исследования процесса деления. Начиная с его открытия, массовые распределения осколков деления изучались с помощью радиохимии. Для получения информации об энергиях осколков уже в первых экспериментах появились ионизационные камеры (ИК). С развитием времяпролетной техники измерений был осуществлен корреляционный, так называемый $2V$ метод регистрации двух осколков. В начале 60-х годов большой прогресс принесла замена газовых ИК полупроводниковыми детекторами (ППД). К середине 60-х в мире были проведены одновременные измерения времени пролета и энергии осколка ($1E-1V$ метод), что относилось лишь к одному из двух осколков, возникавших при делении ядра.

Кто же продолжил важную для ФТИ с момента открытия этого процесса тематику “Изучение деления ядер”, ведущую начало с участия в атомном проекте СССР? Здесь речь пойдет о работах, не связанных с реактором. С середины 50-х главным авторитетом по ИК в применении к исследованию деления стал, несомненно, Б.А. Бочагов, защитивший в 1956 г. диссертацию “Новый метод изучения угловых и энергетических распределений тяжелых заряженных частиц и осколков деления, основанный на использовании импульсной ИК”. Получившие признание в мире результаты экспериментов по фотоделению, проведенных на границе 50-х – 60-х годов Б.А. Бочаговым, А.П. Комаром и Г.Е. Солякиным, представлены в отдельном томе монографии Хайда, Перлмана и Сиборга “Ядерные свойства тяжелых элементов”, озаглавленном “Деление ядер”. Камеры Бочагова были востребованы до конца 60-х – начала 70-х годов прошлого века. Но одновременно его ученики стали применять ППД для регистрации осколков (главным энтузиастом их внедрения в эксперимент, после командировок в Харьковский ФТИ, стал Г.Г. Семенчук, а вслед за ним А.А. Котов).

В преддверии запуска строящегося в Гатчине синхроциклотрона в секторе Б.А. Бочагова Г.Е. Солякиным была задумана установка, предназначенная для более полного исследования процесса деления. С ее созданием связывались надежды реализовать методику, являющуюся естественным продолжением $2V$ и $2E$ методов. Все действия в этом направлении давались нелегко, и все же, пусть с опозданием (см. пункты сообязательств на 1972 и 1973 гг.), но работа началась.

Стартом было получение В.Е. Шашминым визы директора ФТИ В.М. Тучкевича на металл для камеры деления. Затем появился мощный

радиоактивный источник ^{252}Cf , необходимый не только для калибровки прибора (заслуга Г.Г. Ковшевного).

Прибор этот был сделан и получил название ПУСЭК2 (Прибор для изучения Угловых, Скоростных и Энергетических Корреляций парных осколков деления, Двухплечевой).

До появления ПУСЭК2 стандартной методикой экспериментального исследования двойного деления была методика $2E$ (или $E1 \times E2$), основанная на регистрации факта совпадения двух осколков и измерении их энергий. При этом значения масс осколков можно было получить лишь приближенно, исходя из соотношения обратной пропорциональности отношения масс осколков и отношения их энергий. Основным отличием ПУСЭК2 от действовавших в то время установок (в ОФВЭ, например, ПУСЭК2 предшествовали установки ПУСЭК-1/2, где использовался $2E$ метод, и ПУСЭК1, реализующий $1E-1V$ метод) было наличие независимого устройства нуля-времени вблизи пучка, и использование на большом расстоянии от мишени по обе от нее стороны 2-х мозаик из 33 ПЖД, дающих энергии, временные СТОП сигналы и адреса сработавших детекторов. Таким образом, прибор ПУСЭК2 представлял собой двухплечевой времяпролетный спектрометр, позволявший измерять наряду с энергиями, скорости и углы разлета парных осколков. Большая светосила прибора достигалась использованием мозаик вместо одиночных детекторов в каждом плече спектрометра. ПЖД, из которых набирались обе мозаики, изготавливались здесь же в ЛИЯФ, в коллективе С.Р. Новикова.

Реализованная в приборе ПУСЭК2 методика ($2E, 2V$) давала возможность определять массы обоих продуктов деления, зарегистрированных в совпадении i - и j -детекторов из 2-х мозаик, основываясь на одновременном измерении времен пролета осколками фиксированных баз пролета и их энергий согласно соотношению $M \sim E \cdot T^2$. Это было особенно важно при высоких энергиях частиц, инициирующих деление, так как делению возбужденного ядра предшествует разветвленный внутриядерный каскад, отсутствующий в делении при низких энергиях. А ПУСЭК2 обеспечивал восстановление кинематики событий, давая недоступную прежде информацию о спектре масс делящихся ядер и впервые реализуя проведение корреляционного анализа по большому числу параметров, присущих изучаемому процессу.

Небольшой команде людей удалось организовать работу 66 масс-спектрометров и вдвое большего числа трактов с записью 8-ми параметрических событий на удаленную ЭВМ «МИНСК-32» через "Электронику-100", что было в то время нетривиальной задачей. Тогда еще не было ни стандарта КАМАК, ни систем контроля набора информации, обработки и визуализации данных. Наличие мозаик в двух плечах прибора, работавших на совпадение, давало более 1000 корреляций измеряемых параметров. Это в свою очередь позволяло детализировать изучаемый процесс по известным экспериментаторам характеристикам процесса деления, что привело к открытию новых. Среди первых результатов, полученных на ПУСЭК2, наряду со спектрами масс делящихся ядер, была обнаружена «выжившая» компонента низкоэнергетического деления при взаимодействии ^{238}U с протонами, имеющими энергию 1 ГэВ

(представлено на рисунке). Прибор действительно был создан «на вырост», сильно опередив время подобных установок. Много нового было сделано для съема информации радиоинженером В.Р. Резником и его помощником И.Н. Синогеевым в тесном общении с физиком В.Е. Шашминым и вновь созданным Отделом радиоэлектроники. М.Н. Андроненко предстояло "оснастить" прибор системой обработки информации и анализа получаемых результатов, что позволило по результатам проведенной в сжатые сроки обработки данных напечатать статьи, а Шашмину в 1979 г. защитить диссертацию.

ПУСЭК2 успешно отработал несколько сеансов на пучке. Изучалось деление ^{238}U , ^{209}Bi и W . Проводилось много измерений со спонтанно делящимся ядром ^{252}Cf . Это было большим достижением команды Г.Е. Солякина. Запуск прибора более 45 лет назад послужил стимулом для выполнения целого ряда работ, среди которых были

- усовершенствование технологии изготовления и проверки ППД;
- запуск в экспериментах в качестве управляющих мини-ЭВМ;
- установка на ЭВМ «МИНСК-32» магнитных барабанов, что диктовалось небывалым по тем временам объемом информации с ПУСЭК2;
- создание и применение системы обработки и анализа многопараметрической информации, оперирующей с "обобщенным событием" задолго до 1986 года, когда в ЦЕРН появился всем известный RAW с его ntuples.

Сразу стали поступать запросы на сведения о ПУСЭК2, приезжали смотреть прибор и учиться работать с многопараметрической информацией.

Заметно позже подобные установки ("дети" ПУСЭК2) появились во Франции и Германии (в 1984 г.) и в Японии в 1988 г. Такие же приборы были также задуманы в МИФИ и в Дубне. Так, уже в 1977 г. между ЛФВЭ ЛИЯФ и МИФИ был заключен договор о научно-техническом сотрудничестве по разработке, созданию и внедрению модернизированного прибора ПУСЭК2. Работа эта велась с 1978 по 1980 год согласно плану по внедрению новой техники, предусматривавшему изготовление двух вариантов прибора ПУСЭК2 – для экспериментов на реакторе МИФИ и на синхроциклотроне ЛИЯФ. Почему-то передача прибора в ЛИЯФ, оговоренная в документах, не произошла, а с этим, конечно, связывались планы коллектива на будущее. На нем предполагалось, наряду с изучением процесса деления, проводить исследования и других ядерных реакций, сочетая это со стажировкой студентов МИФИ в ЛИЯФ. В результате установка ПУСЭК2 свои перспективные возможности продемонстрировать не смогла, да и коллектив делительщиков сохранить не удалось.

Почти одновременно Г.Г. Семенчук и А.А. Котов возглавили новые направления исследований, не связанные с делением. В этой ситуации Солякин, спустя несколько лет после появления оригинального ПУСЭК2, решил воспроизвести его в облегченном варианте. При запуске такой упрощенной версии прибора (малый ПУСЭК2: Г.Е. Солякин, Ю.А. Честнов, Б.Л. Горшков и Б.Ю. Соколовский) пришлось пожертвовать его основными характеристиками, на треть сократив базу пролета и уменьшив число детекторов в мозаиках с 33 до

8, возлагая надежды на новую элементную базу и измерительную систему в стандарте КАМАК. Но даже такой "урезанный" ПУСЭК2 в экспериментах с 1980 по 1983 год позволил получить новую ценную информацию о процессе деления, приведя Г.Е. Солякина к формулированию ряда оригинальных идей, часть из которых уже нашли свое подтверждение. На этом исследование механизмов высокоэнергетичного деления закончилось, и в дальнейшем на ускорителе продолжались только эксперименты по измерению сечений деления в геометрии близкой к 4л с применением "сэндвича" из двух плоскопараллельных лавинных счетчиков. Эти эксперименты были предложены и начаты Солякиным много лет назад и далее успешно проводились под руководством Котова вплоть до его ухода из жизни в 2006 году.

А теперь обратимся к дню сегодняшнему. В предисловии недавней статьи авторов из LANL, напечатанной в NIM in Physics Research A **788** (2015) 59 читаем: "The 2E-2V method for fission mass measurements was introduced by the COSI-FAN-TUTTI spectrometer in the 1980s at ILL in Grenoble. This technique determines the mass of fission products by measuring the energy and time-of-flight over a measured path length of both fission products." Мне, пришедшей на работу в сектор Бочагова за 5 лет до изготовления ПУСЭК2, горько читать про такой background для создателей современного прибора с именем SPIDER в США.

Сейчас можно говорить о ренессансе делительной тематики в мире. Кардинально изменилась ситуация в экспериментальном исследовании деления. Только в последние годы заявлено о намерениях создать 4 прибора, реализующих методику 2E-2V. Названия этих "внуков" нашего ПУСЭК2 таковы:

- FALSTAFF (Four Arm cLover for the SStudy of Actinide Fission Fragments), Франция (2013);
- SPIDER (Spectrometer for Ion DEtermination in fission Research), США (2015);
- STEFF (SpecTrometer for Exotic Fission Fragments), Англия (2015);
- VERDI (VELOCITY foR Direct particle Identification), Бельгия (2016).

Наряду с применением современных детектирующих узлов в этих установках, их выигрышность в сравнении с "дедом" заключается видимо в том, что информация о них доступна всем, тогда как ПУСЭК2 заявил о себе, проработав 2 года, в препринте ЛИЯФ, и лишь в 1977 г. в журнале ПТЭ, в то время как информация о COSI FAN TUTTI появилась в 1984 г. в NIMe. Вот такой нам преподан урок...

СОЦОБЯЗАТЕЛЬСТВА
СЕКТОРА ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ ПРЯМОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
(зав.сектором Б.А.Бочагов)
на 1972 год

7. Подготовить к работе основные элементы установки ПУСЭК-2
(ядуть времени, мозаики из наличных детекторов)

До 30.12.72 г.

Отв. В.Е.Шапмин, от ОРЭ В.Р.Резник.

Зав. сектором *Бочагов* /Б.А.Бочагов/

Профорг *Шапмин* /В.Е.Шапмин/



Б.А. Бочагов



Г.Е. Солякин

СОЦИАЛИСТИЧЕСКИЕ ОБЯЗАТЕЛЬСТВА сектора Б.А.БОЧАГОВА на 1973 год

2. Оснастить электроникой и подготовить к работе на пучке установку ПУСЭК-2.

Ответственные: В.Е.Шапмин, Г.Е.Солякин, Г.Г.Семенчук,
Г.Г.Ковшевский, Б.Л.Горшков, В.С.Дубог-
рай, В.Ф.Зусарь, А.Д.Еремеев.

От ОРЭ ЛФВЭ: В.Р.Резник и И.Н.Синогеев.

От службы обработки информации: М.Н.Андроненко.

Срок - Декабря 1973 года.

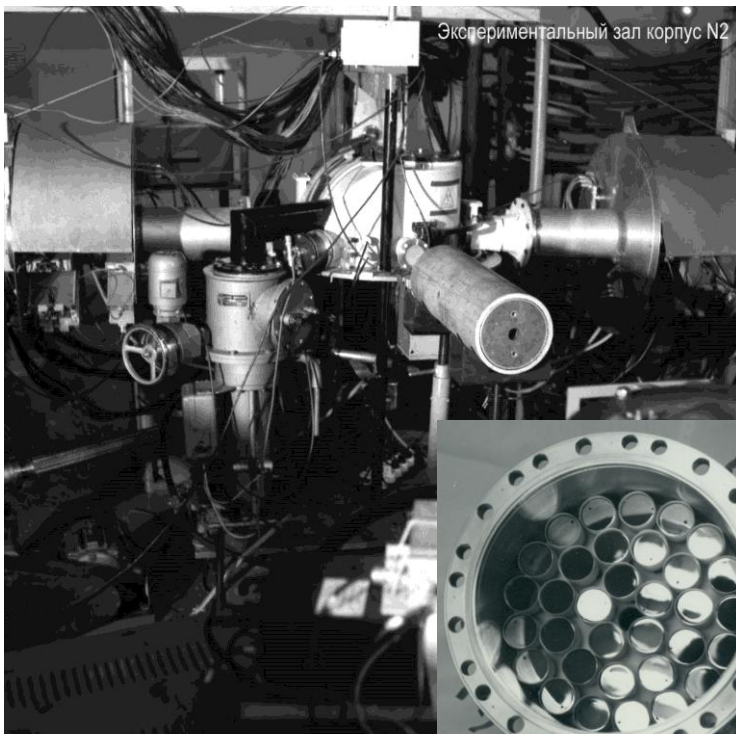
ЗАМ. ЗАВ. СЕКТОРОМ

Солякин

/Г.Е.Солякин/

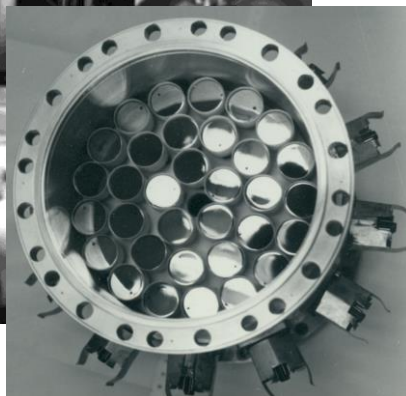
ПРОФОРГ СЕКТОРА

/В.Е.Шапмин /

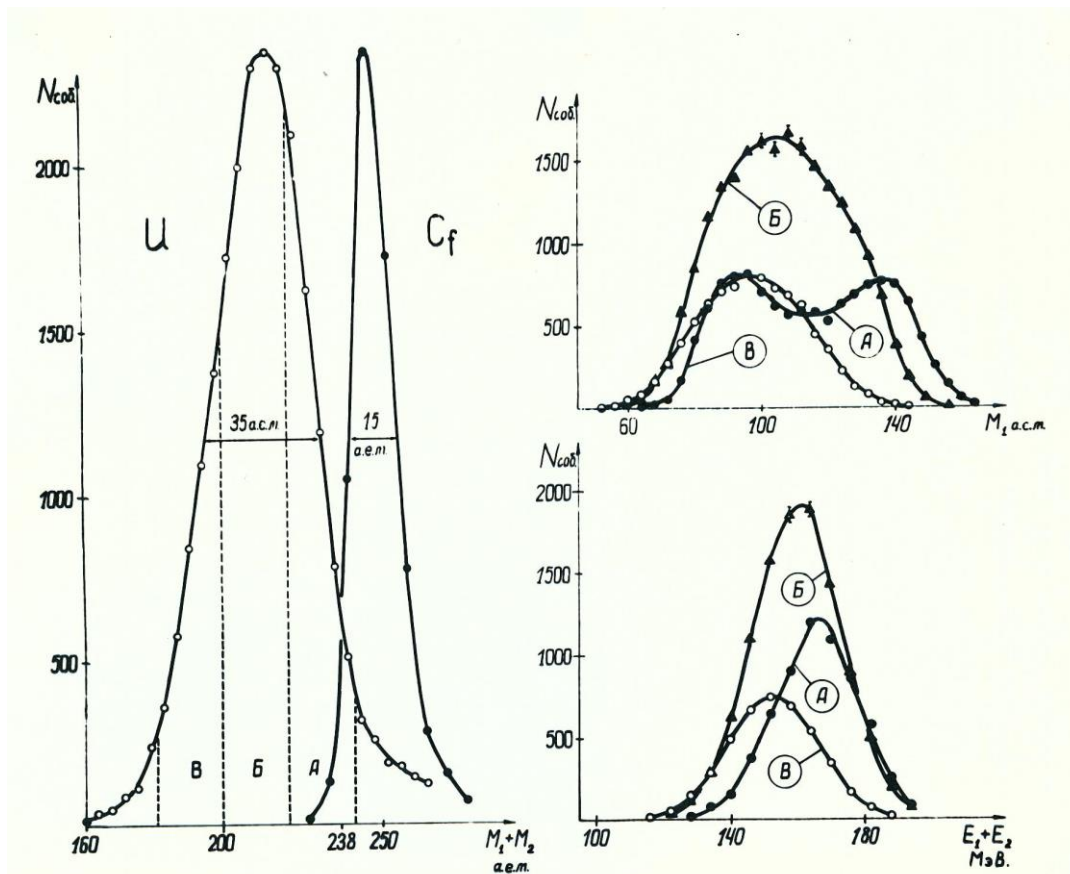


Экспериментальный зал корпус N2

Прибор ПУСЭК2
и вид мозаики с 33-мя ППД



В.Е. Шапмин



Спектр масс делящихся ядер в реакциях $^{238}\text{U}(p[1\text{ГэВ}],f)$ и $^{252}\text{Cf}(sf)$ (слева). Распределения масс осколков и суммарной кинетической энергии осколков при взаимодействии протонов с ураном (справа). Обнаружение компоненты низкоэнергетического деления «А» при делении ^{238}U протонами с энергией 1 ГэВ



«Молодежь», работавшая на разных моделях ПУСЭЖ (фото 1974–1975 гг.).
 1-ый ряд, слева направо: И. Синогеев, Б. Горшков, Л. Андроненко;
 2-ой ряд: Г. Ковшевный, М. Андроненко, Ю. Честнов, А. Котов

Лаборатории мезонной физики конденсированных сред

С.И. Воробьев



Сергей Иванович Воробьев, к.ф.-м.н.,
заведующий Лабораторией мезонной
физики конденсированных сред



15.11.1939 – 12.01.2012 гг.

Коптев Владимир Петрович, к.ф.-м.н.,
в течение ряда лет был зав. ЛМФКС

Лаборатория мезонной физики конденсированных сред (ЛМФКС) была сформирована в 1986 году сначала как группа, входившая в состав «Лаборатории мезонной физики» под руководством доктора физ.-мат. наук, заслуженного деятеля науки РФ С.П. Круглова, а затем и как самостоятельное подразделение во главе с кандидатом физ.-мат. наук Владимиром Петровичем Коптевым вплоть до 2012 года. С 2012 года лабораторией руководит кандидат физ.-мат. наук С.И. Воробьев.



В конце 1967 года состоялся пробный пуск ускорителя, а эксплуатация в полном объеме началась с апреля 1970 года. В 1970 году под руководством С.П. Круглова был запущен пионный канал, в его монтаже и настройке активное участие принимали сотрудники, позднее составившие костяк лаборатории. По инициативе С.П. Круглова на синхроциклотроне был также создан мюонный канал, в реализации этого проекта также активно участвовали сотрудники лаборатории.

С самого начала за лабораторией были закреплены два направления исследований – изучение магнитных свойств веществ при помощи μ SR-метода и изучение рождения мезонов и гиперонов в протон-нуклонных и протон-ядерных соударениях.

Изучение магнитных свойств различных веществ при помощи μ SR-метода на мюонном канале синхроциклотрона ПИЯФ

В ПИЯФ мюонный метод исследования вещества начал развиваться в 1976 году после того, как на синхроциклотроне был введен в строй мюонный канал. В 1977 году была создана установка «МЮОНИЙ» для изучения локальных магнитных полей в веществе методом вращения мюонного спина. В настоящее время в России существует только одна работающая μ SR-установка – на мюонном пучке синхроциклотрона ПИЯФ. *Установка μ SR в ПИЯФ (ЛИЯФ) работает уже более 40 лет!*



Исследования на установке «МЮОНИЙ» в ЛИЯФ АН СССР начались в 1978 году. Это был период бурного развития μ SR-методики на мезонных фабриках Швейцарии, Канады, США. В нашей стране, в связи с реконструкцией ускорителя в Дубне, ЛИЯФ монопольно обладал пучком поляризованных мюонов. Опыт работы московских физиков (Курчатовский институт, ИТЭФ, МИФИ, МФТИ, ОИЯИ) и частичное использование их аппаратуры способствовали развитию μ SR-методики в ЛИЯФ. Однако значительная часть работ того периода носила в основном методический характер, происходил поиск направлений наиболее оптимального использования μ SR в научных исследованиях.



К началу 1987 года, когда была открыта высокотемпературная сверхпроводимость (ВТСП), Лаборатория Мезонной физики конденсированных сред накопила большой опыт работы на пучках поляризованных мюонов. Однако запуск ускорителя в Дубне значительно осложнил практические возможности работы в ЛИЯФ. Для эффективного исследования ВТСП мюонным методом необходимо было не только понимание физических основ сверхпроводимости, как направления исследований в физике твердого тела, но и создания новой μ SR установки на базе оборудования ЛИЯФ. Была создана новая μ SR-установка для измерений в более высоких магнитных полях, и проведена модернизация экспериментальной аппаратуры. Это позволило уменьшить требуемые размеры образцов и эффективно использовать разработанный в ПИЯФ интегральный метод μ SR-исследований.

В период 1988–1991 гг. коллектив лаборатории проводил исследования в соответствии с планом научно-исследовательских работ ПИЯФ по теме «Исследование высокотемпературной сверхпроводимости» в рамках проектов «ШКАЛА» и «МЮОН» Государственной программы по исследованию ВТСП. Эксперименты, выполненные на мюонном канале синхроциклотрона ПИЯФ с использованием модернизированной установки «МЮОНИЙ» и вновь созданной для исследований μ SR-установки, показали, что в высокотемпературных сверхпроводниках имеет место образование достаточно регулярной решетки вихрей Абрикосова. Впервые экспериментально было обнаружено отклонение вихрей от направления внешнего поля, обусловленное анизотропией ВТСП. Независимо и практически одновременно с зарубежными группами были проведены систематические экспериментальные исследования магнитных свойств монофазных керамических образцов соединения $YBa_2Cu_3O_{6+x}$ ($0,06 < x < 0,95$). В этот период времени впервые мюонным методом были исследованы свойства текстурированного монофазного сверхпроводника $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$. В керамических сверхпроводниках $YBa_2Cu_3O_{6+x}$ ($x > 0,40$) была обнаружена зависимость измеряемых характеристик распределения локальных полей от условий изготовления образцов, наиболее вероятной причиной которой являлось изменение глубины проникновения магнитного поля в образец под влиянием неоднородности среды. Исследовался вопрос сосуществования в $YBaCuO$ сверхпроводимости и магнетизма.

С 1996 года в ЛМФКС были начаты исследования марганецсодержащих соединений типа $Cu_{1-x}Mn_x$, $La_{0,85}Sr_{0,15}MnO_3$, $Pt_3(Fe_{1-x}Mn_x)$ и $Pd_{95}(Fe_{1-x}Mn_x)$. Особенность этих соединений состоит в том, что благодаря конкурирующему взаимодействию в них наблюдается сложная фазовая диаграмма и ряд необычных эффектов. Например, в сплаве $Cu_{1-x}Mn_x$ при больших концентрациях Mn ($x > 0,7$) наблюдается 6%-ный эффект памяти формы. При более низких концентрациях ($x < 0,7$) этот эффект значительно уменьшается, но тем не менее остается на уровне 0,1%. При этих концентрациях соединение $Cu_{1-x}Mn_x$ при температурах 100–150 К переходит из состояния парамагнетика в состояние типа спинового стекла. Однако ниже порога перколяции ($x = 0,25-0,4$) возникают большие

неточности в определении температуры фазового перехода, указывающие на появление каких-то особенностей. Впервые μ SR-метод был использован для исследования магнитных характеристик гомогенных сплавов $\text{Cu}_{1-x}\text{Mn}_x$. В образцах с $0,2 < x < 0,7$ обнаружено возникновение специфической магнитной фазы, характеризующейся, по-видимому, отсутствием дальнего порядка и сильной спиновой динамикой в диапазоне температур от 10 К до 330 К. Таким образом, полученные данные позволяют существенно дополнить магнитную фазовую диаграмму гомогенных медно-марганцевых сплавов $\text{Cu}_{1-x}\text{Mn}_x$, которая принимает вид, характерный для систем с конкурирующим обменным взаимодействием. Также, анализ полученных экспериментальных данных позволяет предположить, что в бинарных сплавах $\text{Cu}_{1-x}\text{Mn}_x$ при сравнительно больших концентрациях магнитных атомов Mn в диапазоне температур от 250 К до 20 К могут реализоваться две фазы магнитоупорядоченного состояния. При более высоких температурах (выше 100 К) возникает состояние с повышенной спиновой динамикой с флуктуирующими случайными полями. В этой фазе параметры λ_D и Δ одного порядка. При температуре ~ 70 К для всех исследованных концентраций наблюдается переход в фазу спинового стекла без флуктуирующих случайных полей, т.е. в фазу обычного спинового стекла.



В соединениях типа PdFeMn и PtFeMn при концентрациях вблизи тройной точки в ферромагнитной области наблюдаются сильные эффекты необратимости, указывающие на возможный переход внутри ферромагнитной фазы в состояние асперомагнетика. Основные исследования этих материалов были выполнены либо макроскопически, либо нейтронным методом, в то время как измерения μ SR-методом полностью отсутствовали. Что касается соединений $(\text{Pd}_{0,984}\text{Fe}_{0,016})\text{Mn}_{0,05}$, то в соответствии с нейтронными исследованиями в этом сплаве наблюдается переход в ферромагнитную фазу при 40 К, а при температуре ниже 35 К найдены сильные необратимые эффекты, но никаких дополнительных фазовых переходов. Тем не менее, явление необратимости при температурах 25–30 К указывает на возможность существования при этих температурах перехода в асперомагнетик. На основании ранее выполненных нами μ SR исследований переходов в асперомагнитное состояние в сплавах FeNiCr и PdFeMn можно сделать заключение о том, что μ SR-метод обладает уникальной чувствительностью к подобного рода переходам.

Поэтому в конце 2002 года были проведены первые пробные μ SR-исследования образца $(\text{Pd}_{0,984}\text{Fe}_{0,016})\text{Mn}_{0,05}$, которые подтвердили перспективность исследования данного сплава. Проведено исследование сплава $(\text{Pd}_{1-x}\text{Fe}_x)_{0,95}\text{Mn}_{0,05}$ со случайным конкурирующим взаимодействием. Изучение зависимости скорости динамической релаксации λ и характеристик распределения локальных статических полей позволило уточнить фазовые состояния исследуемого образца. В частности, было показано, что ниже 25 К в образце одновременно сосуществуют два фазовых состояния: ферромагнитное и спинового стекла. При понижении температуры в образце на фоне коллинеарного ферромагнетика появляется фракция спинового стекла, задолго до перехода образца в спин-стекляное состояние. Совместные исследования образца μ SR-методом и методом деполяризации нейтронов позволили определить величину магнитных неоднородностей, равных 2–6 μm .

На μ SR-установке и сейчас проводятся интенсивные исследования, а именно, ведутся следующие исследования: магнетизма в материалах с памятью формы; сплавов со случайным конкурирующим взаимодействием; взаимодействия ферроэлектричества и ферромагнетизма; наноструктурных материалов; мультиферроиков и многого другого.

В частности, в настоящее время традиционная μ SR-методика используется для исследования нанодисперсных магнетиков с целью выяснения влияния размерного фактора на внутреннюю структуру. Таким образом, μ SR-установка на мюонном канале синхроциклотрона ПИЯФ позволяет повысить эффективность исследований в области физики конденсированных сред. Это, в свою очередь, является хорошим обстоятельством для НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, т.к. он является, безусловно, мировым лидером в области исследования вещества с помощью нейтронных методов, которые в ближайшее время получают мощный толчок в связи с предстоящим вводом в эксплуатацию в Гатчине реакторного комплекса ПИК.

В последние годы с помощью данной μ SR-установки был проведен ряд исследований и были получены новые результаты. Изучено взаимодействие ферроэлектричества и ферромагнетизма (исследованы редкоземельные манганиты и манганаты, легированные манганиты, мультиферроики с близкими температурами магнитного и сегнетоэлектрического упорядочения). С помощью μ SR-метода было показано, что образец HoMnO_3 при температуре $T_N = 74$ К испытывает переход из парамагнитного в антиферромагнитное состояние. Доказано, что манганит HoMnO_3 при температуре $T_{SR} = 42$ К испытывает спин-ротационный переход, т.е. спины марганца при этой температуре испытывают поворот на 90° . С помощью μ SR-метода было определено, что при температуре $T_N = 66$ К в образце YMnO_3 происходит фазовый переход парамагнетик–антиферромагнетик. Впервые для манганита YMnO_3 были обнаружены особенности вблизи температуры ~ 50 К, что, по-видимому, связано с частичным поворотом спинов ионов марганца. Показано, что в манганитах существуют два места локализации мюона с различными внутренними магнитными полями, причем второе магнитное поле по величине примерно в два раза меньше, чем первое.

При исследовании манганатов EuMn_2O_5 и GdMn_2O_5 μ SR-методом без внешнего магнитного поля было обнаружено, что ниже температуры магнитного упорядочения 40 К теряется 20–25% поляризации мюонов. Это можно объяснить тем, что в антиферромагнитной матрице образуются отдельные ферромагнитные пары, в которых возможен обмен e_g -электронами через лиганд (кислород) между ионами Mn.

Ведутся исследования магнитных свойств наноструктурных материалов. Методом μ SR исследована феррожидкость на основе наночастиц Fe_3O_4 , диспергированных в тяжелой воде D_2O . Обнаружено, что наряду с прецессионным сигналом от мюонного (диамагнитного) компонента наблюдается отчетливый сигнал от мюониевого компонента. Найдено, что диамагнитная (мюонная) фракция образуется в феррожидкости приблизительно в той же пропорции, что и в D_2O , однако скорость релаксации спина мюона значительно выше в феррожидкости по сравнению с D_2O при температурах $T > 150$ К. Доля мюониевой фракции при этих температурах существенно меньше в феррожидкости, чем в D_2O .

Ведутся исследования ферритно-мартенситных сталей (Fe-Cr). В данной работе получены результаты по магнитным свойствам ферритно-мартенситной стали ЭК-181 с различными режимами термообработки. При изучении зависимостей скорости динамической релаксации поляризации, коэффициента асимметрии и характеристик распределения локальных статических магнитных полей от температуры образца было



обнаружено их нерегулярное поведение в области хрупко-вязкого перехода, что может быть объяснено переходом части материала в состояние спинового стекла.

Изучение рождения мезонов и гиперонов в протон-нуклонных и протон-ядерных соударениях

До 1989 года работы по изучению рождения мезонов и гиперонов в протон-нуклонных и протон-ядерных соударениях велись на синхроциклотроне ПИЯФ, а в дальнейшем на спектрометре ANKE (Juelich, Германия) в рамках международного сотрудничества ПИЯФ-COSY.



Сотрудничество между физиками ПИЯФ и Научно-исследовательского центра «Юлих» (Германия) началось в 1991 году в рамках подписанного директорами этих институтов соглашения о проведении совместных фундаментальных и прикладных исследований в области ядерной физики и физики элементарных частиц. Соглашение неоднократно продлевалось и завершилось в декабре 2017 года. В рамках этого сотрудничества в период с 1991 по 1998 годы были проведены совместные работы по проектированию, созданию и отладке магнитного спектрометра ANKE для внутреннего пучка ускорителя COSY, позволявшего идентифицировать положительно и отрицательно заряженные частицы в диапазоне импульсов от 200 до 3000 МэВ/с с импульсным разрешением в среднем около 2%. Отличительной особенностью спектрометра являлся ранее разработанный в ПИЯФ уникальный метод детектирования K^+ -мезонов по задержанному сигналу продуктов его распада (π -мезонов или мюонов).

Первый цикл работ, выполненный на спектрометре ANKE, был связан с продолжением научных исследований, проводившихся в ПИЯФ в 1978–1988 годах по изучению рождения K^+ -мезонов в рамках проекта «КАОН» Государственной программы по фундаментальной ядерной физике. Рождение мезонов в протон-ядерных взаимодействиях при энергиях налетающей частицы ниже порога свободного нуклон-нуклонного рождения открывает доступ к коллективным степеням свободы в ядрах, а также к высокоимпульсной части волновой функции нуклона в ядре.

Одновременно сотрудники лаборатории были наиболее активными участниками программы по измерению времени жизни пиона и каона. Работа по прецизионному измерению времени жизни π^+ - и K^+ -мезонов в основном была закончена еще в 1985 году, однако полученный результат является самым точным в мире до настоящего времени.

На спектрометре ANKE был проведен ряд уникальных измерений дважды дифференциальных сечений рождения K^+ -мезонов на различных типах мишеней и при различных энергиях налетающих протонов. Было показано, что в процессе рождения K^+ -мезонов значительную роль играют эффекты взаимодействий в конечном состоянии. Измерения позволили определить значения каон-ядерного потенциала с точностью ~ 3 МэВ, а также была показана важность учета кулоновского потенциала отталкивания.

В рамках этой тематики был впервые проведен корреляционный K^+d (и K^+p) эксперимент, который доказал существование двухступенчатого механизма образования K^+ -мезона на ядрах, идущего через промежуточный процесс $pn \rightarrow d\pi$. Вместе с этим были получены указания на возможность существования кластерного механизма, доля которого может составлять примерно 30% от двухступенчатого.

В цикле исследований рождения ϕ - и ω -мезонов в pN -соударениях были проведены уникальные измерения сечений реакций типа $pp \rightarrow ppM$, и $pn \rightarrow dM$ (где $M = \omega, \phi$) в интервале энергий возбуждения до 100 МэВ. Рождение ω -мезона изучалось в реакциях $pp \rightarrow pp\omega$ (при энергиях возбуждения 60 и 92 МэВ) и $pn \rightarrow d\omega$ (28 и 57 МэВ). Впервые выполненные точные измерения сечений реакций $pp \rightarrow pp\phi$ (при энергиях возбуждения 18,5, 34,5 и 75,9 МэВ) и $pn \rightarrow d\phi$ (в диапазоне энергий от 0 до 80 МэВ) позволили вычислить отношение выходов ω и ϕ мезонов вблизи порога их образования как функцию энергии возбуждения. Согласно правилу Окубо, Цвейга и Изуки, которое говорит о подавлении реакций с разорванными кварковыми линиями, это отношение должно составлять $R_{OZI} = \sigma_\phi/\sigma_\omega = 4.2 \cdot 10^{-3}$, что достаточно хорошо подтверждено другими экспериментами (например, в $p\bar{p}$ -взаимодействиях), за исключением аннигиляции останавливающихся в водороде антипротонов.

В результате анализа исследования парного рождения K^+ - и K^- -мезонов были получены полные и дифференциальные сечения реакций: $pp \rightarrow pp\{K^+K^-\}_{\text{non-}\phi}$, $pp \rightarrow d\{K^+K^-\}_{\text{non-}\phi}$, $pp \rightarrow dK^+K^0\text{-bar}$, $dd \rightarrow {}^4\text{He}K^+K^-$ при малых (до 110 МэВ), ранее не исследованных энергиях возбуждения. Изучалось влияние на механизм протекания этих реакций скалярных резонансов ($a_0(980)$ и $f_0(980)$) и антикаон-нуклонных (а также антикаон-ядерных) взаимодействий.

Диапазон импульсов пучка синхротрона COSY позволял проводить исследования рождения легких гиперонов Λ и $\Sigma^{0,\pm}$ в pp - и pn -соударениях. Рождение Σ^+ -гиперонов исследовалось в реакции $pp \rightarrow nK^+\Sigma^+$ при энергиях возбуждения ниже 130 МэВ. В ходе данной работы были также измерены сечения реакций $pp \rightarrow pK^+\Lambda^0$ и $pp \rightarrow nK^+\Sigma^0$ при ранее неисследованных энергиях возбуждения.

Помимо представленных выше результатов исследований, в которых ведущую роль играли сотрудники ЛМФКС ОФВЭ, сотрудничество ANKE выпустило ряд научных работ по другим направлениям ядерной физики и физики элементарных частиц, таким как:

- физика дипротона (развал дейтрона, рождение фотонов и π -мезонов), когда два протона, регистрируемых из продуктов реакции, находятся в 1S_0 конечном состоянии;
- изучение рождения η -мезона в pp -, pn - и pd -взаимодействиях и $\eta^3\text{He}$ взаимодействия в конечном состоянии;
- изучение влияния поляризационных эффектов в реакциях упругого рассеяния, зарядового обмена и рождения π -мезонов;
- исследование деполяризации протонов на электронах при малых относительных энергиях.

Лаборатория Релятивистской Ядерной Физики

М.Б. Жалов, В.М. Самсонов, А.В. Ханзадеев

Исторически датой рождения Лаборатории Релятивистской Ядерной Физики (ЛРЯФ) можно считать 1986 год, когда по инициативе директора Отделения Физики Высоких Энергий профессора А.А. Воробьева был организован Отдел Детекторов Излучений (ОДИ) под началом доктора физ.-мат. наук В.М. Самсонова. Вновь созданный отдел предназначался для проектирования и создания детекторных систем любого типа для крупномасштабных международных экспериментов. В состав ОДИ вошли: группа физиков, в основном из секторов А.А. Воробьева и О.И. Сумбаева, группа пропорциональных камер, группа сцинтилляционной техники, группа гибридной микроэлектроники, группа полупроводниковых детекторов. Одними из значимых результатов начальной деятельности ОДИ явились проектирование и создание мюонного форвардного трекера и исследования тяжелых сцинтилляторов (вольфраматов, VGO) для центрального электромагнитного калориметра установки L3 на электрон-позитронном коллайдере в ЦЕРН. По этим работам были впоследствии защищены три кандидатские диссертации (А.Г. Крившич, В.В. Яновский, 1991 г., В.В. Курятков, 2006 г.) Важным этапом этого периода явилось участие в международном эксперименте E761, выполнявшемся на гиперонном канале Лаборатории им. Э. Ферми (США). В рамках этого проекта сотрудниками отдела был предложен, подготовлен и реализован эксперимент по обнаружению эффекта прецессии спина Σ^+ - гиперона при его прохождении в режиме каналирования в изогнутом кристалле из кремния. Экспериментально наблюдаемый эффект является основой метода прямого измерения магнитных моментов короткоживущих частиц, таких как очарованные и прелестные барионы. Опыт, приобретенный в эксперименте E761, позволил сформулировать предложение и осуществить эксперимент по выводу пучка положительно заряженных частиц с энергией 1 ТэВ с помощью изогнутого кристалла кремния (эксперимент E853). Впервые в мировой практике вывод пучка был осуществлен из сверхпроводящего ускорителя при продолжении набора статистики в коллайдерных установках D0 и CDF. По итогам этих работ В.М. Самсонову была присуждена Государственная премия РФ (1996 г.), были защищены докторская (А.В. Ханзадеев, 1999 г.) и кандидатская (В.В. Баублис, 1997 г.) диссертации.

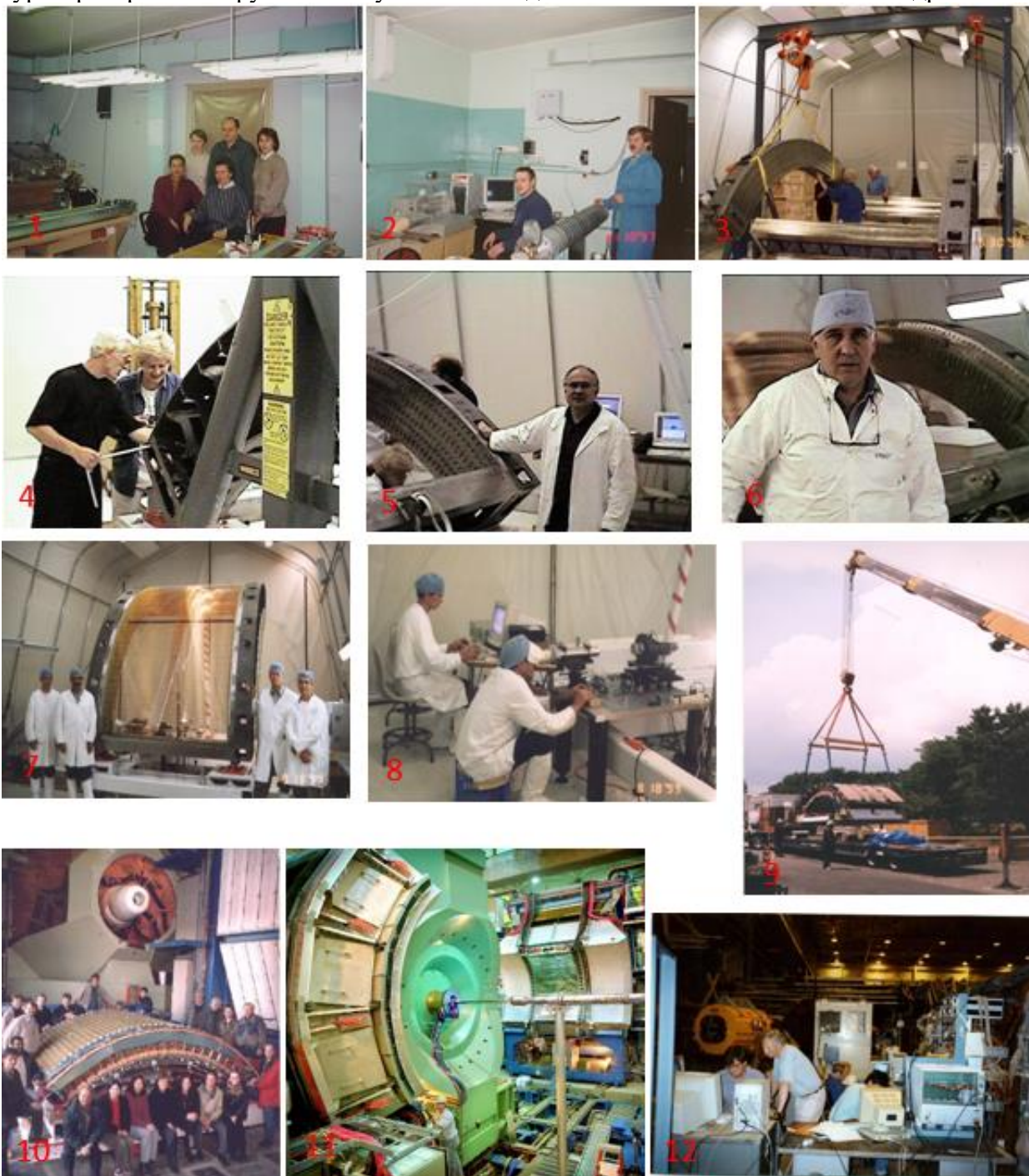
Эксперимент E853 выполнялся коллективом уже не отдела, а Лаборатории детекторов излучений (ЛДИ). В силу различных причин в 1992 году ОДИ был разделен на четыре структурных подразделения, одно из которых, в основном состоящее из группы физиков, превратилось в лабораторию (ЛДИ), руководимую В.М. Самсоновым.

Важнейший этап в истории лаборатории произошел в начале 90-х годов, когда директор ОФВЭ А.А. Воробьев предложил принять участие в международном эксперименте RHENIX по исследованию взаимодействия тяжелых ядер при энергиях вплоть до $\sqrt{s} = 200$ А ГэВ на новом коллайдере RHIC в Брукхейвенской Национальной Лаборатории (США). Собственно, с участия в эксперименте RHENIX научная деятельность ЛДИ приобрела четкую направленность и в 2003 году ЛДИ была переименована в Лабораторию Релятивистской Ядерной Физики (ЛРЯФ).

Вклад ЛРЯФ в создание экспериментальной установки RHENIX трудно переоценить. Коллективом лаборатории были спроектированы и созданы уникальные дрейфовые камеры, являющиеся основным центральным трекером эксперимента RHENIX.

Достаточно сказать, что не менее 90% всех физических результатов эксперимента RHENIX были получены с привлечением информации от центральной трековой системы. Дрейфовые камеры исключительно успешно проработали в течение всех циклов экспериментальных измерений, начиная с 2000 года и вплоть до 2016 года, когда эксперимент RHENIX завершил работу на пучках коллайдера. В анализе данных,

накопленных в сеансах на ускорителе RHIC, сотрудники ЛРЯФ до сих пор занимают свою тематическую «нишу», реализуя программу изучения адронных мод распада легких мезонов, рожденных в столкновении ядер. На протяжении ряда лет В.Г. Рябов являлся куратором рабочей группы по изучению выходов и потоков легких и тяжелых адронов.



