

**В.М. Гришин, Ф.Ф. Каюмов, С.К. Котельников, Б.Н. Ломоносов,
С.Н. Майбуров, Г.И. Мерзон, Н.Г. Полухина, А.С. Русецкий,
В.А. Рябов, Н.И. Старков, О.Д. Чернавская, В.А. Чечин,
А.П. Шмелева**

К ИСТОРИИ ФИАН
ЛАБОРАТОРИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ
(Прошлое, Настоящее, Будущее)

-

Москва, 2011

ЛАБОРАТОРИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

(Отдел космических излучений, Отделение ядерной физики)
и астрофизики ФИАН)

Лаборатория элементарных частиц (ЛЭЧ) была основана известными советскими учеными–физиками братьями А.И. Алихановым и А.И. Алиханяном в 1943 г. Первоначально лаборатория базировалась в Институте физических проблем Академии наук СССР. Основной целью ЛЭЧ были исследования состава космических лучей на высотах гор.

1 января 1950 г. по инициативе тогдашнего Президента Академии наук С.И.Вавилова, стремившегося сосредоточить исследования космических лучей в рамках единого института, ЛЭЧ была переведена в Физический институт им. П.Н. Лебедева (ФИАН). Руководителем ЛЭЧ со дня ее основания и до своей кончины в 1978 г. был член-корреспондент АН СССР Артем Исаакович Алиханян. (Жизни и деятельности А.И. Алиханяна посвящен сборник «Артем Алиханян в воспоминаниях друзей и коллег», Физматлит, Москва, 2008).



А.И. Алиханян (1908—1978).

После смерти А.И. Алиханяна дирекция Отделения «В» ФИАН пыталась присоединить ЛЭЧ к Лаборатории космических лучей. Эта попытка была отвергнута благодаря единой твёрдой позиции сотрудников ЛЭЧ (и, в первую очередь, её временного руководителя д.ф.-м.н. М.И. Дайона, настоявшего на сохранении лаборатории).

В 1979 – 2008 гг. заведующим ЛЭЧ был д.ф.-м.н В.А. Царев. С 2009г. лабораторией руководит д.ф.-м.н. Н.Г. Полухина.

За время существования ЛЭЧ ее сотрудники выполнили множество экспериментальных и теоретических работ по физике элементарных частиц и их взаимодействиях при высоких энергиях, как в космических лучах, так и на ускорителях.



В.А. Царёв (1935—2008 гг.)

Н.Г. Полухина

Характерная особенность ЛЭЧ – поиск, развитие и применение новых экспериментальных методов исследования, открывающих прежде не доступные возможности решения актуальных физических задач.

Исследования ЛЭЧ по физике космических лучей и нейтринной физике выполнялись на высокогорных научных станциях «Арагац» (высота 3200 м) и «Нор–Амберд» (2000 м) и под землей, в том числе в Лаборатории Гран–Сассо (Италия). Подводные эксперименты (вплоть до рекордных глубин 6 км) проводились с борта научно исследовательских судов Академии наук в Чёрном, Средиземном морях и в Атлантическом и Тихом океанах. В настоящее время разрабатываются проекты экспериментов по изучению космических лучей на искусственных спутниках Земли и Луны.

Исследования по физике высоких энергий и физике нейтрино выполнялись на протонных ускорителях (в Дубне, Москве, Протвино, Женеве, Батавии и Брукхейвене), а также на электронных ускорителях (в Москве, Ереване и Гамбурге).

Успешному проведению разнообразных экспериментов ЛЭЧ способствовали талант её научных сотрудников, творческая атмосфера в коллективе и самоотверженный труд замечательных инженеров, техников, лаборантов и механиков. Благодаря им были разработаны, изготовлены и испытаны такие сложные физические приборы как тонкостенные цилиндрические газоразрядные счетчики малого диаметра, камеры Вильсона,

пузырьковые и искровые камеры, сцинтилляционные и черенковские детекторы. Наличие сильной инженерной базы оказалось решающим фактором для целого ряда исследований.

В 1950–1960-х гг. ЛЭЧ являлась кузницей кадров и «инкубатором» молодых ученых и аспирантов из Московского Инженерно–физического института (МИФИ), Ереванского физического института (ЕрФИ), Института физики высоких энергий (ИФВЭ) и других научных учреждений. Сотрудники ЛЭЧ стали соавторами двух монографий, а также многочисленных обзоров, опубликованных в ведущих физических журналах.

За свою более чем 65–летнюю историю ЛЭЧ понесла и ощутимые потери личного состава. Ушли из жизни её основатель А.И. Алиханян, сменивший его на посту заведующего ЛЭЧ В.А. Царев, научные сотрудники Н.В. Шостакович, М.И. Дайон, В.Г. Кириллов–Угрюмов, Л.П. Котенко, Е.П. Кузнецов, Л.А. Кузин, В.К. Ермилова, П.С. Васильев, А.Г. Мартынов, В.М. Фёдоров, С.В. Муравьев. На смену им пришли способные молодые ученые, которые подхватили эстафету и продолжают творческую научную деятельность ЛЭЧ.

В 2011 г. ЛЭЧ насчитывает 36 сотрудников, в том числе 6 докторов и 18 кандидатов наук, 1 докторанта и 4 аспиранта.

1. Исследование состава и спектров космических лучей на высотах гор с помощью магнитных спектрометров (1943 – 1957 гг.)

В 1940–1950-е годы основной задачей ЛЭЧ было изучение космических лучей на высотах гор, определение их состава и характера взаимодействия с веществом. В 1943–1948 гг. в исследованиях на горе Арагац в Армении (высота 3200 м над уровнем моря), проведенных сотрудниками ЛЭЧ и армянскими физиками, была обнаружена третья (ядерная) компонента космических лучей и так называемые «узкие» ливни. Эти исследования, наряду с работами на Памире сотрудников В.И. Векслера, Н.А. Добротина, Г.Т. Зацепина и др., заставили пересмотреть прежнее представление об электронно-фотонной природе космических лучей. Было установлено, что космическое излучение на высотах гор определяется ядерно-каскадными процессами в атмосфере Земли, вызванными первичными космическими лучами ядерного происхождения.

В 1945 г. А.И. Алиханов и А.И. Алиханян начали систематические исследования состава, спектра импульсов и знака заряда космических частиц на высоте гор. Для этой цели на горе Арагац был сооружён первый магнитный спектрометр (Рис.1.1), в котором импульсы частиц измерялись по кривизне их траекторий в магнитном поле с помощью годоскопов на основе газоразрядных счетчиков Гейгера-Мюллера диаметром всего 4,6 мм. В последующие годы было создано еще несколько спектрометров (с максимальным измеримым импульсом 100 ГэВ/с). Под магнитными спектрометрами находились слои поглотителей, прослоенных гейгеровскими счетчиками (с 1952 г. вместо них

стали использовать большие камеры Вильсона с пластинами плотного вещества), что позволяло измерять пробеги частиц. Одновременное измерение импульса и пробега (в случае чисто ионизационного торможения частиц в поглотителе) позволяло определять массу частицы.



Высокогорная научная станция «Арагац» (зима 1953 г.).

В первых работах с магнитными спектрометрами (1948–1949 гг.) А.И. Алихановым и А.И. Алиханяном было высказано предположение о существовании новых элементарных частиц (варитронов). Несмотря на ошибочность этого утверждения, сама идея разнообразия и возможности взаимного превращения элементарных частиц оказалась исключительно плодотворной и была подтверждена дальнейшим развитием физики высоких энергий.

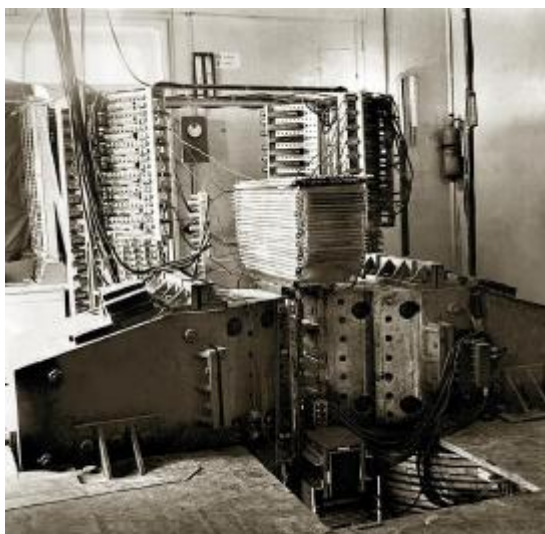


Рис. 1.1. Электромагнитный спектрометр для изучения космических лучей.

Разработанная в ЛЭЧ в 1952 – 1953 гг. В.М. Федоровым и М.И. Дайоном большая (объемом около 40 л) камера Вильсона обеспечивала четкие

фотографии треков. Ионизационный характер торможения частиц определялся по градиенту оптической плотности (почернения) следов, методом фотометрирования.

С помощью магнитных спектрометров, оснащенных большими камерами Вильсона (Рис.1.2), в 1952 – 1953 гг. был измерен спектры импульсов и масс частиц космического излучения на высотах гор. Кроме протонов, мюонов и пионов были обнаружены дейтроны (около 10% от потока протонов) и нейтроны с энергией до нескольких ГэВ. Были измерены спектры импульсов электронов и позитронов (с энергией до 2 ГэВ) и соотношение их интенсивностей, спектры импульсов протонов, дейтронов и мюонов (до 20 ГэВ/с), определен положительный избыток мюонов в космических лучах. Были изучены процессы генерации в различных мишенях протонов и пионов и измерены их спектры, определено сечение ($n-p$) взаимодействия при энергиях до нескольких ГэВ. Таким образом, благодаря применению передовых для того времени методик были получены экспериментальные данные о составе и свойствах космического излучения на высотах гор и новые данные о взаимодействии частиц высоких энергий с веществом.



Участники экспедиций на Арагац 1951–1954 гг.

Изучение рассеяния мюонов в пластинах камеры Вильсона, расположенной под магнитным спектрометром, позволило доказать отсутствие аномального рассеяния, наблюдаемого некоторыми зарубежными авторами.

В исследованиях космических лучей на высотах гор методом магнитных спектрометров участвовали сотрудники ЛЭЧ М.И. Дайон, В.Г. Кириллов-Угрюмов, В.М. Федоров, Н.В. Шостакович, Г.И. Мерзон, А.П. Шмелева и др. На этих работах воспитывались студенты-дипломники из Москвы (МИФИ), а также студенты, и молодые ученые из Армении, Грузии, Азербайджана и Узбекистана.

В 1956 – 1957 гг. М.И. Дайоном и Л.П. Потаповым в подземной лаборатории МГУ на глубине 40 м водного эквивалента были впервые измерены спектры импульсов мюонов малых энергий под землей.

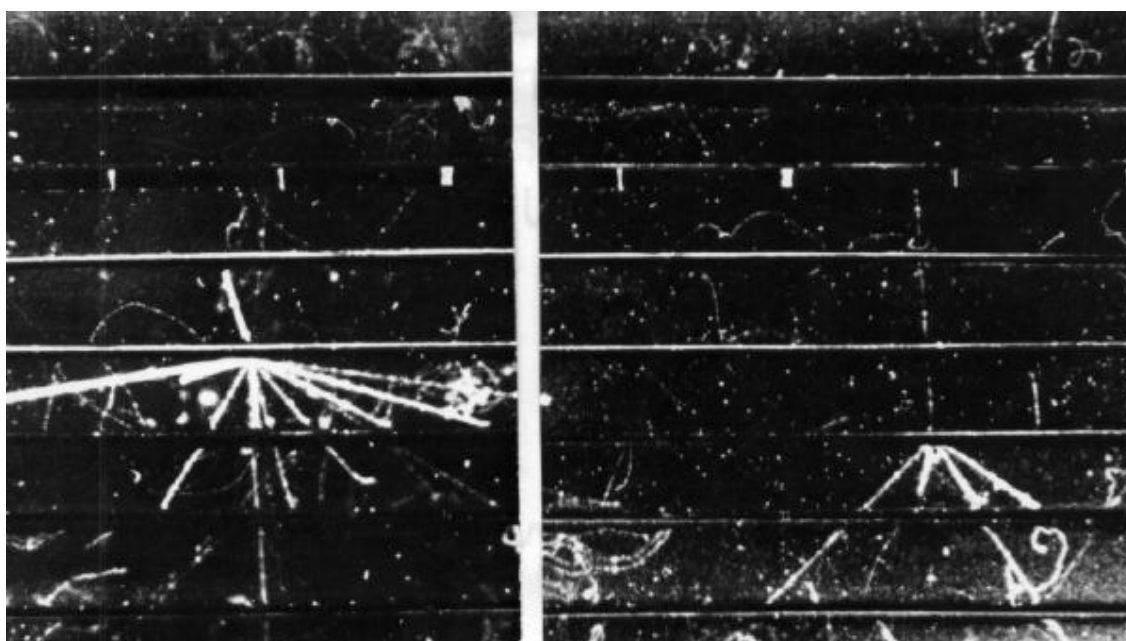


Рис. 1.2. Следы космических частиц в камере Вильсона, установленной под магнитным спектрометром (1953 г.).

Сравнение наземного и подземного спектров мюонов подтвердило справедливость представлений классической теории ионизационного торможения заряженных частиц в плотных средах. Общим для спектров импульсов вторичных космических лучей оказался тот факт, что они наследуют степенной спектр с тем же показателем $-2,7$, который характерен для спектра первичного космического излучения.

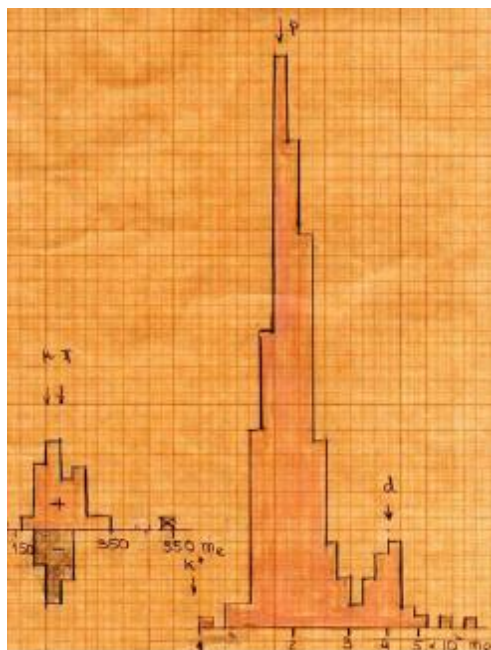


Рис. 1.3. Спектр масс космических частиц (измерения 1952–1953 гг.). Хорошо видны линии $\mu(\pi)$ - мезонов, протонов и дейтронов.

Основные результаты цикла работ по изучению состава и спектров космических частиц на высотах гор и описание новых разработанных в ЛЭЧ экспериментальных методов исследования опубликованы в отечественных научных журналах ЖЭТФ **18**, № 3, 301 (1948); ДАН СССР **86**, 259 (1952); Изв. АН СССР, сер. физ. **17**, 72 (1953), **19**, 950 (1955); ПТЭ №1, 1 (1957), №3, 15 (1957).



Высокогорная научная станция «Арагац» на берегу горного озера Сев-Лич.

2. Исследования элементарных частиц на ускорителях методом пузырьковых камер (1957 – 1964 гг.)

В середине 1950–х гг. в связи с бурным развитием техники ускорителей фронт исследований по физике высоких энергий в значительной мере переместился от космических лучей к экспериментам на ускорителях. Последовавший за этим прогресс наших знаний о типах, свойствах и взаимодействиях элементарных частиц тесно связан с появлением и усовершенствованием пузырьковых камер, сочетающих в себе достоинства трековых детекторов и плотных ядерных мишеней.

В 1954 г. вскоре после пионерских работ Д. Глезера (США), создавшего первую пузырьковую камеру, его эксперименты были воспроизведены сотрудниками ЛЭЧ Л.П. Котенко, Е.П. Кузнецовым и Ю.С. Поповым. Они изготовили одну из первых в нашей стране пропановую пузырьковую камеру объемом 0,75 л. Внутри камеры была установлена пластина плотного поглотителя для торможения пионов и мюонов с целью изучения их распадов и рассеяния. В 1956–1957 гг. эта камера экспонировалась в пучках медленных пионов на фазотроне ОИЯИ в Дубне с целью изучения эффектов несохранения пространственной четности в $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$ распадах. В этих опытах, в частности, было показано, что анизотропия распада $\mu^+ \rightarrow e^+$ растет с энергией позитронов. Такой результат подтверждал выводы предложенной в то время теории двухкомпонентного нейтрино.

В 1958 г. на созданной в ЛЭЧ пропановой пузырьковой камере объемом 3 л (Рис.2.1), был выполнен цикл экспериментов на фазотроне и синхрофазотроне ОИЯИ.

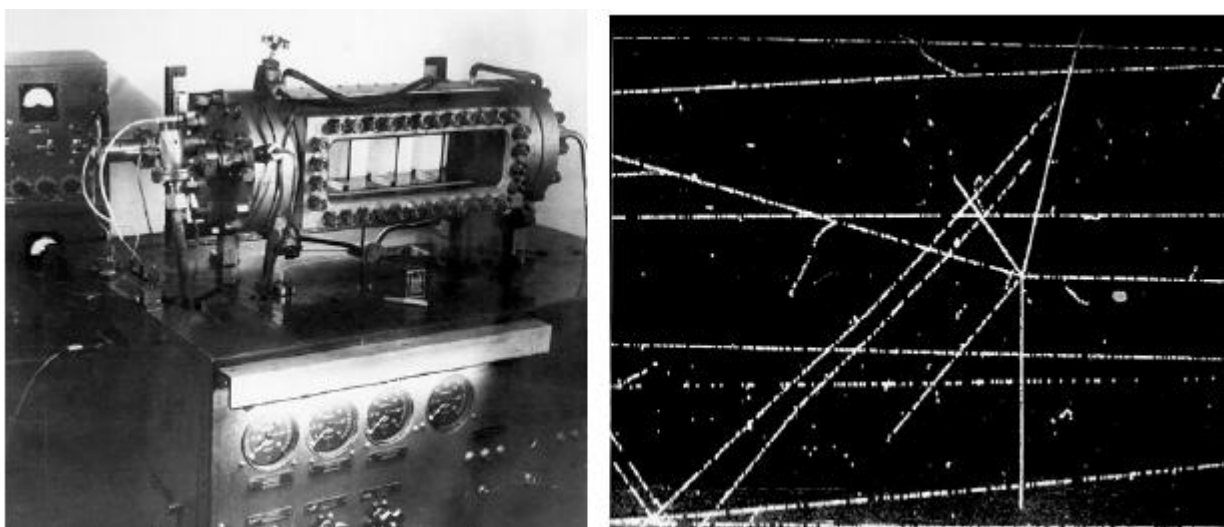


Рис. 2.1. Трехлитровая пропановая пузырьковая камера и фотографии следов пионов с импульсом 2,8 ГэВ/с, генерированных на синхрофазотроне ОИЯИ.

Вопреки существовавшим тогда утверждениям о наличии аномального рассеяния мюонов было показано, что их упругое рассеяние на ядрах углерода имеет чисто кулоновскую природу. Был твердо установлен отталкивающий характер потенциала взаимодействия π^- – мезонов с ядром углерода в S-состоянии, измерены сечения упругого, а также неупругого рассеяния и полное сечение взаимодействия π^- – мезонов на протонах и ядрах углерода при энергии 2,7 ГэВ. Необходимые расчеты проводились на отечественной ЭВМ Урал-4. В этих экспериментах, проведенных А.И. Алиханяном, Л.П. Котенко, Е.П. Кузнецовым, Л.А. Кузиным и Г.И. Мерзоном вместе с коллегами из МИФИ (В.Г. Кирилловым-Угрюмовым и А.М. Гальпером) и Армении (А.С. Алексаняном, И.Б. Вартазарян и Л.П. Кишиневской) впервые в мировой практике применялся метод дистанционного видеонаблюдения за качеством следов и режимом работы пузырьковой камеры.

В 1959 г. сотрудниками ЛЭЧ и МИФИ В.Г. Кирилловым-Угрюмовым, А.М. Гальпером, Л.П. Котенко, Л.А. Кузиным, Е.П. Кузнецовым и Ю.С. Поповым была создана гигантская для того времени фреоновая (50%CFCl₃+50%F₂Cl₂) пузырьковая камера объемом 0,57 м³ (Рис.2.2), которая долго оставалась крупнейшей в мире. Благодаря большому объему, умеренной радиационной длине (23,2 см) и высокой плотности (1,1 г/см³) рабочей жидкости камера эффективно регистрировала жесткие γ -кванты.

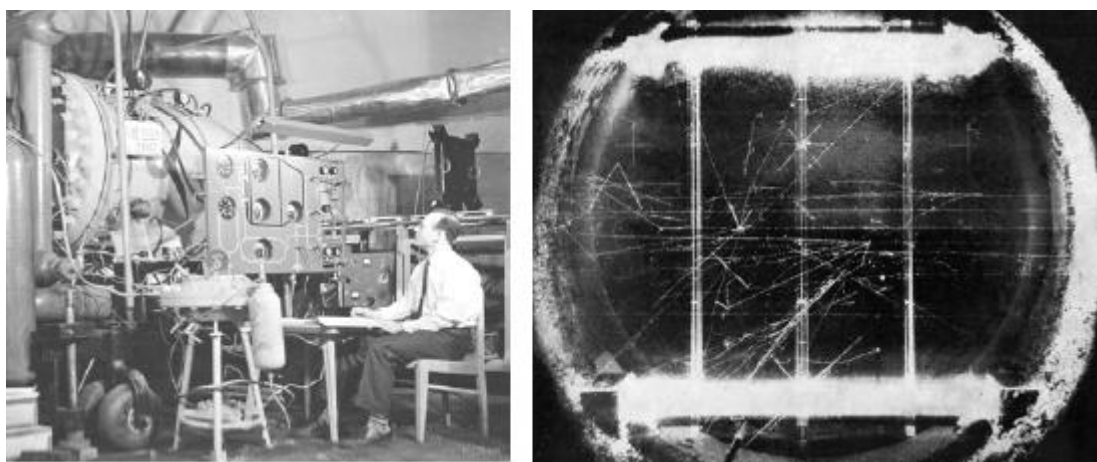


Рис.2.2. Слева: аспирант А.М. Гальпер у пульта управления Большой фреоновой пузырьковой камере объемом 0,57 м³; справа: следы частиц в этой пузырьковой камере.

В 1963 г. она была успешно применена в экспериментах по поиску распадов долгоживущих нейтральных каонов на три нейтральных пиона ($K_L^0 \rightarrow 3\pi^0 \rightarrow 6\gamma \rightarrow 6e^+e^-$), где заряженные продукты (пары e^+e^-) появлялись лишь в четвертом поколении. В качестве сигнатуры распада $K_L^0 \rightarrow 3\pi^0$ использовался тот факт, что направления вылета трех и более пар e^+e^- пересекаются в одной точке (точнее, в малом объеме внутри камеры). В эксперименте было зарегистрировано 96 подобных событий с числом пар e^+e^- $N = 3-6$, что свидетельствовало об обнаружении искомых распадов, и 39 событий,



А.И. Алиханян, Л.П. Котенко и Е.П. Кузнецов на Международной конференции по физике высоких энергий (Киев, 1959 г.)

когда 1 или 2 пары e^+e^- были направлены в вершину вилки, составленной треками двух заряженных частиц. Для расчета эффективности регистрации таких событий использовался метод математического моделирования, который тогда только входил в практику физических экспериментов. Расчеты проводились на ЭВМ ЕС-1020.

Отношение вероятностей распадов $K_L^0 \rightarrow 3\pi^0$ и $K_L^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ оказалось равным $R = 2,0 \pm 0,6$, что соответствовало теоретическим предсказаниям. Полученные данные вошли в Международные таблицы свойств элементарных частиц.

Основные результаты этого цикла исследований опубликованы в физических журналах ЖЭТФ **41**, 1394 (1961), **42**, 1158 (1962), **45**, 18 (1963), **46**, 1504 (1963); ПТЭ, № 6, 34 (1961) и в Трудах 12 Международной конференции по физике частиц высоких энергий, 2, 482, Дубна, 1964, а также в сборнике «Физика элементарных частиц», Москва, Атомиздат, 1966, с.107.

3. Развитие методики искровых и стримерных камер (1960 – 1974 гг.)

В начале 1960-х гг. в ЛЭЧ интенсивно развивались новые методы ядерно-физического эксперимента. Эти работы привели к созданию управляемых импульсных газоразрядных детекторов заряженных частиц: плоскопараллельных воздушных искровых счетчиков, воздушно-аргоновых

искровых камер, а также искровых камер различного типа, наполненных инертными газами (М.И. Дайон, Б.И. Лучков, Л. Ф. Климанова и др.). В этих детекторах искровой разряд непосредственно и с большой точностью следовал вдоль траектории заряженной частицы.

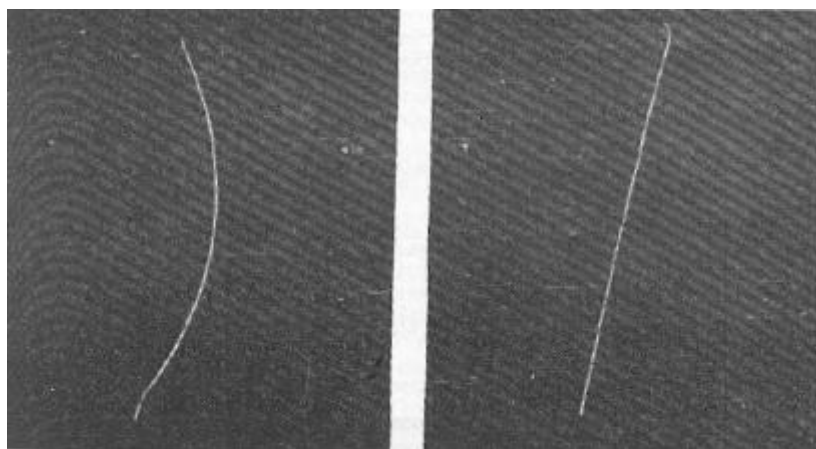


Рис. 3.1. Следы частиц в широкоазорной искровой камере с разрядным промежутком 40 см (магнитное поле 10 Тл). Слева – в плоскости магнитного отклонения; справа – в боковой плоскости, параллельной магнитному полю.

В 1963 г. в эксперименте, выполненном А.И. Алиханяном и др. по идее М.И. Дайона на высокогорной научной станции Нор-Амберд, было доказано, что искровой разряд повторяет траекторию заряженной частицы, искривленную магнитным полем (Рис.3.1). Эти так называемые широкоазорные искровые камеры получили большое распространение, и на Западе долгое время называли «русскими камерами». Работы ЛЭЧ в 1960–е гг. по развитию методики искровых, а затем и стримерных камер, позволили существенно улучшить достоверность регистрации и точность локализации следов заряженных частиц. Было показано, что увеличение давления газа в искровой камере (М.И. Дайон, Г.И. Мерзон и др.) и добавки паров воды или спирта (Л.П. Котенко, Г.И. Мерзон и др.) существенно повышают точность локализации треков частиц благодаря уменьшению диффузии электронов ионизации (Рис.3.2–3.5). Это дало возможность создать на высокогорной научной станции Нор-Амберд в Армении прецизионный магнитный искровой спектрометр с координатной точностью 0,1–0,2 мм (в отличие от точности 1–2 мм, достигаемой в магнитных спектрометрах с годоскопами счетчиков Гейгера-Мюллера). Тем самым появилась возможность измерять импульсы заряженных частиц вплоть до ~ 300 ГэВ/с.

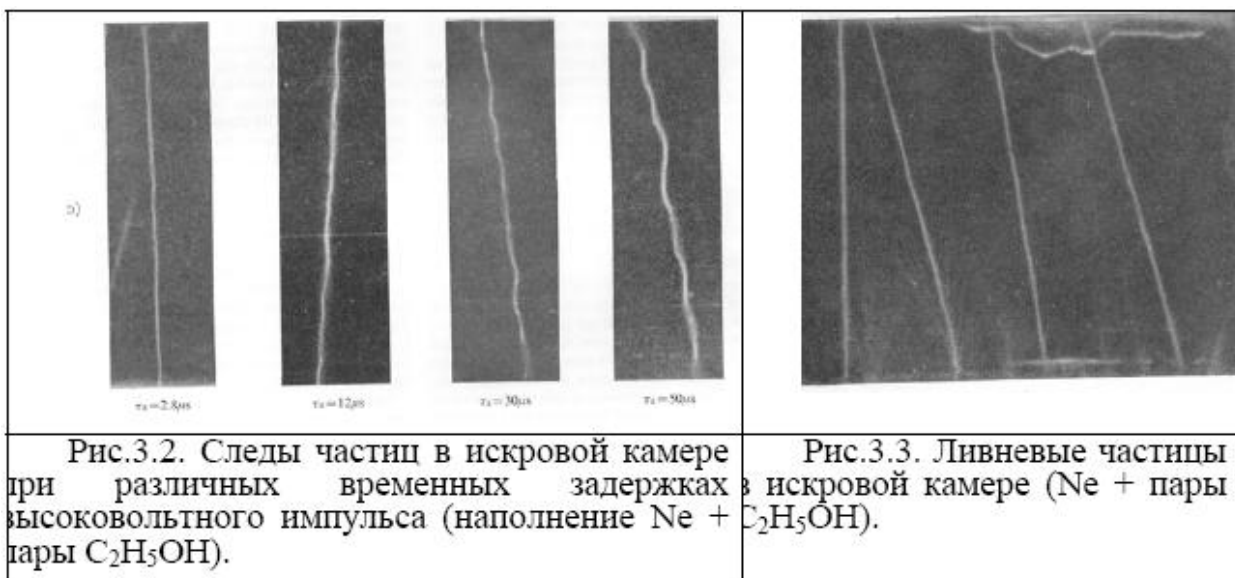


Рис.3.2. Следы частиц в искровой камере при различных временных задержках высоковольтного импульса (наполнение Ne + пары C₂H₅OH).

Рис.3.3. Ливневые частицы в искровой камере (Ne + пары C₂H₅OH).

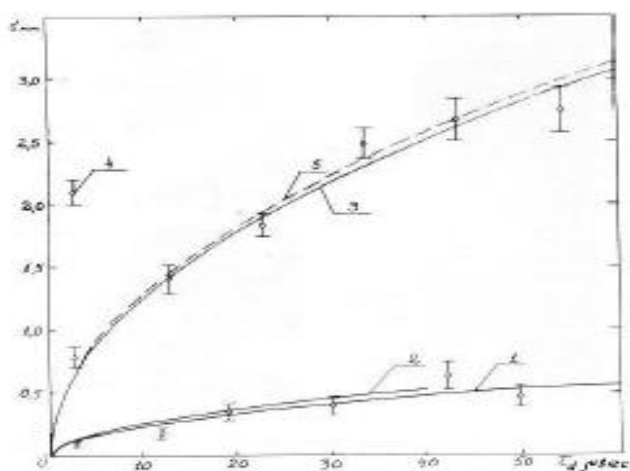


Рис. 3.4. Среднеквадратичное отклонение искрового трека от траектории частицы как функция времени задержки высоковольтного импульса при различном наполнении искровой камеры. 1 – Ne + пары спирта; 2 – Ne + пары воды; 3 – чистый Ne; 4 – особо чистый Ne; 5 – данные, стримерной камеры. Плавные кривые – аппроксимация точек диффузионным законом $\sigma = \text{const}(D\tau_d)^{1/2}$.

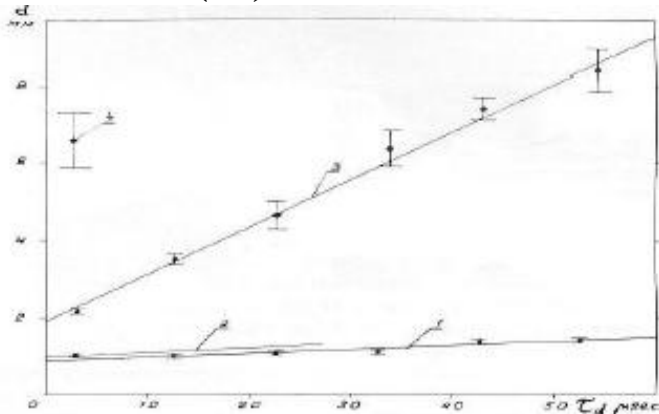


Рис. 3.5. Ширина искрового трека как функция задержки высоковольтного импульса. 1 – Ne + пары спирта; 2 – Ne + пары воды; 3 – чистый Ne; 4 – особо чистый Ne. Сплошные линии – аппроксимация точек линейным законом.

За достижения в разработке новой трековой методики широкоазорных искровых камер в 1970 г. – член-корреспондент АН СССР А.И. Алиханян вместе с учеными из ЕрФИ, МИФИ и Института физики АН Грузии были удостоены Ленинской премии.

В 1973 г. в ЛЭЧ была создана стримерная камера с пластинами из свинцового стекла для наблюдения распадов K^+ -мезонов (М.И. Дайон, С.А. Крылов и др.). Общая толщина пластин достигала 2–3 радиационных длин, что позволяло идентифицировать (по образованию ливня) распадные позитроны или (при отсутствии ливня) мюоны (пионы). Эта стримерная камера успешно использовалась в составе магнитного спектрометра ИТЭФ в экспериментах по исследованию распадов остановившихся в мишени K^+ -мезонов, генерированных протонным ускорителем с энергией 10 ГэВ. Таким образом, развитие в ЛЭЧ техники искровых и стримерных камер позволило получить новые важные экспериментальные данные по физике элементарных частиц.

В развитии методики искровых камер в ЛЭЧ в разные годы принимали участие А.И. Алиханян, В.Н. Болотов, П.С. Васильев, Л.Ф. Васильева, А.С. Виноградов, М.И. Дайон, М.И. Девишев, Л.П. Котенко, Б.И. Лучков, Г.И. Мерзон, А.П. Шмелёва. М.И. Дайон был одним из создателей монографии «Искровая камера» (Атомиздат, Москва, 1967).



Монография «Искровая камера»

Основные результаты ЛЭЧ по разработке и исследованию искровой методики регистрации заряженных частиц опубликованы в ЖЭТФ **37**, 6 (1959); **44**, 773 (1963); ПТЭ № 2, 47 (1961); № 1, 54 (1965); NIM **54**, 119 (1967), **116**, 329 (1974) и в Трудах Международной конференции по аппаратуре для физики высоких энергий, 1,384 (Дубна, 1970).

4. Искровой калориметр для исследования энергетического спектра и взаимодействия адронов космических лучей с веществом (1964 – 1968 гг.)

В середине 1950–х годов профессор МГУ Н.Л. Григоров с сотрудниками предложили измерять энергию космических частиц с помощью нового прибора, названного ими ионизационным калориметром. В нем чередовались слои детекторов и поглотителей. Электроны или адроны высокой энергии, проходя через калориметр, создавали в поглотителях, соответственно, электромагнитные или электронно-ядерные каскады частиц. В экспериментах МГУ детекторами калориметра служили цилиндрические газовые ионизационные камеры длиной около 2 м и диаметром 10 см. Измерение суммарного ионизационного сигнала в детекторах позволяло определить энергию первичной частицы.

В 1960 г. силами ЛЭЧ ФИАН подобный ионизационный калориметр был установлен на высокогорной научной станции Нор-Амберд в Армении. Однако опыт работы с этим прибором вскоре показал, что для, примерно, 80% зарегистрированных событий изучить пространственную картину ливня не удаётся из-за плохого пространственного разрешения. Поэтому было решено использовать в качестве детекторов калориметра трековые приборы – широкозазорные искровые камеры.

Методические исследования подтвердили, что наполненные неоном искровые камеры с зазором 10 см регистрируют ливни частиц с эффективностью 100%, причем для треков, идущих под углом $\leq 45^\circ$ к направлению электрического поля, искры с точностью до 0,003 рад следуют вдоль траекторий частиц. Точность восстановления траектории нейтральной частицы по геометрии ливня в искровом калориметре составляла 0,03 рад.

В 1964 г. на высокогорной станции Нор–Амберд была смонтирована установка, включающая калориметр с широкозазорными (10 см) искровыми камерами площадью $760 \times 640 \text{ мм}^2$. Изучался состав адронной компоненты и измерялось сечение неупругого взаимодействия адронов космических лучей с ядрами вещества в области энергий 100 – 300 ГэВ.



Руководитель работ по созданию искрового калориметра А.П. Шмелёва.

Установка содержала четыре ряда искровых камер, расположенных друг под другом. Верхняя камера выделяла события, когда адрон идет с плотным сопровождением. Высота установки достигала 2 м, геометрический фактор составлял $0,3 \text{ м}^2 \text{ ср}$. Она запускалась триггерным сигналом сцинтилляционного счетчика, расположенного под нижней искровой камерой. При этом на каждую камеру подавался высоковольтный импульс амплитудой 70 кВ. Фоторегистрация событий производилась двумя объективами с расстояния 6 м в ортогональных проекциях. Энергия адрона определялась по числу частиц в ливнях двух нижних искровых камер, над которыми располагались поглотители толщиной в один ядерный пробег.

Калибровка калориметра была выполнена на ускорителе ИФВЭ в пучках пионов с энергией 27–65 ГэВ. Работы проводились под руководством А.П. Шмелевой, в них участвовали А.В. Алакоз, В.Н. Болотов, П.С. Васильев, Л.Ф. Васильева и М.И. Девишев. Для измерения сечений неупругого взаимодействия между верхней и следующей за ней искровыми камерами располагалась мишень (С, Fe, Pb) толщиной в один ядерный пробег.

Измерения проводились методом выбывания из пучка. Чтобы исключить возможные приборные ошибки, каждые сутки мишень менялась. Эксперимент продолжался в течение четырех лет. За это время было зарегистрировано около 22×10^3 ливней. Из них лишь 8% не поддавались однозначной интерпретации и были исключены из обработки.

В результате, были измерены:

1. Интенсивность ядерной компоненты космического излучения на высоте 2000 м над уровнем моря в области энергий 100–300 ГэВ.
2. Соотношение потоков пионов и протонов в тех же условиях.
3. Энергетическая зависимость сечения неупругого взаимодействия нуклонов с ядрами углерода в интервале энергий 30–300 ГэВ.
4. Энергетическая зависимость сечений неупругого взаимодействия пионов с ядрами различных химических элементов в указанном интервале энергий. (Рост сечений с увеличением энергии не наблюдался.)



Фотографии ливней космических частиц в искровом калориметре



Л.Ф. Васильева.

5. Зависимость сечения неупругого взаимодействия нуклонов с ядрами от массового числа ядра–мишени для углерода, железа и свинца.

Опыт эксплуатации искрового калориметра показал его определённые преимущества по сравнению с ионизационным калориметром: простоту прибора, достоверность регистрации ливней частиц и высокое пространственное разрешение. По результатам этих исследований были защищены 6 кандидатских диссертаций.

Основные результаты данного цикла работ опубликованы в научных журналах NIM **31** 213 (1964); Изв. АН СССР, сер. физ. №9, 141 (1967), №3, 364 (1968, №10, 2069 и 2076 (1971), №2, 1286 (1972); КСФ №6, 15 (1970), докладах на международных конференциях и в Препринте ФИАН № 35 (1980).

5. Исследование распадов K^+ -мезонов на протонном синхротроне ИТЭФ (1968 – 1974 гг.)

В 1968–1969 гг. силами ЛЭЧ ФИАН (М.И. Дайон, С.А. Крылов и др.) совместно с сотрудниками Института Теоретической и Экспериментальной Физики (ИТЭФ) был создан крупномасштабный магнитный спектрометр со стримерными камерами – один из первых в мире спектрометров такого типа. Позднее спектрометр был усовершенствован и дополнен стримерной камерой с пластинами плотного вещества (свинцового стекла) и использовался в экспериментах на протонном синхротроне ИТЭФ с энергией 10 ГэВ для изучения редких распадов K^+ -мезонов, остановившихся в мишени прибора (Рис.5.1). Суммарное число наблюдаемых событий превысило 10^5 . Спектрометр обеспечил точное ($\sim 3\%$) измерение импульса продуктов K^+ распада и их идентификацию по характеру взаимодействия в многопластинной стримерной камере. При этом γ -кванты отождествлялись по конверсионным парам e^+e^- .

