

УДК 539.1:006

**ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ
ИМ. В. П. ДЖЕЛЕПОВА НА РУБЕЖЕ
ТЫСЯЧЕЛЕТИЙ**

В. А. Бедняков, Н. А. Русакович, А. А. Тяпкин

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна
Лаборатория ядерных проблем им. В. П. Джеллепова

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ СИЛЬНЫХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ	515
ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ СЛАБЫХ ВЗАИ- МОДЕЙСТВИЙ И ПОИСК ЯВЛЕНИЙ НОВОЙ ФИЗИКИ	528
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ НЕЙ- ТРИННОЙ ФИЗИКИ	543
ВКЛАД СОТРУДНИКОВ ЛЯП В РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ ФИ- ЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА И МЕТОДОВ РЕГИСТРАЦИИ ЧАСТИЦ	547
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	564
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	567

УДК 539.1:006

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ ИМ. В. П. ДЖЕЛЕПОВА НА РУБЕЖЕ ТЫСЯЧЕЛЕТИЙ

В. А. Бедняков, Н. А. Русакович, А. А. Тяпкин

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна
Лаборатория ядерных проблем им. В. П. Джеллепова

Обзор посвящен наиболее фундаментальным результатам, полученным в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Джеллепова. Он не претендует на полноту изложения всех достижений лаборатории, а отражает лишь точку зрения авторов, естественно, субъективную. Особое внимание уделяется исследованиям свойств нейтрино, слабых взаимодействий, редких процессов и поиску проявлений «новой физики». Рассматривается также недостаточно отраженный в литературе вклад сотрудников лаборатории в развитие методики физического эксперимента и методов регистрации частиц.

The review is devoted to the most important results obtained by of scientists of Dzhelapov Laboratory of Nuclear Problems. This review does not pretend to completeness, it reflects only the author's point of view, which is obviously quite subjective. Special attention is paid to investigations of neutrino properties, rare processes and new physics phenomena. The contribution of LNP specialists to the method of physical experiments and particle registration, weakly presented in the literature, is also considered.

Сфера научной деятельности сотрудников Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Джеллепова (ЛЯП) уникальна для Объединенного института ядерных исследований. Она охватывает эксперименты в области физики элементарных частиц (при высоких, промежуточных и низких энергиях); исследования по физике ядра (в том числе релятивистскую ядерную физику и ядерную спектроскопию); экспериментальное изучение конденсированных сред; теоретическую поддержку экспериментальных исследований; медико-биологические исследования; разработку новых методов ускорения частиц и новых экспериментальных установок и приборов. Примечательно, что в ОИЯИ исследования в области слабых взаимодействий, физики нейтрино и новой физики традиционно и систематически проводились главным образом в ЛЯП.

Лаборатория ядерных проблем им. В. П. Джеллепова — старейшая лаборатория физического центра в Дубне. Здесь 14 декабря 1949 г. был введен в действие самый крупный в то время в мире ускоритель частиц — синхротрон с энергией протонов 480 МэВ, который положил начало развитию физики частиц высоких энергий в ОИЯИ [1]. На дубненском синхротроне сотрудниками лаборатории было сделано 13 открытий [2–14].

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ СИЛЬНЫХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Физика сильных взаимодействий всегда была одной из магистральных областей исследований в Лаборатории ядерных проблем. Эксперименты в этой области проводились и проводятся физиками ЛЯП на различных ускорителях в широком интервале энергий.

В первые же годы работы синхроциклотрона в экспериментах по упругому и неупругому (с рождением пионов) рассеянию нуклонов нуклонами (pp , nn , np) (рук. М. Г. Мещеряков и В. П. Джелепов) была доказана справедливость основных принципов симметрии, лежащих в основе сильного взаимодействия нуклонов, — зарядовая независимость ядерных сил и их изотопическая инвариантность при высоких энергиях [15]. Большой комплекс полученных в лаборатории экспериментальных данных по рождению пионов явился в определенной мере базой для создания теории их резонансного образования. Результаты изучения рассеяния π^\pm -мезонов протонами и поляризации в упругом πp -рассеянии (Б. М. Понтекорво, А. И. Мухин, В. Г. Зинов, А. А. Тяпкин, С. М. Коренченко и др.) [16] позволили осуществить проверку справедливости дисперсионных соотношений Н. Н. Боголюбова.

В 1957 г. на синхроциклотроне ЛЯП был обнаружен процесс квазиупругого выбивания из ядер дейтронов с импульсом выше 1,6 ГэВ/с протонами с энергией 680 МэВ (Л. С. Ажгирей, И. К. Взоров, В. П. Зрелов, М. Г. Мещеряков, Б. С. Неганов, А. Ф. Шабудин). Это редкое явление было интерпретировано Д. И. Блохинцевым на основе представлений о существовании в ядре флутонов — флуктуаций плотности ядерного вещества и впоследствии стало характерным для релятивистской ядерной физики. Оно было зарегистрировано как открытие [11].

Следует отметить большой цикл работ по изучению рассеяния пионов на ядрах ^3He и ^4He в области резонанса $\Delta(1236)$ (Ю. К. Акимов, Л. Л. Неменов, Ю. Д. Прокошкин и др.), в которых впервые наблюдалась деструктивная интерференция кулоновского и ядерного рассеяния пионов, а также был определен электромагнитный радиус пиона [17].

В 1964 г. было обнаружено явление двойной перезарядки пионов при взаимодействии их с ядрами (Ю. А. Батусов, С. А. Бунятов, В. М. Сидоров, В. А. Ярба), получившее широкое применение на ускорителях типа «мезонная фабрика». В 1967 г. впервые наблюдалось образование самого тяжелого в то время изотопа гелия — ядра ^8He при захвате отрицательных пионов ядром углерода (Ю. А. Батусов, С. А. Бунятов, В. М. Сидоров, В. А. Ярба, В. И. Гольданский, Я. Б. Зельдович). Оба эти явления были зарегистрированы как открытия [2, 4].

Открытиями были также признаны: обнаружение нового типа возбуждения ядерных уровней так называемых безрадиационных переходов

в мю-мезоатомных тяжелых элементах (Б. М. Понтекорво и др.); обнаружение резонансного возбуждения ядер в реакциях поглощения ими отрицательных мюонов (В. Б. Беляев, В. С. Евсеев, В. С. Роганов и др.), а также явление существования мюония в конденсированных средах [3, 6, 9].

В 1951 г. Б. М. Понтекорво независимо от Пайса (1952) высказал и обосновал гипотезу о совместном рождении гиперонов и странных мезонов и на опыте подтвердил отсутствие одиночного рождения Λ -частиц (М. П. Баландин, Б. Д. Балашов, В. А. Жуков, Б. М. Понтекорво, Г. И. Селиванов) [18]. В 1956 г., вскоре после открытия в США антипротонов, им была обоснована идея о возможности беспионной аннигиляции антипротонов [19], которая позднее положила начало исследованиям в ЛЯП взаимодействия антипротонов с веществом в рамках эксперимента OBELIX.

На пучке отрицательных пионов с импульсом 5 ГэВ/с синхрофазотрона ЛВЭ с помощью созданной в ЛЯП пузырьковой пропановой камеры объемом 200 л (рук. Ю. А. Будагов, В. П. Желепов, В. Б. Флягин) [20] была получена важная информация о малоизученных в то время процессах множественного рождения нейтральных обычных и странных частиц (π^0 , K^0 , Λ , Σ^0 ...) во взаимодействиях π^- -мезонов с протонами и ядрами углерода. Определены сечения нескольких десятков каналов реакций, в том числе и очень маловероятных (А. Г. Володько, В. Б. Виноградов, Ю. Ф. Ломакин, Б. Т. Чиладзе и др.). Впервые было показано, что характеристики инклюзивных реакций с образованием γ -квантов и π^0 -мезонов при энергии 5 ГэВ подчиняются таким универсальным закономерностям, как масштабная инвариантность, «скейлинг в среднем» (В. С. Румянцев, Л. Шандор, Р. Г. Сулуквадзе и др.), наблюдавшимся при значительно более высоких энергиях [21].

Ввод в действие в 1967 г. в ИФВЭ (Протвино) 70 ГэВ протонного синхротрона открыл новые возможности для проведения исследований по физике элементарных частиц. Учеными ЛЯП самостоятельно и совместно с физиками ИФВЭ было создано шесть крупных экспериментальных установок, в основном, на базе магнитных спектрометров, с помощью которых получен целый ряд результатов высокой научной значимости. Одним из первых важных успехов физиков ЛЯП и ИФВЭ явилось открытие самого тяжелого из известных пока антиядер — ядра антитрития (рук. В. И. Петрухин (ЛЯП), В. И. Рыкалин (ИФВЭ)) [22]. Это было сделано в исключительно трудном прецизионном эксперименте с использованием высокоточной спектрометрии по времени пролета, уникальных черенковских счетчиков и электроники высокого разрешения на линии с ЭВМ. Существование антитрития наряду с антидейтерием и антигелием-3 является экспериментальным подтверждением справедливости СРТ-инвариантности взаимодействия частиц.

В исследованиях на пятиметровом магнитном искровом спектрометре МИС на пучке π^- -мезонов с импульсом 40 ГэВ/с ускорителя ИФВЭ коллаборацией с участием ученых ЛЯП (рук. А. А. Тяпкин) были открыты два

новых состояния пиона с массами (1240 ± 30) и (1770 ± 30) МэВ [23]. Эти состояния интерпретируются как радиальные возбуждения пиона и непосредственно свидетельствуют о его кварковой структуре.

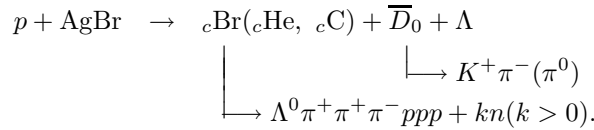
В исследованиях (Н. А. Русакович и др.) процессов перезарядки π^- - и K^- -мезонов в η -мезон (реакции $\pi^+(K^+) + A \rightarrow \eta X$, где $X = \text{H, D, Li, Be, Al, Cu}$) было обнаружено не наблюдавшееся ранее и предсказанное теоретиками лаборатории (Б. З. Копелиович, Л. И. Лапидус) [24] явление цветовой прозрачности ядер. В КХД мезоны рассматриваются как цветовые диполи, образованные парой кварков. Прозрачность ядерной материи по отношению к цветовому диполю определяется малостью расстояний между кварками в мезоне, так как в этих условиях их цветовые заряды взаимно экранируются. Использование η -мезона в качестве объекта наблюдения существенно, поскольку η -мезоны образуются непосредственно в результате взаимодействия пиона с нуклоном ядра, а не являются продуктом распада резонансов. Широкий диапазон ядер-мишеней позволил наблюдать зависимость прозрачности ядер от их размеров. Из анализа процессов образования η -мезонов пионами и каонами было получено, что вероятность «слияния» легких кварков примерно в два раза превышает вероятность слияния странных кварков $g_{q\bar{q}}/g_{s\bar{s}} = (1,8 \pm 0,2)$ [25]. Эксперименты были выполнены на установке ГИПЕРОН в ИФВЭ. На этой установке также с наиболее высокой в мире точностью измерены параметры ряда распадов K^- -мезонов, формфакторы распадов $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$, $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$ и $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$, а также установлен новый верхний предел (90% у.д.) для вероятности запрещенного правилами сохранения кварковых ароматов распада $K_s^0 \rightarrow e^+ e^-$ — $\text{Br}(K_s^0 \rightarrow e^+ e^-) < 2,8 \cdot 10^{-6}$ [26].

В ноябре 1974 г. были открыты J/Ψ -частицы, которые интерпретировались как связанное состояние очарованных c - и \bar{c} -кварков (частицы со скрытым очарованием). Вскоре после этого, в январе 1975 г., на Координационном совете ИФВЭ (Серпухов) А. А. Тяпкин обратил внимание на то, что подобие кварковой структуры Λ^0 -гиперона и легчайшего Λ_c^+ -бариона указывает на близкую аналогию, которая должна иметь место между ΛN - и $\Lambda_c N$ -взаимодействиями и, как следствие, на возможность существования похожих на гиперядра (гиперфрагменты) очарованных ядер (суперфрагментов), то есть ядер, в которых один из нуклонов заменен легчайшим очарованным барионом [27]. В том же 1975 г. в фотоэмульсионном секторе ЛЯП был поставлен целенаправленный эксперимент (рук. С. А. Бунятов) для **поиска очарованных ядер** (суперфрагментов) в протон-ядерных взаимодействиях. С этой целью в феврале 1975 г. фотоэмульсионные камеры были облучены в ИФВЭ (Серпухов) протонами с энергией 70 ГэВ, а в июле 1975 г. в FNAL (Батавия, США) — протонами с энергией 250 ГэВ. Следует отметить, что к этому времени существование очарованных частиц с открытым очарованием, в частности, очарованных барионов, не было экспериментально установлено.