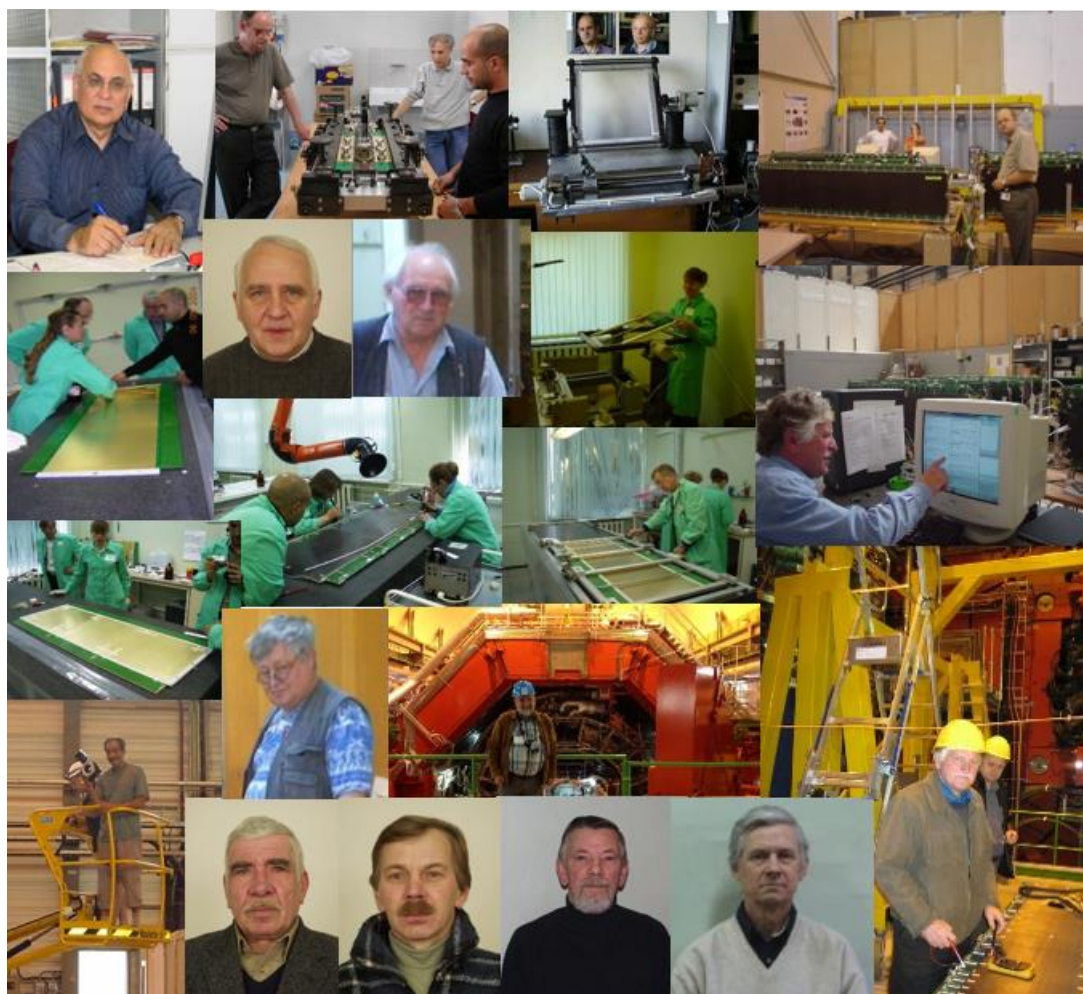
Реализация проекта PHENIX

- 1, 2 – участок производства сеток дрейфовых камер;
 3, 4, 5, 6, 7, 8 – сборка дрейфовых камер и метрологические измерения в университете Стони Брук;
 9, 10 – транспортировка в БНЛ;
 11 – одна из камер в составе установки PHENIX в зоне столкновения пучков;
 12 – смены на ускорителе

Главным фундаментальным результатом эксперимента PHENIX стало открытие нового состояния ядерной материи (2005 год). Большая совокупность данных позволила убедительно продемонстрировать, что при достаточно высоких температурах порядка 200 МэВ, создаваемых в центральных столкновениях ядер на коллайдере RHIC, в пространственной области, существенно превышающей размеры тяжелого ядра, в зоне взаимодействия ядер формируется кварк-глюонная среда, обладающая свойствами почти идеальной сильновзаимодействующей жидкости. По итогам работы в эксперименте ФЕНИКС сотрудниками лаборатории защищена одна докторская диссертация (В.Г. Рябов, 2008 г.) и четыре кандидатских (В.Г. Рябов, 2001 г., Ю.Г. Рябов, 2007 г., Д.О. Котов, 2010 г., Д.А. Иванищев, 2011 г.)

С самого начала эпохи Большого Адронного Коллайдера (LHC) в ЦЕРН (1997 год) лаборатория стала участником коллаборации ALICE, нацеленной на исследования взаимодействия ядер при энергиях вплоть до $\sqrt{s} = 5,5$ А ТэВ с основным акцентом на детальное изучение свойств высокотемпературной кварк-глюонной плазмы.

Сотрудники Лаборатории (В.М. Самсонов, А.В. Ханзадеев, В.Н. Никулин, Б.Г. Комков, Е.В. Рощин, О.П. Тарасенкова, В.В. Иванов, Н.М. Мифтахов, Г.В. Рыбаков) приняли участие в разработке и создании трековой системы мюонного спектрометра установки ALICE. Именно в ПИЯФ была предложена и реализована принципиально новая концепция трековых камер. Для этого в лаборатории был создан экспериментальный участок и освоена технология производства камер, разработаны уникальное оборудование и ряд специальных испытательных стендов.



Участники производства, тестирования и установки трековых камер в мюонный спектрометр эксперимента ALICE

Наряду с участием в экспериментальных сеансах, обеспечением надежной работы мюонного спектрометра и разработкой триггерных систем (Е.Л. Крышень) сотрудники Лаборатории активно вовлечены в анализ данных эксперимента ALICE по нескольким направлениям. Опыт и методики анализа экспериментальных данных, наработанные в эксперименте PHENIX, были успешно адаптированы и применены (В.Г. Рябов, Ю.Г. Рябов, М.В. Малаев) для изучения свойств легких адронов в различных сталкивающихся системах при энергиях коллайдера LHC. Анализ всей совокупности экспериментальных данных, полученных в эксперименте ALICE к настоящему времени, убедительно демонстрирует, что в столкновениях ультрарелятивистских тяжелых ионов действительно формируется очень плотная сильновзаимодействующая кварк-глюонная материя. Более того, оказалось, что в ультрарелятивистских протон-протонных столкновениях с большой множественностью рождаемых частиц также возможно образование капель кварк-глюонной плазмы. По результатам анализа данных, полученных в эксперименте ALICE, на сегодняшний день защищена 1 кандидатская диссертация (М.В. Малаев, 2016 г.)

Параллельно в Лаборатории активно развивается программа теоретических исследований (М.Б. Жалов, В.А. Гузей) процессов фоторождения векторных мезонов в ультрапериферических столкновениях протонов и ядер, жестких процессов в Квантовой Хромодинамике, эффектов ядерных экранировок партонных распределений. В рамках этой программы обеспечивается теоретическая поддержка экспериментов на коллайдерах. Объединение усилий теоретиков и экспериментаторов (Е.Л. Крышень) позволило занять лидирующие позиции в исследованиях ультрапериферических столкновений протонов и тяжелых ядер на LHC.

Естественным продолжением научной программы по изучению свойств материи, создаваемой в экстремальных условиях взаимодействия ядер, явилось участие лаборатории с 2003 года в эксперименте CBM, принятом к постановке на строящемся в GSI (Дармштадт, Германия) ускорительном комплексе FAIR, а с 2018 года в запланированном эксперименте MPD на строящемся в ОИЯИ (Дубна) коллайдере NICA. Оба эти эксперимента, в отличие от PHENIX и ALICE, нацелены на изучение состояния ядерного вещества при сравнительно низких температурах, но высоких значениях барионной плотности, то есть, как предполагается, в условиях более близких к состоянию ядерной материи во внутренней области нейтронных звезд. Программа исследований включает поиск критических точек, сигнализирующих о фазовых переходах, изучение уравнения состояния ядерной материи при высоких барионных плотностях. Уместно отметить, что по результатам теоретического исследования уравнения состояния ядерного вещества при больших барионных плотностях в рамках релятивистских ядерных моделей сотрудник ЛРЯФ Е.Л. Крышень в 2012 году защитил кандидатскую диссертацию.

Один из основных пунктов физической программы CBM – изучение лептонных мод распада легких векторных мезонов и очарованных частиц, производимых при взаимодействии ядер. Для реализации этого пункта с участием ЛРЯФ создаются две подсистемы CBM: мюонный детектор MUCH, состоящий из распределенного адронного поглотителя, между слоями которого расположены трековые станции, и черенковский детектор кольцевого действия RICH. В 2013 году с участием ЛРЯФ были подготовлены и защищены Технические проекты (TDR) обеих подсистем.

Сотрудниками ЛРЯФ в составе коллабораций PHENIX, ALICE и CBM опубликовано более 400 статей с суммарным индексом цитирования более 50000 в ведущих журналах с импакт-фактором, как правило, на уровне 4 и выше (Phys. Rev. Lett., Phys. Rev. C, Physics Letters B, JHEP, Eur. Journal of Physics и др.).

На протяжении всех лет существования лаборатории активно реализуется плодотворное сотрудничество с кафедрой «Экспериментальная ядерная физика» СПбГПУ. Сотрудники лаборатории читают ряд курсов по физике детекторов и ядерной

физике высоких энергий. Шесть выпускников кафедры успешно начали и продолжают научную работу в лаборатории.

«Спиновый кризис» и эксперимент HERMES

1993 – 2019 годы

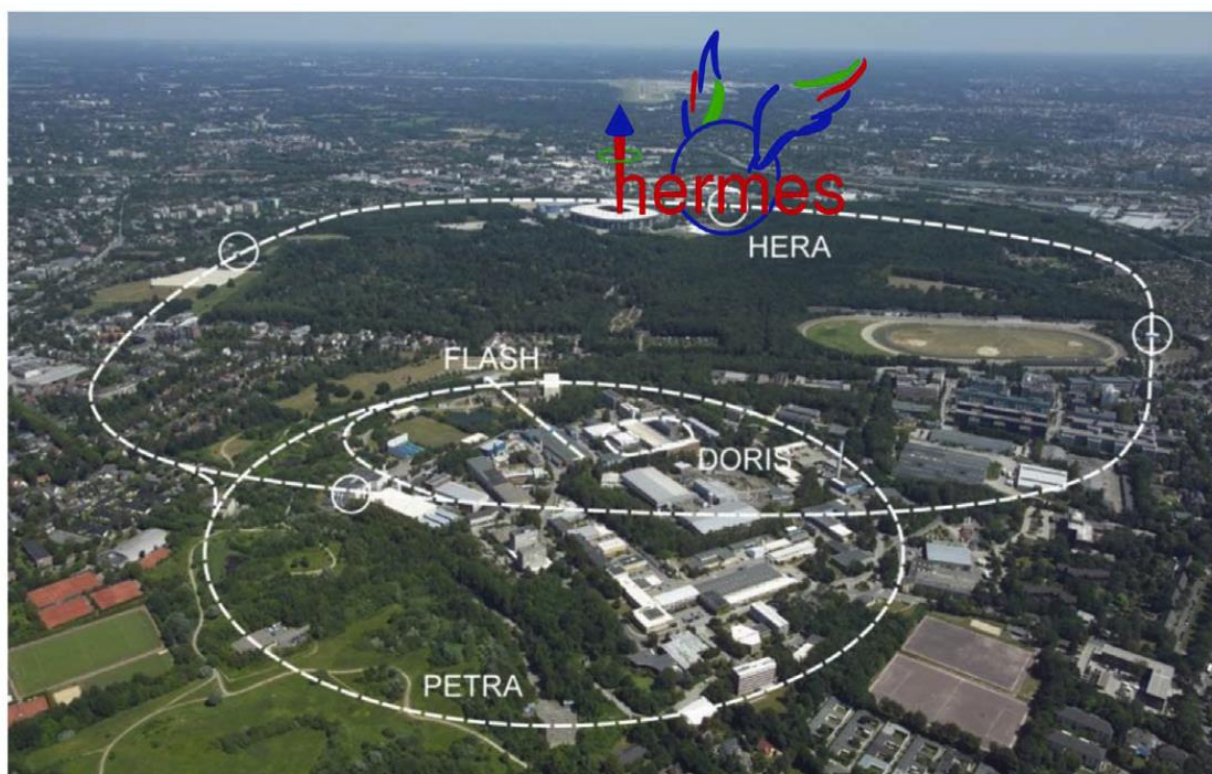
С.Л. Белостоцкий

Эксперимент HERMES на электронном пучке коллайдера HERA

Так называемый «Спиновый кризис» возник около 30-ти лет назад, когда Европейская мюонная коллаборация EMC сообщила о результатах своего эксперимента по глубоконеупругому рассеянию поляризованных мю-мезонов на поляризованных протонах при энергиях мюонного пучка несколько сотен ГэВ. Из эксперимента следовало, что суммарный спин составляющих протон кварков близок к нулю. Этот факт казался тем более удивительным, что магнитные моменты протона и нейтрона, а также измеренные в Лаборатории Ферми (FNAL) магнитные моменты гиперонов хорошо описывались в модели т.н. конституентных кварков, в которой автоматически предполагалось, что спин любого члена барионного октета (протона, нейтрона, лямбда-, сигма- и кси- гиперонов) представлял собой результат сложения спинов трех кварков, находящихся в S состоянии.

Как очевидно сейчас, эксперимент EMC был лишь первым шагом в направлении более глубокого понимания структуры нуклона. Последовал «вал» теоретических работ. Появилось новое, более современное правило сумм – если странные кварки/антикварки в нуклоне не поляризованы, то суммарный вклад кварков составляет $\Delta\Sigma_q = 0.59$ (Robert L. Jaffe, 1994 г.), т.е. может быть меньше единицы. Это был важный результат – но, конечно, не решение проблемы. Требовались более тщательные детальные исследования поляризационных характеристик при высоких энергиях, в том числе продолжение измерений зависящих от спина структурных функций кварков и глюонов в глубоконеупругом рассеянии на протоне и нейтроне, получение информации об орбитальном движении кварков, «поперечности» и пр. Основной вклад в эту программу по линии эксперимента внесли коллаборации HERMES (DESY) и COMPASS (CERN), а также эксперименты SLAC и измерения в США на пучках поляризованных протонов коллайдера RHIC.

Эксперимент HERMES был предложен профессором Клаусом Ридом (Klaus Rith) в 1991 году. Целью эксперимента HERMES было изучение спиновой структуры протонов и нейтронов в глубоконеупругом рассеянии (ГНР) позитронов. Предложенный эксперимент **являлся уникальным по возможностям доступа к спиновым характеристикам при высоких энергиях.** Набор данных был начат в 1994 году и закончился в июле 2007 года в связи с остановкой ускорителя. Был получен обширный экспериментальный материал, обработка и анализ которого продолжаются по сей день.



Коллайдер HERA (DESY, Hamburg). Эмблема HERMES указывает расположение измерительной станции HERMES на кольце коллайдера. DORIS и PETRA – пред-ускорители. В коллайдере HERA позитроны (электроны) ускорялись до 27,6 ГэВ, протоны - до 930 ГэВ

Экспериментальная установка

Предполагалось, что исследования будут проводиться на коллайдере HERA с помощью пучка продольно-поляризованных позитронов (электронов) с энергией 27,6 ГэВ. В эксперименте была практически реализована идея самополяризации пучка релятивистских заряженных частиц в магнитном поле. Поперечная поляризация появлялась за счет испускания фотонов синхротронного излучения – эффект, предсказанный А.А. Соколовым и И.М. Терновым в 1963 г. Получение необходимой для исследований продольной поляризации в циркулирующем пучке позитронов (электронов) – сложная техническая задача поворота спина – осуществлялось с помощью специально разработанных в DESY спин-ротаторов.

Возможность достижения на практике достаточно высокой поляризации пучка не представлялась заранее очевидной. Получение поляризации пучка как минимум 30% было главным условием Программного комитета DESY. После тщательной оптимизации работы ускорительного кольца была достигнута поляризация пучка 51% при времени нарастания и установления поляризации 20–25 минут, и эксперимент HERMES был принят к постановке. В эксперименте использовались позитронные (в основном) и электронные пучки. Поляризация контролировалась с точностью около 1% с помощью поляриметров путем рассеяния небольшой части позитронов пучка на лазерных фотонах.

Набор данных проводился на внутренней газовой поляризованной или неполяризованной мишенях с накопительной ячейкой. Исследовалось рассеяние на ядрах H, D, ^3He , продольно или поперечно поляризованных, а также на более тяжелых неполяризованных ядрах ^4He , ^{14}N , ^{20}Ne , ^{84}Kr , $^{129,132}\text{Xe}$. Плотность ядер в накопительной ячейке лимитировалась условием времени жизни пучка (5–8 часов) и задавалась на основе программы работы коллайдера.

Светимость измерялась двухплечевым калориметром Баба-Меллер. Вторичные частицы регистрировались с помощью широкоапертурного трекового детектора со спектрометрическим магнитом. Идентификация частиц осуществлялась с помощью электромагнитного калориметра, детектора переходного излучения и многоканального черенковского детектора.

Коллаборация HERMES состояла из ~250 физиков из Германии, США, Франции, Италии, России и других стран. Из России помимо ПИЯФ в коллаборацию входили группы ОИЯИ (Дубна), Физический Институт им. Лебедева (Москва), Институт Физики Высоких Энергий (Протвино).

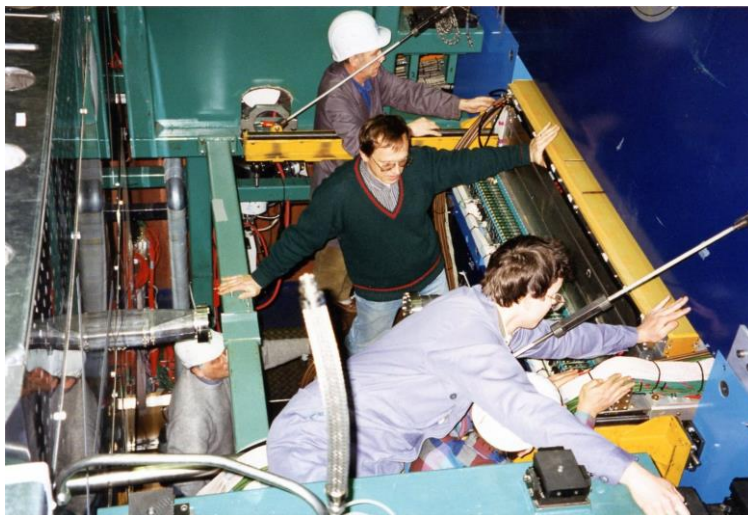
Материальный и интеллектуальный вклад ПИЯФ

Группа ПИЯФ под руководством автора этой статьи включилась в эксперимент HERMES на ранних стадиях в 1992 году, когда предложение о проведении этого эксперимента было еще в процессе рассмотрения. Группа состояла из 15 физиков (в основном из Лаборатории малонуклонных систем), экспертов по трековым приборам, специалистов по быстрой электронике, специалистов по системам охлаждения.



Часть группы физиков ПИЯФ перед установкой пропорциональных камер в зазор магнита спектрометра HERMES.

Слева направо: С. Патричев, А. Изотов, Г. Гаврилов, А. Киселев, О. Миклухо



Установка пропорциональных камер в зазор магнита

Группа ПИЯФ внесла существенный вклад в эксперимент, который состоял в следующем.

- Разработка и изготовление спектрометрического (основного) магнита эксперимента HERMES производились в НИИЭФА им. Д.В. Ефремова. Координаторами были С. Белостоцкий, К. Зинрам (DESY) и А. Петров (Институт Ефремова). Финансирование осуществлялось из гранта INTAS, полученного на эту работу INFN (Италия) совместно с ПИЯФ.

- Детектирование треков в зазоре магнита осуществлялось с помощью изготовленных в ПИЯФ пропорциональных камер на 12 тысяч каналов с быстрым съемом информации и системой охлаждения. Как всегда, работа научно-технических экспертов ОФВЭ А. Крившича, Г. Гаврилова, В. Андреева, В. Головцова, Л. Уварова, А. Васильева и многих других оказалась на высоте. Изготовленная в ПИЯФ аппаратура работала безупречно.
- Программа реконструкции треков в спектрометре HERMES была существенно модернизирована А. Киселевым.
- Поддержание DAQ и систем медленного контроля проводилось (частично) с помощью В. Батурина и А. Истова.
- Контроль работы трековых детекторов спектрометра выполнял Г. Гаврилов.

Основные результаты эксперимента HERMES

В формате данной статьи мы можем лишь перечислить основные направления программы исследований эксперимента HERMES и очень кратко обсудить полученные результаты. Они приведены ниже.

1. **Вклад кварков и глюонов в спин нуклона.**
Было получено $\Delta\Sigma_q = 0,330 \pm 0,025$ (см. следующую секцию).
2. **Функции фрагментации Коллинза и Сиверса, связанные с поперечным движением кварков.**
Тщательно исследовались спиновые эффекты поперечного движения кварков в нуклоне в покое и в фазе фрагментации вторичных адронов. Впервые измерены асимметрии Сиверса (внутреннее движение) и Коллинза (фрагментация).
3. **Обобщенные партонные распределения и орбитальное движение.**
Информация об орбитальных моментах партонов может быть получена из данных по глубоко-виртуальному комптоновскому рассеянию (DVCs). В результате интерференции DVCs и Bethe-Heitler амплитуд возникает асимметрия, которая коррелирует с орбитальным моментом кварка. Выполнены первые измерения этой асимметрии.
4. **Поляризационные параметры в рождении векторных мезонов.**
Проведено полное восстановление спин-зависящей матрицы перехода виртуального фотона в ρ и ω мезоны. Предложен и реализован метод прямого восстановления амплитуд перехода.
5. **Поляризация в рождении лямбда-гиперонов и параметры передачи спина.**
Впервые измерена «спонтанная» поляризация лямбда-гиперона в реакции фоторождения, т.е. на почти реальных фотонах со средней энергией около 15 ГэВ. В отличие от большинства реакций на протонных (адронных) пучках, поляризация оказалась положительной, достигая максимума $P_A = 0,15$ в области фрагментации мишени при поперечном импульсе $p_{\text{перп}} = 1$ ГэВ/с. Поляризация антилямбда-гиперона везде совместима с нулем, так же как в pp соударениях. Изучена A -зависимость. Средняя по $p_{\text{перп}}$ поляризация лямбда остается на уровне $0,0 - 0,07$ в интервале ядер-мишеней от H до Ne и обращается в ноль на тяжелых ядрах Kr и Xe . Был предпринят ряд попыток объяснения спонтанной поляризации гиперонов в кварковой модели. Однако этот богатейший экспериментальный материал до сих пор ждет адекватного теоретического объяснения.
6. **Была тщательно исследована передача спина лямбда-гиперону от поляризованного позитронного пучка в ГНР.**
Вектор передачи спина лежит в плоскости рождения гиперона, образованной импульсом гиперона и линией пучка. Оба компонента вектора передачи импульса лямбда- (и антилямбда-) гиперону оказались равными нулю.

Главный (по мнению автора) результат эксперимента – ответ на вопрос о «спиновом кризисе» – мы обсудим более подробно в следующей секции.

Следует отметить высокий творческий вклад сотрудников ПИЯФ в обработку и анализ экспериментальных данных. Модернизированная А. Киселевым программа реконструкции треков легла в основу всех анализов. С ее помощью «сырые» данные превращались в пособытийный набор со всеми необходимыми для физического анализа параметрами. Существенный вклад в физический анализ и интерпретацию результатов по темам, перечисленным выше, внесли

С. Белостоцкий, О. Гребенюк, Д. Веретенников, А. Жгун, П. Кравченко, С. Манаенков, Ю. Нарышкин.

Вклад кварков в спин нуклона

Эта работа имела высший приоритет, т.к. была связана с проблемой «спинового кризиса». Данные ЕМС требовали уточнения и детализации. В частности, было важно вновь измерить сумму спинов кварков $\Delta\Sigma_q$, понять поляризованы ли странные кварки ($\Delta s + \Delta\bar{s} = ?$), как распределяется спин между валентными u и d кварками и пр. Информация о поляризации кварков извлекалась независимо из двух типов ГНР при $Q^2 > 1 \text{ GeV}^2$: из инклюзивного рассеяния, в котором детектировался только рассеянный позитрон, и полуинклюзивного рассеяния, где один из адронов регистрировался на совпадение с рассеянным позитроном.

Оба подхода дали близкие результаты. Так, интегральные вклады кварков ($\Delta\Sigma_q$) оказались очень близки. Что касается разложения по ароматам, то ввиду сильной модельной зависимости второго метода, мы приводим здесь результаты, полученные из инклюзивного ГНР: $\Delta\Sigma_q = 0,330 \pm 0,025$ ($0,359 \pm 0,026$ из полуинклюзивного ГНР), $\Delta u + \Delta\bar{u} = 0,842 \pm 0,008$, $\Delta d + \Delta\bar{d} = -0,427 \pm 0,008$, $\Delta s + \Delta\bar{s} = -0,085 \pm 0,008 \pm 0,013_{theo}$.

Ошибка теоретического анализа наиболее важна для странных кварков, хотя результат остается статистически значимым. Как показал анализ, небольшая отрицательная поляризация «странного моря» сильно влияет на $\Delta\Sigma_q$, приводя к нарушению правила сумм R. Jaffe. Данные эксперимента HERMES оказались в хорошем согласии с результатами, полученными на мюонном пучке в эксперименте COMPASS, который продолжил начатое ЕМС изучение спиновой структуры нуклона.

Спиновый кризис – итоги

«The European Muon Collaboration, and later experiments, confirmed that the sum of the Z-components of the partonic quarks was very different, much smaller than 1/2. But we do not understand the connection between partonic and constituent quarks – a non-perturbative dynamical question – so that there is no basis for regarding this difference as a crisis.» – Eliot Leader, 2016 г.

Как следует из даты высказывания Элиота Лидера, одного из ведущих теоретиков в области КХД и спиновой физики, проблема спина протона остается не решенной по сей день. По сути, она сводится к вопросу, что есть спин в партонной модели, и какова связь этой модели с моделью конститuentных кварков, дающей в ряде случаев прекрасное описание барионных состояний (например, магнитных моментов барионного спин-1/2 октета).

Заключение

Возвращаясь к эксперименту, можно утверждать, что суммарный спин кварков-партонов измерен в эксперименте HERMES достаточно надежно. Он составляет $\Delta\Sigma_q = 0,330 \pm 0,025$. Получены вклады u и d кварков и отдельно валентных и морских кварков. При этом естественным образом дано объяснение нарушения правила сумм R. Jaffe.

HERMES предпринял попытку измерить поляризацию глюонов. Было получено интегральное значение $\Delta g/g = 0,049 \pm 0,034$. Этот результат носит характер оценки.

HERMES впервые измерил асимметрии, связанные с поперечным движением кварков в протоне и в процессах адронизации. Было показано, что поперечное движение партонов играет важную роль для понимания структуры барионов.

HERMES провел первые измерения асимметрии в DVCs.

HERMES впервые измерил поляризацию лямбда- и антилямбда- гиперонов в фоторождении.

Эксперимент HERMES внес существенный вклад в современное понимание структуры нуклона. Он еще раз продемонстрировал, что в физике элементарных частиц спин играет исключительно важную роль.

От физики ядра и частиц до получения пучков сверхвысоких энергий – история лаборатории

Юрий Михайлович Иванов,

заведующий лабораторией кристаллооптики заряженных частиц

Недавно в ЦЕРН был осуществлен успешный эксперимент по каналированию протонного и ионного пучков Большого адронного коллайдера (БАК) в изогнутых кристаллах, который продемонстрировал новые возможности формирования и управления пучками сверхвысоких энергий, а именно, применение крошечных кристаллов вместо огромных магнитов и коллиматоров, использование кристаллов в программе повышения светимости БАК и вывода с их помощью пучков из коллайдера для проведения исследований фундаментальных взаимодействий на фиксированных мишенях. Этому замечательному достижению предшествовал длинный путь, который соединил научные поиски, опыт и достижения многих людей из разных стран и нескольких поколений. Каким был путь ученых и инженеров Лаборатории кристаллооптики заряженных частиц Отделения физики высоких энергий ПИЯФ, внесших значительный вклад в успех эксперимента в ЦЕРН, рассказывает настоящая заметка.

Экзотические атомы

Лаборатория кристаллооптики заряженных частиц была образована в 2012 году из Лаборатории мезоатомов, которая сложилась в конце 1970-х вокруг группы Алексея Ивановича Смирнова, первоначально входившей в сектор рентгеновской и гамма спектроскопии Олега Игоревича Сумбаева. Исследования этих двух известных физиков во многом повлияли на ход событий.



А.И. Смирнов и О.И. Сумбаев, 1960-ые годы

Тогда, в начале 1970-х годов, по предложению А.И. Смирнова на синхротроне ПИЯФ был выполнен уникальный эксперимент по измерению массы пи-минус мезона с помощью кристалл-дифракционного спектрометра рентгеновского излучения пионных атомов [В.И. Марушенко, А.Ф. Мезенцев, А.А. Петрунин, С.Г. Скорняков, А.И. Смирнов, *Новое измерение массы пи-минус мезона*, Письма в ЖЭТФ **23** (1976) 80–82, эта работа была признана «Лучшей работой ЛИЯФ» 1975 года]. В данном эксперименте впервые источником рентгеновского излучения пионных атомов была мишень, облучаемая первичным пучком протонов высокой энергии, что привело к увеличению интенсивности рентгеновского излучения пионных атомов на несколько порядков по сравнению с опытами на вторичных

пучках и сделало возможным радикальное улучшение точности измерения энергии рентгеновских переходов в пионных атомах, известным образом связанных с массой пи-мезона. Постановка опыта развивала подход, успешно примененный О.И. Сумбаевым и А.И. Смирновым в 1960-е для исследования гамма-излучения радионуклидов, образующихся вблизи активной зоны ядерного реактора. [O.I. Sumbaev, A.I. Smirnov, *4-meter Cauchois spectrometer for neutron-capture γ -radiation research*, NIM **22** (1963) 125–137].

За первым экспериментом последовал целый ряд новых, выполненных на ускорителях США и Европы как независимыми группами, так и с участием нашей Лаборатории (за рубежом метод получил название “Gatchina target”). Важным этапом стал цикл исследований, проведенный в 1980-ые годы на Швейцарской мезонной фабрике в рамках международного сотрудничества ЛИЯФ – SIN (PSI), который был посвящен исследованию сильного взаимодействия в легких пионных атомах [W. Beer *et al.*, NIM PR A **238** (1985) 365–380; G. De Chambrier *et al.*, Nucl. Phys. A **442** (1985) 637–666]. Участниками этих работ стали сотрудники лаборатории Б.В. Григорьев, Л.Н. Кондунова, Л.П. Лапина, П.М. Левченко, К.Е. Кирьянов, В.Н. Марушенко, А.Ф. Мезенцев, А.А. Петрунин, А.Г. Сергеев, С.Г. Скорняков, А.И. Смирнов, В.М. Суворов. Ценный вклад в теоретический анализ взаимодействия внес Б.Л. Бирбраир.



А.И. Смирнов, 1980-ые



А.Г. Сергеев



Л.Н. Кондунова



К.Е. Кирьянов



Л.П. Лапина



П.М. Левченко

И в это же время сразу в двух направлениях развивались эксперименты в Советском Союзе. Первое направление было связано с измерением мягких рентгеновских переходов в пионных атомах водорода и дейтерия с целью определения пион-нуклонных длин рассеяния, фундаментальных постоянных теории сильного взаимодействия. Была создана установка (фокусирующий спектрометр по Иоганну, А.И. Смирнов, А.Г. Сергеев, А.И. Щетковский с сотрудниками), разработан детектор мягкого рентгеновского излучения (вместе с отделом А.Г. Крившича), измерены энергии калибровочных рентгеновских линий (вместе с лабораторией О.И. Сумбаева). Но безопасно вывести в экспериментальный зал синхроциклотрона ПИЯФ необходимую интенсивность протонного пучка не удалось, все ограничилось методическими разработками. В измененном виде проект готовился на Московскую мезонную фабрику (двухкристальный спектрометр, А.Ф. Мезенцев, К.Е. Кирьянов с сотрудниками), но, в конечном счете, эксперимент в варианте с фокусирующим спектрометром был осуществлен западными коллегами на Швейцарской мезонной фабрике в 1990-е годы.

Другое направление было связано с изучением экзотических атомов при более высоких энергиях первичного пучка протонов. Успешное измерение массы пи-минус мезона в ЛИЯФ показало, что новый подход перспективен и для атомов, образованных более тяжелыми мезонами и барионами. Но для их рождения нужны пучки с большей энергией. Развивая эту идею, А.И. Смирнов с сотрудниками предложили эксперимент на ускорителе ИФВЭ с энергией протонов 70 ГэВ (в Протвино) по изучению адронных атомов и характеристик элементарных частиц с помощью кристалл-дифракционного спектрометра (установка «Кварц»), который был успешно осуществлен в 1980-е – в начале 1990-х.



Ю.П. Платонов, 1980-е



М.П. Гурьев и Ю.М. Иванов, установка «Кварц», 1989 г.

В ходе его выполнения в Лаборатории была организована кристаллооптическая группа, сыгравшая и продолжающая играть важную роль в проводимых исследованиях. Для ее создания в 1985 г. в Лабораторию был приглашен Ю.П. Платонов, один из ведущих ленинградских специалистов в области точной механики и оптических технологий, с ним пришли его коллеги, отличные инженеры М.П. Гурьев, В.В. Скоробогатов, конструктор В.В. Иванов, возникла оптическая группа. Очень быстро в Лаборатории было налажено

опытное производство кристаллических пластин, изгибающих устройств, интерферометров, что позволило повысить светосилу и точность кристалл-дифракционной техники.

Важным результатом этой работы, проделанной в очень короткие сроки, стало существенное улучшение характеристик экспериментальной установки «Кварц» в ИФВЭ. К этому же времени была завершена модернизация ускорителя ИФВЭ, которая заметно повысила интенсивность выведенного протонного пучка. Все вместе это позволило выполнить точные измерения масс K^- -мезона и Σ^- -гиперона, которые и по сей день остаются лучшими в мире [А.С. Денисов, А.В. Желамков, Ю.М. Иванов, Л.П. Лапина, П.М. Левченко, В.Д. Малахов, А.А. Петрунин, А.Г. Сергеев, А.И. Смирнов, В.М. Суворов, О.Л. Федин, *Новое измерение массы K^- -мезона*, Письма в ЖЭТФ, **54** (1991) 557–561; М.П. Гурьев, А.С. Денисов, А.В. Желамков, Ю.М. Иванов, П.М. Левченко, В.Д. Малахов, А.А. Петрунин, Ю.П. Платонов, А.Г. Сергеев, А.И. Смирнов, В.М. Суворов, О.Л. Федин, *Первое измерение рентгеновского излучения Σ^- -атомов с помощью кристалл-дифракционного спектрометра*, Письма в ЖЭТФ, **57** (1993) 389–393].

Методические разработки в области газовых детекторов рентгеновского излучения и кристалл-дифракционной техники

Накопленный в Лаборатории опыт применения кристалл-дифракционных приборов и разработки газовых позиционно-чувствительных детекторов рентгеновского излучения нашел интересное приложение в экспериментах при сверхвысоких энергиях, когда А.И. Смирновым с соавторами в начале 1990-х был предложен оригинальный метод пространственной калибровки коллайдерных детекторов GEM на суперколлайдере SSC в США и ATLAS на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН с помощью интенсивного рентгеновского луча определенной энергии, сформированного кристаллом. К сожалению, проект SSC был закрыт, но в случае ATLAS работа была доведена до действующего прототипа. Участие сотрудников Лаборатории в работах для ЦЕРН способствовало формированию группы ATLAS под руководством О.Л. Федина и вхождению нашей Лаборатории в проект CMS. ATLAS и CMS – это в настоящее время два крупнейших коллайдерных эксперимента из проводимых в ЦЕРН.

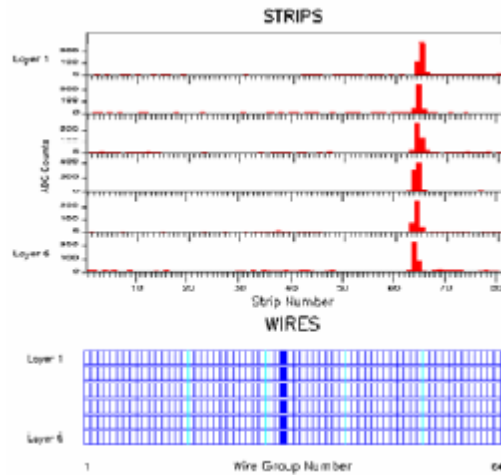
Эксперимент CMS на Большом адронном коллайдере

С конца 1990-ых годов сотрудники Лаборатории С.А. Вавилов, А.С. Денисов, Ю.М. Иванов, Л.П. Лапина, П.М. Левченко, А.А. Петрунин, В.В. Сулимов, Л.А. Щипунов и др. принимали и продолжают принимать активное участие в эксперименте CMS на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН.

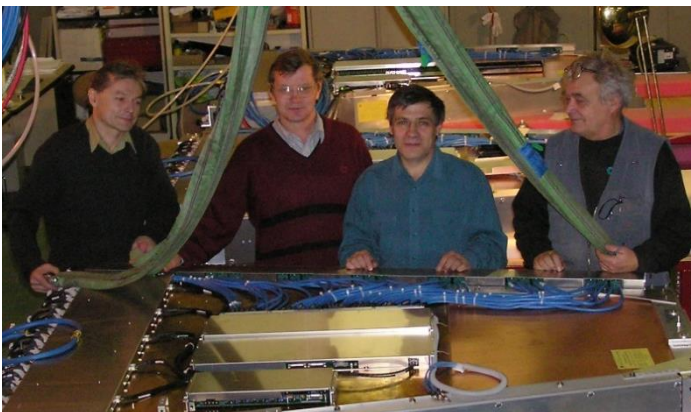


В.В. Сулимов, высоковольтный тест мюонных камер в ПИЯФ, 2002 г.

Группа ПИЯФ в CMS, руководимая А.А. Воробьевым, внесла большой вклад в разработку катодно-стриповых камер Торцевой Мюонной системы CMS, сборку и тестирование камер в ПИЯФ, их повторное тестирование в ЦЕРН, запуск и обслуживание в ходе эксперимента. Детекторы Мюонной системы сыграли решающую роль в открытии бозона Хиггса. Сотрудники Лаборатории по праву стали соавторами этого открытия.



Трек космического мюона, прошедшего через камеру



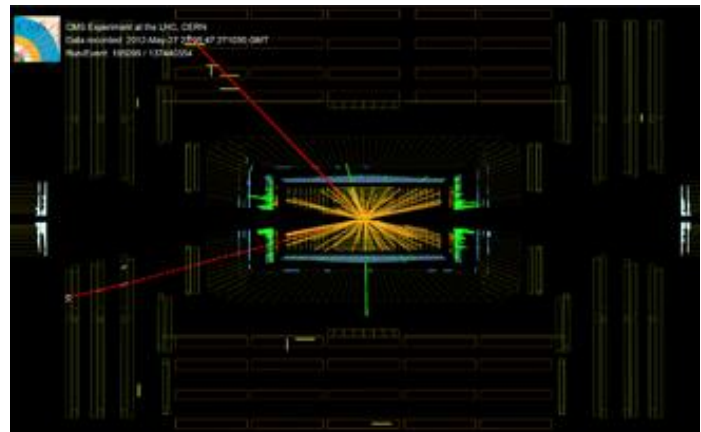
Ан.А. Воробьев, А.А. Петрунин, Л.А. Щипунов и А.С. Денисов, постановка мюонной камеры на тестирование в ЦЕРН, 2005 г.



П.М. Левченко и С.А. Вавилов в шахте детектора CMS в ЦЕРН, 2007 г.



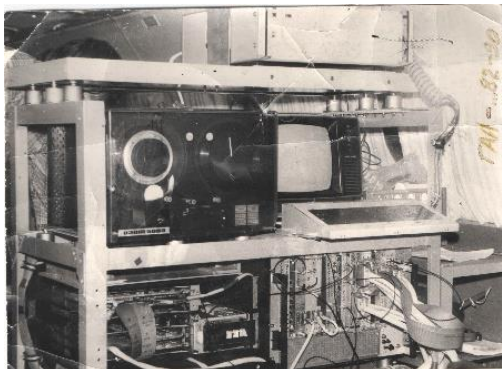
Л.А. Вайшнене, измерение альфа-активности материала мюонных камер, 2004 г.



Распад бозона Хиггса, зарегистрированный мюонными камерами, собранными в ПИЯФ

Прикладные работы

Ведущие сотрудники Лаборатории В.М. Суворов, А.С. Денисов, П.М. Левченко, В.Д. Малахов, С.А. Вавилов и другие внесли большой вклад в развитие не только фундаментальных, но и прикладных исследований.



Электронный комплекс ГРАН, 1984 г.



Авиационная лаборатория ГАЛ в салоне ИЛ-18Д, 1985 г.



Геосъемка Арктики, ИЛ-18Д, 1985 г.



В.М. Суворов и А.С. Денисов, первые измерения в полете ИЛ-18Д, 1984 г.



В.Д. Малахов и А.С. Денисов, возвращение с Северного полюса, 1985 г.



В.Д. Малахов, Антарктида, 1986 г.

В 1980-ые ими, совместно с сотрудниками ВНИИ Океангеология, был создан ГРАН – программно-управляемый электронный комплекс сбора и регистрации геофизических данных для авиационной лаборатории ГАЛ, который удачно воплотил накопленный в Лаборатории опыт разработки электроники для физики высоких энергий. Комплекс был

установлен на научно-исследовательском самолете ИЛ-18Д и прошел испытания над территорией СССР от Балтики до Сахалина и от Северного полюса до Каспийского моря, после чего был использован для магнитной и гравиметрической съемки в ходе 31-ой и 32-ой Антарктических экспедиций. Разработка комплекса ГРАН была удостоена Серебряной медали на ВДНХ СССР в 1987 году.

Другая масштабная «прикладная» работа, имевшая большой общественный резонанс, была выполнена Ю.П. Платоновым, В.В. Ивановым, М.П. Гурьевым и их добровольными помощниками. В 1988 при посещении Ферапонтовского монастыря Юрий Петрович Платонов обнаружил сохранившиеся, но сильно поврежденные временем башенные колокольные часы первой половины XVII века и загорелся идеей восстановить их (часовые механизмы были его второй, после оптики, профессией). Он сумел увлечь этой идеей многих людей, привлечь помощь (шефство) многих организаций, в том числе Фонда культуры, и через два года башенные часы и звонница в 19 колоколов были возрождены (колокола искали по всей области, недостающие отлили заново). Далее последовало возрождение под руководством Ю.П. Платонова башни и башенных часов Гатчинского дворца (шестерни часового механизма были изготовлены им собственноручно в оптико-механической мастерской Лаборатории), башенных часов Суздальского кремля, Мраморного дворца, Зимнего дворца, после чего ему предложили создать в Эрмитаже лабораторию по реставрации часовых и музыкальных механизмов.



Ю.П. Платонов, сборка циферблата башенных часов Гатчинского дворца, 1994 г.



В.В. Иванов за работой, 1990-е годы



Часовая башня Гатчинского дворца с установленными колоколами и циферблатами часов, 1994 г.

В 1994 г. он приступил к организации лаборатории в Эрмитаже, совмещая новую деятельность с работой в ПИЯФ. Первыми были восстановлены знаменитые напольные часы «Механический оркестр» Штрассера, следом еще более знаменитые часы «Павлин». Рассказ самого Платонова о возрождении часов есть в посвященном ему фильме Игоря Шадхана «Россия, который час?». Много подробностей описано в книжке С.С. Василенко «О быстротечности Жизни и бесконечности Времени» и в очерке Л.А. Колесниковой «Часовщик Платонов». В 2010 году цикл работ по реставрации «Павлина» и других редких механизмов, хранящихся в Эрмитаже, был удостоен Государственной премии РФ. Один из лауреатов – Михаил Петрович Гурьев, ученик Платонова, много сделавший для развития экспериментальных установок нашей Лаборатории. Юрий Петрович не дожид до этого момента, он ушел из жизни в 1997 г.



Ю.П. Платонов и М.П. Гурьев, перед подъемом циферблата башенных часов Зимнего дворца после реставрации, 1995 г.