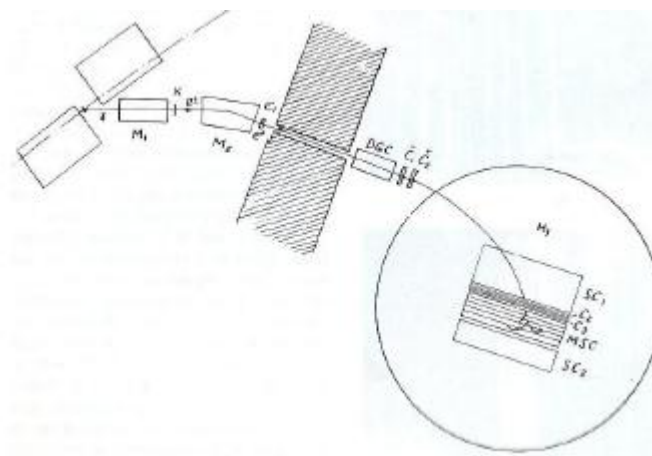
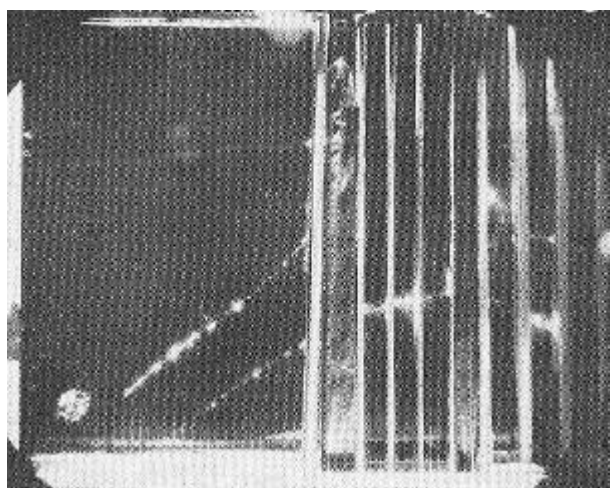


Рис. 5.1. Магнитный спектрометр со стримерными камерами для изучения распадов K^+ мезонов: M_i – отклоняющие магниты; K – Pb конвертер; C_i – сцинтилляционные счетчики; DGC , C_i^v – черенковские счетчики; SC_i , MSC – стримерные камеры.

В эксперименте был обнаружен распад $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$ и с высокой статистической точностью измерены относительные вероятности распада K^+ -мезона по различным каналам. В частности, было определено отношение $0,335 \pm 0,006$ вероятностей распадов $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ и $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$. Впервые была измерена относительная вероятность $(5,8 \pm 3,5) \times 10^{-3}$ радиационного распада $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$ (при энергиях γ -кванта $E_\gamma \geq 9$ МэВ). Эти результаты получили всеобщее признание и вошли в Международные таблицы свойств элементарных частиц. Таким образом, основное значение этих исследований заключается в обнаружении нового типа распада K^+ -мезонов и измерении его вероятности.



Фотография следа позитрона в стримерной и многопластинной стримерной камерах.

Основные результаты этого цикла работ опубликованы в препринтах ИТЭФ № 101 (1973), № 12 (1974), № 28 (1975); NIM **116**, 329 (1974); и Phys. Lett. **488**, 474 (1974).

6. Глубоководные исследования поглощения космических мюонов (1968 – 1984 гг.)

В начале 1960-х годов в ФИАН Лаборатория космических лучей (А.Е. Чудаков, Ю.Н. Вавилов и др.) с участием ЛЭЧ провела исследования широких атмосферных ливней (ШАЛ) космических лучей. Одной из целей этих работ был поиск сверхузких («карандашных») пучков мюонов, обнаруженных в составе ШАЛ в опытах МГУ. Авторы связывали эти пучки с возможным существованием механизма прямой генерации мюонов в ядерных взаимодействиях космических частиц высокой энергии.

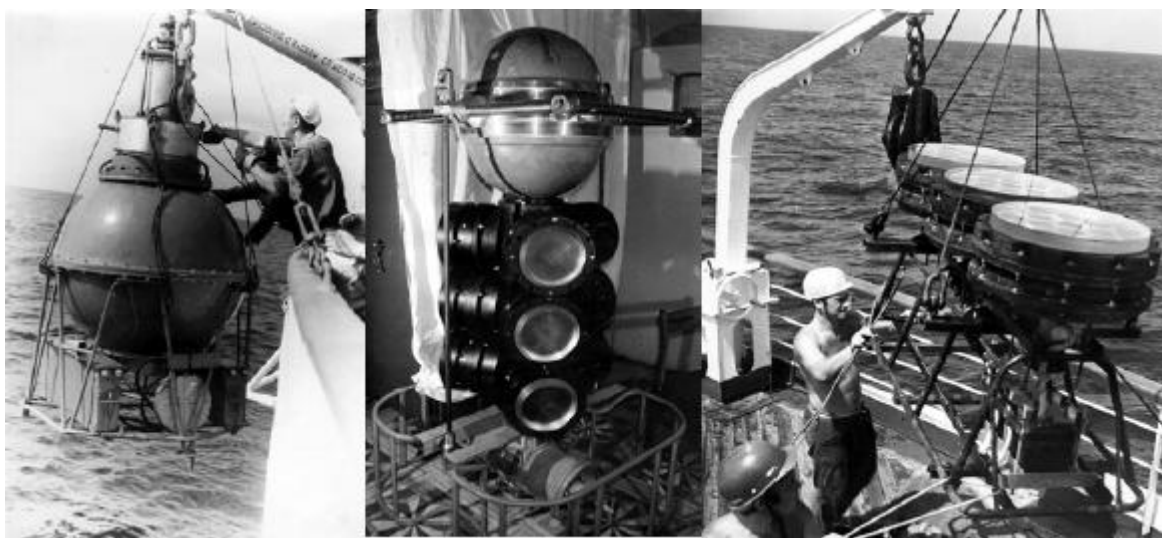
Регистрация ШАЛ производилась по излучению Вавилова-Черенкова в очищенной обессоленной воде, залитой в бак высотой 5 м и диаметром 6,5 м. Черенковский свет регистрировался фотоэлектронными умножителями, укрепленными на внутренних стенках бака. Под баком располагалась большая камера Вильсона, разработанная в ЛЭЧ В.М. Федоровым и предназначенная для непосредственного наблюдения треков мюонов. Проведенные измерения доказали отсутствие карандашных мюонных пучков в ШАЛ с энергией $\leq 10^{14}$ эВ и дали толчок развитию техники подводного детектирования мюонов. В периоды 1968–1969 гг. и 1981–1984 гг. в ЛЭЧ были подготовлены и выполнены две серии экспериментов по изучению поглощения космических мюонов в воде на больших глубинах мирового океана (В.М. Федоров, Ю.А. Трубкин, В.П. Пустоветов и др.). Измерения проводились методом регистрации черенковского излучения мюонов в морской воде в ходе комплексных экспедиций на научно-исследовательских судах Академии наук. Вся глубоководная измерительная аппаратура была полностью сконструирована и изготовлена в ФИАН. Ведущая роль в ее разработке принадлежала В.М. Федорову.



Руководитель глубоководных исследований космических мюонов В.М. Фёдоров

Первая серия измерений выполнялась в акваториях Черного и Средиземного морей, а также в Северной Атлантики. Использовался черенковский радиатор в форме сферы диаметром 1,2 м, которая наполнялась

заборной водой и просматривалась 15-ю фотоприемниками (фотоэлектронными умножителями ФЭУ-24 диаметром 80 мм).



Подводные детекторы черенковского излучения космических мюонов в морской воде.

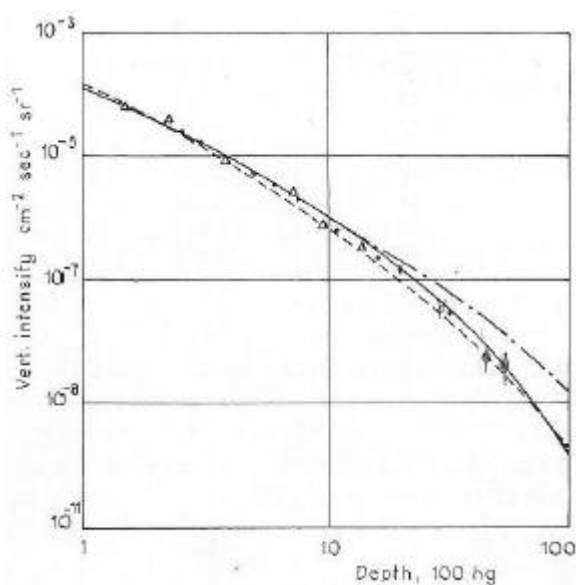


Рис. 6.1. Зависимость вертикальной интенсивности космических мюонов от глубины погружения в морской воде. Черные точки – данные измерений, выполненных сотрудниками ЛЭЧ на различных глубинах Мирового океана. (Крайняя правая точка соответствует глубине 6 км.) Плавные кривые – результаты теоретических расчетов различных авторов.

Внутренняя поверхность сферы была окрашена белой краской с высоким коэффициентом диффузного отражения (~90%). Конструкция детектора обеспечивала эффективное соби́рание черенковского света, генерируемого мюоном внутри радиатора. В результате, с помощью аппаратуры принципиально иной конструкции, чем прежде, созданной на основе новых технических решений, были измерены интенсивности глобальных и вертикальных мюонных потоков на глубинах до 3190 м под водой.

Геометрический фактор детектора достигал около $100 \text{ м}^2\text{ср}$. Детектор содержал три прочных цилиндрических контейнера с 12-ю фотоприемниками (ФЭУ–110) в каждом. Их фотокатоды были направлены в одну сторону и просматривали окружающий водный объем. Измерения проводились в 1981–1983 гг. на глубинах свыше 1 км в Атлантическом океане в Канарской котловине и около берегов Кубы. В результате этих экспериментов были уточнены или получены впервые значения мюонных потоков на глубинах 2–5 км. Кроме того, по данным измерений наклонных мюонов произведена оценка их вертикальных потоков до глубин ~ 7 км. В итоге была получена глубинная кривая интенсивности космических мюонов, которая приведена на Рис.6.1.



Активный участник глубоководных исследований космических мюонов –

Ю.А. Трубкин.

Основные результаты подводных экспериментов по изучению поглощения космических мюонов под водой, в которых участвовали В.М. Федоров, Ю. Н. Вавилов, Ю.А. Трубкин, В.П. Пустоветов и др., опубликованы в Proc. 11th Int. Conf. on Cosmic Rays, Budapest, 1969, p.53; Изв. АН СССР, сер. Физ., **34**, № 1, 1977 (1970); КСФ № 1, 45 (1970), №1, 63 (1982) № 11, 3 (1984); ЯФ **18**, № 4, 844 (1973); ПТЭ № 5, 249 (1972), № 2, 44 (1983); Proc. 19th ICRC, La Jolla, 1985, v/ 8, p. 39.

7. Ионизационные эффекты релятивистских заряженных частиц в реальных детекторах (1967– 1980 гг.)

Описание ионизационного торможения заряженных частиц в поляризуемой среде и флуктуаций ионизационных потерь энергии является одной из важных задач теоретической физики. В то же время измерение ионизирующей способности быстрых заряженных частиц считается одним из классических методов их разделения и идентификации.

Изучение ионизации, создаваемой релятивистскими космическими частицами в газоразрядных пропорциональных счетчиках, газовых детекторах низкого давления и твердотельных сцинтилляционных счетчиках началось в ЛЭЧ еще в 1946 г. в экспериментах на г. Арагац (С.Я. Никитин, М.И. Дайон, В.М. Харитонов, Л.П. Котенко). Позже, в 1960–е годы в работах с пропановой пузырьковой камерой и другими детекторами частиц высокой энергии были наблюдаемы аномальные ионизационные эффекты, которые не укладывались в рамки существующих представлений об ионизационном торможении частиц в веществе. (Под ионизационными эффектами обычно понимаются такие параметры треков частиц как, например, плотность следа, удельные потери энергии, удельная ионизация, удельная первичная ионизация, ограниченные потери энергии, амплитуда ионизационного сигнала, и т.п., а также флуктуации этих величин.)

Многие из подобных эффектов ранее не были исследованы. Среди наиболее серьезных проблем и противоречий выделялись следующие:

1. Отсутствие систематических экспериментальных данных и методов описания первичной удельной ионизации (сечений ионизирующих столкновений) в инертных, двухатомных и многоатомных газах.

2. Аномально высокие значения релятивистского возрастания плотности пузырьков на треках частиц в тяжеложидкостных (пропановых, фреоновых и ксеноновых) пузырьковых камерах, а также плотности зерен на следах частиц в ядерной фотоэмульсии. В последнем случае релятивистский рост оказался в обратной зависимости от чувствительности фотоэмульсии.

3. Несоответствие релятивистского возрастания плотности следов в камерах Вильсона, наполненных тяжелыми газами (аргон, ксенон) предсказаниям теории Бете–Блоха–Штернхеймера для средних ограниченных ионизационных потерь энергии.

4. Несоответствие флуктуаций и вероятных значений ионизационных потерь энергии, измеренных в пропорциональных газовых детекторах, предсказаниям теории Ландау.

В результате теоретических и экспериментальных работ, выполненных в ЛЭЧ в 1967 – 1980 гг. (В.А. Асосков, В.М. Гришин, В.К. Ермилова, Л.П. Котенко, Г.И. Мерзон, В.А. Чечин), пробелы в понимании физической сущности ионизационных эффектов, производимых быстрыми заряженными частицами в среде, были устранены. Удалось согласовать теоретические расчеты с экспериментальными данными (Рис. 7.1–7.4). Ключом к разрешению этих противоречий оказалась идея о том, что для адекватного описания ионизационных эффектов необходимо учитывать не только число ионизирующих столкновений частицы на единице длины её пути в веществе (или её удельные потери энергии), но и функцию отклика прибора. Последняя определяется типом детектора и условиями его работы (т.е. вероятностью появления ионизационного сигнала, которая зависит от локальной передачи энергии в ионизирующем столкновении). Функция отклика определяет вклад столкновений с различными передачами энергии в общий ионизационный эффект. В результате, реальное релятивистское возрастание ионизации может

оказаться заметно выше, чем рост средних ионизационных потерь энергии (случай, когда функция отклика прямо пропорциональна переданной энергии). Так, например, релятивистский рост плотности треков однозарядных частиц в пропановой пузырьковой камере и ядерной фотоэмульсии оказался соответственно 12% и 13% вместо ожидаемых 2% и 5% по Бете–Блоху–Штернхеймеру.

Были также измерены флуктуации потерь энергии в тонких слоях чистых благородных газов методом электролюминесцентной камеры. Разработанные в ЛЭЧ простые атомные модели в виде наборов осцилляторов, частоты которых отражают реальную оболочечную структуру атомов, позволили описать распределения ионизационных потерь энергии в очень тонких слоях вещества, (теория Ландау отвечает некоторому предельному случаю сравнительно толстого слоя). С помощью оригинальной методики проволоочной искровой камеры низкого давления, разработанной в ЛЭЧ, были также выполнены измерения первичной удельной ионизации и ее релятивистского возрастания в инертных газах



Г.И. Мерзон за настройкой электроники.

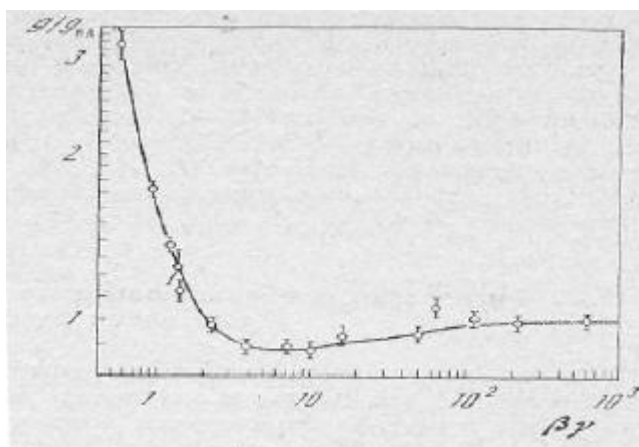


Рис. 7.1. Релятивистский рост следов частиц в пропановой пузырьковой камере. Точки и плавная кривая – результаты измерений и расчетов, выполненных в ЛЭЧ.

(В.А. Асосков, В.М. Гришин, Л.П. Котенко, Г.И. Мерзон). Полученные данные оказались в хорошем согласии с теорией ионизационных эффектов,

учитывающей функцию отклика прибора (в данном случае, функцию Хевисайда с порогом, отвечающим первому потенциалу ионизации газа). Таким образом, выполненный в ЛЭЧ цикл экспериментальных и теоретических исследований ионизационного торможения заряженных частиц высокой энергии с веществом позволил устранить существовавшие противоречия между описанием ионизационных эффектов и данными наблюдений в трековых и других детекторах.

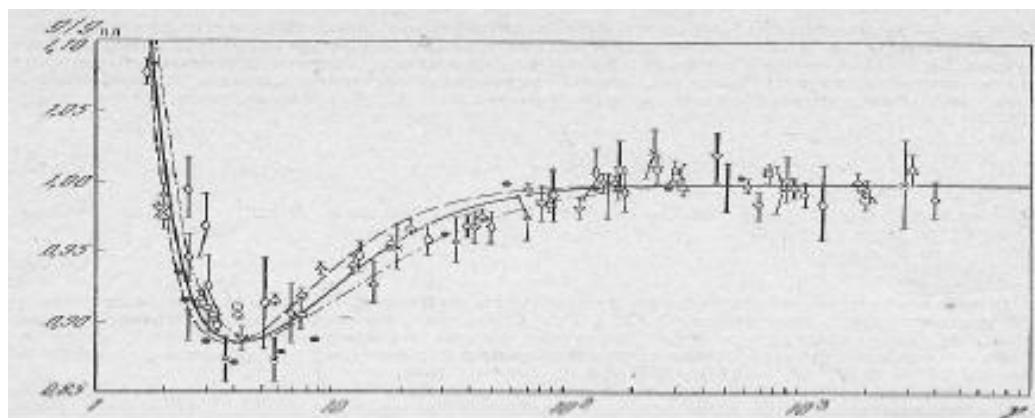


Рис. 7.2. Релятивистское возрастание плотности треков однозарядных частиц в ядерной фотозмультсии. Сплошная кривая – наиболее вероятное описание экспериментальных данных для реалистической функции отклика микрокристаллов AgBr. Штриховая и штрихпунктирная кривые – возможные отклонения от наиболее вероятного описания.

В измерениях и расчётах участвовали сотрудники ЛЭЧ В.А. Асосков, В.В. Блаженков, В.М. Гришин, В.К. Ермилова, Л.П. Котенко, Г.И. Мерзон и В.А. Чечин.

Результаты этого цикла работ исчерпывающе отражены в итоговом обзоре, опубликованном в журнале «Труды ФИАН» **140**, 1 (1982); Phys. Lett. A108, № 9, 453 (1985) а также монографии Ю.А. Будагова, Г. Мерзона, Б. Ситара, В.А. Чечина «Ионизационные измерения в физике высоких энергий» (Москва, Энергоатомиздат, 1985) и B. Sitar, G. Merson, V. Chechin and Yu. Budagov «Ionization Measurements in High-Energy Physics» (Heidelberg, Springer, 1993).

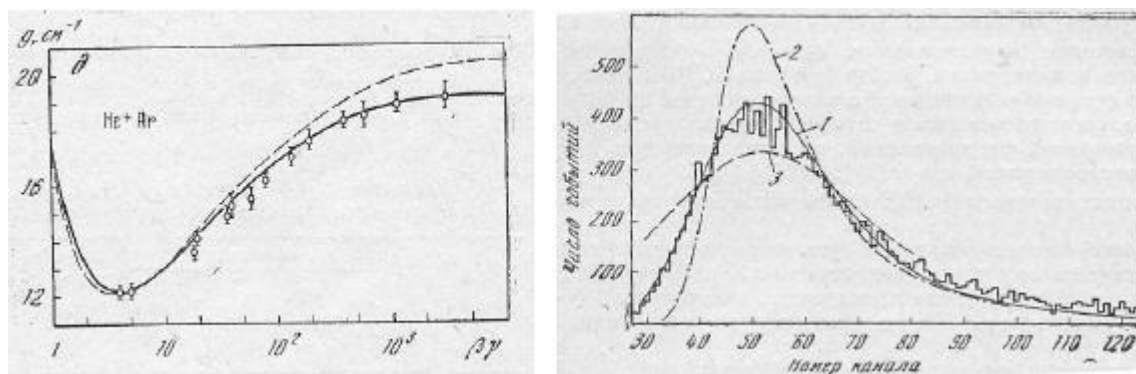


Рис.7.3. Слева – Релятивистский рост плотности следов в камере Вильсона; точки – данные измерений; пунктирная кривая – расчёт по формуле Бете-Блоха-Штернхеймера; сплошная кривая – расчёт по теории, разработанной в ЛЭЧ; штрих-пунктир – теория Блунка-Лейзеганга, пунктир – теория Ландау. Справа – флуктуации ионизационных потерь энергии протонов с импульсом 2.1 ГэВ/с в 5 см Ar + 5%CH₄; гистограмма – экспериментальные данные; сплошная кривая – расчёт, проведенный в ЛЭЧ; пунктир – теория Блунка-Лейзеганга; штрих-пунктир – теория Ландау.

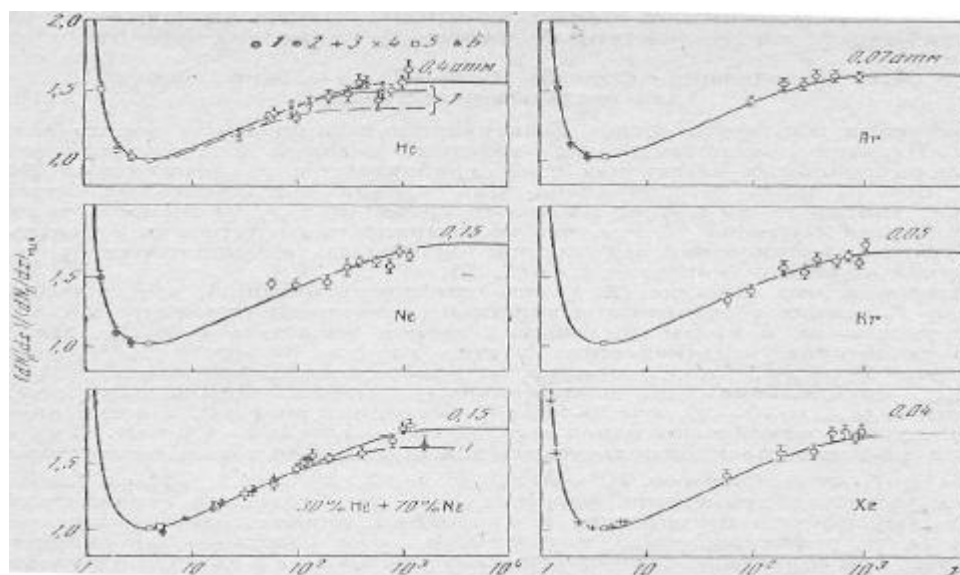


Рис. 7.4. Релятивистский рост удельной первичной ионизации в благородных газах. Белые кружки – результаты измерений, проведенных в ЛЭЧ. Плавные сплошные кривые рассчитаны в соответствии с теоретическими разработками, выполненными в ЛЭЧ.

Теоретические исследования ионизационных эффектов получили дальнейшее развитие в более поздних работах сотрудников ЛЭЧ В.М. Гришина, В.К. Ериловой и В.А. Чечина, предложивших новые реалистические осцилляторные атомные модели. Расчеты по этим моделям вероятных значений ионизационных потерь энергии и их флуктуаций хорошо согласуются с экспериментальными данными и используются сейчас в алгоритмах широко известного пакета программ GEANT4 при моделировании прохождения быстрых заряженных частиц через вещество в современных крупномасштабных детекторах.



В.К. Ермилова



Русская и английская версии монографии «Ионизационные измерения в физике высоких энергий».

8. Изучение фоторождения π^0 – мезонов на ядрах гелия при энергии 4,5 ГэВ (1974 – 1982 гг.)

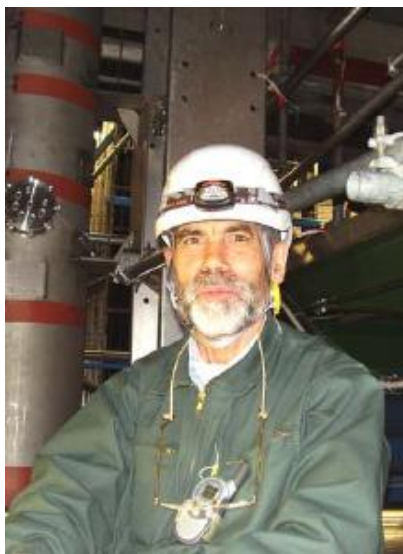
В 1974 – 1975 гг. сотрудником ЛЭЧ Ф.Ф. Каюмовым был разработан новый трековый прибор – самоуправляемая гелиевая искровая камера (ПТЭ, №2, 69, 1975), запускаемая при появлении в ее объеме частиц с повышенной ионизирующей способностью. Камера могла одновременно служить газовой (гелиевой) мишенью и детектором ядер отдачи гелия и других вторичных частиц. Управление искровой камерой обеспечивалось встроенным в рабочий объем многопроводным пропорциональным счётчиком, сигнал которого запускал систему ее высоковольтного импульсного питания и

фоторегистратор. Детектор позволял регистрировать ядра отдачи гелия с энергией 1 МэВ и выше и измерять их пробег (т.е., соответственно, энергию).

Этот детектор был одним из основных элементов экспериментальной установки по измерению сечения фоторождения π^0 – мезонов на ядрах гелия и использовалась сотрудниками ЛЭЦ (М.И. Дайон, Ф.Ф. Каюмов и др.) также в ряде других экспериментов на Ереванском электронном синхротроне с максимальной энергией электронов 6 ГэВ.

Эксперимент по измерению сечения фоторождения π^0 – мезонов на ядрах гелия был проведён совместно с научными группами из Ереванского физического института (ЕрФИ) и Объединённого института ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна). Определялись дифференциальные сечения упругого фоторождения π^0 – мезонов в реакции $\gamma + {}^4\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + \pi^0$ с последующим распадом $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ при энергиях первичных фотонов от 1,5 до 4,5 ГэВ в области малых переданных импульсов (углы вылета π^0 – мезонов $2^\circ - 8^\circ$).

Кроме самоуправляемой гелиевой искровой камеры экспериментальная установка содержала два черенковских счётчика полного поглощения с радиаторами из свинцового стекла, которые измеряли энергию вторичных фотонов, образованных в распаде π^0 – мезонов.



Ф.Ф. Каюмов

Для измерения направлений вылета фотонов использовались стопки ливневых искровых камер, прослоенных тонкими свинцовыми конверторами. Электромагнитные ливни, образованные фотонами, выделялись с помощью телескопов сцинтилляционных счётчиков, помещённых между ливневыми искровыми камерами и черенковскими детекторами. Триггер для запуска установки формировался совпадением сигналов от самоуправляемой искровой камеры, черенковских счётчиков и сцинтилляционных телескопов.

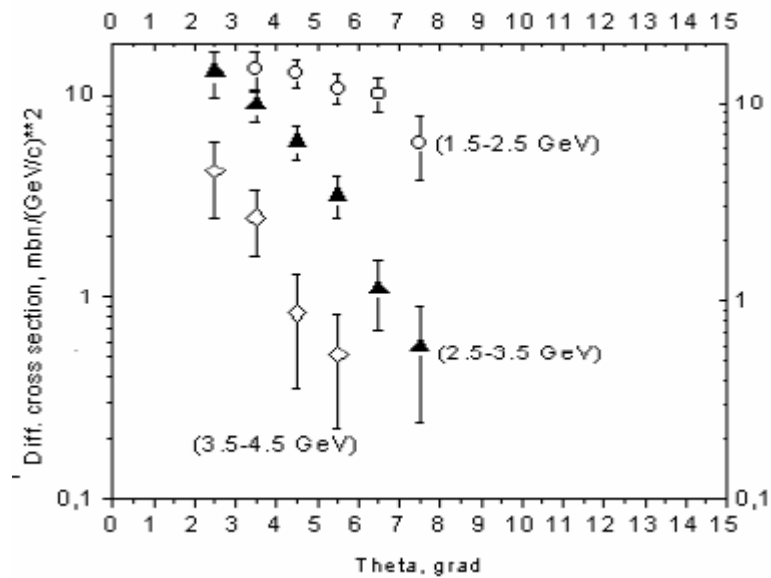


Рис.8.1. Результаты измерений дифференциальных сечений фоторождения π^0 -мезонов на ядрах гелия при энергии падающих фотонов в интервалах 1,5 – 2,5 ГэВ, 2,5 – 3,5 ГэВ и 3,5 – 4,5 ГэВ в зависимости от угла вылета π^0 -мезона.

Результаты эксперимента (Рис. 8.1) были опубликованы в журнале Ядерная физика **35**, № 2, 368 (1982) и сравнивались с теоретическими предсказаниями, полученными ранее (В.А. Царёв и др., Препринт ФИАН № 32, 1977). Качественное сравнение указывает на положительный знак амплитуды распада $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$. Однако различие экспериментальных и теоретических оценок абсолютных значений этой величины делает вывод не вполне надёжным и требует дополнительных исследований.



Обсуждение будущего эксперимента в группе, руководимой М.И. Дайоном. Слева направо: В.М. Раппопорт, Н.В. Владимирский, М.И. Дайон, Ф.Ф. Каюмов.

9. Автоматизация научных исследований на базе ЭВМ WANG 2200 (1975 – 1982 гг.)

Летом 1975 г. в Москве в Сокольниках состоялась Международная научная выставка «ФИЗИКА-75». Лаборатории ФИАН получили от Правительства СССР небольшие суммы денег для закупки необходимых им уникальных приборов и оборудования. Три подразделения нашего института: ЛЭЧ, Лаборатория люминесценции и Теоретический отдел объединили свои ресурсы для приобретения вычислительной техники, а именно персональных компьютеров WANG-2200, способных выполнять расчёты по программам на языке БЕЙСИК.

На базе таких ЭВМ в помещении Теоретического отдела энтузиастами из трёх названных выше подразделений был организован Расчётный центр, которым вскоре стали пользоваться сотрудники многих подразделений ФИАН. Руководили работой Центра Л.П. Котенко, А.М. Леонтович, Г.И. Мерзон и Б.В. Сомов. Все работы по поддержанию компьютеров в работоспособном состоянии выполняли молодые физики Е. Андрюшин, А. Подгорный, С. Тиходеев и др. За первую половину 1976 г. было выполнено более 70 сложных расчетов по проблемам астрофизики, физики элементарных частиц, твердого тела, квантовой электроники, плазмы, нелинейной оптики, люминесценции, биофизики и прикладной и математической физики, созданию служебных программ и программ управления. Расчётный центр привлёк к себе более 60 пользователей и оказал существенное влияние на повышение компьютерной грамотности и уровня вычислительных работ в ФИАН.,

С современной точки зрения ЭВМ WANG 2200 имели весьма ограниченные возможности (оперативная память 12–32 кбайт, быстродействие около 10^3 операций в 1 с). Тем не менее, эти работы успешно развивались. В частности, оказалось полезным разделять ресурсы компьютеров WANG 2200 между несколькими пользователями, работающими одновременно. С этой целью была организована линия связи с удалёнными дисплеями V-340, для чего применялся последовательный асинхронный интерфейс 2207A и согласующая плата VD-11 (Рис.9.1).

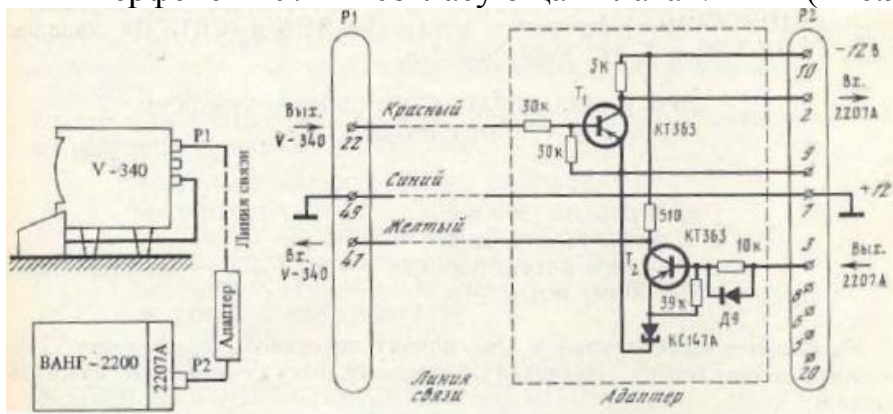


Рис. 9.1. Линия связи ЭВМ WANG 2200 с удалённым дисплеем V-340 и схема согласующего адаптера.

В линии связи использовался экранированный двухжильный кабель длиной до 1 км. Скорость передачи/приёма данных достигала 1200 бод. Режим связи выбирался программным способом. Пассивная связь отвечала диалогу пользователей, работавших на концах линии (подобно телефонной связи). Активная связь соответствовала режиму ввода и вывода данных, когда дисплей V-340 служил терминалом. При этом его пользователь получал почти те же возможности, что и при непосредственной работе на ЭВМ WANG 2200. Имелся также режим монитора (параллельного дисплея), когда любые сообщения, высвечиваемые на дисплее WANG 2200, повторялись на V-340. Прокладка линии связи заметно увеличила эффективность применения ЭВМ WANG 2200 в ФИАН.

Дальнейшее развитие линий связи преследовало переход от использования отдельных ЭВМ к организации сети в составе относительно более мощной ЭВМ PDP 11/70 и ЭВМ WANG 2200 в качестве интеллектуального терминала с расширенными возможностями ввода/вывода данных и редактирования. Это позволило осуществлять обмен информацией и перераспределять функции каждой ЭВМ в соответствии с решаемыми задачами и создать иерархическую структуру с целенаправленной специализацией, что представляло собой переход на более высокий уровень применения вычислительной техники. Активное участие в этих работах принимали также Главный инженер Отделения «В» ФИАН С.Ф. Козлов и сотрудники Лаборатории космических лучей В.С. Асейкин и А.С. Баринов.

Описываемые разработки предвосхитили основные черты современных сетей ЭВМ и значительно повысили уровень автоматизации научных исследований в ФИАН и эффективность расчётов, помогли пользователям преодолеть психологический барьер, мешавший в то время освоению новой вычислительной техники.

С этого времени автоматизация сбора и обработки данных эксперимента стала неременным атрибутом всех исследований, проводимых в ЛЭЧ. Для этой цели применялись отечественные мини-ЭВМ «Электроника-60», «Электроника-85» и СМ-4. Был осуществлён и переход от простых алгоритмов на Ассемблере к анализу спектров по математическим программам, написанным на языке Фортран – 4. В работах по автоматизации экспериментальных установок ЛЭЧ участвовали В.В. Блаженков, В.М. Гришин, В.К. Ермилова, С.К. Котельников, Л.П. Котенко, Г.И. Мерзон, Л.С. Первов и А.Н. Чузо.

Основные результаты этих разработок опубликованы в Proc. of 4th SWAP Symposium, Andover, Mass., p. 444 (1976), в сборнике Труды ФИАН 135, 103 и 106 (1983), а также препринтах ФИАН №№ 81, 82 и 83 (1983).

10. Исследование физических процессов в плазме фокуса мощного пикосекундного лазера (1977 – 1986 гг.)

В 1980 г. в Лаборатории люминесценции ФИАН был создан лазер на кристалле рубина ($\lambda = 0,69$ мкм), способный генерировать сверхкороткие (~ 10 пс) световые импульсы. При мощности лазера $\sim 0,5$ Дж плотность потока энергии в плазме фокуса достигала $I = 10^{13} - 10^{15}$ Вт/см², т.е. была заметно выше, чем у других источников. Следовало ожидать, что в таких экстремальных условиях в лазерной плазме происходят процессы, в которых возникают быстрые электроны и рентгеновские фотоны. Для регистрации потоков таких частиц потребовались приборы и электроника (в стандартах КАМАК и НИМ), используемые в физике высоких энергий и ядерной физике. Поэтому Лаборатория люминесценции обратилась за помощью в ЛЭЧ, которая приняла непосредственное участие в исследованиях излучения плазмы лазерного фокуса.

Малая длительность вспышки лазера препятствовала детектированию отдельных частиц, и приходилось регистрировать всё вторичное излучение вспышки одновременно. Сотрудники ЛЭЧ (В.В. Блаженков, Л.П. Котенко, Г.И. Мерзон и А.Н. Чузо) и Лаборатории люминесценции (А.Н. Киркин, А.М. Леонтович и А.М. Можаровский) создали 32-канальный сцинтилляционный спектрометр на неорганических кристаллах NaI(Tl), CsI(Tl) и органических сцинтилляторах диаметром и толщиной 30 мм (Рис. 12.1). Каждый кристалл имел поглощающий фильтр, толщина которого определяла «эффективную» минимальную энергию излучения, кристаллы с приданными им фотоэлектронными умножителями ФЭУ-85 крепились сферически симметрично по отношению к лазерному фокусу.

В экспериментах измерялись кривая поглощения непрерывного рентгеновского излучения, генерированного в массивных мишенях, его спектр, угловое распределение и поляризация. Мишени, изготовленные из 20 различных материалов от Ве до Вi, помещались в фокусе лазера. Была предусмотрена также калибровка спектрометрических каналов с помощью γ -радиоактивных источников с учётом аппаратной функции экспериментальной установки. Суммарная энергия рентгеновского излучения, выделенная в кристаллах (энергия фотопика) лежала в диапазоне 0,02–5 МэВ. Синхронизация работы всех элементов установки осуществлялась импульсом лазера.

Регистрирующая аппаратура была полностью автоматизирована, результаты измерений передавались в мини-ЭВМ PDP 11/05. При этом в памяти ЭВМ в динамическом диапазоне 10^6 накапливались данные о характеристиках, как первичного оптического излучения лазера, так и вторичного рентгеновского излучения. Одновременно в режиме реального

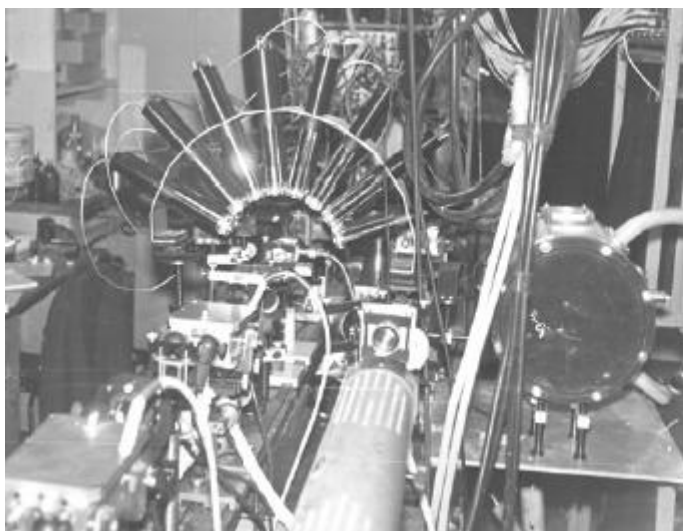


Рис. 10.1. Слева: экспериментальная установка для исследования рентгеновского излучения плазмы из фокуса рубинового лазера; справа: В.В. Блаженков – энтузиаст автоматизации экспериментов ЛЭЧ.

времени в паузах между вспышками лазера проводилась оперативная обработка экспериментальных данных. Обеспечивалась и защита от помех, вызванных высоковольтным разрядом при генерации мощного светового импульса.

Проведенные эксперименты дали следующие результаты:

- (1) При потоках энергии $\sim 10^{15}$ Вт/см² в плазме фокуса пикосекундного рубинового лазера возникают электроны, которые генерируют непрерывное рентгеновское излучение по тормозному механизму.
- (2) Кривая поглощения непрерывного рентгеновского излучения, возникающего в плазме лазерного фокуса, представляет собой наложение двух экспонент (перегиб в области около 10 кэВ). Это указывает на существование в плазме двух групп электронов с различной эффективной температурой T_e , зависящей от атомного номера Z мишени и энергии лазера (Рис.10.2). Наиболее интенсивная группа электронов характеризуется эффективной температурой $T_{1e} = 0,4\text{--}1,0$ кэВ. Другая группа ($\sim 1\%$) «горячих» (надтепловых) электронов имеет температуру $T_{2e} = 2,5\text{--}7,0$ кэВ.
- (3) Угловое распределение непрерывного рентгеновского излучения близко к изотропному.
- (4) Измерения показали наличие поляризации $P = (11,5 \pm 2,0)\%$ непрерывного рентгеновского излучения ($h\nu \geq 10$ кэВ) лазерной плазмы при плотностях потока энергии в фокусе лазера $\sim 10^{14}$ Вт/см². Это свидетельствует о наличии в плазме потока надтепловых электронов в направлении градиента её плотности.