В качестве детектора очарованных ядер была выбрана ядерная фотоэмульсия, обладающая лучшим пространственным разрешением (1,5–2 мкм) среди всех трековых детекторов. В результате просмотра фотоэмульсий удалось зарегистрировать 1270000 взаимодействий. Из них ~ 521000 взаимодействий были вызваны первичными протонами с энергией 250 ГэВ, ~ 53000 — протонами с энергией 70 ГэВ. Остальные взаимодействия были вызваны вторичными частицами. В качестве кандидатов в очарованные ядра отбирались все вторичные звезды с видимым энерговыделением $0,3 < E_{\text{vis}} < 1,5$ ГэВ, связанные с первичным взаимодействием черным следом длиной $< 1,5$ мм.

Из всего набора для дальнейшего анализа были отобраны только три двойные звезды, удовлетворяющие наложенным жестким критериям отбора.

Все три кандидата были проанализированы как возможные распады очарованных ядер гелия, бериллия, бора или углерода с возможной энергией связи $0 < B_c < 10$ МэВ. Наибольший интерес представляло событие, в котором, наряду с кандидатом в очарованное ядро, были обнаружены вилки на расстоянии $(6,3 \pm 2,8)$ мкм от вершины первичного взаимодействия. По измерениям ионизации и многократного рассеяния наиболее вероятно, что одна из частиц вилки является K^- -мезоном. Если второй след принадлежит π^- -мезону, то инвариантная масса частиц вилки $M_{K\pi} = (1,62_{-0,12}^{+0,13})$ ГэВ/ c^2 . Поэтому вилка может быть интерпретирована как распад очарованного D^- -мезона. Знак заряда K^- -мезона неизвестен, но если он положителен, то это событие может рассматриваться как распад очарованного нейтрального \bar{D}^0 -мезона. Таким образом, найденное событие [29] могло быть интерпретировано как образование связанного состояния очарованного бариона Λ_c^+ с нуклонами очарованного ядра ${}_c\text{He}$ или ${}_c\text{C}$:



В двух других событиях ассоциативный партнер \bar{D}^0 -мезон не наблюдался. Таким образом, хотя зарегистрированные события и не противоречат их интерпретации как распады очарованных ядер, но имеющиеся неопределенности и допущения не позволяют сделать однозначный вывод о наблюдении очарованных ядер. Поэтому была определена верхняя граница выхода очарованных ядер во взаимодействиях протонов с ядрами в фотоэмульсии (90% у.д.): $f_{\text{o.s.}} < 3,1 \cdot 10^{-5}$ при энергии $E_p = 70$ ГэВ, $f_{\text{o.s.}} < 3,8 \cdot 10^{-5}$ при энергии $E_p \sim 100$ –150 ГэВ и $f_{\text{o.s.}} < 3,1 \cdot 10^{-6}$ при энергии $E_p = 250$ ГэВ. Эти пределы на 2–3 порядка ниже, чем выход гиперядер, который составляет $(1,5 \div 3) \cdot 10^{-3}$ при тех же энергиях протонов [30].

Изучение звезд очарованных ядер позволит получить информацию о низкоэнергетических взаимодействиях очарованных барионов с нуклонами, что недоступно для других экспериментов [28]*.

На созданной совместно ИФВЭ (рук. С. Б. Нурушев) и ЛЯП (рук. Ю. М. Казаринов) установке ПРОЗА проводились исследования поляризационных эффектов в области энергий $20 \div 40$ ГэВ в упругом рассеянии π^\pm -, K^\pm -мезонов, протонов и антипротонов на протонах, а также в зарядово-обменном рассеянии пионов на протонах $\pi^- p \rightarrow nA$, где $A = \rho, \rho', \omega, f, \pi^0$. Вопреки существовавшему в то время представлениям о вымирании спиновых эффектов с ростом энергий в этих опытах впервые наблюдалась значительная (на уровне $15 \div 30\%$) зависимость сечений всех изучавшихся процессов от поляризации частиц [31].

В совместных с итальянскими физиками экспериментах на пучке антипротонов накопителя LEAR в CERN сотрудниками ЛЯП (рук. М. Г. Сапожников) установлена верхняя граница допустимого количества антиматерии в ранней Вселенной (в виде отношения числа антипротонов к числу протонов $\bar{p}/p < (0,7 \div 1,1) \times 10^{-3}$), что является важным для построения космологических моделей. Этот результат получен при облучении антипротонами стримерной камеры, наполненной гелием и расположенной в магнитном поле.

В экспериментах на LEAR с помощью установки OBELIX путем систематического изучения реакций аннигиляции антипротонов на дейтронах (рук. М. Г. Сапожников) было обнаружено сильное нарушение правила Окубо–Цвейга–Иизуки (ОЦИ) (рис. 1) — аномально высокое рождение φ -мезонов

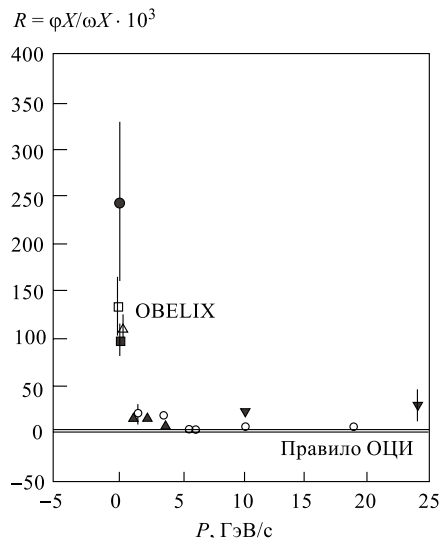


Рис. 1. Иллюстрация нарушения правила ОЦИ в реакциях с участием антипротонов. Показано отношение числа образовавшихся φ -мезонов к числу рожденных ω -мезонов в зависимости от импульса сталкивающихся частиц. Ярко выражена аномалия в случае, когда в реакции участвуют остановившиеся (с нулевым импульсом) античастицы

*Фрагмент текста о поиске очарованных ядер любезно предоставлен авторам С. А. Бунятовым.

(состоящих из s - и \bar{s} -кварков), противоречащее современным представлениям о кварковой структуре нуклонов, в рамках которых ожидалось примерно в 50 раз менее вероятное образование этих мезонов [32]. Коллаборацией OBELIX проведен также широкий спектр исследований различных реакций аннигиляции антипротонов [33]. Найдено сильное нарушение правила Окубо–Цвейга–Иизуки для тензорных мезонов: $\frac{Y(f_2(1525)\pi^0)}{Y(f_2(1270)\pi^0)} = (73 \pm 25) \cdot 10^{-3}$ при ожидаемом значении $(3 \div 16) \cdot 10^{-3}$. Измерено отношение $R = \frac{Y(\varphi\pi^+\pi^-)}{Y(\omega\pi^+\pi^-)}$ для аннигиляции при остановке в газообразной и жидкой водородной мишенях. Найдено, что степень нарушения правила ОЦИ увеличивается с уменьшением массы двухлионной системы и зависит от плотности мишени. Полученные экспериментальные закономерности согласуются с предсказаниями модели поляризованной скрытой странности нуклона.

Отсчеты/10 МэВ/с

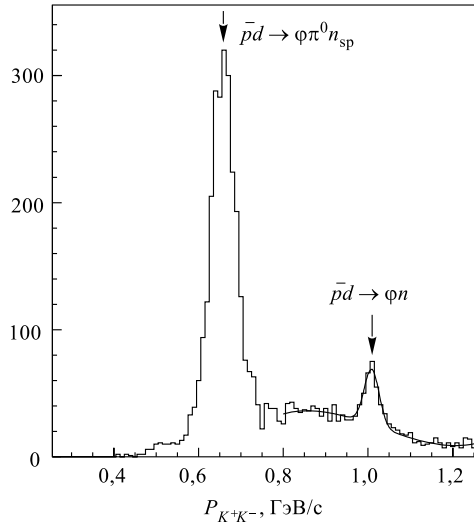


Рис. 2. Наблюдение реакции Понтекорво (впервые) $\bar{p}d \rightarrow \varphi n$ при аннигиляции остановившихся антипротонов в газообразной дейтериевой мишени. По оси абсцисс отложен суммарный импульс K^+K^- -системы

больше, чем в случае аннигиляции на свободном нуклоне: $Y(\bar{p}p \rightarrow \varphi\pi^0)/Y(\bar{p}p \rightarrow \omega\pi^0) = (96 \pm 15) \cdot 10^{-3}$.

Коллаборации OBELIX [33] впервые удалось наблюдать реакцию Понтекорво $\bar{p}d \rightarrow \varphi n$ при аннигиляции остановившихся антипротонов в газообразном дейтерии (рис. 2). Реакции Понтекорво — это такие процессы, в которых аннигиляция начального антинуклона может происходить только на связанном в ядре нуклоне. Их вероятность очень мала. Для обнаружения реакции $\bar{p}d \rightarrow \varphi n$ было набрано порядка $8 \cdot 10^6$ триггерных событий. Измерен выход реакции Понтекорво, а также отношение, характеризующее степень нарушения правила ОЦИ:

$$Y(\bar{p}d \rightarrow \varphi n) = (7,3 \pm 1,1) \cdot 10^{-6},$$

$$\frac{Y(\bar{p}d \rightarrow \varphi n)}{Y(\bar{p}d \rightarrow \omega n)} = (321 \pm 74) \cdot 10^{-3}.$$

Последнее отношение значительно превосходит теоретическое ожидание $(4,2 \cdot 10^{-3})$ и заметно

Научной целью проекта ФАЗА (рук. В. А. Карнаухов), осуществляемого сотрудниками ЛЯП на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ, является выяснение механизма множественной эмиссии фрагментов промежуточной массы «очень горячими» ядрами, который связан с фазовым переходом «жидкость–газ» в ядерном веществе. В основе подхода к исследованию этой проблемы лежит использование пучков релятивистских легких ионов. В этом случае спектрометр мишени получает энергию возбуждения в несколько сотен МэВ и при этом не возникают динамические побочные эффекты, характерные для реакций с тяжелыми ионами (сжатие, вращение, деформация ядер). Поэтому удастся реализовать более чистые условия для изучения термодинамических характеристик очень «горячих» ядер. Для этих исследований создана современная 4 π -установка ФАЗА. В 1996 г. на этой установке обнаружен эффект уменьшения средних энергий фрагментов с увеличением множественности. Показано, что множественная эмиссия фрагментов происходит после значительного расширения системы за счет теплового давления, причем среднее время эмиссии не превышает $2 \cdot 10^{-22}$ с. Этот результат полностью исключает механизм последовательного независимого испарения фрагментов с поверхности ядер и дает основание утверждать, что наблюдаемый распад (помимо радиационного распада, испарения частиц и деления ядер) представляет собой новый тип распада возбужденных ядер — тепловую мультифрагментацию [34].

Энергетические спектры фрагментов промежуточной массы (ФПМ) отражают геометрию и динамику (расширение) источника фрагментов. Показано, что с увеличением массы бомбардирующей частицы наблюдается переход от чисто статистического процесса к более сложному, сопровождающемуся возникновением (потока) коллективного движения фрагментов (рис. 3). Для

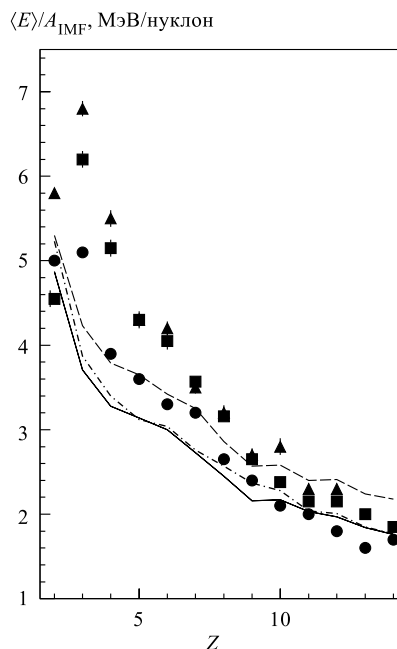


Рис. 3. Средние кинетические энергии на нуклон для фрагментов с зарядом Z , измеренные при $\theta = 89^\circ$ для соударений p (8,1 ГэВ) с золотом (●, штриховая кривая), ${}^4\text{He}$ (14,6 ГэВ) (■, сплошная кривая) и ${}^{12}\text{C}$ (22,4 ГэВ) (▲, штрихпунктирная кривая). Кривые получены в модели, учитывающей модифицированный внутриядерный каскад и статистическую модель мультифрагментации в предположении отсутствия коллективного потока

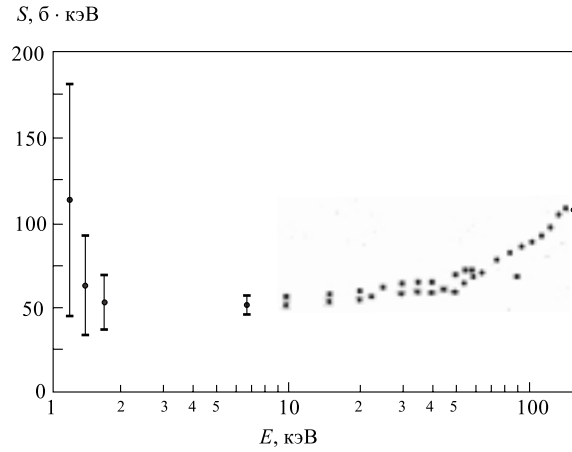


Рис. 4. Зависимость астрофизического S -фактора в dd -взаимодействиях от энергии E столкновения дейтронов. Круги и квадраты обозначают результаты предыдущих измерений; ромбики (в области малых энергий) — результаты, полученные в ЛЯП

протонного пучка измеренные энергии близки к расчетным значениям, но данные для пучков ${}^4\text{He}$ и ${}^{12}\text{C}$ заметно превышают как расчетные величины, так и полученные для $p\text{Au}$ -соударений. Это превышение связано с радиальным коллективным потоком, вызванным тепловым давлением в системе (спектатор мишени), которая оказывается более горячей в случае более тяжелых бомбардирующих частиц [35].