Часы «Павлин», Эрмитаж

Взаимодействие заряженных частиц с кристаллами

К началу 1990-х в Лаборатории сложилось новое направление исследований, связанное с изучением каналирования частиц высокой энергии в изогнутых кристаллах, которое со временем и привело к изменению названия лаборатории. Толчком к новым исследованиям послужило изобретение А.И. Смирновым в середине 80-х способа фокусировки частиц с помощью изогнутых кристаллических пластин особой формы. Такие кристаллы были изготовлены под руководством Ю.П. Платонова и детально исследованы в сотрудничестве с группой В.И. Котова (ИФВЭ) на выведенном пучке протонов с энергией 70 ГэВ в ИФВЭ [М.Г. Гордеева, М.П. Гурьев, А.С. Денисов, Ю.П. Платонов, В.В. Скоробогатов,

А.И. Смирнов, О.Л. Федин, А.И. Щетковский (ПИЯФ), В.И. Баранов, Н.А. Галяев, В.В. Дуденко, В.Н. Запольский, В.И. Котов, С.В. Царик, Ю.А. Чесноков (ИФВЭ). *Первые результаты исследования фокусировки пучка протонов с энергией 70 ГэВ изогнутым монокристаллом*, Письма в ЖЭТФ, **54** (1991) 485–488]. Эти эксперименты вошли в цикл работ, отмеченный Государственной премией РФ 1996 года, лауреатом которой А.И. Смирнов стал посмертно (Алексей Иванович ушел из жизни в январе 1996 г.).

Несмотря на уход А.И. Смирнова, сотрудничество ИФВЭ-ПИЯФ продолжилось, и в 1996 г. был начат новый цикл исследований, имевший целью радикальное увеличение эффективности кристаллического вывода протонного пучка из ускорителя. К тому времени, а это была середина 1990-х годов, практически во всех крупнейших ускорительных центрах (ОИЯИ, ИФВЭ, ФНАЛ, ЦЕРН) уже были поставлены эксперименты по выводу с помощью кристаллов пучков высоких энергий из кольцевых ускорителей. Их анализ привел к открытию эффекта многократного прохождения частиц циркулирующего пучка через кристалл и к предположению о существенном увеличении эффективности вывода при уменьшении длины изогнутого кристалла. Не хватало подтверждающих экспериментов, для осуществления которых нужно было изобрести способы получения коротких (несколько мм) изогнутых кристаллов.

Именно эти решающие эксперименты были подготовлены и выполнены сотрудниками ИФВЭ-ПИЯФ на ускорителе У-70 в ИФВЭ. Для их осуществления были разработаны и реализованы два способа получения коротких изогнутых кристаллов: кристаллы-полоски (в ИФВЭ) и кристаллы О-образной формы (в ПИЯФ). Короткие изогнутые кристаллы позволили на 4 порядка увеличить эффективность кристаллического вывода на ускорителе ИФВЭ и практически сравняться с традиционными методами [А.Г. Афонин, В.М. Бирюков, В.А. Гаврилушкин, В.Н. Гресь, Б.А. Зеленов, В.И. Котов, В.А. Майшеев, А.В. Минченко, В.И. Терехов, Е.Ф. Троянов, Ю.А. Чесноков (ИФВЭ), М.Г. Гордеева, А.С. Денисов, Ю.М. Иванов, А.А. Петрунин, В.В. Скоробогатов, Б.А. Чунин (ПИЯФ), *Первые результаты экспериментов по высокоэффективному выводу протонов из У-70 с помощью монокристалла*, Письма в ЖЭТФ, **67** (1998) 741–745, *Новые результаты по изучению эффективного вывода протонов кристаллом из 70 ГэВ ускорителя ИФВЭ*, Письма в ЖЭТФ, **68** (1998) 544–548].



В.В. Скоробогатов, 1990-е годы



Б.А. Чунин, 1990-е годы



Н.П. Волков, обработка О-кристаллов



М.А. Кознов, изготовление упруго-квасимозаичных пластин кремния

Третий способ получения коротких изогнутых кристаллов был развит в ПИЯФ немного позднее, он основан на использовании упругоквасимозаичного эффекта в кристаллах кремния, который восходит к ранним работам О.И. Сумбаева с сотрудниками по упругой квазимозаичности кристаллов кварца, заложивших основы для создания светосильных кристалл-дифракционных спектрометров рентгеновского и гамма излучения.

Упругоквасимозаичный эффект в кристаллах кремния был сначала обнаружен и изучен в опытах с рентгеновским излучением [Ю.М. Иванов, А.А. Петрунин, В.В. Скоробогатов, *Наблюдение эффекта упругой квазимозаичности в изогнутых монокристаллах кремния*, Письма в ЖЭТФ, **81** (2005) 129–132], а затем подтвержден в опытах на пучке протонов с энергией 70 ГэВ в ИФВЭ.

Первые опытные кристаллы были изготовлены В.В. Скоробогатовым, они имели длину полмиллиметра вдоль протонного пучка с энергией 70 ГэВ и 30 микрон для протонного пучка с энергией 1 ГэВ. При таком пробеге многократное кулоновское рассеяние протонов становится существенно меньше критического угла каналирования, что позволило в первых же опытах на пучке экспериментально обнаружить эффект объемного отражения [Yu.M. Ivanov, A.A. Petrunin, V.V. Skorobogatov, Yu.A. Gavrikov, A.V. Gelamkov, L.P. Lapina, A.I. Schetkovsky, S.A. Vavilov, V.I. Baranov, Yu.A. Chesnokov, A.G. Afonin, V.T. Baranov, V.N. Chepegin, V. Guidi, W. Scandale, and A. Vomiero, *Volume Reflection of a Proton Beam in a Bent Crystal*, Phys. Rev. Lett. **97** (2006) 144801; Ю.М. Иванов, Н.Ф. Бондарь, Ю.А. Гавриков, А.С. Денисов, А.В. Желамков, В.Г. Ивочкин, С.В. Косьяненко, Л.П. Лапина, А.А. Петрунин, В.В. Скоробогатов, В.М. Суворов, А.И. Щетковский, А.М. Таратин, В. Скандале, *Объемное отражение протонов с энергией 1 ГэВ изогнутым кристаллом кремния*, Письма в ЖЭТФ, **84** (2006) 445–450]. Работа была признана «Лучшей работой ПИЯФ» 2006 года.



В.А. Горбунов и Ю.М. Иванов, установка кристалла на пучок протонов с энергией 1 ГэВ, 2005–2006 гг.



Ю.А. Гавриков, настройка первого поворотного механизма кристалла на медицинском канале ПИЯФ, 2005 г.



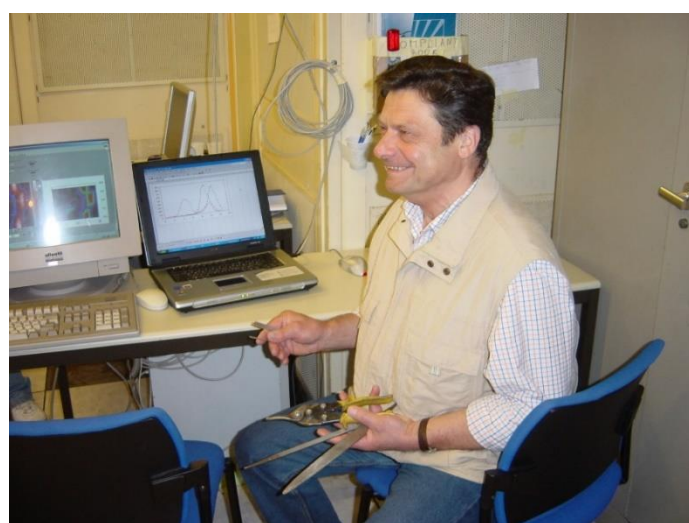
А.В. Желамков, сборка первой системы регистрации данных для поиска объемного отражения в ПИЯФ, 2005 г.



А.И. Щетковский, настройка первых детекторов для поиска объемного отражения в ПИЯФ, 2005 г.



В.А. Майшеев, Ю.А. Чесноков и А.А. Петрунин, обсуждение результатов в ИФВЭ, 2005 г.



В.В. Скоробогатов объясняет сборку из двух кристаллов для первого опыта по двойному объемному отражению в ЦЕРН, 2006 г.

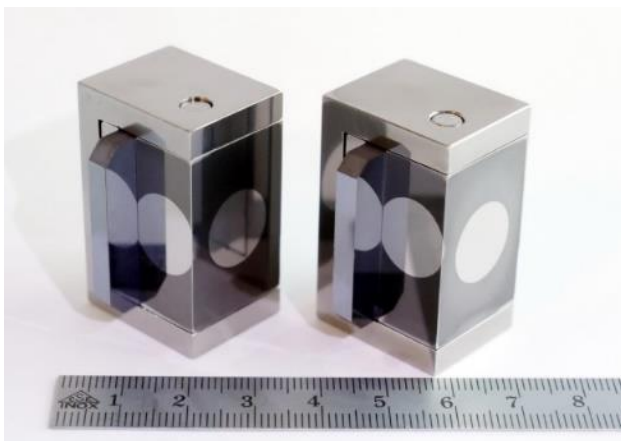
Практически сразу начались исследования нового эффекта в ЦЕРН в рамках проекта N8-RD22, который в 2009 году превратился в международный эксперимент UA9 с целью создания высокоэффективной системы кристаллической коллимации пучков Большого адронного коллайдера. В работах по этому проекту принимают активное участие сотрудники Лаборатории Н.П. Волков, Л.А. Вайшнене, Ю.А. Гавриков, Б.Л. Горшков, А.С. Денисов, Ю.М. Иванов, М.А. Кознов, Л.П. Лапина, Л.Г. Маляренко, В.И. Мурзин, Л.Ф. Павлова.

После серии подготовительных экспериментов в 2009–2013 гг. и разработки необходимого оборудования в 2014–2015 гг. каналирование (с целью коллимации) пучков Большого адронного коллайдера было успешно осуществлено в 2016 г. с помощью коротких изогнутых кристаллов кремния, реализующих режим многократного прохождения протонов через кристалл. Отклоненный каналированный пучок был перехвачен вторичным коллиматором и зарегистрирован по увеличению скорости счета мониторов потерь, расположенных вблизи этого коллиматора. Одновременно в режиме каналирования наблюдалось значительное снижение потерь пучка в кольце коллайдера [W. Scandale *et al.*, *Observation of channeling for 6500 GeV/c protons in the crystal assisted collimation setup for LHC*, *Physics Letters B* **758** (2016) 129–133].

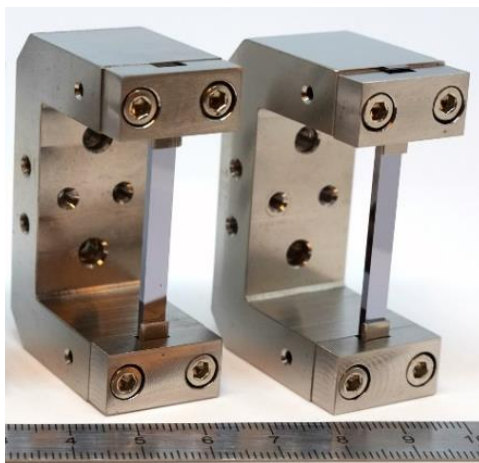


Ю.А. Гавриков, эксперимент по кристаллической коллимации на пучках ЦЕРН, зал управления ускорительным комплексом ЦЕРН, 2010-е годы

Для продолжения и развития исследований по кристаллической коллимации и кристаллическому выводу в 2017–2018 гг. на пучки Большого адронного коллайдера были установлены 3 новых кристалла, разработанные и подготовленные в ПИЯФ.



Кристаллы с упругоквазимозаичным изгибом, разработанные в ПИЯФ для ЛHC, 2014 г.



Кристаллы с антикластическим изгибом, разработанные в ПИЯФ для ЛНС, 2017 г.



Л.Г. Маляренко, Б.Л. Горшков, М.В. Мальков, Ю.М. Иванов, Алессандро Маси (ЦЕРН), Л.А. Вайшнене, совещание по подготовке кристаллов для ЦЕРН, 2017 г.

В 2019 году ПИЯФ получил предложение ЦЕРН участвовать в создании системы кристаллической коллимации в рамках программы повышения светимости HiLumi ЛНС. Проект предполагает создание 12 кристаллических станций для ЛНС в период 2019–2026 гг. и основан на использовании новейших технологий. Он позволит провести глубокую модернизацию производственной базы и средств контроля в Российских институтах и обеспечит их участие в создании ускорительных комплексов будущего.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МЮОННОГО КАТАЛИЗА ЯДЕРНОГО dd - И dt -СИНТЕЗА В ПИЯФ

Г.Г. Семенчук,
д.ф.-м.н.,
заведующий группой (лабораторией)
мюонного катализа в 1980-х – 2000-х гг.

*Смешав дейтерий, водород и тритий,
Стоим на вахте трудовой.
Ждем от катализа открытий,
Когда мюон, увидев тритий
И прихватив с собой дейтрон,
Рождает гелий и нейтрон.
Заставим мы мюон трудиться,
Чтобы не думал он лениться.
Хотим омегой пренебречь ($w_{d1} \approx 0$),
Чтобы энергию извлечь.*

*(Написано в первую ночную смену на пучке
PSI (Швейцария) в апреле 1989 года)*

Введение

В настоящем обзоре представлены основные результаты исследований явления мюонного катализа ядерного dd - и dt -синтеза, начатых в ЛИЯФ в 1980 году по распоряжению Президиума АН. Интерес к этому явлению был связан с обнаружением в ОИЯИ (Дубна) резонансного механизма образования $dd\mu$ -молекул, обязанного наличию у них нового вращательно-колебательного уровня с квантовыми числами $J = v = 1$ и очень малой энергией связи ($\varepsilon_{11} = -1,9$ эВ), приводящей к резкому увеличению скорости их образования в диапазоне температур 25–300 К.

Обнаружение подобного уровня у $dt\mu$ -молекул с еще меньшей энергией связи ($\varepsilon_{11} = -0,66$ эВ) сделало бы возможным осуществление ~ 100 циклов dt -синтеза за время жизни мюона, что позволяло бы рассматривать мюонный катализ как потенциальный источник нейтронов и ядерной энергии. Интерес к указанным теоретическим предсказаниям резко возрос после экспериментального подтверждения высокой скорости образования $dt\mu$ -молекул группой В.П. Дзелепова в 1979 году. С этого момента были начаты эксперименты во многих лабораториях мира, имеющих пучки мюонов. В нашей стране подобные исследования проводились в ОИЯИ (Дубна) и в ПИЯФ (Гатчина).

Мое знакомство с мюонным катализом произошло в июле 1979 года, когда я был вызван в кабинет к заведующему ОФВЭ профессору А.А. Воробьеву, где мне была передана копия статьи С.С. Герштейна и Л.И. Пономарева под названием «Мезонный катализ ядерного синтеза в смеси дейтерия и трития». Было сказано, что я назначен ответственным исполнителем этой темы и должен квалифицированно подтвердить или опровергнуть сделанные теоретические оценки. С этого момента ритм жизни резко изменился, будучи подчиненным выполнению этой важной темы. Буквально в течение месяца был написан и утвержден директором ЛИЯФ технический проект эксперимента «Мю-катализ» и получено разрешение в Медсанчасти № 24 на проведение работ с тритием. Этот момент можно считать стартовой отмашкой для начала работ по данной теме. Я благодарен заместителю директора Института Н.К. Абросимову, который оперативно оформил необходимые документы для обеспечения безопасных условий работы с тритием на синхроциклотроне.

В кратчайшие сроки были проведены обсуждения структуры новых установок и распределены заказы на их изготовление. Обсуждение показало, что к работе надо привлекать специалистов разных специальностей: по криогенике – для очистки водорода от примесей O_2 и N_2 (до уровня 10^{-6}) и для контроля этого уровня, радио-инженеров для разработки чувствительной спектрометрической и логической электроники, программистов для анализа получаемых данных. В результате интенсивного «мозгового штурма» была изготовлена и испытана на пучке в декабре 1980 года первая ионизационная камера, работающая при температуре 300 К и давлении 90 атм дейтерия. Уже в ноябре 1981 года был опубликован первый предварительный физический результат: «Измерение коэффициента прилипания мюонов в процессе мюонного катализа dd -синтеза $\omega_{dd} = 0,14 \pm 0,01$ » [1]. Ниже будет дано описание методик, примененных для анализа различных параметров мюонного катализа. На Рис. 1. представлены участники первых опытов по мюонному катализу, проводившихся в ПИЯФ под руководством А.А. Воробьева.

Следует отметить, что на снимке приведены не все участники проекта «Мю-катализ». Надо упомянуть о разработчиках электроники из ОРЭ, о сотрудниках КБ, превращавших наши эскизы в точные чертежи, сотрудниках ЦЭО, изготавливавших требуемое оборудование часто на пределе имевшейся точности, о сотрудниках группы радиохимии, обеспечивавших высокую чистоту используемых в экспериментах газов. Общим был энтузиазм у всех участников проекта, позволявший надеяться на успешное решение всех возникавших проблем.

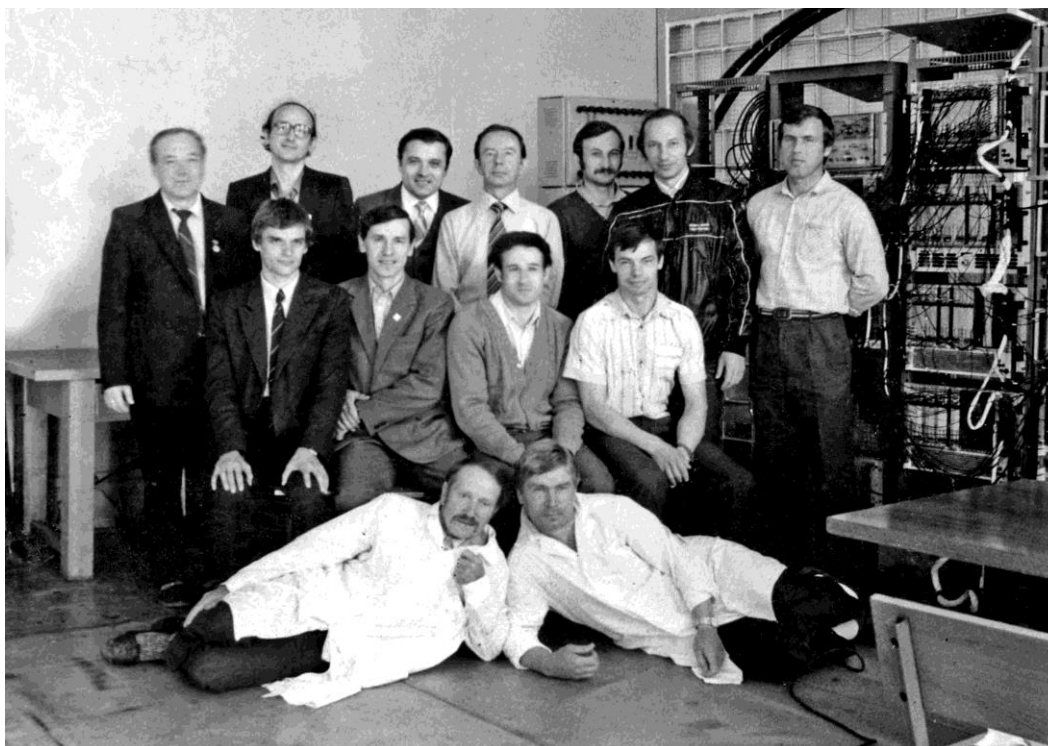


Рис. 1. Стоят, слева направо: Ю.С. Григорьев, Ю.В. Смиренин, С.М. Козлов, В.И. Поромов, А.Д. Еремеев, Г.Е. Петров, А.И. Ильин*. Сидят, слева направо: А.А. Васильев, Г.Г. Семенчук, Е.М. Маев, Л.Б. Петров. На переднем плане: А.А. Андреев и А.Н. Шапарев

Экспериментальный метод ПИЯФ

Как известно, наши коллеги, работавшие в Дубне, использовали методику регистрации нейтронов dd - и dt -синтеза при анализе характеристик мюонного катализа. В ОФВЭ ПИЯФ был развит принципиально новый метод исследований, использующий ионизационную камеру высокого давления, наполненную водородом (дейтерием) в качестве «активной» мишени и одновременно в качестве детектора заряженных продуктов синтеза. Выбор этого метода опирался на большой опыт применения в ОФВЭ ПИЯФ ионизационных детекторов с водородным наполнением, первым из которых была камера «ИКАР», работавшая при давлении водорода 10 атм. Анализ сигналов с камеры позволял выбирать остановки мюонов в центральной части чувствительного объема, обеспечивая стопроцентную эффективность регистрации продуктов синтеза. При создании новой камеры необходимо было удовлетворить нескольким взаимопротиворечивым требованиям. Прежде всего, надо было увеличить давление газа, чтобы обеспечить достаточное число остановок мюонов. Рост давления приводит к уменьшению пробегов продуктов синтеза (до долей мм) и тем самым повышает быстродействие. Однако с ростом давления уменьшается скорость дрейфа электронов и растет рекомбинация зарядов, созданных продуктами синтеза.

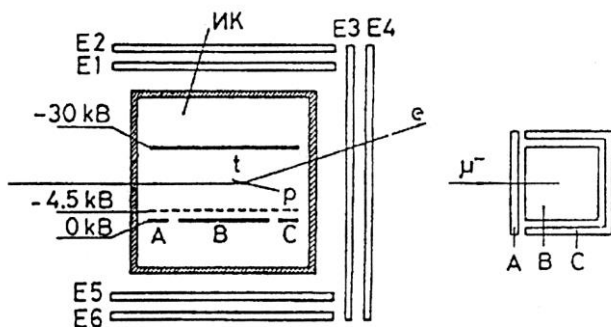


Рис. 2. Схема первой ионизационной камеры (ИК) для исследования $dd\mu$ -синтеза (Гатчина, 1980 г.). Расстояние катод-сетка – 10 мм; расстояние сетка-анод – 1 мм; размер анода В – $35 \times 35 \text{ мм}^2$; давление (D_2) – 90 атм

*) В последующем Андрей Иванович Ильин стал главой Гатчинского муниципального района, председателем Совета депутатов.

Впервые были получены данные о рекомбинации ионизационных зарядов, оставляемых продуктами синтеза в дейтерии при давлении 30–100 атм и напряженности поля 10–40 кВ/см. Оказалось, что для образующихся в $dd\mu$ -катализе частиц ${}^3\text{He}^{++}$ с начальной энергией 0,82 МэВ рекомбинация достигала ~55%, что, тем не менее, обеспечивало их надежную регистрацию при пороге электроники ~130 кэВ. Была измерена скорость дрейфа электронов в водороде и дейтерии в области давлений 15–100 атм. Она определялась по длительности нарастания фронта сигналов от α -источника, находившегося на катоде двухэлектродной ИК.

Измеряя время дрейфа электронов ионизации к аноду, мы можем, зная их скорость, определить координату остановки мюона и затем выделить “чистую” область для анализа событий синтеза. По результатам тестовых измерений была спроектирована первая ионизационная камера для исследования $dd\mu$ -катализа (Рис. 2) [2]. Сборка и испытания камеры на высокое давление проводились Ю.С. Григорьевым, Е.М. Маевым, Г.Г. Семенчуком, Д.В. Балиным и В.С. Дубограем.

Газ для наполнения камеры очищался с помощью цеолитов, работающих при температуре жидкого азота. Подготовку системы очистки на первом этапе экспериментов проводил А.А. Марков. Им же проводился анализ примесей (N_2 и O_2) с помощью хроматографа ЛХМ-8МД. Уровень влажности газа контролировался блоком “Байкал-3”, изотопный состав газа контролировался хроматографом “Цвет-100”.

Из технологических проблем, решение которых потребовало особых усилий, следует отметить изготовление высоковольтных керамических вводов для камер, работающих при высоком давлении. Совместно со специалистами завода «Светлана» была выбрана керамика на основе окиси алюминия и проведены все необходимые операции: формование, отжиг, глазурирование, металлизация и пайка. Пайка проводилась припоем ПСР-70 на слой никель-марганцевой металлизации. Контроль качества изготавливаемых на «Светлане» вводов осуществляли Д.В. Балин, В.С. Дубограй и Ю.В. Смиренин.

Анализ полученной информации показал, что камера эффективно разделяет события с прилипанием мюонов и без прилипания благодаря различию ионизационных потерь у одно- и двухзарядных частиц, какими являются ионы ${}^3\text{He}\mu^+$ и ядра ${}^3\text{He}^{++}$. Поскольку потери энергии частиц при торможении квадратично зависят от заряда ($dE/dx \sim Z^2$), то плотность ионизации у двухзарядных частиц будет существенно выше, чем у однозарядных. Как следствие этого величина электрон-ионной рекомбинации у них будет также выше, а регистрируемая энергия ниже. У однозарядных частиц, наоборот, меньшая плотность ионизации приводит к меньшей рекомбинации, а значит к большей регистрируемой энергии. В результате частицы ${}^3\text{He}\mu^+$ и ${}^3\text{He}^{++}$, имеющие одинаковую начальную энергию, в процессе их регистрации в камере «раздвигаются» в энергетическом спектре, что позволяет с высокой точностью определять число событий с прилипанием. Данный метод является уникальным и не имеет аналогов. В качестве примера на Рис. 3 приведен амплитудный спектр продуктов dd -синтеза, измеренный в одном из наших первых экспериментов [2].

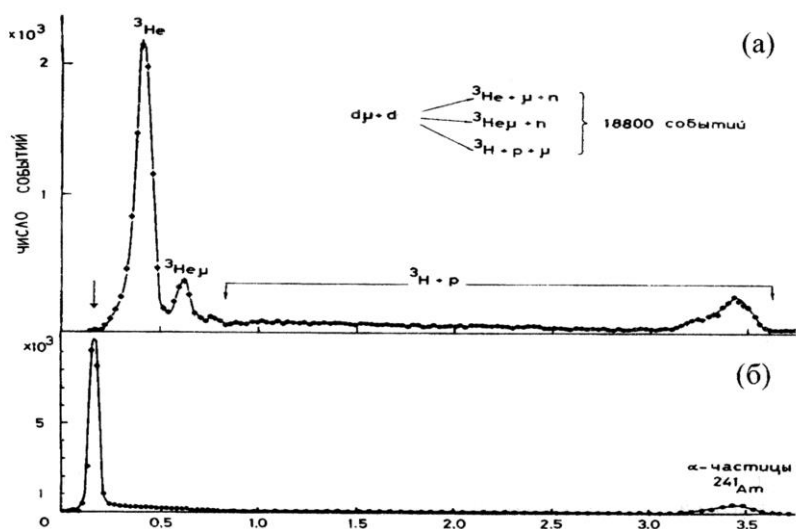


Рис. 3. Энергетическое распределение событий dd -синтеза, зарегистрированных ионизационной камерой. Параметры камеры приведены на Рис. 2. Видно разделение пиков $({}^3\text{He})^{++}$ и $({}^3\text{He}\mu)^+$ вследствие эффекта рекомбинации

Высокая эффективность камеры и малое время анализа сигналов, равное ~300 нс, позволяли регистрировать остановившийся мюон и до 3-х последовательных сигналов синтеза на каждом из трех анодов камеры. При этом для каждого сигнала измерялись три величины: заряд (энергия) импульса, время начала импульса и время окончания импульса. Временные интервалы между сигналами

синтезов несли информацию о скорости мезокаталитических реакций, амплитуды и длительности импульсов в камере содержали информацию об энергиях и пробегах продуктов синтеза.

В последующих экспериментах было использовано несколько модификаций ионизационной камеры, отличающихся, в основном, геометрией и числом анодов. Особый интерес представляло прецизионное измерение температурной зависимости скорости образования $dd\mu$ -молекул ($\lambda_{dd\mu}$). С этой целью был разработан вариант камеры с гелиевым охлаждением [3] (Рис. 4), позволяющий работать в диапазоне температур 30–300 К. При этом в любой точке температура могла быть стабилизирована и измерена с точностью $\pm 0,3$ К. В экспериментах, выполненных в PSI (в Швейцарии), ионизационная камера была окружена 19 пластиковыми нейтронными счетчиками, что еще больше расширило возможности метода, улучшив условия регистрации событий синтеза, происходящих непосредственно (в пределах 200 нс) вслед за остановкой мюона в камере.

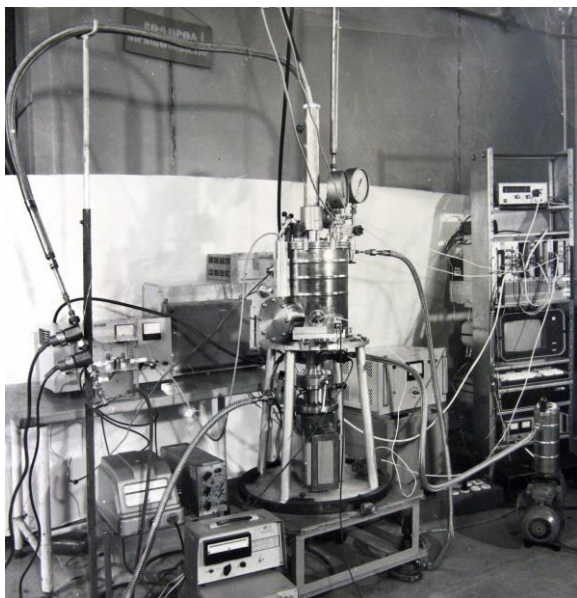


Рис. 4. Первая криогенная установка, созданная в Гатчине для исследования $dd\mu$ -катализа; (1987 г.)

Точное измерение $\lambda_{dd\mu}$ явилось существенным этапом в исследовании мезокатализа: с этого момента стало возможным количественное сравнение теории и эксперимента. В этом отношении особо информативными являются измерения температурной зависимости $\lambda_{dd\mu}(T)$. Такие измерения были выполнены нами в 1987 году [4]. На Рис. 5 наши данные сравниваются с расчетной зависимостью $\lambda_{dd\mu}(T)$, полученной группой Л.И. Пономарева. В расчете использовано большое число матричных элементов, описывающих переходы в мезомолекулярном комплексе. Но в конечном итоге результат расчета чувствительным образом зависит от двух параметров: от энергии наименее связанного уровня ε_{11} и от вероятности λ_f слияния дейтронов в $dd\mu$ -молекуле. На Рис. 5 видно, что расчетная зависимость $\lambda_{dd\mu}(T)$ (сплошная линия) согласуется с экспериментальной кривой при $\varepsilon_{11} = -1,965 \pm 0,001$ эВ, что находится в прекрасном согласии с современным расчетным значением $(\varepsilon_{11})_{\text{расч}} = -1,9653$ эВ.

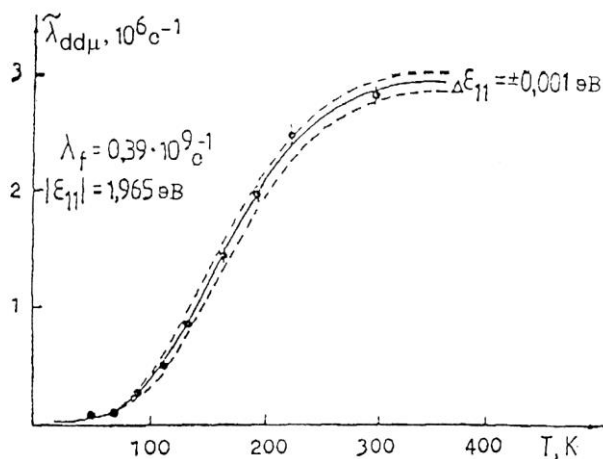


Рис. 5. Резонансная зависимость скорости $dd\mu$ -катализа от температуры. Точки – результат нашего эксперимента (Гатчина, 1987–1990 гг.). Теоретическая кривая соответствует значению энергии уровня $|\varepsilon_{11}| = 1,965$ эВ и скорости dd -синтеза $\lambda_f = 0,39 \times 10^9$ с⁻¹. Указан коридор ошибок $\Delta\varepsilon_{11} = \pm 0,001$ эВ

В момент образования $d\mu$ -атома он может находиться в двух спиновых состояниях, $F = 3/2$ и

$F = 1/2$. С вероятностью $\lambda_{3/2, 1/2}$ состояние $F = 3/2$ переходит в состояние $F = 1/2$, и наступает термодинамическое равновесие. До сих пор мы обсуждали скорость образования $dd\mu$ -молекул в равновесном состоянии. В эксперименте в PSI ионизационная камера работала в совпадении с нейтронными детекторами, что позволяло регистрировать события dd -синтеза, начиная непосредственно с момента остановки мюона, и получать информацию о характере быстрых процессов. Отличие от предыдущих экспериментов с нейтронными детекторами состояло в меньшем уровне фона и в возможности калибровки эффективности нейтронного детектора с точностью $\pm 1\%$ (по сравнению с $\pm 10\%$ в предыдущих экспериментах).

Экспериментальные результаты

$dd\mu$ -катализ (Этап 1980–1987 гг.)

Первым объектом наших исследований стал процесс $dd\mu$ -катализа, идущий согласно теории резонансным образом. Результаты измерений скорости образования $dd\mu$ -молекул оказались неожиданными для нас, поскольку превышали опубликованные ранее данные Дубны более чем в 3 раза. Тщательная проверка при нескольких давлениях (от 50 до 90 атм.) подтвердила полученное нами значение $\lambda_{dd\mu} = (2,76 \pm 0,08) 10^6 \text{ с}^{-1}$. Что касается источника столь больших различий, то причиной этого могло быть неверное определение группой Дубны эффективности нейтронных счетчиков. Позднее наш результат был подтвержден экспериментами в LAMPF и в PSI, а также новыми измерениями ОИЯИ. Поскольку камера позволяла измерять несколько циклов $dd\mu$ -катализа, то это дало нам возможность определить скорость процесса несколькими способами:

- по наклону экспонент последовательных синтезов,
- по отношению выходов первых и вторых синтезов,
- методом «выжившего» мюона, когда регистрируется факт наличия мюона во временном интервале $t > T_0$, что означает его сохранность в течение времени $t \leq T_0$, т.е. реализуется тот факт, что мюон не распался, не перехватился на примеси и не прилип к ядрам ${}^3\text{He}$ в процессе синтеза.

Полученный результат подтвердил резонансный характер процесса $dd\mu$ -катализа из нижнего $F=1/2$ состояния $d\mu$ -атома и имел важные физические последствия. Прежде всего был изменен номер колебательного уровня у молекулярного комплекса $[(dd\mu)d2e]^*$ с $v=8$ на $v=7$, при котором выполнялось условие резонансного образования молекул. Это в свою очередь указывало на то, что энергия слабосвязанного уровня в $dd\mu$ -молекуле меньше, чем следовало из данных Дубны ($\varepsilon_{11} \approx 2,14$ эВ). Последующие расчеты показали, что ее величина близка к $\varepsilon_{11} = 1,96$ эВ. Отметим, что дальнейшие исследования системы трех тел, какой является $dd\mu$ -молекула, позволили определить значение энергии уровня ε_{11} с точностью $\pm 0,001$ эВ, и проверка этих расчетов была сделана при измерении температурной зависимости скорости $dd\mu$ -катализа как наиболее чувствительного теста резонансного механизма.

Как уже говорилось, измерения в Гатчине зависимости $\lambda_{dd\mu}$ от температуры дали возможность определить величину энергии уровня $\varepsilon_{11} = 1,965$ эВ. При этом достигнутая точность $\sim 10^{-6}$ от энергии связи позволяет исследовать вклад релятивистских поправок в значение ε_{11} , таких, например, как поляризация вакуума (0,0098 эВ). Отметим, что аналогичное измерение энергии уровня ε_{11} , проведенное в PSI (Швейцария) в области температур 28–150 К для верхнего спинового состояния $d\mu$ -атома ($F=3/2$), дало значение $\varepsilon_{11} = 1,966$ эВ. Полученное согласие двух экспериментов действительно впечатляет!

Рассмотрим другие параметры $dd\mu$ -катализа, которые исследовались методикой ионизационной камеры.

Нарушение изотопической симметрии

Анализ энергетического спектра продуктов dd -синтеза показал, что отношение выходов каналов (${}^3\text{He} + n$) и (${}^3\text{H} + p$) не равно единице, а составляет $R = Y({}^3\text{He} + n) / Y({}^3\text{H} + p) = 1,39 \pm 0,04$. Найденное нарушение изотопической симметрии является следствием того, что при резонансном образовании $dd\mu$ -молекул синтез идет из чистого P -волнового состояния ядер дейтерия ($J=1$). С уменьшением температуры вклад резонансного механизма падает и увеличивается доля нерезонансного канала $dd\mu$ -катализа ($J=0$), что приводит к S -волновому взаимодействию ядер. Следствием этого является уменьшение отношения R до значения $R \approx 1,0$ (см. Рис. 6), что и было обнаружено в последующих

экспериментах.

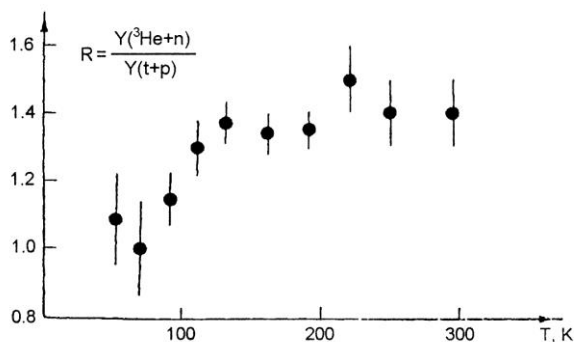


Рис. 6. Температурная зависимость отношения интенсивностей изотопически симметричных каналов dd -синтеза (${}^3\text{He} + n$) и (${}^3\text{H} + p$); (Гатчина. 1987–1990 гг.)

Параметры $dd\mu$ - и $rd\mu$ -катализа в HD-смесях

Особенностью процесса катализа в HD-смесях является нерезонансный механизм образования $dd\mu$ -молекул. Его проявлением является низкая скорость образования $dd\mu$ -молекул и независимость параметра R от температуры: $\lambda_{dd\mu-HD} = (0,115 \pm 0,004) \times 10^6 \text{ c}^{-1} (T = 300 \text{ K})$, $R(T) \approx 1,0$ [5]. Эти характеристики позволяют использовать HD-наполнение в тех случаях, когда необходимо подавить фон от продуктов $dd\mu$ синтеза. Например, при поиске событий от d - ${}^3\text{He}$ - μ -синтеза, идущего через образование d - ${}^3\text{He}$ -молекулы по схеме: ${}^3\text{He} + d\mu \rightarrow {}^3\text{He}d\mu \rightarrow {}^4\text{He} + p + \mu + 21 \text{ МэВ}$. До сих пор скорость этой реакции экспериментально не определена, а дан лишь ее верхний предел $\lambda_f(d\text{-}{}^3\text{He}) < 4 \times 10^6 \text{ c}^{-1}$.

Перехват мюонов на гелий

Исследуя влияние примеси ядер ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$ на выход продуктов $dd\mu$ - и $dt\mu$ -катализа, сотрудник теоретического отдела ПИЯФ Н.П. Попов выдвинул гипотезу (в 1981 г.) о новом механизме перехвата мюонов на ядра гелия, реализуемого через образование $d\text{He}\mu$ -молекулы. Согласно его расчетам, скорость перехвата при этом возрастает приблизительно в 100 раз по сравнению с моделью прямого перехвата. Мы провели эксперимент [6], добавив в камеру контролируемое количество изотопов гелия, и первыми подтвердили новый механизм. Следствием изменившейся ситуации является необходимость регулярной переочистки D/T смеси от гелия, накапливаемого в процессе dt -синтеза в будущем мезокаталитическом реакторе.

Вероятность прилипания мюона к гелию

Рисунок 7 иллюстрирует процедуру измерения вероятности прилипания ω_{dd} . Полученное нами значение $\omega_{dd} = 0,122 \pm 0,003$ до сих пор является единственным результатом прямого измерения этой величины и используется для контроля точности теоретических расчетов.

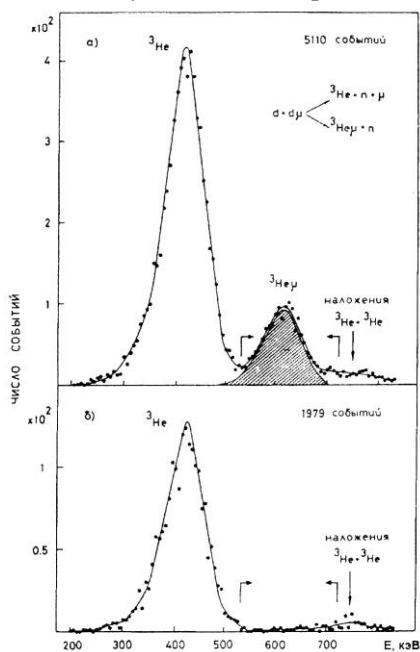


Рис. 7. Прямой способ определения коэффициента прилипания мюонов ω_{dd} : а) спектр всех первых событий dd -синтеза; б) спектр первых событий при условии, что за ними следуют еще события синтеза. События с прилипанием (${}^3\text{He}\mu$) при этом отсутствуют (Гатчина, 1981 г.)

*dt*μ-катализ (Этап 1983–1992 гг.)

Исследования параметров *dt*μ-катализа являются ключевыми для решения вопроса о возможном практическом использовании мюонного катализа в качестве источника ядерной энергии и нейтронов (с энергией 14 МэВ). Необходимым условием этого являются высокие скорости у всех процессов, входящих в кинетику *dt*μ-катализа, и малая величина коэффициента прилипания мюонов ω_{dt} . В Гатчине для исследования *dt*μ-катализа была создана специальная многоанодная тритиевая ионизационная камера [7], которая составила основу экспериментального комплекса, включавшего в себя бокс для работы с тритием, систему напуска газов при высоком давлении, системы очистки водорода и дейтерия от примесей до уровня $\sim 10^{-6}$, систему радиационного контроля и аварийной защиты. С тем, чтобы ослабить влияние фона от β-распада трития в D/T смеси, анод камеры был разбит на 19 отдельных анодов диаметром ~ 3 мм, что позволяло собирать полный заряд от α-частиц синтеза за время ~ 200 нс. Благодаря достаточно низкому энергетическому порогу $\sim 0,8$ МэВ и малой доле делящихся на анодах событий, удалось обеспечить высокую эффективность регистрации камеры $\sim 85\%$ и накапливать события, используя первый синтез как триггер наличия мюонов в объеме ИК. В результате была создана установка с уникальными возможностями.



Рис. 8. Е.М. Маев с Г.Г. Семенчуком, В.И. Паничевым и Ю.В. Смирениным рассматривают многоштырьковый анодный ввод для тритиевой камеры

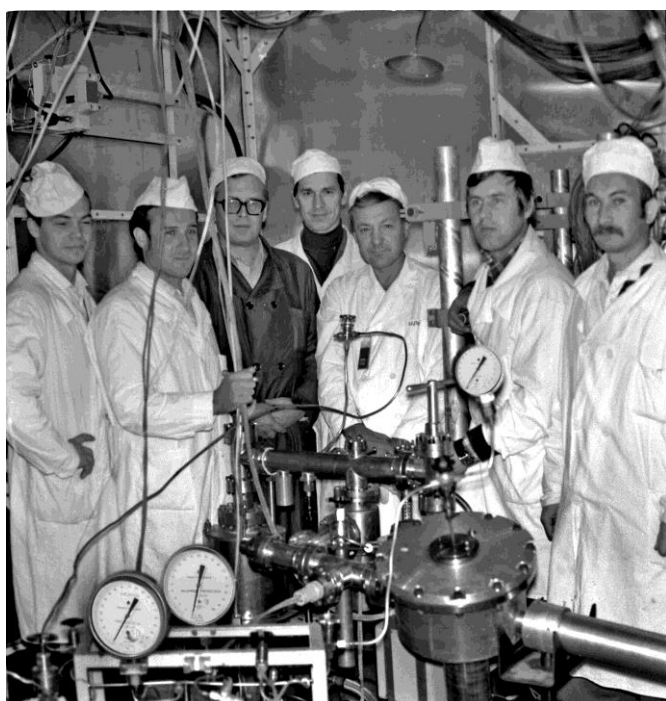


Рис. 9. После удачного эксперимента с наполнением тритиевой камеры. Слева направо: Л.Б. Петров, Е.М. Маев, А.А. Марков, Г.Г. Семенчук, Ю.С. Григорьев, А.И. Ильин, А.Д. Еремеев

Основной задачей наших первых экспериментов со смесью D/T (Гатчина, 1983 г.) было освоение методики работы с ионизационной камерой в условиях тритиевого фона. Следует отметить, что изготовление тритиевой установки было существенно осложнено требованиями радиационной безопасности. Надо выразить глубокую благодарность сотрудникам КБ (Г.А. Ганже и др.) и ЦЭО, потратившим много сил и энергии на ее проектирование и изготовление.

Первоначально камера была наполнена смесью D₂ и T₂ (~1 %) при давлении 90 атм. В этой смеси реакция dt-синтеза шла в следующей последовательности:



Эксперимент проводился при комнатной температуре. Была измерена скорость перехода мюона из основного состояния dμ-атома на tμ-атом [8]: $\lambda_{dt} = (2,8 \pm 0,2) \times 10^8 \text{ с}^{-1}$. Измеренная величина оказалась в согласии с теорией и со значениями, измеренными в Дубне, LAMPF и PSI методикой счета нейтронов.