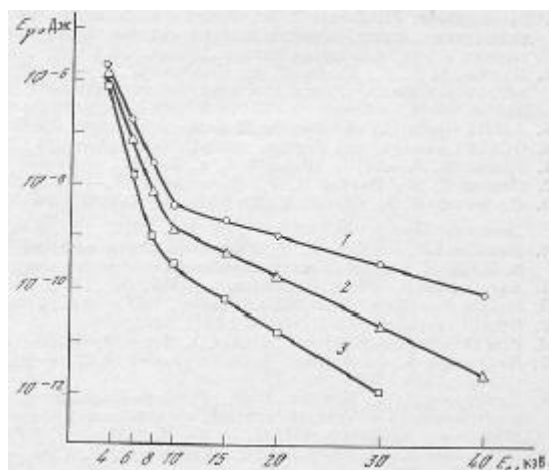


Рис. 10.2. Кривые поглощения рентгеновского излучения из фокуса пикосекундного рубинового лазера: (1) $T_{1e} = 1$ кэВ, $T_{2e} = 7$ кэВ; (2) $T_{1e} = 0,7$ кэВ, $T_{2e} = 5$ кэВ; (3) $T_{1e} = 0,4$ кэВ, $T_{2e} = 2,5$ кэВ; мишени ^{209}Bi , ^{115}In и ^6Be , соответственно; $I = 5 \times 10^{13}$ Вт/см².

Материалы этих исследований опубликованы в виде препринтов ФИАН № 202, (1977) и № 69 (1978), а также в научных журналах: Письма в ЖЭТФ **31**, № 6, 352 (1980); ЖЭТФ **78**, № 4, 1386 (1980); ЖЭТФ **80**, № 1, 144 (1981); Phys. Rev. Lett. **78A**, № 4, 347 (1980); Opt. Comm. **34**, № 2, 231 (1980); Труды ФИАН **135**, 68 (1981), **153**, 36 (1984); и в сборнике «Лазерное ускорение заряженных частиц» Материалы совещания, Нор-Амберд, Армения, 21–23 сентября 1982 г. (Ереван, 1984), с. 156 и 163.

11. Исследования рентгеновского переходного излучения релятивистских заряженных частиц (1978 – 1981 гг.)

Явление переходного излучения заряженных частиц при пересечении ими границы двух разнородных сред было открыто «на кончике пера» В.Л. Гинзбургом и И.М. Франком в ФИАН в 1946 г., а первые экспериментальные исследования были выполнены там же Р. Михалюком под руководством А.Е. Чудакова. Авторы открытия считали, что переходное излучение генерируется исключительно в оптическом диапазоне частот. Однако в 1959 г. Г.М. Гарибян в Армении показал, что преобладающая доля энергии переходного излучения релятивистских частиц сосредоточена в рентгеновской области и линейно зависит от их лоренц-фактора γ . В области очень высоких энергий $\gamma \geq 10^3$, когда ионизационные потери энергии и черенковское излучение насыщаются, методы идентификации частиц, основанные на этих явлениях, становятся неэффективными. Поэтому возможность использовать рентгеновское переходное излучение (РПИ) для идентификации релятивистских частиц увлекла тогдашнего руководителя ЛЭЧ А.И. Алиханяна. Он инициировал теоретические и экспериментальные исследования по этой тематике как в ЕрФИ, так и в ЛЭЧ ФИАН и в МИФИ.

11.1. Развитие теории РПИ.

Теоретические исследования по этой проблеме, проведенные в ЛЭЧ, позволили разработать методы расчета оптимальных радиаторов, а также интенсивности, углового и спектрального распределений РПИ.

Было показано, что применение эйконального приближения позволяет, исходя из первых принципов, вывести простые аналитические формулы теории РПИ. Обоснование такого подхода было дано А.И. Алиханяном и В.А. Чечиным и опубликовано в Phys. Rev. **D19**, 1260 (1979). Эта статья оказалась последней публикацией А.И. Алиханяна. Её расширенную версию можно найти в Трудах ФИАН, **140**, 146 (1982).

Предложенный в ЛЭЧ эйкональный метод основан на приближенном решении уравнений Максвелла в условиях, характерных для радиаторов РПИ. В рамках этого приближения была вычислена энергия, теряемая в среде, эквивалентной случайно распределённой стопке пластин со средней толщиной a и средним расстоянием b между ними ($b \gg a$). Полученные результаты оказались важными для оценки возможностей различных радиаторов и детекторов РПИ.

Были получены также общие формулы для флуктуаций энергии РПИ и проанализированы частные случаи, отвечающие малому ($N \ll 1$) и большому ($N \gg 1$) среднему числу N излучённых фотонов РПИ. Были также рассчитаны угловые и энергетические распределения РПИ, генерированного в радиаторе из лавсановых плёнок при различных лоренц-факторах падающих частиц (В.М. Гришин, В.К. Ермилова, Л.П. Котенко, Г.И. Мерзон, В.А. Чечин). Расчёты выполнялись для пространственных углов и углов в проекции на плоскость, проходящую через траекторию падающей частицы. Было показано, что учёт поглощения квантов РПИ радиатором и эффективности их регистрации детектором незначительно меняют угловое распределение РПИ. Было найдено также, что характерные углы испускания РПИ, как правило, превышают $1/\gamma$. Как показали расчёты для электронов, проходящих через типичные лавсановые радиаторы, угловое распределение РПИ, в основном, определяется многократным кулоновским рассеянием электрона в радиаторе.

В период после 1990 г. был выполнен ряд исследований, направленных на уточнение теоретического описания черенковского излучения и рентгеновского переходного излучений с учетом поглощения фотонов в среде. Эти работы были инициированы участием ЛЭЧ в экспериментах, проводимых в ЦЕРН в рамках проекта большого адронного коллайдера LHC. Детекторы, используемые в этих экспериментах, содержат вещества (например, ксенон), заметно поглощающие фотоны РПИ. Дополнительно в рамках международного сотрудничества по моделированию прохождения ионизирующего излучения через вещество сложной геометрии были предложены и развиты модели, описывающие упругое взаимодействие адронов и ядер с ядрами, а также интегральные сечения основных адронных процессов в широком диапазоне энергий. Большинство таких моделей реализовано в программном пакете GEANT4.

11.2. Экспериментальные исследования РПИ.

В 1960–1970-е годы в ЦЕРН, в США и в СССР были введены в строй ускорители частиц с энергией десятки и сотни ГэВ, что резко стимулировало интерес к использованию РПИ для идентификации ультрарелятивистских частиц. Поскольку теория предсказывала увеличение интенсивности РПИ пропорционально лоренц-фактору частицы, изучались различные методы регистрации фотонов РПИ в пропорциональных, дрейфовых и электролюминесцентных газовых камерах, где в качестве поглотителей РПИ применялись тяжелые благородные газы. Подобные методические работы проводились, в частности, объединённой научной группой ЛЭЧ и МИФИ (А.И. Алиханян, В.И. Баскаков, П.С. Васильев, И.Л. Гавриленко, Б.А. Долгошеин, В.А. Канцеров, О.М. Козодаева, С.П. Коновалов, В.Н. Лебеденко, С.Н. Майбуров, С.В. Муравьёв, П.Л. Невский, В.П. Пустоветов, А.С. Романюк, А.В. Сумароков, В.М. Фёдоров, В.К. Чернятин, А.П. Шмелёва) совместно с американскими и европейскими учёными В. Виллисом, М. Дойчманом, Т. Лидламом, Е. Платнером, В. Полихронакосом, В. Стружинским и К. Фабианом.

В этих работах изучались способы пространственного разделения в объёме детектора актов ионизирующих столкновений релятивистской заряженной частицы, сопровождающихся потерями её энергии на ионизацию, и РПИ, генерированного в слоистом радиаторе перед детектором. Для этой цели была разработана вдвоенная электролюминесцентная дрейфовая камера, наполненная ксеноном под давлением 10 атм. Характеристики этой камеры исследовались в пучке электронов с энергией 3,5 ГэВ. Было показано, что описанный метод позволяет решить поставленную задачу. Детектор РПИ также оптимизировался с целью разделения релятивистских частиц в области лоренц-факторов $\gamma \leq 10^3$. Были измерены углы испускания фотонов РПИ и, одновременно, энерговыделение в газе дрейфовой камеры. При этом было существенно улучшена эффективность разделения электронов и адронов при энергиях 40–150 ГэВ.

Созданный в ЛЭЧ новый детектор РПИ 12–секционная дрейфовая камера позволил измерить распределение заряженных кластеров ионизации вдоль следа частицы в газе. Характеристики этого детектора изучались также в пучках частиц высокой энергии на суперсинхротроне ЦЕРН. Было доказано значительное преимущество метода счёта кластеров по сравнению с методом измерения полного энерговыделения. При этом были решены вопросы практического создания компактного детектора РПИ, позволяющего эффективно разделять пионы и электроны в области $\gamma \sim 10^4$ и существенно улучшить разделение пионов и каонов при $\gamma \sim 10^4$. В результате, была заложена прочная база для развития будущих детекторов РПИ, которые сейчас применяются в эксперименте АТЛАС на суперколлайдере LHC в ЦЕРН.

Основные результаты этого цикла работ по исследованию и применению явления РПИ опубликованы в Трудах ФИАН, **140**, 140–202 (1982).

12. Разработка РПИ детектора, основанного на методе счёта кластеров ионизации, для экспериментов на суперсинхротроне ЦЕРН (1979 – 1980 гг.)

Переходное излучение в оптической области частот было предсказано теоретически в 1946 году В.Л. Гинзбургом и И.М. Франком в ФИАН. Оно испускается, когда заряженная частица пересекает границу двух сред с различными диэлектрическими постоянными. Экспериментально переходное излучение длительное время не исследовалось по причине своей малой интенсивности. Практический интерес к переходному излучению появился в 1958 г., когда Г. М. Гарибян показал, что для ультрарелятивистских частиц оно проявляется в рентгеновской области частот. Теория предсказывала удивительные свойства рентгеновского переходного излучения (РПИ):

(1) Полные энергетические потери заряженной частицы на генерацию РПИ пропорциональны ее лоренц-фактору $\gamma = E / mc^2$.

(2) Число фотонов РПИ, создаваемых частицей на границе раздела двух сред, близко к $1/137$.

(3) Кванты рентгеновского переходного излучения направлены вперед в пределах угла $1/\gamma$.

Свойство (1) дает возможность разделять частицы с различными γ (Рис. 12.1). Малую интенсивность РПИ (2) можно компенсировать, если использовать многослойный радиатор (например, набор полиэтиленовых пленок). Минимальный зазор между ними пропорционален длине волны переходного излучения. Таким образом, в рентгеновской области частот этот зазор существенно меньше, чем в оптической. Свойство (3) затрудняет создание детектора из-за невозможности (в отсутствие магнитного поля) пространственно разделить заряженную частицу и кванты РПИ.

Детекторы переходного излучения (ДПИ) предназначены для выделения релятивистских электронов на преобладающем фоне адронов. Каждый ДПИ представляет собой набор модулей, содержащих радиатор РПИ (например, последовательность тонких полиэтиленовых плёнок с зазором между ними) и пропорциональную (дрейфовую) камеру, наполненную газовой смесью, содержащей тяжёлый газ (например, ксенон). Обычно, ДПИ измеряет суммарное энерговыделение в газе камеры, т.е. ионизационные потери энергии изучаемой заряженной частицы и суммарную энергию фотоэлектронов, образованных в газе фотонами РПИ. Недостатками этого метода являются большие флуктуации ионизационных потерь энергии заряженной частицы в тонких газовых слоях.

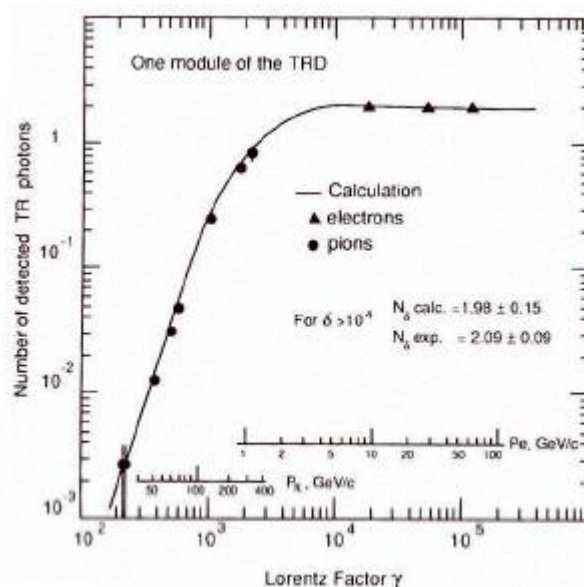


Рис.12.1. Зависимость интенсивности РПИ от лоренц-фактора γ .

В конце 1970-х гг. объединённая группа МИФИ и ЛЭЧ ФИАН предложила новый способ измерения интенсивности РПИ методом «счёта кластеров». Для этого прослеживались сгустки (кластеры) ионизации вдоль трека заряженной частицы в дрейфовой камере и регистрировались только те из них, в которых энерговыделение превышало несколько кэВ. Метод применялся для регистрации фотоэлектронов, возникавших при поглощении фотонов РПИ в ксеноне. Благодаря узкой направленности РПИ релятивистской частицы такие кластеры локализируются в пределах ≤ 500 мкм от трека. Фоновыми событиями здесь являются только следы δ -электронов. Энергетическое распределение суммарного сигнала фотоэлектронов конверсии РПИ имеет пуассоновский характер, т.е. существенно уже, чем в случае полных ионизационных потерь энергии.

В то время в эксперименте проф. Б. Виллиса на ускорителе ISR в ЦЕРН уже применялся ДПИ в режиме измерения полного энерговыделения. Было решено провести совместный эксперимент по тестированию метода счёта кластеров. Для этой цели в начале 1979 г. в Москве был смонтирован 12-модульный прототип ДПИ. Дрейфовые камеры площадью 10×10 см² с анодными нитями диаметром 20 мкм и межэлектродным расстоянием 4 мм наполнялись газовой смесью, содержащей 70%Xe + 30%CO₂. Использовались радиаторы на основе углеродных волокон в атмосфере гелия. ДПИ экспонировался в пучках суперсинхротрона ЦЕРН при энергиях 10, 15, 40 и 140 ГэВ. При низких энергиях пучок содержал приблизительно равное количество пионов и электронов, а при энергии 140 ГэВ более 128% пионов. В радиаторах РПИ помимо углеродных волокон использовались и литиевые фольги. Схема экспериментальной установки представлена на Рис. 12.2.

На Рис.12.3 приведены результаты сравнения эффективности методов полного энерговыделения (Q) и счёта кластеров (N), используемых для

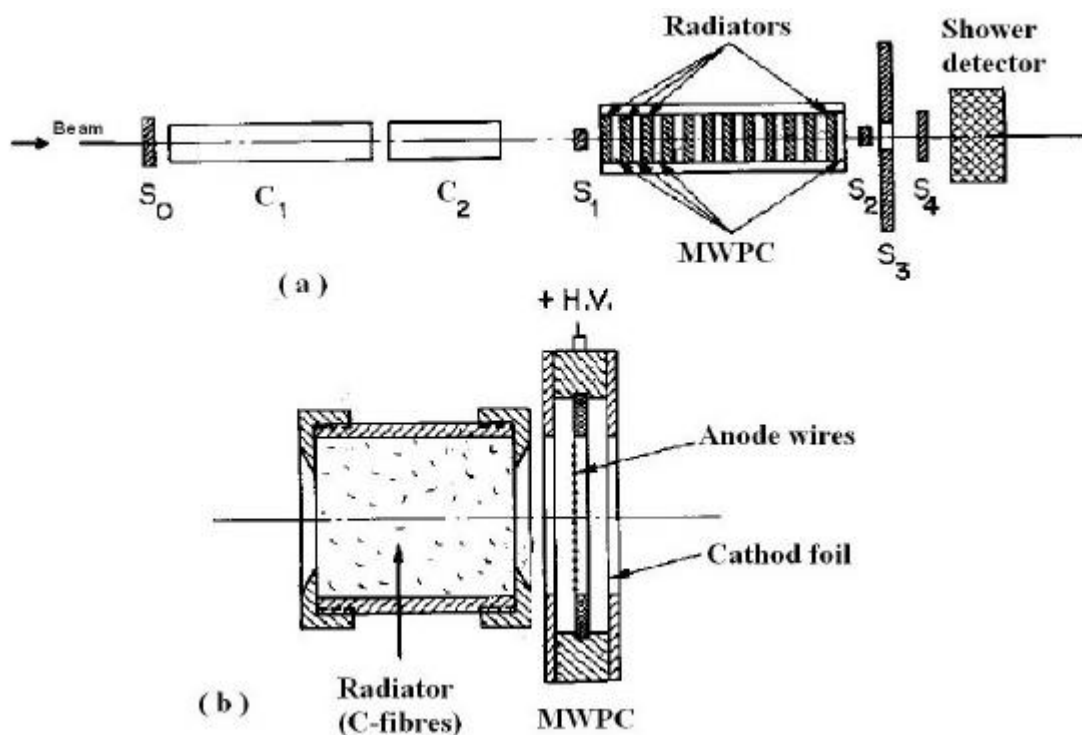


Рис. 12.2. Схема экспериментальной установки: (а) S_0 - S_4 сцинтилляционные детекторы, C_1 , C_2 пороговые черенковские счетчики, Shower detector – стопка пластин: свинец-пластик. (б) элемент ДПИ, содержащий радиатор и детектор РПИ.

разделения электронов и пионов. Тем самым показана возможность создания ДПИ, основанного на методе счёта кластеров и обладающего следующими характеристиками:

1. Высокий фактор режекции частиц ($\sim 10^2 - 10^3$).
2. Компактность (полная длина $L \sim 0,5-1$ м), что позволяет создавать ДПИ с большой апертурой.
3. Возможность организовать триггер-идентификатор частиц за время $\sim 150-200$ нс.
4. Возможность работы в интенсивных пучках частиц.

Чтобы получить высокий фактор режекции адронов, необходимо оптимизировать параметры ДПИ ещё на стадии его проектирования. Оптимизация подразумевает максимальное различие сигналов, возникающих при регистрации электронов и адронов. Иными словами, при заданной эффективности регистрации электронов вклад адронов, которые дают сходный сигнал, должен быть минимальным. Как показали исследования, метод счёта кластеров ионизации обеспечивает лучшее разделение этих частиц по сравнению с методом измерения полной ионизации. Суммарное число зарегистрированных в ДПИ кластеров при прохождении электрона зависит как от числа отдельных модулей (содержащих радиатор и дрейфовую камеру) в ДПИ, так и от эффективности генерации и поглощения РПИ в каждом из них. Способность каждого модуля генерировать и регистрировать РПИ является функцией ряда параметров его структуры. Это, прежде всего, длина радиатора, размер дрейфового зазора, состав газовой смеси, а также материал, число и толщина плёнок в радиаторе и расстояние между ними.

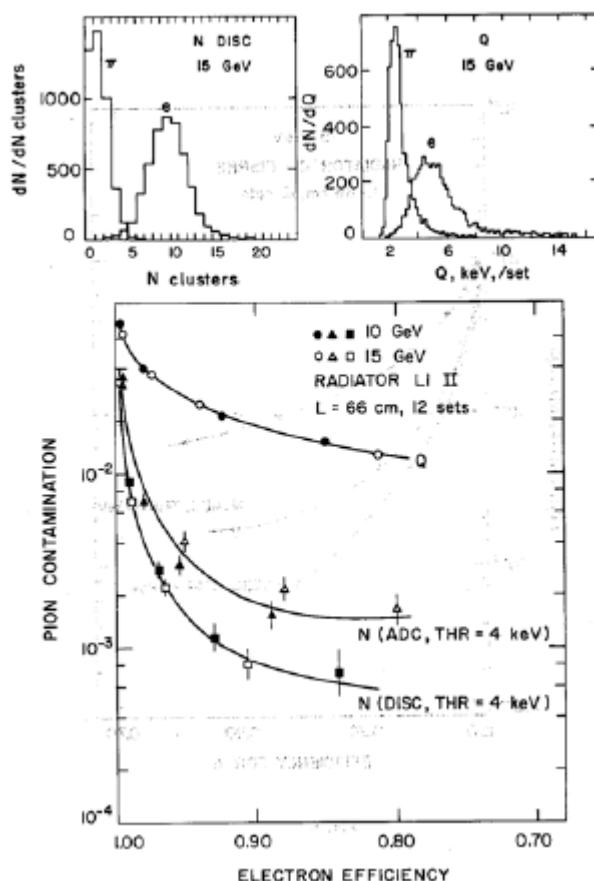


Рис. 12.3. Сравнение эффективности применения методов счёта кластеров(N) и измерения полного энергосодержания (Q) при разделении электронов и пионов.

При оптимизации ДПИ приходится учитывать специфику конкретного эксперимента, которая накладывает некоторые ограничения на размер ДПИ и конструкцию дрейфовой камеры. Основными начальными условиями для оптимизации ДПИ являются его допустимая толщина, конструкция дрейфовой камеры и состав газовой смеси. Оптимизация ДПИ предусматривает многопараметрический анализ с последовательно меняющимися значениями основных параметров и числа отдельных модулей. На каждом этапе оптимизации рассчитываются суммарное число кластеров ионизации с амплитудой сигнала выше заданного порога во всех модулях при регистрации электрона и адрона. Для расчёта ионизационных потерь были использованы разработанный в ЛЭЧ метод вычисления сечения поглощения фотонов в газовой смеси (NIM **145**, 555 (1977)). Расчёт сигналов РПИ проводился согласно уравнениям Г. Гарибяна (ЖЭТФ **33**, 1043 (1957)). Далее оценивались режекционные возможности ДПИ. В случае их улучшения изменения данного параметра принимались, и варьировался следующий очередной параметр. Анализ завершался нахождением набора параметров, отвечающих максимальному разделению электронов и адронов.

Данный метод оптимизации ДПИ хорошо зарекомендовал себя при планировании экспериментов с фиксированной мишенью, где используются плоские дрейфовые камеры, и режекционная способность детектора слабо

зависит от направления движения частицы (например, эксперимент ГЕЛИОС).

Для экспериментов на встречных пучках, таких как, например, АТЛАС, в ДПИ используются цилиндрические дрейфовые камеры, а число таких камер, пересекаемых частицей, зависит от её поперечного импульса и азимутального и полярного углов. В этом случае подобный анализ дополнительно включал оптимизацию положения дрейфовых камер в ДПИ, чтобы максимально уменьшить разброс числа пересечений частицей границ дрейфовых камер. Это позволило увеличить как эффективность разделения электронов и адронов, так и трековые возможности ДПИ, т.е. эффективность нахождения треков заряженных частиц и определения их импульса в магнитном поле.

В описываемом цикле исследований принимали участие сотрудники ЛЭЧ П.С. Васильев, И.Л. Гавриленко, С.Н. Майбуров и А.П. Шмелёва. Полученные результаты опубликованы в журналах NIM **185**, 119 (1981) и NIM **216**, 105 (1983).

13. Изучение рождения прямых фотонов в эксперименте R808 на протонном коллайдере ISR в ЦЕРН (1980 – 1988 гг.)

После завершения исследований возможности регистрации рентгеновского переходного излучения (РПИ) методом счёта кластеров (см. разделы 11 и 12) группа ЛЭЧ вошла в эксперимент R808 (Рис.13.1) на ускорителе ISR ЦЕРН (накопительные кольца на встречных пучках pp и pp^+ с энергиями 31 ГэВ). Перед группой ставилась задача сконструировать и изготовить панели годоскопа ливневых счётчиков на основе сцинтилляционных кристаллов NaI(Tl). Это было необходимо для уточнения структуры адронных столкновений, характеризующихся интенсивными поперечными передачами энергии (в частности, в процессах рождения прямых фотонов, когда испускаются одиночные фотоны с большими поперечными импульсами $p_T > 2$ ГэВ/с). Прямые фотоны рождаются не в результате распада каких-либо частиц, а генерируются непосредственно в процессах партон-партонного рассеяния при соударении кварка и глюона. Для эффективного наблюдения таких событий, необходимо подавить фон распадов π^0 - и η^0 -мезонов, что предполагалось реализовать с помощью ливневых NaI детекторов.

Панели с детекторами NaI должны были удовлетворять следующим условиям:

- (а) Обладать высокой гранулированностью, чтобы обеспечить пространственное разрешение, необходимо для эффективной регистрации двух фотонов от распада π^0 -мезонов с поперечным импульсом вплоть до 8 ГэВ/с.
- (б) Иметь высокое энергетическое и пространственное разрешение при регистрации электромагнитных ливней в широком диапазоне энергий.

- (в) Различать электромагнитные ливни в струях с большой множественностью частиц.
- (г) Обеспечивать режекцию электронов от адронного фона.
- (д) Обладать долговременной стабильностью при работе в магнитном поле 3,5 кГаусс.

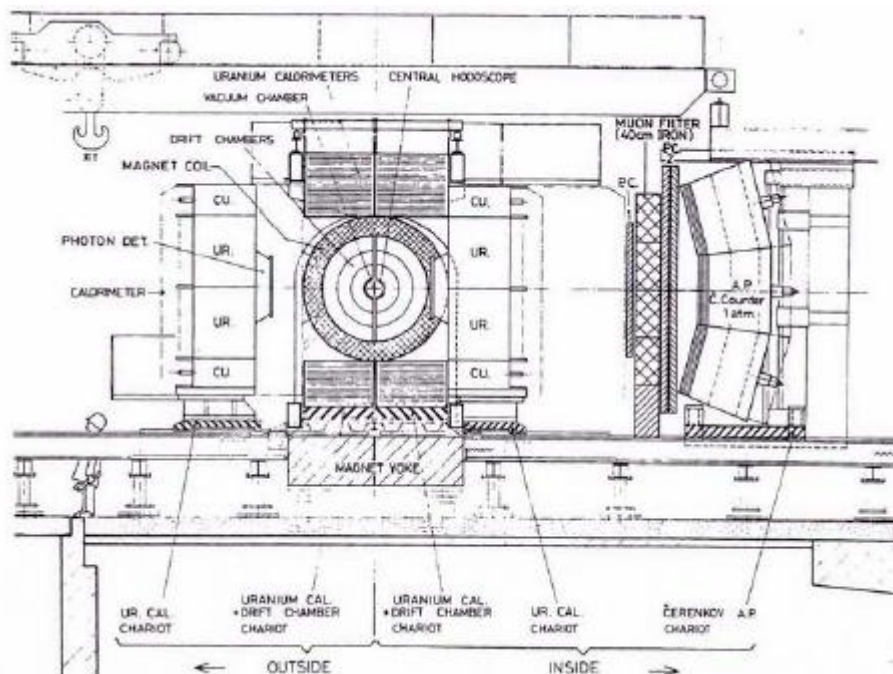


Рис. 13.1. Схема установки эксперимента R808 на ускорителе ISR (встречные протон–антипротонные и протон–протонные пучки с энергиями 31 ГэВ).

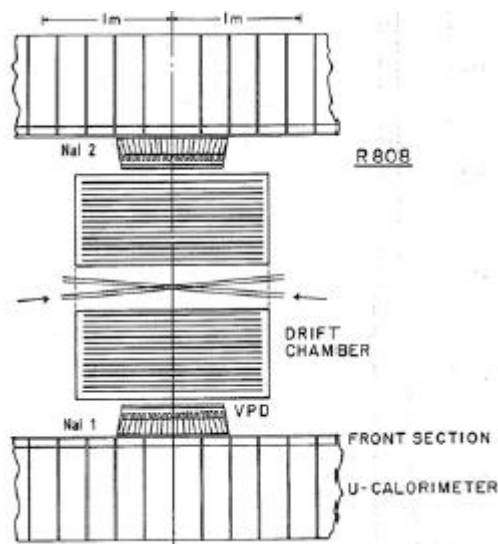


Рис. 13.2. Схема центральной части экспериментальной установки R808.

На Рис.13.2. показана схема центральной части установки R808. Эксперимент был начат в конце 1970-х – начале 1980-х гг. Место пересечения встречных пучков окружалось 48–слойной вершинным детектором (цилиндрической дрейфовой камерой). Она помещалась в

магнитное поле напряженностью 0,5 Тл, направленное по оси пучков. Урановый сцинтилляционный калориметр перекрывал азимутальный угол 2π и обладал высоким энергетическим разрешением для адронных ливней.

На Рис.13.3 изображено расположение панелей детекторов NaI на внутренних сторонах боковых стенок калориметра. Каждая панель составлена из 600 небольших блоков каждый в форме усечённой пирамиды (с квадратным основанием) со стороны, наклоненной под углом 70° к оси симметрии пучков. Высота каждой пирамиды достигала 13 см, что соответствовало 5,3 радиационным длинам. Поперечные размеры пирамид составляли $35 \times 35 \text{ мм}^2$ на передней плоскости и $40 \times 40 \text{ мм}^2$ на задней. Таким образом, оси пирамид были направлены в зону пересечения пучков ускорителя ISR. Каждая пирамида была оптически изолирована (обёрнута плёнкой алюминированного майлара толщиной 25 мкм).

Кристаллы NaI(Tl) были выращены в специальных печах и обработаны в 1980 – 1981 гг. на заводе ХИМПРОМ в Иркутской области – единственном в СССР заводе по производству больших кристаллов NaI(Tl) с высоким энергетическим разрешением.

В обработке кристаллов на заводе участвовали сотрудники ФИАН, ИЯФ СОАН и МИФИ. Общий вес 1200 пирамид NaI(Tl) составил одну тонну, а их стоимость 600 тыс. рублей.

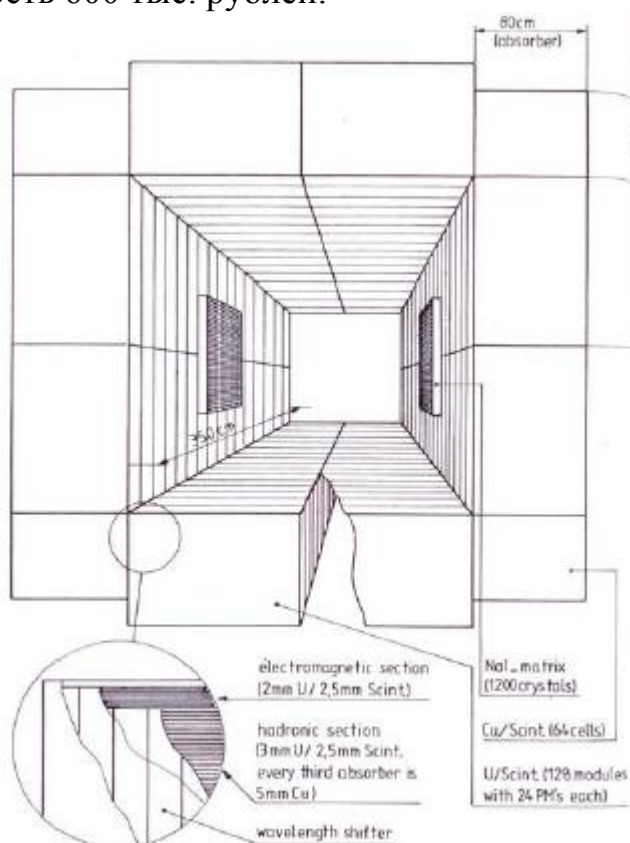


Рис. 13.3. Расположение панелей ливневых NaI детекторов на внутренних сторонах боковых стенок электромагнитного калориметра.

В начале 1982 г. все пирамиды были доставлены в ЦЕРН. В специально оборудованном помещении с низкой влажностью было измерено энергетическое разрешение и однородность светосбора по длине каждой

пирамиды. Световой сигнал регистрировался вакуумными фотодиодами VPD (Philips AV29), которые наклеивались на лицевой стороне пирамиды. Использовать стандартные фотоумножители было невозможно, потому что ливневые детекторы NaI(Tl) помещались в магнитное поле.

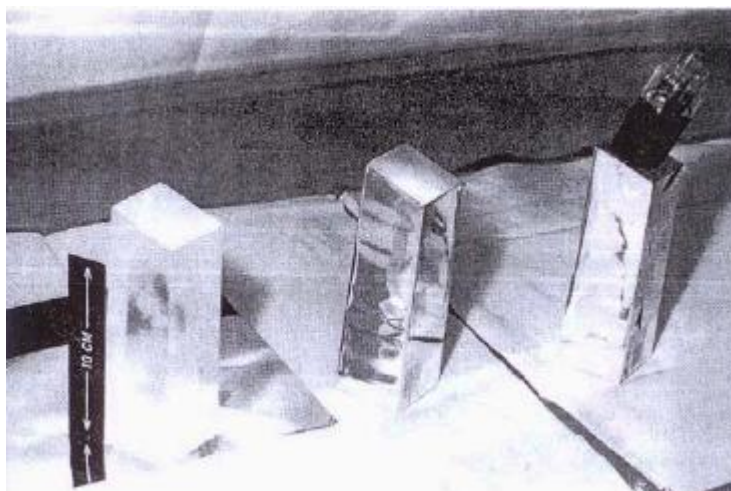


Рис. 13.4. Фотография кристаллов NaI(Tl).

Гигроскопичность кристаллов вынудила проводить измерения в герметичных контейнерах с циркуляцией сухого азота. На Рис.13.4 показаны пирамиды NaI(Tl) в майларовой плёнке для светоизоляции и с приклеенным сверху фотодиодом.

Установка R808 экспонировалась в пучках коллайдера ISR в течение 18 месяцев в 1982 –1983 гг. На Рис.13.5 показаны образцы событий зарегистрированных с помощью NaI(Tl) детекторов с триггерами от одного и двух кластеров с большой энергией.

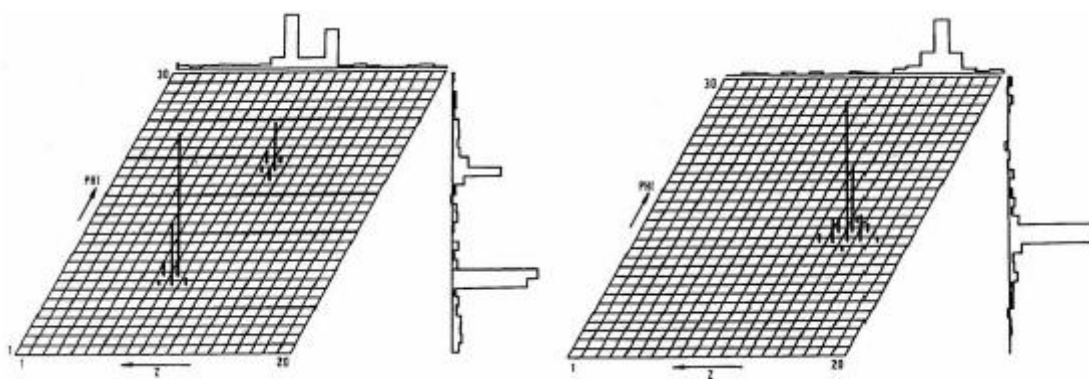


Рис. 13.5. Типичные образцы событий в NaI(Tl) детекторах с триггерами от одного и двух энергичных кластеров.

После вычитания фона и внесения поправок на акцептанс и относительную эффективность регистрации одиночных фотонов и π^0 -мезонов были получены следующие экспериментальные значения для отношения γ/π^0 , которые приведены в Таблице 13.1 и на Рис.13.6.

Таким образом, в результате эксперимента R808 удалось наблюдать рождение прямых фотонов в столкновениях протон-антипротон для событий с большим поперечным импульсом ($p_T > 4$ ГэВ/с) при энергии 63 ГэВ в СЦМ.

К сожалению, из-за преждевременной остановки ускорителя ISR в декабре 1983 г. (в связи с подготовкой к запуску ускорителя LEP) чувствительность данного эксперимента оказалась недостаточной чтобы обнаружить различие отношения γ/π^0 для $p\bar{p}$ и $p p$ столкновений, предсказываемое квантовой хромодинамикой.

Таблица 13.1

Скорректированное γ/π^0 отношение

p_T (GeV/c)	$\gamma/\pi^0(p\bar{p})$	$\gamma/\pi^0(pp)$
3.21	0.00 ± 0.01	-0.01 ± 0.01
3.71	0.05 ± 0.02	0.03 ± 0.01
4.21	0.06 ± 0.03	0.05 ± 0.02
4.79	0.11 ± 0.05	0.11 ± 0.03
6.12	0.29 ± 0.17	0.13 ± 0.08

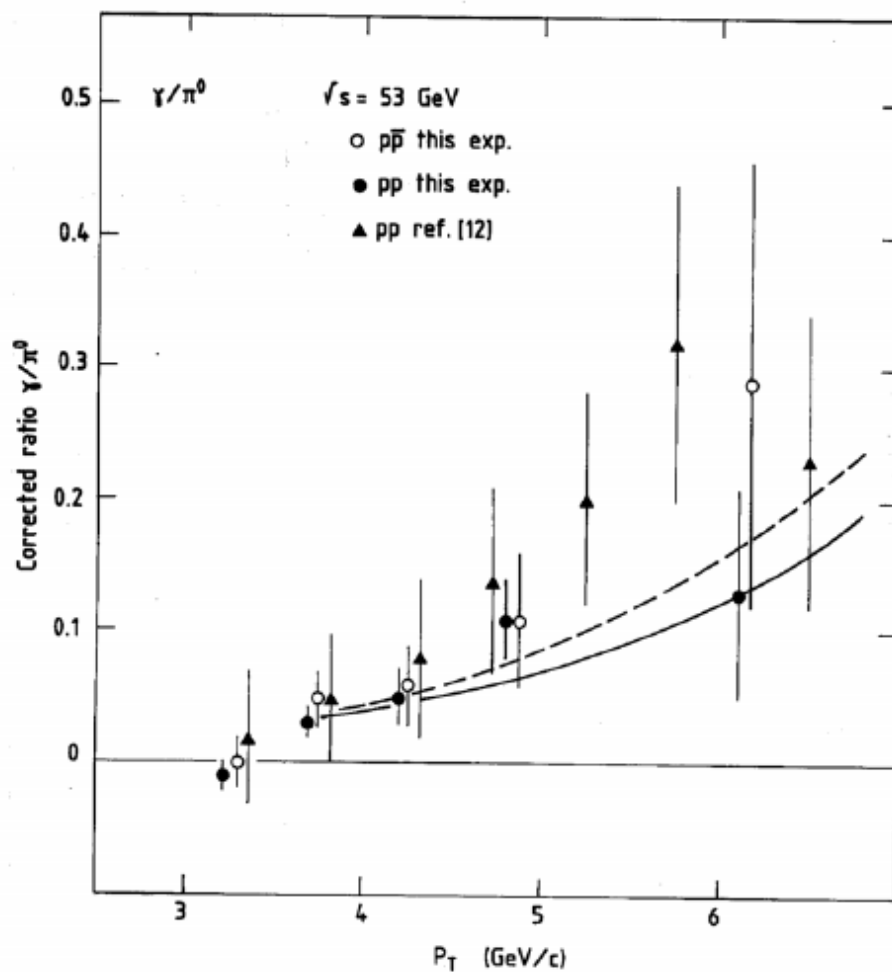


Рис. 13.6. Отношение γ/π^0 для протон-антипротонных и протон-протонных взаимодействий после вычитания фона и введения поправок на относительную эффективность регистрации и акцептанс.

Основные результаты этих исследований с участием сотрудников ЛЭЧ Л.Ф. Васильевой, П.С. Васильева, И.Л. Гавриленко, С.П. Коновалова, С.Н. Майбунова, С.В. Муравьёва, В.О. Тихомирова и А.П. Шмелёвой опубликованы в NIM **A242** 75 (1985); Phys. Lett. **158B** 3 (1985) и Phys. Rev. D, **36**, 9 (1987).

14. Изучение рождения странных и очарованных частиц в нейтринных пучках ускорителя У-70 на спектрометре «СКИФ» (Эксперимент Е-128, 1986 – 1993 гг.)

В эксперименте Е –128 изучалось рождение короткоживущих странных и очарованных частиц в нейтрино-ядерных взаимодействиях при энергиях нейтрино 3–30 ГэВ. В спектрометре «СКИФ» (Стримерная Камера И Фотоэмульсия) была впервые реализована гибридная компоновка трековых детекторов с использованием метода целеуказания, предложенного в 1969 г. в ЛЭЧ М.И. Дайоном.



Сотрудники ЛЭЧ – участники эксперимента Е-128.

Спектрометр содержал фотоэмульсию (вершинный детектор-мишень) с целеуказанием от стримерной камеры (координатный детектор), помещенной в магнитное поле, мюонный идентификатор и триггерные сцинтилляционные счётчики.

