**Лаборатория физики элементарных частиц (ЛФЭЧ)**

**Основные результаты, полученные с участием сотрудников ЛФЭЧ**

“Лаборатория Физики Элементарных Частиц”, называвшаяся вначале “Лаборатория (Сектор) Структуры Ядра”, была образована в 1963 г. в ПИЯФ (в то время ПИЯФ был филиалом Физико-Технического Института им. А.Ф. Иоффе). Вплоть до 2002 г. эту лабораторию возглавлял проф. А.А. Воробьев. В 2002 г. руководителем ЛФЭЧ был избран Г.Д. Алхазов.

1. **Дифракционное рассеяние протонов на ядрах и распределения ядерной материи**

Рассеяние протонов с энергией 1 ГэВ на ядрах оказалось очень эффективным средством изучения ядерной структуры. Первые прецизионные измерения дифференциальных поперечных сечений упругого рассеяния протонов с энергией 1 ГэВ на ядрах были выполнены в ПИЯФ (ЛИЯФ) в 1972 г. Было показано, что этим методом можно получать информацию о распределении ядерной материи с точностью, сопоставимой с той, которая достигается в экспериментах по изучению распределения заряда в ядрах методом рассеяния электронов. В ПИЯФ был изучен большой ряд ядер, от 3He до 208Pb, включая все дваждымагические ядра. Начиная с 1973 г., аналогичные исследования проводились в совместных ПИЯФ-Сакле экспериментах при энергии протонов 1 ГэВ, а позже (с 1977 г.) в Лос-Аламосе (при энергии 0,8 ГэВ). Таким образом, изучение дифракционного рассеяния на ядрах протонов с энергией близкой к 1 ГэВ стало новым направлением экспериментальных исследований в ядерной физике. Благодаря этим исследованиям была получена достаточно точная информация о распределении материи в стабильных ядрах.

1. **Малоугловое дифракционное рассеяние адронов на легчайших ядрах**

В Гатчине, Сакле, Серпухове и ЦЕРН был выполнен ряд экспериментов по малоугловому рассеянию пионов и нуклонов на ядрах водорода, дейтерия и гелия при промежуточной и высокой энергии. Главным компонентом экспериментальной установки в проведенных исследованиях была ионизационная камера протонов отдачи ИКАР, разработанная в ПИЯФ. Созданная установка позволяла измерять поперечные сечения рассеяния при малых переданных импульсах с высокой точностью – 1–2%. В этих экспериментах были измерены как абсолютные дифференциальные сечения рассеяния, так и анализирующие способности. В результате были определены полные сечения рассеяния и отношения реальной к мнимой частей скалярных амплитуд рассеяния. Были определены экспериментальные ограничения на вклады спин-спиновых нуклонных амплитуд. Полученные экспериментальные результаты использовались в нуклон-нуклонных фазовых анализах. Они также позволили найти неупругую теневую поправку к глауберовским сечениям.

1. **Изучение ядерной структуры методом квазиупругого рассеяния протонов с энергией 1 ГэВ**

В ПИЯФ на пучке протонов с энергией 1 ГэВ была изучена оболочечная структура ядер в реакциях (*p*,2*p*) и (*p*,*np*). Обе реакции изучались в идентичных кинематических условиях. Рассеянный протон регистрировался магнитным спектрометром, в то время как выбитый нуклон (протон или нейтрон) регистрировался с помощью время-пролетного спектрометра. Был изучен целый ряд ядер (более 20, начиная от 6Li, вплоть до 208Pb), и в результате была получена детальная информация об энергетической структуре протонных и нейтронных оболочек. До обсуждаемых измерений энергии нейтронных оболочек в большинстве случаев были не известны. Одним из важных результатов работы было наблюдение 1s1/2 и 1p1/2 протонных и нейтронных оболочек в тяжелых ядрах, в том числе в 90Zr и 208Pb. Во многих ядрах было наблюдено спин-орбитальное расщепление нуклонных оболочек, которое можно объяснить в терминах деформационной модели ядра. Полученные данные об энергиях протонных и нейтронных оболочек позволяют определить величины деформационных параметров как для протонных, так и для нейтронных оболочек. Измеренные спектры энергий связи нуклонов в ядрах позволяют также определить разницу между протонными и нейтронными среднеквадратичными радиусами. Полученные данные важны для проверки теоретических моделей атомного ядра.

