

## 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  $^3\text{He}$  до  $^{208}\text{Pb}$ , 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.

#### 2. 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.

#### 3. 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  $(p,2p)$  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  ${}^6\text{Li}$ , вплоть до  ${}^{208}\text{Pb}$ ), 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  $1s_{1/2}$  и  $1p_{1/2}$  протонных и нейтронных оболочек в тяжелых ядрах, в том числе в  ${}^{90}\text{Zr}$  и  ${}^{208}\text{Pb}$ . Во многих ядрах было наблюденно 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.

#### 4. 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  $28\text{ K} \div 350\text{ K}$ . Регистрируются остановка мюона в чувствительном объеме камеры и все заряженные продукты  $dd$ -синтеза. Таким образом, впервые появилась возможность регистрации всех каналов  $dd$ -синтеза:  $dd\mu \rightarrow {}^3\text{He}+n+\mu$ ,  ${}^3\text{He}\mu+n$ ,  $t+p+\mu$ .

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  ${}^4\text{He}$  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  $178 \pm 13$ .

#### 5. 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 ( ${}^2,3\text{H}$ ,  ${}^4,6,8\text{He}$ ,  ${}^7,8,9\text{Li}$ ,  ${}^9,10,11\text{Be}$ ,  ${}^{11,12,13,14}\text{B}$ ,  ${}^{14,15,16}\text{C}$ ,  ${}^{20}\text{O}$ ), испускаемых в процессе тройного деления. Измерения были выполнены с помощью магнитного время-пролетного спектрометра с мишенями из  ${}^{233}\text{U}$ ,  ${}^{235}\text{U}$ ,  ${}^{239}\text{U}$  и  ${}^{242\text{m}}\text{Am}$ , 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.

## 6. 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  $p\bar{p}$ - рассеянии) и восстановлена справедливость дисперсионных соотношений в  $pp$  рассеянии при этих энергиях. Вслед за этим были выполнены эксперименты в Серпухове с пучком  $\pi$ -мезонов с энергией 40 ГэВ и в ЦЕРН с  $\pi$ -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.

## 7. 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  $\beta$ -распада  $\Sigma^-$ -гиперона в связи со странной ситуацией, сложившейся в исследовании этого процесса. Существовавшие тогда экспериментальные данные по асимметрии распада поляризованного  $\Sigma^-$ -гиперона находились в резком противоречии с предсказаниями модели Кабиббо, в то время как  $\beta$ -распад других членов барионного октета хорошо описывался этой моделью. Основная трудность в изучении реакции  $\Sigma^- \rightarrow ne^- \tilde{\nu}_e$  состояла в выделении этой реакции от в тысячу раз более интенсивной реакции  $\Sigma^- \rightarrow n\pi^-$ . Для преодоления этой трудности группа ПИЯФ предложила использовать детектор переходного излучения, чувствительный к электронам и малочувствительный к  $\pi$ -мезонам. Этот детектор был создан, и он оказался очень важным компонентом эксперимента E715 по изучению  $\beta$ -распада  $\Sigma^-$ -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  $\Sigma^+ \rightarrow p\gamma$ , что противоречило существовавшей теории. В эксперименте E761 были получены новые данные по распаду  $\Sigma^+ \rightarrow p\gamma$  с высокой статистической точностью, которые подтвердили результаты предыдущих экспериментов. В эксперименте E761 также важную роль сыграл детектор переходного излучения. Помимо радиационного распада  $\Sigma^+ \rightarrow p\gamma$ , были также исследованы радиационные распады  $\Xi^- \rightarrow \Sigma^-\gamma$  и  $\Omega^- \rightarrow \Xi^-\gamma$  и измерена поляризация  $\Sigma^+$  и  $\Sigma^-$  гиперонов, рождающихся при взаимодействии протонов высокой энергии с ядрами. В дополнение к основной программе экспериментов E715 и E761, были также измерены магнитные моменты гиперонов  $\Sigma^-$ ,  $\Sigma^+$ ,  $\bar{\Sigma}^+$  и  $\Xi^-$ .

## 8. 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 FTS вместе с соответствующей электроникой были разработаны и изготовлены в ПИЯФ. Физики ПИЯФ осуществляли эксплуатацию FTS, 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.

## 9. Прецизионное измерение скорости мюонного захвата ядрами ${}^3\text{He}$

В 1993 г. группа ПИЯФ совместно с физиками из Швейцарии, Германии, Австрии, Бельгии и США выполнили прецизионные измерения мюонного захвата ядрами  ${}^3\text{He}$ . 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  ${}^3\text{He}$  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  ${}^3\text{He}$  была определена с точностью  $\sim 0,3\%$ , 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.

## 10. 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  $q\bar{q}$  состояниями, и физические резонансы несут большое содержание этого состояния. Решеточные QCD вычисления дают отношение тензорной и скалярной масс глюбола  $\sim 1,4$  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  $\bar{p}p$ -аннигиляции на лету, полученных Crystal Barrel коллаборацией на LEAR при импульсах антипротонов в области 600–1940 МэВ/с. 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 (ИНЕР, Пекин) и группой C.Batty (Reserford Applepton Laboratory, Англия).

Были обработаны следующие каналы с нейтральными частицами:

$$p\bar{p} \rightarrow \pi^0\pi^0, \eta\eta, \eta\eta', \pi^0\eta, \pi^0\eta'; \pi^0\omega, \eta\omega, \eta'\omega; 3\pi^0, 2\pi^0\eta; \pi^0 2\eta, \pi^0\eta\eta'; 4\pi^0, 3\pi^0\eta, 2\pi^0 2\eta.$$

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  $q\bar{q}$  состояний в  $(n, M^2)$  и  $(J, M^2)$  плоскостях.

## 11. Эксперимент SPES4-п

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  $\alpha$ -частиц с энергией 4 ГэВ на ядрах водорода с целью изучения Роперовского резонанса. Было показано, что неупругое рассеяние  $\alpha$ -частиц на протоне происходит за счет возбуждения и распада  $\Delta(1232)$  резонанса в налетающей  $\alpha$ -частице или возбуждении и распада Роперовского  $N(1440)$  резонанса на протоне мишени, причем Роперовский резонанс распадается на протон и  $\sigma$ -мезон с последующим его распадом на два  $\pi$ -мезона в S-состоянии с изотопическим спином  $I = 0$ .

## 12. 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.

### **13. Эксперимент MuСар**

В международном эксперименте MuСар 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.

### **14. 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  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^8\text{He}$ ,  ${}^{11}\text{Li}$ ,  ${}^{14}\text{Be}$ ,  ${}^{15}\text{C}$  и протонного гало у ядра  ${}^8\text{B}$ . Самое большое нейтронное гало наблюдается у ядра  ${}^{11}\text{Li}$ . В нейтроноизбыточных ядрах  ${}^8\text{Li}$ ,  ${}^9\text{Li}$ ,  ${}^{12}\text{Be}$  и  ${}^{16}\text{C}$  обнаружена значительная нейтронная шуба.

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

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 (SM). 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 м<sup>2</sup>. 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 SM вероятность распада  $B_s$  мезона на два мюона может быть больше, чем та, что следует из SM. Вероятность распада  $B_s$  мезона на два мюона, определенная в эксперименте LHCb и затем подтвержденная в эксперименте CMS, согласуется со SM. Полученный результат закрывает ряд новых теорий и является сильным аргументом в пользу расширения области применимости SM.

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.