Установка «СКИФ» была одной из самых крупных на ускорителе У-70 в Протвино. Коллаборация Е-128 объединяла физиков ФИАН, ИФВЭ, МИФИ и ИТЭФ. Стримерная камера для этого эксперимента была разработана в МИФИ под руководством С.В. Сомова. Ведущую роль в её создании и эксплуатации сыграли Е.М. Гущин, А.Н. Лебедев (МИФИ), а также сотрудник ЛЭЧ ФИАН В.А. Рябов. Основные работы по изготовлению фотоэмульсионного детектора выполнялись сотрудниками ИТЭФ В.А. Смирнитским, О.К. Егоровым и Е.А. Пожаровой. Мюонный идентификатор разрабатывался сотрудниками ИТЭФ под руководством И.С. Тростина при ведущем участии В.А. Смотряева и И.И. Митрофанова. Работы по созданию сцинтилляционного детектора, организации триггера и синхронизации работы узлов спектрометра с моментом вывода нейтринного пучка были выполнены сотрудниками ЛЭЧ ФИАН П.С. Васильевым, Б.Н. Ломоносовым, С.К. Котельниковым и Л.С. Первовым. Руководителем всего направления работ был Е.П. Кузнецов. Общая координация работ по взаимодействию со службами ускорителя для обеспечения стабильного функционирования спектрометра «СКИФ» во время нейтринных сеансов осуществлялась под руководством начальника Лаборатории нейтринных взаимодействий ИФВЭ В.В. Аммосова.

Монтаж спектрометра в нейтринном пучке ускорителя У-70 начался в 1984 г. с установки стримерной камеры (Рис.14.1.), которая обеспечивала целеуказание на вершину нейтринного взаимодействия в фотоэмульсионной мишени и определяла угловые и кинематические характеристики вторичных частиц по отклонению в магнитном поле. Аппаратурный комплекс стримерной камеры содержал системы электропитания и формирования высоковольтного импульса с амплитудой 800 кВ и длительностью 25 нс, системы газообеспечения и фотографирования, систему координатных реперов, а также вспомогательное оборудование. Чувствительный объем стримерной камеры составляли 2 больших $(1600 \times 695 \times 400) \text{ мм}^3$ и 4 малых $(1600 \times 100 \times 400) \text{ мм}^3$ винипластовых модулей. Большие модули (передние по пучку нейтрино) служили для определения угловых и кинематических характеристик вторичных частиц и целеуказания на поиск вершин нейтринных взаимодействий в фотоэмульсии. Малые модули (задние по пучку) предназначались для регистрации и идентификации электронов и γ -квантов (последние конвертировались в брусках свинцового стекла общей толщиной 3 радиационные длины. Чувствительный объем стримерной камеры заполнялся газовой смесью 80% Ne+20% He, непрерывная очистка которой осуществлялась системой газообеспечения. После очистки в смесь вводилось 0,2–0,3% изобутана, что позволяло на 20% снизить рабочее напряжение на электродах стримерной камеры.

Координатная система стримерной камеры содержала реперные кресты, реперную сетку и систему лазерной подсветки реперов. Реперные кресты образовывали нижнюю, а реперная сетка – верхнюю координатную плоскости. Объемная лазерная система координат позволяла определить систематическое смещение треков импульсным электрическим полем в любой точке объема стримерной камеры и вводить необходимые поправки. Оптическая система состояла из трёх фоторегистраторов, каждый из которых содержал объектив и двухкаскадный электронно-оптических преобразователей с электростатической фокусировкой изображения.

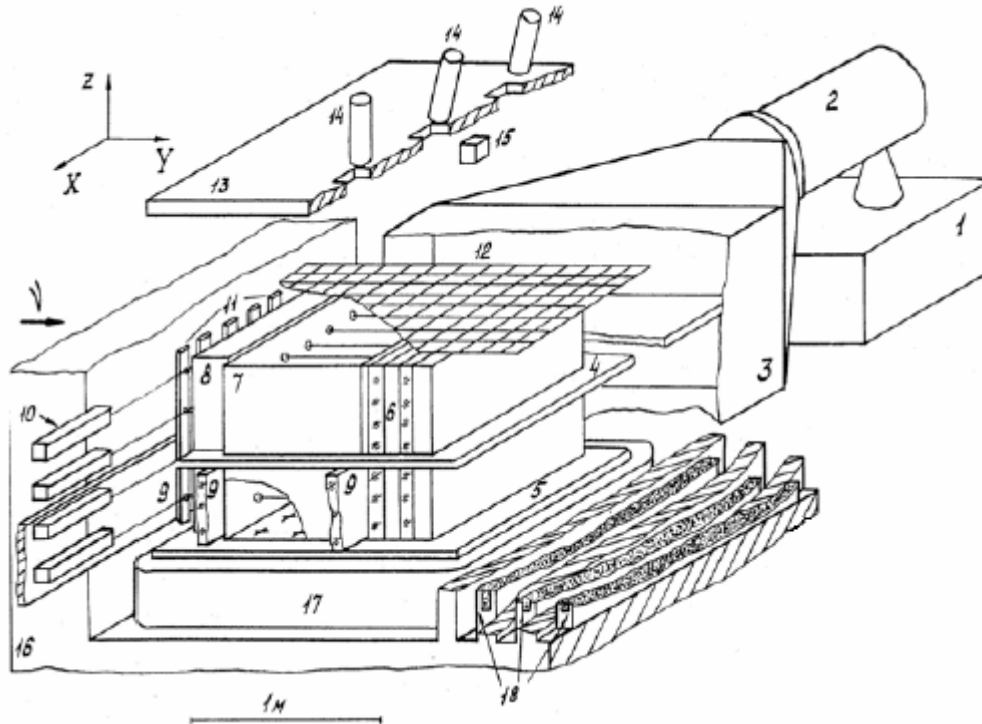


Рис. 14.1. Стримерная камера спектрометра СКИФ: 1 – генератор импульсного напряжения, 2 – формирующая линия, 3 – переходник, 4 – центральный высоковольтный электрод-сетка, 5 – опорная плита (нижний электрод), 6 – γ конвертор, 7 – целеуказующий модуль стримерной камеры, 8 – контейнер с фотоэмульсией, 9 – триггерные сцинтилляционные счетчики, 10 – лазерные излучатели, 11 – стойки крепления зеркал, 12 – реперная сетка, 13 – опорная плита фоторегистратора, 14 – фоторегистраторы, 15 – лампа-вспышка, 16 – нижняя катушка магнита, 17 – секционированное ядро (мюонный идентификатор).

Типичная фотография распада $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$, зарегистрированного в стримерной камере, показана на Рис. 14.2.

Мюонный идентификатор состоял из 14 оптических искровых камер, площадью $(2,5 \times 2,0) \text{ м}^2$ и искровым зазором – 24 мм, прослоенных железными фильтрами. Полная длина мюонного детектора вдоль пучка составляла 84 см Fe. Искровые камеры заполнялись газовой смесью 80% Ne + 20% He. Мюонный идентификатор обеспечивал разделение мюонов и адронов с эффективностью 90% при импульсах более 0,6 ГэВ/с. Пример фотографии мюонных треков показан на Рис.14.3.

Сцинтилляционный детектор состоял из 25 крупногабаритных сцинтилляционных счетчиков, формирующих триггерный сигнал для запуска стримерной камеры и мюонного идентификатора. Для выработки триггерного сигнала требовалось отсутствие заряженных частиц на входе фотоэмульсионного детектора и их наличие ($n \geq 1$) перед стримерной камерой. Восстановление вершины взаимодействия проводилось для событий с $n \geq 2$. Эффективность триггерной системы всей установки при множественности $n \geq 3$ вторичных заряженных частиц, образованных при взаимодействии нейтрино в фотоэмульсии, составляла 96%.

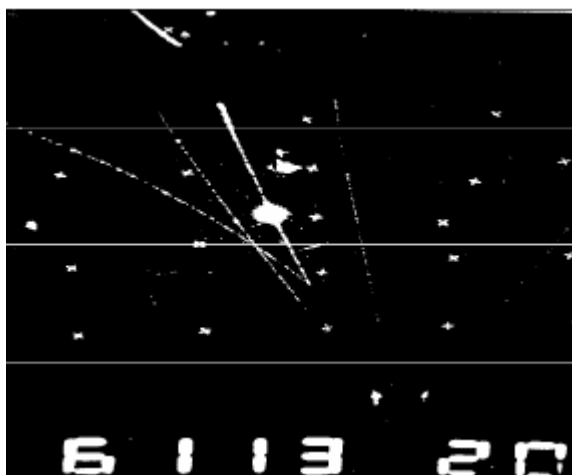


Рис. 14.2. Фотография распада $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$, зарегистрированного в стримерной камере.

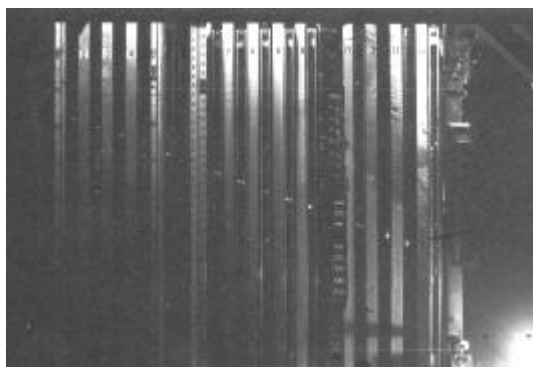


Рис. 14.3. Фотография мюонного трека в мюонном идентификаторе.

Магнит спектрометра представлял собой модернизированный магнит ИК-3-4 с вертикальным направлением магнитного поля. Он имел нижний прямоугольный полюс, на котором устанавливалась стримерная камера, и открытое пространство сверху для фотографирования. Габариты магнитного поля спектрометра – $1600 \times 1780 \times 760 \text{ мм}^3$. При токе питания магнита 10 кА потребляемая мощность составляла 1,2 МВт, а максимальная напряженность магнитного поля достигала 1 Тл. Компоненты напряженности магнитного поля измерялись тремя калиброванными датчиками Холла, ориентированными в трех взаимно перпендикулярных плоскостях.

На спектрометре СКИФ было проведено облучение трёх партий ядерной фотоэмульсии объемом 22 л каждая при интегральном сбросе $I_p = 2,0 \cdot 10^{18}$ протонов на мишень нейтринного канала ускорителя У–70.

Экспериментальная установка экспонировалась в десяти нейтринных сеансах, так что общее время экспозиции составило около 5000 ч. Было отснято примерно $8 \cdot 10^4$ фотографий треков в стримерной камере и мюонном идентификаторе. В результате, получено около 1000 целеуказаний на вершину нейтринного взаимодействия в объеме вершинного детектора. Для этих событий проводилась идентификация заряженных и нейтральных частиц, зарегистрированных в трековых детекторах спектрометра СКИФ.

Обработка данных этого эксперимента потребовала нескольких лет. Большую роль при реализации оптической модели пространственного и кинематического восстановления νN – взаимодействий сыграли сотрудники ИФВЭ А.А. Иванилов, В.А. Кораблев и П.В. Питухин. Поиск событий в эмульсионных слоях осуществлялся четырьмя группами: в ИТЭФ (В.А. Смирнитский, О.К. Егоров, Е.А. Пожарова, Ю.Д. Алешин), в ИФВЭ (В.И. Баранов), в МИФИ (С.В. Сомов, Е.М. Гушин, М.К. Тимофеев) и в ФИАН (Г. Орлова).

Комплексный анализ нейтрино-ядерных взаимодействий, зарегистрированных на спектрометре СКИФ в нейтринном пучке ускорителя У–70 при энергиях $E_\nu = 3 - 30$ ГэВ, включал в себя изучение инклюзивных спектров и средних множественностей конечных адронных состояний, а также исследование процессов образования и распада странных и очарованных частиц.

Полученные в эксперименте Е–128 результаты дополнили банк экспериментальных данных по сечениям взаимодействия нейтрино, включая сечения образования странных и очарованных частиц при низких энергиях, и определили пределы применимости различных феноменологических моделей, описывающих глубоко-неупругие процессы.

Таким образом, в результате эксперимента на спектрометре СКИФ:

(1) Получены новые данные о характеристиках конечных адронных состояний (средние множественности и инклюзивные спектры) в нейтрино – ядерных взаимодействиях при сравнительно низких энергиях нейтрино $E_\nu = 3 - 30$ ГэВ.

(2) Измерены сечения образования странных частиц в этих взаимодействиях и установлены ограничения на сечения рождения очарованных частиц.

(3) Установлены пределы для вклада процессов дифракционной диссоциации в полное сечение глубоко-неупругого νN -взаимодействия.

Основные результаты исследований, полученные на спектрометре СКИФ, опубликованы в ПТЭ № 4, стр. 63 (1990); ПТЭ № 5, 23 (1994); ПТЭ № 1, 44 (1997); ЖЭТФ, **108**, № 6(12), 1899 (1995); ЖЭТФ **110**, № 2 (8), 385 (1996); ЖЭТФ **110**, № 2 (8), 391 (1996); ЯФ **67**, № 12, 2190 (2004).

15. Проекты исследования осцилляций нейтрино

в пучках ускорителя УНК-I с энергией 600 ГэВ (1990 – 1997 гг.)

Проекты экспериментов с пучками нейтрино на большой пролётной базе, т.е. на больших расстояниях от ускорителя ("дальние" нейтрино), появились в конце 1980-х гг. В научной печати обсуждалось более 10 проектов, в которых предлагалось направить интенсивные нейтринные пучки от ускорителей УНК-I, FNAL, BNL, CERN и КЕК на детекторы с большой чувствительной массой. По различным причинам большая часть этих проектов осталась нереализованной.

Физические основы исследований нейтринных осцилляций в ускорительных экспериментах с использованием пучков дальних нейтрино в значительной мере были заложены и развиты в ЛЭЧ ФИАН (В.А. Царев, В.А. Чечин, В.К. Ермилова, Е.П. Кузнецов, П.С. Васильев, Б.Н. Ломоносов, В.А.Рябов). В этих работах анализировались возможности определения параметров осцилляций в экспериментах с пучками нейтрино от сооружаемого в г. Протвино ускорительно-накопительного комплекса (УНК). Существенную роль в развитии подобных совместных проектов сыграли также сотрудники ИФВЭ и ИТЭФ.

Были проанализированы возможности исследования осцилляций в пучках дальних нейтрино от УНК, направленных на детектор большого объема, удалённый на расстояние от 1000 до 12800 км от ускорителя. Проблема изучения нейтринных осцилляций в начале 1990-х гг. согласно "Программе физических исследований на первой очереди УНК с энергией протонов $E_p = 600$ ГэВ" была названа одной из приоритетных задач физики нейтрино. В проекте по созданию "Комплекса дальних нейтрино" предусматривалась возможность формирования нейтринных пучков как с широким, так и узким энергетическими спектрами. Анализировались выбор направления пучка дальних нейтрино и возможные детекторы, предназначенные для нейтринных исследований.



Е.П. Кузнецов

Были предложены и разработаны проекты экспериментов, в которых регистрация нейтринного пучка, сформированного на УНК-I, осуществлялась бы системой двух детекторов, расположенных на различных расстояниях от ускорителя. Была оптимизирована структура экспериментов на основе ближнего детектора, находящегося поблизости от точки вывода пучка нейтрино из УНК-I, и дальнего детектора, в качестве которого могли служить нейтринный телескоп NT-200 на озере Байкал или детектор ICARUS в Лаборатории Гран-Сассо, удаленные от УНК на расстояния, соответственно, 4200 и 2200 км. Байкальский проект отличался уникальными возможностями, так как пролётное расстояние нейтрино в 6 раз превышало базу экспериментов с пучками ускорителей FNAL и CERN.

Разработка в ЛЭЧ проектов экспериментов по изучению нейтринных осцилляций с использованием пучков нейтрино от УНК-I позволила не только определить основную концепцию проведения подобных экспериментов на большой пролётной базе, но и заложила физические основы создания таких современных крупномасштабных детекторов как KEK и MINOS. В этих проектах были реализованы многие идеи, предложенные при разработке комплекса дальних нейтрино от УНК-I, связанные с выбором энергии и структуры пучков нейтрино, а также с оптимизацией детекторов.

Основы концепции формирования пучков «дальних» нейтрино и экспериментов с ними, предложенные в ЛЭЧ, опубликованы в сборниках ЭЧАЯ **21**, № 1, 5 (1990); ЭЧАЯ **34**, № 5, 1257 (2003); и журналах Ядерная Физика **58**, № 12, 2210 (1995) и УФН **167**, № 8, 811 (1997).

16. Регистрация дальних нейтрино в отсутствие синхронизации с ускорителем (1989 – 1996 гг.)

Планы по созданию в 1980–е годы близ Серпухова (Протвино) Ускорительно–накопительного комплекса (УНК) с энергией протонов 600 ГэВ стимулировали разработку проектов по поиску осцилляций нейтрино в нейтринных пучках на большой пролётной базе. В проекте БАЙКАЛ, предложенном коллаборацией с участием ЛЭЧ ФИАН, рассматривалась возможность направить нейтринный пучок в район озера Байкал и зарегистрировать нейтрино с помощью аппаратуры, удалённой от УНК на расстояние около 4200 км. Важной проблемой, требующей решения при поиске осцилляций нейтрино, является отделение редких нейтринных событий от интенсивного постороннего фона. Наиболее эффективным способом борьбы с фоном естественного происхождения (космические лучи, биологический фон при регистрации нейтрино в природных водоёмах, радиоактивный фон и т.п.) является временное стробирование. Оно достигается посредством передачи на удалённый детектор синхроимпульсов, воспроизводящих временную структуру пучка УНК. Однако, при этом

требуется создать дополнительные дорогостоящие каналы связи (кабельные электрические, волоконно-оптические или радиоканалы).

В ЛЭЧ ФИАН В.А.Царевым и В.А. Чечиным была предложена альтернативная схема синхронизации. Её суть состоит в применении двух разнесённых на большое расстояние высокостабильных синхронизаторов, работающих синфазно. Один из них задаёт момент сброса пучка в нейтринный канал, другой непосредственно обеспечивает стробирование удалённого детектора. Для проверки этой идеи в 1989 г. сотрудники ЛЭЧ ФИАН провели модельный эксперимент на протонном синхротроне У-70. Была разработана автоматизированная установка, содержащая аппаратуру синхронизации вывода пучка (блок синхронизации и высокостабильный стандарт частоты САПФИР с нестабильностью менее 5×10^{-13} с) и аппаратуру обнаружения нейтрино (сцинтилляционный детектор, включённый в схему совпадения, блок синхронизации и обнаружения нейтрино на базе IBM PC/XT и стандарта частоты САПФИР). В обоих синхронизаторах применялись 8-разрядные микроконтроллеры Intel 8080, обеспечившие функциональную гибкость оборудования.

Аппаратура системы обнаружения пучкового нейтрино была установлена в нейтринном канале ускорителя У-70 в помещении гибридного спектрометра СКИФ на расстоянии 0,5 км за мишенью. Регистрация нейтринных взаимодействий осуществлялась тремя плоскостями (А, С, S) сцинтилляционных счетчиков, каждая из которых содержала от 4 до 6 детекторов, расположенных поперёк оси пучка. С помощью быстродействующей логической электроники "или/и", выполненной в стандарте СУММА, формировался сигнал совпадения ACS, который поступал в блок обнаружения нейтрино.



Б.Н. Ломоносов

Аппаратура управления пучком располагалась в помещении пульта системы быстрого вывода протонов. Синхронизатор пучка подключался к стойке (SHOT) импульса вывода (ИВ). Сигнал с этой стойки запускал синхронизатор, который осуществлял привязку к опорной частоте 20 Гц и задерживал ИВ на время от 50 мкс до 13 мс (кратное 50 мкс) в соответствии с

выбором одной из 15 программ управления пучком. Путем подачи однократного сигнала СТАРТ оба синхронизатора приводились в синфазное состояние на частоте 20 Гц, которое сохранялось в течение всего времени измерений (около 9 суток).

Эксперименты проводились на нейтринном пучке при средней интенсивности 2×10^{12} протонов, падающих на мишень за время сброса. Структура импульса пучка отвечала 10 банчам с периодом следования 166 нс и полной длительностью сгустка 1.6 мкс.

Экспериментально определялось временное положение пучка протонов в режиме без стробирования на интервале обнаружения (Рис.16.1.), равное $734 \pm 2,04$ мкс (временной разброс, в основном, зависел от длительности сгустка пучка ускорителя, нестабильности киккер-магнитов и привязки к ускоряющему ВЧ полю ускорителя). Статистическая обработка данных позволила с высокой точностью определить момент сброса протонного пучка на мишень. Зная временное положение пучка на удаленном детекторе, можно было организовать его стробирование. На Рис.16.2. приведено распределение зарегистрированных событий со стробированием при имитации дальности пролета нейтрино путем введения задержки $T_3 = 6685$ мкс. Измеренная интенсивность фона не превышала $2,36 \text{ сек}^{-1}$ за время измерения ~ 4 ч.

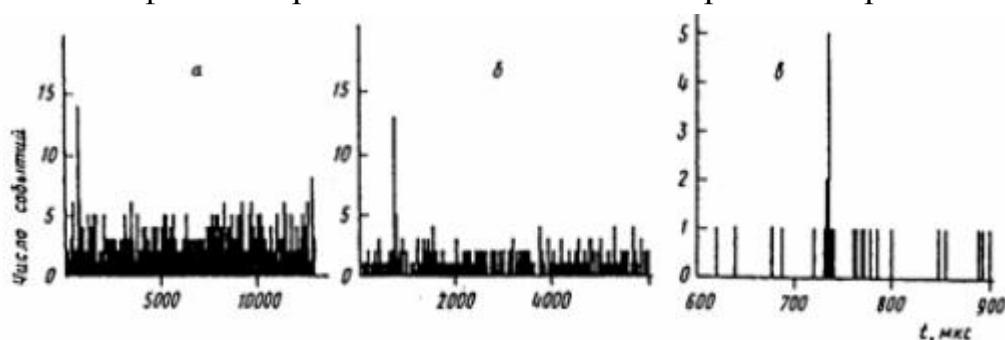


Рис. 16.1. Временное распределение числа зарегистрированных событий в режиме без стробирования для временных выборок: (а) 50 мкс, (б) 20 мкс, и (в) 1 мкс.

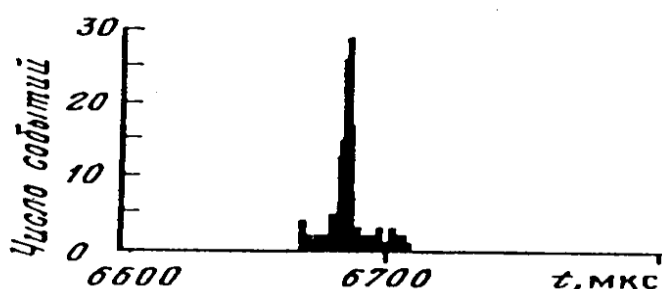


Рис. 16.2. Временное распределение зарегистрированных событий в режиме со стробированием, длительность строба $\tau_c = 50$ мкс.

Таким образом, на ускорителе У-70 ИФВЭ впервые был осуществлен эксперимент, имитирующий регистрацию нейтрино на больших пролётных расстояниях. Была решена задача обнаружения нейтринных взаимодействий в удалённом детекторе в отсутствие синхронизации от ускорителя. Было

определено временное положение банчей пучка, а также измерены интенсивности нейтринных событий и фонового излучения. Тем самым был успешно осуществлён эксперимент по имитации больших пролетных расстояний нейтрино с бескабельной синхронизацией вывода пучка из ускорителя и регистрацией нейтринных событий в детекторе. Эти результаты доказали осуществимость в экспериментах с пучками дальних нейтрино подобной или аналогичной временной привязки для разделения полезных и фоновых событий.

В настоящее время задача синхронизации момента времени вывода пучка из ускорителя и регистрации нейтринного события в удаленном детекторе решается с помощью космической навигационной системы GPS, обеспечивающей высокую точность синхронизации. Тем не менее, важно отметить, что еще в 1989 г. задача синхронизации нейтринного пучка была впервые решена экспериментально на уровне существовавшей тогда техники. Работа была выполнена группой сотрудников ЛЭЧ в составе Е.П. Кузнецова, П.С. Васильева, С.К. Котельникова, Б.Н. Ломоносова, Л.С.Первова и В.А. Рябова при участии сотрудников ИВФЭ А.Г. Афолина, А.В. Минченко и Ю.С. Черноусько.

Основные результаты разработки метода бескабельной синхронизации вывода нейтринного пучка ускорителя и удалённого детектора опубликованы в препринтах ФИАН № 87 (1989), №151 (1990) и № 48 (1991), а также в ПТЭ № 5, (1995) и ЖТФ, **66**, № 12, 11 (1996).

17. Теоретические исследования в ЛЭЧ (1968 – 2011 гг.)

17.1. Исследования по проблеме элементарной длины (1960 – 1972 гг.)

(1) В 1960–1970-е гг. в научной литературе активно обсуждались различные варианты нелокальной квантовой теории поля, в которых устранялись расходимости, возникающие при вычислении наблюдаемых величин в рамках локальной теории. Эти расходимости, очевидно, были связаны с представлением о бесконечной делимости пространства-времени. Математически это проявлялось в том, что, начиная со второго порядка теории возмущений, наблюдаемые величины представляются в виде расходящихся интегралов по импульсам виртуальных частиц. В некоторых вариантах теории поля, например, в квантовой электродинамике, эта трудность устраняется с помощью перенормировки массы и заряда. Однако уже в четырехфермионной теории слабого взаимодействия возникают расходимости, которые невозможно устранить таким методом. Один из изящных способов преодоления таких трудностей в рамках теории квантованного пространства-времени был предложен независимо Х. Снайдером, Ю.А. Гольфандом, В.Г. Кадышевским и др. В этой теории импульсное пространство имеет постоянную кривизну $1/p_i^2 = \kappa/\hbar^2$, где $\hbar$ - постоянная Планка, а l - элементарная длина, являющаяся, по предположению, третьей универсальной постоянной. Соответственно, все

интегралы по импульсам становятся конечными, причём эффективное обрезание происходит при $p \leq p_l$. Более общая теория с импульсным пространством переменной кривизны рассматривалась И.Е. Таммом в последние годы его жизни.

В совместной работе сотрудников Теоретического Отдела ФИАН Д.А. Киржница и сотрудника ЛЭЧ В.А. Чечина обсуждалась возможность определения верхней границы элементарной длины из экспериментов по наблюдению эффекта Мёссбауэра. В рамках теории квантованного пространства-времени было подробно исследовано излучение заряженной частицы в осцилляторной потенциальной яме. В этом случае координаты и время в p_μ -представлении имеют вид

$$\hat{x}^\mu = i\hbar \left[\frac{\partial}{\partial p_\mu} + \frac{1}{2\hbar} p^\mu \frac{\partial}{\partial p_\mu} \right],$$

где $p_\mu = (p, p_4 = E/c)$. Было найдено решение соответствующего уравнения Шрёдингера и найдена форма линии перехода. Оказалось, что все эти линии имеют особую дополнительную ширину $\Delta\omega$, вызванную эффектами нелокальности, которая не приводит к уменьшению времени жизни уровней: $\Delta\omega/\omega \approx \sqrt{R}$, где R радиус системы.



В.А. Чечин.

Из сравнения с минимальной относительной шириной линий перехода $\Delta\omega/\omega \approx 10^{-16}$, регистрируемой в мёссбауэровских экспериментах с ядром Zn^{67} , следует оценка $l \leq 10^{-20}$ см при $R \approx 10^{-12}$ см. Эта величина на семь порядков меньше, чем оценки, следующие из прямой опытной проверки предсказаний локальной теории. Описанный метод был применен к анализу других теорий, содержащих элементарную длину, и оказался весьма эффективным.

В последующие годы, проблема расходимостей в квантовой теории поля стала менее актуальной, в частности, в связи с построением

перенормируемой теории электрослабого взаимодействия. Соответственно, интерес к нелокальным квантовым теориям поля уменьшился.

(2) В начале 1970 –х гг. экспериментальные данные о спектре первичных космических лучей в области $E > 5 \times 10^{19}$ эВ были весьма неопределенными. Однако, уже тогда появилось подозрение, что спектр, возможно, не имеет "обрезания", обязанного эффекту Грейзена–Зацепина–Кузьмина (ГЗК). Были предложены различные объяснения противоречия между теоретическими представлениями и экспериментальными данными. Идеи Д.А. Киржница и В.А. Чечина основывались на том, что при вычислении ГЗК-эффекта используется преобразование Лоренца с уникально большими значениями лоренц-фактора $\gamma \geq 5 \times 10^{18}$, т.е. на много порядков выше, чем в любых других экспериментах. Возникает вопрос: насколько стандартные представления о псевдо-эвклидовом пространстве-времени соответствуют постулатам специальной теории относительности: закону инерции, принципу относительности Галилея, постоянству скорости света, однородности и изотропии трехмерного пространства и времени? Было доказано, что этим постулатам не противоречит пространство Финслера, в котором 4-импульс свободной частицы удовлетворяет закону дисперсии $f \Phi_\mu \tilde{p}_\mu^2 = m^2 c^2$, где $f \Phi$ – однородная положительная функция нулевой степени. При малых скоростях, как и в специальной теории относительности, $f \Phi / p_4 \rightarrow 0 \rightarrow 1$. Такой закон дисперсии диктует соответствующие преобразования 4-импульса при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой. Для того, чтобы в спектре космических лучей отсутствовало ГЗК-обрезание, достаточно предположить, что $f \approx 1 + 10^{-44} \gamma^4 + \dots$. Физически это означает, что в пространстве Финслера энергия реликтовых тепловых фотонов в системе покоя протона с энергией порядка 5×10^{19} эВ оказывается недостаточной для фоторождения пионов. В данной теории Лоренц-преобразование импульсов становится нелинейным, а в лоренц-преобразование координат примешиваются импульсы, так что они становятся контактными преобразованиями теории пространства Финслера.

Классическая механика точки в пространстве Финслера была разработана в 1960-х годах, но соответствующая квантовая теория поля пока не сформулирована. Тем не менее, введение пространства Финслера как обобщение псевдо-эвклидова пространства специальной теории относительности активно обсуждается в последние годы.

Основные результаты этих исследований опубликованы в ЯФ, 7 (2), 431 (1968); ЯФ 15 (5) 1051 (1972); Письма ЖЭТФ, 14, 261 (1971).

17.2. Изучение свойств супер-ядер (1981 – 1992 гг.)

С 1981 г. в ЛЭЧ проводились теоретические исследования свойств супер-ядер, т. е. атомных ядер, в состав которых входят тяжёлые барионы: очарованные, прелестные или содержащие топ-кварк. Идея о существовании очарованных ядер возникла вскоре после открытия в 1974 г.

очарованных частиц, а в 1975 г. в ОИЯИ (Дубна) была предпринята попытка их обнаружения. В этом эксперименте несколько эмульсионных камер были облучены в ИФВЭ (Протвино) и во ФНАЛ (Батавия, США) протонами с энергией 70 и 250 ГэВ, соответственно. После обработки эмульсий было обнаружено более 1 млн. двойных звёзд. Благодаря применению процедуры анализа с повышенной эффективностью поиска событий было найдено три кандидата на образование и распад очарованного ядра. Этот результат стимулировал теоретические исследования свойств супер-ядер, обсуждение возможных экспериментов по их наблюдению и рождения, а также способов их идентификации.

Теоретические исследования свойств супер-ядер включали несколько направлений. Основная проблема была связана с определением возможных энергетических уровней, в том числе их зависимости от массы бариона. Такая зависимость проявляется, с одной стороны, кинематически через уравнение состояния и приводит к увеличению числа уровней и росту энергии связи. С другой стороны, характер нарушения $SU(4)$ симметрии может быть таким, что оказывает существенное влияние на барион–барионный потенциал. Степень нарушения $SU(4)$ симметрии зависит от массы бариона. Это влияние не столь актуально для физики гиперядер, так как различие масс нуклонов и странных барионов не очень велико. Однако очарованные барионы более чем вдвое тяжелее нуклонов, так что для них влияние массы на ядерный потенциал может быть значительным. Сотрудники ЛЭЧ В.А.Царёв и Н.И. Старков провели детальные расчёты по теории барион–барионного взаимодействия с использованием разных моделей: вершин взаимодействия, однобозонного и двухпионного обменов с учётом взаимодействия между составляющими кварками.



Н.И. Старков

В результате, было показано, что с увеличением массы составляющих кварков как притягивающая, так и отталкивающая составляющие потенциала взаимодействия ослабевают. В зависимости от модели расчёта, несколько уменьшаются также радиусы их действия. Для потенциала взаимодействия очарованных барионов с нуклонами коэффициент ослабления составляет 0.6–0.8 и падает для более тяжёлых барионов. Вычисления энергий связи очарованных супер-ядер показали, что, несмотря на ослабление взаимодействия, даже положительно заряженные $\Lambda_c^\pm$ барионы имеют достаточно богатый спектр уровней в ядрах с промежуточными значениями атомного номера Z ($4 < Z < 70$). Энергия связи в основном состоянии достигает 12 МэВ. Нейтральные очарованные барионы имеют связанные состояния во всём диапазоне периодической таблицы элементов. Положительно заряженные прелестные барионы не имеют связанных состояний, а нейтральные характеризуются энергией связи порядка 5–8 МэВ.

В другом цикле работ, проведенных в ЛЭЧ, были рассмотрены возможности образования очарованных ядер. Одна из них касалась использования адронных пучков. Большая разница в массах нуклонов и тяжёлых барионов приводит к тому, что при рождении на покоящейся мишени импульсы образованных тяжёлых барионов и мезонов велики, а вероятность образования супер-ядра мала ($\sim 10^{-10} - 10^{-8}$). Учёт импульсного распределения нуклонов в ядре и перераспределения на этих нуклонах повышают вероятность захвата до $10^{-8} - 10^{-6}$.

Другая возможность образования супер-ядер возникает при использовании встречных пучков. В этом случае подбор импульсов сталкивающихся частиц позволяет получить очарованные частицы с импульсом, оптимальным для образования супер-ядра.

Было показано, что наиболее эффективная постановка эксперимента соответствует встречным электрон-позитронным пучкам. В этом случае процесс образования супер-ядер может идти по нескольким каналам. Основные из них связаны с рождением пары мезон-антимезон:

$$e^+ + e^- \rightarrow \begin{cases} D^0 + \bar{D}^0 \\ D^+ + D^- \\ \dots \\ B^0 + \bar{B}^0 \\ B^+ + B^- \end{cases}$$

Пробег тяжёлых мезонов в плотном веществе составляет несколько сот микрон. Если на расстоянии 100–200 мкм от точки столкновения расположить мишень, например, слой ядерной эмульсии, то мезон M ($M = D, B \dots$) при взаимодействии с ядром мишени может с большой вероятностью образовать тяжёлый барион B ($B = \Lambda_c, \Sigma_c \dots \Lambda_b \dots$): $M + A \rightarrow B + \pi$. Кинематическая особенность этой реакции такова, что при определённом значении импульса мезона M ("магический" импульс) барион B рождается с нулевым импульсом, и вероятность его захвата ядром-

остатком весьма велика. Эта особенность широко используется для генерации гиперядер в пучках каонов. Значение "магического" импульса составляет ~ 500 и 600 МэВ для К- и D-мезонов, соответственно. Для рождения D-мезона с таким импульсом полная энергия пучков e^+ и e^- должна быть около 3,93 ГэВ.

Идентификация супер-ядер может быть затруднена наличием большого числа распадных каналов тяжёлого бариона, вследствие его большой массы. В экспериментах на встречных пучках наличие второго мезона, летящего в противоположном направлении, может служить дополнительным признаком при поиске супер-ядра.

Результаты этого цикла работ опубликованы в КСФ № 11, 28 (1981); КСФ № 12, 24 (1984); Proc. Symp. Quark Interactions & Quantum Chromodynamics, (1981) p. 155; Proc. Conf. Hypernucl. & Kaon Phys., Heidelberg, (1982) p. 331; Nucl. Phys. **A450**, 507C (1986); Proc. Int. Symp. Hypernucl. & Strange Particle Phys., Shimoda, Japan (1991) p. 86; SUPERLEAR Workshop: Physics at SuperLEAR, Zurich, Switzerland, 9--12 Oct 1991, p. 241; Nuovo Cim., **A104**, 1361 (1991); Preprint JINR-E1-91-404 (1991); Preprint RIKEN-AF-NP-122 (1992).

17.3. Исследования ядерной материи в состояниях с экстремально высокими температурой и плотностью (1993 – 2006 гг.).

В 1993–2004 гг. в Теоретическом отделе (ТО) ФИАН и ЛЭЧ (с участием Е.Л. Фейнберга, О.Д. Чернавской, и И.И. Ройзена) проводились теоретические исследования состояний ядерной материи при высокой и сверхвысокой температуре и/или плотности.



О.Д. Чернавская

В современной физике считается, что ядерная материя существует в двух фазах. Её нормальной температуре и/или плотности отвечает обычная (адронная) фаза, где кварки связаны внутри адронов, а цвет (внутренне квантовое число кварков) не распространяется свободно. В то же время при

экстремальных условиях (т.е. при сверхвысоких значениях этих параметров) возникает кварк-глюонной плазмы (КГП), т.е. газ «свободных» безмассовых кварков и глюонов.

В работах ТО и ЛЭЧ ФИАН было введено понятие нового промежуточного фазового состояния: газа свободно распространяющихся массивных цветных конститuentных кварков (их часто называют валентными кварками, или валонами). В рамках этих представлений была предложена и разработана концепция трехфазного состояния ядерной материи.

Имеются два аргумента в пользу такой концепции. Принято считать, что в экстремальных условиях ядерная материя существует в фазе кварк-глюонной плазмы, т.е. газа почти свободных безмассовых «цветных» кварков и безмассовых же «двухцветных» глюонов. Последние обеспечивают взаимодействие кварков вплоть до установления полной асимптотической свободы. В то же время в нормальных условиях кварки связаны внутри обычных адронов. В этом и заключается эффект «конфайнмента», т.е. удержания или невылетания цветных свободных кварков. Однако вопрос о том, что делается при промежуточных температурах, т.е. как происходит переход от КГП к адронной материи остаётся открытым.

В господствующей ныне модели «раннего фризаута», предложенной для описания процессов охлаждения ядерной материи для объяснения экспериментов на ускорителях, этот вопрос не ставился. Считалось, что при температуре порядка 180 МэВ происходит множественное рождение адронов. При этом их состав консервируется, и вплоть до свободного разлета, они существуют в виде квазисвободного газа, а их состав не меняется.

Такая гипотеза весьма уязвима. Во-первых, нет оснований считать адронный газ при таких температурах слабо взаимодействующим. Так, например, по оценкам, в опытах на ускорителях отношение выхода антипротонов и протонов, будучи зафиксировано при температуре фризаута, просто не может сохраниться вплоть до свободного разлета адронов и даже должно понизиться на порядок. Во-вторых, температуры как фризаута, так и свободного разлета физически не выделены, и вопрос, почему происходит сначала фризаут, а при дальнейшем охлаждении свободный разлет, ответа не имел.

Развитие наших знаний об адронной материи исторически шло от низких температур к высоким. Концепция же кваркового строения адронной материи всегда апеллировала к тяжелым конститuentным кваркам с массой, примерно, $1/3$ массы протона. Со временем, в экспериментах с космическими лучами и на ускорителях были открыты новые элементарные частицы. Разобраться в их многообразии стало возможным благодаря гипотезе о существовании валонов. Р. Хагедорном было показано, что имеется некая предельная температура адронной материи (температура Хагедорна), выше которой элементарные частицы и резонансы существовать не могут.

Естественно предположить, что температура Хагедорна отвечает фазовому переходу, т.е. переходу в фазу свободных массивных валонов (фаза свободного распространения цвета). В свою очередь, в рамках трехфазной модели температуру фризаута разумно отождествить с температурой второго фазового перехода от валонной фазы к истинной КГП. Таким образом, в рамках этой концепции удастся вплотную подойти к одному из самых интригующих эффектов современной физики: эффекту конфайнмента. Фазовый переход от валонной плазмы к адронной материи, естественно, приводит к связыванию одиночных цветных кварков, т.е. к их невылетанию.

К недостаткам данной концепции следует отнести несоблюдение «принципа минимализма», который лежит в основе современной гипотезы раннего фризаута: две фазы присутствуют с неизбежностью, третьей (а также последующих) желательно избежать. Пока этот принцип является более популярным, чем развиваемая здесь концепция. Однако, на её основе удаётся удовлетворительно описать экспериментальные данные, полученные на ускорителях как средних (BEVALAC, GSI), так и очень высоких (SPS, RHIC) энергий. Было показано, что экстра-выход дилептонов, наблюдаемый на ускорителях SPS и RHIC, в рамках концепции трехфазной ядерной материи может быть описан лучше, чем это удастся сделать без обращения к конституентным кваркам. Предсказанные выходы частиц хорошо совпадают с результатами экспериментов. Удалось также дать предсказания для будущих экспериментов на ускорителе-коллайдере сверхвысокой энергии LHC.

Основные результаты, относящиеся к развиваемой концепции, изложены в научных журналах *Z. Phys. C*, **70**, 517 (1996); *ЯФ*, **66**, 185 (2003); и *УФН* **174**, 473 (2004).

17.4. Разработка моделей физических и биологических процессов (1985–2011 гг.).