В следующих экспериментах дейтерий был «разбавлен» водородом: H₂(78 %) + D₂(20 %) + T₂(2 %). Эта смесь с помощью катализатора была переведена в равновесное состояние с тем, чтобы дейтрон находился в основном в составе HD-молекул (D₂ – 5,8 %, HD – 32,8 %). Тройная H/D/T смесь оказалась очень удобной для наших целей. Благодаря присутствию балластного водорода она позволила «растянуть» временное распределение событий таким образом, что стало возможным измерение скоростей образования dtμ-молекул в D₂- и HD-комплексах. Полученные данные [9] подтвердили высокую скорость образования dtμ-молекул:

$$\lambda_{dt\mu-D_2} = (2,1 \pm 0,6) \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}, \quad \lambda_{dt\mu-HD} = (1,3 \pm 0,3) \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}.$$

В этих условиях на повестку дня встала задача измерения коэффициента прилипания мюонов. Эксперимент был выполнен в PSI (Швейцария) в период с 1988 по 1992 гг. в рамках международной коллаборации: ПИЯФ (Россия), IMEP (Австрия), TUM (Германия), LBL (Беркли, США). Метод измерения был тот же, что и для измерения ω_{dd} – использовался эффект рекомбинации для разделения пиков (⁴He)⁺⁺ и (⁴Heμ)⁺. Однако в данном случае предстояло измерить очень малую величину ω_{dt} , к тому же в присутствии тритиевого фона и фона от канала t + p в ddμ-синтезе. С целью уменьшения последнего была выбрана тройная смесь H/D/T в равновесной фазе: C_t = 0,05 %, C_d = 9 % и C_p = 91 %. Кроме того, для подавления t + p-канала использовалось совпадение сигналов с камеры и с нейтронных счетчиков. Малая концентрация трития (в 20 раз меньше, чем при анализе скоростей образования молекул) позволила добиться хорошего энергетического разрешения, σ = 80 кэВ. Относительно низкий выход событий dt-синтеза на мюон (~2 %) был компенсирован высокой интенсивностью остановок мюонов (~1000 с⁻¹) в чувствительном объеме камеры (3 см³) благодаря уникальным возможностям мюонного канала PSI.

В результате было зарегистрировано более 5 × 10⁶ событий dt-синтеза. При этом удалось выделить события ⁴Heμ с прилипанием мюонов (Рис. 10) и определить вероятность прилипания [10] на уровне $\omega_{dt} = (0,56 \pm 0,04) \%$. Это значение учитывает стряхивание мюонов при торможении ионов (⁴Heμ)⁺ в газе. Полученное значение является результатом первого и пока единственного прямого измерения величины ω_{dt} . Это значение согласуется с результатом последних вычислений. Ему соответствует верхний предел выхода нейтронов на один мюон Y_n = 180.

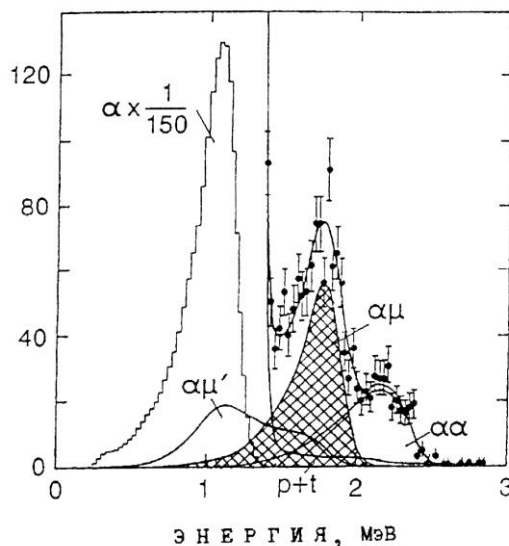


Рис. 10. Энергетический спектр событий dt-синтеза, зарегистрированных ионизационной камерой. Заштрихована область событий с прилипанием (αμ). События (αμ)' происходят от стряхивания мюонов при торможении в газе, события (αα) – результат наложения последующих синтезов; (PSI–ПИЯФ, 1988–1992 гг.)

Еще одним важным результатом эксперимента явилось обнаружение эпитеpmального канала образования $dt\mu$ -молекул, обусловленного взаимодействием «горячих» $t\mu$ -атомов с HD-молекулами. В эксперименте этот факт проявляется в остром пике в начале временного распределения нейтронов из dt -синтеза (Рис. 11). Анализ этих распределений показал, что скорость эпитеpmального образования $dt\mu$ -молекул исключительно высока [11]:

$$\lambda_{dt\mu-HD}^{\text{эпитеpm}} = (2,5 \pm 0,6) \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}.$$

Этот результат соответствует теоретическим расчетам, предсказывающим наличие мощного резонанса в зависимости $\lambda_{dt\mu-HD}$ от энергии $t\mu$ -атомов в области энергий ~ 1 эВ. Другим фактором, способствующим проявлению эпитеpmального образования $dt\mu$ -молекул, является эффект Рамзауэра в $t\mu$ -H-столкновениях, приводящий к замедлению процесса термализации $t\mu$ -атомов в тройной H/D/T-смеси. Заметим, что в D/T-смеси этот эффект отсутствует.

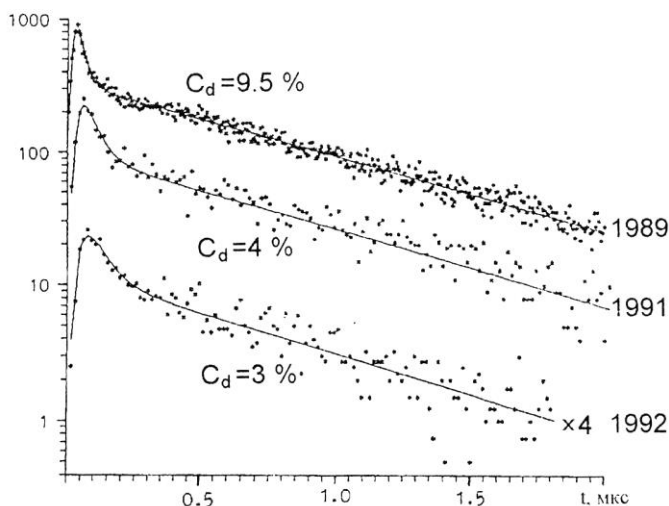


Рис. 11. Временное распределение нейтронов dt -синтеза в тройной смеси H/D/T. Виден «быстрый» пик за счет образования $dt\mu$ -молекул; (PSI–ПИЯФ, 1989–1992 гг.)

Данное наблюдение открывает новые возможности для практического применения $dt\mu$ -синтеза, например, в проекте создания интенсивного нейтронного источника.

Заключение

Приведенные в данной статье результаты исследований мезокатализа реакций ядерного синтеза составляют в настоящее время основную базу мировых данных по физике мезокатализа и используются для проверки теории. Они иллюстрируют эффективность разработанного в ПИЯФ экспериментального метода, а также важность объединения усилий и возможностей различных лабораторий мира.

Следующий коллектив авторов – сотрудников ПИЯФ – участвовал на различных этапах создания экспериментальных установок и проведения исследования процесса мюонного катализа ядерного dd - и dt -синтеза:

Д.В. Балин, В.Н. Батулин, А.А. Васильев, А.А. Воробьев, Ан.А. Воробьев, Н.И. Воропаев, В.А. Ганжа, Б.Л. Гориков, Ю.С. Григорьев, В.С. Дубоград, Ю.К. Залите, А.И. Ильин, С.М. Козлов, Л.Г. Кудин, Е.М. Маев, А.А. Марков, В.И. Медведев, В.В. Нелюбин, Е.М. Орицин, Г.Е. Петров, Л.Б. Петров, В.И. Поромов, Г.Г. Семенчук, Ю.В. Смиренин, Г.Л. Соколов, М.А. Сорока, В.В. Сулимов, Н.А. Тимофеев, В.А. Трофимов, Ю.А. Честнов, Г.Н. Шапкин.

Список цитированной литературы

- [1] Коллектив авторов ПИЯФ. Препринт ЛИЯФ 715. Л., 1981. 17 с.
- [2] Коллектив авторов ПИЯФ. Препринт ЛИЯФ 964. Л., 1984. 54 с.
- [3] Коллектив авторов ПИЯФ. Препринт ЛИЯФ 1630. Гатчина, 1990. 24 с.
- [4] Коллектив авторов ПИЯФ. Muon Cat. Fusion 5/6, 163 (1990).

- [5] *MCF Collaboration*. // “New project for investigation of unsolved problems of $dd\mu$ and $pd\mu$ catalysis in D_2 and H/D mixtures”, Proc. Symp. “Muon Catalyzed Fusion-95”. Dubna, 1995.
- [6] *Коллектив авторов ПИЯФ*. Письма в ЖЭТФ **42**, 236 (1985).
- [7] *Коллектив авторов ПИЯФ*. Muon Cat. Fusion **5/6**, 481 (1990).
- [8] *Коллектив авторов ПИЯФ*. Muon Cat. Fusion **2**, 163 (1988).
- [9] *Коллектив авторов ПИЯФ*. Muon Cat. Fusion **1**, 127 (1987).
- [10] *MCF Collaboration*. Hyperfine Interactions **82**, 273 (1993).
- [11] *Коллектив авторов ПИЯФ*. Proc. Int. Workshop LEMS-93. Santa-Fe, USA, 1993.

Эксперимент MuSun

А.А. Васильев

Начало эксперимента MuSun, прецизионного измерения скорости захвата отрицательного мюона дейтроном, было положено в 2007 г. Тогда профессором П. Каммелем из Иллинойского университета была озвучена идея сохранить опыт плодотворного сотрудничества ученых из разных стран в работах на мюонном источнике Института Пауля Шеррера (PSI). Завершенный незадолго до этого эксперимент MuCar по измерению скорости захвата отрицательного мюона протоном показал высокую работоспособность интернациональной группы, и было предложено использовать ее потенциал для решения еще более сложной задачи. Идея получила поддержку со стороны руководителя Отделения физики высоких энергий ПИЯФ А.А. Воробьева, сформулировавшего основные принципы, положенные в основу методики нового эксперимента.

К этому моменту проблеме точного измерения скорости μ -захвата на дейтроне Λ_d исполнилось несколько десятилетий. Разработанные приложения теории эффективного поля уже позволяли рассчитать эту величину с точностью не хуже 1,5 %. В то же время экспериментальные работы существенно, на порядок, не дотягивали по точности до уровня теоретических расчетов. Измерению величины Λ_d с точностью, соответствующей современной теории, препятствовал ряд технических проблем. Так, для эксперимента необходимо было иметь дейтерий чрезвычайно высокой изотопной и химической чистоты. В середине двухтысячных годов группа ПИЯФ уже решала задачу особо тонкой очистки легкого изотопа водорода, протия, для эксперимента MuCar. Результаты этой работы были впечатляющими: химическая чистота рабочего газа в центральном детекторе MuCar поддерживалась на уровне 10 ppb (ppb – parts per billion, частей на миллиард). В то же время подтвержденная ускорительной масс-спектрометрией величина атомарной примеси дейтерия составила 6 ppb. Получение протия столь высокой изотопной чистоты является по сей день непревзойденным мировым рекордом. Таким образом, у нас был солидный задел по работе с особо чистым водородом и его изотопами. Также, у коллектива имелся опыт создания «активных мишеней», в том числе криогенных, полученный в экспериментах по изучению μ -катализа dd -, dt - и $d^3\text{He}$ - ядерного синтеза и в том же MuCar. Так что работа над новой задачей начиналась не на пустом месте.

Желание принять участие в новом проекте было велико. Разумеется, исследователей в первую очередь привлекала сама физическая задача, ее сложность и амбициозность. Вместе с этим, эксперимент предполагалось провести силами относительно небольшой группы, что накладывало большую ответственность на любого ее участника, но давало каждому возможность проявить себя в интересной нестандартной задаче. В распоряжении физиков по-прежнему находился уникальный инструмент – мюонный источник $S_{\mu}S$ (Swiss Muon Source) на базе протонного циклотрона с энергией 590 МэВ, не имеющий аналогов в мире по интенсивности и ряду других параметров.

Расположенный в прекрасной долине реки Ааре, Институт Пауля Шеррера предоставляет хорошие (лучшие в мире по опыту многих участников эксперимента) условия для работы и, что немаловажно, имеет удобное для проживания общежитие. Куратор эксперимента со стороны Швейцарии, доктор К. Петижан, находится в прекрасных отношениях с сотрудниками ПИЯФ и благодаря своему авторитету способен оперативно решать все рабочие вопросы.

Группа приступила к работе над новым проектом с большим энтузиазмом, порой граничившим с некоторым легкомыслием. Во всяком случае, масштаба лежащих впереди препятствий на тот момент не смог увидеть никто, как невозможно оказалось и оценить масштаб времени, требуемого на проведение полного цикла измерений.

Удачное название для нового проекта было найдено не сразу. После рассмотрения нескольких вариантов, признанных неблагозвучными, остановились на окончательном – «MuSun». Это название содержит прямое указание на связь эксперимента с основным ядерным процессом, протекающим на Солнце – синтезом дейтерия. Эксперимент MuSun дает

уникальную возможность «прокалибровать» эту реакцию в лабораторных условиях, применяя вычислительный аппарат теории эффективного поля.

Экспериментальная программа MuSun стартовала в 2008 г.; разработка основного оборудования была начата годом раньше. Для первых тестовых измерений из установки MuCap был с незначительными изменениями заимствован центральный детектор, время-проекционная камера, работающая при давлении 10 бар и комнатной температуре. Параллельно с тестами на этой «теплой» камере изготавливался принципиально новый, криогенный прибор, получивший название CryoTPC (Cryogenic Time Projecting Chamber). В новом эксперименте планировалось и далее использовать часть оборудования MuCap, в частности, годоскоп сцинтилляционных счетчиков и электронный трекер, что, конечно же, было большим подспорьем, но в то же время накладывало жесткие ограничения на форму и размеры вновь проектируемого детектора.

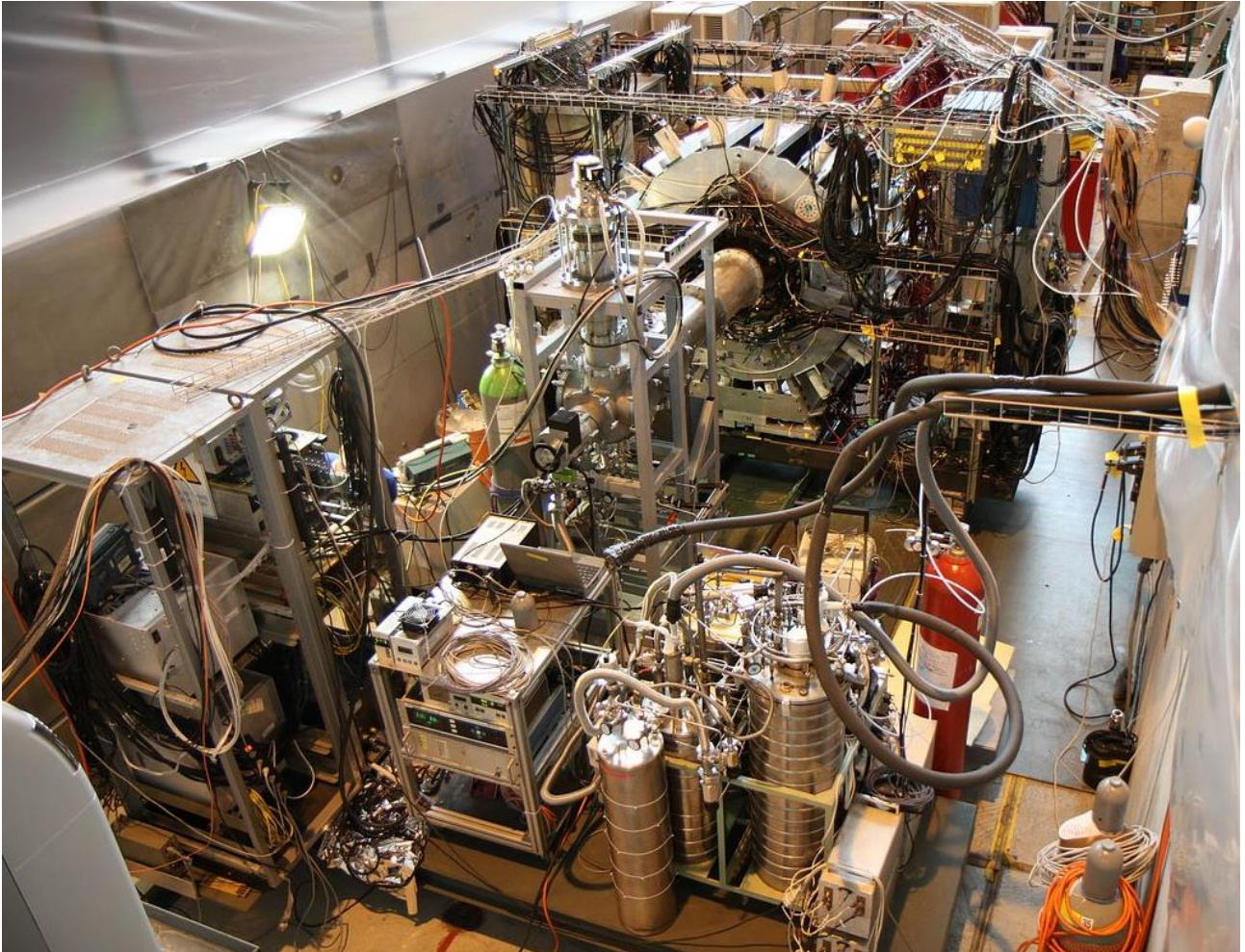


Сборка и отладка CryoTPC для эксперимента MuSun в PSI (2009 г.)

Первый рабочий образец CryoTPC был изготовлен к лету 2009 г. в ПИЯФ, где были проведены его криогенные и прочностные испытания. Также к этому времени в ПИЯФ были изготовлены электроника и значительная часть деталей криогенной системы, разработано программное обеспечение. Прочая комплектация, прежде всего элементы вакуумной системы, была изготовлена или закуплена в PSI. В конце августа того же года в PSI начался 42-дневный «марафон» по первому монтажу экспериментальной установки MuSun.

Несмотря на то, что проработка конструкции была сделана весьма детально, в процессе сборки и отладки возникли сложности. Наибольшее их количество оказалось связано с высоковольтной системой. Эта область была во многом новой для коллектива, и первый

рабочий образец установки оказался обладателем ряда «детских болезней». Процесс вывода установки на напряжение, требуемое для регистрации сигнала от тестового источника α -частиц, был мучительным и отнял значительное время. Вывод системы на запланированное рабочее напряжение 80 кВ был сделан только в следующем техническом сеансе спустя год, после ряда консультаций со специалистами и тщательной доводки всех частей высоковольтного оборудования.



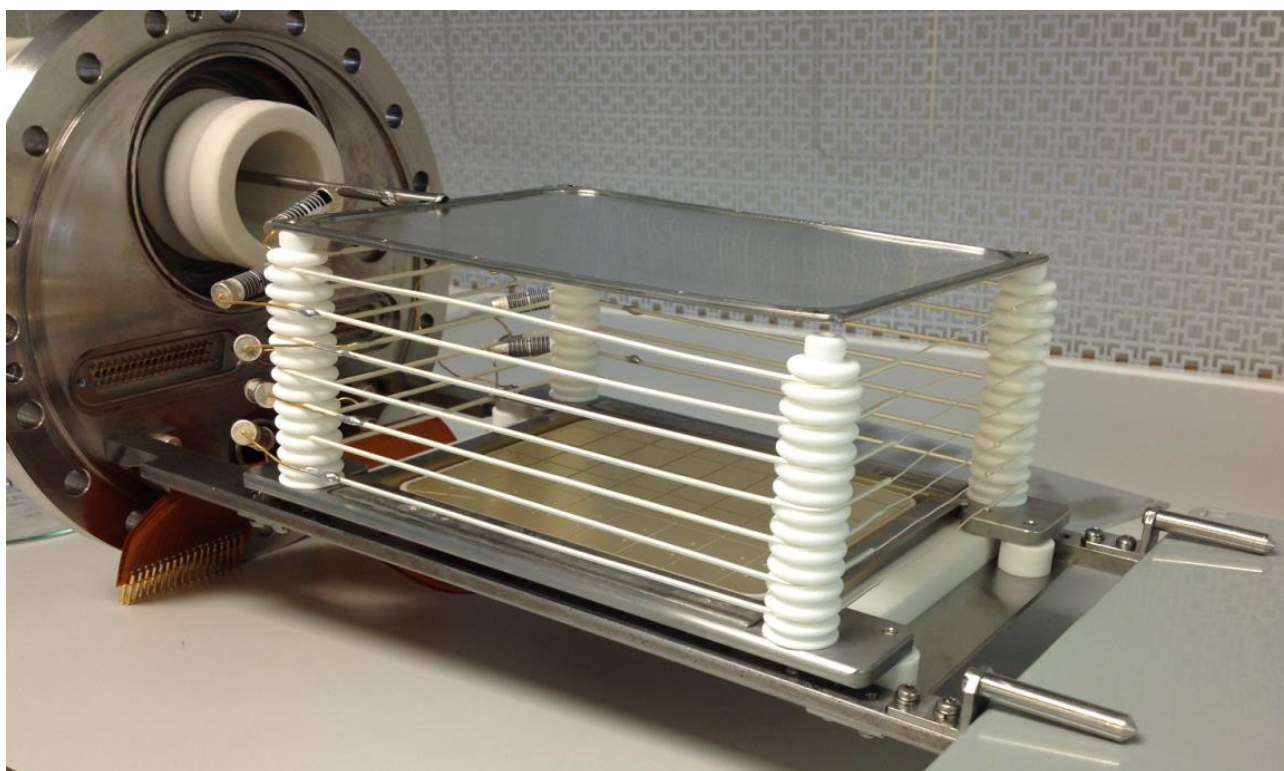
Экспериментальная установка MuSun на мюонном пучке в PSI (2010 г.)

Не сразу удалось отладить и криогенику. Наибольшие связанные с ней волнения возникли в заключительный день первого технического сеанса, когда было проведено охлаждение установки до температуры 30 К при заполнении рабочим газом. Когда температура CryoTPC достигла 50 К, но еще до того, как удалось «поймать» сигнал тестовой α -частицы, открылась течь неона – теплоносителя системы охлаждения. Теплоизолирующий вакуум начал стремительно ухудшаться, вместе с ним пошла вверх температура. Завершать сеанс без объективных свидетельств работоспособности детектора было бы очень некрасиво. Уже было принято решение об остановке и отогреве системы, но неожиданно вакуум стал резко улучшаться. Произошел удивительный и даже не совсем правдоподобный случай: холодная течь, скорее всего в индиевом уплотнении, закрылась самопроизвольно! Так или иначе, желанный сигнал зарегистрировать в тот день удалось.

Циркуляционная система химической очистки дейтерия, напротив, сразу показала прекрасную эффективность, которая была подтверждена хроматографически. Конструкция системы во многом была заимствована из предыдущего эксперимента, однако благодаря практически полной замене наиболее ответственных элементов ее надежность была существенно повышена. Используемый для определения чистоты газа хроматографический

метод был доработан с улучшением чувствительности на порядок, в соответствии с возросшими требованиями к чистоте рабочего газа.

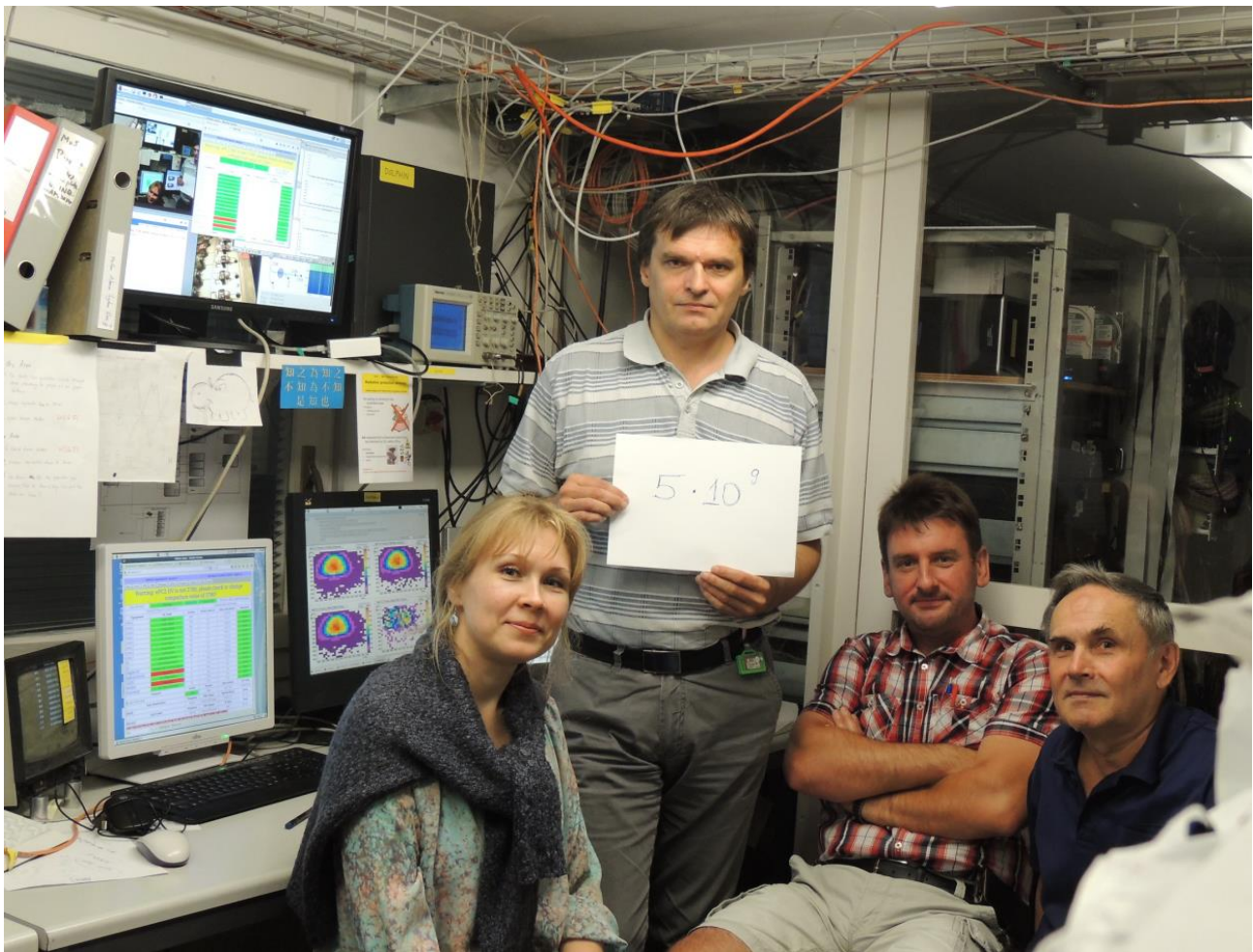
В течение последующих трех лет был проведен ряд технических и тестовых ускорительных сеансов, посвященных доводке оборудования до оптимального состояния. За это время в конструкцию установки были внесены многочисленные улучшения. Модернизированная высоковольтная система исключила сбои в поддержании рабочего напряжения. Полностью были устранены холодные течи в криогенной системе. Существенно доработана конструкция центрального детектора. Оптимизирован алгоритм работы циркуляционной газовой системы и полностью автоматизирован процесс ее заправки жидким азотом. В результате всех этих улучшений достигнута необходимая точность в поддержании ключевых параметров рабочего газа. Давление в CryoTPC стабилизировалось на уровне $5,001 \pm 0,003$ бар, температура фланцев камеры – на уровне $31,00 \pm 0,03$ К с абсолютной погрешностью в измерении температуры 0,1 К благодаря специально созданной системе калибровки датчиков температуры.



Внутренняя часть CryoTPC во время сборки в PSI (2014 г.)

С 2013 по 2016 гг. было проведено несколько плодотворных ускорительных сеансов, в результате которых был набран массив экспериментальных данных достаточный для получения финального результата с запланированной точностью. В настоящее время параллельно и независимо двумя группами специалистов из ПИЯФ и Университета штата Вашингтон производится обработка данных. После взаимного согласования полученных двумя группами результатов они будут опубликованы.

На протяжении всего эксперимента со стороны ПИЯФ работу вела группа, созданная на основе Лаборатории криогенной и сверхпроводящей техники под руководством А.А. Васильева. В состав группы входили В.А. Трофимов, П.А. Кравцов, Л.М. Коченда, П.В. Кравченко, М.Е. Взнуздаев. В 2012 г. в коллектив вошел молодой сотрудник К.А. Ившин, который в 2019 г., на основе результатов своей работы в эксперименте, защитил кандидатскую диссертацию. В заключительных сеансах также приняли участие молодые сотрудники, братья А.Н. Соловьев и И.Н. Соловьев.



*Набор половины полной статистики эксперимента в 2015 году.
Слева направо: П.В. Кравченко, А.А. Васильев, П.А. Кравцов, В.А. Ганжа*

С благодарностью следует упомянуть вклад в работу сотрудников Лаборатории физики элементарных частиц Г.Е. Петрова и Е.М. Маева. Также представляющий эту лабораторию Н.И. Воропаев с 2012 г. по настоящее время занимается обработкой результатов измерений.

Сотрудник группы прикладной радиохимии В.А. Ганжа и ее руководитель Г.Н. Шапкин на протяжении всего эксперимента осуществляли контроль химической и изотопной чистоты дейтерия, постоянно совершенствуя используемый ими метод газовой хроматографии. Благодаря существенной модернизации хроматографического метода, выполненной В.А. Ганжой при помощи сотрудников ЛКСТ, удалось провести абсолютную динамическую калибровку измерительной методики и определить содержание примеси азота (основная атмосферная примесь) в камере с рекордной для такого метода чувствительностью и точностью: $C_{TRC} = 1,03^{+0,24}_{-0,40}$ ppb, что обеспечило необходимую погрешность при расчете поправок к результатам всего эксперимента.

Неоценимую помощь коллаборации MuSun оказали сотрудники Отдела радиоэлектроники. Н.Ф. Бондарь несколько раз спасал эксперимент от неполадок в работе электронных устройств. А.В. Надточий с 2011 года вошел в коллектив эксперимента и принимал непосредственное участие в каждом экспериментальном сеансе. С его помощью была проведена модернизация электроники детектора, в частности, переход к криогенным предусилителям. Это позволило более чем вдвое улучшить энергетическое разрешение электроники.

Плодотворная работа всех членов коллаборации MuSun позволила успешно завершить эксперимент и с оптимизмом смотреть в будущее. На мюонном источнике PSI уже планируются новые эксперименты, которые станут продолжением MuSun.

Лаборатория адронной физики

Олег Львович Федин, заведующий лабораторией

В начале 90-х годов в [ЦЕРН](#) начались работы по подготовке экспериментов для вновь строящегося коллайдера [ЛНС](#) (Large Hadron Collider). Работы проводились в рамках, так называемых, R&D коллабораций (Research&Development), которые создавались для разработки детекторов, придетекторной электроники, программного обеспечения и электроники для системы считывания данных, электроники и программного обеспечения для системы мониторинга работы детекторов. Одновременно велась работа по подготовке физической программы экспериментов. Сотрудники Отделения физики высоких энергий ([ОФВЭ](#)) приняли активное участие в этих работах. Так в рамках коллаборации R&D6 сотрудники отделения участвовали в разработке детектора переходного излучения на основе дрейфовых трубок из каптона, который одновременно должен был выполнять функцию трекера эксперимента [ATLAS](#). Детектор переходного излучения должен был обеспечить идентификацию электронов и подавление адронного, в основном π -мезонного, фона от 10 до 100 раз, который образуется в процессах рождения КХД струй. Такой детектор должен был существенно увеличить эффективность регистрации электронов, что позволило бы надежно зарегистрировать сигнал от распада на четыре электрона гипотетического, на тот момент, бозона Хиггса.

Идея использовать детектор переходного излучения в качестве трекера в большом коллайдерном эксперименте принадлежит [Б. А. Долгошеину](#) (МИФИ). Следует отметить, что первый крупный детектор переходного излучения был создан именно в нашем отделении под руководством [Алексея Алексеевича Воробьева](#) в начале 80-х годов для эксперимента E715 (FNAL) по измерению магнитного момента сигма-минус гиперона. В 1994 году проект создания детектора переходного излучения для коллайдерного эксперимента победил в жесткой конкурентной борьбе с другими предложениями и был включен в состав эксперимента ATLAS.

Для разработки конструкции будущего детектора создавались прототипы, испытания которых проводились на пучках ускорителя SPS в ЦЕРН. В разработке прототипов и проведении испытаний участвовали и сотрудники нашего отделения. Важную роль в разработке придетекторной электроники, в том момент, сыграл [Александр Васильевич Надточий](#) (отдел радиоэлектроники ОФВЭ), который разработал предусилитель и формирователь на дискретных элементах. Параметры (шумы, кросс-токи и т.д.) разработанной электроники были настолько уникальны, что данная электроника получила даже свое название - Гатчинская референсная электроника (Gatchina reference electronics). Огромная работа по проведению теоретических расчетов формы сигнала с дрейфовых трубок и компенсации отрицательной части сигнала, так называемое восстановление постоянной составляющей, была выполнена [Эдуардом Михайловичем Спириденковым](#) (отдел радиоэлектроники ОФВЭ). Велась так же работа по изучению старения дрейфовых трубок, вызванных их работой в больших радиационных полях, активное участие в которой принимал Отдел трековых детекторов ОФВЭ под руководством [Анатолия Григорьевича Крившича](#).

Следует отметить также участие сотрудников Отдела информационных технологий ПИЯФ под руководством [Юрия Федоровича Рябова](#) в работе коллаборации R&D13 по созданию программного обеспечения для системы считывания данных и триггерной системы. Координирование работ в R&D коллаборациях осуществлялось [В. А Щегельским](#).

После принятия в июле 1997 года решения о строительстве двух так называемых детекторов общего назначения ATLAS и CMS сотрудники ОФВЭ приняли [участие в подготовке](#) технических проектов (Technical Design Report) этих экспериментов.

В начале 2000-х годов коллаборации ATLAS и CMS перешли от исследований к непосредственному созданию установок. В связи с этим в ОФВЭ в 2001 году была создана новая группа, в задачу которой входило участие в физической программе эксперимента ATLAS, а также сборка и испытание модулей (тип А) для торцевой части детектора TRT (Transition Radiation Tracker). Руководителем группы был назначен [О. Л. Федин](#). В дальнейшем в 2005 году эта группа была преобразована в Лабораторию адронной физики ([ЛАФ](#)).

В течение 2001- 2005 годов в ПИЯФ были собраны и испытаны 50 модулей для торцевой части детектора TRT, каждый из которых содержит четыре слоя дрейфовых трубок из каптона диаметром 4 мм. [Торцевая часть детектора TRT](#), собранная в ПИЯФ, содержит более 150000 дрейфовых трубок. В работе по сборке и испытаниях модулей детектора TRT участвовало более 30 сотрудников отделения, среди которых большой вклад внесли [В. П. Малеев](#), [С. К. Патричев](#), [Л. Н. Баканов](#), [Е. А. Иванов](#) и др. Огромная роль в обеспечении работы по сборке модулей детектора TRT в ПИЯФ принадлежит [Дмитрию Михайловичу Селиверстову](#).

В создании [модулей детектора TRT в ПИЯФ](#) принимали участие не только



Рис. 1. [Торцевая часть детектора TRT](#), собранная из модулей произведенных в ПИЯФ.

сотрудники Отделения физики высоких энергий, но так же сотрудники других подразделений института. Так, например, базы данных для контроля процесса сборки всего детектора TRT были созданы в Отделе информационных технологий ([ОИТА](#)) под руководством профессора [Ю. Ф. Рябова](#).

В работе над созданием баз данных участвовали [С. Б. Олешко](#), [Е. Г. Новодворский](#) и [Н. В. Клопов](#) (ОМРБ). Огромная работа по тестированию и ремонту гибких печатных плат (Wheel Electronic Board), которые предназначались для подачи высокого напряжения на модули детектора и для считывания информации с детектора, была выполнена под руководством [Л. Г. Кудина](#).

Следует отметить большую работу [Лилии Федоровны Жигуновой](#), которая обеспечивала доставку из-за границы материалов и оборудования для сборки детектора и отправку собранных модулей в ЦЕРН.

Все модули детектора TRT собранные в ПИЯФ были доставлены в ЦЕРН, где снова, при участии наших сотрудников (Малеева В. П., Патричева С. К. и др.), прошли испытания и были собраны в единое целое – торцевую часть детектора TRT. В результате только менее 0,1% каналов не работали после проведения всех этапов испытаний и сборки детектора.

Сотрудники отделения [Ю. К. Залите](#) и [А. Ю. Залите](#) внесли ключевой вклад в создании программного обеспечения для моделирования работы детектора TRT с использованием пакета программ GEANT4 в рамках программного обеспечения Athena эксперимента ATLAS. В разработке программного обеспечения для идентификации электронов с помощью детектора TRT также участвовал [Малеев В. П.](#)

После запуска ускорителя LHC в 2008 году сотрудники лаборатории адронной физики участвовали в работах по анализу физических данных эксперимента ATLAS. За прошедшие годы при их участии выполнены работы по поиску новых тяжелых заряженных и нейтральных калибровочных бозонов (Малеев В П, [Соловьев В.М.](#)), частиц темной материи и тяжелого нейтрального бозона Хиггса ([Нарышкин Ю. Г.](#)).

Выполнены прецизионные измерения зависимостей угловых коэффициентов в распаде Z-бозона в лептоны в полном фазовом объеме от поперечного импульса лептонной пары ([Федин О. Л.](#)).



На странице представлены сотрудники ПИЯФ, принимавшие участие в подготовке эксперимента ATLAS и участвующие в его работе:

(слева направо): (первый ряд):

Воробьев А.А., Федин О.Л., Надточий А.В., Спириденков Э.М., Щегельский В.А.

(второй ряд): Рябов Ю.Ф., Крившич А.Г., Жигунова Л.Ф., Залите Ю.К., Залите А.Ю.

(третий ряд): Олешко С.Б., Новодворский Е.Г., Клопов Н.В., Кудин Л.Г., Иванов Е.А.

(четвертый ряд): Нарышкин Ю.Г., Соловьев В.М., Малеев В.П., Патричев С.К., Селиверстов Д.М., Баканов Л.Н.



Сотрудники института, принимавшие участие в создании детектора TRT в ПИЯФ.



Рис. 2 Участок армирования дрейфовых трубок.



Рис. 3 Участок подготовки дрейфовых трубок для сборки модулей детектора TRT в ПИЯФ.



Рис. 4 Сборка модулей детектора TRT в ПИЯФ. Установка и вклейка трубок в поддерживающие



Рис. 5 Сборка модулей детектора TRT в ПИЯФ. 4-слойный модуль подготовлен к натяжению нитей.

В настоящее время в лаборатории адронной физики заканчивается работа по созданию тонкозазорных камер ([strip Thin Gap Chambers - sTGC](#)) для модернизации передней части мюонного спектрометра детектора ATLAS.

Основные этапы производственного цикла sTGC камер в ПИЯФ представлены в [Постере](#) и фотографиях, приведенных в [фотогалерее](#).



Рис. 6. Процесс сборки тонкоззорных камер (sTGC) для мюонной системы детектора ATLAS.

В ближайшее время, после остановки работы ускорителя LHC для модернизации, будет продолжен анализ данных, что, как мы с нетерпением ожидаем, должно привести к новым крупным открытиям.

Исследование фрагментации релятивистских ядер

Ф.Г. Лепехин (2014 г.)



Д.ф.-м.н. Федор Георгиевич Лепехин

Началась моя трудовая деятельность службой в Советской Армии с 24 сентября 1942 года, по 10 октября 1945 года. В это же время, находясь в роте обслуживания Зенитно Прожекторного Училища в городе Омске, я закончил заочное отделение Омского Гос. Пед. института, и получил специальность учителя математики. После демобилизации я поступил в Автодорожный Институт на должность старшего лаборанта (преподавателя). Так записано в трудовой книжке. В мои обязанности входило готовить демонстрации на лекциях. Это меня и увлекло. Я мог продемонстрировать почти все – от двойного лучепреломления до рентгеновских лучей.

Так я стал физиком и поступил в аспирантуру Ленинградского Гос. Пед. Института им. А.И. Герцена. Моим руководителем был А.П. Жданов, сотрудник Радиевого Института АН СССР. Он и взял меня в РИАН. Руководителем физического отдела РИАН в это время был академик П.И. Лукирский. Ему я сдавал персональный экзамен по физике, и поэтому могу считать себя его учеником.

По окончании срока аспирантуры я был направлен преподавателем физики в Калининградский Гос. Пед. Институт, где уже через год был назначен зав. кафедрой физики. В 1956 году уволился, и опять поступил в РИАН. В 1963 году по конкурсу поступил на работу в ФизТех, а в 1975 году был переведен на работу в ЛИЯФ, где и работал до 2014 года.

За эти годы, при моем руководстве на фирме ЛОМО был изготовлен комплекс микроскопов, с датчиками для ввода информации в ЭВМ. Такие микроскопы и сегодня работают в Дубне, ФИАН, Алма-Ате, Ташкенте. Зарубежных аналогов таких приборов нет. С их помощью проведены исследования фрагментации релятивистских ядер лития-6, серы, свинца, бора-10, бора-11, азота-14, неона-22, кислорода-16 с импульсами от 2 до 200 ГэВ/с на нуклон, с ядрами в фотоэмульсии. Некоторые из этих работ выполнены в сотрудничестве со многими лабораториями. Все результаты работ опубликованы в реферируемых журналах.

Практически все поперечные импульсы фрагментов релятивистских ядер совпали с ожидаемыми их значениями в системе покоя фрагментирующего ядра до его взаимодействия с ядром в фотоэмульсии. Отклонения от предсказания для некоторых фрагментирующих ядер связаны с особенностями их оболочечной структуры. При фрагментации ядра кислорода-16 в 4 альфа частицы обнаружено, что около 0.0054 доли всех событий идет через промежуточное состояние из двух ядер бериллия-8. И только потом каждый из них распадается на две альфа частицы. Такая каскадная фрагментация нами обнаружена впервые. До нас этого никто не наблюдал.

После увольнения из ПИЯФ я продолжаю работать. За это время, в журнале Int. J. Adv. Innovat. Thoughts Ideas т. 3, вып. 1 опубликованы две моих работы.

Всего я проработал в ПИЯФ ровно 50 лет. Занимался общественной работой. Был председателем профкома, членом парткома. Более детальная информация о последних моих научных интересах, о всех публикациях, и о моей жизни содержится на странице <http://lepfed2013.wordpress.com>

Отдел радиоэлектроники – история жизни и деятельности

В.Л. Головцов

1. Создание отдела. Начало пути



А.А. Воробьев



И. И. Ткач



В. Т. Грачев



А.Н. Кознов

Началом отсчета существования отдела радиоэлектроники официально считается январь 1971 года. К тому времени свершилась основополагающая череда событий: в 1967 году был произведен физический запуск синхроциклотрона – ускорителя протонов до энергии 1 ГэВ, а в 1970 году – вывод пучка в экспериментальный зал. В экспериментальном зале при сравнительно удовлетворительном состоянии детекторной части предстояло в короткие сроки создать приборную базу, разработать и изготовить прикладную электронику, приобрести необходимую вычислительную технику и т.д. Неизбежный исторический вопрос «Что делать?» со всеми его частностями стал перед молодыми руководителями А.А. Воробьевым и А.В. Куликовым. Напряженные многочасовые дискуссии, заседания Ученого совета и иных руководящих органов привели к естественному решению – созданию отдела радиоэлектроники (ОРЭ). Руководителем отдела был назначен А.С. Денисов. Структуру отдела составили служба автоматизации сбора и накопления экспериментальных данных – руководитель И.И.Ткач, группа физической электроники – руководитель Э.М. Спириденков, группа наносекундной электроники – руководитель В.Т. Грачев, вычислительный центр – руководитель В.А. Щегельский, опытное производство – руководитель А.Н. Кознов, группа измерительного и экспериментального



А.С. Денисов
Заведующий ОРЭ
1971-1978



Э.М. Спириденков



В.А. Щегельский



В.Д. Малахов

залов – руководитель В. Д. Малахов. Первоначально располагавшийся в помещениях 7-го корпуса отдел весной 1973 года переехал во вновь построенную в рекордно короткие сроки пристройку 2-го корпуса, с тех пор именуемую пристройкой ОРЭ. К тому времени группы разработчиков были заняты созданием электроники для экспериментов с ионизационной камерой ИКАР, магнитным анализатором протонов (МАП), нейтронным спектрометром и другими детекторами. Молодые специалисты А.П. Кашук и Н.К. Ласточкин при участии В.С. Самсоненкова и В.Н. Антифеева под руководством И. И. Ткача разработали и изготовили систему обработки и накопления информации с искровых камер

(СОНИК). В системе использовались магнестрикционные ультразвуковые линии задержки, а в качестве носителя информации – кольца из проволоки. Система была соединена в линию с ЭВМ «Минск-22», над чем потрудился дружный коллектив, возглавляемый А.В. Денисовой. В результате появилась и начала функционировать первая система сбора данных экспериментов на ускорителе. Активно включилась в работу группа измерительного зала (В.Д. Малахов, А.Г. Куликов, В.И. Голубев). В короткие сроки в залах появились стандартизованное кабельное хозяйство, стойки высоковольтного питания общего пользования, измерительные приборы и системы. Для «быстрой» электроники использовался доморощенный стандарт «Вишня» - аналог стандарта NIM - Nuclear Instrumentation Module. Принятый в 1969 году стандарт NIM представил общие правила устройства электронных модулей, таких как усилители, цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи, фильтры и т.д., устанавливаемые в кейт NIM. Появились выносные измерительные станции (ВИСТ), реализованные из набора модулей, установленных в кейтах «Вишня».