1. **Мюонный катализ ядерного *dd*- и *dt-* синтеза**

В ПИЯФ был предложен новый экспериментальный метод, оказавшийся особенно эффективным для изучения мезокатализа *dd*-синтеза. Основу метода составляет время-проекционная камера, наполненная дейтерием при давлении до 120 атм. Камера работает в диапазоне температур 28 К ÷ 350 К. Регистрируются остановка мюона в чувствительном объеме камеры и все заряженные продукты *dd*-синтеза. Таким образом, впервые появилась возможность регистрации всех каналов *dd*-синтеза: *ddμ* → 3He+*n*+*μ*, 3He*μ*+*n*, *t*+*p*+*μ*.

Первые эксперименты с использованием нового метода были выполнены в ПИЯФ, затем они были продолжены на Швейцарской Мезонной фабрике. Основные измерения были выполнены в 1994-1996 годах. В результате были определены все основные параметры мезокатализа *dd*-синтеза. Эти результаты составляют современную базу данных, используемую для сравнения с теорией мезокатализа.

Важным результатом, имеющим практическое значение, явилось измерение вероятности прилипания мюона к ядру 4He в реакции*dtμ* → 4He*μ* + *n*. Тем самым было определено максимальное число циклов *dt*-синтеза, катализируемых в среднем одним мюоном. Это число оказалось равным 178±13.

1. **Тройное деление ядер**

На нейтронном пучке гатчинского реактора ВВР-М был выполнен ряд исследований тройного деления атомных ядер. В 1960-ые годы обсуждались два различных процесса тройного деления ядер. Один – в рамках статистической модели деления, в которой предполагалось, что спуск с седловой точки проходит адиабатически медленно, так что формирование осколков происходит непосредственно перед стадией разделения ядра. Другой – по динамической модели, согласно которой считалось, что формирование осколков реализуется на барьере, спуск же с седловой точки происходит быстро, причем во время этого спуска не происходит существенного перераспределения масс осколков. Исследование кинематических характеристик тройного деления ядер позволяет сделать выбор между этими двумя моделями.

В экспериментах, проводившихся в ПИЯФ, были измерены инклюзивные энергетические спектры легких ядер (2,3H, 4,6,8He, 7,8,9Li, 9,10,11Be, 11,12,13,14B, 14,15,16C, 20O), испускаемых в процессе тройного деления. Измерения были выполнены с помощью магнитного время-пролетного спектрометра с мишенями из 233U, 235U, 239U и 242mAm, облучаемыми потоками тепловых нейтронов. В результате проведенных исследований был получен обширный экспериментальный материал, составивший основу для детального кинематического анализа с целью определения начальных условий разлета осколков деления. Основным результатом этого анализа стало подтверждение достаточно высокой величины начальной энергии осколков, которая исключает статистическую модель деления ядер.

1. **Дифракционное рассеяние адронов высокой энергии**

В конце 1960-ых годов исследование глобальных характеристик взаимодействия адронов представляло всеобщий интерес. Каким будет поведение полных сечений взаимодействия адронов с ростом энергии? Будет ли наблюдаться сужение дифракционного конуса (и связанное с этим увеличение размера элементарных частиц) с ростом энергии? В частности, теория полюсов Редже предсказывала постоянство полных сечений в асимптотической области высоких энергий, сопровождающееся логарифмическим сужением дифракционного конуса. Также был вопрос, выполняются ли дисперсионные соотношения, связывающие реальную часть амплитуды рассеяния вперед с полным сечением взаимодействия частиц?