В 1985–1987 гг. в процессе подготовки экспериментов на ускорителях высокой энергии в ЦЕРН ЛЭЧ приняла участие в разработке теоретической модели взаимодействия адронов, которая могла бы детально описать рождение новых частиц. Были учтены и вычислены вклады всех существенных диаграмм кварк-кварковых, кварк-глюонных и глюон-глюонных взаимодействий. В частности, применение этой модели к процессу рождения тяжелых s и b кварков в протон-ядерных соударениях позволило успешно описать наблюдаемые свойства лептонных пар, такие как сечение их рождения и импульсное распределение. Другой вариант этой модели позволил успешно описать импульсные распределения адронов и фотонов, образованных в протон-ядерных и ядро-ядерных соударениях при энергиях от 20 до 200 ГэВ/нуклон. Впоследствии в ЛЭЧ была разработана более абстрактная модель нелокальных взаимодействий калибровочных полей, которую можно применять для описания рождения тяжёлых частиц на коллайдере LHC при более высоких энергиях.



С.Н. Майбуров

Другие теоретические исследования связаны с квантовой теорией передачи и измерения сверхслабых квантовых сигналов. Такие процессы происходят, в первую очередь, в биологических системах: живых клетках, хромосомах и других подобных объектах. Совместно с университетом Генуи (Италия) изучались процессы передачи сигналов в хромосомах при туннельном переходе протонов через электростатические клеточные барьеры. Понимание этих процессов позволяет выяснить причины возникновения некоторых наследственных заболеваний. В рамках исследования механизмов фотонной межклеточной сигнализации была предложена модель, основанная на аналогии со стандартными (дискретными) каналами связи, используемыми в компьютерных сетях. Такая модель позволила успешно описать ряд свойств фотонов биологического происхождения, излучаемых клетками и тканями живых организмов.

Деятельность, связанная с развитием теоретических моделей, даёт и практический выход. На их основе совместно с Биологическим факультетом МГУ и рядом институтов Минздрава РФ разрабатывается проект комплекса диагностической аппаратуры для выявления некоторых заболеваний, в том числе онкологических. Участником всех упомянутых исследований является сотрудник ЛЭЧ С.Н. Майбуров.

Основные научные результаты, относящиеся к этому циклу, работ опубликованы в изданиях Phys. Lett. **B152**, 583 (1985); Nucl. Phys. **B6**, 411 (1985); Phys. Lett. **B192**, 463 (1987); Z. Phys.. **C32**, 491 (1987); Phys. Lett. **B214**, 295 (1988); Труды Института им. Стеклова, **81**, 165 (2004); J. Phys. **A41** (2008); Int. J. Quant. Inform. **5**, 279 (2006); Proc. VIII Symp. Frontiers of Fundamental Physics (Springer, Dordrecht, 2005); Труды Межд. Конф. Нанотехнол. Наноматериал. (Москва, Изд. МГОУ, 2009) с. 351; и Труды Конф. PIERS-2009' (в печати).

18. Разработка новых черенковских детекторов (1984 – 1995)

В середине 1980-х гг. в научной литературе широко обсуждались возможности регистрации мюонов, генерированных нейтрино высокой

энергии) по их акустическому и оптическому черенковскому излучению в глубоких естественных водоёмах (проект ДЮМАНД и др.). Проблема регистрации высокоэнергичных нейтрино имеет научные и прикладные аспекты. Так, состав и интенсивность пучков нейтрино, на больших (~1000 км) расстояниях от генерирующего их ускорителя («дальние» нейтрино) позволяет исследовать нейтринные осцилляции, т.е. переходы между различными типами нейтрино, зависящие от его массы. Прикладное значение таких экспериментов связано с тем, что дальние нейтрино могут служить хорошим зондом для изучения структуры Земли, а также переносчиком информации сквозь её толщу.

В работах, выполненных в ЛЭЧ Н.З. Гогитидзе и В.А. Царевым, был предложен метод повышения эффективности регистрации широких параллельных пучков высокоэнергичных мюонов, порождённых нейтрино в водной среде. Это достигается фокусировкой света зеркальными отражателями параболоидного типа (Рис.18.1–18.3), в фокальной плоскости которых помещался фотоприёмник (фотоэлектронный умножитель). При этом наличие отражателя обеспечивает высокую угловую направленность регистрации ($\Delta\theta \sim d/CD$, где d и D диаметры фотоприёмника и рефлектора, соответственно, а $C \geq 1$ численный коэффициент, зависящий от конструкции зеркального рефлектора). Аналогичным образом, диаметр пространственной области обзора такого детектора увеличивается в $1/\Delta\theta$ раз по сравнению с открытым фотоприёмником.

Подобные детекторы особенно эффективны при регистрации широких пучков, поперечный размер которых заметно превосходит размеры фотоприёмника. Зеркальные отражатели были изготовлены методом осадки в форму (сжатым аргоном) нагретого листового оргстекла. Свойства полученных бочкообразных рефлекторов изучались в опытах с пучками электронов с энергией 0,1–0,5 ГэВ на ускорителе С-60 ФИАН. Эксперименты подтвердили ожидаемые характеристики черенковских детекторов с фокусировкой света, которые затем были использованы в измерениях поглощения космических мюонов в воде Тихого океана на глубинах до 3 км (14-ый рейс НИС «Академик «Лаврентьев», 1989 – 1990 гг.).

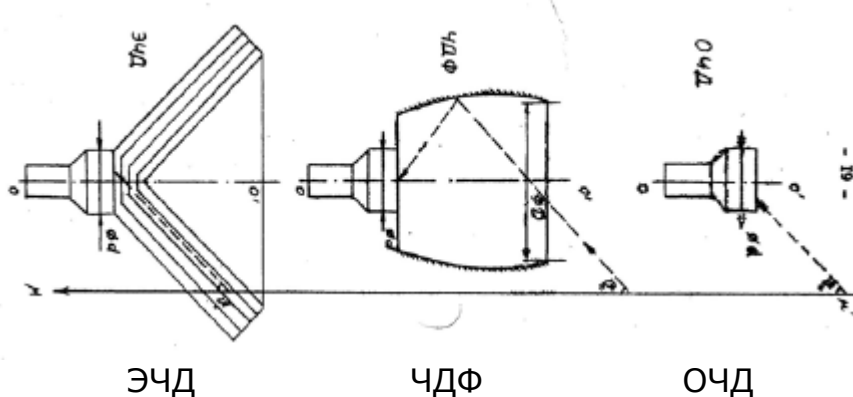


Рис.18.1. Водные черенковские детекторы (справа налево): открытый (ОЧД); с фокусировкой (ЧДФ) и с экранировкой (ЭЧД) света.

При этом детекторы регистрировали широкий поток вертикальных космических мюонов. Поскольку световой фон океана изотропен, то подобные детекторы также улучшают отношение сигнал/шум. Это отношение увеличивается и применением экранирующих насадок в форме кольцевых жалюзи. Режим детекторов соответствовал эффективности 15% регистрации одноэлектронных сигналов. Измерения подтвердили правильность оценок эффективности детекторов с фокусировкой света (Рис.18.4–18.6).

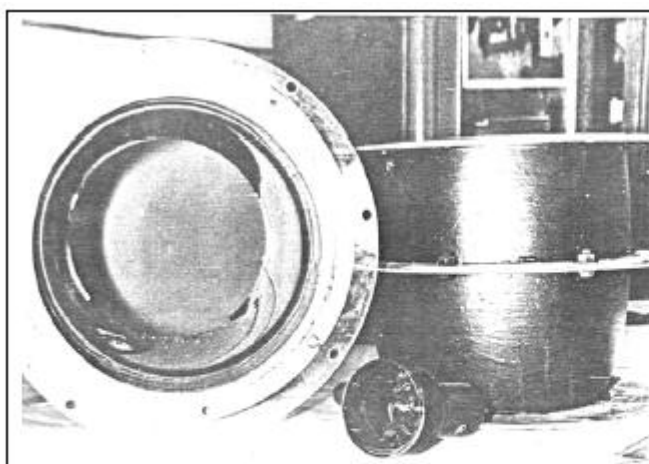


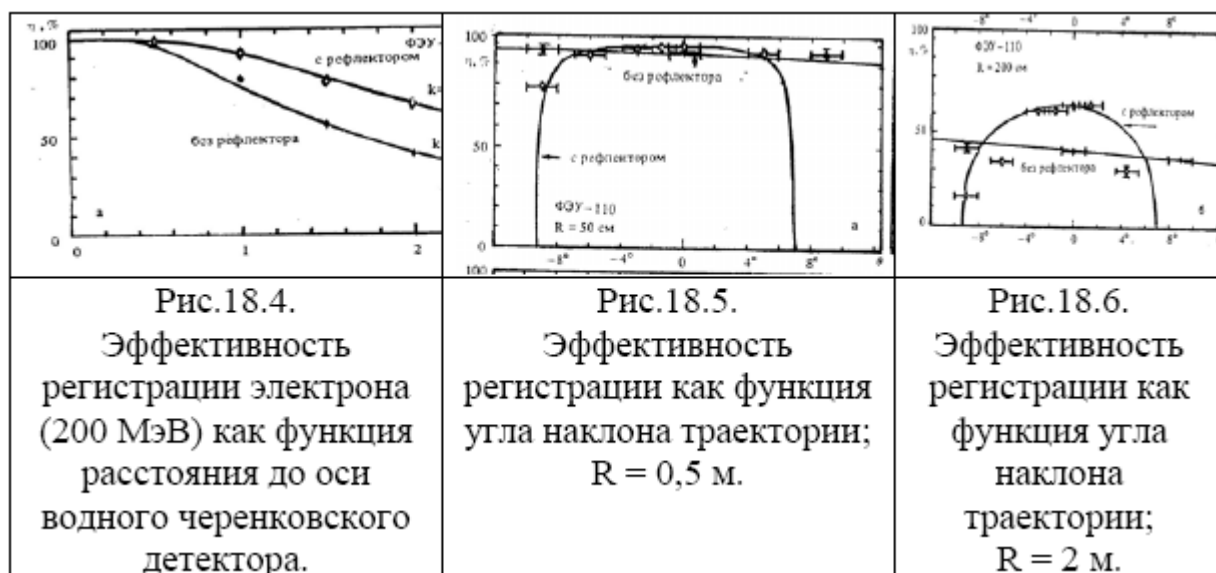
Рис.18.2. Рефлекторы параболоидного типа с фотоэлектронным умножителем ФЭУ-110



Рис.18.3. 4-х каналный модуль детекторов для подводных измерений

Ещё одна разработка ЛЭЧ была направлена на создание черенковских спектрометров полного поглощения на основе концентрированных водных растворов тяжелых солей. Насыщенные водные растворы ZnBr_2 и CsCl при комнатной температуре имеют радиационную длину $x_0 = 5,0$ и $6,3$ см при плотности $2,65$ и $1,86$ г/см³, соответственно, что сравнимо с параметрами тяжелых кристаллов. При этом такие детекторы недороги и просты в изготовлении. В экспериментах на ускорителе С-60 ФИАН проводилась спектрометрия электронов с энергией $200\text{--}500$ МэВ. Использовалась измерительная ячейка в виде стеклянной трубы с внутренним диаметром $8,5$ см и длиной $0,54$ м с торцевым фотоприемником ФЭУ-110. Энергетическое разрешение для насыщенного раствора CsCl составило $0,32\%(E, \text{ГэВ})^{-1/2}$.

Была также исследована возможность регистрации колец черенковского УФ-излучения в радиаторе CaF_2 (РИЧ-детекторов) с целью идентификации продуктов (с энергией до 5 ГэВ) взаимодействия нейтрино, генерированного ускорителем ИФВЭ. Визуализацию колец черенковского УФ-излучения предполагалось производить в гелиевой стримерной камере с добавкой органических паров ТЕА или ТМАЕ с низким (~ 7 эВ) порогом ионизации.



Моделирование регистрации черенковских фотонов в газе стримерной камеры показало, что отделение пионов от каонов и каонов от протонов этим методом возможно при импульсах частиц ниже 2,6 и 4,2 ГэВ/с, соответственно. Для уменьшения хроматических погрешностей из-за резкого изменения показателя преломления CaF_2 в области длин волн $\lambda < 140$ нм, предложено добавлять в газ метан, сильно поглощающий такие УФ фотоны.

Проблема детектирования колец черенковского излучения из радиаторов LiF и MgF_2 изучалась как расчётным путём, так и экспериментально. В последнем случае черенковские фотоны регистрировались либо с помощью ЭОП, либо матрицей фотоумножителей ФЭУ-115м. Проведенные эксперименты подтвердили принципиальную возможность использования обоих методов регистрации колец черенковского излучения.

Эти исследования были продолжены в связи с подготовкой эксперимента AMS по регистрации частиц космических лучей на искусственном спутнике Земли или Международной космической станции. Проводилось моделирование регистрации матрицей фотоэлектронных умножителей ФЭУ-143 колец черенковского излучения, генерированного в радиаторе NaF толщиной 2 см. Была доказана возможность определения заряда ядра и угла его падения на радиатор, а также идентификации ядра по черенковскому углу и отклонению в магните AMS (Рис.18.7–18.10).

В разработках и испытаниях черенковских детекторов нового типа принимали участие сотрудники ЛЭЧ К.В. Александров, П.С. Васильев, В.М. Гришин, Е.П. Кузнецов, Б.Н. Ломоносов, Г.И. Мерзон, Д.И. Минасян, Л.С. Первов, В.А. Рябов, А.С. Русецкий, Н.И. Старков, В.А. Царёв и В.А. Чечин.

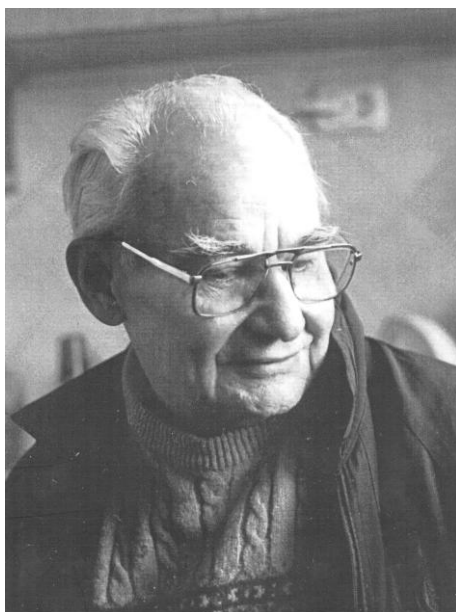
Рис. 18.7. Моделирование колец черенковского излучения для электрона и протона с импульсом 3 ГэВ/с и ядра He (3 ГэВ/с нуклон)	Рис.18.8. Кольца черенковского излучения ядра He, падающего на радиатор NaF под углами 10° и 20°.	Рис. 18.9. Скорость частицы, восстановленная по кольцу черенковского излучения. Сверху вниз: π-, K-мезоны и протоны.	Рис.18.10. Расчётные массы частиц, восстановленные по данным RICH-детектора и магнита AMS.

Материалы этих исследований опубликованы в виде препринтов ФИАН № 146 (1984), № 51 (1989), № 119 (1989), № 154 (1989), № 159 (1990), № 9 (1991), а также в журналах КСФ № 7-8, 43 (1994), КСФ № 1-2, 52 (1995); Письма в ЖТФ, 22, № 18, 11 (1996); Математическое моделирование 9, № 11, 33 (1997); ПТЭ № 1, 71 (1999).

19. Развитие метода регистрации заряженных частиц плоским резистивным газоразрядным счётчиком (1990 – 1996 гг.)

Резистивный плоскопараллельный счетчик (РПС) был предложен в 1970 г. Ю.Н. Пестовым и др. Однако последующее развитие эта новая перспективная методика получила в 1980--1990-е гг. Достоинствами РПС являются простота конструкции, низкая стоимость и возможность изготовления детекторов большой площади при их высоких временных и пространственных характеристиках. Эти качества РПС позволяют им конкурировать со сцинтилляционными детекторами.

Методика РПС основана на свойствах полупроводящих листовых материалов, определяющих развитие ограниченного во времени и пространстве разряда. Работы, проводившиеся в ЛЭЧ (Л.П Котенко, С.К. Котельниковым, С.Е. Пятовским, Ю.А. Трубкиным и др.), были нацелены на создание РПС, использующих недорогие доступные материалы, в частности, обычное оконное стекло с объемным сопротивлением $\sim 3 \times 10^{12}$ Ом см.



Л.П. Котенко

Были собраны и испытаны однозачорные РПС в искровом режиме. (В этом случае усиливать сигнал не требуется, и счетная характеристика имеет протяженное плато, позволяющее стабилизировать режим работы РПС). Исследовались РПС со стеклянными электродами двух типов.

(1) Электрод размером $11 \times 11 \text{ см}^2$ с наружным покрытием из алюминиевой фольги, соединенной со стеклом с помощью коллоидного графита.

(2) Электрод размером $40 \times 20 \text{ см}^2$ с алюминиевым напылением (катод имел сплошное покрытие, а анод – полоски (стрипы) шириной 4 см для определения места прохождения частицы).

Зазор 2–3 см между стрипами позволял согласовать РПС с 50-омным сигнальным кабелем. Зазор между электродами задавался диэлектрическими шайбами и составлял 1,85 мм. Герметичный корпус РПС заполнялся газовой смесью $\text{Ar} + \text{C}_3\text{H}_8 + \text{фреон13}$ в различных пропорциях.

В результате, были созданы РПС со следующими параметрами:

1. Эффективность регистрации одиночных космических мюонов 93%.
2. Амплитудное разрешение $\sim 10\%$.
3. Временное разрешение (средне-квадратичная задержка времени появления сигнала после прохождения мюона) $\sigma_\tau = 0,63 \text{ нс}$.
4. Пространственное разрешение по длине стрипа (точность локализации разряда) $\sigma_x = 0,4 \text{ см}$.

Вместе с тем РПС обладал и некоторыми недостатками. Из них самым специфичным было постепенное нарастание частоты фоновых сигналов из-за накопления продуктов полимеризации углеводородов, оседавших на электродах.

Основные результаты работ по развитию техники РПС в ЛЭЧ опубликованы в виде препринта ФИАН № 17, М., (1991) и в журнале КСФ № 3 – 4, 78 (1996).

20. Участие ЛЭЧ в коллаборациях H1 и HERA-B на коллайдере ДЕЗИ в Гамбурге (1991 – 2003 гг.)

Коллайдер HERA – немецкий ускоритель ДЕЗИ (DESY, Deutsches-Elektronen Synchrotron, Гамбург) на встречных пучках протонов ($E_p \sim 920$ ГэВ) и электронов ($E_e \sim 27,5$ ГэВ). Сотрудники ЛЭЧ участвовали в двух экспериментах: H1 и HERA-B ускорителя HERA (Рис.20.1).

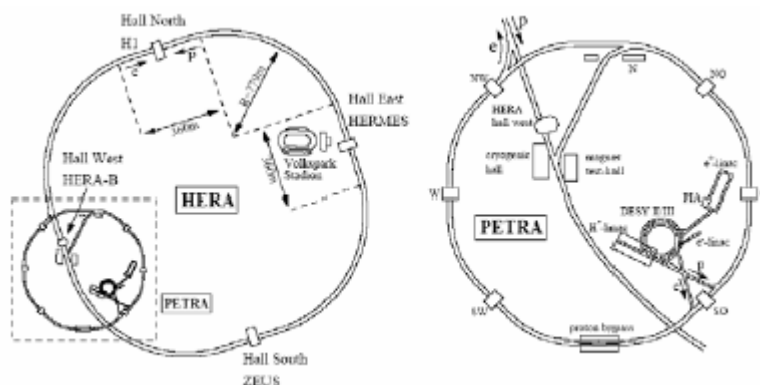


Рис.20.1. Схема ускорителя HERA и размещения 4-х экспериментов: H1, HERAB, HERMES и ZEUS.

В экспериментах H1 и HERA-B изучались проявление структуры протона во встречных $e-p$ столкновениях и эффекты нарушения СР-чётности при столкновении протонного пучка с фиксированной мишенью.

20.1. Эксперимент Н1.

Коллаборацией H1 на ускорителе HERA была создана комплексная экспериментальная установка (Рис.20.2) для изучения структуры протона (Рис.20.3).

С этой целью были решены задачи автоматизации управления источниками высокого напряжения трековых детекторов, контроля триггера мюонного детектора, обнаружения в режиме реального времени неисправных каналов считывания (при их числе около 700000) и контроля положения пучка протонов.

Наиболее интересная и продолжительная работа была связана с созданием спектрометра слабо рассеянных протонов, который получил название Римские Горшки. Такое название было дано в честь группы физиков из Рима, предложивших помещать детекторы частиц в вакуумный трубопровод ускорителя, с тем, чтобы регистрировать слабо рассеянные частицы, отклонившиеся от оси пучка.

В число наиболее важных задач входили управление детектором, установленном в канале протонного пучка, и синхронный сбор данных со всей установки Н1. Перечисленные задачи оказались критически важными для работы всей коллаборации. Так, например, было необходимо

максимально приблизить детектор к пучку, чтобы эффективно регистрировать слабо рассеянные протоны. Но при введении детектора в гало пучка часто нарушалась его фокусировка. Это происходило из-за попадания протонов пучка на стенку вакуумной камеры и приводило к ухудшению вакуума в канале ускорителя и к выходу последнего из строя.

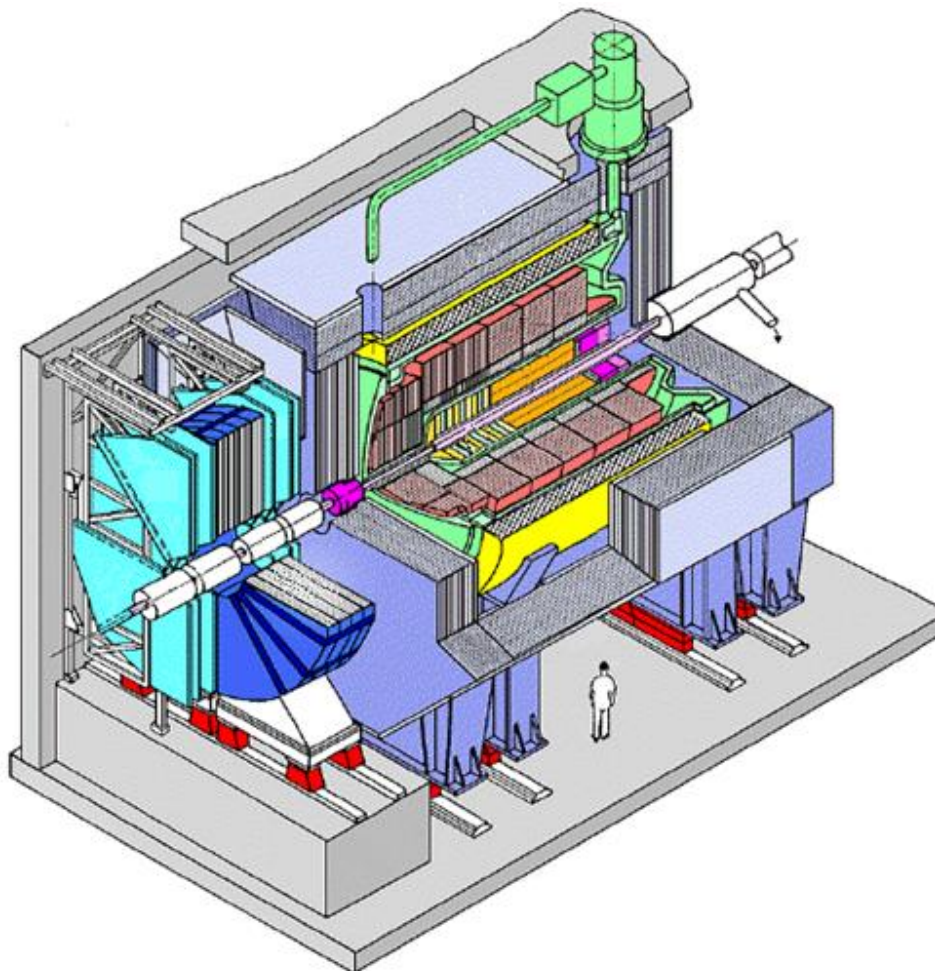


Рис.20.2. Детектор Н1 .

Не менее сложно было организовать сбор данных с детектора. Для этого потребовалось в пределах нескольких миллисекунд добиться отклика на триггер второго уровня, управляющий сбором результатов измерений, и организовать в течение 700 мс передачу данных с детектора в базу данных установки Н1. Все эти трудности удалось преодолеть. В результате работы спектрометра было измерено сечение дифракционного рассеяния протонов при малых передачах импульса.

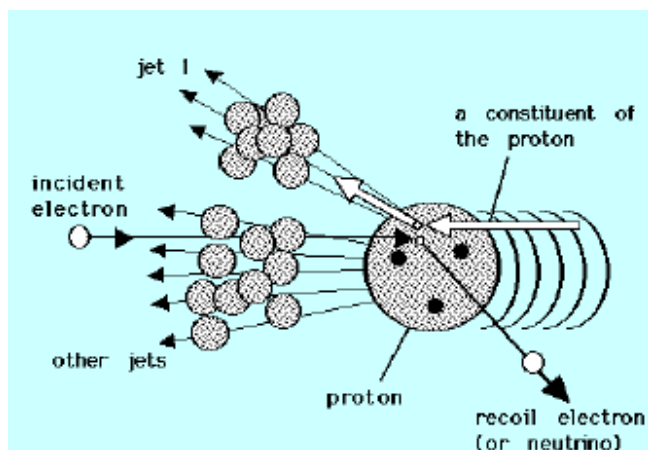


Рис. 20.3. Исследование структуры протона.

В этих работах активное участие принимал сотрудник ЛЭЧ С.К. Котельников. Результаты исследований по этой теме опубликованы в виде препринта ФИАН № 98-39, 1998 и в журнале NIM **A446**, 409 (2000).

20.2. Эксперимент HERA-B.

Цель этого эксперимента, который стартовал в ДЕЗИ (Гамбург) весной 2000 г., состояла в измерении CP-нарушения в В-мезонной системе. Нейтральные В-мезоны генерировались при взаимодействии протонов (920 ГэВ) с фиксированной мишенью (Рис.20.4). Спектрометр HERA-B (Рис.20.5) включал проволочную мишень (Target Wires), трековые детекторы (Si-Strip Vertex, Inner Tracker, Outer Tracker), черенковский детектор (Ring Cherenkov Counter), ионизационный калориметр (Calorimeter) и мюонный детектор (Muon Detector).

В период 1999–2003 гг. сотрудники ФИАН (Б.Н. Ломоносов и М. А. Негодаев) участвовали в совместных работах с немецкими физиками из Гейделбергского университета по сборке, тестированию и обслуживанию детектора ITR (Inner Tracker detector). ITR содержал 184 микростриповых газовых камер (MSGC) с газовыми электронными усилителями (GEM).

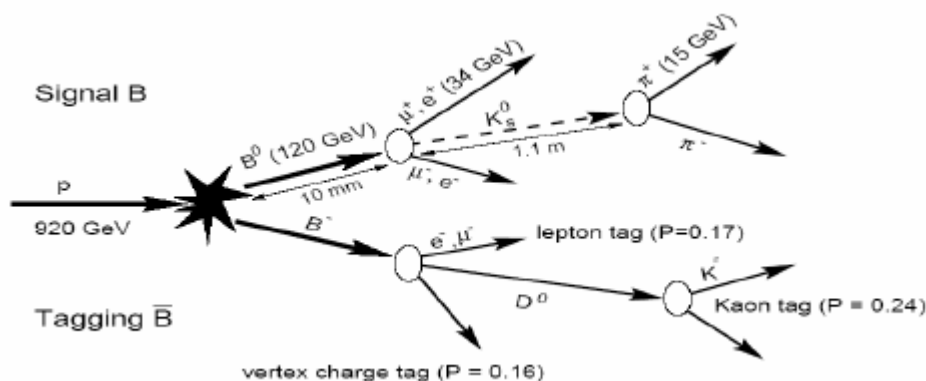


Рис. 20.4. Изучение CP-нарушения в эксперименте HERA-B.

Для автоматизации контроля каждого собранного модуля сотрудник ЛЭЧ Б.Н. Ломоносов разработал тестовую программу, которая за 20 минут работы измеряла уровень шумов всех 768 аналоговых каналов MSGC. Результаты измерений каждого канала MSGC записывались в базу данных.

Микростриповые камеры объединялись в десять станций ITR, расположенные вдоль оси протонного пучка от вершинного детектора до калориметра; общее число аналоговых каналов ITR составляло 120000.

Рис. 20.6. иллюстрирует принцип работы микростриповой камеры (MSGC + GEM); на Рис.20.7 приведено расположение камер MSGC около протонного пучка.

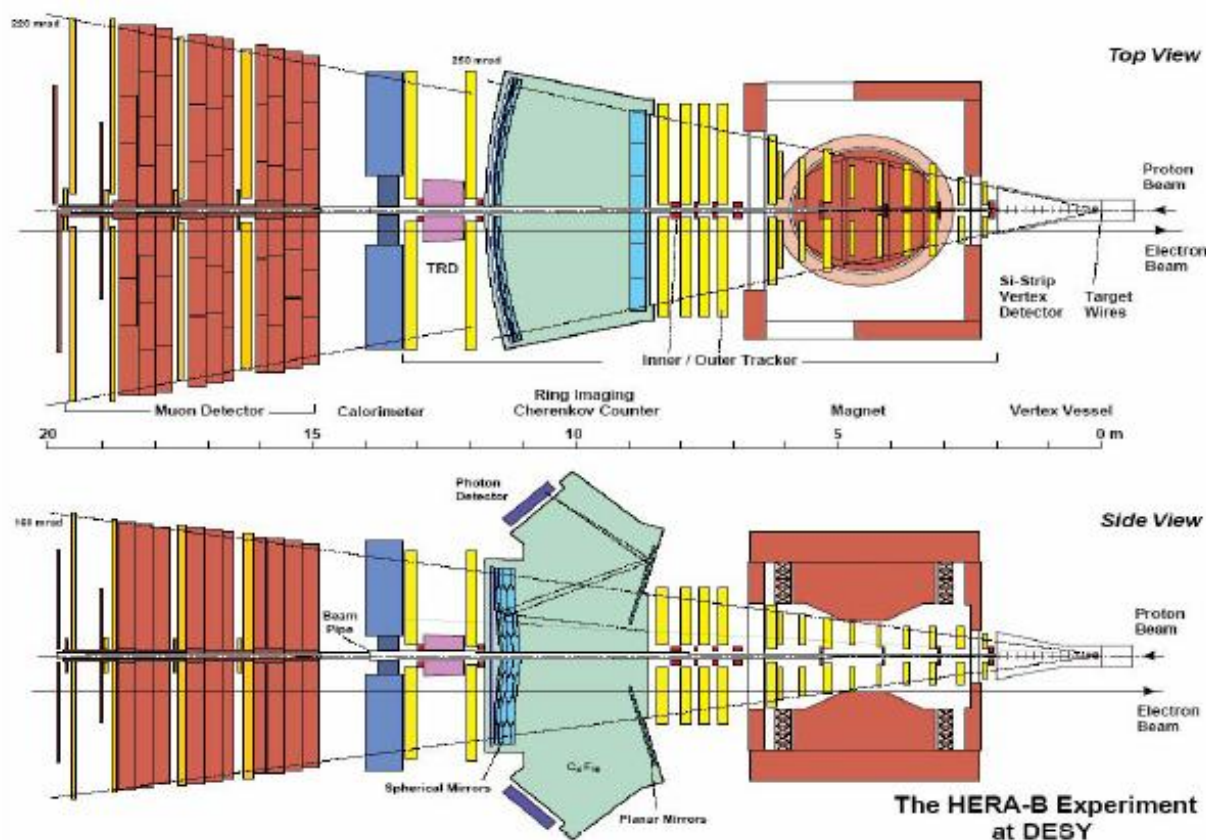


Рис.20.5. Схема размещения детекторов эксперимента HERA-B.

Результаты работы на HERA-B приведены в публикациях: ICFA Instrum. Bull. **24**, 54 (2002); Eur. Phys. J. **C26**, 345 (2003); Phys.Lett. **B561**, 61 (2003); Eur. Phys. J. **C29**, 181 (2003); Phys. Lett. **B596**, 173 (2004); Phys. Rev. Lett. **93**, 212003 (2004).

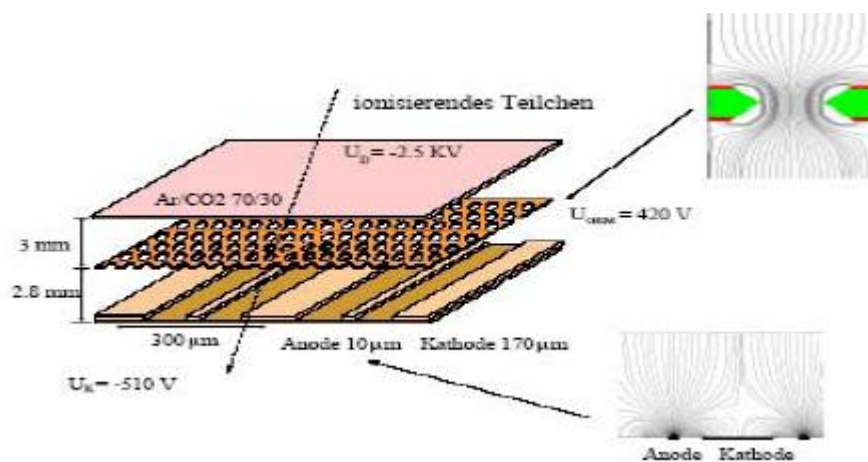


Рис. 20.6. Микростриповая камера MSGC + GEM.

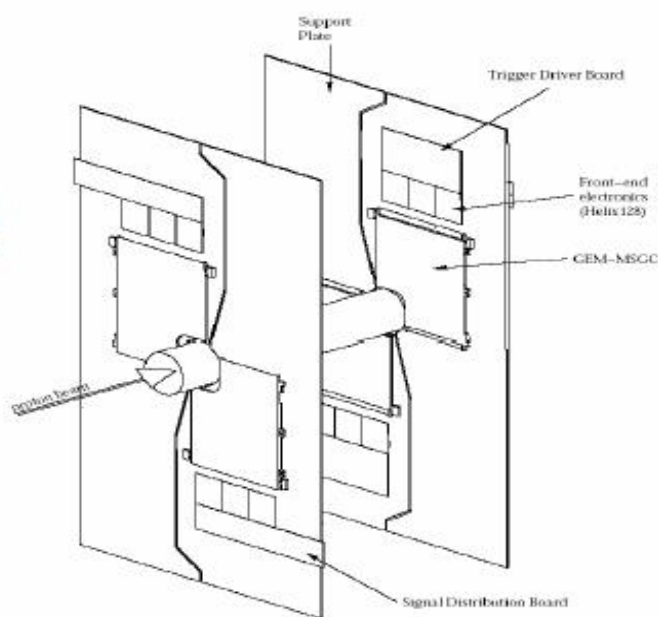
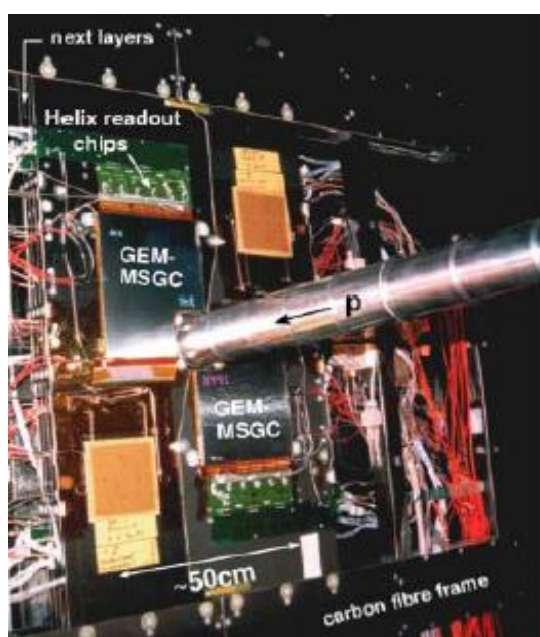


Рис. 20.7. Расположение микростриповой газовой камер MSGC около протонного вакуумпровода ускорителя HERA.

21. Разработка пакета программ GEANT4 для моделирования процессов взаимодействия элементарных частиц высокой энергии

Со дня основания в начале 1990-х годов Международного сотрудничества GEANT ЛЭЧ ФИАН участвует в разработке пакета этого объектно-ориентированного программного обеспечения для физики высоких энергий.

Эта деятельность началась с того, что руководитель группы GEANT3 Ф. Карминати предложил физикам ЛЭЧ включить в пакет GEANT3 раздел, описывающий ионизационные потери энергии (и их флуктуации) в веществе детекторов частиц.

Основой соответствующего раздела пакета GEANT3 стала развитая в ЛЭЧ ионизационная модель атома в виде системы гармонических

осцилляторов, адекватно отражающих его оболочечную структуру. К концу 1993 г. код GEANT3 был вчерне готов. В это время в группу пришёл новый руководитель С. Джани, и сотрудничество продолжилось в рамках более детального проекта GEANT4.

Весной 1994 г. Джани инициировал коренную переработку пакета GEANT3 в объектно-ориентированной (ОО) парадигме на языке C++, что соответствовало планам применения нового программного обеспечения для нужд Большого адронного коллайдера (БАК). В частности, отмечалось, что язык Фортран теряет свою популярность среди программистов, и нужно предпринять новые усилия, чтобы оставаться на современном уровне. Отмечалось также, что язык C++ набирает популярность и представляется весьма перспективным. В ЛЭЧ этот язык также пропагандировался Б.Н. Ломоносовым, кто одним из первых начал применять методы ОО для программирования электроники. Освоение ОО потребовало времени, но уже в 1995 г. в ЦЕРН началась практическая работа в рамках нового проекта GEANT4. Сначала были адаптированы некоторые ионизационные модели. Затем в 1996–1997 гг. начались работы по реализации раздела, касающегося геометрии эксперимента, в терминах различных геометрических тел, затем трассировки частиц в магнитных и электрических полях, и, наконец, булевой геометрии, описывающей тела со сложной конфигурацией.

В 1999–2009 гг. сотрудники ЛЭЧ и ЛЭВЭ ФИАН (В.М. Гришин, Н.И. Старков и А.В. Багуля) участвовали в разработке пакета GEANT4 уже как единая группа из России. В частности, Н.И. Старков работал с моделями упругих ядерных столкновений, а А.В. Багуля, в основном, по физике электромагнитных взаимодействий.

Таким образом, группа ФИАН участвует в проекте GEANT4 более 15 лет. За это время выполнены следующие программные разработки:

1. физические модели для электромагнитной физики (ионизация, синхротронное излучение в веществе, рентгеновское переходное излучение в различных радиаторах и ряд вспомогательных программ);
2. геометрия простых тел и булева геометрия;
3. трассировка частиц в пространственно-неоднородных и зависящих от времени магнитных и электрических полях;
4. модели ядерных взаимодействий (сечения взаимодействия адрон – ядро и ядро–ядро, и упругое рассеяние адронов и ядер на ядрах);
5. вспомогательные математические программы для интегрирования и вычисления специальных функций.

Названные выше сотрудники ФИАН разработали и продолжают развивать следующие разделы пакета программ GEANT4:

1. Геометрическая часть пакета.
2. Прохождение заряженных частиц во внешних неоднородных и нестационарных электромагнитных полях.
3. Части пакета электромагнитной физики, в частности, библиотеку процессов испускания рентгеновского переходного излучения в радиаторах различного состава и геометрии.

4. Части пакета по адронной физике.
5. Часть общих математических алгоритмов



Активные разработчики программного пакета GEANT4 В.М. Гришин и Н.И. Старков

В настоящее время все эти направления активно продолжают развиваться с целью повышения точности расчётов, расширения областей применения и, особенно, для нужд БАК (в частности, с учётом сечения генерации и взаимодействия антиядер, в том числе антинуклонов и легких антиядер). Многие из разработанных моделей оригинальны и опубликованы в авторитетных научных журналах. Пакет GEANT4 принят большинством участников экспериментов на Большом адронном коллайдере ЦЕРН в качестве основного средства моделирования прохождения релятивистских частиц через вещество детекторов.

В 2010 г. основная публикация по GEANT4 имеет индекс цитирования более 2200, и он ежедневно растёт, в среднем, на 1–2. Это говорит о большом практическом значении проекта, нашедшего применение не только в физике высоких энергий, но и в космических исследованиях, астрофизике, промышленности, медицине и других смежных областях науки и техники (см. <http://geant4.web.cern.ch/geant4>).

22. Подготовка эксперимента АТЛАС на коллайдере LHC в ЦЕРН (1991 – 2009 гг.).