Дальнейшее развитие требовало новых технологий проектирования и производства электроники на современной для того времени и доступной элементной базе. Началось освоение стандарта КАМАК (англ. САМАС - Computer Automated Measurement and



Б.В. Бочин

Control), определяющего организацию магистрально-модульной шины для связи измерительных устройств с цифровой аппаратурой обработки информации в системах сбора данных. Отдел столкнулся с рядом проблем, таких как отсутствие коммерчески доступных кейтов КАМАК, источников питания и серийных модулей

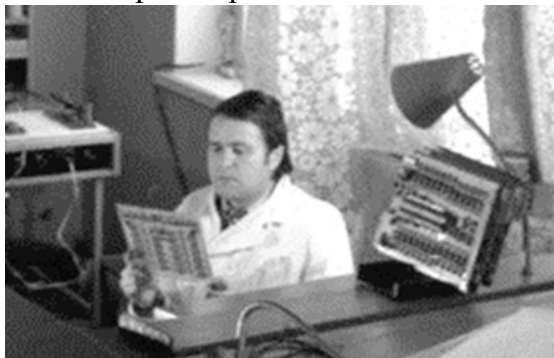
к ним, а производство своих модулей КАМАК требовало соответствующей технологической базы. Были предприняты энергичные усилия по освоению приемлемой технологии производства двухслойных печатных плат, приобретено необходимое оборудование - травильные и копировальные



Аппликация печатных плат.

Н.И. Рогозина

машины, сверлильные станки, оборудован монтажный участок (А.Н.Кознов, Б.В. Бочин), а на этапе проектирования печатных плат освоен метод аппликации. В результате был налажен серийный выпуск модулей с производительностью до 7 изделий в неделю. В перечне изделий КАМАК появилась линейка модулей общего применения – разработчики И.И. Ткач, Е.Г. Кормин, Г. А. Городницкий, С.И. Калентарова, Н.Я. Архипова. Линейка модулей предназначалась для регистрации цифровой информации, управления, связи систем с аппаратурой, выполненной не в стандарте КАМАК. Для эксперимента



Монтажный участок. В.Н. Антифеев

«Рассеяние мюонов на поляризованной мишени» был разработан модуль запуска считывающей электроники искровых камер (Н.Ф. Бондарь). Развивалась линейка модулей наносекундного быстродействия – программно управляемые формирователи сигналов

(А.С. Денисов, Н.Ф. Бондарь, С.С. Волков). В стандарте КАМАК была выполнена автоматизированная система логического отбора сигналов сцинтилляционных детекторов (С.С. Волков, Е.Г. Кормин).

Развивалась компьютерная база: к концу 1974 года была получена первая ЭВМ серии ЕС1020, имевшая 8-битный процессор, память 64 кБ, дисковую операционную систему (ДОС) и магнитные ленты. Запуск машины и соединение её в линию с ЭВМ «Минск-22», проведенные усилиями П.В. Неустроева, Б.В. Бочина, А.В. Денисовой, позволили



Группа сотрудников, проводивших работы по отладке и запуску ЭВМ и системного оборудования.

Сидят П.В. Неустроев, А.Ф. Мышинский.

Стоят Н.И. Окунев, Ф.Е. Шевель, А.В. Денисова,
Б.В. Бочин, В.А. Сумар

принимать данные экспериментов на современные магнитные ленты ЕС1020. К концу 1975 года был разработан и подсоединен к мультиплексному каналу ЕС1020 связной контроллер Л330, что позволило подключать к машине до 16 удаленных абонентов. Тогда же был введен в строй дисплей Л820, созданный по разработке П.В. Неустроева, В.И. Семенихина и Б.В. Бочина. Группа программистов - А.Е. Шевель, Т. С. Сереброва, И.И. Грачева и др. модифицировала систему ДОС, что позволило адаптировать её для работы с активными устройствами, а написанная теми же авторами диалоговая система Луга, использовавшая дисплей Л820, позволила принимать данные в режиме диалога.

2. Эксперименты с ионизационным спектрометром ИКАР. Дальнейшее развитие.



Разработчики электроники амплитудных измерений импульсов ИКАР Г.Е. Петров, А.В. Надточий, М.Н. Язиков, Э.М. Спириденков

Значительные разработки электроники были выполнены для экспериментов по измерению упругого рассеяния адронов на малые углы (руководитель А.А. Воробьев). В экспериментальной установке использовались импульсная ионизационная камера адронного рассеяния (ИКАР), являющаяся одновременно газовой мишенью и детектором ядер отдачи, и магнитный спектрометр – установка пропорциональных камер для регистрации рассеянной частицы. Измерения были проведены как на синхроциклотроне в Гатчине, так и на ускорителях Серпухова и ЦЕРН (эксперимент WA9). Электронику амплитудных измерений импульсов катода и анода камеры ИКАР разрабатывали А.В.Надточий, Г.Е. Петров, М.И. Язиков,

Н.А. Тимофеев под руководством Э.М. Спириденкова. Для избирательного запуска

относительно более медленного спектрометра ядер отдачи на пучках с интенсивностью $\sim 10^6$ 1/сек был разработан и изготовлен специализированный процессор (SDPU),



Демонстрация процессора SDPU перед отправкой в ЦЕРН.

А.А. Воробьев, А.П. Кашук
Ю.А. Антонов

режектирующий события с углом рассеяния менее заданного порогового значения. Такой режим избирательного запуска в 100 раз снижал частоту запусков ионизационной камеры. В спецпроцессоре были применены современные микросхемы эмиттерно-связанной логики серии MECL 10000, быстродействие которых в совокупности с минимизацией переключательных функций выработки решения позволили получить быстродействие (комбинационную задержку) спецпроцессора 120 нс и «мертвое» время системы триггера в эксперименте 250 нс. Разработка процессора была выполнена в службе И.И. Ткача группой А.П. Кашука с участием В.Л. Головцова,

Л.Г.Кудина, Э.И.Малютенкова, Т.Г. Макаева, В.Н. Слюсаря и др. Как следующая итерация спецпроцессора SDPU, уже успешно работавшего в ЦЕРН, в группе Э.М. Спириденкова был разработан модернизированный спецпроцессор для избирательного запуска

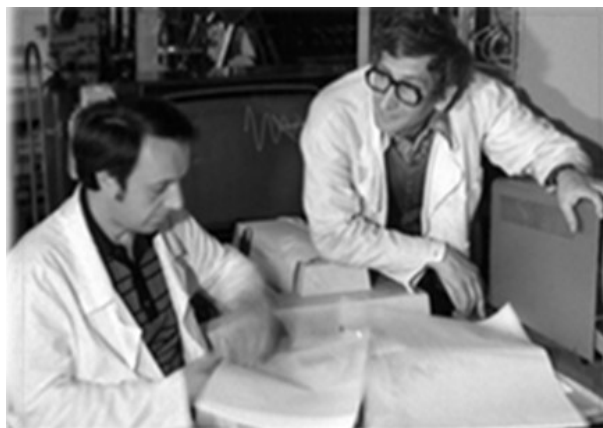


П.В. Неустроев
Заведующий ОРЭ
1979-1986

спектрометра ИКАР в экспериментах по изучению возможных дибарионных резонансов на синхроциклотроне ПИЯФ. Квинтэссенцией модернизации явилась заглавная идея промежуточного кодирования информации пропорциональных камер до схем совпадений, конвейерный принцип обработки событий с дискретностью 50 нс и уточненная аппроксимация телесного угла рассеяния. Как результат, было значительно (\sim в 3 раза) сокращено оборудование, получено практически нулевое «мертвое» время и существенно повышен коэффициент режекции нерассеянных частиц. В разработке, изготовлении, тестировании и эксплуатации спецпроцессора приняли участие А.Г. Атаманчук, В.Л. Головцов,

Э.М. Спириденков, Ю.А. Антонов, А.А. Князев и др.

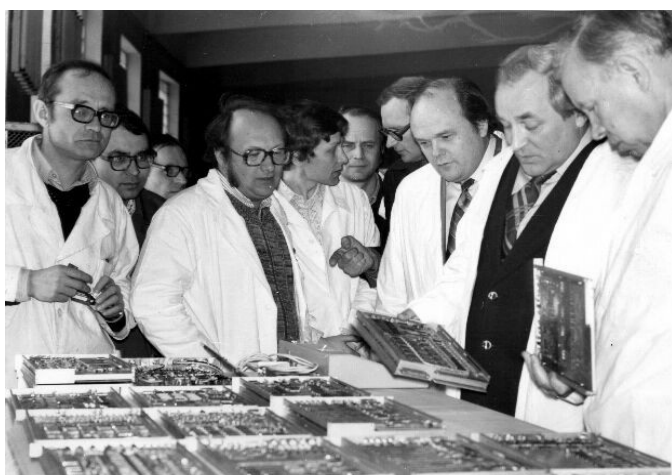
В связи с подготовкой эксперимента WA9 были выделены некоторые инвалютные средства, позволившие приобрести



Е. М. Оришин, А.Г. Атаманчук

современное по тем временам оборудование: компьютер PDP11-40, драйвер ветви BD011, 12 крейтов КАМАК Boreg с крейт-контроллерами A1 и источниками питания. Приобретенное оборудование в кратчайшие сроки было освоено и после создания необходимого программного обеспечения позволило перевести ряд текущих экспериментов на КАМАК (А.Г. Атаманчук, Е.М Оришин). Были организованы крейты общего пользования, оборудованные контроллерами A1, подключенными к компьютеру PDP11. Вскоре

PDP11 через прямой крейт была соединена с контроллером ЛЗ30 и получила соответственно прямой выход на ЕС1020 для передачи накопленных данных. Через некоторое время были приобретены отечественные мини ЭВМ СМЗ, СМ4 и соответственно возросшему парку компьютеров были организованы группа эксплуатации мини ЭВМ – руководитель А.Г. Атаманчук и группа программирования – руководитель Е.М. Оришин. К этому времени в отделе было произведено достаточное количество модулей КАМАК общего назначения – счетчики, аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, преобразователи время-код программно-управляемые формирователи сигналов, сервисные модули и т.д. Разработки выполнили специалисты высокого класса Л.Н. Уваров, Н.Ф.



Демонстрация модулей КАМАК, разработанных и изготовленных в ОРЭ.

На переднем плане:

Э.М. Спириденков, П.В. Неустроев,
Е.П. Велихов, А.А. Воробьев

Бондарь, С.С. Волков, Л.Г. Кудин, В.А. Снаррь, Н.А. Тимофеев. Эти разработки существенно расширили обеспечение экспериментов на синхроциклотроне современной для того времени электроникой. Для обеспечения обслуживания парка модулей и их использования в экспериментах на синхроциклотроне был организован ПУЛ, который возглавил Л.Г. Кудин.

Успехи в разработке, производстве и внедрении устройств систем сбора данных в ПИЯФ и в том числе – в ОРЭ были оценены присуждением в 1985 г. руководителям трех электронных подразделений П.В. Неустроеву, В.И. Кадашевичу и Ю.Ф. Рябову Премии

Совета Министров СССР «За разработку на основе международного стандарта КАМАК и организацию производства аппаратуры для создания систем автоматизации научных и научно-технических исследований».



Очередной номер стенгазеты «ОРЭШЕК»

Жизнь отдела не ограничивалась сугубо производственной и связанной с ней организационной деятельностью. Свою позитивную роль играло неформальное общение с его раскованностью, доброжелательной атмосферой, творческой активностью, появлением новых идей. В живом общении молодых многосторонне развитых людей проходили сражения шахматных блицтурниров, работала не вполне стандартная стенгазета ОРЭШЕК, где юмор присутствовал не только в соответствующей рубрике.

Повышенным спросом пользовалась рубрика «Сыч Силыч Сеятель сообщает», где собирательный образ мыслителя, внешне напоминавший Козьму Прутков, оперативно откликался на животрепещущие темы текущего бытия. Как-то в парткоме редактора

стенгазеты при случае спросили: «Что это у вас там за недорезанная газета? Сил Силыч какой-то ...». И по-отечески слегка пожутив, а затем и пошутив, перешли на другую тему... Весьма популярны в институте были новогодние вечера ОРЭ. Так сложилось, что в одном и том же месте в одно и то же время собрался коллектив, способный «в буднях великих строек» успевать выдумывать, творить и реализовывать неизменно интересные программы. Конечно, не все получалось одинаково удачно, но один номер всегда имел знаковый успех – выступление цыганского ансамбля с его знаменитой «Величальной» ...

3. Эксперименты E715, E761, E781, D0 на ускорителях Национальной Лаборатории им. Ферми (ФНАЛ).

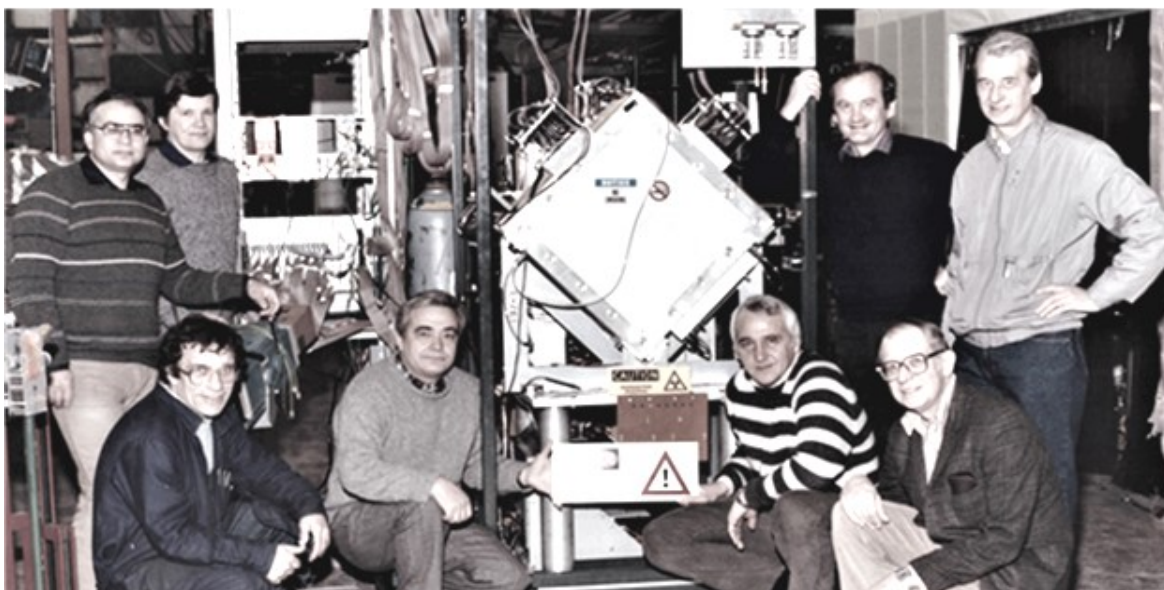
В начале 1980-х годов ПИЯФ (в те годы ЛИЯФ) по инициативе директора ОФВЭ А.А. Воробьева начал сотрудничать с ФНАЛ. Подготовка экспериментов E715 (1983), E761(1990) и E781(1997) на ускорителе Теватрон положила начало новому этапу в деятельности ОФВЭ (тогда – ЛФВЭ) и в том числе инициировала новый этап разработок электроники в ОРЭ. Для эксперимента E715 по изучению бета-распадов сигма-гиперонов ($\Sigma^- \rightarrow ne\nu$) в ОФВЭ был разработан и изготовлен уникальный детектор переходного излучения. Детектор состоял из двенадцати независимых секций, каждая из которых включала многослойный пленочный радиатор и дрейфовую камеру для регистрации фотонов. Детектор был оснащен разработанной в ОРЭ придетекторной электроникой на основе гибридных микросхем (Н.Ф. Бондарь). Запуск и обслуживание электроники в эксперименте E715 осуществляли А.С. Денисов, И.И. Ткач и В.Т. Грачев. Эксперимент был выполнен столь успешно, что заслужил самые высокие оценки в научных кругах и послужил надежной основой для подготовки следующих экспериментов.

Эксперимент E761 был посвящен исследованию Σ^- - и Ξ^- - гиперонов на пучке протонов 800 GeV/c. В этом эксперименте помимо детектора переходного излучения ПИЯФ был представлен установкой многопроволочных пропорциональных камер (МПК).

Для регистрации и сбора данных с МПК в ОРЭ была разработана система CROS (Chamber Readout System), высокая эффективность работы которой достигалась следующим набором особенностей:

- применением специально разработанной микросхемы усилителя-дискриминатора повышенного быстродействия на основе гибридной технологии;
- использованием цифровой памяти в качестве программно-управляемой задержки, при этом мертвое время в канале регистрации определялось лишь периодом частоты записи данных в память и не зависело от величины задержки (используемого объема памяти);
- предельно быстрым циклом считывания (200 нс/ 32 бит) по магистрали крейта (Dedicated CAMAC Dataway) только из модулей, содержащих информацию, а также одновременной обработкой события во всех крейтах системы.
- восстановлением всей пространственно-временной структуры данных в пределах установленной заданной задержки

Гибридные микросхемы усилителей-дискриминаторов изготавливались в НПО «Позитрон» при кураторстве Н.Ф. Бондаря. Изготовление модулей системы CROS производилось в опытном производстве ОАОД – руководитель Г.П. Шаблий. Микропрограммное и программное обеспечение для проверки и отладки модулей системы CROS создавалось трудами А.Г. Атаманчука.



28 декабря 1989 года. Перед началом установки оборудования эксперимента E761.
 Нижний ряд: Н.Ф. Бондарь, А.С. Денисов, А.В. Ханзадеев, Д. Лах (FNAL). Верхний ряд:
 В.М. Самсонов, В.Л. Головцов, Н.К. Терентьев, В.Т. Грачев.

Система CROS показала высокую надежность и успешно работала в течение всех многомесячных сеансов сбора данных. В итоге была выполнена научная программа, включая исследования поляризации Σ^+ и Σ^- - распада, $\Xi^- \rightarrow \Sigma^- \gamma$ распада, поиск легких супербарионов. Коллектив разработчиков системы CROS составили А.Г. Атаманчук, Н.Ф. Бондарь, В.Л. Головцов, Л.Н. Уваров. Запуск и поддержку электроники в эксперименте осуществляли Н.Ф. Бондарь, В.Л. Головцов А.С. Денисов.



Э.М. Спириденков
 Заведующий ОРЭ
 1989 - 1997

Эксперимент E781 (SELEX) был посвящен исследованию очарованных барионов, их распадных характеристик. Набор данных производился в 1996-97 гг. Установка SELEX представляла собой универсальный трехступенчатый магнитный спектрометр, способный регистрировать и идентифицировать как заряженные, так и нейтральные частицы. Использовался гиперонный пучок с энергией до 600 ГэВ, падающий на различные мишени. Первая часть исследований была посвящена изучению рождения и распада очарованных частиц, вторая часть программы – измерениям полных сечений Σ^- , π^- и p . Вспомогательной частью программы было измерение поляризуемости π^- и Σ^- - мезонов кулоновским полем при энергии 600 ГэВ с использованием аппаратного триггера на рассеяние (HST-триггера)

Подготовка электроники эксперимента E781 (SELEX) проходила на очередном, возможно наиболее динамичном, этапе масштабного развития систем сбора данных физических экспериментов - быстродействующих средств обработки и передачи данных, компьютеров (real-time computers) и средств программирования (real-time programming). Развивались Fastbus (IEEE 960) - стандарт компьютерной шины и крейтовой системы, ориентированный на работу в высокоскоростных системах сбора данных, VME (VersaModule Eurocard) - стандарт на компьютерную шину, первоначально разработанный для семейства микропроцессоров Motorola 68000, и в дальнейшем нашедший применение

для множества других приложений. Реализовывались индивидуальные варианты скоростных решений (Home-brew) для стандартной шины, как это было сделано в системах PCOS, FERA LeCroу и в нашей системе CROS.

Вклад ПИЯФ в E781 включал модернизированную систему CROS (CROS2), использовавшую часть регистрирующей электроники CROS/E761 и вновь разработанные скоростные контроллеры для работы с системой сбора данных DART установки SELEX. Система CROS2 применялась для считывания данных установки МПК, детектора переходного излучения ETRD, черенковского детектора RICH с суммарным количеством каналов ~ 13000 .

Другим основополагающим направлением деятельности ОПЭ ПИЯФ совместно со специалистами Университета Карнеги-Меллон была разработка системы регистрации данных пучковых микроstriповых детекторов (BSD) и вершинных микроstriповых детекторов (VSD). Детекторы BSD измеряли импульс пучковых частиц (Σ , π), детекторы VSD регистрировали заряженные частицы, возникшие после взаимодействия пучковых частиц. Суммарное число каналов микроstriповых детекторов составило ~ 75000 . Регистрирующая электроника BSD/VSD состояла из Fastbus модулей накопителей данных (FSDA) и контроллеров (FSCC) с доступом в систему сбора данных DART.

Еще одной разработкой, выполненной специалистами ОПЭ при участии специалистов ФНАЛ и Рочестерского Университета, явилась координатная система с программируемой логикой триггера FERS. Система использовала данные с 1920 каналов микроstriповых детекторов для реализации аппаратного триггера на рассеяние (HST) по программе исследования поляризуемости Σ , π -мезонов кулоновским полем. В разработке HST-



Участники эксперимента E781(SELEX)
Нижний ряд: А. Голяш, В. Малеев,
А.Г. Атаманчук, Н.Ф. Бондарь
Верхний ряд: Н.К. Терентьев, Л.Н. Уваров,
В.Л. Головцов

триггера *впервые* использовались микросхемы программируемой логики FPGA (Field Gate Arrays). Тогда это были простейшие однократно программируемые наборы логических вентилях для выполнения многоходовых арифметических и логических операций. Сейчас это многократно программируемые монстры с десятками миллионов логических элементов, десятками тысяч процессоров и других элементов, включая высокоскоростные каналы передачи данных. Разработка и изготовление электроники HST-триггера производилась во ФНАЛ уже в ходе эксперимента E781 со «сверхзвуковой» скоростью: от начала проектирования до включения всей системы в эксперимент прошло всего 6 месяцев.

Суммарное количество каналов координатных детекторов E781 (SELEX) составило ~ 105000 . Вся электроника считывания располагалась рядом с детекторами. Десять потоков данных, управляемых трехуровневой системой

триггера, со средней скоростью 33 МВ/с транслировались в измерительный зал и поступали на систему фильтрации, где процессорное время обработки составляло до 12 мс на событие, а скорость записи данных на ленты ~ 1 Мб/с. Сбор данных E781 (SELEX) завершился в 1997 году. Разработанные специалистами ОРЭ системы электроники показали высокую надежность и успешно эксплуатировались в течение всех многомесечных сеансов сбора данных. В эксперименте получены значительные научные результаты: обнаружен дважды очарованный барион, впервые измерен зарядовый радиус Σ^- - гиперона, определен радиус сильного взаимодействия Σ^- - гиперонов с нуклонами. Авторский коллектив ОРЭ ПИЯФ создания и поддержки систем электроники в эксперименте E781 (SELEX) составили А.Г. Атаманчук, Н.Ф. Бондарь, В.Л. Головцов, П.В. Неустроев, Л.Н. Уваров, А.Г. Голяш, Б.В. Размыслович, М.Ф. Свойский, В.Л. Степанов.

В 1996 году ПИЯФ присоединился к сотрудничеству в коллайдерном эксперименте D0 в связи с модернизацией его подсистем – трековой, мюонной и электромагнитного калориметра для проведения второго сеанса измерений (Run2). Установленный на ускорителе Теватрон детектор D0 представлял собой огромный, сложный универсальный коллайдерный детектор для исследований процессов, возникших при столкновениях протонов и антипротонов. В трековой системе координаты вылетающих частиц измерялись с помощью микростриповых и сцинтилляционных детекторов. Электромагнитный калориметр измерял энергию фотонов, электронов и потоков (струй) заряженных частиц, вылетевших из области взаимодействия. Мюонная система, измерявшая координаты треков и энергию мюонов, располагалась на периферии детектора D0; в её состав входили сверхпроводящие магниты, сцинтилляционные детекторы и минидрейфовые трубки. Всего детектор D0 содержал около миллиона детектирующих элементов. сверхпроводящие магниты, сцинтилляционные детекторы и минидрейфовые трубки.



Л. Н. Уваров у крейтов с электроникой MDT



П. В. Неустроев в комнате управления эксперимента D0

Сферой деятельности специалистов ОРЭ ПИЯФ явилась электроника мюонной системы. Была разработана, изготовлена, протестирована и успешно внедрена в эксперимент 50 000-канальная система считывания данных минидрейфовых трубок (MDT). В состав системы считывания MDT входили два типа модулей – карты оцифровывания (MDC) и контроллер крейта (MDRC) на основе DSP-процессора. Специалисты ПИЯФ осуществляли также поддержку аппаратного и программного обеспечения разработанной системы считывания

в течение второго сеанса (Run 2). Электроника считывания системы MDT размещалась в 24 крейтах 9U VME. В крейте устанавливалось до двенадцати MDC карт, контроллер MDRC и VME-процессор, выполнявший задачи управления и контроля. Карты MDC осуществляли измерение времени дрейфа с разрешением 18,8 нс, улучшая координатное разрешение MDT до нескольких миллиметров. Карты MDC имели цифровой конвейер и буферизацию событий по триггеру первого уровня L1 для хранения и последующего считывания данных MDRC- контроллером.

Электроника MDT передней мюонной системы отработала все 10 лет второго сеанса измерений с исключительной надежностью. Созданную специалистами ОПЭ ПИЯФ электронику эксперты ФНАЛ оценили в \$1М. В эксперименте D0 был получен большой объем новых сведений о свойствах и превращениях элементарных частиц, которые опубликованы в более чем трех сотнях научных статей. Наиболее важным результатом эксперимента D0 является открытие топ-кварка. В эксперименте D0 были также осуществлены прецизионные измерения масс топ-кварка и W-бозона



С. Ф. Удалова на тестовом стенде электроники системы MDT



Н. А. Осипова на стенде проверки модулей системы MDT

Авторский коллектив разработки, внедрения и поддержки эксплуатации электроники передней мюонной системы D0, составили сотрудники ОПЭ П.В. Неустроев, Л.Н. Уваров, С.Л. Уваров. В поддержке эксплуатации системы участвовали сотрудницы ОПЭ С.Ф.Удалова и Н.А. Осипова.

4. Эксперименты CMS, LHCb на Большом Адронном Коллайдере в ЦЕРН



В.Л. Головцов
Заведующий ОПЭ
1998 – Настоящее
время

Объектом участия специалистов ОПЭ в эксперименте CMS стала обширная программа создания электроники катодных стриповых камер (CSC) для Торцевой Мюонной Системы (EMU-Endcap Muons), включающая придетекторную (Front-End), электронику анодных локальных треков (ALCT – Anode Local Charge Track), электронику мюонного триггера – CSC Track Finder, высоковольтную систему (EMU HV System), электронику выстройки мюонных камер (EMU Alignment System).

4.1. Придетекторная электроника CSC EMU Front-End

Переходом от гибридной технологии быстродействующих усилителей для пропорциональных камер экспериментов E761, E781 к разработке и изготовлению заказных интегральных микросхем ASIC (ASIC-

Application-Specific Integrated Circuit) для CSC- камер стала для Н.Ф. Бондаря работа в коллаборации с Университетом Карнеги Меллон (CMU). Это была пятилетняя (1995 – 2000 гг.) напряженная работа, в результате которой была создана микросхема CMP16_g – 16-канальный усилитель -формирователь-дискриминатор, оптимизированный для входной ёмкости до 200 pF с временным разрешением ~ 2 ns и потребляемой мощностью ~ 30 mW/канал.



Н.Ф. Бондарь на тестовом стенде модулей AD16 F

Разработан также ASIC 16-канальной программируемой задержки D16G. На основе микросхем CMP16_g были разработаны и изготовлены 16-канальные модули AD16_F. Общее количество изготовленных модулей 12000 (192 000 каналов). В 2003 году было закончено производство и тестирование всех модулей, после чего они отправлены на фабрики производства CSC-камер в Университет Флориды (UF), Университет Калифорнии (UCLA). ПИЯФ, ИФВЭ. В 2004 году произведен монтаж и тестирование электроники на CSC-камерах и дан старт длительной, продолжающейся до нынешнего времени надежной работы на пучке.

4.2. Электроника анодных локальных треков – ALCT Anode Local Charge Track

ALCT электроника разработана для анодных сигналов CSC-камер EMU. Модуль ALCT принимает сигналы с выхода карт AD16_F одной 6-слойной камеры, восстанавливает мюонные треки, используя многоуровневую технику временных совпадений, анализирует треки, сортирует их по качеству и определяет 2 лучших трека. Модули ALCT, как и модули AD16_F размещены на CSC-камерах.



В.И. Яцюра на тестовом стенде ALCT-модулей. UCLA 2003 год

Разработаны три типа модулей ALCT 288, ALCT 384, ALCT 672 для трёх разновидностей CSC-камер. Для проверки всех трех типов модулей разработан специальный тестер. Разработку электроники в коллаборации с UCLA выполняли сотрудники ОПЭ В.И. Яцюра, М.Р. Кан, Г.Ф.Жмакин. Производство модулей размещалось в американской промышленности; в 2003 году все модули были изготовлены, протестированы и отправлены на фабрики UF, UCLA, ПИЯФ, ИФВЭ. В 2004 году для ALCT-модулей были разработаны и изготовлены сменяемые мезонинные карты с программируемой логикой для возможных последующих модификаций

алгоритмов обработки данных с более широкими возможностями реализации алгоритмов соответственно развитию технологий производства интегральных микросхем.

4.3. Электроника мюонного триггера – CSC Track Finder

Электроника CSC Track Finder (CSC TF) была изначально разработана как 12 специализированных Track Finding процессоров (TF-процессоров), каждый из которых анализирует входные примитивные мюонные треки (сегменты) CSC-камер в 60-градусном азимутальном секторе, восстанавливает по сегментам и анализирует полные треки, измеряет поперечный импульс P_t . идентифицирует до 3 лучших мюонных треков.

История создания TF-процессора начиналась летом 1998 года, когда системной реализацией HST-триггера в эксперименте E781 заинтересовался ученый-физик Университета Флориды (UF) Д. Акоста, ответственный за триггер торцевой мюонной системы CMS. Состоявшееся двухстороннее детальное обсуждение темы и триггеростроения в целом завершилось в сентябре 1998 года приглашением двух разработчиков HST-триггера Б.В. Размысловича и автора этих строк в Университет Флориды для выполнения проектных работ и уже в апреле 1999 года был подписан Меморандум между UF и ПИЯФ по созданию триггера торцевой мюонной системы CMS.

Первый прототип TF- процессора был разработан и успешно прошел тестовые испытания в UF в 1999 – 2001 гг. Второй, знаковый прототип TF-процессора с реализацией



Июнь 2003 г. ЦЕРН
Тестирование TF – процессора
Л. Уваров, В. Головцов
D. Acosta, B. Scurlock, H. Stoeck (UF)

алгоритма трекового анализа на одной сверхбольшой микросхеме FPGA и полным временем выработки решения ~ 175 нс привел к возможности размещения оборудования для 60-градусного сектора в одном модуле 9U VME.

Далее разработка совершенствовалась по мере развития общих подходов к проекту всей системы CMS триггера, результатов тестовых испытаний, симуляции и совершенствования микропрограмм, развития элементной базы, новых идей и т.д. К этому времени к разработке TF- процессора подключились Л.Н.

Уваров и А.Г. Атаманчук. После разработки и тестовых испытаний четырех прототипов в январе 2005 года была выпущена пилотная серия и начато серийное производство модулей, которое было завершено в 2006 году. Трудозатраты на разработку и производство CSC TF системы составили ~ 12 человеко-лет, объем финансирования (US CMS) ~ 700 K\$.

В 2007 – 2009 гг производилась отладка взаимодействия CSC TF с системой глобального мюонного триггера, системой управления и сбора данных, произведен пробный пучковый запуск с набором статистики. В 2010 – 2012 гг проведен набор физических данных вплоть до энергии центра масс 8 ТэВ и светимости $10^{33} \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Эксплуатация CSC TF показала его высокую надежность, что, наряду с другими характеристиками этого триггерного устройства, обеспечило стабильный набор физических данных.

В 2012 – 14 гг проводилась модернизация системы MT- триггера для обеспечения более высоких селективных характеристик при энергиях центра масс вплоть до 13 ТэВ и светимости коллайдера до уровня $1 \times 10^{34} \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и далее до уровня $5 \times 10^{34} \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. С этой целью использовалась современная номенклатура средств микроэлектронники, высокоскоростные каналы оптической связи, современный экономный стандарт электроники с телекоммуникационными вычислениями MicroTCA. В качестве основного элемента модернизированной системы MT-триггера разработан унифицированный модуль MTF-процессора, характеристики которого существенно улучшены в сравнении с реализованным на предыдущем этапе. Так, число водных оптических каналов возросло с 15 до 80 за счет использования 12-канальных оптических приемников, при этом скорость передачи данных возросла с 2 Гб/с до 10 Гб/с, число ячеек программируемой логики

возросло с 12 тыс. до 700 тыс., адресное поле табличной памяти для ассигнования поперечного импульса P_T увеличено с 2МБ до 1 ГБ и т.д. Основные работы по модернизации TF-процессора (MTF-процессора) проводились в Университете Флориды. Для исследования характеристик MTF-процессора, включая оптимизацию микропрограмм, в ОРЭ в 2014 году был оборудован стенд на основе стандарта MicroTCA. Назначение стенда более широкое: он может использоваться для новых разработок электроники физических экспериментов.

4.4. Высоковольтная система CSC-камер EMU CMS

Вся торцевая мюонная система EMU CMS состоит из 468 шестислойных CSC-камер и каждый слой имеет от 3 до 5 секций, что требует суммарно более 10 000 каналов индивидуального высоковольтного питания. Разработка системы, обеспечивающей регулирование и измерение высоковольтного напряжения, а также измерение значения тока по всем каналам высоковольтного питания установки CSC-камер MU CMS была осуществлена специалистами ПИЯФ и UF. Работы были начаты в UF в 1999 году.



Апрель 2004 г. ОРЭ, Тестовый стенд №1.
Ведущий разработчик CMS EMU HV-системы
С.С. Волков

В 2001 году был изготовлен и прошел тестирование первый прототип системы. В 2003 году изготовлен и протестирован второй прототип системы, а затем выпущен сигнальный опытный образец, прошедший тестирование на камере в магнитном поле, а также - радиационный тест и тест на пучке LHC. В том же 2003 году проект UF/ PNPI системы был выбран для EMU CMS по результатам тендера с ведущей в производстве высоковольтных систем фирмой CAEN. Оцениваемая стоимость проекта UF/PNPI ~ \$ 1.2M, проекта CAEN ~ \$ 2.5M.



Апрель 2004 года. ОРЭ, Тестовый стенд №2.
С.В. Бондарев и Н.Б. Исаев за проверкой модулей
CMS EMU HV-системы

Параллельно шла подготовка производства UF/ PNPI системы для обеспечения высоковольтным питанием станций ME1/2, ME2, ME3, ME4/1. Производство было развернуто в ПИЯФ и на создание соответствующей инфраструктуры в ОРЭ были выделены целевые средства из бюджета проекта CMS EMU HV В короткие сроки было оборудовано 280 м² производственной площади, включающей два монтажных участка, технологический участок, участок тестирования, участок диагностики, склад с входным контролем компонентов и склад готовой

продукции. Оборудовано 2 рабочих места инженеров-разработчиков, 5 тестовых стендов

настройки модулей, включая термоэлектрические и климатические испытания. Оборудовано 4 рабочих места монтажников печатных плат и 2 рабочих места сборки модулей. Шестнадцать сотрудников отдела и других подразделений ОФВЭ были непосредственно заняты в производстве и тестировании. Общие затраты на оборудование и ремонтные работы в 2004 году составили около 1.4 миллиона рублей.

Производство системы UF/PNPI для станций ME1/2, ME2, ME3, ME4/1 было завершено в 2005 году. В 2007 состоялся системный тест в ЦЕРН, после чего UF/PNPI система была подключена к детекторам, а в 2008 году началась её успешная эксплуатация в эксперименте.

Изготовление новых CSC-камер для станции ME4 /2 потребовало дополнительных поставок 2500 каналов UF/PNPI высоковольтной системы. Производство по прежнему сценарию было начато в конце 2012 года, а к февралю 2014 года система была изготовлена и доставлена в ЦЕРН. В итоге была разработана, изготовлена и внедрена в эксплуатацию 11016-канальная система распределения высоковольтного питания катодных стриповых камер торцевой мюонной системы эксперимента CMS. Разработка, создание необходимой инфраструктуры, производство и успешная эксплуатация UF/PNPI высоковольтной системы, наличие квалифицированных специалистов инициировали развитие отрасли высоковольтных систем в ОРЭ.

В 2006 году был начат еще один проект высоковольтной системы на 2016 каналов мюонных камер LHCb. Была выбрана та же система, что и для CMS EMU, т.к. она удовлетворяла большинству требований LHCb. До того в 2005 году состоялся и вновь положительно тендер с фирмой CAEN с заявленными ценами: UF/PNPI – 320 KCHF, CAEN – 700 KCHF.

Всего для установки LHCb требовалось 4032 канала высоковольтной системы (HV LHCb) и чтобы минимизировать начальную цену её производство было разделено на два этапа. На первом этапе было изготовлено только 2016 каналов, и подача высоковольтного напряжения на все каналы осуществлялась через специальное разделительное устройство.

Первые два года эксплуатации были напряженными, т.к. обнаружилась пониженная надежность высоковольтных резисторов одной закупленной партии: это вызывало дрейф выходного напряжения. Проблема решалась процедурой калибровки, а во время перерыва в работе коллайдера все ненадежные резисторы были заменены. Некоторая коррекция потребовалась для высоковольтных регуляторов. Все проблемы в итоге были решены и учтены при производстве второй половины LHCb HV системы. Дальнейшая работа всей установленной системы на пучке оставалась надежной.

Участниками проекта UF/PNPI высоковольтной системы являются сотрудники ОРЭ С.С. Волков, С.В. Бондарев, Н.Б. Исаев, Е.М. Оришин, Л.О. Сергеев, И.Ю.Славнов, Г.В. Ясенова, А.В. Мыльникова, Н.М. Гулина, В.И. Иванова, Н.С.Самсоненкова, Н.А. Осипова, С.И. Калентарова, сотрудники ОФВЭ В.И. Лазарев, В.В. Асташин и др.

Дальнейшее развитие CMS EMU высоковольтной системы связано с переходом коллайдера на повышенную и высокую светимость. Две высоковольтные системы CMS EMU – 11016-канальная UF/PNPI и 432- канальная CAEN изначально не имеют достаточного запаса для работы с комфортным коэффициентом безопасности при ожидаемом увеличении загрузки в 5-7 раз выше номинальной. Проведенный к 2018 году новый дизайн UF/PNPI системы позволяет перейти от трехуровневой к двухуровневой структуре путем замены промышленных источников высоковольтного питания и восьмиканальных головных модулей девятиканальными модулями с встроенными

регулируемыми источниками питания, обеспечивающими достаточно высокий коэффициент безопасности. К слову, надежность этих встроенных миниатюрных источников питания, определяемая как среднее время перед сбоем, составляет 840000 часов или 95 лет непрерывной работы. В результате было принято решение об оснащении всех станций CMS EMU, включая станцию ME1/1, модернизированной системой UF/PNPI. Работы должны быть осуществлены до 2021 года в процессе т.н. Фазы 2 при наличии финансирования.

4.5 Электроника системы выстройки CMS EMU.



В.А. Скаррь
Разработчик
системы
выстройки
EMU

Геометрическое положение 468 закрепленных на дисках магнита CSC – камер должно определяться с точностью 100 мкм в азимутальной плоскости и с миллиметровой точностью в Z-направлении. Ситуация усложнена существенной деформацией железных дисков в магнитном поле. Для постоянного контроля за положением CSC-камер разработана и изготовлена система выстройки CMS EMU. Система использует оптические позиционные сенсоры, следящие за положением прямой линии лазера. Этот процесс слежения производится под управлением DSP-процессоров. Система считывания данных сенсоров передает данные в головную систему сбора данных для мониторингования и анализа. В состав системы входят более 1200 придетекторных сенсорных плат, более 300 плат считывания и более 100 интерфейсных плат. Разработка системы производилась в коллаборации с Университетом Висконсина в 1999- 2003 гг. В 2006 году произведена сборка оборудования, разработка программного обеспечения. В 2006-2007 гг выполнены глобальные тесты всей системы выстройки, а в 2008 году – запуск системы, мониторингование и анализ считываемых данных. В разработке, тестировании и обслуживании электроники системы выстройки принимали участие сотрудники ОПЭ В.А. Скаррь, Е.М. Орищин и А.Г. Голяш.

5. Текущие проекты

Достигнутый на рубеже веков высокий уровень разработок отдела, отмеченный вышеперечисленным перечнем работ, остается таковым и до нынешних времен. Мы стараемся не отставать от стремительно развивающихся технологий электроники и средств проектирования. Динамика разработок электроники сохраняется в том объеме, который определяется физическими экспериментами нашего отделения. Именно они определяют реализованные и текущие проекты отдела.

5.1 Система считывания данных трековых детекторов CROS3

Следующая за системами CROS и CROS2 система считывания данных трековых детекторов CROS3 начала разрабатываться в 2005 году. Идея разработки состояла в создании современной быстродействующей и экономически эффективной считывающей электроники трековых детекторов современных физических экспериментов. Система адаптируется под конструкцию детектора и позволяет организовать структуру последовательной фильтрации данных. В систему изначально закладывались следующие особенности:

- предусилитель, дискриминатор, схемы задержки и считывания располагаются непосредственно на детекторе.
- быстрое кодирование и считывание данных с частотой не ниже 100 МГц.

- возможность измерения с дискретностью 2.5 нс временного распределения сработавших каналов в интервале «ворот» схемы совпадений.

Современные FPGA микросхемы, доступные микросхемы ASIC или качественный дизайн с дискретными элементами для придетекторной электроники, оптические каналы связи, развитая технология многослойных печатных плат позволяли разработать надежные и быстродействующие устройства серии CROS3.

Первые разработки семейства CROS3 были ориентированы на многопроводочные пропорциональные камеры (PWC) и дрейфовые камеры (DC) с гексагональной структурой ячеек. Соответственно в аналоговой части системы использовались ASIC CMP-16G для применения с PWC и ASIC ASD-Q - для применения с DC в последующих разработках



Сентябрь 2006 г. Дармштадт
В.И. Яцюра и Л.Н. Уваров подключают
систему CROS3_B
для эксперимента LAND

(модификациях) системы CROS3 придетекторная электроника реализовывалась на дискретных элементах для CROS3_B, аналого-цифровых преобразователях АЦП для CROS3_N. Модернизировался системный интерфейс от первоначального PCI до текущего 1 Гб Ethernet.

В 2006 году были сданы в эксплуатацию 512 каналов системы CROS3_DC для эксперимента LAND в GSI с частотой триггерных запусков ~ 100 кГц.

В 2007 году состоялся запуск 2000 каналов системы CROS3_PWC для

эксперимента НЭС на пучке синхроциклотрона ПИЯФ. Эффективность внедрения системы CROS3_PWC видна на следующем примере: среднее время считывания события для установки НЭС составило 13 мкс, а для прежней системы - 350 мкс. В 2012 году система CROS3_PWC переехала в Гамбург и используется в эксперименте OLYMPUS (DESY).

В 2010 году поставлено 2500 каналов системы CROS3_B для установки дрейфовых камер эксперимента BGO-OD ELSA Бонн, а в 2011 году началась работа системы на пучке. Характерно, что со времени запуска системы рекламаций на неё не поступало.

В 2013 году было поставлено 200 каналов системы CROS3_N для установки фотоумножителей эксперимента по поиску стерильного нейтрино Нейтрино-4. В 2016 в году система была установлена на реакторе CM3 Димитровграде, откуда от экспериментаторов поступил следующий отзыв: «За 8 месяцев работы данного детектора и 3 года работы прототипа система показала себя как надежное, выполненное на высоком профессиональном уровне изделие, которое можно с успехом применять для решения сложных научных задач». В настоящее время обсуждается вопрос модернизации системы CROS3_N с дополнительным количеством каналов придетекторной электроники.

В 2014 году было поставлено 576 каналов электроники CROS3_P для эксперимента Polfusion и 96 каналов электроники CROS3_L для тестового стенда камер LHCb

Как модернизация системы CROS3 в рамках проекта эксперимента SHiP на SPS-ускорителе ЦЕРН разработана концепция системы считывания данных Straw-трекера. Проект системы считывания данных Straw-трекера находится в стадии разработки к четвертому поколению системы считывания CROS.