В эксперименте LESI (рук. В. М. Быстрицкий), выполненном на импульсном ионном ускорителе Института высокоточной электроники (Томск) с использованием интенсивного пучка дейтронов, впервые получена прямая экспериментальная оценка верхней границы сечения $\sigma(dd) \leq 2 \cdot 10^{-34} \text{ см}^2$ (90 % у.д.) реакции $d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n$ при энергии дейтронов 400 эВ. В 1999 г. впервые измерены значения астрофизического S -фактора в dd -взаимодействиях при энергиях столкновения дейтронов 1,8, 2,06 и 2,27 кэВ: $S_{dd} = (53 \pm 16)$; (64 ± 30) ; $(114 \pm 68) \text{ б} \cdot \text{кэВ}$ соответственно [36]. Связь S -фактора с сечением определяется соотношением

$$\sigma(E) = \frac{S(E)}{E} \exp\left(-31,29\sqrt{m_d/2E}\right),$$

где E — энергия столкновения дейтронов; m_d — масса дейтрона. Полученные значения астрофизического S -фактора свидетельствуют о том, что в пределах указанных ошибок измерения не наблюдается расхождения с ожидаемыми экстраполяционными значениями данной величины из области энергий столкновения $7 \div 45 \text{ кэВ}$ в исследуемую область энергии (рис. 4). Соответ-

ствующие полные сечения dd -реакции таковы: $\sigma_{dd}^n = (0, 43 \pm 0, 26) \cdot 10^{-32}$; $(0, 98 \pm 0, 46) \cdot 10^{-32}$; $(2, 1 \pm 0, 6) \cdot 10^{-32}$ см².

В области **физики электромагнитных взаимодействий** в Лаборатории ядерных проблем также получено несколько крупных результатов.

На установке ПОЗИТРОНИЙ, созданной совместно ЛЯП (рук. Л. Л. Неменов) и ИФВЭ, открыт и изучен новый распад π^0 -мезона на γ -квант и атом позитрония $\pi^0 \rightarrow \gamma + A_{e+e-}$. Это один из самых редких из разрешенных распадов элементарных частиц, его относительная вероятность составляет $W(\pi^0 \rightarrow \gamma + A_{ee})/W(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) = (1, 84 \pm 0, 29) \cdot 10^{-9}$ [37]. Наблюдено образование π -мезоатомов, состоящих из π^+ - и π^- -мезонов, и получена оценка времени их существования ($\tau > 1, 8 \cdot 10^{-15}$ с) [38]. В настоящее время исследования π -мезоатомов продолжаются на ускорителе PS в ЦЕРН в рамках международной коллаборации DIRAC, где лидирующую роль играют физики ЛЯП ОИЯИ (Л. Л. Неменов, Л. Г. Афанасьев, В. В. Круглов и др.) [39].

Важные сведения, касающиеся кварковой структуры пионов, получены в результате исследования комптон-эффекта на π -мезоне с помощью установки АЯКС–СИГМА, созданной в ЛЯП (рук. Г. В. Мицельмахер) и ИФВЭ (рук. Ю. М. Антипов) [40]. В этих экспериментах впервые были измерены фундаментальные константы, характеризующие деформацию π -мезона в электромагнитном поле, — его электрическая и магнитная поляризуемости

$$\alpha_\pi = (6, 8 \pm 1, 4) \cdot 10^{-43} \text{ см}^3 \quad \text{и} \quad \beta_\pi = (-7, 1 \pm 2, 8) \cdot 10^{-43} \text{ см}^3,$$

которые хорошо согласуются с предсказаниями киральной симметрии. В других экспериментах на той же установке в результате исследования процесса околопорогового образования пионных пар пионами в кулоновском поле ядер впервые была определена величина константы фундаментального процесса $\gamma \rightarrow 3\pi$. Полученное число совпадает с теоретическими расчетами в предположении, что число цветов кварков равно трем. Кроме этого, была продемонстрирована справедливость важной теоремы в теории киральных аномалий, связывающих амплитуды процессов $\gamma \rightarrow 3\pi$ и $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$, и тем самым получена информация о структуре КХД при низких энергиях (А. Г. Ольшевский, Ю. А. Горнушкин, П. А. Кулинич).

Мюонный катализ является специфическим процессом, в котором выход нейтронов при слиянии ядер зависит от макроскопических параметров среды (температуры, плотности и состава). В частности, исследование процессов мюонного катализа позволяет подойти к решению фундаментальной проблемы трех тел в кулоновском потенциале с релятивистскими поправками.

Детальное экспериментальное изучение процессов мюонного катализа ядерных реакций синтеза (μ -катализ) началось в ЛЯП в первой половине 60-х годов. На первом же этапе этой работы было открыто новое явление — резонансное образование мезомолекул, состоящих из двух атомов дейтерия

и мюона: $dd\mu$ (Э. А. Весман, С. С. Герштейн, В. П. Желепов, П. Ф. Ермолов, В. В. Фильченков). Это явление было зарегистрировано как открытие [14]. С тех пор такие исследования ведутся непрерывно не только в ЛЯП, но и во всем мире. Изучение мюонного катализа стало самостоятельным направлением в физике, ему посвящены специальные международные конференции, издается журнал «Muon Catalyzed Fusion». Получено большое количество данных по образованию $dd\mu$ -молекул в условиях различных температур и давлений вплоть до 600 К и 1000 атм и т. д.

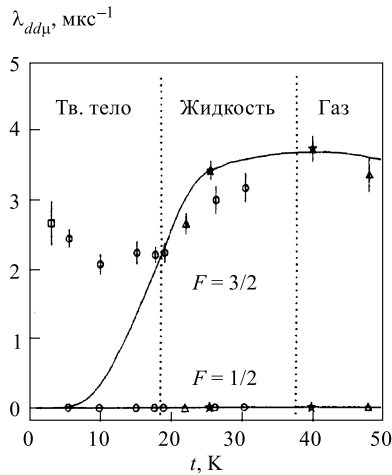


Рис. 5. Температурная зависимость скорости образования мезомолекул дейтерия из различных спиновых состояний мезоатома: \square — данные TRIUMF; \star — PSI; \blacktriangle — прежние данные ЛЯП; \circ — новые данные ЛЯП. Сплошной линией обозначены результаты теоретических вычислений

3 К и противоречат предсказаниям теории [42].

В 1998 г. впервые на установке TRITON в плотной смеси двойных и тройных изотопов водорода были выполнены прямые измерения коэффициента прилипания мюонов к гелию, а также выхода нейтронов (В. Г. Зинов, Д. Л. Дремин и др.). Впервые измерена зависимость скорости цикла (нейтронного выхода) от температуры, давления (плотности) и концентрации изотопов (рис. 6).

В ЛЯП успешно продолжается исследование процессов мюонного катализа ядерных реакций синтеза в двойных (дейтерий и тритий) и тройных (протий, дейтерий и тритий) смесях изотопов водорода при высоких температурах и давлениях. Эти исследования проводятся с помощью установки TRITON (В. Г. Зинов, В. В. Фильченков и др.) на мюонном канале фазотрона ОИЯИ. Измерение так называемых эффективных параметров (скорости цикла λ_c , выхода нейтронов Y_n и потери мюонов ω) процесса мюонного катализа является главной целью экспериментов [41].

В экспозициях на мюонном пучке фазотрона ОИЯИ впервые в широком температурном диапазоне (5,5 ÷ 30 К) выполнены измерения температурной и спиновой зависимости скорости образования мезомолекул из верхнего состояния сверхтонкой структуры мезоатома $d\mu$ и скорости перехода между уровнями (λd) для твердого и жидкого дейтерия (рис. 5). Результаты для твердого дейтерия в диапазоне температур 5,5 ÷ 17,7 К согласуются с измерениями группы TRIUMF при

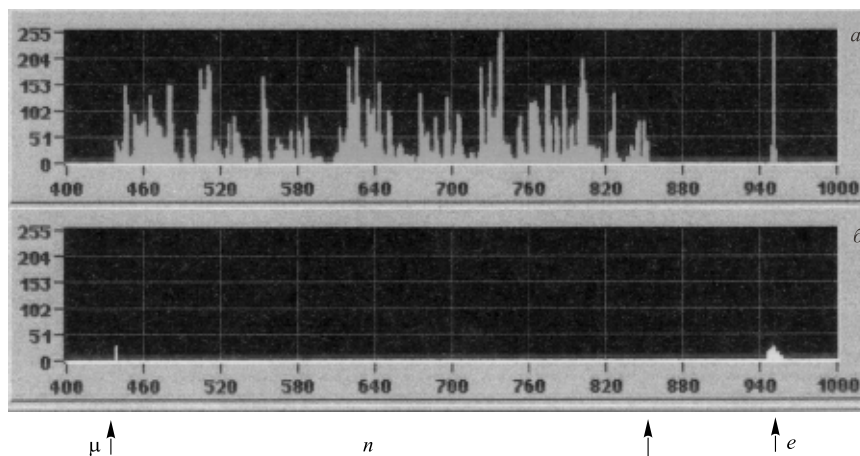


Рис. 6. Процесс μ -катализа в d - t -смеси. Первый импульс (δ) соответствует моменту, когда мюон попадает в установку. Второй импульс — это момент распада мюона. α) Показаны циклы образования ${}^4\text{He}$, сопровождающиеся испусканием нейтронов. Всего испущено примерно 400 нейтронов. Прекращение испускания нейтронов до момента распада мюона связано с прилипанием мюона к гелию

Успешному и широкому развитию **ядерно-спектроскопических исследований** в ЛЯП (рук. К. Я. Громов, В. Г. Калинин, В. А. Халкин, Ц. Д. Вылов и др.) в большой мере способствовали созданные высококвалифицированными радиохимиками лаборатории методы быстрого выделения, очистки и концентрирования радиоактивных веществ в количествах $\sim 10^{-10}$ г с высокими полными и удельными активностями. Исследования велись, в основном, в области редкоземельных сильнодеформированных ядер с $A = 150 \div 190$. Ученые работали как на собственном синхроциклотроне, так и на синхроциклотроне в Гатчине (1979–1984 гг.). В этот период было открыто 20 новых изотопов с временем полураспада $T_{1/2}$ до долей секунды, установлена граница протонной стабильности ядер на относительно протяженном участке по заряду ядра Z , обнаружено новое магическое ядро гадолиний-146, экспериментально определено отношение констант аксиального и векторного взаимодействий g_V/g_A в тяжелых ядрах, оказавшееся резко отличным от такового для нуклонов, и т. д.