Группа из семи физиков ЛЭЧ: А.П.Шмелева (руководитель), Л.Ф. Васильева, И.Л. Гавриленко, Ф.Ф. Каюмов, С.П. Коновалов, С.В. Муравьёв и В.О. Тихомиров активно участвовала в создании трекового детектора рентгеновского переходного излучения (Transition Radiation Tracker, или

TRT) для эксперимента АТЛАС на ускорителе LHC (Large Hadron Collider) в Европейском Центре Ядерных Исследований (ЦЕРН).

Эксперимент АТЛАС нацелен на изучение физики протон-антипротонных взаимодействий при энергиях сталкивающихся частиц 7 ТэВ. Установка АТЛАС (Рис.22.1) содержит три основных комплексных детектора: внутренний детектор, калориметрический детектор и мюонный спектрометр. Внутренний детектор располагается в непосредственной близости к области взаимодействия встречных пучков коллайдера и находится в магнитном поле 2 Тл. Он имеет длину 7 м и радиус 1,1 м и содержит кремниевый пиксельный детектор, полупроводниковый стриповый детектор и детектор переходного излучения TRT. Последний предназначен для трекинга заряженных частиц и идентификации электронов на преобладающем адронном фоне.

Детектор состоит из 420000 цилиндрических дрейфовых трубок диаметром 4 мм и длиной 0.5—2 м (Рис.22.2). Трубки прослоены пористым радиатором, в котором генерируются кванты переходного излучения. Временное разрешение TRT соответствует частоте 40 МГц работы LHC. TRT позволяет получить, в среднем, 36 точек на треке с пространственной точностью 150 мкм. Фактор подавления пионов при эффективности идентификации электронов 90% близок к 10^2 .

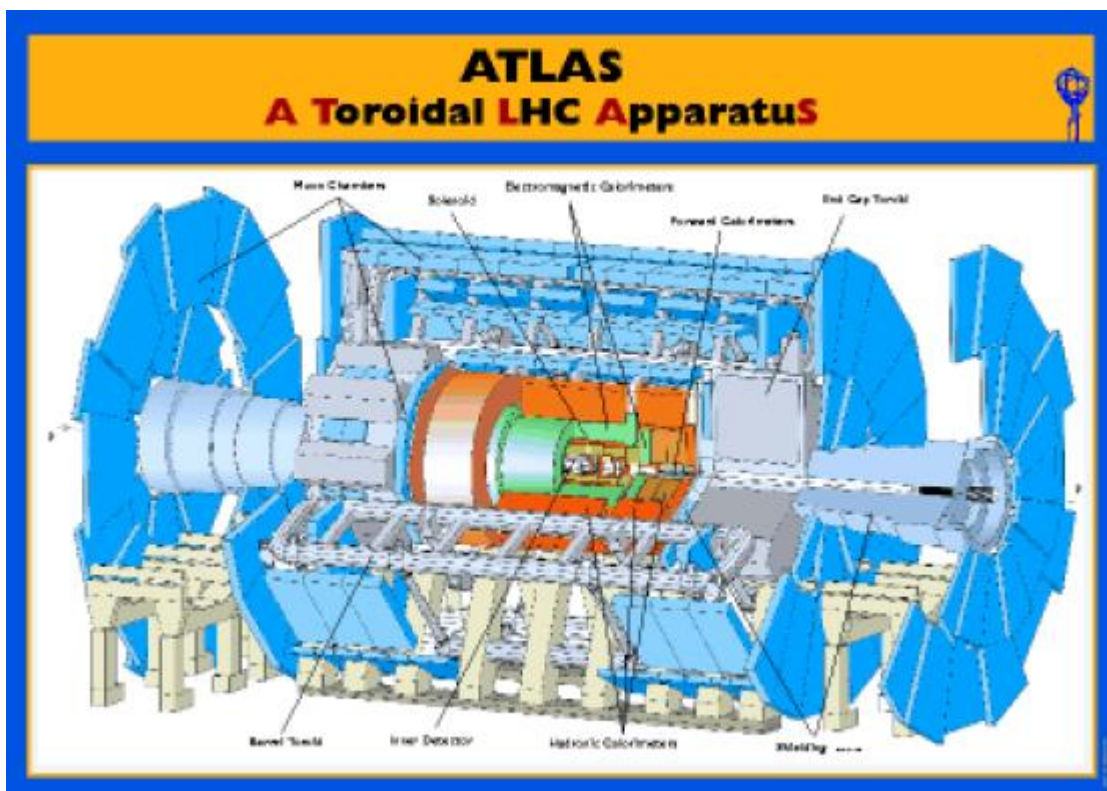


Рис. 22.1. Схема установки АТЛАС размером 45 м × 24 м.

Таким образом, TRT позволяет реконструировать и идентифицировать треки вторичных частиц в условиях высокой загрузки, ожидаемой на LHC.

С 1991 года группа ЛЭЧ ФИАН участвует в конструировании и тестировании различных прототипов TRT для использования на ускорителе SPS в ЦЕРН. Производство модулей TRT для эксперимента АТЛАС начато в ПИЯФ (Гатчина) и ОИЯИ (Дубна) с 2002 г. Эта работа завершилась в конце 2005 г. Группа ЛЭЧ ФИАН принимала участие в приемке и тестировании в ЦЕРН готовых модулей.

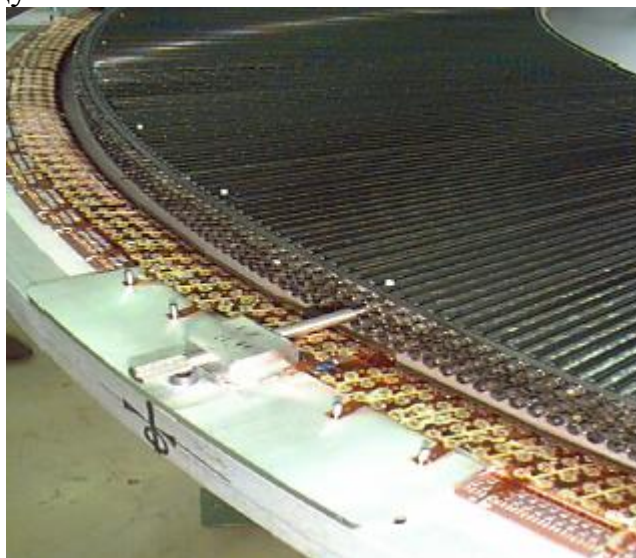


Рис.22.2. Дрейфовые камеры модуля TRT.



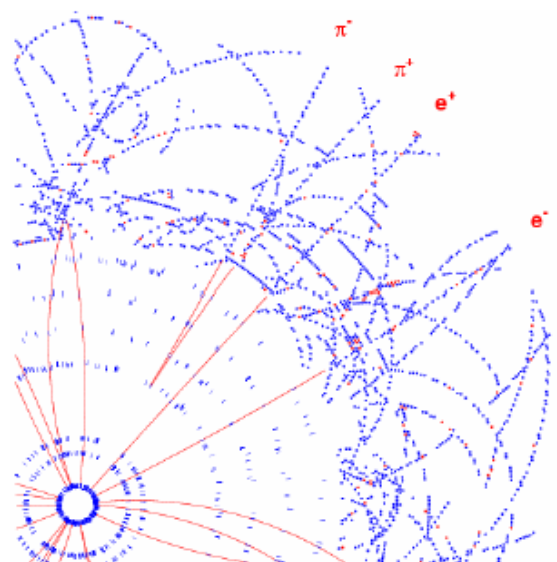


В.О. Тихомиров

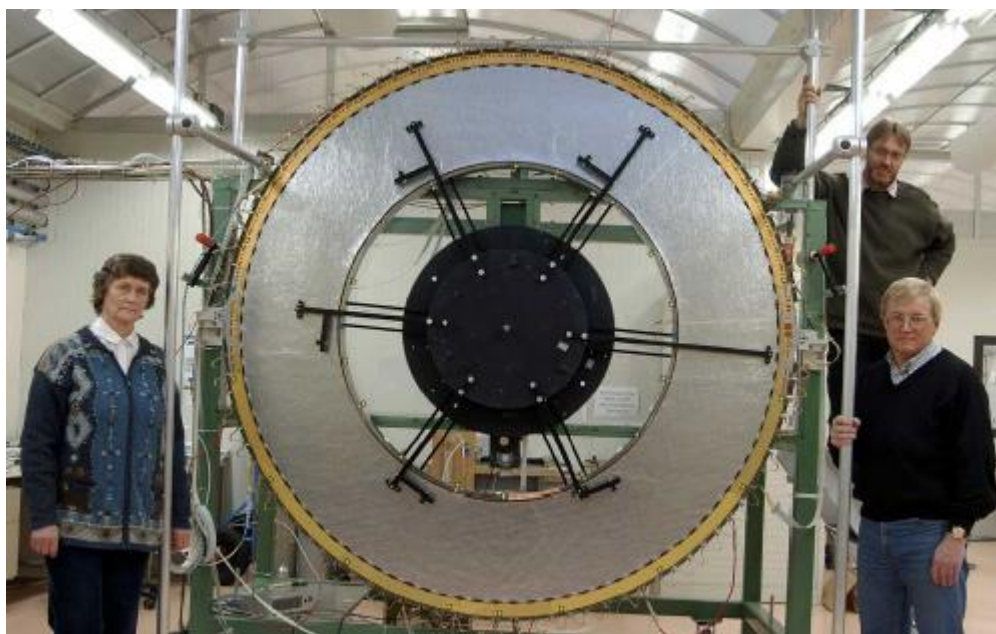
*Сотрудники ЛЭЧ участники
эксперимента АТЛАС*

Существенный вклад сделан в программное обеспечение эксперимента. Так, например, была создана программа реконструкции заряженных треков во внутреннем детекторе АТЛАС. Пример моделированного события в этом детекторе показан на Рис. 22.3.

Более подробные сведения можно найти в Интернет: <http://www.cern.ch>; и <http://atlas.web.cern.ch/Atlas> (Эксперимент АТЛАС) и http://www.cern.ch/Atlas/GROUPS/INNER_DETECTOR/TRT/trt.html (TRT детектор).



*Рис.22.3. Пример смоделированного
события во внутреннем детекторе АТЛАС*



Руководитель группы ФИАН А.П.Шмелева (слева), С.В.Муравьев (справа на переднем плане) и руководитель проекта АТЛАС TRT Фидо Диттус (справа на заднем плане) в помещении для тестирования модулей TRT в ЦЕРН; в центре – один из собранных модулей TRT.

23. Разработка широкоапертурного ионизационно-нейтронного калориметра для исследования космических лучей

Ионизационно-нейтронный калориметр (ИНКА) – многоцелевая орбитальная астрофизическая обсерватория, которая на протяжении ряда лет разрабатывалась и в настоящее время создается сотрудниками ЛЭЧ Г.И. Мерзоном и В.А. Рябовым, а также Лаборатории космических лучей (ЛКЛ ФИАН) А.П. Чубенко и А.А. Щепетовым, совместно с ИЯИ РАН и НИИЯФ МГУ.

Обсерватория ИНКА предназначена для проведения фундаментальных исследований первичного космического излучения (ПКИ) в интервале энергий $E_0 = 10^{12} - 10^{16}$ эВ. Основные задачи ИНКА – изучение энергетического спектра космических частиц и определение массового состава ядерной компоненты ПКИ, определение спектра первичных электронов при $E_e \geq 10^{12}$ эВ и измерение спектра диффузных γ -квантов в области энергий $30 \text{ ГэВ} \leq E_\gamma \leq 30 \text{ ТэВ}$, а также γ -квантов от дискретных источников при энергиях $10^{10} \text{ эВ} \leq E_\gamma \leq 10^{12} \text{ эВ}$. Модуль ИНКА с апертурой $\sim 17,6 \text{ м}^2 \cdot \text{ср}$, размещенный на космическом аппарате, значительно превзойдет по эффективности аналогичные зарубежные приборы (FERMI, CALET и др.).

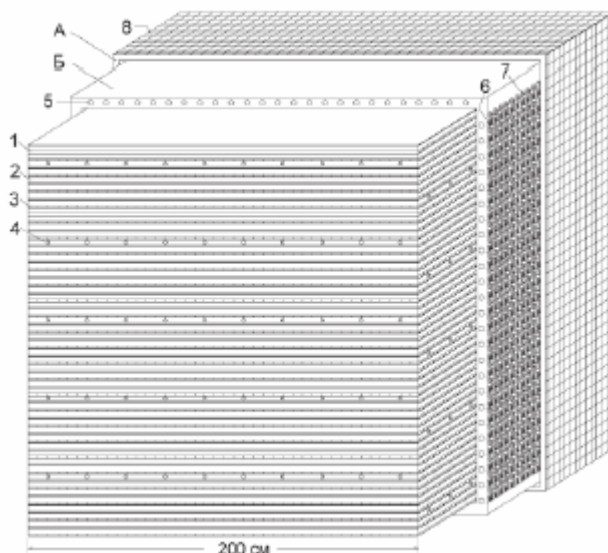


Рис. 23.1. Схема ИНКА. Обозначения: (1) свинец; (2) полиэтилен; (3) пластические сцинтилляторы; (4) счетчики СНМ-17; (5) счетчики "Гелий-2"; (6) платы электроники; (7) фотоприемники (ФЭУ, фототриоды); (8) зарядовые детекторы и внешняя часть прибора (А) и (Б).

Основные элементы модуля ИНКА схематически показаны на Рис. 23.1. Внутренняя часть (калориметр) разделена на 48 слоев, каждый из которых содержит пластины свинца толщиной 2 мм, полиэтилена толщиной

27,2 мм и слой полос пластических сцинтилляторов длиной ~ 2000 мм и толщиной 10 мм. Полиэтилен и свинец составляют около 56% и 44% веса прибора, что эквивалентно, соответственно, 4,2 и 0,3 ядерным пробегам λ_{int}^p протонов, а также 4 и 17 радиационным длинам.

Полосы пластического сцинтиллятора используются как позиционно-чувствительные детекторы нейтронного и ионизационного сигналов. На их торцах установлены фотоприёмники (фототриоды) для регистрации амплитуд сигналов от электронно-фотонных и ядерно-каскадных ливней. Нейтроны регистрируются вблизи места их генерации с помощью 100 газовых счетчиков СНМ-17 (He^3 , 7 атм) длиной 2000 мм, проходящих через полиэтилен в каждом пятом слое на расстоянии 200 мм друг от друга.

Внешняя часть ИНКА имеет 2 стенки (А и Б), разделённые зазором. Наружная полиэтиленовая стенка А толщиной 1 см служит для крепления полупроводникового зарядового детектора толщиной 1 мм, разбитого на секции $5,5 \times 5,5$ мм² и покрытого защитной плёнкой полиэтилена толщиной 3 мм. Стенка Б изготовлена из полиэтилена толщиной 5 см, через отверстия в котором проходят световоды, собирающие свет со сцинтилляторов. Эта стенка служит рефлектором нейтронов, и снабжена нейтронными счетчиками "Гелий-2", предназначенными для измерения интенсивности вторичных нейтронов.

Регистрация нейтронов в пластическом сцинтилляторе возможна при введении в него добавок веществ с большим сечением поглощения тепловых нейтронов типа Cd (5300 б) или Gd (60000 б). При регистрации нейтронов сцинтилляционные детекторы работают в счетном режиме, а энерговыведение ливней измеряется по амплитуде ионизационного сигнала. Разность амплитуд сигналов на торцах сцинтилляционных полос используется для определения X- и Y-координат осей каскадов в каждой плоскости прибора.

В качестве детекторов заряда предполагается использовать разработанные нами в рамках проекта ИНКА полупроводниковые кремниевые пиксельные детекторы. В них реализована новая концепция локально-инжекционного механизма усиления активной биполярной n - p -транзисторной структуры дрейфового компонента тока ионизации. Разрабатывается также матрично-структурный детектор с большим количеством ячеек, расположенных на кремниевой подложке. Он имеет высокое временное (~ 1 нс) и пространственное (~ 10 мкм) разрешение. Отношение сигнал/шум в таком детекторе достигает $\sim 10^2$.

Методика определения энергии адронов по амплитуде нейтронного сигнала, а также отношения выхода нейтронов в электромагнитных и адронных каскадах была опробована в калибровочных экспериментах с участием В.А. Рябова (ЛЭЧ), и А.П. Чубенко и А.Л. Щепетов (ЛКЛ на прототипе ИНКА (Рис.23.2) в пучках ускорителей У-70 ИФВЭ и С-60 ФИАН. Поглотитель калориметра содержал 6 рядов свинца толщиной 10 см и сечением 20×20 см² каждый, прослоенных блоками полиэтилена толщиной 6

см. Детекторами нейтронов служили гелиевые (^3He) счетчики СНМ-18 диаметром 3 см и длиной 30 см. Под каждым рядом поглотителя в каналах, просверленных в полиэтиленовых блоках, располагались по три счетчика. Расстояние между ними в соседних рядах составляло 15 см. Общее число нейтронных счетчиков достигало 18.

С целью увеличения эффективности регистрации испарительных нейтронов, генерируемых в ИНКА, свинцовый поглотитель был закрыт со всех сторон полиэтиленовым отражателем-замедлителем толщиной $\cong 10$ см. Для определения эффективности ε регистрации испарительного нейтрона в ИНКА проводились калибровочные измерения с нейтронными источниками $\text{Po}-\alpha\text{-Be}$ активностью $2,25 \times 10^5$ и $2,25 \times 10^6 \text{ c}^{-1}$. Источники поочередно помещались в различные точки прототипа ИНКА, и измерялось суммарное число нейтронов, зарегистрированных во всех 18 каналах. Средняя эффективность ε регистрации нейтрона для 20 различных положений источников составила $7,4 \pm 0,4\%$. Измерения проводились в пионом, протонном и электронном пучках с энергией $E_\pi = 4, 10 \text{ ГэВ}$, $E_p = 70 \text{ ГэВ}$ и $E_e = 10 \text{ ГэВ}$ ускорителя У-70 ИФВЭ. Применялись растянутые пучки с длительностью вывода частиц 2 с при интенсивности сброса протонов $\leq 10^4$. Триггерная система выполняла следующие функции: (1) выделяла нейтронный сигнала от одиночной пучковой частицы; (2) исключала временные перекрытия нейтронных сигналов от двух и более частиц и (3) подавляла вклад сигналов от фоновых частиц. Для формирования триггерного сигнала использовались сцинтилляционные счетчики S_1 , S_2 , S_3 и $\bar{S}_4$, размещенные на базе 20 м. Счетчик S_1 располагался за выходным окном коллиматора пучка, а S_3 – перед калориметром.

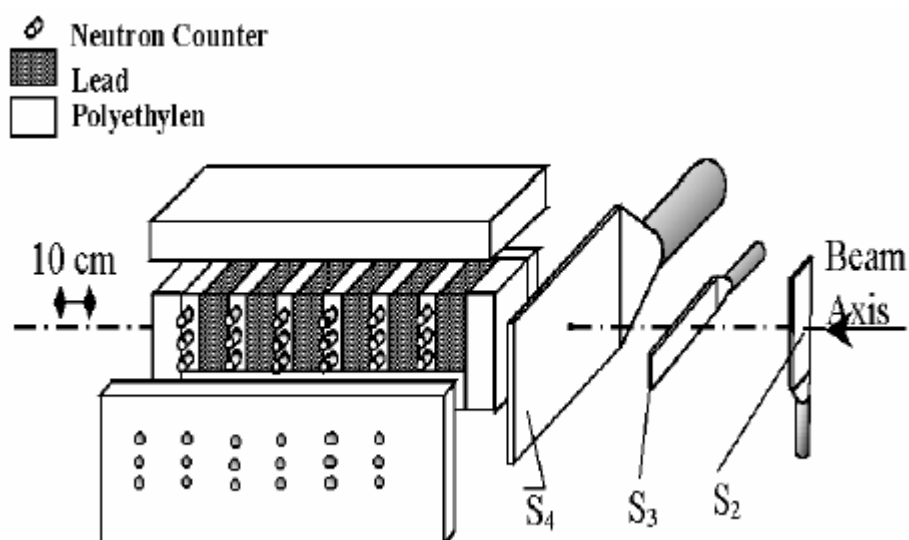
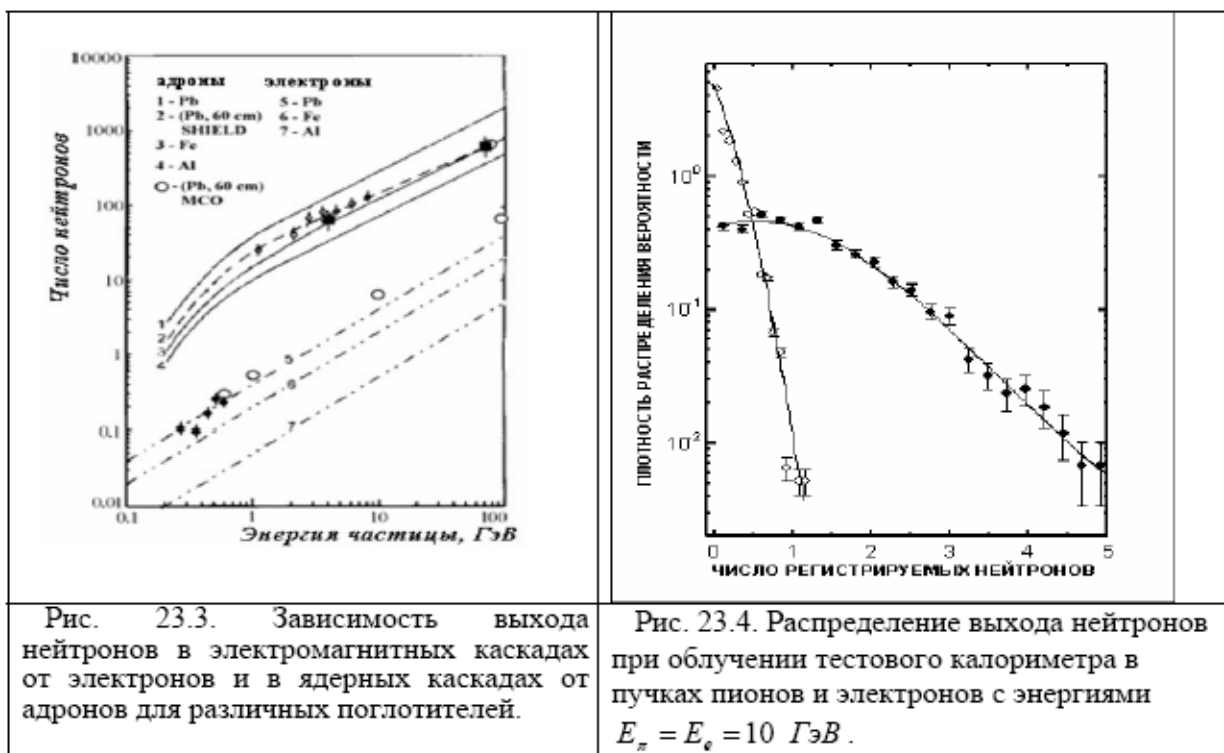


Рис.23.2. Калибровочный эксперимент в пучках адронов и электронов на ускорителе ИФВЭ: по измерение нейтронного сигнала в ионизационно-нейтронном калориметре.

Совпадения $S_1 S_2 S_3$ фиксировали прохождение пучковой частицы через установку. Отделение фоновых событий и исключение нецентральных пучковых частиц осуществлялись антисовпадательным счетчиком S_4 размером $30 \times 30 \text{ см}^2$ с центральным отверстием диаметром 2 см. Каждый триггерный сигнал $S_1 S_2 S_3 \bar{S}_4$ генерировал временные "ворота" длительностью от 30 до 420 мкс, в течение которых каналы ИНКА регистрировали нейтронные импульсы.

Основные экспериментальные результаты представлены на Рис.23.3 и Рис.23.4. Энергетическая зависимость среднего выхода нейтронов из свинцового поглотителя, полученная в нашем эксперименте для адронов с энергией 4 и 70 ГэВ и для электронов с энергией от 200 до 600 МэВ показана на Рис.23.3. Видно, что при энергии частиц 1 ГэВ в адронных каскадах среднее число испарительных нейтронов в Fe составляет 20, а при 20 ГэВ – 200, т.е. возникает интенсивный нейтронный сигнал. В поглотителе из Pb толщиной 60 см выделяется около 50% испарительных нейтронов, генерируемых в слое Fe бесконечных размеров. Эти результаты в пределах ошибок согласуются с другими экспериментальными данными и расчетами по программам SHIELD и MC0.



На Рис. 23.4. показано распределение выхода нейтронов при облучении тестового калориметра в пучках пионов и электронов с энергиями $E_\pi = E_e = 10 \text{ ГэВ}$. Среднее число нейтронов в адронном каскаде составило $\langle m^{hadr} \rangle = 2,85 \pm 0,09$, а в электромагнитном — $\langle m^{el} \rangle = 0,15 \pm 0,03$. Таким образом,

средний измеренный относительный выход нейтронов в электромагнитных и ядерных каскадах составляет около 5%.

В настоящее время начата проработка возможности привязки научной аппаратуры ИНКА к космическим аппаратам, в частности, к космической платформе типа "Яхта".

Основные работы, относящиеся к эксперименту ИНКА, опубликованы в научных журналах: Письма в ЖТФ **24**, № 18, 66 (1998), **24**, № 20, 35 (1998), Gravitation & Cosmology (Suppl. Issue) **5**, 175 (1999), Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), **75A**, 269 (1999), Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), **97**, 189 (2001), Nucl. Phys. B (Proc. Suppl) **113**, 344 (2002), Nucl. Phys. B (Proc. Supply), **122**, 427 (2003), Nucl. Phys. B (Proc. Supply) **122** (2003); Nucl. Instr. Meth. A, **459**, 135 (2001); Изв. Акад. Наук, Сер. Физ. **66**, № 11, 1624 (2002).

24. Исследование осцилляций нейтрино в эксперименте MINOS с использованием нейтринного пучка ускорителя MI FNAL (1995 – 2011 гг.)

Концепция нового протонного ускорителя MI (Main Injector) для получения интенсивного нейтринного пучка NuMI (Neutrino from MI) в лаборатории FNAL возникла в 1988 г. В начале 1990-х гг. рассматривались три предложения о проведении экспериментов с нейтринным пучком NuMI: P-803 COSMOS (на короткой пролётной базе), а также P-805 и P-822 (оба на длинной базе). В первом из них предполагалось использовать водный черенковский детектор IMB, удаленный на расстояние 570 км, а во втором – сцинтилляционный калориметр SOUDAN-2 на расстоянии 730 км от FNAL. Несколько позже появилось предложение провести исследования с нейтринным пучком от ускорителя AGS BNL (эксперимент E-889). Среди этих проектов развитие получил только эксперимент P-822. В течение нескольких лет он концептуально совершенствовался, и в 1995 г. было предложено создать на его основе новый детектор с полезной массой около 10 кт в подземной шахте Soudan. Этот эксперимент под номером P-875 получил название MINOS (Main Injector Neutrino Oscillation Search).

Эксперимент MINOS активно развивался, и сборка его дальнего и ближнего детекторов завершилась, соответственно, в июне 2003 г. и в октябре 2004 г. В настоящее время оба детектора набирают экспериментальный материал, и идёт обработка событий взаимодействия атмосферных нейтрино и атмосферных мюонов.

Нейтринный пучок NuMI был выведен из ускорителя в декабре 2004 г., а первые события взаимодействия нейтрино из этого пучка обнаружены и реконструированы в ближнем и дальнем детекторах, соответственно, в январе и марте 2005 г.

Сотрудники ЛЭЧ ФИАН В.А. Царев, Е.П. Кузнецов, В.К. Ермилова и В.А. Рябов стояли у истоков эксперимента MINOS. На протяжении многих лет в состав коллаборации MINOS входили также сотрудники ЛЭЧ: П.С.

Васильев, С.К. Котельников, Г.И. Мерзон, Н.И. Старков. Они внесли значительный вклад, как в разработку концепции эксперимента и программ моделирования нейтринных взаимодействий с учётом структуры детекторов, так и в создание ближнего и дальнего калориметров MINOS. Все эти работы велись в тесном сотрудничестве с группой физиков ИТЭФ, руководимой И.С. Тростиным.

Главная задача эксперимента MINOS состоит в измерении параметров нейтринных осцилляций ($\Delta m_{23}^2 \sin 2\theta_{23}$). Эти параметры определяют элементы матрицы смешивания нейтрино, которая связывает его массовые состояния, имеющие массы m_2 и m_3 , и могут быть определены сравнением числа взаимодействий пучковых мюонных нейтрино в двух последовательно расположенных (ближнем и дальнем) детекторах. Нейтринные осцилляции должны изменять количество регистрируемых событий взаимодействия мюонных нейтрино от ускорителя в дальнем детекторе из-за их перехода в нейтрино других ароматов (электронные нейтрино и тау-нейтрино). Измерение скорости счета таких событий наряду с их энергетической зависимостью позволяет очень точно определить квадрат разности масс нейтрино двух ароматов из трех известных.

Сотрудники ЛЭЧ разработали и оптимизировали структуру ближнего и дальнего детекторов эксперимента MINOS, располагающихся на расстоянии 730 км друг от друга. В результате расчетов и калибровочных измерений определено энергетическое разрешение калориметров MINOS. Было показано, что для обеспечения приемлемой чувствительности к параметрам осцилляций ($\Delta m_{23}^2 \approx 0,003 \text{ эВ}^2$, $\sin 2\theta_{23} \approx 1$)



*В.А. Рябов (2003 г.) в подземной шахте Soudan;
на заднем плане видна часть дальнего детектора.*

необходимо облучать эти детекторы пучком нейтрино низкой энергии. При этом нужно также использовать относительные методы регистрации

взаимодействий нейтрино в каналах заряженного и нейтрального слабых токов (CC и NC) в ближнем и дальнем калориметрах. Именно в таком режиме сейчас выполняется этот эксперимент.

Дальний детектор MINOS представляет собой калориметр весом 5,4 кт, состоящий из пластин намагниченного железа, прослоенных плоскостями пластического сцинтиллятора (Рис. 24.1). Калориметр разделен на два одинаковых супермодуля, каждый из которых набран из 243 октогональных железных пластин шириной 8 м и толщиной 2,54 см и таких же плоскостей сцинтиллятора. Вдоль оси супермодуля проходят обмотки электромагнитов, создающие в его объеме тороидальное магнитное поле напряженностью 1,5 Тл. Ближний детектор (Рис. 24.1) имеет полезную массу 1,0 кт и представляет собой уменьшенный вариант дальнего детектора.

На основе обработки статистики взаимодействий, набранной за время экспозиции дальнего детектора MINOS в потоках атмосферных нейтрино, подтверждено существование осцилляций на уровне достоверности 98%. Наилучший фит для параметров осцилляций атмосферных нейтрино составил $\Delta m_{23}^2 = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}^2$, $\sin^2 2\theta_{23} = 0,90$. Проведен анализ данных по регистрации взаимодействий нейтрино от пучка NuMI ускорителя FNAL. Анализ этих событий проводился при интегральном сбросе $2,50 \cdot 10^{20}$ протонов на мишени. Было отобрано 567 CC-событий, коррелированных по времени с моментом вывода пучка из ускорителя. При отсутствии осцилляций расчетное число таких событий составляет 738 ± 30 . Гипотеза отсутствия осцилляций приводит к дефициту 36% от ожидаемых ν_μ (CC)-взаимодействий. Статистическая достоверность существования осцилляций отвечает 5,2 σ . Допустимая область параметров (на уровне достоверности 68%) составляет $2,54 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}^2 < \Delta m^2 < 3,18 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}^2$, $\sin^2 2\theta > 0,87$ (Рис. 24.2).



Рис. 24.1. Дальний (слева) и ближний (справа) калориметры MINOS.

Наилучший фит распределения событий по энергии наблюдается при значениях параметров осцилляций $\Delta m^2 = 2,38 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}^2$, $\sin^2 2\theta = 1$.

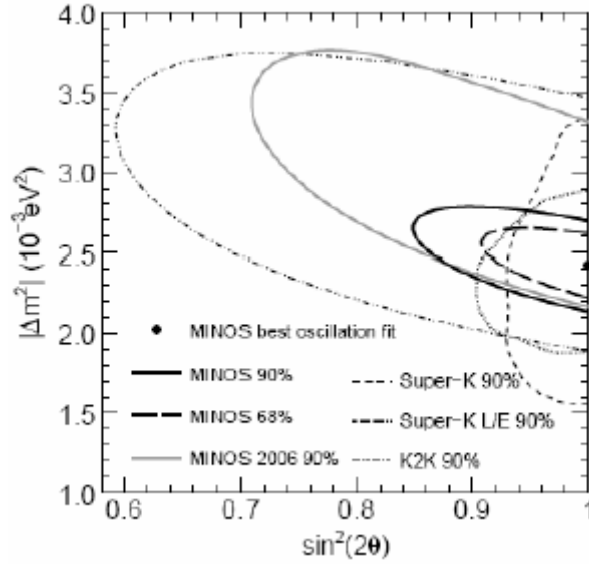


Рис. 24.2. Допустимые области параметров осцилляций, определенные на уровне достоверности 68 и 90% на основе реконструированного энергетического спектра событий взаимодействий нейтрино пучка NuMI в дальнем детекторе MINOS. Показаны Также ранний результат MINOS и ограничения, полученные в эксперименте Super-Kamiokande с атмосферными нейтрино и нейтрино от ускорителя KEK.

Данные эксперимента MINOS были также проанализированы с целью проверки гипотезы появления стерильных нейтрино $\nu_\mu \rightarrow \nu_{ster}$. Для этого проводились детальные вычисления энергетического спектра событий, отвечающих нейтральному току (NC), которые были зарегистрированы в ближнем и дальнем детекторах (Рис. 24.3). Результаты сравнивались с расчётами, выполненными методом Монте Карло. NC-события не чувствительны к осцилляциям $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ и $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, но отражают вклады осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_{ster}$ (если последние существуют). В сценарии со стерильными нейтрино число NC-событий, наблюдаемых в детекторе, должно изменяться в соответствии с вероятностью осцилляции

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_{ster}) = f_{ster} \sin^2(2\theta_{23}) \sin^2(1.27 \Delta m_{32}^2 L / E_\nu) = f_{ster} [1 - P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu)],$$

где f_{ster} — доля событий, отвечающих осцилляциям обычных нейтрино в стерильные. Никакого аномального искажения энергетического спектра NC-событий ни в ближнем, ни в дальнем детекторах обнаружено не было. Поэтому выбывание пучка ν_μ по каналу заряженного тока в дальнем детекторе может быть связано только с осцилляциями в один из активных ароматов нейтрино ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ или $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$).

Один из последних результатов эксперимента MINOS связан с исследованием моды появления осцилляции $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$. Обнаружение ν_e -событий в дальнем детекторе может быть использовано для измерения угла смешивания θ_{13} .

Сотрудники ЛЭЧ ФИАН были среди инициаторов дальнейшей модернизации эксперимента MINOS. Два предложения – о создании фотоэмульсионного детектора, нацеленного на изучение взаимодействий ν_τ и "off-axis"–эксперимента $\text{NO}\nu\text{A}$, ориентированного на появление ν_e , были разработаны при участии В.А. Царева, С.К. Котельникова, Г.И. Мерзон, В.А. Рябова и Н.И. Старкова.

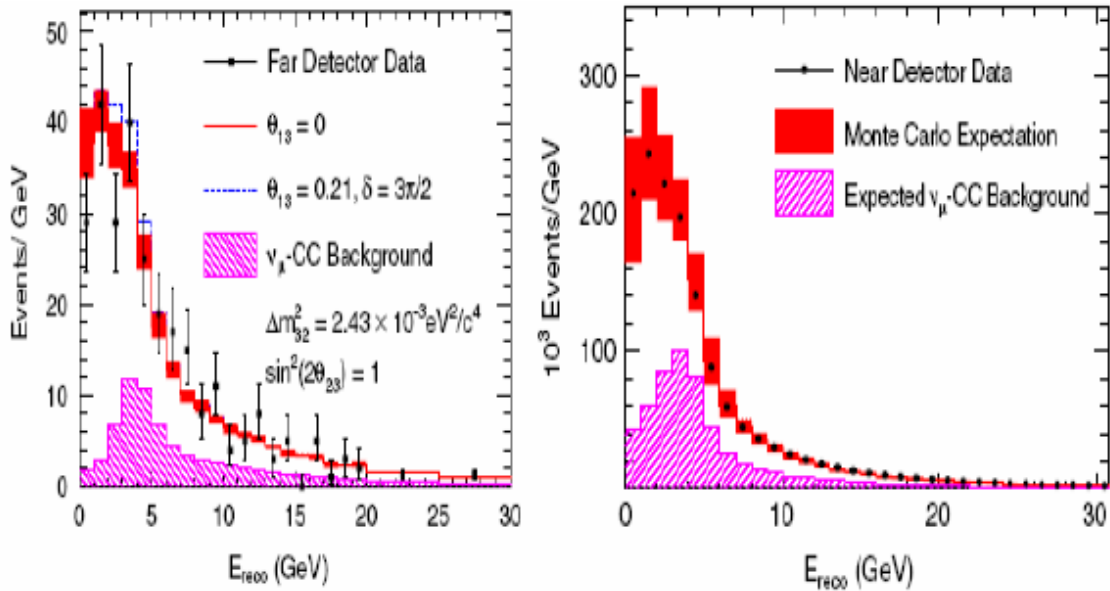


Рис. 24.3. Реконструированный спектр событий нейтрального тока в дальнем (слева) и ближнем (справа) детекторах MINOS.

Для увеличения чувствительности эксперимента MINOS было предложено дополнить калориметры фотоэмульсионным детектором, позволяющим наблюдать взаимодействие ν_τ и вершину распада τ -лептона (в случае осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$). Большую полезную массу детектора обеспечивает мишень: свинцовые пластины, чередующиеся со слоями фотоэмульсии, что необходимо для измерений угловых характеристик треков вторичных частиц. Слои пластика, прокладываемые между слоями фотоэмульсии (spacers), обеспечивают пространство для распадов τ -лептона. Детектор должен был иметь сотовую структуру и позволять наращивать массу от 100 до 1000 т, причём масса фотоэмульсии составляла 10%.

Сотрудниками ЛЭЧ была проведена оптимизация структуры и калибровка модулей фотоэмульсионного детектора в тестовых пучках ускорителя ИФВЭ. По финансовым соображениям коллаборация MINOS отказалась от создания фотоэмульсионного детектора. Однако, эта идея в настоящее время реализуется в эксперименте OPERA.

"Off-axis" эксперименты предложены для обнаружения моды появления $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$. В настоящее время активно развивается подготовка эксперимента $\text{NO}\nu\text{A}$ (NuMI Off-axis ν_e Appearance). Детектор с массой 30 кт предполагается разместить на выходе пучка NuMI на поверхность Земли

после дальнего калориметра MINOS с некоторым смещением относительно оси пучка. Регистрацию появления ν_e должна обеспечить структура калориметра NO ν A, в котором толщина структурного элемента в продольном направлении составляет 0,15 радиационной длины, что в 10 раз меньше, чем в MINOS. В калориметре NO ν A 80% массы составляет активный детектор: жидкий сцинтиллятор на основе минерального масла, залитый в модули сотовой конструкции. В ходе разработки эксперимента NO ν A было показано, что в таком "off-axis"- детекторе спектр падающих нейтрино близок к моноэнергетическому. При этом использование калориметра с малой радиационной длиной структурного элемента (0,15 рад. ед.) позволяет исследовать осцилляции $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, с чувствительностью в 10 раз лучшей, чем в основном эксперименте MINOS.

Основные результаты этих экспериментов опубликованы в журналах Phys. Rev. **D73**, 072002 (2006); Phys. Rev. **D75**, 092003 (2007); Phys. Rev. **D76**, 052003 (2007); Phys. Rev. **D76**, 072005 (2007); Phys. Rev. **D77**, 072002 (2008); Phys. Rev. **D81**, 012001 (2010); Phys. Rev. **D81**, 052004 (2010); Phys. Rev. **D81**, 072002 (2010); Phys. Rev. **D82**, 051102 (2010); Phys. Rev. Lett. **97**, 191801 (2006); Phys. Rev. Lett. **101**, 131802 (2008); Phys. Rev. Lett. **101**, 151601 (2008); Phys. Rev. Lett. **101**, 221804 (2008); Phys. Rev. Lett. **103**, 261802 (2009); Phys. Rev. Lett. **105**, 151601 (2010); Nucl. Instr. Meth. **A596**, 190 (2008); Astropart. Phys. **34**, 457 (2011).

25. Регистрация космических лучей и нейтрино ультравысоких энергий радиометодом. Эксперимент ЛОРД – Лунный Орбитальный РадиоДетектор (2004 – 2011 гг.)