В 1969 году в ПИЯФ был предложен и разработан новый экспериментальный метод исследования малоуглового рассеяния адронов высоких энергий на основе наполненной водородом (дейтерием, гелием) ионизационной камеры высокого давления. Эта камера (ИКАР) явилась одновременно мишенью и детектором ядер отдачи. Новый метод оказался очень плодотворным. Он позволил измерять сечения с высокой точностью (около 1%).

Первые эксперименты с использованием нового метода были выполнены в Гатчине при энергии налетающих протонов в диапазоне 600–1000 МэВ. В этих экспериментах была разрешена “загадка Даттона” (сообщавшего о нарушении дисперсионных соотношений в *pp*- и *πp*- рассеянии) и восстановлена справедливость дисперсионных соотношений в *pp* рассеянии при этих энергиях. Вслед за этим были выполнены эксперименты в Серпухове с пучком *π*-мезонов с энергией 40 ГэВ и в ЦЕРН с *π*-мезонами с энергией 140 ГэВ (эксперимент WA9) и 400 ГэВ (эксперимент NA8). В этих экспериментах были получены важные результаты, которые в совокупности с результатами других экспериментов позволили установить общую картину взаимодействия адронов в области высоких энергий. В частности, был продемонстрирован универсальный характер подъема сечений и сужения дифракционного конуса с увеличением энергии частиц.

1. **Исследование редких распадов гиперонов**

ПИЯФ принял активное участие в исследовании редких распадов гиперонов на гиперонных пучках во ФНАЛ. Начало сотрудничества ПИЯФ-ФНАЛ относится к 1981 году. Основой сотрудничества стало предложение ПИЯФ о постановке эксперимента по изучению *β*-распада Σ– -гиперона в связи со странной ситуацией, сложившейся в исследовании этого процесса. Существовавшие тогда экспериментальные данные по асимметрии распада поляризованного Σ– -гиперона находились в резком противоречии с предсказаниями модели Кабиббо, в то время как *β*-распад других членов барионного октета хорошо описывался этой моделью. Основная трудность в изучении реакции Σ–→ *ne*–**состояла в выделении этой реакции от в тысячу раз более интенсивной реакции Σ–→ *nπ*–.Для преодоления этой трудности группа ПИЯФ предложила использовать детектор переходного излучения, чувствительный к электронам и малочувствительный к *π*-мезонам. Этот детектор был создан, и он оказался очень важным компонентом эксперимента E715 по изучению *β*-распада Σ– -гиперона. Эксперимент был успешно выполнен. Результаты эксперимента оказались в полном согласии с предсказаниями модели Кабиббо, и тем самым было разрешено существовавшее ранее противоречие между теорией и экспериментом. Затем ПИЯФ предложил новый эксперимент (E761). Экспериментальные результаты предыдущих экспериментов (выполненных с относительно малой статистикой) указывали на большую отрицательную асимметрию в распаде Σ+→ *p*γ, что противоречило существовавшей теории. В эксперименте E761 были получены новые данные по распаду Σ+→*p*γ с высокой статистической точностью, которые подтвердили результаты предыдущих экспериментов. В эксперименте E761 также важную роль сыграл детектор переходного излучения. Помимо радиационного распада Σ+→*p*γ, были также исследованы радиационные распады Ξ–→Σ–γ и Ω–→Ξ–γ и измерена поляризация Σ+ и Σ– гиперонов, рождающихся при взаимодействии протонов высокой энергии с ядрами. В дополнение к основной программе экспериментов E715 и E761, были также измерены магнитные моменты гиперонов Σ−, Σ+, + и Ξ−.