В 1987 г. в Лаборатории ядерных проблем был успешно введен в эксплуатацию сложный экспериментальный комплекс с электромагнитным сепаратором изотопов (установка ЯСНАПП-2) и на нем начаты систематические исследования свойств ядер на выведенном пучке реконструированного фазотрона (рук. В. Г. Калинин) [43]. В ходе работ на комплексе ЯСНАПП-2 получен ряд важных методических и физических результатов: достигнуты вы-

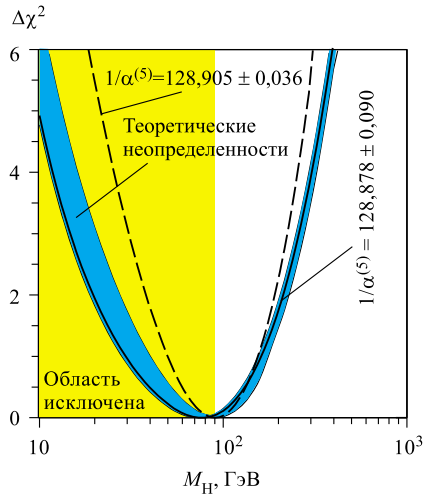


Рис. 7. Пример косвенного измерения массы бозона Хиггса (коллекция DELPHI)

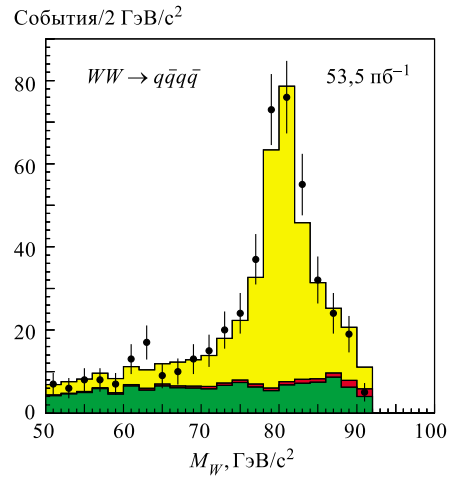


Рис. 8. Определение массы W -бозона из анализа реакции $WW \rightarrow q\bar{q}q\bar{q}$

ходы радионуклидов редкоземельных элементов, соизмеримые по своей величине ($\approx 10^3 - 10^7 \text{ с}^{-1}$) с выходами на установке ISOLDE в CERN. Это позволило наблюдать такие короткоживущие нуклиды, как ^{155}Lu (70 мс), что является уникальным для установок данного типа, а также β -запаздывающие протонные излучатели (^{147}Dy). Обнаружено несколько новых изомеров или существенно уточнена идентификация ранее известных — ^{157}Lu , ^{156}Lu , ^{156}Ho , ^{155}Tm (Ю. В. Юшкевич, М. Яницки, В. В. Кузнецов, В. А. Морозов и др.). Систематические исследования α -эмиттеров редкоземельной области привели к обнаружению новых крайне слабых ($\sim 10^{-5} \%$ на распад) излучателей (^{156}Er , ^{157}Tm) и тонкой структуры α -распада ^{151}Ho и ^{154}Tm . Путем измерения энергий α - и β -переходов нуклидов, связанных «цепочкой» последовательных превращений, установлены с хорошей точностью ($\leq 100 \text{ кэВ}$) массы 25 ядер от Pг до Tm (К. Я. Громов, А. В. Потемпа, В. И. Фоминых, В. М. Горожанкин и др.).

Проведены исследования свойств переходных (от сферических к сильнодеформированным) ядер в области скачка деформации ($N \approx 88$). При β -распаде ^{147}Tb идентифицированы ранее не известные состояния околомагического ядра $^{147}_{64}\text{Gd}_{83}$. Изучение распада короткоживущих изотопов ^{157}Th (36 с), ^{159}Yb (1,4 мин) и более долгоживущих $^{157,159}\text{Er}$ и ^{152}Dy существенно уточнило картину поведения возбужденных уровней дочерних ядер тулия ($Z = 69$), гольмия ($Z = 67$), тербия ($Z = 65$) с числом нейтронов вблизи $N = 88, 90$. Влияние формы ядра на вероятность ядерных процессов просле-

жено на примере α -, β -распада ^{156}Er и обнаруженного МЗ-изомера в $^{156}_{67}\text{Ho}_{89}$ (9,5 с) (Я. Ваврышук, И. Адам, В. И. Стегайлов, Д. Венос и др.).

Одной из приоритетных задач ЛЯП является участие в крупных международных проектах самого высокого уровня научной значимости. Несомненно, наиболее важным из таких за последние 10 лет являлся эксперимент DELPHI (рук. А. Г. Ольшевский) на коллайдере LEP в CERN. Среди множества важных результатов коллаборации DELPHI, касающихся физики как сильных, так и электрослабых взаимодействий (для перечисления которых нужна отдельная статья [44]), отметим полученные ограничения на массу бозона Хиггса: $M_H = 76^{+85}_{-47}$ ГэВ [45], при этом были использованы все чувствительные к электрослабым взаимодействиям наблюдаемые, в том числе и прямые измерения массы топ-кварка.

Все эти наблюдаемые позволяют, тем не менее, получить только косвенные ограничения на массу бозона Хиггса, поэтому не теряет своего значения прямой поиск хиггсовского бозона, предсказываемого в стандартной модели электрослабого взаимодействия. Предварительный анализ результатов прямого поиска такой частицы участниками коллаборации DELPHI при энергии LEP 189 ГэВ позволил установить нижнюю границу для ее массы $M_H > 94,1$ ГэВ [46] (рис. 7). Выполнен поиск осциллирующих $B_s^0 \leftrightarrow \bar{B}_s^0$ в событиях с большими поперечными импульсами. Получен новый предел на разность масс физических B_s^0 -состояний: $\Delta m_s > 6,5$ пс $^{-1}$ (90 % у. д.) [47].

К числу важных результатов, полученных на LEP, следует также отнести непосредственное измерение константы 3-глюонного взаимодействия, что согласуется с предсказаниями квантовой хромодинамики и доказывает существование цвета у кварков. Измеренное коллаборацией DELPHI в процессе $WW \rightarrow q\bar{q}q\bar{q}$ распределение по эффективным массам (рис. 8) позволило определить массу W -бозона [48, 49].

Из анализа данных DELPHI при энергии столкновения 188,63 ГэВ получено, что относительные вероятности лептонных мод распада не проти-

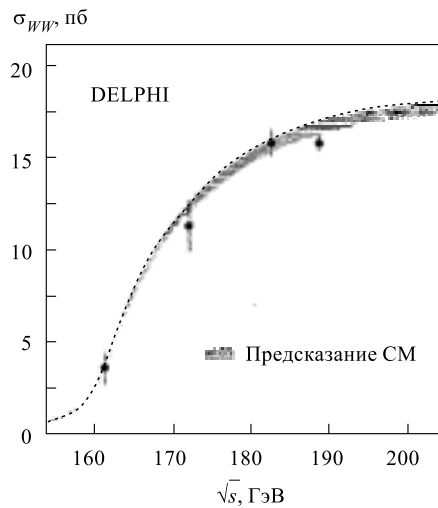


Рис. 9. Измеренные сечения образования W^+W^- -пар в сравнении с предсказаниями стандартной модели при $M_W = 80,41$ ГэВ/ c^2 в рамках возможной неточности вычислений $\pm 2\%$

воречат лептонной универсальности и относительная вероятность адронной моды распада W -бозона составляет $\text{Br}(W \rightarrow q\bar{q}) = 0,680 \pm 0,008$ (стат.) $\pm 0,004$ (сист.), согласуется с предсказанием стандартной модели 0,675 и с результатами измерений при меньших энергиях, проведенных в других экспериментах на LEP [50]. Измеренное полное сечение резонансного рождения двух W -бозонов (рис. 9) в предположении, что относительные вероятности вычислены в стандартной модели, составляет $\sigma_{WW}^{\text{tot}} = 15,83 \pm 0,38$ (стат.) $\pm 0,20$ (сист.) пб.

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ СЛАБЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ И ПОИСК ЯВЛЕНИЙ НОВОЙ ФИЗИКИ

Лаборатория ядерных проблем им. В. П. Джелепова является пионером в исследованиях по физике слабых взаимодействий в ОИЯИ. Здесь получен ряд выдающихся научных результатов.

Прежде всего это открытие β -распада пиона (1962 г.). Измеренная вероятность распада $\pi^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$ оказалась равной $(1,1 \pm 0,1) \cdot 10^{-8}$ по отношению к распаду $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$. Этот исключительно сложный опыт удалось осуществить благодаря очень остроумной постановке [5]. Авторы этой работы Ю. Д. Прокошкин, А. Ф. Дунайцев, В. И. Петрухин, В. И. Рыкалин были удостоены Академией наук СССР золотой медали и премии им. И. В. Курчатова. Важность полученного результата состоит в том, что он явился прямым доказательством фундаментального закона сохранения векторного тока в слабом взаимодействии, впервые теоретически обоснованного Я. Б. Зельдовичем и С. С. Герштейном [51].

Целый комплекс фундаментальных теоретических и экспериментальных исследований по физике слабых взаимодействий (и физике нейтрино) выполнен в лаборатории академиком Б. М. Понтекорво и под его руководством. Без преувеличения можно сказать, что главными достижениями прошлых лет в этой области лаборатория обязана Бруно Максимовичу.

Б. М. Понтекорво (вместе с М. А. Марковым) обосновал возможности существования мюонного нейтрино, а также предложил (в 1959 г.) эксперимент по обнаружению этого нейтрино на ускорителях высоких энергий [52]. Выполненные в США в 1962 г. эксперименты действительно позволили открыть мюонное нейтрино (нейтрино второго поколения) и положили начало новой области исследований — физике нейтрино высоких энергий на ускорителях [53].

В 1957 г. Б. М. Понтекорво высказал идею о возможности существования осцилляций нейтрино — превращения одного типа нейтрино в другой, что допустимо, в принципе, только при наличии у нейтрино хотя бы очень маленькой массы [54]. Важность поиска осцилляций нейтрино определяется

не просто тем, что их обнаружение будет означать наличие масс у нейтрино. Легкие массивные нейтрино — это ключ ко многим нераскрытым тайнам нашей Вселенной (недостаток потока нейтрино от Солнца, эволюция звезд, взрывы сверхновых, проблема так называемой темной, или скрытой, материи, образование космических лучей сверхвысоких энергий и т. д.).

Интерес к гипотезе о массивных нейтрино и их осцилляциях начал расти после создания стандартной модели электрослабых взаимодействий и особенно усилился после появления многочисленных моделей, выходящих за рамки стандартной модели, в которых нейтрино естественным образом обладают ненулевыми массами. В настоящее время мало найдется специалистов в области физики элементарных частиц, которые бы не верили в существование ненулевых масс и осцилляций нейтрино. Поиск осцилляций нейтрино наряду с поиском безнейтринного двойного β -распада ядер является основным направлением современной нейтринной физики [53]. Эти два фундаментальных эффекта — нейтринные осцилляции и безнейтринный двойной β -распад — позволяют определить все свойства нейтрино (дираковские или майорановские, массы и смешивание) и имеют ключевое значение для современной теории элементарных частиц, астрофизики и космологии. Неудивительно, что проблемой осцилляций нейтрино занимаются сейчас в мире десятки крупных лабораторий.

Физики ЛЯП (рук. С. А. Бунятов) начиная с 1993 г. проводят совместный с CERN эксперимент на установке NOMAD (WA-96). Главная цель эксперимента — поиск осцилляций нейтрино $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ и $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$. За прошедшие годы по мере набора данных коллаборация NOMAD неуклонно улучшала свои результаты [55, 56].

В области больших значений Δm_{12}^2 ($> 50 \text{ эВ}^2$) пределы (90 % у. д.) для амплитуды и вероятности ($\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$)-осцилляций (рис. 10, а) равны [56]:

$$\sin^2 2\theta_{\nu_\mu\nu_\tau} < 4,0 \cdot 10^{-4}, \quad P_{\nu_\mu\nu_\tau}(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) < 2 \cdot 10^{-4}.$$

Полученное значение $P_{\nu_\mu\nu_\tau}(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau)$ более чем в 10 раз превосходит прежний лучший предел в области больших масс: $P_{\nu_\mu\nu_\tau}(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) < 2,5 \cdot 10^{-3}$ (FNAL, E531, 1986). Аналогично пределы для амплитуды и вероятности ($\nu_e \rightarrow \nu_\tau$)-осцилляций (рис. 10, б) при $\Delta m_{12}^2 > 50 \text{ эВ}^2$ равны [56]:

$$\sin^2 2\theta_{\nu_e\nu_\tau} < 2,0 \cdot 10^{-2}, \quad P_{\nu_e\nu_\tau}(\nu_e \rightarrow \nu_\tau) < 1,0 \cdot 10^{-2},$$

что также в 10 раз превосходит прежние ограничения на параметры ($\nu_e \rightarrow \nu_\tau$)-осцилляций (FNAL, CCFR, 1994).