В проекте CROS3 приняли участие сотрудники ОПЭ Н.Ф. Бондарь, В.Л. Головцов, Л.Н. Уваров, С.Л. Уваров, В.И. Яцюра, Н.В. Грузинский, Е.М. Оришин, Э.М. Спириденков, Е.А. Лобачев и др

5.2 Высоковольтная система нейтронного детектора NeuLAND

Система распределения высоковольтного питания HVDS (High Voltage Distribution System) изготавливается для нового высокоапертурного нейтронного детектора на базе фотоумножителей NeuLAND экспериментальной установки R3B коллаборации NUSTAR. Договор заключен в 2014 году. Как и предыдущие высоковольтные системы HVDS

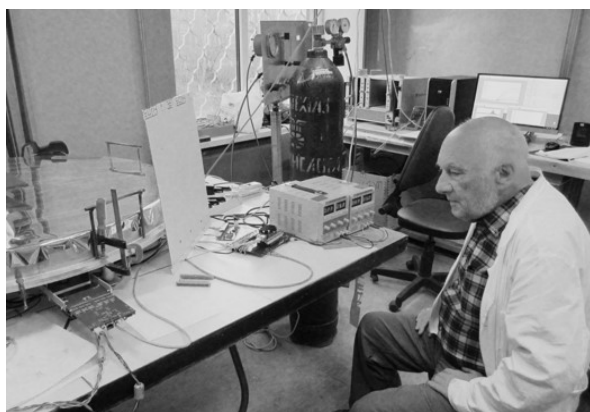


Декабрь 2014 года. GSI. Е.М. Оришин и Н.В. Грузинский наблюдают результаты измерений характеристик первой партии модулей

управляющий модуль. Поставки оборудования начались в 2014 году и всего изготовлено 6000 каналов. В проекте HVDS NeuLAND заняты С.С. Волков, Л.Н. Уваров, С.В. Бондарев, Н.Б. Исаев, Н.В. Грузинский, В. И. Яцюра ...

выполняет индивидуальное понижающее регулирование и мониторинг напряжения и тока для каждого канала. Система имеет два уровня. На первом уровне - коммерческий высоковольтный источник, на втором - 50-канальные модули, осуществляющие понижающее регулирование в полном диапазоне исходного напряжения и мониторинг напряжения и тока. Система работает под управлением компьютера через сеть Ethernet, используя специально разработанный

5.3. Электроника эксперимента «ПРОТОН».



Ноябрь, 2019 г. П.В. Неустроев исследует работу придетекторной электроники трекового спектрометра в комплексе с концентратором CROS3 P

Экспериментальная установка ПРОТОН имеет в своем составе три спектрометра – времяпролетный, трековый и пучковый. Считывание данных спектрометров установки ПРОТОН осуществляется через придетекторную электронику и далее – через концентраторы CROS3 с блоком Ethernet-интерфейса для связи с системой сбора данных эксперимента. Разрабатываемая придетекторная электроника системы CROS3_P базируется на аппаратной платформе 24/48-канальных предусилителей, Flash ADC и логики FPGA, представляющей широкое поле для микропрограммирования. Возможны два режима работы – режим самозапуска и режим системного триггера. Предполагается наличие специальной логики, учитывающей специфику детектора и позволяющей оптимальным образом вырабатывать системный триггер. В проекте «ПРОТОН» участвуют сотрудники ОПЭ П.В. Неустроев, Э.М. Спириденков, Н.В. Грузинский, В.И. Яцюра

Экспериментальная установка ПРОТОН имеет в своем составе три спектрометра – времяпролетный, трековый и пучковый. Считывание данных спектрометров установки ПРОТОН осуществляется через придетекторную электронику и далее – через концентраторы CROS3 с блоком Ethernet-интерфейса для связи с системой сбора данных эксперимента.

Разрабатываемая придетекторная электроника системы CROS3_P базируется на аппаратной платформе 24/48-канальных предусилителей, Flash ADC и логики FPGA, представляющей широкое поле для микропрограммирования.

Возможны два режима работы – режим самозапуска и режим системного триггера. Предполагается наличие специальной логики, учитывающей специфику детектора и позволяющей оптимальным образом вырабатывать системный триггер. В проекте «ПРОТОН» участвуют сотрудники ОПЭ П.В. Неустроев, Э.М. Спириденков, Н.В. Грузинский, В.И. Яцюра



Отделу радиоэлектроники исполнилось 50 лет. За полвека пройден славный путь становления, расцвета, преодоления трудностей, трудовых успехов и достижений. Все эти годы коллектив отдела в меру сил достойно трудился, обеспечивая подразделения ОФВЭ и международные коллаборации различных физических экспериментов современной электроникой. И в настоящее время высокая квалификация и опыт сотрудников позволяют отделу выполнять текущие разработки на уровне современной элементной базы, находить решения сложных технических и технологических задач.



Искренне благодарю уважаемых Александра Сергеевича Денисова и Петра Всеволодовича Неустроева за их краткие, но емкие воспоминания времен начала ОРЭ и далее.

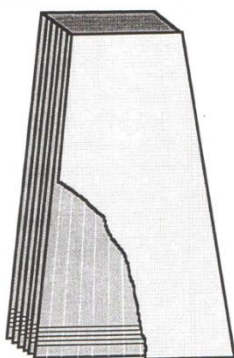
Отдел мюонных камер

В.С. Козлов

Отдел мюонных камер (ОМК), руководитель – В.С. Козлов, был сформирован в 1999 г. на основе группы мюонных камер, образованной в 1993 г.

Основная деятельность группы, руководимой в то время В.В. Асташиным, была главным образом направлена на конструирование и изготовление многопроволочных детекторов различных типов, таких как пропорциональные камеры, дрейфовые камеры, катодно-стриповые и другие, которые использовались в экспериментах на ускорителе ПИЯФ и за рубежом.

С 1999 по 2004 годы команда ОМК работала в рамках проекта CMS, и её основная деятельность была направлена на производство катодно-стриповых камер CSC для торцевой области детектора CMS. Камеры имеют трапециевидную форму и состоят из шести независимых катодно-стриповых камер. Стрипы располагаются радиально, анодные проволочки-поперёк. Схематичный вид камеры представлен ниже.



Изготавливались камеры следующих типов:

ME2/1, ME3/1, ME4/1

Тип камер/ габариты	ME2/1	ME3/1	ME4/1
Длина, мм	2065	1845	1665
Ширина (основание), мм	1534	1534	1534
Ширина (вершина), мм	751	835	903

Массовое производство камер CSC для ME2, ME3 и ME4 станций началась в 2001 г. За указанный период совместно с сотрудниками Лаборатории мезоатомов были собраны, оттестированы и отправлены в ЦЕРН 120 камер 3-х типов. Изготовление камер проводилось в тесном сотрудничестве с ФНАЛ.



Команда ОМК
Слева направо:
В.С. Козлов,
В.Д. Лебедев,
Н.М. Степанова,
Г.А. Городницкий,
В.В. Голубев,
З.Г. Кудряшова,
Н.М. Малыхина,
Е.М. Полунина,
А.С. Балдычев,
В.И. Тараканов,
А.М. Стуглев



Прощальное фото с последней камерой перед её отправкой в ЦЕРН.

На церемонии прощания присутствовали все участники производства.

Слева направо:

Л.А. Щипунов, Н.М. Степанова,
Г.А. Городницкий, Н.Н. Малыхина,
В.Д. Лебедев, В.И. Тараканов,
Н.Ф. Бондарь, В.А. Мильников,
Ю.В. Брюсова, В.В. Голубев,
Н.М. Гулина, Е.М. Полупина,
З.Г. Кудряшова, Л.П. Лапина,
А.Н. Кознов, А.С. Денисов,
Ю.М. Иванов, В.С. Козлов,
В.И. Лупанов

В 2005 г. в ПИЯФ началось массовое производство многопроволочных пропорциональных камер (MWPC) в рамках проекта ЛНСб. Для производства камер были организованы две площадки: Factory I (группа детекторов мюонов – руководитель Б.В. Бочин) и Factory II (ОМК). Конструкция и технология сборки камер разрабатывались в Группе детекторов мюонов.

Основное технологическое оборудование для сборки камер поступало из ЦЕРН. Использовалось также оборудование как собственного производства, так и часть оставшегося от предыдущей программы CMS. Изготавливались камеры 3-х типов: M2R4, M3R4 и M4R4. Конструктивно камеры принципиально не различаются и представляют собой четырёхзачорные многопроволочные пропорциональные камеры. Отличия заключаются в геометрических размерах активных зон, в размерах панелей и чувствительных элементов пропорциональных камер (“падов”). Все камеры имеют анодный съём информации, анодные проволочки объединены в группу по 26 штук, образуя проволочный пад. Съём информации осуществляется через высоковольтные конденсаторы. К моменту завершения производства (март 2007 г.) на 2-х площадках было изготовлено 660 камер разного типа. При этом скорость сборки камер с полным циклом тестирования составляла одна камера в день на каждой площадке.



Команда ПИЯФ, Factory I.

Слева направо:

А.Д. Еремеев, А.А. Жданов,
Б.В. Бочин, О.Е. Маев,
С.А. Гец, С.Ю. Агафонова,
О.Е. Федоров, А.Г. Филимонов,
П.Н. Константинов, А.А. Никитина,
Н.Р. Сагидова, Ю.А. Зуев,
Н.В. Емельянова, Е.Э. Путнис

Команда ПИЯФ, Factory II
Отправка последних 70-ти камер
M4R4 в ЦЕРН

Верхний ряд:

В.В. Голубев, В.С. Козлов.

Нижний ряд:

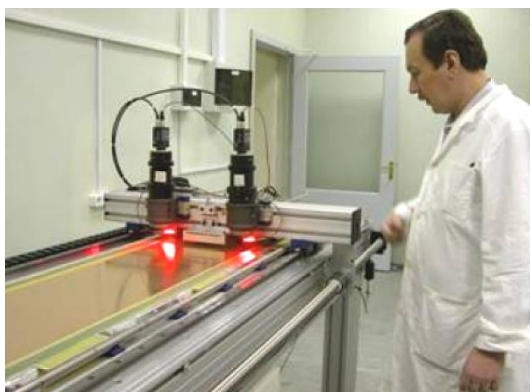
В.И. Тараканов, Н.М. Степанова,

Е.М. Полунина, В.Д. Лебедев,

Н.М. Малыгина, А.С. Балдычев,

З.Г. Кудряшова.

Сидит: В.И. Лупанов



С.А. Гец. Измерение шага намотки
проволок



В.В. Голубев. Высоковольтное
тестирование камеры



Б.В. Бочин. Одна из первых камер,
собранных на Factory I.
Камера состоит из 4-х
детектирующих слоев площадью
 $30 \times 120 \text{ см}^2$



А.С. Денисов. Настройка электроники
камеры



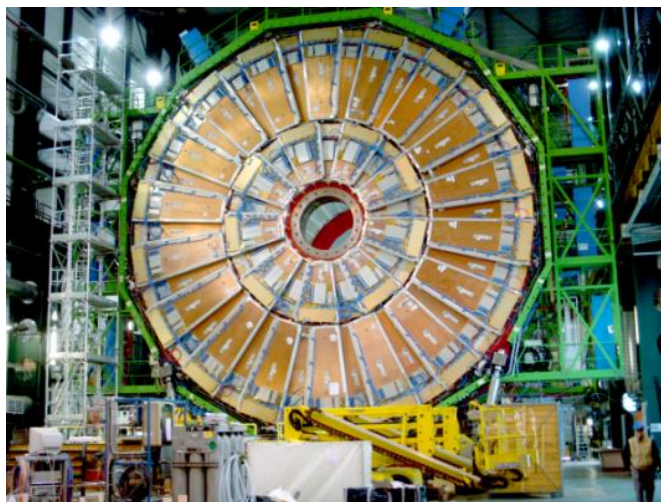
П.В. Неустров. Тестирование камер

Все камеры собраны по технологии камер повышенной надёжности, предложенной Б.В. Бочиным, отличительная особенность которой состоит в следующем. По итальянской технологии, на основе которой собраны больше половины мюонных камер детектора LHCb, панели изготавливались методом заполнения пространства между двумя пластинами стеклотекстолита FR4 толщиной 0,8 мм полиуретановой пеной под давлением 3 атм. Такой метод формирования панелей приводил иногда к потере её плоскостности в течение времени и, как результат, к нарушению работоспособности камеры. В новом предложенном методе пространство между пластинами стеклотекстолита заполнялось сотовым материалом «Honeycomb», который приклеивался к пластинам эпоксидным клеем на специально изготовленных столах под вакуумным прижимом. Это позволило обеспечить стабильность плоскостности панели в течение длительного времени не хуже 50 мкм.

Другая особенность камеры, собранной по технологии повышенной надёжности, состоит в том, что её конструкция обеспечивает временную герметизацию камеры. Это позволяет проводить высоковольтную тренировку камеры на рабочем газе до полной её герметизации, что повышает чистоту сборки камеры, в отличие от итальянской технологии, где предварительная тренировка камеры на рабочем газе не предусмотрена.

По окончании производства камер по программе LHCb группа детекторов мюонов вошла в состав ОМК.

Наши сотрудники принимали непосредственное участие в тестировании и монтаже камер на детекторах CMS и LHCb.



Одна из смонтированных станций детектора CMS

В 2012–2013 гг. наши сотрудники занимались сборкой в ЦЕРН мюонных камер (CSC) второго кольца станции ME4 торцовой мюонной системы детектора CMS. При их непосредственном участии было собрано и оттестировано 76 мюонных камер ME4/2.

Команда сотрудников ПИЯФ выполнила основную работу по сборке и тестированию в ЦЕРН мюонных камер ME4/2.



Слева направо: Б.В. Бочин, Ан.А. Воробьев, В.В. Голубев, В.В. Сулимов, С.А. Гец, В.И. Тараканов

В 2005 г. ОМК принимал участие в создании установки эксперимента «Эпекур». В течение 2006–2008 гг. была разработана конструкция дрейфовых камер с гексагональной структурой электрического поля и изготовлены 8 камер: 2 камеры с размером чувствительной области $400 \times 600 \text{ мм}^2$ и 6 камер с размером чувствительной области $800 \times 1200 \text{ мм}^2$. Камеры успешно отработали в эксперименте по измерению дифференциального сечения упругого пион-протонного рассеяния на ускорителе ИТЭФ.



В развитие эксперимента для измерения неупругих реакций $\pi p \rightarrow K_S^0 \Lambda$ были сконструированы широкоформатные дрейфовые камеры с гексагональной структурой с размером чувствительной области $1632 \times 2448 \text{ мм}^2$. К концу 2015 г. все 4 камеры, необходимые для эксперимента, были собраны и оттестированы.

Одна из широкоформатных камер для эксперимента ЭПЕКУР

Отличительной особенностью этих дрейфовых камер, кроме размера, является наличие в центральной части камер области размером $50 \times 50 \text{ мм}^2$ с нулевым газовым усилением (для подавления сигналов от пучка). Это было достигнуто локальным увеличением гальваническим методом диаметра сигнальных проволочек до 150 мкм.

В производстве камер, в части их тестирования со считывающей электроникой, активное участие принимали сотрудники Лаборатории мезонной физики.

В рамках коллаборации CB ELSA, базирующейся на ускорителе ELSA, в 2007 г. было заключено соглашение между ПИЯФ и Рейнским Университетом им. Фридриха Вильгельма (RFWU, Бонн, Германия) на разработку и производство широкоформатных дрейфовых камер для SFB/TR-16/B1 магнитного спектрометра.

В течение 2008–2010 гг. были разработаны, изготовлены и отправлены в Бонн 8 дрейфовых камер с гексагональной структурой электрического поля. Соответствующая электроника для камер была разработана и изготовлена силами Отдела радиоэлектроники ОФВЭ. С 2010 г. все 8 камер используются в BGO-OD эксперименте.

Все камеры одинаковой конструкции и имеют чувствительную область размером 2456×1233 мм². В 2-х камерах проволочки располагаются вдоль длинной стороны камеры. Чтобы исключить недопустимое провисание проволочек, была использована поддержка этих проволочек оригинальной конструкции.

В рамках реализации сотрудничества Российской Федерации и Европейской организации по ядерным исследованиям (ЦЕРН) по программе "Разработка детекторных устройств мюонной системы супердетектора БАК-би в ОМК в течение 2015–2017 гг. были разработаны, изготовлены и отправлены в ЦЕРН в качестве запасных мюонные камеры M4R2, M2R3, M3R3 и M2R4 в количестве 24 шт. Камеры M2R3, M4R2 и M3R3, за исключением M2R4, имеют катодный съём информации, катоды разбиты на пады. Размеры падов обусловлены требованиями эксперимента и различны для каждого типа камер. Камеры изготавливались по технологии повышенной надёжности, разработанной в ОМК.

В настоящее время деятельность ОМК связана с научно исследовательской и опытно-конструкторской работой по теме: "Модернизация Мюонной Системы супердетектора БАК-би" в рамках реализации сотрудничества Российской Федерации с Европейской организацией по ядерным исследованиям (ЦЕРН).

Сотрудники ОФВЭ О.Е. Маев и Н.Ф. Бондарь провели анализ работы мюонной системы в условиях планируемого повышения светимости коллайдера на порядок. Они показали, что камеры внутренних регионов M2R1, M3R1, M2R2 и M3R2 в условиях десятикратного повышения фоновых загрузок будут работать неэффективно. Поэтому было принято решение заменить существующие камеры на камеры с высокой гранулярностью падов. К настоящему моменту разработана конструкторская документация для камер M2R2 и M3R2 с высокой гранулярностью падов и изготовлен экспериментальный образец камеры M2R2 в новом дизайне. Он прошёл испытание на специализированном стенде измерения рабочих характеристик лабораторных образцов мюонных камер с помощью протонного пучка синхроциклотрона ПИЯФ, а также испытания проводились на установке GIF++ в ЦЕРН.

Испытания подтвердили правильность выбранной конструкции камер с высокой гранулярностью падов. В настоящее время ведутся работы по изготовлению прототипа камер для региона M2R1, а также по организации производства камер для всех регионов M2R1, M2R2 и M3R1, где планируются заменить существующие детекторы падовыми пропорциональными камерами повышенной гранулярности.

Отдел трековых детекторов

А.Г. Крившич

Отдел Трековых Детекторов (ОТД) – руководитель А.Г. Крившич – был образован в ОФВЭ в 1982 году на базе группы газоразрядных приборов, которая была создана в 1972 году. Руководил группой сначала Е.А. Дамаскинский, а потом – А.Г. Крившич.

ОТД – это профессионально работающее научно-техническое подразделение, основными задачами которого являются:

1. Создание оригинальных детекторных систем на базе газоразрядных детекторов частиц. Разработка и оптимизация алгоритмов их работы совместно с другими детекторами в составе экспериментальных установок, работающих в области физики высоких и сверхвысоких энергий.

2. Исследование и оптимизация рабочих характеристик детекторов с целью достижения их предельно достижимых параметров.

3. Исследование физики газового разряда применительно к детекторам частиц, работающих в интенсивных радиационных полях. Разработка методологии исследования и оптимизации радиационной стойкости детекторов частиц. Ресурсные испытания детекторов.

В ОТД впервые в истории ОФВЭ созданы пропорциональные камеры – Рис. 1. На базе этих камер проведена серия экспериментальных исследований (рук. А.А. Воробьев) в Гатчине, в Протвино и далее – в ЦЕРН (Швейцария) и во FNAL (США).

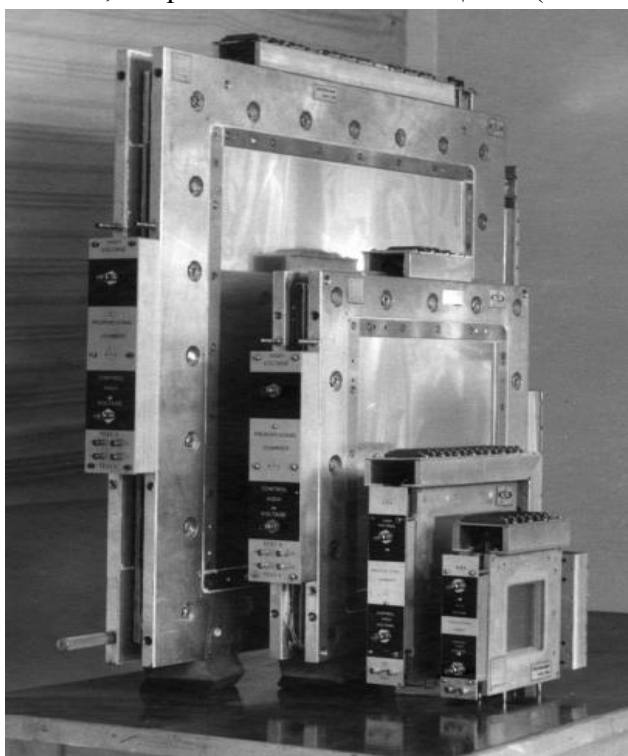


Рис. 1. Пропорциональные камеры

Отдел накопил большой опыт в области создания сложных экспериментальных установок на базе газовых многоканальных координатных детекторов. Проведенные исследования и разработки обеспечили основу для создания в ПИЯФ широкого спектра экспериментальных установок с пропорциональными и дрейфовыми камерами с различными типами съема информации (по-канальный съем, метод деления заряда, метод измерения времени дрейфа, съем информации на линию задержки, катодный съем информации и т.д.). Эти детекторы надежно работали (и продолжают работать) практически во всех ядерно-физических экспериментах, проводимых ПИЯФ в области физики высоких энергий, как в России, так и в международных научных центрах в течение последних 40 лет.

ОТД является одной из немногих научных групп в мире, которая ведет систематические исследования в области создания детекторов, владеет наиболее полным комплексом физических методик и добилась существенных результатов. Наиболее значимые из них приведены ниже.

1. ОТД принял активное участие в создании нового класса детекторов, позволяющих идентифицировать частицы в области высоких энергий, где традиционные методы (черенковские счётчики, детекторы ионизационных потерь) становятся менее эффективными – **детектора переходного излучения (ДПИ)**, впервые в мире



Рис. 2. Пропорциональные камеры для детектора переходного излучения. Слева направо в верхнем ряду: Г.Е. Гаврилов, Н.М. Малыхина, В.А. Андреев, А.Г. Кривишч, М.А. Ясюкевич. Слева направо в нижнем ряду: Т.Б. Мезенцева, А.Н. Никаненок

работавшего в реальном физическом эксперименте Рис. 2 и Рис. 3 – [1]. Это создало принципиальную возможность для проведения в 1981–1998 годах серии успешных экспериментов (E-715, E-761, E-781; Fermilab, США) на гиперонных пучках с энергией от 250 ГэВ до 600 ГэВ, в которых была получена целая серия уникальных физических результатов.

2. Создание в ОТД торцевого координатного детектора (ФТС) для экспериментальной установки L3, с помощью которой на коллайдере LEP в ЦЕРН (Швейцария) изучались уникальные физические процессы, возникающие в e^+e^- столкновениях при сверхвысоких энергиях 5–200 ГэВ в 1992–2002 гг. Рис. 4. – детектор ФТС, установленный внутри L3 (одна из 2-х сторон). Диаметр – 1 метр. Стрелкой показано место для установки устройства калибровки ВГО. Трубки по периметру диска – система газового питания.

Впервые в истории ОФВЭ в детекторе регистрировалось время, что позволило гарантировать очень малое пространственное разрешение – 0,15 мм. **Впервые** в истории ОФВЭ с одного анода снимались две координаты частицы: одна – по времени дрейфа и вторая – по делению заряда [2]. **Впервые** разработан и применен новый



Рис. 3. Катод детектора ДПИ. Состав: слева направо – С.К. Патричев, Д.М. Селиверстов, А.Г. Кривишч, Т.Б. Мезенцева

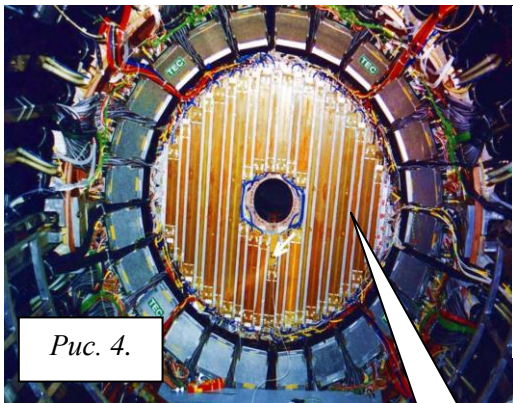


Рис. 4.

FTC

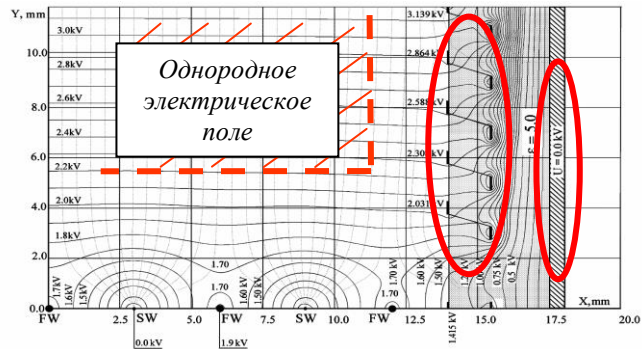


Рис. 5. Новый метод: двойная линия стрипов плюс правильное распределение стриповых потенциалов, и наружные «земли» вам не страшны

метод (Рис. 5), гарантирующий в FTC однородное электрическое поле в условиях близкого расположения других детекторов частиц [3].

3. Обнаружение эффектов каналирования протонов с энергией 1 ГэВ и их фокусировки изогнутыми монокристаллами стало возможным благодаря использованию трековых систем, одна из которых имела предельно высокое пространственное разрешение ($\sigma \leq 50 \mu\text{m}$) – Рис. 6 – [4].

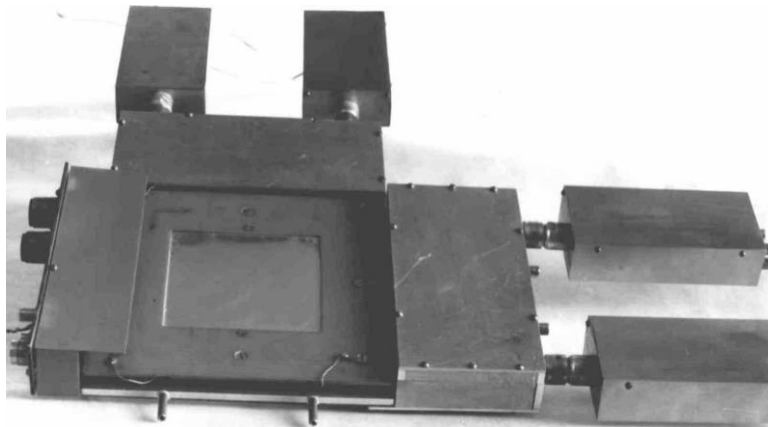


Рис. 6. Часть трековой системы на базе пропорциональных камер с катодным съемом информации

4. Для экспериментальной установки по исследованию мю-захвата в водороде была создана трековая система, состоящая из пропорциональных камер и время-проекционной камеры, работающая в сверхчистом водороде под давлением 10



Рис. 7. Элементы трековой системы. Сборка в PSI.
Слева направо: В.А. Андреев, А.Г. Кривиич, Е.М. Маев

атмосфер – Рис. 7. Полученные в экспериментах результаты вошли в мировую базу данных Particle Data Group.

5. Оригинальные решения и методические находки [5] позволили разработать и создать на базе шести пропорциональных камер координатный детектор низкоэнергичных частиц (МС-детектор), более 10 лет успешно работавший в составе экспериментальной установки HERMES (DESY).

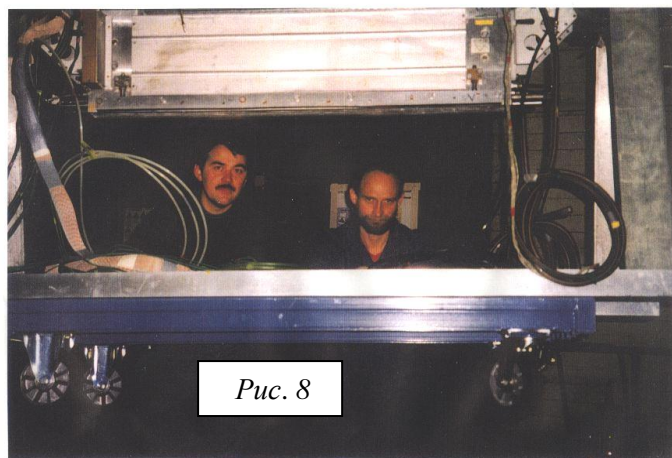


Рис. 8

Монтаж пропорциональных камер (они находятся в верхней части снимка – Рис. 8) внутри большого магнита в экспериментальной установке HERMES.

Слева направо: И.Н. Парченко, А.А. Фетисов.

6. Сотрудники отдела активно участвовали в разработке, изготовлении и тестировании от прототипов до финальной конструкции торцевых детекторов на базе дрейфовых трубок и создания в ПИЯФ участка по изготовлению элементов детектора TRT (ATLAS, Женева). Они же создавали торцевые спектрометры TOTEM – Рис. 9 (CMS, Женева), трековую систему для эксперимента ЭПЕКУР – Рис. 10 (ИТЭФ, Москва), монитор интенсивности пучка OLYMPUS (ДЭЗИ, Гамбург) и многое другое.

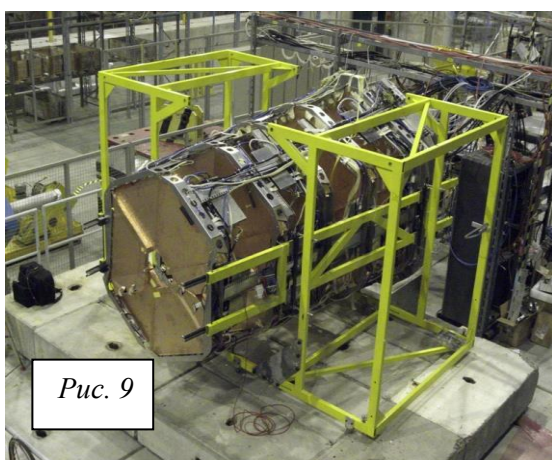


Рис. 9

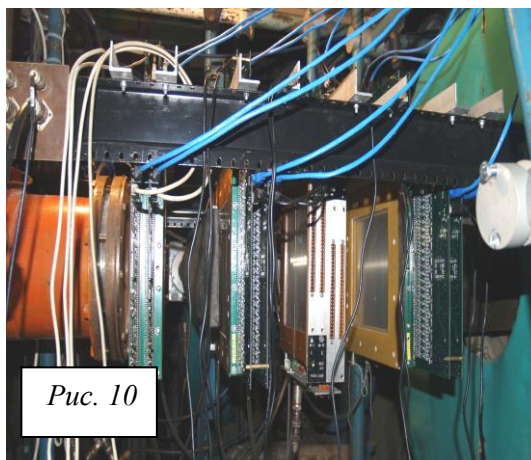


Рис. 10

7. Был проведен широкий комплекс исследований по изучению физических механизмов развития старения газоразрядных детекторов частиц в интенсивных полях излучений. В результате **обнаружены и исследованы новые физические эффекты**, основными из которых являются следующие:

Рис.11а

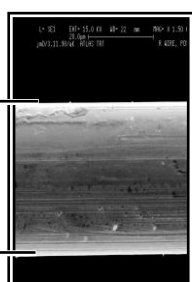
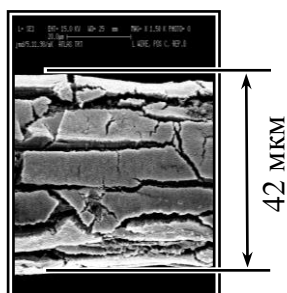


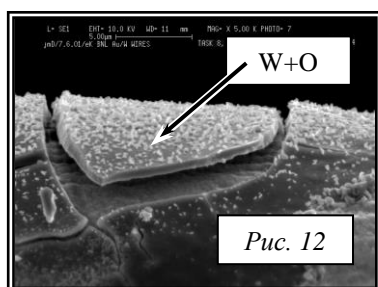
Рис.11б



Впервые в мире обнаружен и исследован новый тип старения, который нами был назван «эффект распухания» анодных проволочек. На Рис. 11а показана поверхность анодной проволочки до облучения, а на Рис. 11б – после облучения. Принципиальным отличием обнаруженного «эффекта распухания» от

ранее известных «полимеризационных» механизмов старения состоит в том, что силы, вызывающие деформацию анодной проволоочки, развиваются внутри проволоочки, разрывая её золотое покрытие изнутри [6].

Показана ключевая роль кислорода в развитии набухания проволоочек. Предложена физическая модель развития явления, в основе которого лежат плазмо-химические процессы образования вольфрамо-кислородных соединений.



Впервые обнаружено и показано, что в ряде случаев процессы, приводящие к набуханию проволоочек, могут идти столь интенсивно, что вольфрамо-кислородные соединения просто «выбрасываются» изнутри проволоочки на ее поверхность и распространяются далеко за пределы зоны облучения – Рис. 12.

Экспериментально обоснованы новые методы исследований, наиболее перспективным из которых является метод ядерных реакций, который оказался очень эффективным инструментом при исследовании механизмов развития процессов старения детекторов частиц. **Впервые** в мировой практике было продемонстрировано [7], что метод ядерных реакций может применяться для количественных измерений распределения легких элементов (кислорода, углерода, азота, фтора), приходящих из газовой лавины на анодную проволоочку. Это позволило изучать распределение этих элементов вдоль поверхности анода, а также проследить динамику движения этих элементов в глубину проволоочки и их обратное движение в составе новых химических соединений на поверхность проволоочки.

Проведены детальные исследования процессов развития старения прототипов «мюонных камер» для установки CMS в ЦЕРН. В результате были выработаны такие решения, реализация которых позволила гарантировать надежную работу гигантского мюонного спектрометра в течении не менее 30 лет в условиях максимальной светимости коллайдера LHC. Эксперименты показали, что применение газовой смеси $40\%Ag + 50\%CO_2 + 10\%CF_4$ позволяет накапливать экстремально высокие дозы облучения – вплоть до 13 Кулон на сантиметр длины анодной проволоочки практически без заметного падения величины коэффициента газового усиления. [8]. Экспериментально было доказано, что ключевую роль в механизме блокирования играет фреон CF_4 . В частности, при его отсутствии в составе газовой смеси, камера выходила полностью из строя уже при накопленной дозе менее 0,1 кулона на 1 см длины анодной проволоочки. Причиной этого явилось интенсивное оседание кремнийсодержащих осадков на анодные проволоочки.

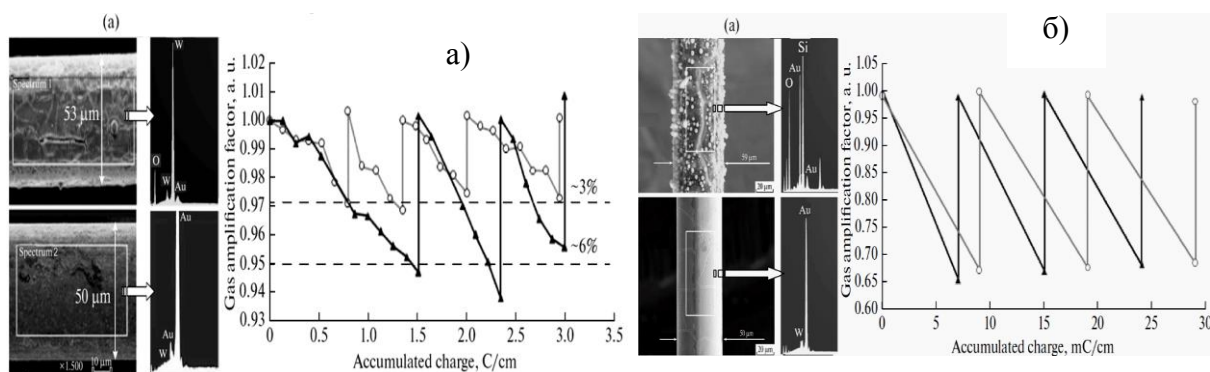


Рис. 13. Восстановление анода. Газовая смесь – $80\%CO_2 + 20\%CF_4$. Подавление эффекта набухания (а). Удаление кремниевых соединений (б)

В ОТД в 2002 г. была создана группа, которая на постоянной основе занимается исследованием ресурсных свойств детекторов частиц. Комплексно исследуются не только процессы старения, но и процессы восстановления качества электродов газоразрядных приборов (анодов и катодов). (Смотри Рис. 13).

8. Сотрудники ОТД совместно с сотрудниками других подразделений ПИЯФ детально изучают свойства шаровой молнии. В научной литературе часто ссылаются на «гатчинский» разряд, вероятность генерации которого близка к 100%, и который похож на шаровую молнию. На снимке (Рис. 14) – один из идеологов шаровой молнии Шабанов Г.Д.



Рис. 14

9. В настоящее время в ОТД (совместно с ОРЭ и ОКСТ) реализуется технология создания трекового детекторов частиц – PAS (2000 каналов), которая базируется на дрейфовых трубках, содержащих экстремально малое количество вещества ($X/X_0 \approx 0,05\%$ на трубку), имеющих большую длину (до 2,4 метра) и работающих в условиях вакуума. Проект получил первый приоритет, и теперь его реализация является **международным** обязательством института. На Рис. 15 – прототип детектора на пучке в ГСИ (Германия).

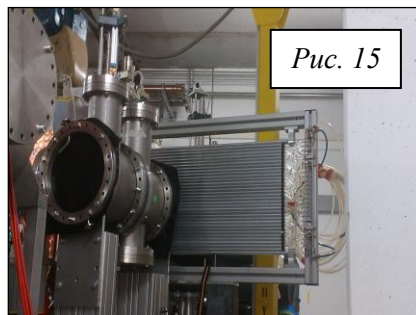


Рис. 15

10. В ОТД велись работы по созданию детекторов нейтронов (ультра-холодных и тепловых) для работы в составе экспериментальных установок имеющегося в ПИЯФ реактора ВВР-М и для строящегося реактора ПИК, а также - за границей России.

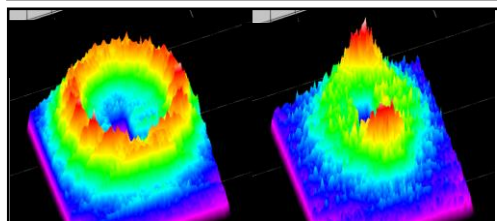


Рис. 16. Детектор тепловых нейтронов 300×300 мм (вверху). Асимметричное рассеяние нейтронов на фторопластовой пленке ДО ее деформации и ПОСЛЕ (внизу)



Рис. 17. Детектор ультрахолодных нейтронов. Диаметр – около 300 мм.
(1) – верхняя часть детектора;
(2) – нижняя часть детектора;
(3) – детектор в сборе

11. В отделе создана и работает экспериментальная установка на основе масс-спектрометра по отбору малогазящих материалов, что особенно важно для нейтронных детекторов (Рис. 18).

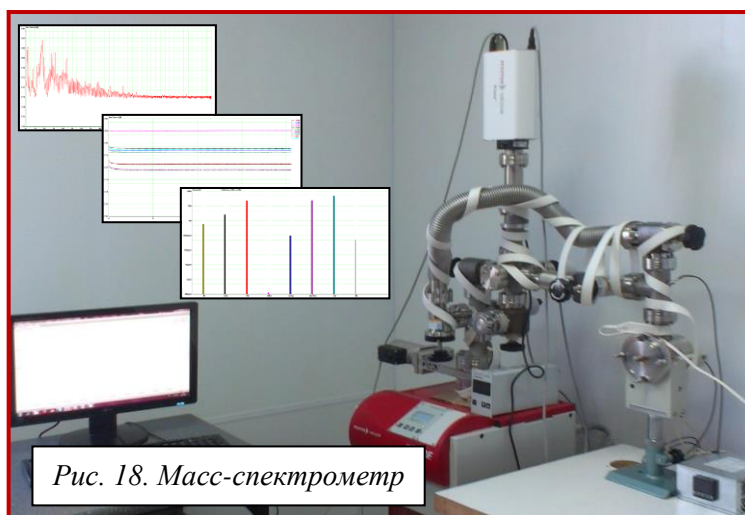


Рис. 18. Масс-спектрометр

Список работ-победителей, инициированных ОТД, на конкурсе «Лучшая работа ПИЯФ» (смотри ниже). Работ с участием сотрудников отдела значительно больше.

Вторая премия, 2002 год (первых премий не было).

Обнаружение нового механизма старения газонаполненных детекторов частиц, работающих при высоких дозах облучения. *Г.Е. Гаврилов, А.И. Егоров, А.Г. Крившич, Е.В. Кузнецова, В.М. Лебедев, Е.А. Лобачев, Л.А. Щипунов.*

Первая премия, 2009 год.

Разработка и создание двухкоординатного детектора тепловых нейтронов. *В.А. Андреев, Г.А. Ганжа, Д.С. Ильин, Е.А. Иванов, С.Н. Коваленко, М.Р. Колхидашвили, А.Г. Крившич, А.В. Надточий, В.В. Рунов, В.А. Соловей, Г.Д. Шабанов.*

Вторая премия, 2015 год.

Новая методика восстановления газоразрядных детекторов после их деградации в высокоинтенсивных радиационных полях.

Г.Е. Гаврилов, А.Г. Крившич, Д.А. Майсузенко, А.А. Фетисов, Н.Ю. Швецова, В.М. Вахтель, R Conti.

Все работавшие и работающие сотрудники ОТД внесли существенный вклад в развитие ОТД. В настоящее время в отделе работают 11 человек. Их фотографии представлены ниже: Агафонова Е.И., Андреев В.А., Иванов В.Ю., Иванов Е.А., Иванова М.М., Крившич А.Г., Майсузенко Д.А., Парченко И.Н., Фетисов А.А., Филимонова Н.Н., Шабанов Г.Д.



Литература.

1. В.А. Андреев, А.А. Воробьев, ..., А.Г. Крившич, В.А. Щегельский, “Детектор переходного излучения электронов в эксперименте по измерению асимметрии в β -распаде поляризованных Σ^- гиперонов”, Препринт ЛИЯФ АН СССР № **1186** (апрель 1986).
2. V. Andreev, G. Gavrilo, A. Krivshich, V. Maleev, A. Nadtochy, S. Patrichev, S. Volkov. “Design principles of the end cap drift chambers in the L3 experiment”. Nucl. Instr. and Meth. A **430** (1999) 245–259.
3. G. Gavrilo, A. Krivshych and M. Jarmarkin. “Influence of external grounded screens on electric field structure in a drift chamber”. Nucl. Instr. and Meth. A **356** (1995) 189–195.
4. В.А. Андреев, В.В. Баублис, Е.А. Дамаскинский, А.Г. Крившич, Л.Г. Кудин, В.В. Марченков, В.Ф. Морозов, В.В. Нелюбин, Е.М. Оришин, Г.Е. Петров, Г.А. Рябов, В.М. Самсонов, Л.Э. Самсонов, Э.М. Спириденков, В.В. Сулимов, О.И. Сумбаев, В.А. Щегельский. “Пространственная фокусировка 1 ГэВ-ных протонов изогнутым монокристаллом”, Письма в ЖЭТФ, **41** (1985) 408.
5. V. Andreev, ..., A. Krivchitch, ..., G.M. Urciuoli, “Multiwire proportional chambers in the HERMES experiment”, Nucl. Instr. and Meth. A **465** (2001) 482–497.
6. T. Ferguson, G. Gavrilo, A. Egorov, A. Krivchitch, E. Kuznetsova, V. Lebedev, L. Shipunov, “Anode wire swelling – a possible phenomenon in the anode wire aging under high accumulated dose”, Nucl. Instr. and Meth. A **483** (2002) 698–712.
7. A.G. Krivchitch and V.M. Lebedev, “Application of nuclear reaction analysis for the fluorine content measurements under the aging investigations of gas-filled particle detectors”, Nucl. Instr. and Meth., **581** (2007) 167–170.
8. T. Ferguson, G. Gavrilo, A. Korytov, A. Krivchitch, E. Kuznetsova, E. Lobachev, G. Mitselmakher and L. Schipunov, “Aging studies of CMS muon chamber prototypes”, Nucl. Instr. and Meth. A **488** (2002) 240–257.

Испытания прототипов мюонных камер CSC

Г.Е. Гаврилов

Одновременно, вместе с разработкой технологии производства модулей мюонных камер CSC, в 1997 году в ОФВЭ были начаты первые ресурсные исследования прототипов этих камер. Сотрудниками ОФВЭ Г.Е. Гавриловым, Л.А. Щипуновым, Е.А. Лобачёвым и, тогда еще студенткой-дипломницей, Е.В. Кузнецовой был создан испытательный стенд, где при помощи β -источника ^{90}Sr с активностью 2 Кюри проводились циклы длительных облучений прототипов мюонных камер. Первые чертежи прототипов и конструкционные материалы были доставлены в ПИЯФ из лаборатории Э. Ферми (США). Прототип мюонной камеры с размерами входного окна $175 \times 200 \text{ мм}^2$ из соображений дешевизны производства был целиком склеен с помощью герметика RTV. В качестве рабочей газовой смеси была выбрана смесь $\text{Ar}(30\%) + \text{CO}_2(50\%) + \text{CF}_4(20\%)$, содержащая значительное количество фреона CF_4 , который, прежде всего, был предназначен для защиты электродов камеры от образований кремния. Уже после набора прототипом дозы в несколько Кулон на сантиметр длины проволоочки (что соответствовало нескольким десятилетиям работы в условиях ЛНС) стало ясно, что высокое содержание фреона в газовой смеси себя оправдывает: амплитуда сигналов с анодных проволоочек оставалась неизменной. Но, вместе с тем, в десятки раз вырос темновой ток, по-видимому, из-за кремниевых образований на катодах.