В начале 2000-х годов В.А. Царев в ЛЭЧ ФИАН предложил регистрировать космические лучи и нейтрино ультравысоких энергий по черенковскому радиоизлучению создаваемых ими электромагнитных ливней согласно идее, сформулированной еще в начале 1960-х годов Г.А. Аскарьяном.

Важнейшее преимущество радиометода -- использование большой длины распространения радиоволн, что позволяет обеспечить просмотр огромных объемов атмосферы Земли или других сред, прозрачных для радиоизлучения. Тем самым, появляется возможность регистрировать с высокой статистической обеспеченностью редкие события. Применение радиометода особенно целесообразно при ультравысоких энергиях частиц, поскольку мощность когерентного радиосигнала растет как квадрат энергии ливня. Поэтому при высоких энергиях мощность излучения в радиодиапазоне оказывается выше, чем в оптической области.



В.А. Царев выступает на семинаре с предложением проекта ЛОРД.

К работе по подготовке совместного с НПО им. С.А. Лавочкина эксперимента по регистрации радиометодом частиц самых высоких из существующих в Природе энергий В.А. Царев привлек сотрудников ЛЭЧ Г.А. Гусева, Б.Н. Ломоносова, Н.Г. Полухину, В.А. Рябова, В.А. Чечина. Несколько позже к ним присоединились сотрудники НИЦ им. Г. Н. Бабакина. Необходимость подобного объединения диктовалась тем, что регистрировать космические лучи и нейтрино ультравысоких энергий предполагалось с помощью радиоприемных устройств, размещенных на искусственных спутниках Земли или Луны.

Сама задача изучения природы и спектров космических частиц с предельными, существующими во Вселенной энергиями, является одной из приоритетных в современной науке. Информация о природе таких частиц важна для решения фундаментальных проблем астрофизики и физики элементарных частиц, касающихся источников и механизмов ускорения космических лучей, природы темной материи, и возможно, нарушения основополагающих принципов теории относительности.

Основная трудность при регистрации космических лучей ультравысоких энергий (КЛУВЭ) связана с малым числом таких событий. Если при энергиях $E_{CR} \geq 10^{19} \text{ эВ}$ интегральный поток КЛУВЭ равен $\sim 1 \text{ км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$, то при $E_{CR} \geq 10^{20} \text{ эВ}$, этот поток может составлять всего одну частицу на 1 км^2 в

столетие. Поэтому для регистрации КЛУВЭ необходимы детекторы огромной площади, которые регистрируют не первичное космическое излучение, а вторичные частицы, входящие в состав широкого атмосферного ливня (ШАЛ). В настоящее время уже работают детекторы КЛУВЭ нового поколения с очень большой апертурой. Среди них недавно введенная в строй установка AUGER и Telescope Array. Площадь покрытия детекторами в двух массивах установки AUGER составляет $6 \times 10^3 \text{ км}^2$, а в установке Telescope Array – около 10^3 км^2 . Однако площади обзора этих наземных детекторов, по-видимому, близки к предельно возможным значениям.

Следующий шаг на пути регистрации частиц ультравысоких энергий предполагает выход в космическое пространство. Так в проекте EUSO предусматривалось установить на Международной Космической станции детектор, который из космоса будет регистрировать флуоресцентный и черенковский свет в атмосфере Земли. Эффективная апертура этого детектора составит около $10^5 \text{ км}^2 \text{ стер}$. Однако может оказаться, что апертуры установок AUGER, Telescope Array и даже EUSO будут недостаточными, чтобы надежно регистрировать КЛУВЭ с энергиями $E_{CR} \geq 10^{20} \text{ эВ}$ (если они существуют в Природе).

Нейтрино ультравысоких энергий (НУВЭ) также могут порождать события, которые имитируют взаимодействия КЛУВЭ. Наиболее энергичными астрофизическими источниками, где возможно образование потоков нейтрино с энергиями, достигающими $E_\nu \approx 10^{19} \text{ эВ}$, являются гамма-всплески и активные ядра галактик. Нейтринные потоки могут возникать и при распадах или аннигиляции сверхмассивных частиц, которые образовались на ранней стадии эволюции Вселенной и дожили до наших дней. Максимальные энергии нейтрино в этих сценариях зависят от массы распадающихся тяжелых частиц и простираются до $E_\nu \approx 10^{24} \text{ эВ}$. "Гарантированными" источниками нейтрино сверхвысоких энергий являются реакции взаимодействия КЛУВЭ, распространяющихся во Вселенной, с космическим микроволновым фоном. Распады пионов, образованных в реакциях фоторождения, создают потоки "космогенных" нейтрино, спектр которых имеет максимум при энергиях $E_\nu \approx 10^{19} \text{ эВ}$.

Для регистрации НУВЭ с энергиями $E_\nu \geq 10^{19} \text{ эВ}$ необходимы нейтринные детекторы объемом больше 1 км^3 . В таких детекторах используются природные резервуары, заполненные чистой водой или льдом. Они служат одновременно мишенью, где взаимодействуют нейтрино, и радиатором, генерирующим черенковское радиоизлучение вторичных частиц, которые образуются под действием нейтрино.

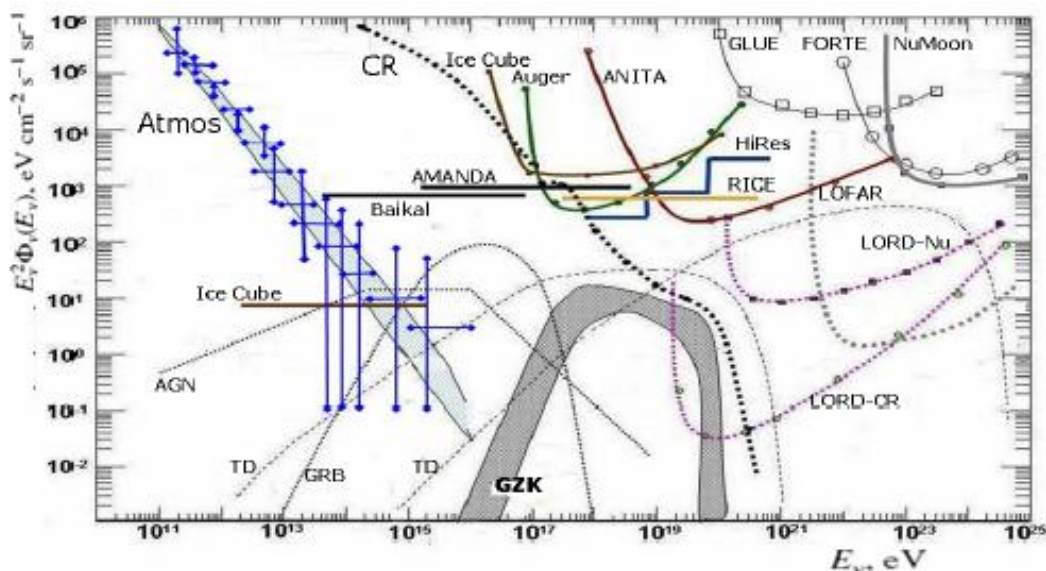


Рис. 25.1. Нейтринные потоки, рассчитанные для моделей ГВ и АЯГ, а также "top-down"-сценария и космогенных (ГЗК) атмосферных нейтрино. Указаны также ограничения на потоки, полученные в экспериментах "Байкал", AMANDA, FORTE, RICE, GLUE, и ожидаемые ограничения в исследованиях KM3NeT, IceCube, AUGER, LOFAR, ANITA, SALSA, WSRT и ЛОРД, запланированных на ближайшее будущее. Для сравнения с нейтринными потоками приведен измеренный поток космических лучей (КЛ).

Для обнаружения космических лучей и нейтрино с энергиями $E \geq 10^{20}$ эВ требуются принципиально новые экспериментальные установки и методы регистрации. В первую очередь, надежды связаны с экспериментами, в которых регистрируется (или предполагается регистрировать) когерентное радиоизлучение от каскадов, инициированных взаимодействиями нейтрино в таких радиопрозрачных природных средах как атмосфера (LOFAR), ледяные щиты Гренландии (FORTE) и Антарктиды (RICE, ARIANNA, ANITA) и соляные месторождения (SALSA). В ряде проектов в качестве мишени для регистрации КЛУВЭ и НУВЭ предлагается использовать радиопрозрачный приповерхностный слой лунного грунта (реголит) и наблюдать радиоизлучение от каскадов с помощью наземных радиотелескопов (WSRT, SKA). Потенциальные возможности экспериментов по регистрации космических лучей и нейтринных потоков показан на Рис. 25.1.

В разрабатываемом в ЛЭЧ эксперименте ЛОРД (Лунный Орбитальный РадиоДетектор) предлагается разместить радиоприемные устройства на окололунном спутнике (Рис. 25.2). В лунных экспериментах по регистрации частиц радиометодом средой, в которой происходит рождение каскадов и генерация радиоизлучения, является реголит, состоящий из мелких частиц и небольших камней, выброшенных при ударах метеоритов о поверхность Луны. Радиоизлучение генерируется каскадом, вызванным высокоэнергичной частицей, в области углов вблизи черенковского конуса и в широком частотном диапазоне.

обеспечивает сбор цифровых данных и их передачу по каналу телеметрии космического аппарата.

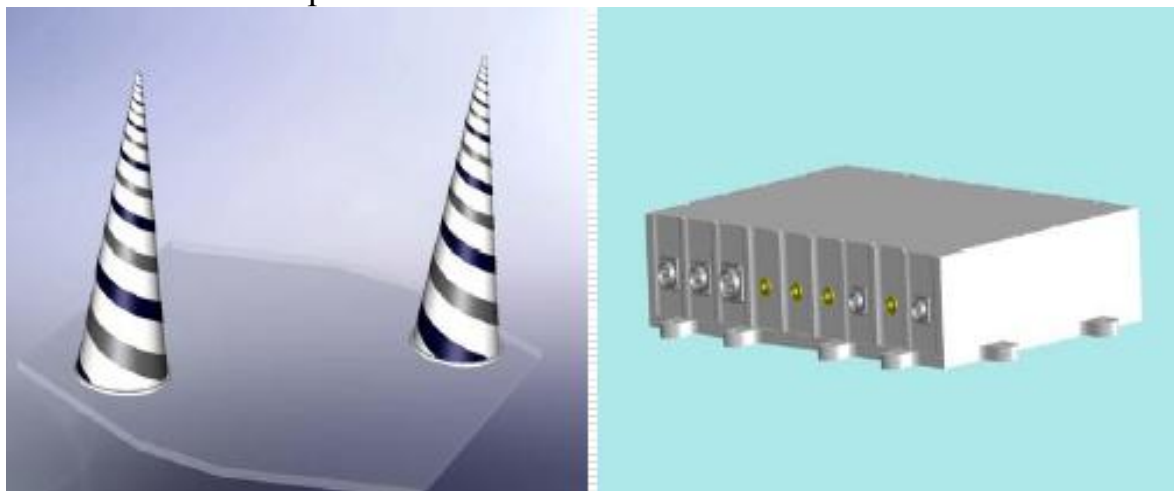


Рис. 25.3. Антенная система (слева) и блок электроники радиодетектора ЛОРД.

Высокая эффективность регистрации КЛУВЭ и НУВЭ обусловлена большой апертурой радиодетектора ЛОРД. Для космических лучей с энергиями $E_{кл} \geq 10^{20}$ эВ полная апертура ЛОРД составляет $2 \cdot 10^5 \text{ км}^2 \text{ ср}$, что почти на два порядка превышает апертуру эксперимента AUGER. Число событий, зарегистрированных за один год экспозиции, достигает нескольких десятков. Высокая научная значимость эксперимента ЛОРД послужила основанием для включения его в Федеральную космическую программу России в рамках миссии "Луна-Глоб". К началу 2010 г. разработана конструкторская документация на комплекс необходимой научной аппаратуры. Выведение спутника на окололунную орбиту запланировано на 2014 г. (Рис. 25.4).



Г.А. Гусев рассказывает об эксперименте ЛОРД.

Основные результаты работ по проекту ЛОРД опубликованы в научных журналах и сборниках ЭЧАЯ **40** (1), 5 (2009); Косм. Исслед. **44**, №1, 22 (2006); ДАН **406**, №3, 327 (2006); Мат. Модел. **20** №6, 67 (2008); Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A **604**, 124 (2009); Nuclear Physics B, Proc. Suppl. **196**, 458 (2009); ЖТФ **80**. №1, 98 (2010); КСФ ФИАН, № 6, 22 (2009), № 4, 8 (2010); УФН **180**, № 9, 957 (2010).

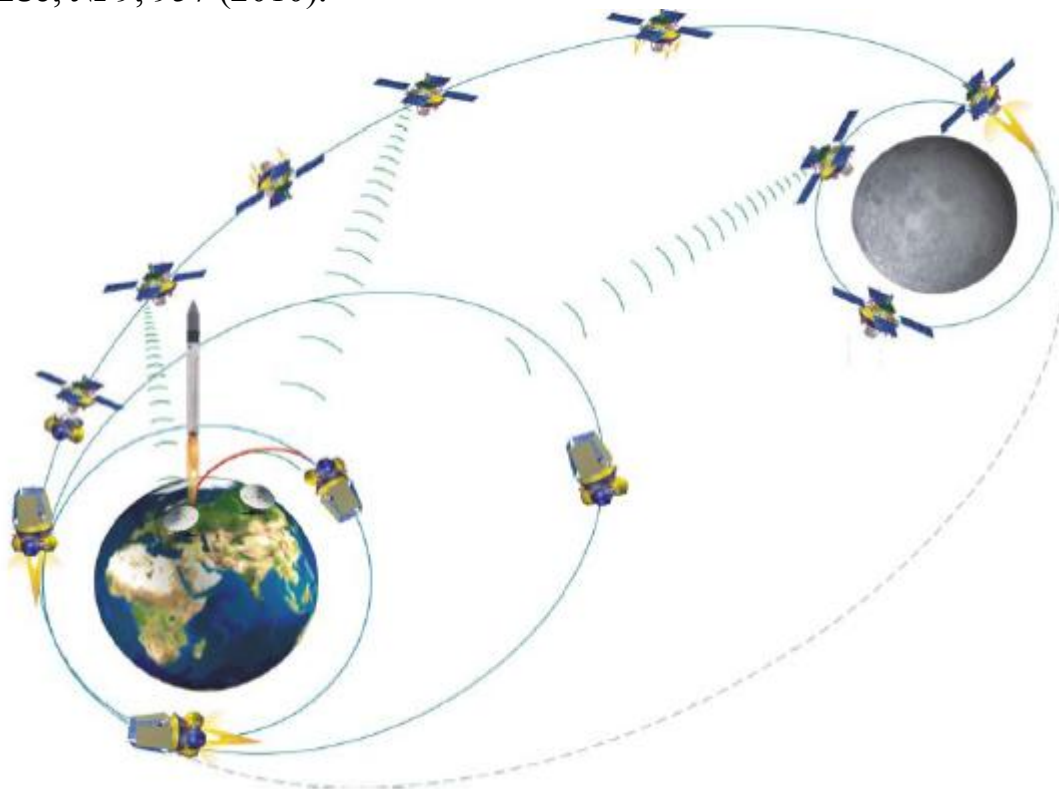


Рис. 25.4. Схема выведение спутника на окололунную орбиту.

26. Ядерно-физические исследования на основе автоматизированной обработки трековых детекторов с помощью многофункциональной установки ПАВИКОМ

Работы по автоматизации измерений в трековых детекторах были начаты в ЛЭЧ ещё в 1980-е годы в связи с потребностями эксперимента СКИФ, где использовалось целеуказание с трековой стримерной камеры на ядерную фотоэмульсию. (Метод был предложен в ЛЭЧ М.И. Дайоном в 1969 г.). В 1986 г. на базе инструментального микроскопа МИЭМ была разработана полуавтоматическая система «Микрон», позволявшая нажатием кнопки оцифровывать и запоминать координаты следа при наведении оператором подвижного креста на изображение трека. Это полуавтоматическое устройство (см. ПТЭ № 6, 46 (1987)) стало предтечей более позднего полностью автоматизированного комплекса ПАВИКОМ для обработки следов частиц в различных трековых детекторах.

Трековые детекторы применяются в экспериментах по физике частиц уже много десятилетий. Долговечность этой методики, обусловлена её

уникально высоким пространственным разрешением и возможностью разделения близких треков. Так, в ядерной эмульсии при размерах зёрен 0,3--1 мкм их отклонение от траектории частицы не превышает 0,2--0,8 мкм. В двухсторонней эмульсии направление движения частиц определяется с погрешностью менее 1 мрад. Простота трековой методики создаёт ей существенные преимущества перед многими другими системами детектирования.

В этой связи, первостепенное значение приобретают методы обработки, обеспечивающие быстрое и качественное извлечение информации из данных, полученных с помощью трековых детекторов. Однако просмотр больших площадей детекторов представляет весьма сложную задачу. Визуальная обработка данных микроскопистом требует огромных затрат труда и времени. Малая скорость измерений предопределяет низкую статистику событий.

Поэтому одновременно с развитием техники трековых детекторов совершенствовались методы автоматизации измерений. Наибольшие успехи были достигнуты на пути создания систем полуавтоматического, а затем и автоматического анализа изображений. Примерами первых могут служить системы Videoplan, SAMICA (Германия), VIDS (Англия), VPA 1000 (Япония) и МИКРОН (ЛЭЧ ФИАН).

В последние годы препятствия, связанные с трудоемкостью обработки изображений треков, были преодолены благодаря появлению новой прецизионной техники и созданию управляемых компьютером оптических столов с высокой точностью перемещения, а также применению современных приборов с зарядовой связью (CCD-камер) для регистрации и оцифровки оптических изображений, что позволило полностью автоматизировать труд микроскопистов. При измерениях в таком режиме оцифрованные изображения следов вводятся в компьютер, а его математическое обеспечение позволяет находить, распознавать треки и восстанавливать их пространственное положение. Такой режим оказался значительно более эффективным, чем полуавтоматический.

В 2000 г. в ЛЭЧ был создан и освоен высокотехнологичный Полностью Автоматизированный Измерительный КОМПлекс (ПАВИКОМ), который сканирует треки в автоматическом режиме. При этом выполняются следующие операции.

1. Перемещение стола и контроль глубины фокуса объектива:
 - изменение поля зрения (т.е. перемещение стола в плоскости, нормальной оптической оси микроскопа);
 - изменение фокальной плоскости (т.е. перемещение объектива вдоль оптической оси);
 - считывание координат стола.
2. Работа с видеоизображением:
 - воспроизведение изображения поля зрения микроскопа с помощью телевизионной (ТВ) системы;
 - наложение графического указателя на ТВ экран;

- считывание с экрана координат любого пикселя поля зрения;
 - наложение графических символов на экран.
3. Оцифровка изображения и распознавание образов:
- аналого-цифровая конвертация изображения в CCD-камере;
 - фильтрация, т.е. масштабирование, выбор порога и др.;
 - сохранение оцифрованного изображения;
 - распознавание образов, т.е. определение пространственных характеристик и анализ формы.

В комплексе ПАВИКОМ успешно сопряжены механические оптические и электронные устройства лучших мировых производителей.



Академик Е.Л. Фейнберг, И.Ю. Тарасова, Н.Г. Полухина и А.Б. Александров около автоматизированного комплекса ПАВИКОМ

Оригинальное базовое программное обеспечение ПАВИКОМ создано сотрудниками ЛЭЧ.

ПАВИКОМ включает три независимые автоматизированные установки с разными пределами перемещений оптических столов (т.е. и допустимыми размерами обрабатываемых образцов).

Установка ПАВИКОМ -1 содержит следующие основные узлы:

- автоматический прецизионный стол MICOS (400 мм x 800 мм);
- оптическую систему, комплектуемую в соответствии с решаемой физической задачей;
- персональный компьютер Pentium.

С помощью CCD-камеры с вертикальным перемещением до 200 мм, координаты по всем трем осям измеряются с точностью 0,5 мкм. Все перемещения осуществляются шаговыми двигателями с помощью контроллера, управляемого компьютером или от джойстика ручного управления. Оптическая система микроскопа создана в ЛЭЧ с использованием элементной базы ЛОМО. Оптика микроскопа проецирует изображение трека на CCD-матрицу системы VS-СТТ, обеспечивающую ввод оцифрованных изображений в компьютер. Система имеет 1024 уровня «градаций серого»; матрицу CCD-камеры с числом пикселей 1360×1024 и размером каждого пикселя $4,65 \text{ мкм}^2$. Установка размещена в «чистой» комнате со стеклянными стенами.

Автоматизированный микроскоп ПАВИКОМ-2 создан на базе микроскопа МПЭ-11 производства ЛОМО.

К основным узлам установки ПАВИКОМ-2 относятся:

- прецизионный стол фирмы Carl Zeiss с блоком управления;
- 2 цифровые CCD-камеры;
- персональный компьютер.

Пределы автоматического перемещения столика составляют 0-- 120 мм по оси X и 0--100 мм по оси Y; пределы перемещения по вертикальной координате около 1 см. Перемещение оптического столика по всем координатам осуществляется шаговыми двигателями с помощью контроллера, управляемого компьютером. Точность измерения координат X и Y составляет 0,25 мкм, а координаты Z -- $3,46 \times 10^{-3}$ мкм.

Третий комплекс, ПАВИКОМ-3 имеет:

- моторизованный подвижный стол Micos с пределами перемещений по осям X и Y 0--120 мм и 5 см по оси Z с точностью перемещения 0.5 мкм;
- микроконтроллер управления шаговыми двигателями;
- микроскоп Nikon;
- систему подсветки Nikon;
- блок питания подсветки с управлением от компьютера;
- персональный компьютер.

Комплекс ПАВИКОМ изначально создавался для обработки событий, зарегистрированных с помощью ядерных фотоэмульсий, которые облучались пучком ядер свинца с энергией 158 ГэВ/нуклон на ускорителе SPS (ЦЕРН77) в рамках эксперимента EMU-15. Основной целью этого эксперимента был поиск сигналов кварк-глюонной плазмы при сверхвысоких температурах сверхплотных состояний материи. Однако возможности ПАВИКОМ позволили эффективно использовать его и в интересах других российских институтов.

При этом участие ЛЭЧ отнюдь не сводится к предоставлению установки «в аренду». Для каждого эксперимента на ПАВИКОМ дорабатывается программное обеспечение, и/или аппаратура. Участниками группы ПАВИКОМ в сотрудничестве с коллегами из НИИЯФ МГУ, ИЯИ РАН, ИТЭФ, ОИЯИ, СПФТИ получены следующие результаты:

(1) Созданы программный пакет для автоматизированной обработки ядро-ядерных столкновений с энергией 158 ГэВ/нуклон при поперечном облучении тонкослойных эмульсий, а также интерфейс для применения математического метода вейвлет-анализа. Впервые для двухмерного вейвлет-анализа вторичных частиц использован вейвлет Добеши. Подтвержден несимметричный характер распределения вторичных заряженных частиц по азимутальному углу вылета и пиками распределения по псевдобыстроте в индивидуальном событии. Эти результаты указывают на особенности разлета, вызываемые многочастичными корреляциями, появление которых, в частности, ожидалось при сравнительно небольшом числе испущенных черенковских глюонов.

(2) Полностью и с высокой эффективностью обработан экспериментальный материал рентгеноэмульсионной камеры, облученной в 1996 г. в рамках эксперимента RUNJOB. Найдено около 20000 треков тяжелых ядер. Измерено зарядовое распределение для всего диапазона регистрируемых частиц. Использование ПАВИКОМ позволило российским физикам участвовать на равных со своими японскими коллегами в обработке полученного экспериментального материала. Созданное программное обеспечение для автоматического сканирования и анализа микроизображений даёт возможность обрабатывать большие площади фотоэмульсионных материалов с высоким пространственным разрешением и скоростью до $16 \text{ см}^2/\text{мин}$.

(3) За период 2003 – 2005 гг. на ПАВИКОМ выполнен анализ более 120 наиболее интересных событий, и создан атлас наиболее интересных из них (общий объем видеоизображений превышает 6 Гбайт). Эти события зарегистрированы в рамках эксперимента «БЕККЕРЕЛЬ» по изучению процессов фрагментации легких радиоактивных ядер. Показано, что особенностью фрагментации ядер Ne, Mg, Si и S является практически полное подавление парных расщеплений ядер на фрагменты с зарядом более 2. Возрастание степени фрагментации проявляется в росте множественности фрагментов с зарядами 1 и 2, причём заряда основной невозбужденной части фрагментирующего ядра уменьшается. В процессах мультифрагментации стабильных изотопов Li, Be, B, C, N, O определены особенности образования систем легчайших ядер, содержащих α , d и t .

(4) Исследована структура нейтроноизбыточного ядра ${}^6\text{He}$. Разработан метод автоматической настройки процедуры обработки изображений в зависимости от их качества. Применение методов анализа нечётких множеств позволило подтвердить существование динейтронной конфигурации в ядре ${}^6\text{He}$.

(5) Разработана методика автоматизированного измерения зарядов релятивистских ядер в толстослойных фотоэмульсиях. На её основе построены калибровочные кривые, позволяющие в автоматическом режиме определять заряд релятивистских ядер. Эффективность и корректность метода доказаны сравнением с результатами ручной обработки.

(6) Проведён анализ данных эксперимента по исследованию спектров электронов внутренней конверсии ядер актиноидов. В частности, выделены

линии L_2 и L_3 от γ -перехода с энергией 148.16 КэВ $^{161}\text{Er}_{68}$ при доминировании фоновых событий (эффект/фон $\sim 1/100$). Таблицы уровней ядра ^{161}Ho дополнены ранее не известными линиями.

(7) Создан пакет программ для автоматизированной обработки майларовых твердотельных трековых детекторов с радиаторами различного типа по измерению распределений потоков нейтронов в эксперименте "Энергия + трансмутация". Получены распределения потоков нейтронов для разных условий облучения свинцовой мишени: определено число делений урана тепловыми, резонансными и быстрыми нейтронами, показано, что с удалением по радиусу от оси симметрии установки наблюдается тенденция роста вклада медленных нейтронов.

(8) Выполнены тестовые измерения при автоматизированной обработке данных эксперимента «ПЛАТАН» с целью исследования первичных космических лучей солнечного и галактического происхождения методом многослойных твердотельных трековых детекторов. Объем сканированных видеоизображений здесь составил 20 Гб. Показана принципиальная возможность использования ПАВИКОМ для обработки плёночных детекторов CR-39.

(9) Проведён анализ характеристик треков космических частиц в оливинах из метеоритов. Разработаны алгоритмы обработки треков сложной конфигурации с перемежающимися тёмными и светлыми участками. Развита методика продолжения треков на соседние поля зрения и слои. Получены зарядовые распределения тяжёлых и сверхтяжёлых ядер в оливинах из метеоритов. Регистрация тяжелых и сверхтяжелых ядер космических лучей и поиск среди них трансфермиевых ядер принадлежит к числу наиболее значимых и актуальных задач современной ядерной физики и астрофизики. Интерес к проблеме существования сверхтяжелых ядер в последние годы существенно возрос, в том числе, в связи с недавними новыми результатами по синтезу трансурановых элементов на ускорителях. Группами сотрудников ФИАН и ГЕОХИ РАН существенно увеличена мировая статистика по зарядовому распределению сверхтяжелых ядер галактических космических лучей: с использованием новой методики автоматизированной обработки кристаллов оливинов из метеоритов на комплексе ПАВИКОМ получено зарядовое распределение 2716 ядер с зарядом в диапазоне 50–98, всего измерены характеристики более чем 6000 треков ядер с $Z > 26$.

Одно из основных современных направлений деятельности группы ПАВИКОМ – участие в эксперименте OPERA (Oscillation Project with Emulsion tRacking Apparatus). Эксперимент нацелен на регистрацию нейтринных осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ по наблюдению распадов τ -лептонов, образованных в ν_τ -СС взаимодействиях в ядерной фотоэмульсии. Для этого проведена модернизация оборудования ПАВИКОМ и установлены стандартизированные программы автоматизированного сканирования. Начато сканирование первого эмульсионного «кирпича», содержащего зарегистрированное в Гран-Сассо взаимодействие нейтрино с детектором

OPERA.

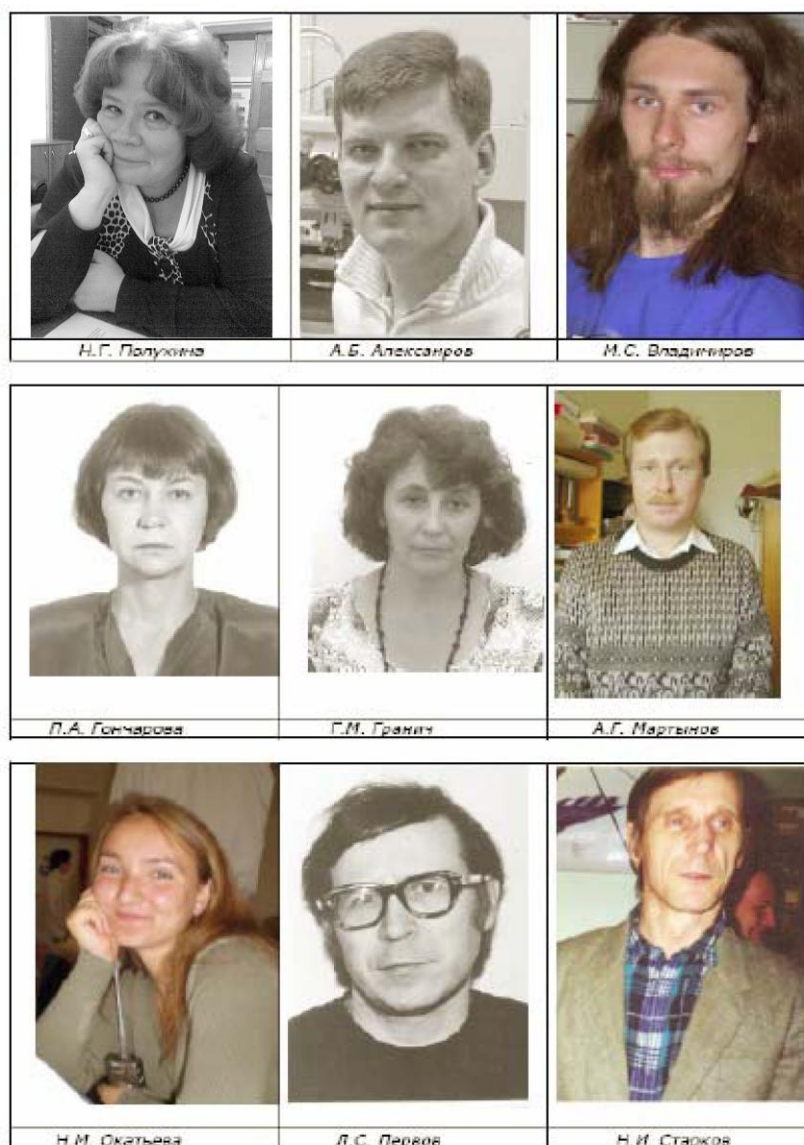
В эксперименте OPERA участвуют сотрудники 39 институтов из 13 стран, в том числе 8 физиков ФИАН. В июне 2010 г. был найден первый кандидат на событие взаимодействия ν_τ по каналу заряженного тока. Кандидат был идентифицирован в выборке событий от пучка ν_μ (пучок CNGS), соответствующих $1,89 \times 10^{19}$ протонов на мишени ускорителя. При консервативной оценке фона уровень значимости этого результата превышает 2σ . Чтобы надежно доказать существование осцилляций нейтрино при прямом наблюдении и идентификации конечного заряженного лептона, нужно найти еще несколько подобных кандидатов.

С 2009 г. на ПАВИКОМ (совместного с ИТЭФ, НИИЯФ МГУ и ОИЯИ) реализуется проект по поиску двойного бета-распада. Особый интерес представляет изучение возможности безнейтринного двойного бета-распада, при котором лептонное число не сохраняется. Этот случай отвечает майорановскому нейтрино, которое является собственной античастицей. Выяснение этого вопроса имеет важное значение для дальнейшего развития теории слабого взаимодействия.

Таким образом, с 2007 г. в ЛЭЧ ФИАН успешно функционирует (в режиме коллективного пользования) автоматизированный комплекс ПАВИКОМ для обработки данных эмульсионных и твердотельных трековых детекторов. Это единственный в России автоматизированный комплекс, удовлетворяющий современным мировым стандартам. За период 2000--2010 гг. по результатам, полученным на ПАВИКОМ, защищены 3 кандидатские и 2 докторские диссертации. Универсальность этого комплекса позволяет обрабатывать как ядерные эмульсии, так и пластиковые детекторы, а также кристаллы оливинов из метеоритов. Успешная реализация целого ряда проектов и высокая квалификация научного персонала ПАВИКОМ, включающего сотрудников не только трех отделений ФИАН (ядерного, оптического и теоретической физики) и нескольких российских институтов, дают основание ожидать в ближайшем будущем получения новых важных экспериментальных данных.

В работах по созданию, развитию и использованию комплекса ПАВИКОМ принимали участие сотрудники ЛЭЧ Н.Г. Полухина, А.Б. Александров, М.А. Владимиров, Л.А. Гончарова, Г.М. Гранич, К.А. Котельников, А.Г. Мартынов, Н.М. Окатьева, Л.С. Первов и Н.И. Старков, И.Ю. Тарасова.

Основные методические и физические результаты, полученные с помощью автоматизированного комплекса ПАВИКОМ, опубликованы в научных журналах NIM **A535** 542 (2004); Письма в ЭЧАЯ **4**, № 1 (137) 170 (2007); Изв. РАН, сер. физ., **70**, № 5, 646 (2006); ПТЭ № 4, 469 (2007), № 2, 1 (2009); КСФ ФИАН **7** 19 (2008), **9** 34 (2008) а также в Препринтах ФИАН № 23 (2005), № 29 (2005), № 4 (2007) и других изданиях.



Сотрудники ЛЭЧ – члены группы ПАВИКОМ.

27. Биофизические исследования в ЛЭЧ и проблема киральности (2005 – 2011 гг.)

Одним из традиционных направлений ЛЭЧ является изучение первичного космического излучения и связанных с ним астрофизических проблем. При проведении таких работ сложились устойчивые деловые контакты с НПО им. С.А. Лавочкина. Эта совместная деятельность началась в связи с проведением аэростатных испытаний элементов конструкций и отдельных модулей в рамках проекта MARC-96. (В настоящее время сотрудничество продолжается в рамках проекта ЛОРД.) В частности, в 1998 г. грантом INTAS-97-1247 был поддержан проект «Поиск внеземной гомокиральности» под руководством В.А. Царева. Коллабораторами в этом проекте выступили также НИИ импульсной техники и Университеты Кембриджа и Бремена.

Проект, поддержанный ИНТАС, был инициирован возросшим интересом к исследованиям малых тел Солнечной системы, Марса и его спутников. Эти задачи связаны, прежде всего, с необходимостью решения проблемы происхождения и эволюции Солнечной системы. Для их решения в одинаковой степени важны данные о планетах, подвергшихся значительной трансформации в результате магматической дифференциации, эрозийных и других процессов, а также об астероидах, спутниках планет и кометах, т.е. о малых телах, представляющих собой первородное вещество Солнечной системы.

Особый интерес имеет комплексное исследование грунта Марса как с доставкой образцов на Землю, так и непосредственно на поверхности Марса. Исследование марсианского грунта позволяет изучать различные аспекты образования Земли и ее ранней эволюции.

Описываемый проект предусматривал исследование Марса автоматическими средствами (Рис. 27.1). Такой способ является одним из наиболее перспективных направлений сравнительной планетологии, поскольку в геологическом отношении Марс представляет собой промежуточный этап между геологически развитой Землей и инертной Луной. Кроме того, важно изучать Марс как дистанционными методами с орбиты его искусственного спутника, так и непосредственно в его атмосфере и на его поверхности. Предполагалось, что марсоход (передвижная научная лаборатория для долговременных исследований марсианского грунта) будет разработан и изготовлен в НПО им. С.А. Лавочкина, и необходимо было подготовить измерительный комплекс для экзобиологических исследований. Научной группой ФИАН (с участием ЛЭЧ и сотрудников Отделения оптики, руководимых профессором В.Н. Сорокиным) было предложено измерить киральность раствора марсианской почвы, поскольку наличие поворота плоскости поляризации света, проходящего через кювету, могло свидетельствовать о присутствии в растворе органики.

Экзобиологический блок аппаратуры марсохода предназначался для поиска нескольких различных признаков возможной прошлой или настоящей марсианской жизни. Главной целью был поиск характерным признака жизни – гомокиральности: все биомолекулы имеют одинаковую киральность. Иными словами, на Земле существуют только L-аминокислоты, а не их D зеркальные изображения. Нежизнеспособные образцы обычно содержат равные доли L и D молекул, так что любой избыток одной киральности мог бы служить правдоподобным указанием присутствия жизни. Таким образом, обнаружение гомокиральности, в дополнение к другим биологическим индикаторам, позволило бы заключить о существовании жизни на Марсе.

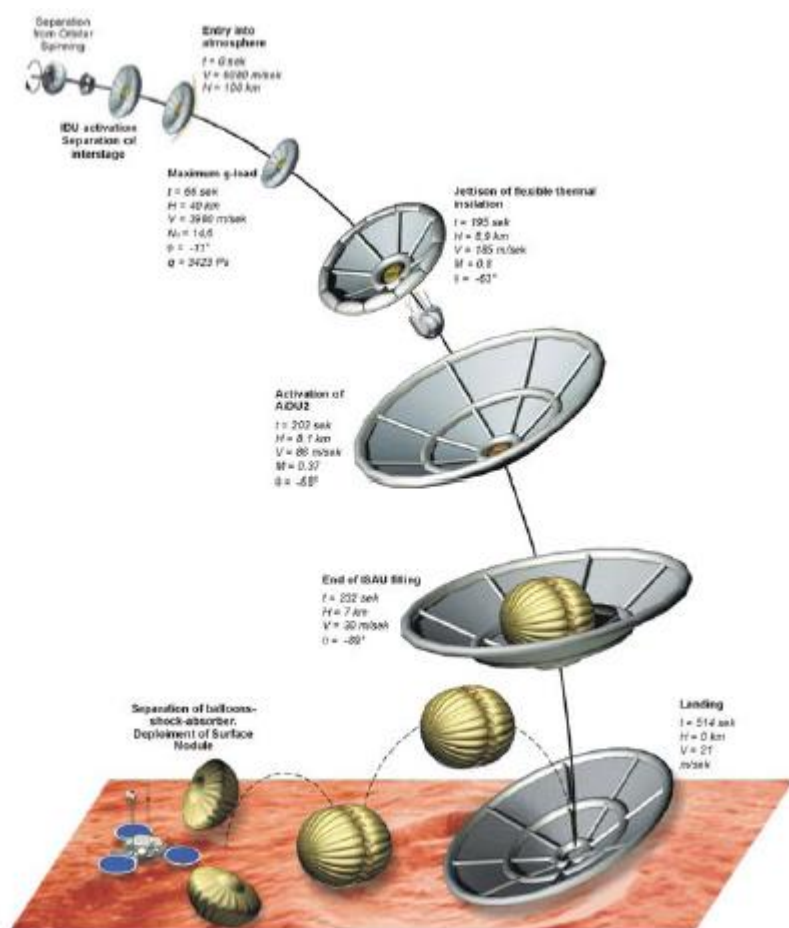


Рис.27. 1. Схема спуска и посадки на Марс.

В ФИАН был разработан компактный космический поляриметр размером с сигару, названный SETH (the Search for Extra-Terrestrial Homochirality), чтобы обнаружить оптическое вращение плоскости поляризации раствора марсианской почвы как гомокирального признака жизни.

Прежде всего, нужно было определить чувствительность такого прецизионного прибора. С этой целью использовался коммерческий поляриметр СМ-3, чья погрешность определения угла поворота плоскости поляризации составляла около 3×10^{-4} рад. При этом минимально измеримые концентрации оптически активных веществ, таких как сахароза и желатин достигали, соответственно, $q = 3 \times 10^{-4}$ и 8×10^{-5} г/мл. Для оценки оптической активности вытяжки из (подзолистой) земной почвы были использованы данные из монографии В.В. Добровольского "Основы биогеохимии" (Москва, 1998), а именно: биоорганика составляет, приблизительно, 1% от веса садовой земли. Тогда при растворении 2 кг почвы в 3 л воды концентрация органики составляет 6×10^{-4} г/мл. Если бы органика в почве по оптической активности была бы близка к среднему значению для аминокислот, то при помощи СМ-3 можно было бы измерять концентрацию органики в вытяжке. Однако, в многочисленных сериях измерений оптической активности вытяжек из почвы, приготовленных различными методами для различных рН и в различных растворителях, углы

поворота плоскости поляризации оказались в пределах ошибок измерений. Поэтому был сделан вывод, что чувствительность СМ-3, равная 3×10^{-4} рад, крайне низка и в будущих приборах должна быть улучшена.