С целью проверки основных законов симметрии в слабых взаимодействиях в 1962 г. Б. М. Понтекорво, Р. М. Суляевым, Ю. А. Щербаковым и др. был выполнен опыт по захвату μ^- -мезонов в ${}^3\text{He}$ — реакция ${}^3\text{He} + \mu^- \rightarrow$

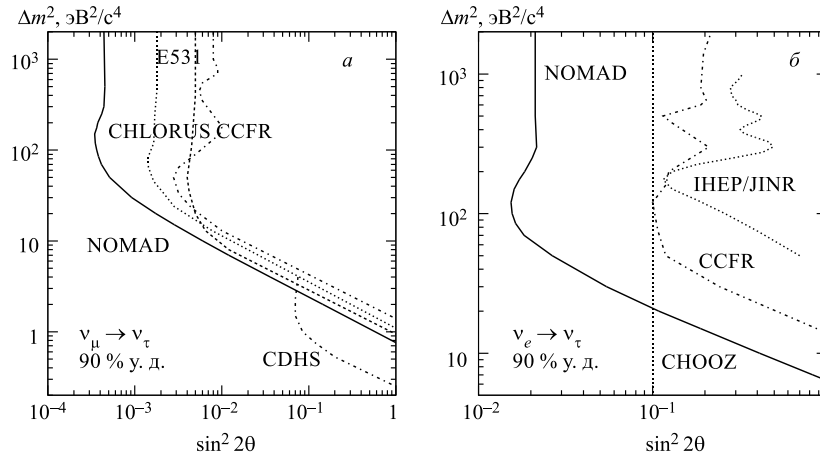


Рис. 10. Исключенные в эксперименте NOMAD области параметров $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ (а) и $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$ (б) осцилляций расположены справа от кривых (в интервале разности квадратов масс $1 < \Delta m_{12}^2 < 1000 \text{ эВ}^2$)

$^3\text{H} + \nu_\mu$ (рис. 11). Использовалась диффузионная камера, наполненная тщательно очищенным от трития ^3He [58]. Впервые наблюдалась отдача от мюонного нейтрино, что позволило определить верхний предел массы нейтрино. Опыт подтвердил тождественность мюона и электрона в слабом взаимодействии ($\mu - e$ -универсальность) [57]. В экспериментах В. П. Желепова, П. Ф. Ермолова, В. В. Фильченкова и др. по захвату μ^- -мезонов протонами с использованием газовой водородной мишени с давлением 40 атм была определена вероятность процесса $\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$. Результаты подтвердили справедливость $V - A$ -варианта и универсальность слабого взаимодействия [59].

С рекордной точностью (1974 г.) в чисто лептонном процессе $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$ было определено время жизни мюона ($\tau_{\mu^+} = (2,191711 \pm 0,00008) \text{ мкс}$), что важно для более строгого вычисления константы слабого взаимодействия $g_\mu = (1,43544 \pm 0,00004) \cdot 10^{-49} \text{ эрг/см}^2$ и определения роли радиационных поправок в процессах слабого взаимодействия (М. П. Баландин, В. Г. Зинов и др.). Регистрация позитронов от распада положительно заряженного мюона осуществлялась путем наблюдения вспышек черенковского излучения, возникавших от них в водяном 4π -детекторе [60].

В ЛЯП (В. Б. Бруданин, Ц. Д. Вылов, В. М. Горожанкин, К. Я. Громов и др.) проведено измерение спиральности электронного нейтрино от распада ^{152m}Eu с помощью Ge(Li)-детектора. Получено значение $-0,87 \pm 0,10$, хорошо согласующееся с предположением о полной левой продольной поляризации нейтрино [61]. С высокой точностью (рук. Ц. Д. Вылов) были измерены массы

электрона e^- и позитрона e^+ : $m_0c^2(e^+ \text{ и } e^-) = (511,003 \pm 0,005) \text{ кэВ}$ и энергия связи дейтрона ($E_d = (2224563 \pm 10) \text{ эВ}$).

С целью исследования возможностей нарушения законов симметрии слабых взаимодействий, в частности, гипотезы о сохранении лептонных чисел, по инициативе Б. М. Понтекорво были выполнены первые экспериментальные работы по определению вероятностей распадов, запрещенных законом сохранения лептонного числа. Эти эксперименты заложили основу исследовательской традиции ЛЯП — искать новые явления на границе между известным и еще непознанным.

Так, в экспериментах на синхротронном ЛЯП с помощью 4π -магнитного спектрометра с искровыми цилиндрическими камерами, созданного С. М. Коренченко, К. Г. Некрасовым и др., было достигнуто рекордное (в десятки раз более жесткое, чем полученное где-либо ранее до 1975 г.) ограничение $R < 1,9 \cdot 10^{-9}$ на вероятность распада $\mu \rightarrow 3e$ [62], в котором одновременно меняются мюонное и электронное лептонные числа. Этими же учеными и А. И. Филипповым и др. в 1990 г. на новом фазотроне ЛЯП и на более совершенном 4π -детекторе АРЕС с 18 пропорциональными цилиндрическими камерами эта граница была понижена до $R < 3,6 \cdot 10^{-11}$. Таким образом, пока нарушения закона сохранения лептонных чисел в такого сорта процессах не обнаружено.

В 1957 г. Б. М. Понтекорво высказал идею о возможном существовании переходов мюония (атома, состоящего из двух лептонов, $M \equiv \mu^+e^-$) в антимюоний ($e^+\mu^-$) [54]. В этом процессе лептонные числа частиц меняются не на единицу, а на двойку и, следовательно, запрет на переход $\mu^+e^- \rightarrow e^+\mu^-$ ожидается очень сильным. На рис. 12 показаны возможные в рамках современных теоретических моделей пути конверсии мюония в антимюоний. Например, при обмене дважды заряженным бозоном Хиггса (рис. 12, а) отношение эффективной константы $M \rightarrow \bar{M}$ -перехода $G_{M\bar{M}}$ к константе Ферми G_F равно

$$\frac{G_{M\bar{M}}}{G_F} = \frac{f_{ee}f_{\mu\mu}^*}{g^2} \left(\frac{M_W}{M_{++}} \right)^2,$$

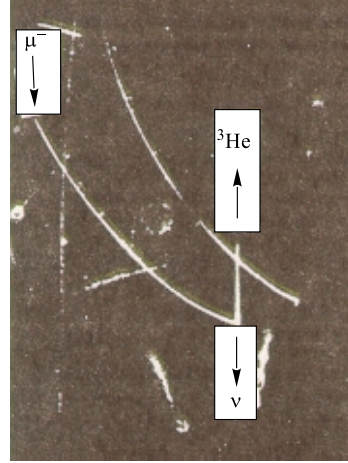


Рис. 11. Типичная фотография реакции ${}^3\text{He} + \mu^- \rightarrow {}^3\text{H} + \nu_\mu$. Короткие следы, видимые на фотографии, образованы тепловыми нейтронами в реакции $n + {}^3\text{He} \rightarrow {}^3\text{H} + p$

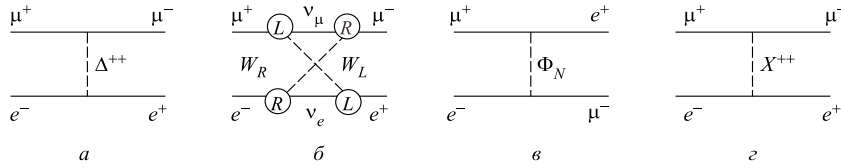


Рис. 12. Переходы мюония в антимюоний $M \rightarrow \bar{M}$ в теоретических подходах, выходящих за рамки стандартной модели. Взаимодействие может осуществляться за счет обмена дважды заряженным бозоном Хиггса Δ^{++} (а), тяжелыми нейтрино Майораны (б), нейтральным скаляром Φ_N , например суперсимметричными τ -нейтрино $\tilde{\nu}_\tau$ (в), или дилептонным калибровочным бозоном X^{++} (г)

где f_{ll} — константы взаимодействия в $l^+l^-\Delta^{++}$ -вершинах; M_W и M_{++} — массы W - и Δ^{++} -бозонов.

В 1993 г. на фазотроне ЛЯП был проведен первый совместный с ПИЯФ эксперимент (рук. В. А. Гордеев (ПИЯФ) и О. В. Савченко (ОИЯИ)) по поиску перехода $\mu^+e^- \rightarrow \mu^-e^+$. Метод регистрации был основан на детектировании с помощью магнитного спектрометра высокоэнергетичных электронов от (ожидаемого) распада антимюония. Было зарегистрировано только одно под-

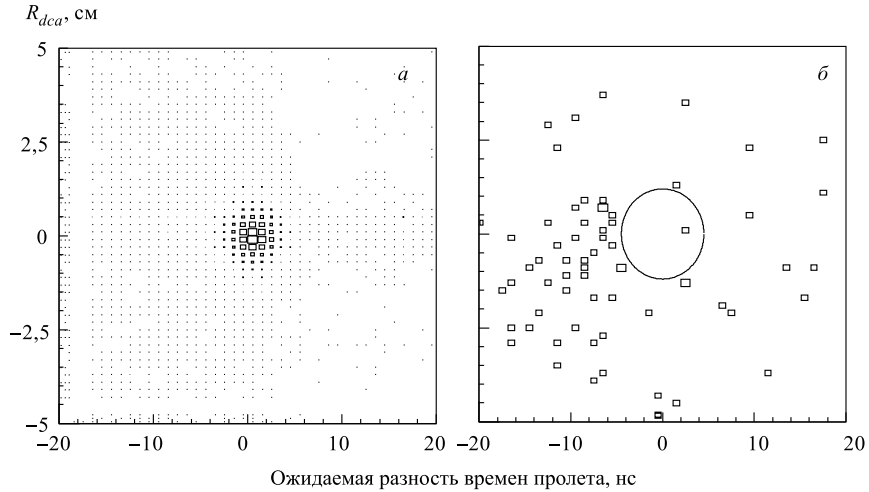


Рис. 13. Распределение кратчайших расстояний (R_{dca}) между треком быстрой частицы в магнитном спектрометре и проекцией позитрона на МСР-детектор как функция времени пролета (TOF) частицы с атомной оболочки при регистрации мюония (а); то же распределение для данных, накопленных в 1996 г. во время поиска антимюония (б). Лишь одно событие попало в 3σ -область (отмечена на рисунке эллипсом) ожидаемых значений TOF и R_{dca}

ходящее событие, что позволило установить границу вероятности перехода $M \rightarrow \bar{M}$: $R < 4,7 \cdot 10^{-7}$ и, соответственно, $G_{M\bar{M}} \leq 0,14 G_F$ [63]. Этот результат оставался лучшим в мире в «Particle Date Group» до 1996 г., пока не были получены первые результаты в эксперименте по измерению конверсии мюония в антимюоний (с участием ЛЯП) в PSI (Швейцария).

Международная коллаборация «Мюоний–антимюоний» (от ЛЯП рук. С. М. Коренченко) [64] успешно провела в PSI другой эксперимент по поиску переходов мюоний–антимюоний. В эксперименте (1993–1996 гг.) было образовано $5,7 \cdot 10^{10}$ атомов мюония в наблюдаемом объеме. Было найдено одно событие (рис. 13), удовлетворяющее всем критериям отбора при ожидаемом фоне 1,7 события. Полученные данные позволили установить новое ограничение на верхнюю границу вероятности переходов $M \rightarrow \bar{M}$: $P_{M\bar{M}} \leq 2,3 \cdot 10^{-10}$. Это ограничение уменьшает известный ранее предел более чем в 2000 раз. Соответствующее ограничение на величину константы связи для переходов $M \rightarrow \bar{M}$ составляет $G_{M\bar{M}} \leq 3 \cdot 10^{-3} G_F$ [65]. Полученное значение $G_{M\bar{M}}$ позволяет исключить некоторые модели и дает новые ограничения на параметры ряда других.