Продолжение облучения прототипа до 12 Кл/см и последующее его вскрытие подтвердили эти предположения. На сделанных с помощью сканирующего микроскопа снимках поверхности катода после вскрытия прототипа было хорошо видно, насколько более рыхлой выглядит медная фольга после образования на ней осадков кремния. Необходимо отметить, что первый тест проводился при высокой скорости сменяемости газа – 75 объёмов в день или скорости продува $15 \text{ см}^3/\text{мин}$, что совпадало с потоком газа в реальной полномасштабной камере.

На основании полученных результатов конструкцию камер CSC было решено оптимизировать. Прежде всего было решено отказаться от склеивания деталей конструкции герметиком. Камеру стали собирать из двух склеенных эпоксидной смолой половин и только снаружи сборки стыковочный шов уплотняли RTV. Во-вторых, количество дорогостоящего фреона CF_4 было уменьшено в два раза – до 10%.

Второй цикл облучения прототипа CSC, изготовленного по скорректированной технологии, был выполнен с газовой смесью $\text{Ar}(40\%) + \text{CO}_2(50\%) + \text{CF}_4(10\%)$. При этом сменяемость газа в рабочем объеме, как и в реальных камерах, составила 1 объем за день. После длительного теста была накоплена доза 13,4 Кл/см. Амплитуда сигналов в конце облучения осталась стабильной. Удаление при производстве содержащего кремний герметика из рабочего объема привело к тому, что к концу эксперимента темновой ток в прототипе при рабочем напряжении вырос всего на несколько наноампер.

Таким образом, в ОФВЭ ПИЯФ был успешно выполнен первый экспериментальный этап оптимизации конструкции мюонных камер CSC. Дальнейшие исследования, в которых приняла участие и наша группа сотрудников, проводились в 1998–2001 годы на облучательной гамма-установке GIF в ЦЕРН.

Начиная с 2015 года, ресурсные исследования мюонных камер CSC возобновились. Сегодня они ведутся параллельно в Отделе мюонных камер ОФВЭ и на установке GIF++ в ЦЕРН. Главной мотивацией дополнительных ресурсных исследований CSC является запланированное в середине 2020-х годов увеличение светимости пучка LHC с $7 \times 10^{33} \text{ сек}^{-1}\text{см}^{-2}$ (2012 г.) до $5 \times 10^{34} \text{ сек}^{-1}\text{см}^{-2}$ при энергии 14 ТэВ (режим HL-LHC – High Luminosity Large Hadron Collider). С переходом в режим HL-LHC комплекс LHC станет «фабрикой бозонов Хиггса», что отвечает основной задаче LHC – развитию фундаментальных исследований материи и поискам «новой физики». Поэтому для успешной работы эксперимента CMS в новых условиях, когда ток в CSC от пучка LHC вырастет в 5 раз, необходимо быть уверенным, что мюонные камеры полностью сохранят свою работоспособность на всю длительность работы в режиме HL-LHC. Ресурс радиационной стойкости камер CSC поэтому должен быть на уровне аккумулялированного заряда $0,6 \text{ Кл}\cdot\text{см}^{-1}$ и выше.

Сегодня новой проблемой для CSC в CMS является то обстоятельство, что выбросы в атмосферу рабочей газовой смеси из-за CF_4 , входящего в её состав, являются значительным источником загрязнения и попадают под действие международных соглашений по экологии, ограничивающих выбросы парниковых газов. Система газового снабжения камер CSC обеспечивает смену рабочей газовой смеси в мюонном трекаре со скоростью два полных объёма ($2 \times 90 \text{ м}^3$) в сутки. При этом для минимизации расхода газовой смеси и уменьшения её экологического воздействия на среду система снабжения организована по схеме 90%-й рециркуляции. Однако даже последующая 80% регенерация CF_4 из смеси, удаляемой из газовой системы приводит к тому, что за день в атмосферу поступает около $0,4 \text{ м}^3$ фреона. Таким образом, эквивалентом суточного выброса CF_4 для камер CSC является около 12 тонн углекислого газа, а годовой выброс составляет ~4380 тонн.

Поиски замены фреона CF_4 в рабочей газовой смеси или возможности уменьшения его выбросов сегодня ведутся интенсивно и в ОМК ОФВЭ и в других лабораториях в мире, но это уже другая история.

Газовые системы для газоразрядных детекторов, разработанные, созданные и создаваемые в ЛКСТ

Л.М. Коченда

Лаборатория криогенной и сверхпроводящей техники (ЛКСТ) была образована в 1975 году. Первым руководителем ЛКСТ был Н.Н. Чернов. С 2012 г. руководителем ЛКСТ является А.А. Васильев. Сотрудники ЛКСТ активно участвовали в создании водородно-дейтериевой пузырьковой камеры, ионизационного спектрометра ИКАР, установки для исследования мюонного катализа реакций ядерного синтеза, установки для измерения скорости захвата мюона водородом и принимали участие в проведении ряда экспериментов.

Одним из направлений деятельности Лаборатории криогенной и сверхпроводящей техники является проектирование, монтаж, отладка и ввод в эксплуатацию рециркуляционных газовых систем для различных детекторов, как в ПИЯФ, так и в других институтах, и даже за пределами России. Поскольку я являюсь родоначальником этого направления в лаборатории, постараюсь изложить в деталях, как все начиналось, развивалось и продолжает развиваться дальше.

Итак, толчком к появления этого направления явился эксперимент L3 (LEP, CERN). В начале 90-х годов в ПИЯФ А.Г. Крившич должен был изготовить детектор FTC (Forward Tracking Chamber) для этого эксперимента. Для тестирования детектора нужна была газовая система. Поступило предложение о создании такой системы в ЛКСТ. Задача была практически новой для нас, но причины отказываться не было. Пришлось познакомиться с разработками на стороне, в частности, в CERN и других научных центрах.

Решено было разработать автоматизированную систему обеспечения детектора бинарными смесями. Такая система была разработана. Это была установка динамического смешения компонент. Нужно было приступить к монтажу. К сожалению, это было не так просто. Основная проблема – это комплектация. Многое пришлось разрабатывать и делать в мастерских ЛКСТ и ПИЯФ. Установка была успешно смонтирована и испытана. В 1992 году был опубликован препринт ПИЯФ [1], где дано подробное описание системы и результаты ее испытаний. Полученные данные и накопленный опыт дали возможность получить проект создания газовой системы в эксперименте STAR (Brookhaven National Laboratory, USA), но об этом позже.

В конце 1992 года я был командирован на полгода в Фермилаб (Fermilab, USA), где продолжил заниматься вопросами газовых систем и утилизации редких газов, таких как ксенон в эксперименте E781. В данном эксперименте был использован большой (40 м^3) RICH детектор, в котором должен был использоваться чистый неон. Возникла проблема: как удалить из детектора воздух, не используя вакуумную откачку, и заполнить его неоном, а после эксперимента неон утилизировать. Эта проблема была успешно решена. Я сделал проект такой системы, которая была реализована американской стороной и успешно использована. Проект системы был опубликован в препринте ПИЯФ [2] в 1993 году.

Успешно была решена и проблема утилизации ксенона из смеси (ксенон + 30% метана), выходящей из TRD (Transition Radiation Detector) детектора эксперимента E781 с объемным расходом $30 \text{ см}^3/\text{мин}$. В ПИЯФ был разработан и изготовлен 2х-ступенчатый криостат и газовая система для очистки собранного ксенона. В первой ступени криостата при температуре 163 К происходило ожижение ксенона, а во второй ступени он вымораживался при температуре 113 К, а газообразный метан удалялся в атмосферу. Количество накапливаемого в криостате ксенона оценивалось по массе вымороженного газа. Анализ собранного и очищенного ксенона показал, что содержание метана в нем было на уровне

100 ppm (0,01 %), а кислорода и воды на уровне 20 ppm. Таким образом, он мог быть использован повторно. Всего было утилизировано порядка 3 м³ ксенона. Если учесть, что стоимость последнего в то время была около \$12 за литр газообразного ксенона, то легко оценить экономию.

В начале 1994 года В.М. Самсонов предложил мне выступить на коллаборационном совещании по эксперименту STAR в МИФИ с предложением создания газовой системы для TPC (Time Projection Chamber). Такое предложение было сделано, и оно очень заинтересовало американскую сторону. Ответственным за создание TPC был Howard Wieman. После совещания он предложил мне разработать и сделать газовую систему для TPC объемом 50 м³. Он отметил, что данные в моем предложении его впечатлили и это то, что ему нужно. А ведь это те данные, которые мы получили при испытании нашей первой автоматизированной газовой системы динамического смешения. И уже в конце 1994 года я был приглашен на 3 месяца в Lawrence Berkeley Laboratory (LBL, USA), где начинались работы по сборке STAR TPC, чтобы разработать и защитить проект газовой системы. Все было сделано в срок. За основу была взята рециркуляционная газовая система с динамическим приготовлением смеси P10 (аргон + 10% метана), предлагавшаяся Давидом Пичем (David Peach) для мюонных камер в L3. Подробно описание нашей газовой системы изложено в публикациях [3, 4]. Реализация проекта началась сразу после его защиты и одобрения. Частично элементы газовой системы были сделаны в ПИЯФ. Это были блоки очистки от кислорода и осушки от влаги, лицевые панели, регуляторы низкого давления и жидкостной ограничитель давления (барбулятор), цифровой барометр (разработан С.М. Козловым и П.А. Кравцовым) [5], система аварийной блокировки (разработана В.А. Трофимовым) [6, 7], электроника (С.М. Козлов) и программное обеспечение (П.А. Кравцов) для управления установкой [8, 9]. В работе над газовой системой принимал участие весь коллектив ЛКСТ.

Особого внимания заслуживает блок очистки от кислорода, разработанный в лаборатории А.А. Марковым. В нем использован хромоникелевый катализатор, нанесенный на силикагель. В присутствии метана и кислорода в блоке при температуре 220°C образуется метиловый спирт, который впоследствии удаляется блоком осушки. Блок очистки практически не требует регенерации. Содержание кислорода после блока было на уровне 3–4 ppm.



*Газовая система STAR TPC, собранная и испытанная в LBL, США (1997 г.).
Слева направо: П.А. Кравцов, Л.М. Коченда, В.М. Чиков, В.А. Трофимов, С.М. Козлов*

Монтаж газовой системы проводился в LBL сотрудниками ЛКСТ в механических мастерских LBL, которые возглавлял наш бывший соотечественник Воронин Дмитрий Николаевич. Так что проблем с механическим монтажом не было. А вот с электрическим монтажом проблемы были. Ведь нужного опыта работы за рубежом у наших сотрудников на тот момент не было. Мы не знали, что в США все, что тебе нужно для работы, можно заказать, и в течение 24-х часов это поставляется. Доходило до смешного, провода для электромонтажа добывались на свалке LBL (property reuse center). Поэтому коммутационная панель была сделана без предварительной проработки и выглядела очень сомнительно – это был клубок проводов на двух десятках разъемов. Несмотря на это, система заработала. После переезда в BNL эта панель была переделана в виде печатной платы с несколькими разъемами, без промежуточных проводов.

С другой стороны, некоторые приборы и устройства, приобретенные для газовой системы в США, пришлось дорабатывать, поскольку они не обеспечивали необходимой герметичности и надежности. У анализатора метана, купленного американскими коллегами, обнаружилась температурная нестабильность (несмотря на гарантии производителя). Даже покупка и установка специального дополнительного устройства для стабилизации температуры не улучшила ситуацию. В итоге были куплены анализаторы другого производителя.

После сборки и наладки система была перевезена в BNL. Вот уже более 20 лет, с 1998 года, газовая система STAR TPC успешно эксплуатируется. Так что первый блин не всегда бывает комом. При работе над газовой системой STAR TPC сформировалась команда (Л.М. Коченда, П.А. Кравцов, В.А. Трофимов), силами которой, с привлечением других сотрудников ЛКСТ, создавались последующие газовые системы.



Газовая система STAR TPC после запуска в BNL, вместе с автором (2000 г.)

В эксперименте STAR нами была создана еще одна рециркуляционная система: для детектора TOF (Time of Flight), в котором планировалось использовать тройную смесь (фреон 134 + 4% изобутан + 1% элегаз). Хотя система и была создана для производства такой смеси, в действительности она используется для производства и рециркуляции бинарной смеси (фреон 134 + 4% изобутана). Использование сильно электроотрицательного элегаза было запрещено, поскольку он мог случайно попасть в TPC и сделать ее неработоспособной.



*Газовые системы эксперимента PHENIX.
Брукхейвенская Национальная Лаборатория, 2000 г.
Слева направо: П.А. Кравцов, В.А. Трофимов, Л.М. Коченда*

В 1994 году по просьбе В.М. Самсонова началась работа и по проектированию газовой системы для дрейфовой камеры (DC) эксперимента PHENIX (Brookhaven National Laboratory, USA). Эта камера как раз делалась в ПИЯФ его лабораторией. А в 1996 году поступило предложение разработать и изготовить газовую систему для пропорциональной камеры (Proportional Chamber, PC) в этом же эксперименте, которую делал Edward O'Brien в BNL. Затем стали поступать предложения о создании газовых систем практически для всех детекторов эксперимента PHENIX. Только RICH детектор не использовал нашу разработку. Работы по проектированию и монтажу систем проводились главным образом в BNL. Отдельные компоненты, в основном блоки очистки, системы аварийной блокировки, а также программное обеспечение, разрабатывались в ПИЯФ. Все системы были рециркуляционные. Для проведения электромонтажа был приглашен сотрудник из Биофизприбора Третьяков Геннадий Васильевич, который показал мастер-класс, как нужно выполнять такую работу. Американские коллеги из STAR, когда увидели результаты его работы, предложили ему то же самое сделать на газовой системе STAR TPC. И это впоследствии было сделано под его руководством. По газовым системам эксперимента PHENIX был опубликованы ряд работ [7, 9–13]. Всего в эксперименте PHENIX нашей группой было создано 7 газовых систем. В это же время, в ходе работы над газовыми системами PHENIX в BNL, нами была сделана газовая система для тестирования детекторов ATLAS CSC, которые создавались в BNL с участием наших коллег из ПИЯФ.

В 2008 году нас пригласили разработать и сделать газовую систему для прототипа детектора RICH в эксперименте CBM, Дармштадт, Германия. Такая система была создана и успешно эксплуатировалась при испытании прототипа RICH детектора в CERN в 2010–2011 годах. Результаты работы по данной газовой системе изложены в [14–17]. С учетом

полученных результатов, нам было предложено разработать и создать газовые системы детекторов RICH и MUCH в эксперименте CBM, а также для детектора PAS в эксперименте R3B. На данном этапе в ЛКСТ ведется активная работа над этими системами.



Л.М. Коченда у газовой системы для прототипа RICH CBM в Университете Гиссен, Германия (2011 г.)

Если говорить о газовых системах для экспериментов в России, то стоит отметить разработку и монтаж рециркуляционной газовой системы для ТРС объемом 18 м^3 в эксперименте MPD на коллайдере NICA, Дубна. В этой системе впервые нами была применена двухконтурная схема циркуляции газовой смеси. В малом контуре газ циркулирует с большим расходом (200 л/мин) вблизи детектора, обеспечивая требуемую однородность смеси в детекторе, а также очистку от примесей. В большом контуре расход существенно меньше (20 л/мин). Он служит для стабилизации давления в детекторе, измерения параметров газовой смеси и дополнительной очистки от примесей. На данный момент система закончена, испытана и передана заказчику. Результаты работы будут в ближайшее время опубликованы.

Для производителей детекторов в ПИЯФ мы также разрабатываем и производим различные газовые системы. К примеру, система очистки CO_2 [18] и система утилизации ^3He из смеси $\text{CF}_4 + ^3\text{He}$ для А.Г. Крившича. Новым опытом для нас стала газовая система для получения смеси ($\text{CO}_2 + 45\% \text{ n-пентан}$) для тестирования детекторов ATLAS sTGC в лаборатории О.Л. Федина. Впервые нам пришлось разрабатывать систему для поддержания стабильной концентрации горючей жидкости в газе.

Таким образом, подводя итог изложенному, можно сказать, что ЛКСТ занимает достойное место по проектированию и созданию различных газовых систем в ПИЯФ и вне его.

Список цитированной литературы

1. Л.М. Коченда и др., Препринт ЛИЯФ–**1768**, Гатчина (1992), 55 с.
2. L.M.Kotchenda, R.L.Schmitt, Preprint PNPI–**1888**, Gatchina (1993), 9 p.
3. L.M. Kotchenda *et al.*, Preprint PNPI–**2219**, Gatchina (1998), 22 p.
4. L. Kotchenda *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **499**, 703 (2003).
5. S. Kozlov *et al.*, Instruments and Experimental Techniques **43**, № 3 (2000).
6. L. Kotchenda *et al.*, Instruments and Experimental Techniques **43**, № 4 (2000).
7. L. Kotchenda *et al.*, Preprint PNPI–**2374**, Gatchina (2000), 13 p.
8. P. Kravtsov *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **499**, 792 (2003).
9. P. Kravtsov., Preprint PNPI–**2593**, Gatchina (2005), 19 p.
10. L. Kotchenda *et al.*, *Gas systems of PHENIX central tracking detectors*. PNPI Annual Report 1999.
11. L. Kotchenda *et al.*, Preprint PNPI–**2594**, Gatchina (2005), 14 p.
12. L. Kochenda *et al.*, Preprint PNPI–**2712**, Gatchina (2007), 16 p.
13. L. Kotchenda *et al.*, NIM A **578**, 172 (2007).
14. L. Kochenda *et al.*, *A gas system for the CBM–RICH prototype*. CBM Progress report 2010, Darmstadt 2010, p. 31.
15. P. Kravtsov *et al.*, *A slow-control system for the CBM–RICH gas system*. CBM Progress report 2010, Darmstadt 2010, p. 32.
16. L. Kochenda *et al.*, *Beamtest results of the RICH Prototype Gas System*. CBM Progress report 2011, Darmstadt 2011, p. 40.
17. L. Kochenda *et al.*, *The test run results of the RICH Prototype Gas System*. CBM Progress report 2012, Darmstadt 2012, p. 36.
18. L. Kotchenda *et al.*, Preprint PNPI–**2716**, Gatchina (2007).

Историческое эссе на тему компьютерная инфраструктура ОФВЭ

А.Е. Шевель

(Дата составления: 6 ноября 2014, представлена руководству ОФВЭ)

(Коррекция: 28 декабря 2018; 20 января 2020; 15 марта 2021)

Шевель А.Е. (Shevel_AYE@pnpri.nrcki.ru)

В физике высоких энергий вся компьютерная инфраструктура завязана на природу экспериментов в данной области, которая определяется поиском редких и очень редких событий на фоне огромного количества фоновых взаимодействий микрочастиц материального мира. Собственно из этого посыла возникает необходимость в больших объёмах данных, которые следует запоминать, передавать и обрабатывать. Раз большие объёмы данных, то требуются высокие скорости передачи данных и большие скорости компьютеров, чтобы обработать эти данные. Из такого рода физических экспериментов и выросло представление о «больших данных» (Big Data). Большими признаются данные, которые выходят за рамки общепринятых размеров и характеризуются в основном тремя свойствами:

- скоростью поступления (имеется в виду очень большой);
- объёмом (имеется в виду очень большой);
- сложной структурой данных, определяемой сложностью окружающего нас мира.

Нетрудно видеть, что все эти свойства данных определяются тем временем (годом), когда свойства эти обсуждаются¹. Так, некоторое время назад ёмкость дисковой памяти 1 ТВ казалась запредельной, а пара сотен процессоров в компьютерных кластерах считалось рекордом. Но времена меняются и системы хранения данных в 1000 РВ не являются уникальными, а число процессоров в кластере может превышать сто тысяч. Одновременно с ростом объёма и сложностью измерительных данных стало совершенно очевидным, что требуется много людей, которые могут разобраться в этих данных и на основе измерений способны понять фундаментальные свойства материи. В то же время обнаружилось, что такие люди работают (и живут) в совершенно разных частях мира, что привело к идее некоторой компьютеризированной структуры, которая помогала бы организовать распределённый коллектив исследователей, инженеров, конструкторов, так чтобы достичь синергетического эффекта в больших исследовательских коллективах (коллорациях). Так появились

¹ Легко себе представить, что набор текстов, который в начале нашей эры составил библию, рассматривался людьми того времени как «большие данные».

системы типа Grid и системы общения для проведения удалённых совещаний, семинаров, проч. Всё уже упомянутое делает очевидным тот факт, что компьютерная инфраструктура в настоящее время является не просто вычислительным инструментом, а средой общения людей. Иногда прямого общения, например, через скайп, или опосредованного через использование программных систем различных видов (Grid и подобные системы). В реалиях ядерно-физических лабораторий можно только удивляться тому, что от такого небольшого процента затрат (на компьютерную инфраструктуру) зависит столь много в конечном результате, т. е. в научном продукте.

Как и в остальном мире, примерно те же стадии преобразования компьютерной инфраструктуры происходили в ОФВЭ, с естественным временным отставанием от ведущих физических лабораторий мира примерно на 10–20 лет. Тем не менее, техника (железо) и методы её использования изменялись довольно быстро, даже в самые неблагоприятные времена. Естественно, что с упрощением обмена информацией (Интернет) процессы освоения новых методов использования компьютерной инфраструктуры значительно ускорились. В целом, значение и влияние той или иной научной организации по сравнению с подобными легко оценить по исходящему и входящему сетевому трафику организации. А сам факт наличия хорошей по современным понятиям внешней коннективности многое говорит о претензиях такой научной лаборатории.

Исторический обзор развития имеет большую ценность в отношении прояснения контуров будущего. Однако многие детали стираются или подвержены временной коррозии. Посему мне кажется верным отметить только основные точки в развитии компьютерной инфраструктуры ОФВЭ, которые имеются в каком-то виде на странице

http://hepd.pnpi.spb.ru/CSD/CSD_SupportedProjects.shtml.

Обратим внимание, что в ОФВЭ наш отдел вычислительных систем (ОВС) занимался в основном важными нововведениями в ПИЯФ. Значительная часть внедрённых в ОФВЭ технологий разошлась по Институту, часть была сознательно передана для поддержки и развития в другие подразделения ПИЯФ.

Итак, основные моменты развития инфраструктуры ОФВЭ (в обратном порядке):

- 2021 – введён в строй первый вариант JupyterNUb;
- 2017 – введено в строй облачное хранилище ОФВЭ;
- 2010 г. – разработан и введён в строй полностью виртуализированный компьютерный кластер ОФВЭ;

- 2009 г. –
 - разработана и введена в строй первая в ПИЯФ централизованная в масштабе ОФВЭ сеть WiFi;
 - введена в строй первая в ПИЯФ система видео-конференц связи;
- 2000 г. – испытан первый в ПИЯФ и один из самых первых в РФ сегмент сети Grid;
- 1998 г. – запущен первый в ПИЯФ и один из первых в РФ вычислительный кластер под ОС Линукс с системой управления пакетными заданиями CODINE;
- 1995 г. –
 - запущен первый в ПИЯФ и один из первых в РФ спутниковый канал в Интернет (через DESY) ёмкостью 64 Kbit (работал до 2002 г.);
 - запущен первый в ПИЯФ и один из первых в РФ http (вэб) сервер;
- 1994 г. –
 - запущена модемная линия 14 Kbit в Интернет (через ИТЭФ) – работала до 1995 г.;
 - запущена первая в ПИЯФ 6-процессорная машина SGI-3000 под ОС Unix (получена из DESY);
- 1993 г. –
 - в корпусе 7 развёрнута первая в ПИЯФ сеть Ethernet;
 - демонтированы машины ЕС-1046;
 - разработан и запущен общедоступный сервис электронной почты на базе на Интел 386 под ОС XENIX (впервые в ПИЯФ такого рода сервис);
- 1988 г. – введён в эксплуатацию комплекс из двух машин ЕС-1046 с общим дисковым полем, с общим числом терминалов для пользователей свыше 100 по всему Институту (впервые в ПИЯФ машины такой мощности);
- 1983 г. – введена в эксплуатацию системы из трёх ЭВМ (2-х ЕС-1030 и СМ-4 как терминальный контроллер) под управлением системы управления пакетными заданиями, около 30 терминалов для пользователей по корпусу 2 (впервые в ПИЯФ система такого типа);
- 1977 г. – две машины ЕС-1030 введены в эксплуатацию (впервые в ПИЯФ

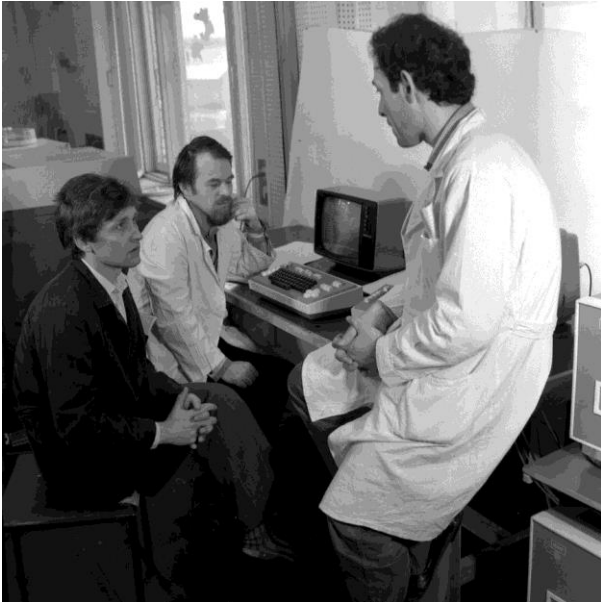
такого типа комплекс);

- 1973 г. – одна машина ЕС-1020 введена в эксплуатацию (впервые в ПИЯФ машина такого типа).

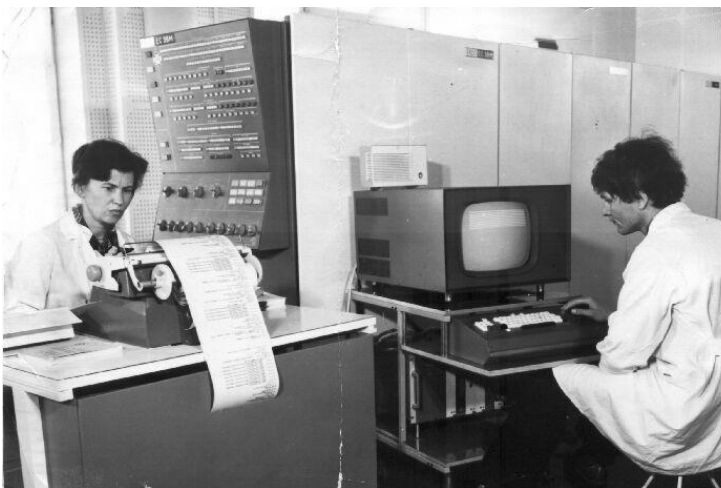
Нет нужды говорить, что многие диссертации ОФВЭ были написаны с использованием вычислительной инфраструктуры ОФВЭ.



Сотрудники Отдела вычислительных систем: А.Е. Шевель – с.н.с., руководитель отдела, А.Н. Лодкин – вед. инж.-программист (отвечал за планирование архитектуры и приобретение оборудования для формирования централизованных компьютерных ресурсов ОФВЭ), Т.С. Сереброва – вед. инж.-программист, отвечает за регистрацию пользователей на централизованных компьютерных ресурсах ОФВЭ и консультации, В.В. Леонтьев – вед. инж.-электроник (отвечал за реализацию и поддержку сетевой инфраструктуры ОФВЭ), А.А. Орешкин – вед. инж.-программист, отвечает за разработку архитектуры, настройку и поддержку системного программного обеспечения на централизованных компьютерных ресурсах ОФВЭ (фото 2003 г.)



Обсуждение проблем коммуникаций между измерительными залами и большими вычислительными машинами. Рабочий момент обсуждения в машинном зале в пристройке ОРЭ корпуса 2 (около 1984 г.), слева направо: А.Е. Шевель (руководитель группы), Н.А. Серёгин (старший инженер-электроник), А.А. Орешкин (старший инженер-программист). Виден терминал: такого размера были клавиатуры и мониторы. На этом мониторе отображались только буквы и цифры, никакой графики.



Рабочий момент в машинном зале ЕС-1020. (фото примерно 1974 г.) Большое число светлых шкафов – это вычислительная машина ЕС-1020. Оперативная память 64 КилоБайта. Суммарный вес шкафов составлял около 2 тонн. Показанный графический терминал был разработан и произведён в ПИЯФ. На терминале стоит громкоговоритель, посредством которого производился аудио контакт с измерительными залами корпуса 2. Разработчик терминала П.В. Неустроев (старший инженер-электроник) – его нет в кадре. На снимке И.И. Грачёва (инженер-программист), справа А.Е. Шевель (стажёр-исследователь).



Закрытие машинного комплекса в составе двух ЕС-1046, который использовался для хранения и обработки измерительных данных из экспериментов на синхроциклотроне. На фото показан начальный этап демонтажа компьютерного оборудования в пристройке ОРЭ корпуса 2. Справа видно, что часть фальшпола уже вскрыта. Фото датируется январём 1993 г. Слева направо в дальнем ряду: В.В. Леонтьев (ведущий инженер-электроник), Т.В. Волкова (инженер программист), В.В. Голубев (старший механик), З.Н. Кудряшова (старший инженер-электроник), В.А. Бусикова (старший оператор), Т.М. Кисатаева (старший инженер), Т.С. Сереброва (ведущий инженер-программист), Н.М. Степанова (начальник смены), В.А. Лупанов, во втором ряду: Н.А. Серёгин (начальник группы обслуживания ЭВМ), А.А. Орешкин (ведущий инженер-программист), А.Е. Шевель (начальник отдела), В.А. Сушков (механик), ... Смирнов, Н.К. Терентьев (физик, один из пользователей этой ЭВМ), В первом ряду: Е.Б. Булкина (оператор), А.Н. Лодкин (ведущий инженер-программист). Все лица в кадре, кроме Терентьева, обеспечивали весь год круглосуточную работу вычислительного комплекса, а также разработки программ и аппаратных компонентов для увеличения эффективности использования комплекса.





Семинар отдела вычислительных систем, посвящённый запуску спутникового канала ёмкостью 64 Кбит в Интернет (обе фотографии, показывающие один и тот же зал с разных ракурсов, датированы октябрём 1995 г.). Спутниковый канал в Интернет был реализован с помощью средств гранта международного фонда INTAS. В институт поступило спутниковое оборудование Российского производства, для связи использовался Российский спутник. Фонд INTAS оплатил изготовление всего необходимого оборудования и сервиса на Российских предприятиях. По числу участников семинара видно, что интерес к новым возможностям коммуникаций был огромен. Менеджером проекта был назначен А.Е. Шевель. Место проведения семинара: конференц зал корпуса 7. Докладчик А.Е. Шевель (начальник отдела вычислительных систем).

Некоторые этапы создания медицинского протонного комплекса на СЦ-1000 ПИЯФ НИЦ «Курчатовский институт»

Карлин Д.Л.

Институты ПИЯФ (бывший ЛИЯФ, филиал ФТИ) и РНЦРХТ (бывший ЦНИРРИ) связывают одни корни: в 1918 г., лишь несколько месяцев спустя после Октябрьской революции 1917 г., был создан Государственный Рентгенологический и Радиологический институт (постановление подписано А.В. Луначарским). Инициаторами создания института были ученик В.К. Рентгена профессор А.Ф. Иоффе и профессор Женского медицинского института М.И. Немёнов.

Из состава этого института впоследствии выделились ФТИ – директор А.Ф. Иоффе, Радиевый институт – директор В.И. Вернадский и собственно Государственный Рентгенологический и Радиологический институт – директор М.И. Немёнов.

Позже в ФТИ образовался филиал в Гатчине, который потом стал самостоятельным институтом ЛИЯФ (теперь ПИЯФ), а Государственный Рентгенологический и Радиологический институт получил название Центральный научно-исследовательский рентгенорадиологический институт (ЦНИРРИ), который в дальнейшем был переименован в Российский научный центр радиологии и хирургических технологий (РНЦРХТ).

Единые корни и понимание государственных задач позволили развить научное сотрудничество между институтами в области прикладных наук:

- лучевая терапия,
- получение радиофармпрепаратов.

В январе 1973 г. с целью лучевой терапии был создан Медицинский протонный комплекс (МПК) синхроциклотрона ПИЯФ – третий в СССР и шестой в мире. Лечение больных начато 17 апреля 1975 г.

ЭТАПЫ СТАНОВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ПРОТОННОЙ ТЕРАПИИ В ПИЯФ

1960 г. – Постановление Совмина СССР № 986 от 08.09.1960 г. о создании при ФТИ подразделения ЦНИРРИ для проведения исследований возможности применения синхроциклотрона в медицине.

1961–1966 гг. – Проектные работы, строительство зала облучения и лабораторной пристройки. Последняя была принята в эксплуатацию в августе **1966 г.**

В **1963 г.** – 7 сентября по договоренности Минздрав СССР (зам. министра П. Гусенков) передает, а АН СССР (уполномоченный Президиума АН по строительству К. Чернопятов) принимает капитальные вложения на строительство медико-биологического корпуса «МБ». Общий объем капиталовложений 720 тыс. руб. (Госплан СССР. Госстрой СССР № 02-2/648 от 7 сентября 1963г.).

Для выполнения Постановления ГК СССР по науке и технике № 102 от **19.04.1966** «Исследовать возможности применения протонов высоких энергий в медицине на базе 1000 МэВ синхроциклотрона в Гатчине» (предполагалось использовать протоны с энергией 200 МэВ) решением Ученого Совета ЦНИРРИ был создан медико-биологический отдел.

1967–1973 гг. – Изготовление нестандартного оборудования для формирования и измерения параметров пучка протонов, разработка метода облучения. После ввода в эксплуатацию синхроциклотрона в ноябре 1970 г. выяснилось, что интенсивности выведенного пучка протонов не хватает для получения пучка протонов с энергией 200 МэВ, чтобы использовать метод остановок – метод пика Брегга.

Профессор А.А. Воробьев предложил провести исследования на пучке протонов с энергией 1000 МэВ в экспериментальном зале синхроциклотрона. В ноябре **1971 г.** исследования были начаты. Они позволили сделать вывод

о целесообразности развития работы по применению пучка такой энергии для клинических целей.

В январе **1973 г.** был создан МПК с установкой для протонной стереотаксической терапии (УПСТ) первого поколения. 13–15 января в зал облучения МПК был выведен пучок с энергией 1000 МэВ.

. В ЦНИРРИ было организовано отделение протонной терапии (ОПТ) (руководитель Б.А. Коннов). Блок протонной терапии МПК был принят в эксплуатацию 23 ноября 1973 г. Были исследованы основные дозиметрические и радиобиологические характеристики пучка протонов с энергией 1000 МэВ, разработано дозиметрическое и радиобиологическое обоснование возможности применения пучка протонов с энергией 1000 МэВ. Осуществлена апробация метода и были изготовлены технические средства протонной «гипофизэктомии» в экспериментах на собаках.

1974 г. – 13 ноября Ученым Советом ЦНИРРИ было принято решение о возможности использования созданного оборудования, технологий и сформированного пучка протонов с энергией 1000 МэВ для лучевой терапии больных опухолевыми заболеваниями гипофиза и головного мозга, о чем было поставлено в известность Минздрав СССР.

1975 г. – 17 апреля была проведена первая протонная «гипофизэктомия» у больной генерализованной формой рака молочной железы. С июня 1975 г. было начато регулярное применение протонной терапии.

1976 г. – Начато лечение больных с аденомами гипофиза;

1977 г. – Создан клинический стационар отделения протонной терапии в ЦНИРРИ.

1978 г. – Впервые в СССР начата протонная стереотаксическая терапия неоперабельных артериовенозных мальформаций головного мозга, начато лечение больных с эндокринной офтальмопатией и диабетической ангиоретинопатией.

Постановлением ГК СМ СССР по науке и технике от 19. 09.78 г. № 16-11/152 ЛИЯФ им. Б.П. Константинова был включен в число

исполнителей для проведения работ по науке и технической проблеме 0.69.02 (Разработка методов и средств диагностики, лечения и профилактики злокачественных новообразований).

1980 г. – Модифицирован медицинский протонный тракт; упрощена схема проводки пучка протонов; улучшены параметры пучка (Н.К. Абросимовым с сотрудниками Ускорительного отдела). 13 марта 1980 г. Комиссия по аппаратам и техническому оснащению, применяемым в радиологии Минздрава СССР, разрешила проводить клинические испытания методов лечения с помощью протонных пучков высоких энергий, выведенных из протонного синхроциклотрона ЛИЯФ.

1985 г. – Ученым Советом ЛИЯФ работа выдвинута на соискание премии Совмина СССР.

1975–2013 гг. Курс лечения прошли 1394 больных.

Как уже говорилось, первоначально на синхроциклотроне ПИЯФ, энергия протонов в котором фиксирована и равна 1000 МэВ, предполагалось использовать протонный пучок, предварительно замедленный в полиэтиленовом замедлителе до энергии 200 МэВ. Однако, проведенные оценки показали, что параметры получаемого таким способом пучка из-за многократного рассеяния протонов в замедлителе и недостаточной интенсивности выведенного из ускорителя пучка не удовлетворяют требованиям протонной терапии. Поэтому был сделан упор на развитие облучения напролет узкими пучками протонов с энергией 1000 МэВ в комбинации с 2х-осевой ротационной техникой конвергентного облучения. Эксперименты, которые выполнялись в 1971 г. в экспериментальном зале ускорителя (предложение профессора А.А. Воробьева) показали, что этот метод позволяет получать в малых объемах дозные поля с высоким краевым градиентом.

Основателем и бессменным руководителем отделения протонной терапии в течение четверти века был профессор Борис Александрович Коннов, благодаря которому разработка и всестороннее изучение этого метода

протонной терапии стало одним из ведущих направлений деятельности (РНЦРХТ).



**Б.А. Коннов (1934 – 2003),
д.м.н., профессор, основатель и
первый руководитель ОПТ ЦНИРРИ**

В период с апреля 1975 г. по май 2013 г. было проведено лечение больных эндоселлярными аденомами гипофиза – 477 человек, артериовенозными мальформациями головного мозга – 518 человек, а также облучение аденогипофиза с целью обезболивания у пациентов больных раком молочной железы и предстательной железы с костными метастазами – 350 человек.

Директор РНЦРХТ академик А.М. Гранов высоко ценил протонную терапию за конкретные результаты, которые часто превосходили нейрохирургические методы.

Протонная терапия по сравнению с хирургическими методами лечения имеет следующие преимущества:

- лечение проводится без повреждения целостности черепа и разрушения ткани головного мозга;
- нет жизненно опасных или ведущих к инвалидности осложнений;

- эффект реализуется через 6–12 месяцев, что позволяет организму плавно адаптироваться к изменениям гормонального фона после протонной терапии передней трети гипофиза;

- женщины детородного периода через 1–2 года после лечения имеют возможность забеременеть и, при желании, родить здорового ребенка, что нереально после хирургического вмешательства.

Результаты исследования, касающиеся использования протонного пучка в лучевой терапии опухолей гипофиза и заболеваний центральной нервной системы, были отражены в приказе Министерства здравоохранения СССР № 588 от 01.06.1981г. «Общесоюзный план внедрения важнейших достижений медицинской науки в практику здравоохранения на 1981–1985 гг.». Результаты выполненной работы, касающиеся применения протонного пучка ЛИЯФ в стереотаксической нейрохирургической практике, были включены в целевую научно-техническую программу, утвержденную Постановлением ГКНТ, Госплана СССР, Комиссии Президиума Совета Министров СССР и Академии Наук СССР № 10/15/37/10 от 27.01.1981 г.

Клиническое наблюдение за пролеченными пациентами осуществлялось на протяжении 5–23 лет. Для формирования адекватного дозного поля использовали ротационно-конвергентный метод облучения.



УПСТ 3-го поколения. Укладка больного.

Сотрудники ОПТ – слева Карлин Д.Л., справа Жидков М.В.

Клиническое излечение отмечено в отдаленные сроки наблюдения у 86% из 205 больных акромегалией. Излечение больных с болезнью Иценко-Кушинга наблюдалось у 94% из 118. При пролактин-секретирующих аденомах клиническая ремиссия отмечена у 74% из 117 пациентов. Клиническое излечение при гормонально-неактивных аденомах составило 95%. Протонная абляция аденогипофиза у больных раком молочной железы с метастазами в кости и болевым синдромом обеспечивала полное купирование болей у 72,5% из 207 больных, в 16,3% отмечено уменьшение боли более чем на 50%. Такой же эффект отмечался у 143 больных раком простаты с метастазами в кости. Исчезновение болевого синдрома в течении 4–16 дней наблюдалось у 72,4% из 118 больных. Достоверно снижались уровни половых гормонов и простатического антигена в течение года. Поглощенные дозы – 90–120 Гр.

Протонная радиохирurgia была высокоэффективной при артериовенозных мальформациях головного мозга у 328 больных (502 сеанса), доза в изоцентре составляла 40–60 Гр. Излечение при объемах сосудистого клубка до 8 см³ отмечено у 55%, положительный эффект достигнут у 74% больных.

Проведение протонного облучения не сопровождалось серьезными, угрожающими жизни осложнениями и являлось альтернативой хирургическим и лекарственным методам лечения. (Р.А. Шалек, ж. мед. физика №2, 2016 г.)

ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Становление протонной лучевой терапии проходило не очень гладко. Голоса против использования протонов столь высокой энергии высказывали в стране руководители ИТЭФ. Был лозунг: “У протонной терапии столь высокой энергии не может быть никакой перспективы”.

В 1978 г. группа онкологического научного центра во главе с профессором Рудерманом И.И. в составе 16 человек физиков и медиков приезжала на 2 дня в ЦНИРРИ для ознакомления с методикой проведения радиохирургических операций на протонном пучке СЦ-1000 при лечении больных с аденомами гипофиза и артериовенозными мальформациями.

Проверяла нас и комиссия Минздрава, составленная из физиков Института медико-биологических проблем в составе: профессор Ковалев Е.Е., Дудкин В.Е., Вихров А.И. и представитель Минздрава.

Они проверяли все – даже заходили за электроциты пультавой: проверяли также подключение кабелей к видеотерминалам. Результатом обсуждений было заключение договора о совместном сотрудничестве и подарок нам – тканеэквивалентный фантом-человека, который трижды побывал в космосе.

Первые иностранцы посещали МПК в начале декабря 1977 г. Были представители всех 3-х зарубежных центров (Беркли, Гарвард – США; Упсала – Швеция).

Впечатлял тот факт, что у иностранных коллег энергия пучка протонов в 1 ГэВ не вызывала сомнений. Они, в частности, предлагали использовать наш протонный пучок для лечения рака простаты.



Иностранные гости в зале облучения МПК.

Особенностью МПК ПИЯФ является не только применение для терапии протонов с энергией 1000 МэВ, но и его организация. Впервые в мире МПК создавался по инициативе медиков. Это создавало и создает огромные трудности и в организации технических, инфраструктурных, юридических, разрешительных работ. Для РНЦРХТ структура в Гатчине

(медико-биологический отдел) – была “чемоданом без ручки”: и нести тяжело, и выбросить жалко.

Многое для развития протонной терапии было сделано совместно с ПИЯФ:

- отремонтирована кровля здания (директор ПИЯФ В.А. Назаренко).
- впервые при поддержке Д.М. Селиверстова (зам. директора ОФВЭ А.А. Воробьева) отремонтированы дважды комнаты временного пребывания больных). Последний ремонт этих помещений, пультавой и зала облучений был сделан при поддержке зам. директора ПИЯФ В.Ф. Ежова.

- создана система мониторинга параметров и положения протонного медицинского пучка (А.Г. Крившич, С.С. Волков и др.);

- созданы системы управления УПСТ (Е.Н. Леонова, Е.П. Волков, Я.А. Касман, М.Р. Колхидашвили, Т.В. Савельева);

- изготовление деталей для МПТ и УПСТ (Е.П. Волков, Д.И. Лаптев, И.А. Завьялов);

- в 1980г. модернизирован МПТ (Н.К. Абросимов, А.В. Куликов, Г.А. Рябов, В.А. Елисеев, Е.М. Иванов).