При оценке перспектив работ в этом направлении учитывалось, что, по-видимому, предел чувствительности разрабатываемых поляриметров будет определяться дробовыми эффектами (см. Я.А. Фофанов, Опт. Спектроск. **82**, 1004 (1997)), т.е. $\varphi_{\min} \approx 10^{-7}$ рада, или на 3 порядка лучше, чем даёт СМ-3. Именно на это пришлось ориентироваться при разработке поляриметра.

Лабораторный макет Фарадеевского поляриметра был изготовлен в ФИАН с учётом миниатюризации, необходимой для использования в космосе. Его высокочастотный шум (2×10^{-6} рад за среднее время 100 мс) позволяло измерять углы поворота с точностью до 10^{-6} рад.

Однако, из-за недостаточного финансирования изготовить полетный образец прибора не удалось. Тем не менее, проблема поиска признаков внеземной жизни оказалась настолько важна и интересной, что работа продолжилась.

В.А.Царевым были просчитаны возможные механизмы возникновения такого уникального свойства земной органики как киральность. В качестве основной гипотезы ее появления он предложил рассматривать радиационный механизм Вестера–Ульбрихта.

Гомокиральность, или «киральная чистота» (КЧ), так же как генетический код, который является универсальным для всех живых организмов, составляет отличительное и ключевое свойство живого. Фундаментальная проблема происхождения жизни не может быть решена без решения проблемы происхождения КЧ. Более того, КЧ биополимеров является необходимым условием их нормального функционирования. Следовательно, проблема происхождения КЧ является одной из ключевых проблем для понимания процессов, которые приводят к возникновению саморепродуцирующихся биологических систем. За 150 лет, прошедших после открытия Л. Пастером киральной асимметрии биосферы, предложено большое число различных гипотез относительно возможного источника киральной асимметрии биоорганических молекул, однако ни одна из них до сих пор не получила всеобщего признания. Наиболее популярным является «радиационный» механизм Вестера–Ульбрихта, обусловленный взаимодействием молекул со «спиральными» частицами. Ранее уже было проведено много исследований по проверке эффективности радиационного механизма, однако вопрос о его возможной роли в возникновении киральной асимметрии оставался открытым.

ЛЭЧ провела совместную работу с Институтом физики высоких энергий АН КНР с целью экспериментальной проверки радиационного механизма кирального воздействия, который, возможно, является фундаментальным механизмом, обеспечивающим киральную асимметрию как в земном, так и в космическом сценариях происхождения жизни. Оригинальность подхода состояла в том, что впервые исследовалась

радиационно-индуцированная киральная асимметрия при синтезе аминокислот. При этом впервые проверялась возможность усиления киральных эффектов в присутствии тяжелых металлов.

В ходе выполнения проекта готовились различные соединения аминокислот с добавлениями тяжелых металлов (и без них). Образцы были получены в Институте общей и неорганической химии им. Курнакова РАН и нашими коллегами из Иокагамского Национального Университета (Япония). Изначально все соединения содержали рацемические смеси ряда аминокислот, а (на первом этапе эксперимента) также и газовые смеси.

Образцы передавались для облучения в Российский Федеральный Ядерный Центр (г. Снежинск). В течение нескольких лет проверялась дозовая зависимость результатов облучения образцов.

Облучение проводилось в специальной камере, где располагались десять бета-излучателей и образцы с аминокислотными комплексами. Стенки камеры были изготовлены из тяжёлого сплава обедненного урана в контейнерах из нержавеющей стали. Температура воздуха в камере во время проведения работ соответствовала окружающей среде и составляла 18–20°C. Излучающим элементом 10 источников служила смесь радионуклидов $^{90}\text{Sr}(^{90}\text{Y})$, нанесённая тонким слоем на подложку источника. Активность радионуклидов в источниках была не более 22×10^{10} Бк. Средняя величина энергии, внесённой в образцы за время облучения, составляла $1,71 \times 10^{22}$ эВ.

В частности, исследовались растворы комплексов металлов (гидроксикарбоната никеля, гидроксикарбоната меди, ацетата меди, ацетатов палладия и кобальта и др.) в водных растворах (d, l) аминокислот (серина, аланина, гистидина).

Таким образом, растворы этих соединений были подвергнуты (поляризованному) бета-облучению. После облучения окраска растворов комплексов металлов радикально изменилась, что свидетельствовало о нарушении октаэдрической координации атомов переходных металлов. Под действием облучения произошли кардинальные изменения в структуре комплексов и валентности центрального иона металла и, как следствие, наблюдалось кардинальное изменение спектров поглощения. Например, в пробирке, содержащей раствор с комплексом меди, произошло частичное восстановление меди до металлической фазы. В растворах других комплексов металлов после облучения также появился нерастворимый осадок, что говорило о разложении исходных комплексов и появлении новых соединений, нерастворимых в воде.

Согласно программе работ, облученные растворы соединений были использованы в качестве объектов исследования в экспериментах по измерению спектров кругового дихроизма в области 170–250 нм, где лежат доступные для измерения полосы водных растворов основных аминокислот. В указанном диапазоне спектра использование спектральных приборов с традиционными источниками света проблематично из-за низкой интенсивности излучения и значительного поглощения света кварцевой

оптикой и водой. Именно поэтому для этой цели планировалось использовать в качестве источника света синхротронное излучение электронного ускорителя. Интенсивность такого излучения в указанной области спектра выше, чем у традиционных источников света. В рамках совместного Российско-Китайского проекта в Институте физики высоких энергий Академии наук КНР (Пекин) была выполнена серия экспериментов по измерению кругового дихроизма (КД). При этом обеспечивалась возможность измерения КД в ультрафиолетовой области вплоть до 170 нм (естественно, при изучении объектов прозрачных в этой области длин волн).

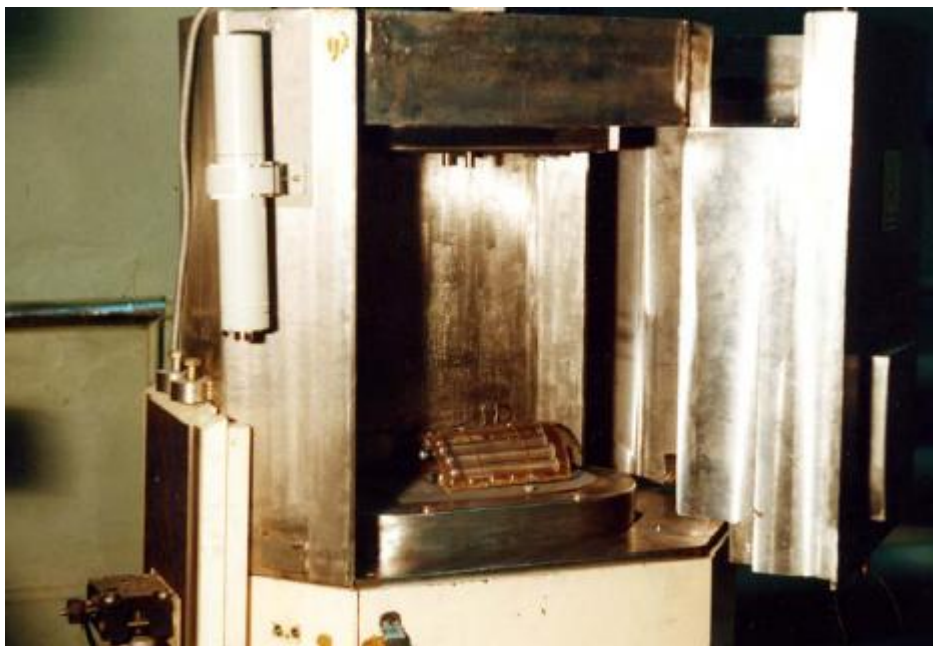


Рис. 27.2. Водные растворы аминокислот и газовые смеси, подготовленные для облучения в Снежинске.

Измерения КД были выполнены для всех облученных образцов и в серии контрольных измерений для исходных необлученных образцов.

До тех пор ни в одном из исследований «радиационного механизма» не использовались одновременно техника КД, источники синхротронного излучения и образцы, содержащие комплексы металлов. Сочетание этих факторов обеспечило значительно более высокую чувствительность измерений и позволило продвинуться в решении фундаментальной проблемы происхождения киральной асимметрии биосферы. При отсутствии предварительных данных о поведении веществ, содержащих комплексы металлов, при различных дозах облучения возникла необходимость определения оптимальной дозы путем пробного облучения. При выборе его условий исходили из собственного и мирового опыта исследований радиационного механизма на обычных аминокислотах, когда используются весьма значительные дозы облучения.

Наряду с экспериментами, В.А.Царев продолжал также теоретическое изучение радиационного механизма в рамках космического сценария

происхождения жизни: модель кирального воздействия» потоков электронов от сверхновых. В этой модели в качестве основного источника поляризованных электронов рассматривались распады нейтронов, выбрасываемых при взрыве сверхновой. Как показали оценки В.А.Царева, такой механизм обеспечивал достаточно высокую киральную асимметрию молекул при облучении расположенного неподалеку межзвездного газопылевого облака. Позже он предложил и конкретный механизм выноса нейтронов за пределы плотной оболочки сверхновой, что сделало рассатриваемую модель «кирального воздействия при взрывах сверхновых» значительно более реалистичной и привлекательной.

Всего в рамках международной программы «РАМБАС» (Радиационный Механизм Биомолекулярной Асимметрии) работали группы из трёх стран, представлявшие 7 институтов:

1. Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН.
2. Российский Федеральный Ядерный Центр.
3. Московский Физико-технический институт.
4. Institute of High-Energy Physics, Beijing, China,
5. University of Science and Technology of China, Hefei, China,
6. Yokohama National University, Yokohama, Japan,
7. Institute of Advanced Studies, Tokyo, Japan.

Для подавляющего большинства всех образцов было обнаружено:

(а) наличие оптической активности у облученных образцов и (б) отсутствие оптической активности необлучённых (исходных) образцов.

Таким образом, в результате исследований по этой программе были получены надежные свидетельства о роли, которую может играть облучение потоками релятивистских заряженных частиц, как для синтеза биоорганических соединений, так и возникновения (при облучении поляризованными частицами) киральной асимметрии биоорганических веществ.

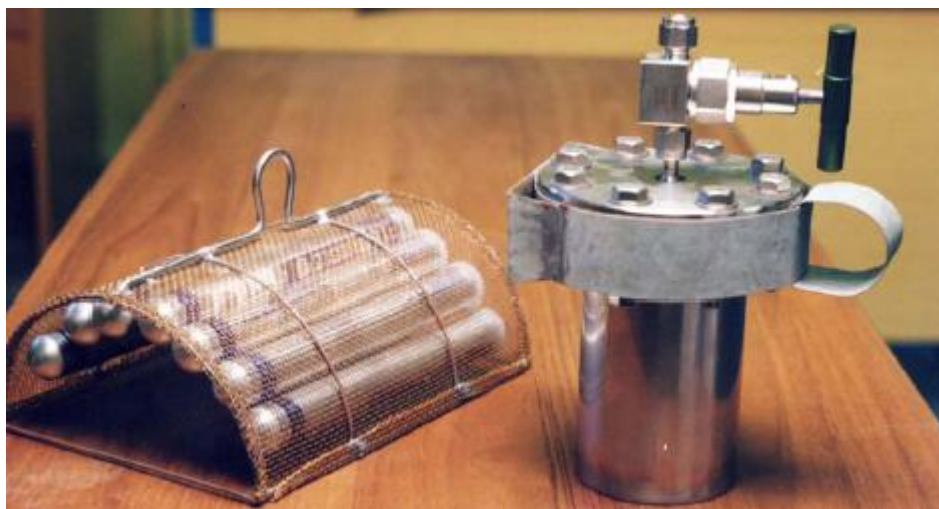


Рис. 27.3. Камера для облучения с установленными образцами.



Н.Г.Полухина с китайскими коллегами – Ксю Джиянхуа (готовит кювету для измерений) и Тао Е (руководитель установки по измерению кругового дихроизма).

Последний вывод, несомненно, имеет важнейшее значение для решения проблемы происхождения жизни и возникновения киральной асимметрии биосферы, как в земном, так и в космическом сценариях происхождения жизни. Тем самым, была достигнута главная цель эксперимента РАМБАС: показано, что киральная асимметрия действительно возникает в результате облучения образцов потоком поляризованных электронов и не является артефактом, связанным с возможной нерацемичностью исходного материала.



Обсуждение полученных результатов после сеанса 2008 г. в гостинице ИФВЭ АН КНР (слева направо: Ксю Джиянхуа, Н.Г.Полухина, Тао Е, В.А.Царев).

Биофизические работы ЛЭЧ стали еще одним примером щедрости таланта и богатства идей В.А.Царева, привели к дальнейшему развитию и укреплению научных связей с японскими коллегами и коллегами из АН КНР, примером весьма успешного экспериментального проекта, принесшего новые нетривиальные результаты.

28. Разработка методов поиска темной материи (1998 – 2009 гг.)

В середине 2000-х годов сотрудники ЛЭЧ В.А. Царев и В.А. Рябов рассмотрели возможности проведения исследований в новом для ЛЭЧ направлении поиска частиц темной материи во Вселенной.

Обнаружение темной материи (ТМ) т.е. материи, не излучающей свет и не наблюдаемой в телескопы, имело бы фундаментальное значение для космологии, астрофизики и физики элементарных частиц. Недавние астрофизические и космологические исследования показали, что обычная материя составляет менее 5% энергетического содержания Вселенной, тогда как природа остальных 95% не ясна. В истории науки подобные примеры известны: мир, о котором мы, кажется, знаем всё, или почти всё, в действительности, составляет лишь малую часть ещё не познанной Вселенной. Эксперименты по поиску ТМ пока результатов не дали.

Для доказательства того, что ТМ ответственна за скрытую массу Вселенной достаточно зарегистрировать частицы ТМ, приходящие из гало Галактики. Такие частицы следует искать и в ускорительных экспериментах. Наконец, детектирование астрофизических сигналов от возможной аннигиляции частиц ТМ также могло бы дать сведения, например, о распределении ТМ во Вселенной. Вместе с тем очевидно, что в случае не прямых измерений, основанных на регистрации продуктов аннигиляции или распада частиц ТМ, трудно разделить их от сигналов астрофизического происхождения. В целом, детальное изучение частиц ТМ требует разработки и создания комплексных детекторов, применения материалов, свободных от радиоактивных примесей и использования подземных низкофоновых лабораторий для защиты от космических лучей.

В ЛЭЧ были проанализированы различные теоретические и экспериментальные возможности регистрации частиц ТМ и изучены их вероятные кандидаты. Были рассмотрены также возможности обнаружения подобных частиц на коллайдере LHC, а также в "непрямых" экспериментах.

Одним из наиболее вероятных кандидатов на роль частиц ТМ являются так называемые ВИМПы (Weakly Interacting Massive Particles, WIMPs), которые, могли возникнуть в первые мгновения после Большого Взрыва. Термином ВИМП принято называть класс частиц, характеризующихся, прежде всего, массой и сечением аннигиляции, которые позволяют им выйти из равновесия в ранней Вселенной на уровне плотности, характерной для

ТМ. В силу ряда достоинств ВИМПы весьма привлекательны как кандидаты в состав ТМ. Во-первых, их рассмотрение мотивировано возможным нарушением электрослабой симметрии. Во-вторых, согласно стандартным космологическим предположениям, их тепловая реликтовая распространенность естественным образом совпадает с той, что требуется для ТМ. Наконец, требование эффективной аннигиляции ВИМПов (для обеспечения требуемой реликтовой плотности) означает, что их взаимодействие с материей достаточно сильное, чтобы они были обнаружены в прямых экспериментах.

ВИМПами могли бы быть частицы, возникающие в теории Суперсимметрии (SUSY), которая расширяет Стандартную Модель посредством включения в неё новых частиц и взаимодействий. В этой связи были оценены возможности регистрации нейтрино, снейтрино и гравитино. Была также изучена возможность регистрации состояний Калуцы-Клейна, которые предсказываются теориями с дополнительными размерностями пространства-времени.

В качестве кандидатов сильновзаимодействующих частиц ТМ рассматривались экзотические барионы: (1) MACHOs (Massive Compact Halo Objects), которыми, в частности, могли бы быть черные дыры, рожденные в эпоху Большого Взрыва; (2) странглеты и нуклеариты, являющиеся сгустками странной кварковой материи; (3) технибарионы; (4) заряженные массивные частицы ЧАМПы (CHARGE Massive Particles, CHAMPs); (5) сверхтяжелые частицы (X-частицы), которые могли бы напрямую рождаться из флуктуаций вакуума на инфляционной стадии расширения Вселенной и дожить до наших дней; (6) Нетопологические солитоны, получившие название Q-balls; (7) Криптоны: стабильные или метастабильные связанные состояния барионной материи в скрытом секторе.

В результате проведенных теоретических и аналитических исследований были предложены следующие перспективные методы регистрации частиц ТМ.

(1) Акустическая регистрация массивных заряженных частиц ТМ в экспериментах на спутниках.

Заряженные массивные частицы ТМ (например, странглеты) можно регистрировать радиационно-акустическими детекторами на аэростатах или спутниках по создаваемому этими частицами акустическому сигналу за счет термоупругого механизма его генерации в материале детектора. Современные акустические датчики позволяют создавать сравнительно легкие и недорогие детекторы ТМ. Было показано, что эти датчики способны воспринимать сигналы от массивных частиц ТМ. В частности, можно использовать пьезоприемники с активными элементами, изготовленными из пьезополимерной пленки на основе поливинилиденфторида, широко применяемые в датчиках динамических деформаций. Для регистрации массивных частиц ТМ целесообразно использовать несколько слоев акустических радиаторов, поскольку, в отличие от космической пыли,

тяжелые частицы ТМ могут легко проходить значительную толщину материала. Например, тяжелые частицы с массовым числом $A > 10^9$ проникают через четыре пластины полистирола толщиной 1 см. Этот факт можно использовать для детектирования сигналов ТМ одновременно в нескольких пластинах и тем самым получить уникальную дополнительную сигнатуру для таких частиц.

(2) Ионизационно-нейтронный калориметр (ИНКА) на искусственном спутнике Земли

На протяжении многих лет ЛЭЧ принимает участие в разработке и создании многоцелевого ионизационно-нейтронного калориметра ИНКА для исследования спектра и состава космических лучей сверхвысокой энергии. Идеи регистрации частиц ТМ в ИНКА разрабатывались при активном участии сотрудника Лаборатории космических лучей ФИАН А.П. Чубенко и сотрудника ИЯИ РАН Р.А. Мухамедшина.

Большая апертура ИНКА ($\sim 17,6 \text{ м}^2 \cdot \text{ср}$) и применение новых методов регистрации частиц позволяют изучать ТМ как в форме массивных экзотических частиц с аномально низким отношением заряда к массе, так и в форме ВИМПов, наблюдая, например, сигналы от аннигиляции массивных нейтрино.

Сильновзаимодействующие частицы ТМ могут иметь высокое значение $A = M_{\text{SIMP}} / m_p \gg 1$, и аномально низкое отношение $Z/A \ll 1$. Некоторая доля таких частиц может быть ускорена до высоких энергий подобно обычным ядрам. Свидетельства в пользу существования подобных быстрых экзотических частиц были получены в японском баллонном эксперименте, проведенном в 1995 г. Эти высокоэнергичные X -частицы могли быть зарегистрированы в ИНКА как сверхтяжелые ядра с аномально низким отношением Z/A , что характерно, например, для странглетов. ИНКА мог бы измерить Z и A таких частиц (при условии, что X -частицы взаимодействуют подобно массивным ядрам).

На Рис. 28.1 показаны расчетные распределения по числу нейтронов, генерируемых ядрами в поглотителе толщиной порядка ядерного пробега. Эти распределения иллюстрируют способность ИНКА измерять массовое число A "сверхтяжелого ядра". Исходя из модельной формы спектра высокоэнергичных X -частиц, мы показали, что $\sim 10^{-6}$ всех частиц, регистрируемых ИНКА, будут экзотическими.

Возможно, с проблемой существования сильно-взаимодействующих частиц ТМ связан феномен так называемых "Кентавров": – взаимодействий КЛ, наблюдаемых на уровне гор, которые характеризуются аномально высокой долей высокоэнергичных адронов при очень малом числе (или даже отсутствии) частиц электромагнитной природы. Если ранее предполагалось, что это результат специфических взаимодействий протонов в области энергий "колена", то сейчас появляется возможность проверить также астрофизическое происхождение данного явления, в частности, его

объяснения распадом странглета высокой энергии. Возможности ИНКА позволят оценить, по крайней мере, верхний предел сечения взаимодействия адронов с образованием события типа "Кентавр". В настоящее время прорабатывается привязка ИНКА к космическому аппарату.

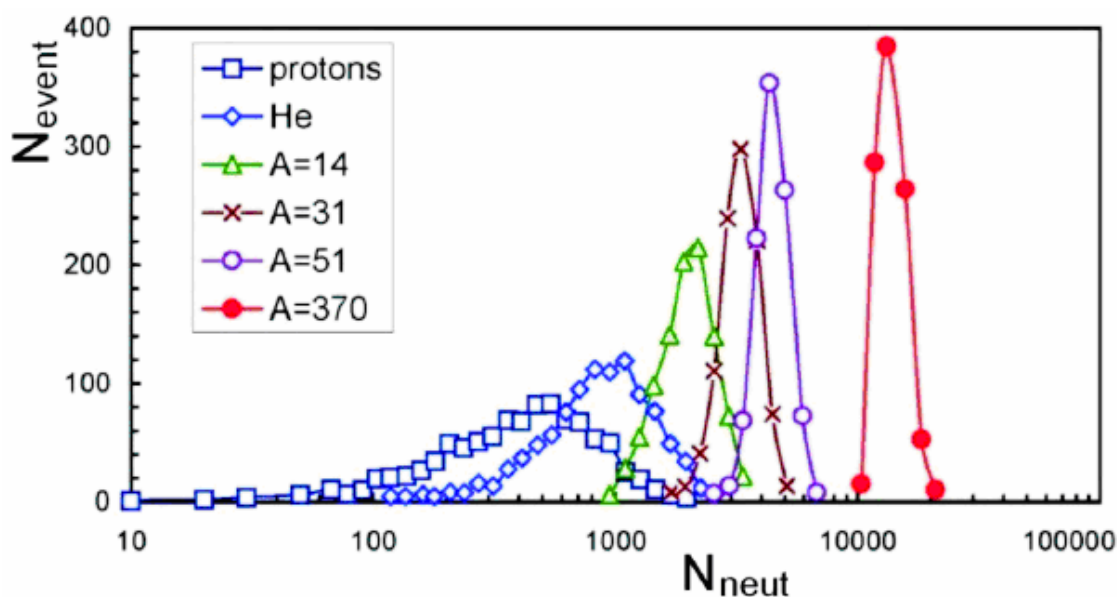


Рис. 28.1. Распределения взаимодействий в ИНКА по числу нейтронов, создаваемых первичными ядрами ($A=1, 4, 14, 31, 51$) с энергией $E=1$ ТэВ. Предполагается, что X -частицы взаимодействуют как сверхтяжелые ядра с $A=370$.

(3) Двухканальный криогенный магнитный калориметр.

Идея прямого детектирования ВИМПов основана на предположении, что наша галактика заполнена этими частицами, так что при движении Земли многие из них проходят сквозь неё. Для оценки характеристик сигнала при прямой регистрации ВИМПов ключевыми параметрами являются: их объёмная плотность в галактике, их распределение по скоростям в Солнечной системе и сечение рассеяния на нуклонах.

В экспериментах по прямой регистрации ВИМПов необходимо измерять энерговыделение в процессе их рассеяния на ядерной мишени. Для регистрации ядра отдачи и измерения его энергии могут быть использованы ионизационные, сцинтилляционные и тепловые детекторы или их комбинации. Важно подчеркнуть, что в отличие от тепловых детекторов, в которых почти 100% энергии ΔE ядра отдачи преобразуется в тепловой сигнал, ионизационные детекторы характеризуются коэффициентом преобразования энергии отдачи на рождение электронно-дырочных пар $\leq 30\%$. В сцинтилляционных детекторах в свет преобразуется $\leq 10\%$ энергии. Поэтому детектор, регистрирующий ядра отдачи, должен иметь порог порядка 1 кэВ и ниже.

Важно и то, что выходы ионизации и сцинтилляции заметно повышаются, если первичное взаимодействие происходит на электроне и образуется электрон отдачи, а не ядро отдачи. Именно это имеет место во всех событиях, инициированных фотонами на электронах и составляющих

главную компоненту фона. Как показывает практика проведения экспериментов, такой фон не исчезает даже при наиболее изолированных системах его подавления (использование подземных лабораторий, защищённых от КЛ, применение пассивной и активной защиты, а также сверхчистых материалов). Решение этой задачи, по сути, определяет пределы чувствительности экспериментов по прямому поиску ВИМПов. Регистрируя одновременно два сигнала (например, фонон + ионизация, или фонон + сцинтилляция, или ионизация + сцинтилляция), как это делается в "гибридных" детекторах, можно существенно подавить эту компоненту фона.

По инициативе сотрудников Лаборатории сверхпроводимости ОТТ ФИАН А. И. Головашкина и Криогенного отдела ФИАН Л. Н. Жерихиной и А.М. Цховребова совместно с ЛЭЧ были рассмотрены возможности создания нового типа детектора для регистрации ВИМПов: двухканального криогенного магнитного калориметра. В этих работах активное участие приняли сотрудники ЛЭЧ В.А. Царев, В.А. Рябов, Г.А. Гусев и Б.Н. Ломоносов. Была предложена оригинальная двухканальная схема прямой регистрации космических частиц ТМ на основе сверхнизкотемпературного калориметра, магнитный отклик которых измеряется SQUID-детектором. Такой калориметр мог бы регистрировать ядра отдачи малых энергий с одновременной дискриминацией фоновых событий, вызванных электронами отдачи. Тем самым, стала бы доступной для измерений область малых энергий ядер отдачи, очень существенная для поиска ВИМПов. Рассмотренный ядерно-магнитный калориметр мог бы использоваться для решения и других фундаментальных задач, связанных с регистрацией и прецизионным измерением малых энерговыделений (например, таких, как поиск магнитного момента нейтрино, измерения потока солнечных нейтрино низких энергий и т.п.).

Основные результаты разработок методов поиска частиц темной материи опубликованы в журналах УФН **178**, № 11, 1129 (2008); Акустический журнал **44**, 76 (1998); Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) **97**, 189 (2001) и КСФ **10** 35 (2007).

29. Исследования по проблеме «холодного» ядерного синтеза

Осенью 1989 г. научный мир был заинтригован сообщением М. Флейшмана и С. Понса об обнаружении ими значительного энерговыделения и нейтронной эмиссии в обычной электролитической ячейке с палладиевым катодом, содержащей тяжелую воду. Авторы заявили о наблюдении «холодного ядерного синтеза» (ХЯС), когда ядерная реакция $d + d \rightarrow He^3 + n$ (или $d + d \rightarrow p + H^3$) идет при низкой энергии дейтрона. Качественно этот результат пытались объяснить возникновением больших электрических полей при растрескивании насыщенного дейтерием палладия. Однако, даже при энергиях масштаба 100 кэВ ядерная реакция синтеза может идти только

за счёт подбарьерного перехода с крайне малой вероятностью. Это не может объяснить выделение большого количества тепла и эмиссию нейтронов.

Во многих лабораториях мира, в том числе в ЛЭЧ ФИАН, попытались воспроизвести результаты М. Флейшмана и С. Понса. Не осталась в стороне и ЛЭЧ ФИАН. В.А.Царев неоднократно выступал с обзорными докладами по проблеме ХЯС. Он также подготовил несколько обзоров по этой теме, опубликованных в научных журналах. В экспериментах по исследованию «холодного» ядерного синтеза приняли участие сотрудники ЛЭЧ Ф.Ф. Каюмов, Б.Н. Ломоносов, Г.И. Мерзон, Д.И. Минасян, А.С. Русецкий. Эти работы проводились совместно с итальянскими физиками Ф. Челани и Б.Стелла в лаборатории INFN Frascati. В результате проведенных исследований эффект ХЯС не подтвердился.

В конце 1990-х годов Ф.Ф. Каюмовым был поставлен эксперимент по поиску вторичных протонов из насыщенного дейтерием палладиевого образца с помощью самоуправляемой гелиевой искровой камеры. Одновременно А.С. Русецкий разработал $\Delta E/E$ -детектор, в котором ионизационные потери энергии ΔE вторичных протонов могли регистрироваться газовым пропорциональным счётчиком, а энергия E заряженной частицы – сцинтилляционным CsI(Tl)-детектором. Он также разработал многоканальный нейтронный детектор на основе пластического сцинтиллятора, обернутого кадмиевой фольгой. Все эти опыты значимых результатов не принесли.



Энтузиаст исследований проблемы холодного ядерного синтеза А.С. Русецкий.

В дальнейшем А.С. Русецкий усовершенствовал методы регистрации продуктов (dd) реакции, применив сцинтилляционные счётчики и кремниевые ППД, а также трековые (CR-39) детекторы. Он провел серию экспериментов по исследованию нейтронной и протонной эмиссии в процессе экзотермической десорбции дейтерия из гетероструктур

Au/Pd/PdO:D_x и PdO/Pd/PdO:D_x. Здесь наблюдались слабые устойчиво воспроизводимые эффекты нейтронной и протонной эмиссии.

Эти результаты были подтверждены в совместных исследованиях с японскими физиками. В экспериментах с кремниевыми ППД и $\Delta E/E$ детекторами были измерены спектры вторичных заряженных частиц из (dd) реакции и доказана эмиссия протонов с энергией около 3 МэВ. Была также обнаружена эмиссия α -частиц с энергией 8–16 МэВ, с интенсивностью, превышающей естественный фон. Таким образом, работы, проведенные в ЛЭЧ, подтвердили наличие слабого эффекта эмиссии протонов, нейтронов, и α -частиц, природа которого пока остаётся неизвестной.

Основные итоги этих исследований опубликованы в научных журналах УФН **160**, № 11, 1 (1990); УФН **161**, № 4, 152 (1991), УФН **162**, № 10, 63 (1992); Письма в ЖТФ **16**, № 21, 46 (1990); КСФ ФИАН № 8, 26 (1990); Письма в ЖЭТФ **25**, № 2, 46 (1991); КСФ ФИАН № 11-12, 41 (1991); КСФ ФИАН № 10, 22 (2001); ЖЭТФ **127**, № 6 334 (2005); Fusion Techn. **38**, 57 (2000); Bull. Am. Phys. Soc. **47**, 1219 (2002); Diamond & Rel. Mater, **18**, 984 (2009).

30. Влияние космических лучей на грозовые разряды в условиях пробоя на убегающих электронах

История исследований электрического пробоя (или искрового разряда) насчитывает более трёх столетий. Это явление, представляющее собой индуцированный электрический разряд в веществе, подробно изучено и широко применяется в технике. Пробой на убегающих электронах (ПУЭ) – новое физическое явление, в основе которого лежит классический механизм взаимодействия быстрых частиц с веществом. Чем выше скорость электронов, тем слабее их рассеяние. В отсутствие сил, препятствующих движению электронов, они начинают ускоряться электрическим полем. Чем больше приобретённая ими скорость, тем меньшее сопротивление своему движению они испытывают и, следовательно, ускоряются ещё сильнее. В столкновениях убегающих электронов возникают каскады вторичных убегающих электронов, которые также ускоряются полем. В результате, появляется экспоненциально нарастающая лавина убегающих электронов, вместе с которыми растет и число медленных (тепловых) электронов, что приводит к быстрому росту электропроводности среды и последующему пробую.

Быстрые затравочные электроны могут генерироваться космическими лучами. Плотность потока вторичных электронов КЛ с энергией 1 МэВ составляет $\sim 10^3 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Поэтому в грозовых облаках при достижении электрическим полем некоторого критического значения, которое на порядок величины меньше напряжения обычного пробоя, возможен пробой на убегающих электронах.

Теория пробоя на убегающих электронах разрабатывалась в Отделе теоретической физики (ОТФ) ФИАН под руководством академика РАН А.В. Гуревича с начала 1990-х годов. Были определены условия возникновения пробоя в верхних слоях атмосферы. Для проверки теории была проведена серия экспериментов на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции (ТШВНС) ФИАН, расположенной вблизи г. Алматы. На Тянь-Шане имеются уникальные природные условия для исследования



В.А. Рябов на дороге к Тянь-Шаньской высокогорной научной станции.

физики грозового разряда: грозы гремят с мая по ноябрь, а на склонах горных вершин можно разместить несколько ярусов детектирующей аппаратуры на расстояниях порядка сотен метров, что позволяет измерить длину пробега убегающего электрона в электронной лавине.

В настоящее время работы по исследованию эффектов космических лучей и пробоя на убегающих электронах на грозовые разряды ведутся силами двух отделений ФИАН: ОТФ и ОЯФА, а также сотрудников ТШВНС и Научно-исследовательского радиофизического института (Нижний Новгород). В этих работах принимают участие сотрудники ЛЭЧ В.А. Рябов и два аспиранта Г.Г. Митько и А.С. Наумов.

Для комплексного изучения грозового разряда на специально спроектированном для этих исследований комплексе «Гроза» проводится одновременная регистрация широких атмосферных ливней (ШАЛ), инициированных КЛ, а также гамма- и радиоизлучения. Работы ведутся практически непрерывно. В периоды неблагоприятной погоды осуществляется анализ экспериментальных данных. Результаты исследований позволяют существенно продвинуться в понимании явлений, происходящих в верхних слоях атмосферы.

Основные результаты эксперимента «Гроза» представлены в публикациях Phys. Lett. A **325**, 389 (2004); Phys.Lett. A **373**, 2953 (2009); Phys. Lett. A **373**, 3550 (2009); ЖТФ **77**, № 11, 109 (2007); УФН **179**, № 7, 779 (2009).



Тянь-Шаньская высокогорная научная станция.

Послесловие

За почти семидесятилетнюю историю ЛЭЧ география её научных интересов охватила несколько стран (Россия, Армения, Казахстан, Швейцария, Китай, Франция, Италия, США, Германия). Исследования космических лучей велись на горных высотах, под землей и на больших глубинах Атлантического и Тихого океанов. Исследования элементарных частиц высоких энергий выполнялись на протонных ускорителях ОИЯИ в Дубне: синхротроне (600 МэВ) и синхрофазотроне (10 ГэВ), на протонных синхротронах ИТЭФ (10 ГэВ) в Москве и ИФВЭ (70 ГэВ) в Протвино. Эксперименты проводились также на электронных синхротронах с энергией 680 МэВ (ФИАН, Москва) и 6 ГэВ (ЕрФИ, Ереван). Сотрудники ЛЭЧ вели исследования на ускорителях ISR (30 ГэВ) и SPS (450 ГэВ) в ЦЕРН, (Швейцария), HERA ($E_p=920$ ГэВ, $E_e=27,5$ ГэВ) в Германии и на

Тэватроне (1 ТэВ) в США. Для этих экспериментов была разработана сложнейшая аппаратура, в создании и эксплуатации которой участвовали научные сотрудники, инженеры, техники, лаборанты и механики ЛЭЧ. Они конструировали, изготавливали и испытывали современные приборы, собирали и налаживали электронику, дежурили около физических установок. Они же обрабатывали данные измерений, проводили сложные математические расчёты и теоретический анализ полученных результатов. О многих участниках этих работ уже говорилось выше. К ним следует добавить научных сотрудников А. Алакоза, В. Елисеева, О. Козодаеву, С. Крылова, В. Пустоветова, В. Раппопорта, инженера-конструктора М.М. Веремеева, инженеров А. Виноградова, Н. Владимирского, Л. Давитаева, С. Караваева, Б. Лобковского, М. Опрышко, Т. Метлову, радиотехника Г.Д. Давимуса, лаборантов Е. Рыбакова, механиков Н.А. Голубчикова, С.Г. Рюмина, В.А. Николаева, В.В. Булатова и др.

		
Радиотехник Г.Д. Давимус	Механик В.В. Булатов	Инженер Т.В. Метлова

ЛЭЧ активно участвовала в общественных мероприятиях, практиковавшихся в советские времена: в трудовых субботниках, работе в колхозах и на овощных базах, дежурствах народных дружинников по охране порядка на улицах Москвы. Десятки студентов из МИФИ, МГУ, МФТИ и других учебных заведений готовили и защищали здесь свои дипломные работы, учились в аспирантуре, получали путёвки в жизнь. ЛЭЧ всегда отличалась сплочённостью, духом товарищества и добрыми отношениями между сотрудниками. Эти традиции были заложены основателем лаборатории А.И. Алиханяном и сохраняются до сегодняшнего дня.



*Лаборатория элементарных частиц на весеннем субботнике
по уборке территории детского сада ФИАН.*

*Постигнуть мирозданье – вот цель ученых ЛЭЧ
Крупницы вечных знаний им удалось извлечь.
Век золотой ФИАНа расцветом стал для ЛЭЧ
Мечту Алиханяна нам удалось сберечь!*

/Г.А. Гусев./

СОДЕРЖАНИЕ

ЛАБОРАТОРИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ.....	2
1. Исследование состава и спектров космических лучей на высотах гор с помощью магнитных спектрометров (1943–1957 гг.).....	4
2. Исследования элементарных частиц на ускорителях методом пузырьковых камер (1957–1964 гг.).....	9
3. Развитие методики искровых и стримерных камер (1960–1974 гг.).....	11
4. Искровой калориметр для исследования энергетического спектра и взаимодействия адронов космических лучей с веществом (1964–1968 гг.)	15
5. Исследование распадов K^+ -мезонов на протонном синхротроне ИТЭФ (1968–1974гг.).....	17
6. Глубоководные исследования поглощения космических мюонов (1968–1984 гг.)	19
7. Ионизационные эффекты релятивистских заряженных частиц в реальных детекторах (1967–1980 гг.).....	21
8. Изучение фоторождения π^0 -мезонов на ядрах гелия при энергии 4.5 ГэВ (1974–1982 гг.).....	26
9. Автоматизация научных исследований на базе ЭВМ WANG 2200 (1975–1982 гг.).....	29
10. Исследование физических процессов в плазме фокуса мощного пикосекундного лазера (1977–1986 гг.).....	31
11. Исследования рентгеновского переходного излучения релятивистских заряженных частиц (1978–1981гг.).....	33
12. Разработка РПИ детектора, основанного на методе счёта кластеров ионизации, для экспериментов на суперсинхротроне ЦЕРН (1979–1980 гг.)....	36

13. Изучение рождения прямых фотонов в эксперименте R808 на протонном коллайдере ISR в ЦЕРН (1980–1988 гг.).....	40
14. Изучение рождения странных и очарованных частиц в нейтринных пучках ускорителя У-70 на спектрометре «СКИФ» (Эксперимент Е-128, 1986–1993 гг.)	45
15. Проекты исследования осцилляций нейтрино в пучках ускорителя УНК-I с энергией 600 ГэВ (1990–1997 гг.).....	50
16. Регистрация дальних нейтрино в отсутствие синхронизации с ускорителем (1989–1996 гг.).....	51
17. Теоретические исследования в ЛЭЧ (1968--2011 гг.).....	54
18. Разработка новых черенковских детекторов (1984–1995)	62
19. Развитие метода регистрации заряженных частиц плоским резистивным газоразрядным счётчиком (1990–1996 гг.).....	66
20. Участие ЛЭЧ в коллаборациях Н1 и HERA-B на коллайдере ДЕЗИ в Гамбурге (1991–2003 гг.).....	68
21. Разработка пакета программ GEANT4 для моделирования взаимодействия элементарных частиц высокой энергии	72
22. Подготовка эксперимента АТЛАС на коллайдере LHC в ЦЕРН (1991–2009 гг.).....	74
23. Разработка широкоапертурного ионизационно-нейтронного калориметра для исследования космических лучей	78
24. Исследование осцилляций нейтрино в эксперименте MINOS с использованием нейтринного пучка ускорителя МI FNAL (1995–2011 гг.).....	82
25. Регистрация космических лучей и нейтрино ультравысоких энергий радиометодом. Эксперимент ЛОРД– Лунный Орбитальный РадиоДетектор (2004–2011 гг.).....	87
26. Ядернофизические исследования на основе автоматизированной обработки трековых детекторов с помощью многофункциональной установки ПАВИКОМ.....	93

27. Биофизические исследования в ЛЭЧ (проблема киральности)	100
28. Разработка методов поиска темной материи (1998–2009 гг.).....	108
29. Исследования по проблеме «холодного» ядерного синтеза.....	112
30. Влияние космических лучей на грозовые разряды в условиях пробоя на убегающих электронах	114
Послесловие.....	116
Содержание	119