В эксперименте NOMAD (от ЛЯП рук. С. А. Бунятов) получены важные данные о поляризации Λ^0 -гиперонов в нейтринных взаимодействиях $\nu_\mu N \rightarrow \mu^- \Lambda^0 X$. Проанализировано 8087 событий с Λ^0 -гиперонами, что

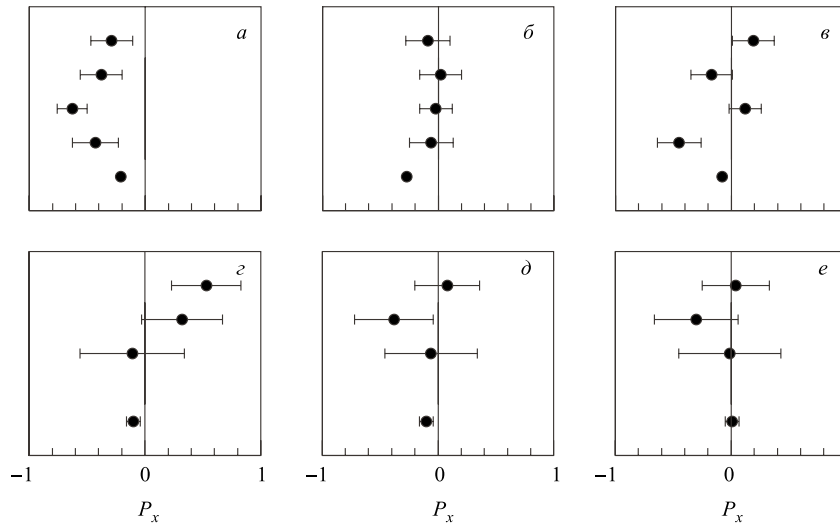


Рис. 14. Поляризация Λ^0 -гиперонов в области фрагментации мишени ($x_F < 0$) (а, б, в) и тока ($x_F > 0$) (г, д, е), измеренная в экспериментах (точки сверху вниз): WA 21 ($\nu_\mu - p$), WA 21 ($\bar{\nu}_\mu - p$), WA 59 ($\bar{\nu}_\mu - Ne$), E 632 ($\nu_\mu - Ne$, только вверх) и NOMAD (хорошо заметно значительное снижение ошибок измерения)

в 30 раз больше, чем во всех прежних нейтринных экспериментах [66]. Продольная поляризация Λ^0 -гиперонов измерена (рис. 14) как в области фрагментации мишени $P_x(x_F < 0) = -0,21 \pm 0,04$ (стат.) $\pm 0,02$ (сист.), так и в области фрагментации пучка $P_x(x_F > 0) = -0,09 \pm 0,06$ (стат.) $\pm 0,03$ (сист.). Измерение продольной поляризации в области фрагментации пучка позволяет оценить коэффициент передачи спина u -кварка Λ^0 -гиперону $C_u^\Lambda = -P_x = 0,09 \pm 0,06$ (стат.) $\pm 0,03$ (сист.). Впервые в нейтринных экспериментах наблюдалась значительная поперечная поляризация в направлении, перпендикулярном к плоскости образования Λ^0 -гиперона: $P_y = -0,22 \pm 0,03$ (стат.) $\pm 0,01$ (сист.). Новые экспериментальные данные позволяют проверить в области $x_F < 0$ различные модели, предполагающие существование поляризованной «скрытой» странности в нуклоне, а в области $x_F > 0$ — механизм передачи поляризации кварка Λ^0 -гиперону.

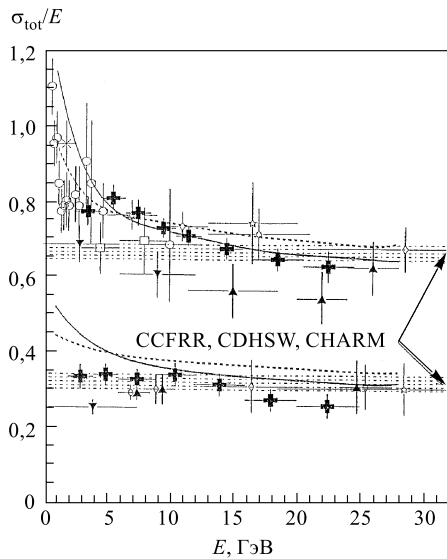


Рис. 15. Полные сечения взаимодействия нейтрино и антинейтрино с нуклонами в канале заряженных токов. Данные коллаборации ИФВЭ–ОИЯИ отмечены крестами

тон-нуклонных взаимодействиях при 70 ГэВ («beam-dump»-эксперимент), равно $0,9_{-0,9}^{+1,1}$ мкб/нуклон. Эта величина является лучшей оценкой сечения образования очарованных частиц в околопороговой области энергий [67], она согласуется с расчетами на основе квантовой хромодинамики и опровергает утверждения о существовании аномального усиления сечения образования

Помимо исследования слабых взаимодействий в редких процессах в ЛЯП выполняется широкая программа исследований свойств нейтрино на ускорителях. Начиная с 1989 г. на ускорителе У-70 (Протвино) с помощью установки «Нейтринный детектор» коллаборацией ИФВЭ–ОИЯИ (рук. А. С. Вовенко (ИФВЭ) и С. А. Бунятов) проводятся эксперименты по исследованию взаимодействия нейтрино с веществом. В них с высокой точностью измерены полные сечения взаимодействия мюонных нейтрино и антинейтрино на изоскалярной мишени в канале заряженного тока в области энергий $3 \div 30$ ГэВ (рис. 15). В интервале $3 \div 10$ ГэВ наблюдается отклонение от линейной зависимости между полным сечением и энергией мюонного нейтрино.

Измерено полное сечение образования очарованных частиц в про-

очарованных частиц вблизи порога. В реакциях глубоконеупругого рассеяния измерены структурные функции нуклонов $x F_3$ и F_2 в области малых значений переданного импульса Q^2 (рис. 16) [68]. С учетом твистовых поправок и систематических ошибок проведен КХД-анализ структурной функции $x F_3$ в следующем за лидирующим (NLO) приближении [69]. Определены масштабный параметр КХД и константа сильного взаимодействия

$$\Lambda_{\overline{MS}} = (411 \pm 200) \text{ МэВ},$$

$$\alpha_S(M_Z) = 0,123^{+0,010}_{-0,013},$$

которые хорошо согласуются с измерениями, выполненными на Z -пике (LEP и SLC), с результатами коллаборации CCFR, а также с анализом данных дубненской мюонной коллаборации [70].

Важный вклад в исследования физики нейтрино внесла группа ученых ЛЯП (рук. А. Г. Ольшевский) в составе коллаборации DELPHI. Первостепенное значение как для физики частиц, так, особенно, для астрофизики, несомненно, имеет убедительное доказательство существования только трех поколений легких нейтрино ν_e, ν_μ и ν_τ ($m_\nu < 45 \text{ ГэВ}/c$, $N_\nu = (2,994 \pm 0,011)$) (рис. 17). Нельзя, конечно, переоценить значение прецизионного измерения массы и ширины Z^0 -бозона $M_Z = (91,06 \pm 0,09) \text{ ГэВ}$, $\Gamma_Z = (2,42 \pm 0,21) \text{ ГэВ}$, а также синуса угла смешивания $\sin^2 \Theta_W = (0,2335 \pm 0,0015)$ [44].

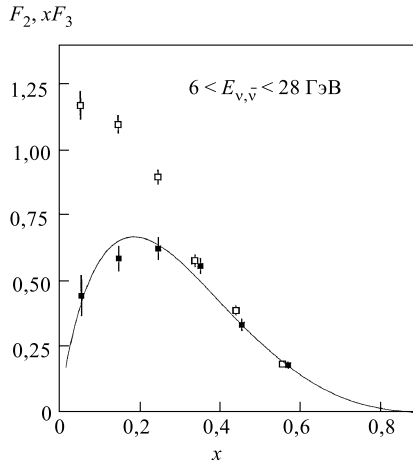


Рис. 16. Структурные функции $x F_3$ (■) и F_2 (□), измеренные на нейтринном детекторе ИФВЭ–ОИЯИ в области малых значений переданного импульса $0,55 < Q^2 < 4,0 \text{ ГэВ}^2$

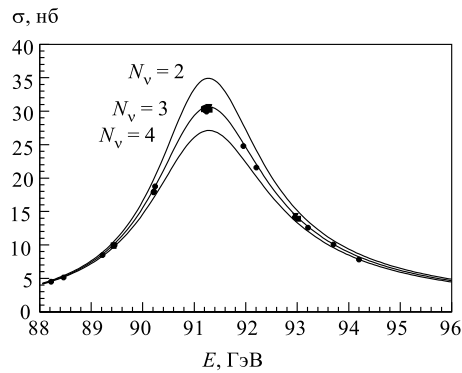


Рис. 17. Энергетическая зависимость сечения образования адронов в области Z^0 -пика как функция числа типов легких нейтрино. Данные отвечают статистике, набранной с помощью установки DELPHI на первой стадии работы коллайдера LEP (LEP1). Хорошо видно, что только $N_\nu = 3$ согласуется с данными

Физика нейтрино и слабых взаимодействий посредством исследования крайне редких процессов теснейшим образом граничит с областью так называемой новой физики, за рамками стандартной модели. Основным интересом исследователей лежит в сфере поиска новых, неизвестных ранее процессов и закономерностей, противоречащих господствующим теоретическим представлениям.

Стандартная модель слабых, электромагнитных и сильных взаимодействий — одна из наиболее удачных теоретических схем, предложенных в физике частиц. Она прекрасно работает. Однако считается, что стандартная модель не может быть окончательной, фундаментальной теорией, и следует ожидать новых явлений за рамками стандартной модели, причем эти явления должны проявиться уже скоро — при тэвных энергиях, т. е. на ускорителях ближайшего будущего, таких как ЛНС. Эта новая физика, как правило, сопровождается появлением новых частиц и новых взаимодействий. Наиболее многообещающие построения за рамками стандартной модели базируются на идеях суперсимметрии, которые разрешают ряд общих проблем теории, таких как проблема иерархии массовых масштабов, и позволяют осуществить объединение всех взаимодействий, включая в недалеком будущем, видимо, и гравитацию. С помощью ускорителей проводится прямой поиск новой физики; они позволяют либо напрямую обнаружить ту или иную предсказываемую частицу, либо закрыть возможность ее существования путем ее ненаблюдения (см. ниже результаты DELPHI).

Другой подход основан на косвенном, непрямом, поиске проявлений новой физики, который проводится без помощи ускорителей в неускорительных лабораторных (подземных) экспериментах и путем астрофизических (земных и космических) наблюдений. В этом случае ведется прецизионный поиск эффектов, обусловленных обменом новыми экзотическими частицами (переносчиками новых взаимодействий) между обычными частицами. Такого сорта эксперименты, в отличие от ускорителей, не ограничены пределом по достижимой энергии. В принципе, чувствительность уже имеющихся неускорительных экспериментов простирается далеко за мыслимые возможности ускорителей, вплоть до планковских масштабов по энергии (10^{19} ГэВ). Современные ускорительные и неускорительные эксперименты в области физики частиц, направленные на максимально точное определение различных физических наблюдаемых, позволяют вести поиск новых явлений за рамками стандартной модели или, как минимум (что не менее важно), получать важные ограничения на такие явления.

В качестве примера поиска необычного явления, предсказанного еще Дираком, физики ЛЯП (рук. В. П. Зрелов) и Братиславского университета им. Я. Коменского (рук. П. Павлович) в 1976 г. выполнили тонкий опыт на ускорителе ИФВЭ по поиску магнитных монополей Дирака с помощью оригинального метода, основанного на различии поляризации черенковского из-

лучения от магнитного монополя и поляризации этого излучения от других частиц. Было получено ограничение на существование легких магнитных зарядов с массой $3 \div 5$ масс протона [71]. Этот эксперимент можно расценивать как одну из первых попыток сотрудников ЛЯП вести поиск эффектов новой физики на ускорителях.

Никаких проявлений физики за пределами стандартной модели не было обнаружено в результате определения сечений образования фермионных пар, асимметрий и угловых распределений в процессах рождения лептонов на основе данных, полученных на детекторе DELPHI в реакциях $e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\gamma)$, $\mu^+\mu^-(\gamma)$, $\tau^+\tau^-(\gamma)$ и $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}(\gamma)$ при энергиях LEP 183 и 189 ГэВ. Это позволило установить новые ограничения на интенсивность контактного взаимодействия фермионов, на параметры нарушения R -четности в процессе обмена нейтрино, на массы Z' -бозонов и вероятность существования гравитационного взаимодействия за счет так называемых дополнительных размерностей. В случае обмена нейтрино с нарушением R -четности лептонная константа связи суперпотенциала $\lambda > 0,1$ исключается для масс $m_{\tilde{\nu}}$ в области $130 \div 190$ ГэВ для всех лептонных конечных состояний на 95 % уровне достоверности. Исключаются дополнительные Z' -бозоны, массы которых не превышают $300 \text{ ГэВ}/c^2$ (95 % у.д.). Нижние пределы в 542 и 680 ГэВ (95 % у.д.) получены для масштаба струны M_S в гравитационных

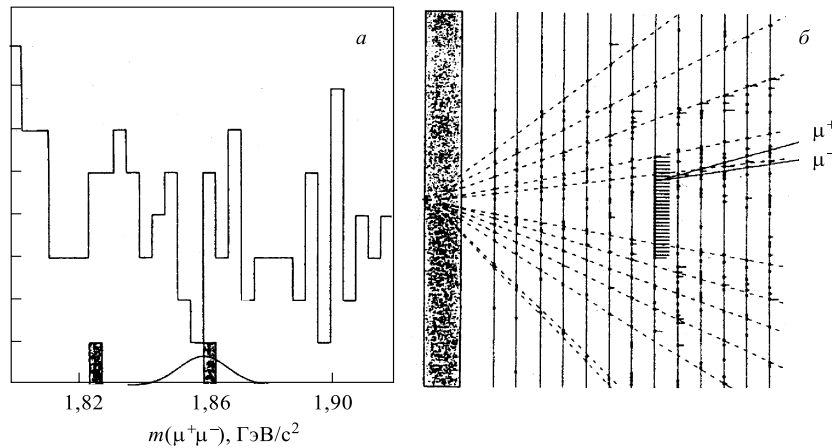


Рис. 18. *а*) Распределение по инвариантным массам димеонов разного знака. Кривая демонстрирует ожидаемое положение и ширину распада $D^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$. Два (заштрихованных) события выживают после визуального сканирования, однако исключаются на основании критерия энерговыделения в распадном детекторе. *б*) Пример события, прошедшего визуальное сканирование и соответствующего димеоновой массе $1,86 \text{ ГэВ}/c^2$

моделях с дополнительными размерностями, соответственно, для $\mu^+\mu^-$ - и $\tau^+\tau^-$ -конечных состояний [49].