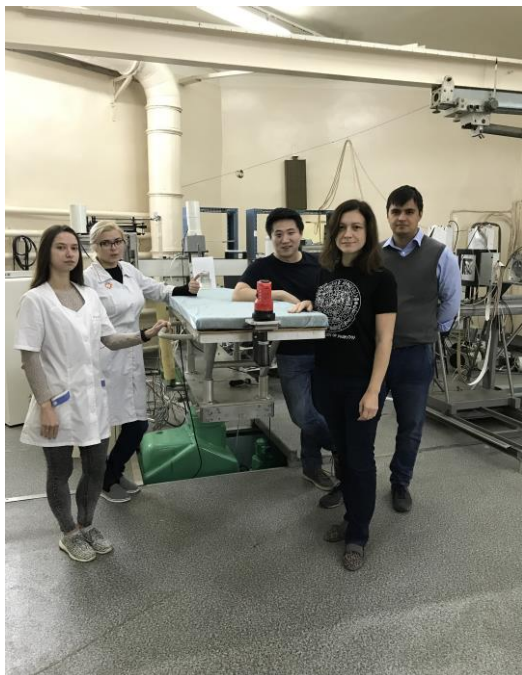
В лихие 90-е годы, когда сотрудникам ЦНИРРИ не платили зарплату, Д.М. Селиверстов оформил их по совместительству в ОФВЭ (группа, а затем лаборатория физики экзотических ядер). Сотрудники ОФВЭ Гавриков Ю.А. и Комков Б.Г. добровольно разработали программу автоматизированного управления УПСТ третьего поколения. Ю.А. Гавриков принимал непосредственное участие в сеансах протонной терапии.

В 2014 г. в ОПР ПИЯФ в ускорительном отделе была создана группа протонной терапии, в которую вошла часть сотрудников из лаборатории Д.М. Селиверстова и которой автор этой заметки руководил до апреля 2018 г. А группа протонной терапии РНЦРХТ была ликвидирована в сентябре 2015 г.

Благодаря инициативе зам. директора ПИЯФ по перспективным разработкам В.И. Максимова, группа протонной терапии была

укомплектована молодыми сотрудниками. Приказом директора от 24.12.2019г., №679 группа преобразована в лабораторию медицинской физики, заведующий – А.И. Халиков.

Молодые сотрудники грамотны, способны, энергичны, инициативны. Они планомерно осуществляют модернизацию УПСТ (уже пятое поколение), чтобы она соответствовала современным требованиям и была зарегистрирована как медицинское изделие.



На фото – молодые сотрудники группы протонной терапии возле УПСТ пятого поколения. Левый ряд – Н.И. Мамедова, Д.С. Брожик; правый ряд (слева направо) – Ф.А. Пак, Н.А. Кузора, А.И. Халиков (зав. лабораторией медицинской физики).

Физико-техническое обеспечение протонной терапии – в надежных руках.

Нейтронный времяпролётный спектрометр ГНЕЙС – универсальный инструмент для фундаментальных и прикладных исследований с использованием нейтронов

О.А. Щербаков

Нейтронный времяпролётный спектрометр ГНЕЙС (Рис. 1), разработанный и созданный в ПИЯФ на базе синхроциклотрона с энергией протонов 1 ГэВ (СЦ-1000), предназначен для исследования взаимодействия нейтронов с атомными ядрами в диапазоне энергий от тепловых нейтронов ($\sim 10^{-2}$ эВ) до 1000 МэВ. Экспериментальные работы фундаментального и прикладного значения проводятся на спектрометре ГНЕЙС с 1975 г.

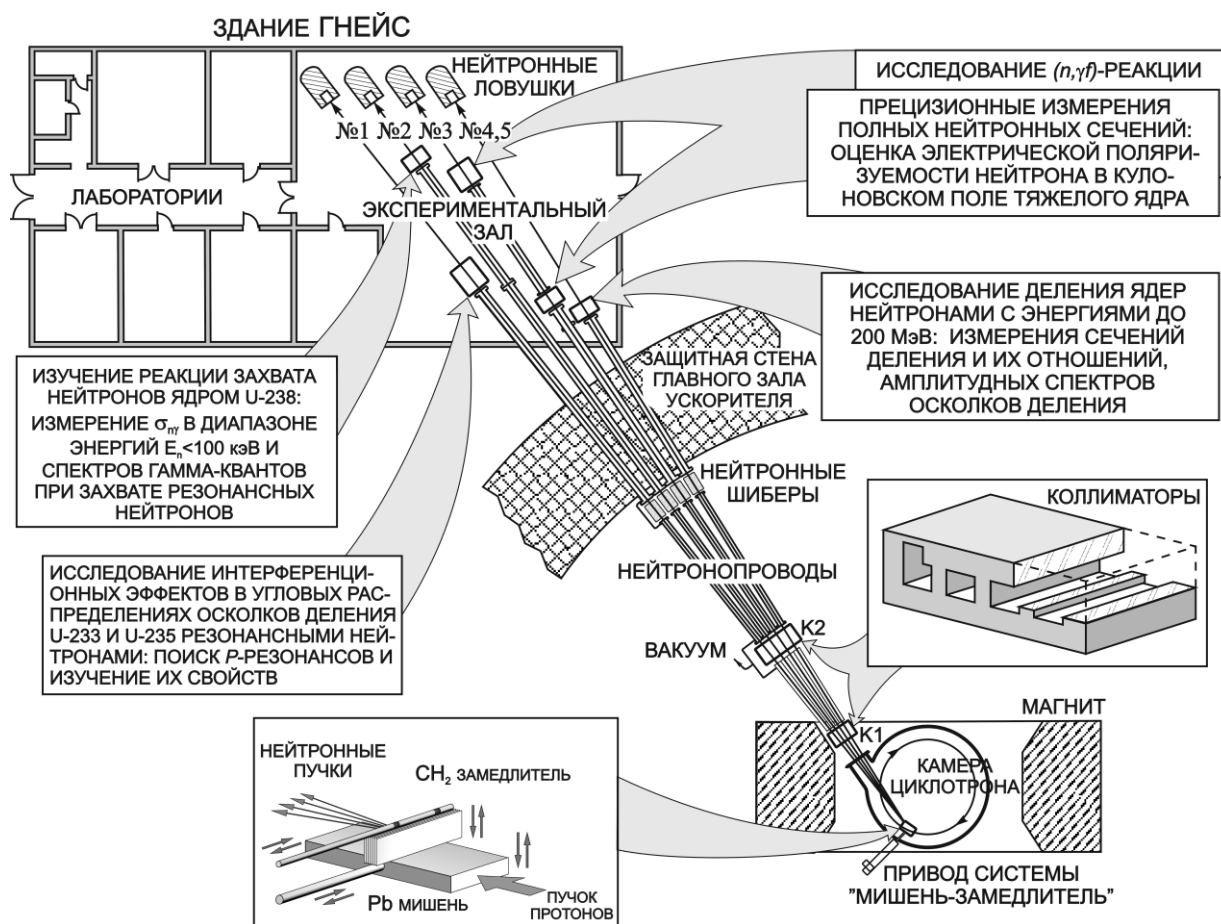


Рис.1. Общий вид нейтронного спектрометра ГНЕЙС

Импульсным источником нейтронов спектрометра является система «мишень + замедлитель», расположенная в вакуумной камере ускорителя. Импульс быстрых нейтронов длительностью ~ 10 нс получается в результате сброса протонного пучка на охлаждаемую водой свинцовую мишень. Мишень и полиэтиленовый замедлитель могут независимо перемещаться в радиальном и вертикальном направлениях и дистанционно управляются с пульта управления ускорителя. Спектрометр имеет 5 нейтронных пучков, при этом оси пучков № 1–4 проходят через замедлитель, а ось пучка № 5 – через мишень. В результате в нейтронных спектрах пучков № 1–4 преобладают медленные и резонансные нейтроны с энергиями ниже 100 кэВ, а спектр пучка № 5 является типичным

спектром нейтронов “spallation”, имеющим «испарительную» компоненту (область энергий 0,1–10 МэВ) и “каскадную” компоненту (область энергий 10–1000 МэВ).

Нейтронные пучки выводятся наружу, в отдельно стоящее здание – ангар, состоящий из экспериментального зала и лабораторно-измерительной части. Формирование нейтронных пучков осуществляется системой коллиматоров, расположенных в главном зале СЦ-1000 и внутри труб, в которых поддерживается форвакуум. Пролётные базы длиной 35–50 м оборудованы шиберами и нейтронными ловушками. В Таблице приведены основные параметры синхроциклотрона СЦ-1000 и нейтронного источника спектрометра ГНЕЙС. В России в настоящее время для ядерно-физических исследований с использованием нейтронной времяпролётной спектроскопии в области энергий от тепловых до сотен МэВ имеются 3 импульсных нейтронных источника (и спектрометры на их базе): ГНЕЙС (ПИЯФ, Гатчина), ИРЕН (ОИЯИ, Дубна) и ММФ (ИЯИ, Троицк). Следует отметить, что только на спектрометре ГНЕЙС, благодаря высокой интенсивности импульсного нейтронного источника и малой длительности нейтронной вспышки, получаемые ядерные данные имеют точность, соответствующую современному мировому уровню.

Таблица. Основные параметры СЦ-1000 и нейтронного источника ГНЕЙС.

СИНХРОЦИКЛОТРОН СЦ-1000	
Энергия протонов	1 ГэВ
Внутренний ток протонов	≤ 3 мкА
Частота повторений	≤ 50 Гц
НЕЙТРОННЫЙ ИСТОЧНИК ГНЕЙС	
Средняя величина выхода быстрых нейтронов (из мишени)	$\leq 3 \times 10^{14}$ нейтронов /с
Длительность импульса быстрых нейтронов	10 нс
Диапазон энергии нейтронов	0,01 эВ–1000 МэВ
Количество нейтронных пучков	5
Длина пролётных баз	35 – 50 м
Тип нейтронного спектра, пучки № 1–4, $E_n < 0,1$ МэВ	$1/E^{(0,65-0,82)}$
Тип нейтронного спектра, пучок № 5, $E_n > 0,1$ МэВ	“spallation”

На спектрометре ГНЕЙС за 45 лет его существования были выполнены разнообразные ядерно-физические исследования, имеющие как фундаментальный, так и прикладной характер, например:

- 1) исследование 2-х ступенчатой ($n, \gamma f$)-реакции – индуцированного резонансными нейтронами с энергией 1–300 эВ деления ядер ^{235}U и ^{239}Pu после предварительного испускания гамма-квантов;
- 2) прецизионные измерения полных нейтронных сечений изотопов свинца в интервале энергий 1 эВ–10 кэВ с целью получения величины электрической поляризуемости нейтрона;
- 3) измерение сечения и спектров гамма-квантов реакции радиационного захвата нейтронов с энергиями 100 эВ–1000 эВ ядрами ^{238}U с целью изучения возбуждённых состояний компаунд-ядер во 2-й яме барьера деления;
- 4) измерения асимметрии типа «вперёд – назад» разлёта осколков деления ^{233}U и ^{235}U резонансными нейтронами с энергиями 1–200 эВ для получения параметров p -волновых нейтронных резонансов делящихся ядер;
- 5) измерения сечений деления ^{233}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{237}Np , ^{243}Am , Pb , ^{209}Bi и W в области энергий нейтронов 1 МэВ–200 МэВ;
- 6) измерения угловых распределений и анизотропии осколков деления ^{233}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th , ^{239}Pu , ^{237}Np , Pb и ^{209}Bi в области энергий нейтронов 1 МэВ–200 МэВ.

Примером использования экспериментальных возможностей спектрометра ГНЕЙС для прикладных работ является создание испытательного стенда ИСНП/ГНЕЙС для исследования радиационной стойкости электронной компонентной базы (ЭКБ) к естественным нейтронным потокам. Стенд создан в 2012–2014 гг. на базе нейтронного спектрометра ГНЕЙС в коллаборации с филиалом ОАО «Объединённая ракетно-космическая корпорация» – Институт космического приборостроения (НИИ КП), РОСКОСМОС. Выбор спектрометра ГНЕЙС в качестве основы стенда обусловлен тем, что из действующих в настоящее время в РФ нейтронных источников только ГНЕЙС (пучок № 5) имеет форму нейтронного энергетического спектра, максимально близко воспроизводящую форму спектра атмосферных нейтронов космического происхождения в интервале энергий нейтронов 1–1000 МэВ. Спектр именно такой формы рекомендован отечественным и международными стандартами для проведения «ускоренных» испытаний ЭКБ электронного оборудования авиационного и космического применения. Такие испытания называются «ускоренными», поскольку 1 час облучения ЭКБ на нейтронном пучке стенда ИСНП/ГНЕЙС эквивалентен по флюенсу нейтронов 125000 часов облучения естественными нейтронными потоками на высоте 10–12 км или 5700 лет на уровне моря.

В связи с тем, что с момента создания ядерной энергетики непрерывно повышаются требования к точности ядерно-физических констант (нейтронных сечений, дифференциальных характеристик частиц-продуктов ядерных реакций, индуцированных нейтронами), потребность в проведении новых измерений будет существовать всегда.

Примером является происходящее каждые 5–10 лет обновление библиотек оценённых ядерных (нейтронных и других) данных, таких как ENDF (США), JEFF (Европа), JENDL (Япония) и ROSFOND (Россия). При подготовке новых библиотек происходит обновление международного списка запросов на ядерные данные (WRENDA – World Request List on Nuclear Data), в первую очередь на новые высокоточные экспериментальные данные. Что касается нейтронных ядерных данных, то созданные в последние годы и создаваемые высокоинтенсивные нейтронные источники в США (SNS, Ок-Ридж), в Европе (ESS, Лунд), в Японии (J-Park, Токай) и Китае (CNS) предназначены в том числе и для проведения измерений таких данных.

В связи с разрабатываемыми в развитых странах проектами нейтронных источников на базе высокоинтенсивных протонных ускорителей, проектами ядерных энергетических установок следующего поколения, в том числе – гибридных, с приводом от ускорителей, проектами трансмутации ядерных отходов и т.д., для исследований на спектрометре ГНЕЙС в ближайшей перспективе приоритетными являются исследования реакции деления под действием нейтронов промежуточных и высоких энергий 1–1000 МэВ. Примером таких исследований является начатые в 2014 году и продолжающиеся в настоящее время измерения угловых распределений осколков деления ^{233}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{209}Bi и Pb нейтронами в диапазоне 1–200 МэВ. Следующим этапом исследований могут быть измерения массовых и энергетических распределений осколков деления ядер-актинидов.

Помимо испытаний ЭКБ на нейтронную радиационную стойкость в соответствии с действующими техническими стандартами, существует возможность и необходимость исследования ядерных реакций, происходящих в атомных ядрах элементов, входящих в состав ЭКБ. В качестве других возможных направлений прикладных исследований с использованием нейтронного источника спектрометра ГНЕЙС можно привести следующие:

- 1) исследования чувствительности и стойкости детекторов элементарных частиц и сопутствующей электронной аппаратуры к нейтронам с энергиями от тепловых до нескольких сотен МэВ. В 1993 году на спектрометре ГНЕЙС были выполнены измерения чувствительности к нейтронам с энергией 0,1 эВ–20 МэВ катодных стриповых камер, разработанных в ПИЯФ и используемых в международных экспериментах по физике высоких энергий;
- 2) энергетическая калибровка и эффективность регистрации нейтронов космического происхождения детекторами нейтронов, установленными на борту пилотируемых космических аппаратов, например на МКС (международной космической станции);
- 3) облучение нейтронами с энергетическим спектром близким к атмосферному биологических объектов для исследования воздействия малых доз нейтронного излучения на жизнедеятельность и генетические последствия при долгом пребывании на околоземной орбите и во время длительных космических перелётов. Следует отметить, что такого рода исследования уже проводятся за рубежом в течение нескольких последних лет.

Подводя итоги, можно сказать, что созданный более 45 лет назад нейтронный времяпролётный спектрометр ГНЕЙС в настоящее время продолжает активно использоваться для нейтронных ядерно-физических исследований, входя в группу мировых лидеров в области нейтронной времяпролётной спектрометрии. В условиях существующего в России очевидного дефицита мощных нейтронных источников на базе ускорителей, необходима модернизация ускорителя СЦ-1000 и действующих на его базе нейтронного источника и спектрометра ГНЕЙС, которая не требует больших финансовых затрат.



Рис. 2. У входа в ангар ГНЕЙС (слева направо) А.С. Воробьёв, Л.А. Вайшнене, О.А. Щербаков и А.М. Гагарский

В создании нейтронного источника на синхротроне СЦ-1000 и нейтронного времяпролётного спектрометра ГНЕЙС принимали участие сотрудники различных подразделений ПИЯФ, прежде всего Ускорительного отдела и Лаборатории физики деления ядер Отделения нейтронных исследований. Авторами первых публикаций на тему ГНЕЙС были Г.А. Петров, Г.З. Борухович, Н.К. Абросимов, А.В. Куликов, Н.Н. Чернов, Г.Ф. Михеев и В.И. Юрченко. С середины 70-х годов в физических экспериментах, выполняемых на спектрометре, самое активное участие принимали О.А. Щербаков и А.Б. Лаптев. В настоящее время (Рис. 2), кроме сотрудников Лаборатории радиационной физики Отделения перспективных разработок (ОПР) О.А. Щербакова и А.С. Воробьёва, в исследованиях на ГНЕЙСе участвуют А.М. Гагарский (Отделение нейтронных исследований) и Л.А. Вайшнене (Отделение

физики высоких энергий). Все работы на ГНЕЙСе выполняются физиками в тесном сотрудничестве и при поддержке возглавляемого Е.М. Ивановым Ускорительного отдела ОПР.

**ЛАБОРАТОРИЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ – ЛГИИС ПИЯФ НИЦ
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**

Б.Г. Турухано, Н. Турухано

После окончания кафедры экспериментальной ядерной физики ЛПИ им. М.И. Калинина Турухано Борис Ганьевич, нынешний заведующий лабораторией ЛГИИС, был распределен в филиал ФТИ им. А.Ф. Иоффе в г. Гатчина в ЛФВЭ в сектор М.В. Стабникова, где он стал руководителем группы по автоматизации универсальных измерительных микроскопов УИМ-21. Чертежи этих микроскопов были получены в качестве репараций от Германии, и после войны микроскопы стали выпускаться в большом количестве на ЛОМО в Ленинграде в основном для промышленности и военных предприятий, а ученые ЛИЯФ (ныне ПИЯФ) также стали их использовать для обмера треков от ядерных событий. В дальнейшем лаборатория голографии усовершенствовала (как было задумано и обещано Б.Г. Турухано) измерительную систему УИМ-23, доведя ее точность до 0,6 мкм по объему.

Изобретение лазеров произвело взрыв в науке, и они положили основу новых научных направлений и открытий. Среди них в 1965 году была и наука, названная **голографией**, основанная на интерференции света. Несмотря на то, что она была открыта еще ранее в 1948 г. венгерским ученым Денисом Габором, она не была реализована на практике из-за отсутствия источников когерентного излучения. Это явление не пропустил Турухано Б.Г. Он оставил группу по автоматизации УИМ-ов, которая продолжала идти своим проторенным путем, а вместо себя предложил руководство группой своему заместителю, способному электронщику В.В. Добырну. Сам же Турухано Б.Г. в полном одиночестве поплыл по световым волнам к неизведанным берегам новой науки – **голографии**, интуитивно понимая, что именно интерференция когерентного излучения с

очень маленькой длиной волны света (менее микрона в оптическом диапазоне) приведет к новым рубежам высоких точностей и позволит создать бесконтактным способом измерительные системы высочайшей точности, о которой метрологи только мечтали. Более того, понимая риск нового направления, он не повернул штурвал всей лаборатории в сторону неизведанной **голографии**, а бросился один в эту пучину. Конечно, смена курса классических измерительных систем, основанных на линейных и радиальных дифракционных решетках, изготавливаемых механическим способом, было рискованным делом, но как оказалось впоследствии, она была весьма оправдана. Эта смена курса была поддержана зав. ЛФВЭ, а в будущем директором ПИЯФ – А.А. Воробьевым. Он потратил немало времени, чтобы убедиться, что затея Турухано Б.Г. не пустая, и стал поддерживать и поддерживает вплоть до настоящего времени сотрудников ЛГИИС, что очень важно для них. Он помог начинаниям лаборатории идти по новому неизведанному голографическому пути и даже обращался к зам. премьер-министра СССР за финансовой поддержкой.

В семидесятых годах мир начал увлекаться **изобразительной голографией**, так как она была обворожительна в своем проявлении, показывая людям полный объемный повтор материальных объектов и картины мира. Конечно и мы, как хобби, тоже участвовали в таких играх, однако наше научное направление было для нас главнее и серьезнее. Более того, мы успешно записывали не только одноцветные, но и цветные голограммы, которые в то время были уникальными и единичными, и мало кто их создавал из-за сложности их записи, так как не было в наличии лазеров с излучением, которое простиралось в “цветовом треугольнике”, охватывающем границы оптического диапазона. Нам повезло, т.к. в Рязани российские ученые изобрели уникальный многоволновой ксеноновый лазер с большим количеством длин волн в оптическом диапазоне. С его помощью мы создали голографические изображения различных цветных значков.

На конференции по голографии, которая проводилась в Новосибирске в 1972 году, один из отцов голографии – американец Емет Лейт – написал на деревянной рамке, обрамлявшей нашу цветную голограмму: «это лучшая цветная голограмма, которую я видел» (*“It is the best color hologram I have seen”*). Конечно, для нас это была настоящая награда – ведь изобразительная голография была для нас лишь хобби.

Однако вернемся исторически немного назад и виртуально постараемся пройти снова путь, пройденный сотрудниками ЛГИИС на протяжении более 50 лет. Первые 20 лет были годы проведения фундаментальных исследований по определению свойств оптических интерференционных полей в части их линейности с целью их возможного копирования на материальных носителях, подобно известным дифракционным решеткам, обладающих набором линейных или радиальных штрихов. Наши фундаментальные исследования позволили создать такие поля, которые адаптировались под поставленные нами задачи, а именно, они обладали интерференционными частотами линий с высокой их равномерностью при их линейном или радиальном расположении. Нам удалось записать метрологические линейные голографические дифракционные решетки (МЛГДР), до тысячи штрихов/мм с большой равномерностью штрихов, превышающей все существовавшие тогда и существующие даже сейчас аналоги. Более того, Турухано Б.Г. разработал метод синтеза этих решеток из отдельных линейных интерференционных участков. Этим методом до сих пор владеет только ЛГИИС. Причем в 80-е годы прошлого столетия мы успешно записывали МЛГДР с длиной до 1200 мм (Рис. 1), а ныне мы можем писать их и без ограничения по длине.

Такие линейные решетки, а позже и радиальные, были нами записаны на базе галогенидосеребряных эмульсий (также разработанных в ЛГИИС), нанесённых на стеклянные подложки. Метровые линейные решетки были аттестованы в 1988 году, а радиальные в 1991 году во ВНИИМ им.

Д.И. Менделеева. Результаты аттестации доказали, что они превосходят и по сей день все мировые аналоги. Бурное развитие технологий и их переход в область высоких нанотехнологий практически во всех сферах науки и промышленности связано в том числе с усовершенствованием способов контроля и внедрения новых средств измерения и измерительных приборов.



Рис. 1. Турухано Б.Г. с МЛГДР длиной 1 200 мм

Одно из ведущих мест в процессе контроля занимают эталоны и контрольно-измерительные системы, обладающие высокой точностью, а сейчас и нано-точностью.

К сожалению, необходимость повышения точностей измерительных приборов растет быстрее, чем возможность реализации последних, хотя известна аксиома, что “если нельзя измерить, то нельзя создать”, особенно сейчас, когда идет бурный экспоненциальный рост высоких технологий.

Практически все измерения в оптике сводятся к измерению длин и углов, в связи с чем ЛГИИС проводит свои работы именно в данном направлении. Сегодня уже ясно, что та точность, которую имеют эталоны, недостаточна для решения ряда фундаментальных физических задач, в том числе и прикладных научно-технических. Очень малые перемещения теперь

востребованы и в нанотехнологиях. Следует отметить, что все эталоны частоты, в том числе и оптические лазеры, используются в качестве реперов для атомных и молекулярных переходов.

Так как мы повторяем исторический путь лаборатории, отвлечемся ненадолго еще к одной задаче, которую ЛГИИС решала в семидесятые годы. Лаборатория занималась также исследованиями и разработкой голографической памяти. Руководил этой группой молодой ученый Толчин В.Г. Как ученому или конструктору найти сведения об интересующих его материалах, изделиях, результатах исследований в огромном массиве информации? И тут голография оказалась очень полезной и кстати.

Способность светочувствительного слоя фиксировать огромное количество информации, принесенной лазерным лучом, позволило создать не только систему голографической памяти большой емкости, но и автоматизировать поиск нужных сведений.

В каждой технической новинке есть свое главное «зерно» – удачно найденное решение, помогающее воплотить в жизнь идею создателей. Для ленинградских физиков таким «зерном» явился плоский стеклянный диск диаметром 400 и толщиной 5 миллиметров, покрытый высокоразрешающей фотоэмульсией. На одном диске (Рис. 2) удалось расположить более 10 000 страниц текста, что по объему равнялось около 3 Гб информации. На указанном диске записывалась патентная информация.

Система “информационная машина с голографической памятью” с управлением от ЭВМ и специальной поисковой программой была установлена в Государственной библиотеке СССР имени В.И. Ленина в Москве. Эта же система была успешно передана военным морякам.

Следует заметить, что данная разработка проводилась в те времена, когда вычислительная техника была не столь продвинута, как сейчас:

обрабатываемая информация измерялась в килобайтах, жесткие диски имели емкость не более $1 \div 2$ Gb, а оптических приводов вообще не было.

Параллельно с голографической памятью велись исследования по синтезу метрологических голографических линейных и радиальных дифракционных решеток (МГЛДР и МГРДР).

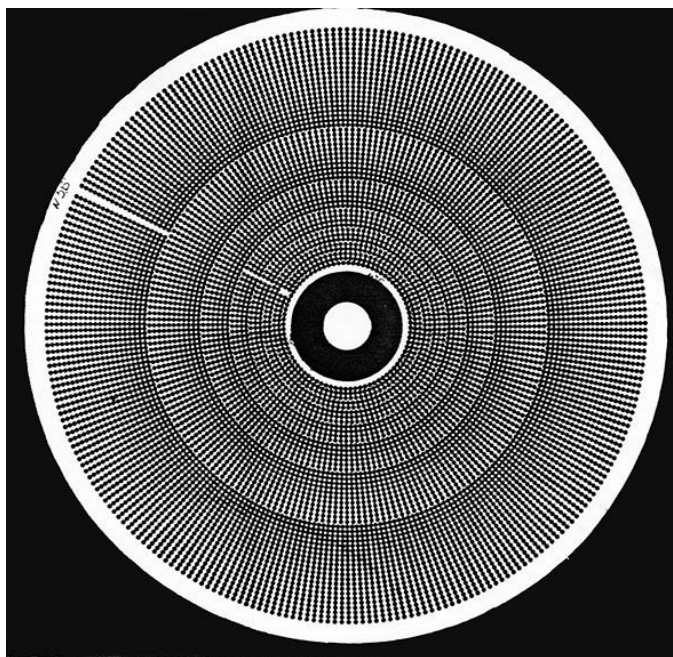


Рис. 2. Голографический диск на 10 тыс. страниц текста (около 3 Гб)

Благодаря рекордной точности МЛГДР и МРГДР, ЛГИИС удалось разработать и создать высокоточные отечественные голографические линейные и радиальные фотоэлектрические преобразователи (датчики) линейных и угловых перемещений, которые сейчас уже имеют разрешение до 1 нанометра и 0,01 угловой секунды. На базе этих датчиков были созданы уникальные измерительные системы.

В связи с этими достижениями ЛГИИС в 1988 г. выиграла конкурс ГКНТ СССР, результатом которого были: [Распоряжение СМ СССР № 1366 от 2 июля 1988 г.](#), [Постановление ГКНТ № 317 от 17 мая 1989 г.](#) и [Распоряжение Президиума АН СССР № 10103-165 от 27 января 1989 г.](#),

целью которых было «...создание и производство преобразователей перемещений для станков и координатно-измерительных машин особо высокой точности, а также качественно **новых типов измерительных систем**. Проведение комплекса исследований, обеспечивающих разработку измерительных систем в 1991–1995 годах, позволяющих существенно повысить качество обрабатываемого и измерительного оборудования, исключить затраты на закупку соответствующих комплектующих изделий по импорту и превзойти к 1995 г. мировой уровень по этим видам изделий...».

Отметим, что в настоящее время (как и ранее), станки, выпускаемые в России на базе измерительных систем линейных и угловых перемещений с растровыми датчиками, соответствуют лишь «4, 5» классам точности, т.е. обладают точностями не выше **(10–15) мкм/м**.

Благодаря вышеупомянутым Распоряжениям и Постановлению ГКНТ к ЛГИИС были подключены ведущие машиностроительные предприятия ЭНИМС, Калибр, ВНИИ измерений (Москва), Кировский завод, завод им. Свердлова, новый завод «МИКРОН», созданный для производства измерительных систем ЛГИИС, а также ВНИИМ им. Д.И. Менделеева (Ленинград), способствующие внедрению в промышленность разработок ЛГИИС.

Для ознакомления с измерительными системами Лабораторию посетил И.М. Бортник – заместитель председателя ГКНТ. После его визита Е.П. Велихов и Б.Г. Турухано были вызваны в Москву в Кремль, где по вопросу ЛГИИС, связанному с внедрением отечественных точных измерительных систем ЛГИИС, заседал Совмин СССР во главе с зам. председателя И.С. Силаевым. ЛГИИС было выделено 1,5 миллиарда рублей, 150 000 \$ и 720 штатных единиц.

В результате этих решений в кратчайший срок – 8 месяцев – Ленметрогипротранс спроектировал, а Ленметрострой построил уникальную вибро- и термо-стабилизированную подземную лабораторию (глубиной 14 метров (рис. 3)) и было организовано производство датчиков линейных перемещений на основе МЛГДР на заводе “МИКРОН”. Эта подземная лаборатория (бункер) позволила расположить в ней автоматизированные адаптивные голографические интерферометры и аттестационные измерительные системы ЛГИИС.

К сожалению, с 1991 г. ЛГИИС не имеет никакой целевой государственной финансовой поддержки и в одиночку в условиях рыночной экономики без государственной помощи с трудом находит внутренних и внешних заказчиков.



a



b

Однако, несмотря на отсутствие финансирования, лаборатория продолжает работать в направлении создания прецизионных измерительных систем, сохраняя свою передовую нишу. Поэтому сейчас по-прежнему имеются достаточные знания и возможности для создания основ отечественной наноиндустрии измерительных систем и их серийного производства, а также для их использования не только в России, но и для экспорта за рубеж в силу их высокого уровня техники и технологии. Все разработки, устройства для их реализации, приборы и измерительные системы на их основе имеют высокую патентную защищенность.



с

Рис. 3. Подземная лаборатория: а – один из коридоров бункера, б – надземный комплекс бункера, с – госприемка бункера: справа налево – руководитель завода “Микрон” Зубков Ю.С., зам. директора ПИЯФ Назаренко В.А., зав. ЛГИИС Турухано Б.Г., директор ПИЯФ Воробьев А.А., 1-ый секретарь Обкома Лен. Обл. Соловьев Ю.Ф. и др. официальные лица

Несмотря на все финансовые и организационные сложности ЛГИИС удалось создать большое количество (17 единиц) измерительных систем и запатентовать их. В настоящее время лаборатория владеет 65 патентами, из которых 36 – РФ, а 29 – зарубежных в ведущих промышленно-развитых государствах (Рис. 4).

На базе этих патентов в 2006 году были получены Правительственные награды – двум сотрудникам ЛГИИС, Турухано Б.Г. и Турухано Никулине, было присвоено звание заслуженного изобретателя РФ.

Отметим некоторые из ультрапрецизионных нано-разработок ЛГИИС, не имеющих аналогов за рубежом и представляющих актуальный интерес для промышленности и ВПК:

- длиномеры голографические: ДГ-30, ДГ-100, ДГ-200 (руководитель группы, ведущий инженер-конструктор Ханов С.Н.;
- координатно-измерительная машина (Рис. 5) – поставлена самой крупной в мире японской станкостроительной фирме «MAZAK Co.»;
- поворотные столы (Рис. 6) для сертификации космических систем наведения.



Рис. 4. **65 патентов ЛГИИС:**

- РФ (верхний ряд),
- США, Японии, Швейцарии, Германии, Франции, Канады (нижний ряд)



Рис. 5. **3D НАНО КИМ** – координатно-измерительная машина с разрешением 10 нм

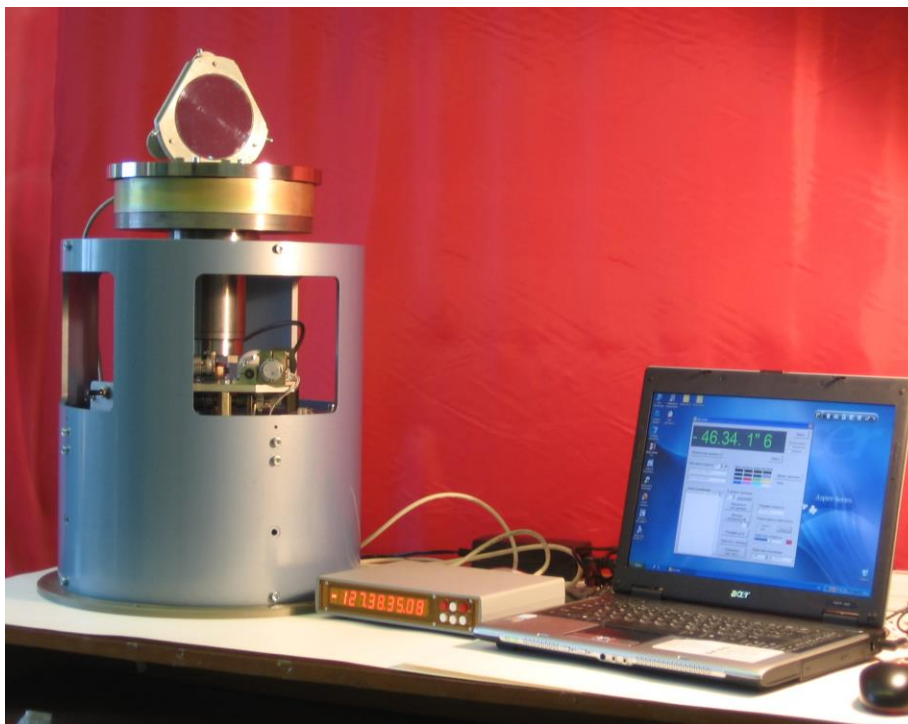


Рис. 6. Ультрапрецизионный наноизмерительный двухшпиндельный зеркальный гониометр – **НАНО ДЗГ**

Благодаря своим достижениям Лаборатория получила на выставках десятки золотых и серебряных медалей и дипломов. На Рис. 7 и 8 представлены Диплом и Золотая медаль «За лучшие наноизмерительные системы России» в 2018 г.



Рис. 7.



Рис. 8.

Лабораторию периодически посещали выдающиеся ученые.

Академик **Георгий Николаевич Флеров** (рис. 9) при своем посещении рассказал нам, что в начале войны Сталин собрал академиков и спросил: «Какое вооружение необходимо разработать?!» - академики не ответили, тогда Сталин сказал, что лейтенант Флеров (тогда он еще не был академиком) предложил срочно разрабатывать атомную бомбу. У американцев это был «Проект Манхэттен». Руководители американского проекта – физик Роберт Оппенгеймер и генерал Лесли Гровс.

По словам Г.Н. Флерова, во время войны учителей по физике и математике и ученых по физико-математическим дисциплинам в окопы не отправляли.



Рис. 9. Академик Г.Н. Флеров у дисковой голографической памяти
в ЛГИИС

Они становились командирами орудий и батарей. Именно они превращали немецкие «Пантеры» и «Тигры» в груды металлолома. Лейтенант Флеров был

одним из них – он командовал батареей. Его отозвали, и он активно участвовал в работах по созданию атомной бомбы.

Интересны воспоминания **Петра Леонидовича Капицы**, посетившего Лабораторию в 1974 году (Рис. 10).



Рис.10. Академик, лауреат нобелевской премии П.Л. Капица в ЛГИИС, где Турухано Б.Г. демонстрирует голографическую память

Резерфорд сделал купчую на имя П.Л. Капицы на лужайку перед своим домом, без которой его нельзя было сделать СЭРОМ. А когда поступило от ЦК КПСС предложение на общее собрание АН СССР о лишении Андрея Сахарова звания академика, П.Л. Капица высказался, “что это уже было”, на что Келдыш спросил: «Что вы имеете ввиду?!» Капица напомнил, что прямо перед войной из немецкой академии наук Германии выгнали Альберта Эйнштейна. В результате этого разговора А. Сахаров остался академиком.

ЛГИИС посещали также известные иностранные ученые (Рис. 11–13).



Рис. 11. Дж. Гудман – американский ученый, специалист по статистической оптике, квантовой электронике и голографии



Рис. 12. Делябуа – французский специалист в области оптики и голографии



Рис. 13. Вильфорд – английский ученый, специалист по оптике, радиофизике и голографии. Слева направо: Турухано Б.Г., Турухано Н., Вильфорд и Толчин В.Г.

Лабораторию ЛГИИС посещали также множество представителей науки, промышленности и политические деятели России (Рис. 14–17).

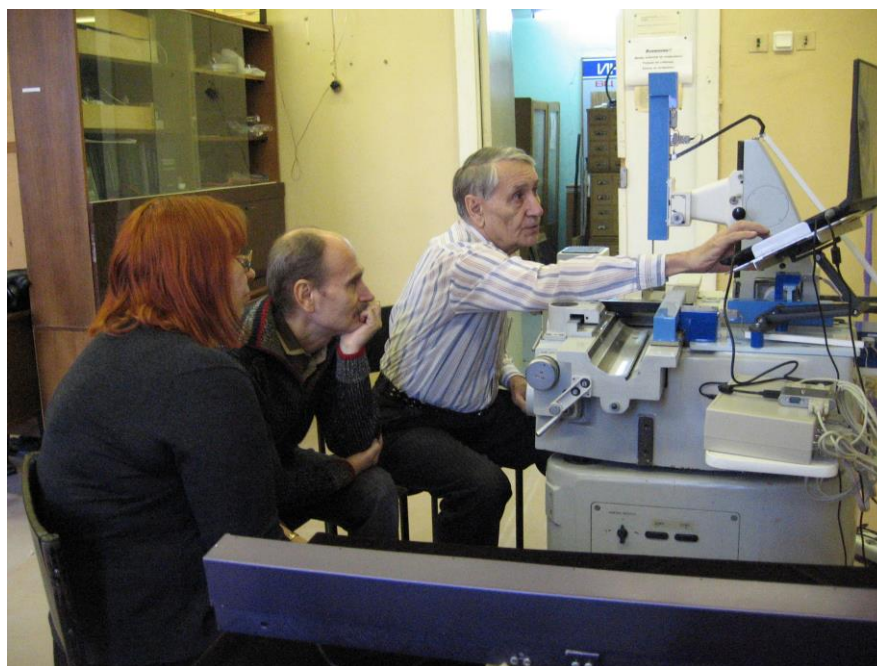


Рис. 14. Представители з-да «Авангард», которые приобрели УИМ-23, модернизированный в ЛГИИС нано-измерительными системами



Рис. 15. Сотрудники объединения «ПОЛЮС»



Рис.16. Вице-президент станкостроительного объединения ООО «СТАН»
Звягинцев Р.В.



Рис.17. Сергей Юрьевич Глазьев – заместитель генерального секретаря ЕврАзЭС, профессор, академик РАН – знакомится с разработками ЛГИИС

ЛГИИС участвовал во множестве международных выставок по голографии в России и за рубежом в городах Бомбей, Генуя, Мюнхен, Карлсруэ, Франкфурт на Майне, Лондон. В Лондоне выставка длилась полгода, где Турухано Б.Г. был ее директором.

Благодаря высокому уровню разработок ЛГИИС, ими особенно интересовались военные специалисты на Форуме «АРМИЯ-2015»:



Рис. 18. Главный метролог МО РФ

В результате участия ЛГИИС в этом Форуме представители ВПК в 2016 г. приобрели две nano-разработки лаборатории.

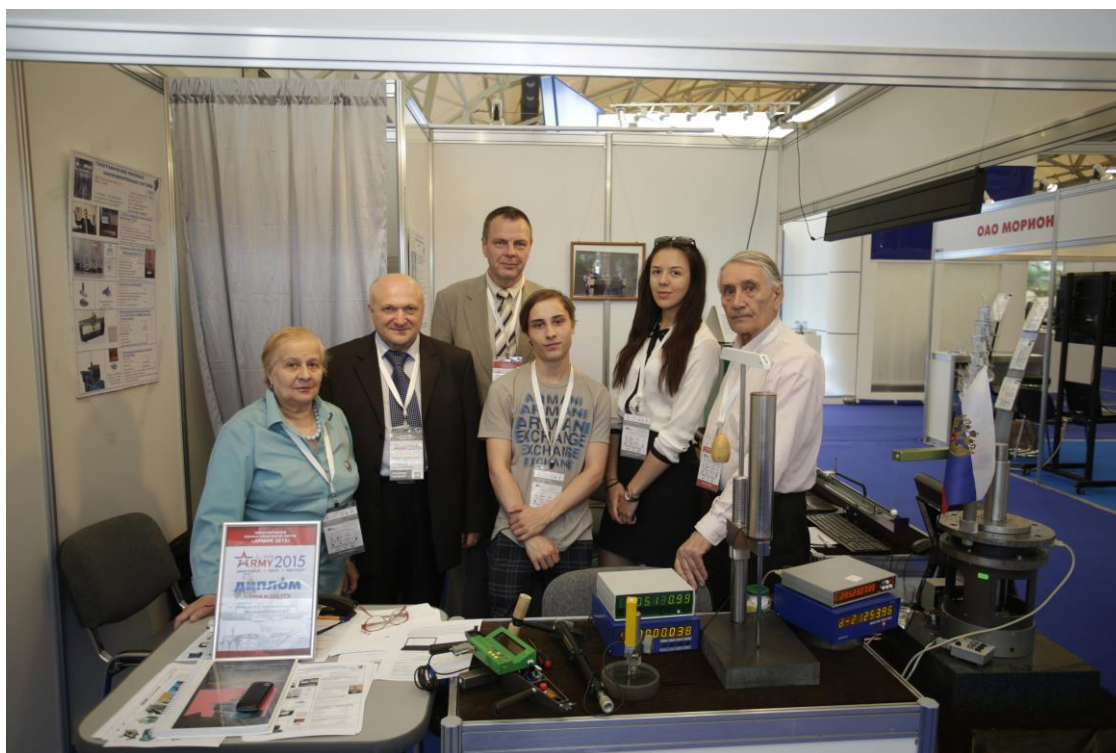


Рис. 19. Сотрудники ЛГИИС на Форуме «АРМИЯ-2015». Слева направо: Турухано Н., Губочкин Г.М., Константинов Л.А., Турухано И.А. (оператор – студент V курса СПб Гос. Университета Кино и телевидения), Грищенко К.М., Турухано Б.Г.

К сожалению, на других форумах лаборатория не имела возможности участвовать. Кроме этого, Турухано Б.Г. сам организовывал выставку по голографии в Гатчинском дворце.

ЛГИИС выиграла первую премию на конкурс РОСНАНО 2011 г. и большое денежное вознаграждение, используемое сегодня ПИЯФ для постройки НАНО ЦЕНТРА. Лаборатория с 2003 по 2018 гг. получила 6 золотых медалей и Гран-при на Международных форумах и выставках НН-ТЕСН по «нанотехнологии».

ЛГИИС осуществлял совместные работы с кафедрой голографии Абердинского университета в Шотландии. Шотландцы вели работы по определению ржавления опор (до 700 метров глубиной) морских нефтяных платформ. В связи с тем, что голографическое изображение передает картину событий лучше, чем фотографическое, они решили воспользоваться не фотографией, а цветной голограммой. Зав. кафедрой голографии Абердинского университета J. Watson неоднократно посещал нашу лабораторию и видел наши цветные голограммы. Он попросил нас научить его записывать цветные голограммы в Шотландии на своей кафедре. Турухано Н., совместно с J. Watson проводили лабораторные эксперименты по записи цветных голограмм. Благодаря этому сотрудничеству мы приобрели опыт по работе с иностранными лазерами широкого оптического диапазона.

За разработку голографических решеток группа сотрудников ЛГИИС получила медали имени И.В. Курчатова, а в 2018 году группа сотрудников (Б.Г. Турухано, Н. Турухано, В.В. Добырн, С.Н. Ханов, Н.А. Щипунова) за цикл работ по наноизмерительным системам завоевала первое место среди 37 работ, поданных на Премию имени И.В. Курчатова.

В настоящее время в Подземной Лаборатории создана лаборатория по аттестации линейных и угловых высокоточных измерительных систем, которую успешно возглавляет внук Б.П. Константинова – Леонид Александрович Константинов.

Отметим также, что на протяжении многих лет Турухано Н. редактировала ежегодные труды Всесоюзных школ по голографии (23 тома), которые впоследствии стали называться «энциклопедией голографии». ЛГИИС на всем протяжении своего существования в лице Турухано Б.Г. была ареной для передачи своих знаний азбуки голографии и высокотехнологических систем ЛГИИС молодому поколению России – школьникам и студентам.