1. **Участие в эксперименте L3**

Эксперимент L3, проводившийся на Большом Электрон-Позитронном коллайдере в ЦЕРН был одним из крупнейших экспериментов в физике высоких энергий. ПИЯФ внес существенный вклад в создание экспериментального комплекса L3. Половина кристаллов электромагнитного калориметра была изготовлена совместно из материалов, поставленных ПИЯФ; высоковольтный монитор для мюонного спектрометра был разработан, изготовлен и смонтирован специалистами ПИЯФ; вся электроника сбора данных и контроля эксперимента L3 (около 1000 крейтов CAMAC и FASTBUS) была размещена в стойках с водяным охлаждением, спроектированных (совместно с ЦЕРН) и изготовленных в ПИЯФ; торцевые трековые детекторы FTC вместе с соответствующей электроникой были разработаны и изготовлены в ПИЯФ. Физики ПИЯФ осуществляли эксплуатацию FTC, принимали участие в наборе экспериментальных данных и в их анализе. Результаты, полученные в эксперименте L3, опубликованы в более сотни статей. Одним из главных результатов эксперимента L3 стало подтверждением справедливости Стандартной Модели.

1. **Прецизионное измерение скорости мюонного захвата ядрами 3He**

В 1993 г. группа ПИЯФ совместно с физиками из Швейцарии, Германии, Австрии, Бельгии и США выполнили прецизионные измерения мюонного захвата ядрами 3He. Эксперимент проводился на мюонном пучке Швейцарской мезонной фабрике с помощью нового метода, предложенного и разработанного в ПИЯФ. Основу детектора составляла специальная ионизационная камера, наполненная сверхчистым газом 3He при давлении 120 атм, в которой останавливались мюоны. Ионизационная камера позволяла детектировать как остановившиеся мюоны, так и продукты реакции, т.е. тритоны, дейтроны и протоны. В результате проведенных измерений скорость захвата мюонов ядрами 3He была определена с точностью ~0,3%, т.е. с точностью более чем в 10 раз лучше предыдущих измерений. Эти измерения позволили надежно определить наведенный псевдоскалярный форм-фактор рассматриваемой реакции. Полученные результаты стимулировали совершенствование теории мюонного захвата ядрами.

1. **Мезонная спектроскопия**

Поиск тензорного глюбола является одной из первостепенных задач мезонной спектроскопии в массовой области 1900–2400 МэВ. Имеются довольно строгие доказательства того, что скалярный глюбол существует с массой 1500–1650 МэВ. Он смешивается с соседними  состояниями, и физические резонансы несут большое содержание этого состояния. Решеточные QCD вычисления дают отношение тензорной и скалярной масс глюбола ~1,4 с довольно малой ошибкой. Это соответствует для массы тензорного глюбола 2150–2350 МэВ. Первый шаг в поиске тензорного глюбола состоит в том, чтобы локализовать мезонные резонансы в этой массовой области. Указанием на экзотическое состояние могло быть заметное отклонение положений полюсов от линейной траектории или присутствие состояний, которые не соответствуют линейной траектории вообще. Реальный прогресс был сделан в анализе новых данных по -аннигиляции на лету, полученных Crystal Barrel коллаборацией на LEAR при импульсах антипротонов в области 600–1940 МэВ/*c*. Каналы рождения нейтральных частиц анализировались группой ПИЯФ (Отдел Теоретической Физики и Отдел Физики высоких Энергий) в коллаборации с D.V. Bugg (Queen Mary and Wiestfield college, Лондон), B.S. Zou (IHEP, Пекин) и группой C.Batty (Reserford Applepton Laboratory, Англия).

Были обработаны следующие каналы с нейтральными частицами:****; ; ;; .

На первой стадии был проведен отдельный парциально-волновой анализ двухчастичных и трехчастичных конечных состояний. На следующей стадии все относящиеся к делу каналы рождения были исследованы в рамках комбинированного анализа. Анализ позволил определить значительное число мезонных состояний в области 1900–2400 МэВ, которые сделали возможным провести систематику  состояний в (*n*,*M*2) и (*J*, *M*2) плоскостях.