С целью поиска запрещенного в стандартной модели чисто лептонного распада очарованного мезона $D \rightarrow \mu^+\mu^-$ с участием сотрудников ЛЯП (Н. А. Русакович, А. А. Семенов и др.) в рамках коллаборации BEATRICE был предпринят анализ данных с Ω -спектрометра (CERN). На основе анализа (рис. 18) $1,25 \cdot 10^5$ $\mu^+\mu^-$ -пар, образовавшихся во взаимодействиях 350 ГэВ π^- -мезонов с медной и вольфрамовой мишенями, установлена верхняя граница (90 % у. д.) вероятности этого распада [72]:

$$\text{Br}(D^0 \rightarrow \mu^+\mu^-) = 7,6 \cdot 10^{-6}.$$

Эта величина в 1,5 раза ниже известного ранее ограничения.

В области неускорительной физики с целью обнаружения эффектов, лежащих за пределами стандартной модели, большой международной коллаборацией NEMO с участием в ней значительной группы сотрудников ЛЯП (от ОИЯИ рук. Ц. Д. Вылов и В. Б. Бруданин) в подземной низкофононовой лаборатории Модане (Франция) был создан крупный спектрометр NEMO-2 и на нем проведен поиск безнейтринных мод (и измерение двухнейтринных мод) двойного β -распада ($2\beta0\nu$) ядер ^{100}Mo , ^{116}Cd , ^{82}Se и ^{96}Zr . Получены результаты:

$$T_{1/2}(2\beta2\nu, ^{100}\text{Mo}) = (1,0 \pm 0,08 \text{ (стат.)} \pm 0,2 \text{ (сист.)}) \cdot 10^{19} \text{ лет};$$

$$T_{1/2}(2\beta2\nu, ^{82}\text{Se}) = (1,2 \pm 0,3 \text{ (стат.)} \pm 0,2 \text{ (сист.)}) \cdot 10^{20} \text{ лет};$$

$$T_{1/2}(2\beta0\nu, ^{82}\text{Se}) > 5 \cdot 10^{21} \text{ лет}, \quad T_{1/2}(2\beta0\nu, ^{96}\text{Zr}) > 1 \cdot 10^{21} \text{ лет};$$

$$T_{1/2}(2\beta2\nu, ^{116}\text{Cd}) = (3,75 \pm 0,35 \text{ (стат.)} \pm 0,21 \text{ (сист.)}) \cdot 10^{19} \text{ лет};$$

$$T_{1/2}(2\beta0\nu, ^{116}\text{Cd}) > 5 \cdot 10^{21} \text{ лет}.$$

Измеренные значения периодов полураспада ядер находятся на уровне 10^{19} лет. Для безнейтринной моды двойного β -распада получена нижняя граница на время полураспада 10^{21} лет. Эти результаты соответствуют мировому уровню точности в данной области исследований. В 1997 г. установка NEMO-2 демонтирована и начато создание на ее месте нового большого спектрометра NEMO-3 (рис. 19). Цель эксперимента NEMO-3 [73] состоит в поиске безнейтринной и двухнейтринной мод двойного β -распада ядер ^{100}Mo , ^{130}Te , ^{82}Se , ^{150}Nd , ^{96}Zr , ^{48}Ca (масса изотопически обогащенных образцов ~ 10 кг) и измерении эффективной майорановской массы нейтрино $\langle m_\nu \rangle$ на уровне 0,1 эВ. В 2000 г. основная часть детектора NEMO-3 была собрана в подземной лаборатории Фрейджус (Франция) на глубине, соответствующей защите в 4800 м водн. экв. [74].

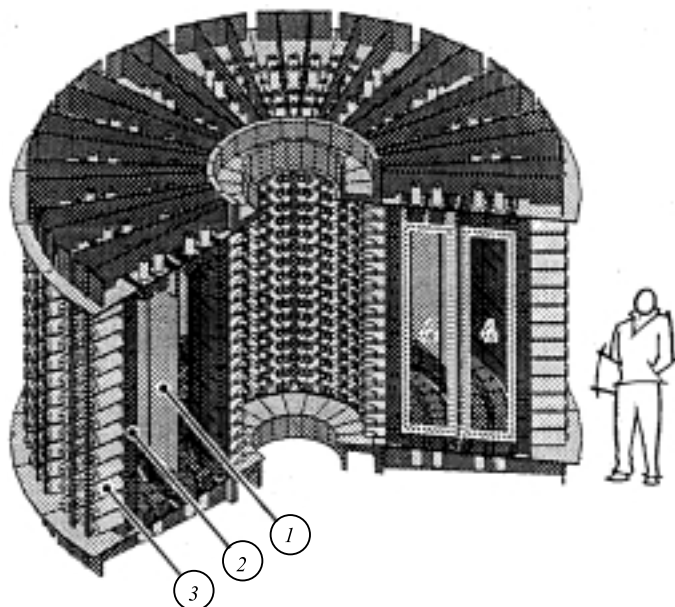


Рис. 19. Новый большой спектрометр NEMO-3: 1 — фольга источника в виде цилиндра; 2 — блоки сцинтиляторов; 3 — фотоумножители. Детектор состоит из 6180 счетчиков Гейгера и 1940 пластиковых сцинтилляторов, собранных в 20 сегментированных секторов. Такая конструкция обеспечивает высокую эффективность регистрации ядерных распадов

Интерес к измерению $2\beta 0\nu$ -распада, запрещенного в стандартной модели, сейчас существенно повысился в связи с тем, что найдены новые механизмы этого процесса, реализующиеся в суперсимметричных моделях [75]. При определенных условиях новые механизмы абсолютно доминируют в этом процессе. Расчеты показали (рук. С. Г. Коваленко), что имеющиеся данные о времени полураспада некоторых изотопов устанавливают жесткие ограничения на параметры суперсимметрии. Для ряда ключевых параметров эти ограничения оказались гораздо более жесткими, чем соответствующие ограничения для ускорительных экспериментов. Таким образом, $2\beta 0\nu$ -распад является уникальным зондом новой физики.

Помимо эксперимента NEMO в подземной лаборатории Модане (Франция) проведен поиск двойного β -распада ядер ^{48}Ca , с помощью установленного там прототипа спектрометра TGV, состоящего из 16 сверхчистых германиевых детекторов, расположенных вертикально. Из анализа высокоэнергетической области измеренного спектра и монте-карловского моделирования

для двухнейтринной моды двойного β -распада ^{48}Ca было получено значение $T_{1/2} = 4(2) \cdot 10^{19}$ лет. Предварительная оценка времени полураспада для безнейтринной моды двойного β -распада ^{48}Ca составляет $T_{1/2} > 1,1 \cdot 10^{21}$ лет (90 % у. д.) [76].

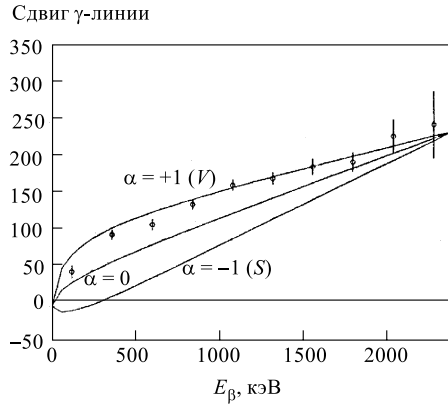


Рис. 20. Доплеровский сдвиг γ -линии при β -распаде ^{18}Ne . Кривая с $\alpha = 1$ соответствует векторному варианту слабого взаимодействия

$^{16}\text{O}(^3\text{He}, n)^{18}\text{Ne}$. Полученные результаты соответствуют векторному варианту слабого взаимодействия (рис. 20). Из анализа данных, однако, извлечен верхний предел для величины эффективной скалярной константы связи слабого взаимодействия $C_S/C_V \leq 0,26$ (95 % у. д.) [77]. Измерение угловой корреляции между импульсами нейтрино и позитрона осуществлялось путем прецизионной γ -спектроскопии за счет доплеровского сдвига γ -квантов, сопровождающих β -распад.

Аналогичная идея использовалась в эксперименте по исследованию μ -захвата на мюонном пучке PSI (Швейцария). Доплеровское уширение этой 277 кэВ γ -линии, сопровождающей обычный захват мюона ядром ^{16}O , очень чувствительно к возможной примеси скалярного слабого взаимодействия (как истинного, так и индуцированного). Из анализа формы этой линии для корреляционного коэффициента получено значение $\alpha = +0,096 \pm 0,020$ (68 у. д.), что отвечает наличию скалярного формфактора на уровне 5–10 % (в зависимости от ядерной модели, использованной для вычисления ядерных матричных элементов).

Целью нового этапа эксперимента AnCor является изучение β -распада ядра ^{32}Ar , сопровождающегося эмиссией протона. Использование

Проект AnCor (рук. В. Г. Егоров) посвящен исследованию β -нейтринных угловых корреляций при сверхразрешенных β -распадах короткоживущих ядер. Фундаментальная цель этого проекта состоит в прецизионном измерении в процессах β -распада и μ -захвата констант связи скалярного и тензорного слабого взаимодействия, которые запрещены в стандартной модели. В рамках этого проекта на тандемном ускорителе Института ядерной физики в Орсе (Франция) с помощью многодетекторной установки (14 Si(Li) позиционных и 2 HPGe γ -детекторов) исследованы электрон-нейтринные угловые корреляции в процессе β -распада ^{18}Ne , образованного в реакции

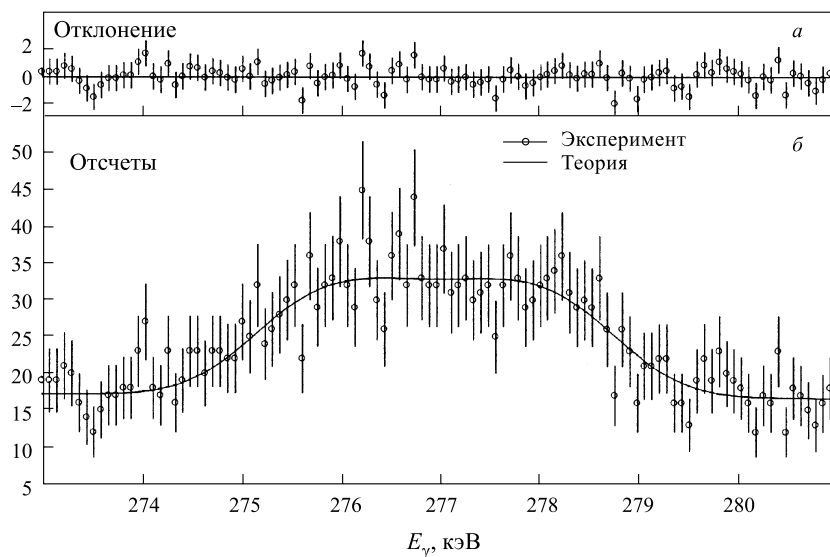


Рис. 21. Форма γ -линии (277 кэВ), возникающей в результате захвата мюона газообразным кислородом $\mu^- + {}^{16}\text{O} \rightarrow \nu + {}^{16}\text{N}^{**} \rightarrow {}^{16}\text{N}^* + \gamma$, и ее фитирование

метода β - p -совпадений позволяет измерить не только доплеровское уширение сигнала от протона, который сопровождает β -распад, но и сдвиг этого сигнала. В 2000 г. в GANIL (Кан, Франция) был успешно проведен пробный сеанс измерений. Качество пучка ядер ${}^{32}\text{Ag}$, условия проведения эксперимента и характеристики прототипа детектора оказались вполне удовлетворительными. В настоящее время установка находится в стадии создания, основные измерения будут проведены в 2001–2002 гг.