1. **Эксперимент SPES4-π**

В ядерном центре Saclay на ускорителе Saturne II с использованием магнитного спектрометра SPES4 и с помощью созданного в ПИЯФ трекового детектора, состоящего из сцинтилляционного годоскопа и дрейфовых проволочных камер с гексагональной структурой, было исследовано рассеяние α-частиц с энергией 4 ГэВ на ядрах водорода с целью изучения Роперовского резонанса. Было показано, что неупругое рассеяние α-частиц на протоне происходит за счет возбуждения и распада Δ(1232) резонанса в налетающей α-частице или возбуждении и распада Роперовского *N*(1440) резонанса на протоне мишени, причем Роперовский резонанс распадается на протон и σ-мезон с последующим его распадом на два π-мезона в S-состоянии с изотопическим спином *I* = 0.

1. **Эксперимент D0**

С 1996 года ПИЯФ принимал участие в крупном международном эксперименте D0, проводившемся во ФНАЛ (США) на ускорителе Тэватрон с суммарной энергией сталкивающихся частиц 1,96 ТэВ. Детектор D0 – это универсальный коллайдерный детектор, позволявший исследовать широкий спектр процессов, возникающих при столкновении протонов с антипротонами. Главными задачами этого эксперимента являлись прецизионная проверка Стандартной Модели и поиски проявлений Новой физики. Группа ПИЯФ внесла крупный методический вклад в установку D0, как в электроническую систему сбора информации с 50000 каналов мюонного детектора, так и в программное обеспечение. В эксперименте D0 был получен ряд важных результатов. Была значительно повышена точность измерения массы *t*- кварка, было получено свидетельство о рождении одиночных *t*-кварков, впервые были определены нижний и верхний пределы частоты осцилляций (переходов из частицы в анти-частицу и обратно) *B*s- мезонов.

1. **Эксперимент MuCap**

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

1. **Исследование распределений ядерной материи экзотических ядер методом малоуглового рассеяния протонов в инверсной кинематике**

Для изучения пространственной структуры легких экзотических ядер в ПИЯФ было предложено измерять дифференциальные сечения упругого рассеяния протонов на малые углы в инверсной кинематике. С помощью созданного в ПИЯФ ионизационного спектрометра ИКАР был проведен цикл измерений на пучках радиоактивных ядер с энергией 0,7 ГэВ/нуклон в Ядерном центре тяжелых ионов (GSI, Дармштадт). Полученные сечения анализировались в рамках теории Глаубера с использованием феноменологических радиальных распределений плотности с двумя свободными параметрами. Были найдены распределения ядерной материи и определены среднеквадратичные радиусы ядер изотопов He, Li, Be, B и C. Экспериментальные данные указывают на наличие нейтронного гало у ядер 6He, 8He, 11Li, 14Be, 15C и протонного гало у ядра 8B. Самое большое нейтронное гало наблюдается у ядра 11Li. В нейтроноизбыточных ядрах 8Li, 9Li, 12Be и 16C обнаружена значительная нейтронная шуба.

1. **Участие в экспериментах LHCb и CMS на Большом Адронном Коллайдере**

Детектор LHCb создан с целью изучения природы нарушения СР инвариантности в распадах *В*-мезонов, а также для исследования редких распадов *В*-мезонов, в которых может быть обнаружена «новая физика» за пределами Стандартной Модели (СМ). 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. Одним из важных результатов эксперимента LHCb явилось наблюдение сверхредкого распад *B*s мезона на два мюона. Согласно Стандартной Модели, 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 затем подтвержденная в эксперименте CMS, согласуется со СМ. Полученный результат закрывает ряд новых теорий и является сильным аргументом в пользу расширения области применимости СМ.

CMS – это 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. Наиболее важным результатом эксперимента CMS явилось открытие (совместно с экспериментом ATLAS) бозона Хиггса–ключевой частицы современной теории элементарных частиц.