Прецизионное измерение уширения γ -линии (277 кэВ) в результате захвата мюона газообразным кислородом $\mu^- + {}^{16}\text{O} \rightarrow \nu + {}^{16}\text{N}^{**} \rightarrow {}^{16}\text{N}^* + \gamma$ выполнено сотрудниками ЛЯП на пучке $\mu E4$ PSI (проект AC/ μ C). Доплеровское уширение данной линии излучения чувствительно к возможному вкладу скалярного взаимодействия в процесс ядерного захвата мюона. Хотя в стандартной модели слабое взаимодействие имеет вид $V-A$, тем не менее современные расширения этой модели (такие как суперсимметрия с нарушенной R -четностью, лептокварки и т. д.) допускают вклад фундаментального скалярного взаимодействия. В таком случае константа связи этого взаимодействия C_S вместе с так называемой индуцированной скалярной константой g_S (вклад которой мал) может быть определена из различных наблюдаемых при захвате мюона. Из формы γ -линии найден (рис. 21) коэффициент γ -нейтринной кор-

реляции $a_2^1 = 0,096 \pm 0,041$ (95 % у.д.), откуда получена оценка константы связи $-0,25 < C_S < -0,07$ слабого скалярного взаимодействия, запрещенного в стандартной $V-A$ -модели. Имеющаяся неопределенность в получении этой константы обусловлена недостаточной точностью знания ядерных матричных элементов [78].

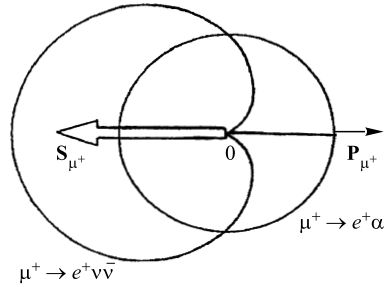


Рис. 22. Угловое распределение позитронов относительно направления спина мюона для распадов $\mu^+ \rightarrow e^+ \bar{\nu} \nu$ и $\mu^+ \rightarrow e^+ \alpha$, где α обозначает скалярный голдстоуновский бозон — фамилон. Изотропный характер углового распределения в распаде $\mu^+ \rightarrow e^+ \alpha$ позволяет выделять данный процесс из фонового $\mu^+ \rightarrow e^+ \bar{\nu} \nu$

$\pi^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$ на установке РИВЕТА (от ЛЯП рук. С. М. Коренченко), которое позволит с рекордной точностью проверить справедливость гипотезы универсальности заряженного кварк-лептонного тока, а также оценить степень унитарности матрицы смешивания Кабиббо–Кобаяши–Маскава (с возможным проявлением новой физики за пределами стандартной модели). Целью эксперимента является увеличение точности измерения вероятности β -распада пиона с 4 до 0,5 % (на первом этапе). В 2000 г. получен набор статистики для прецизионного измерения вероятности β -распада пиона. Данная статистика соответствует возможной точности определения этой вероятности на уровне $\sim 0,7\%$ [80]. Помимо исследования β -распада $\pi^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$ начаты работы по прецизионному исследованию радиационного распада пиона ($\pi \rightarrow e \nu \gamma$), в котором имеется возможность [81] с высокой точностью провести поиск тензорного слабого взаимодействия, запрещенного в стандартной модели. Набор данных для исследования процесса $\pi \rightarrow e \nu \gamma$ идет одновременно с набором данных по β -распаду пиона.

Для исследования вероятности двух-частичного (безнейтринного) распада мюона на электрон и безмассовый голдстоуновский бозон (фамилон) коллаборация ОИЯИ–ПИЯФ (рук. В. А. Гордеев (ПИЯФ) и В. Н. Дугинов) создает установку FAMILON [79]. Данный распад ($\mu \rightarrow \alpha e$, рис. 22) может идти только с нарушением закона сохранения лептонного числа, он также запрещен в стандартной модели. Проведенное моделирование показало, что установка, расположенная на пучке поверхностных мюонов фазотрона ОИЯИ, может обеспечить энергетическое разрешение для позитронов от распада мюонов на уровне 10^{-3} , что позволяет улучшить предыдущий результат (полученный в TRIUMF) в три раза.

Большие надежды в лаборатории возлагаются на повторное в истории ЛЯП измерение вероятности β -распада пиона

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
В ОБЛАСТИ НЕЙТРИННОЙ ФИЗИКИ**

Теоретическим исследованиям свойств нейтрино и взаимодействия нейтрино с ядрами уделялось в ЛЯП большое внимание (Б. З. Копелиович, А. В. Тарасов, Г. И. Лыкасов, Ю. П. Иванов и др.) [82]. В настоящее время, помимо исследования адронных процессов в рамках КХД и т. п., в лаборатории ведутся всесторонние исследования возможных проявлений новой физики как в ускорительных, так и в неускорительных прецизионных экспериментах, например таких, как двойной безнейтринный β -распад ядер или поиск галактических частиц темной (скрытой) материи (С. Г. Коваленко, В. А. Бедняков и др.). Эти исследования в области слабых взаимодействий и неускорительной новой физики, выполненные за последние несколько лет, являются фундаментом для экспериментальных работ ЛЯП в этом направлении, в частности, на самом современном уровне с учетом последних достижений теории в области суперсимметрии, лептокварков и т. п. обоснована необходимость и важность исследования процессов безнейтринного двойного β -распада [75, 83].

Среди неускорительных экспериментов безнейтринный двойной β -распад ядер ($0\nu\beta\beta$) уже давно признан наиболее чувствительным зондом новой физики. Наблюдение безнейтринного двойного β -распада ${}^Z_A Y \rightarrow {}^{Z+2}_A Y + 2e^-$ ядра ${}^Z_A Y$ было бы однозначным сигналом новой физики, поскольку этот процесс сопровождается нарушением лептонного числа на две единицы и, следовательно, запрещен в стандартной модели. В основе традиционно рассматриваемого механизма $0\nu\beta\beta$ -распада лежит обмен массивным майорановским нейтрино между распадающимися нейтронами (рис. 23). Физической

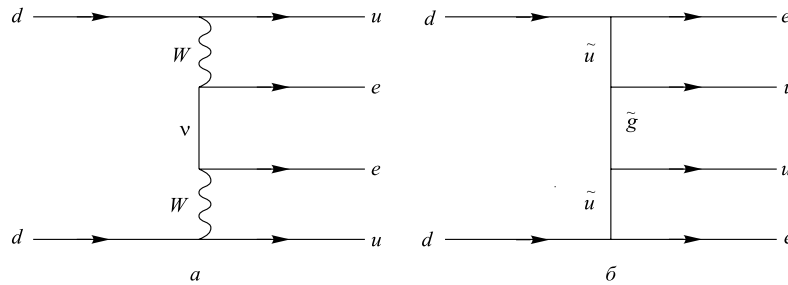


Рис. 23. Традиционный механизм безнейтринного двойного β -распада — обмен майорановским массивным нейтрино ν и двумя заряженными W -бозонами (а) и доминирующий вклад суперсимметричного механизма $0\nu\beta\beta$ -распада (б) — обмен глюино и двумя скварками (SUSY-партнерами глюона и u -кварков соответственно). Константа связи в вершине $d\text{-}\tilde{u}\text{-}e$ пропорциональна λ'_{111} — параметру нарушения R -четности первого поколения

величиной, на которую даются экспериментальные ограничения из условия ненаблюдения этого распада, является эффективная масса нейтрино $\langle m_\nu \rangle$. Недавно было понято (С. Г. Коваленко), что отмеченный выше механизм нейтринного обмена не является единственно возможным. Современная физика частиц может предложить другие механизмы, например, обусловленные взаимодействиями суперсимметричного происхождения с нарушением так называемой R -четности [75]. Сохранение R -четности означает, что суперсимметричные частицы образуются и исчезают во взаимодействиях с обычными частицами *только парами*. SUSY-взаимодействия вносят свой вклад во множество процессов, в том числе и в $0\nu\beta\beta$ -распад. Было показано [83], что эксперименты по $0\nu\beta\beta$ -распадам значительно более чувствительны к определенным проявлениям SUSY, чем другие, уже идущие или только планируемые ускорительные и неускорительные эксперименты.

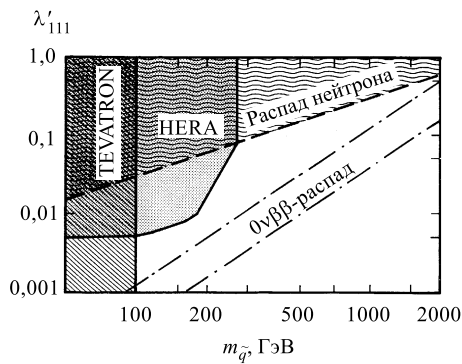


Рис. 24. Ограничения на нарушающие R -четность суперсимметричные теории, полученные из различных экспериментальных данных. Области параметров, которые уже исключены экспериментальными данными, расположены левее и выше соответствующих кривых. λ'_{111} — нарушающая R -четность константа связи; $m_{\bar{q}}$ — масса скалярного кварка. Видно, что безнейтринный двойной β -распад дает наиболее жесткие ограничения на параметрическое пространство

дом физики за пределами стандартной модели слабых и электромагнитных взаимодействий.

В процессе всестороннего теоретического изучения возможных механизмов $0\nu\beta\beta$ -распада предложен новый суперсимметричный механизм, основан-

К сожалению, сам $0\nu\beta\beta$ -распад до сих пор не наблюдался. Однако из этого факта удается получить очень жесткие ограничения на параметры новой физики. Так, в свое время достаточно неожиданным был результат, полученный в работах [83], где был найден новый механизм безнейтринного двойного β -распада, реализующийся в суперсимметричных теориях. Оказалось, что ограничения на юкавскую константу нарушения R -четности в первом поколении фермионов λ'_{111} из ядерного процесса ($0\nu\beta\beta$ -распада) значительно жестче тех ограничений, которые можно получить из ускорительных экспериментов, как ныне действующих, так и ожидающихся, по крайней мере, в ближайшие десять лет (рис. 24). Дальнейшие исследования в этом направлении подтвердили точку зрения о том, что $0\nu\beta\beta$ -распад является уникальным зон-

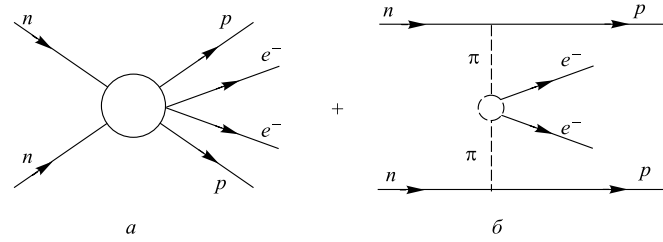


Рис. 25. Обычный двухнуклонный (а) и новый π -обменный (б) вклады в безнейтринный двойной β -распад

ный на обмене виртуальными пионами между распадающимися нейтронами (С.Г. Коваленко) [85]. Эти пионы переходят в электроны конечного состояния посредством нарушающего R -четность SUSY-взаимодействия. Такого сорта пионообменный механизм (рис. 25, б) полностью доминирует над обычным двухнуклонным механизмом (рис. 25, а) безнейтринного двойного β -распада. Последний, как известно, соответствует прямому взаимодействию между кварками из двух распадающихся нейтронов без каких-либо легких адронных промежуточных состояний типа π -мезонов.

Вопрос о том, существуют ли массы у нейтрино и каково их смешивание друг с другом, является, наверное, одним из самых интригующих в современной физике элементарных частиц. В настоящее время имеются весьма убедительные экспериментальные свидетельства в пользу нетривиальной структуры массовой матрицы трех поколений нейтрино. Это следует, в частности, из дефицита солнечных и атмосферных нейтрино. Значительное экспериментальное продвижение в исследовании аномалии атмосферных нейтрино было недавно достигнуто коллаборацией «SuperKamioKande» путем измерения угловой зависимости потока атмосферных нейтрино [86].

С теоретической точки зрения проблема массы нейтрино привлекала к себе очень много внимания за все время существования современной физики элементарных частиц. Она стимулировала создание ряда интересных подходов, значимость которых лежит далеко за пределами только физики нейтрино. Популярная в настоящее время суперсимметричная модель с нарушенной R -четностью может служить новым средством исследования проблемы нейтринных масс. В рамках этого подхода нейтрино могут приобретать обусловленные суперсимметрией массы на древесном уровне за счет смешивания с гейджино и хиггсино на электрослабом масштабе, что становится возможным по причине билинейных, нарушающих R -четность операторов в суперпотенциале и секторе мягкого нарушения SUSY. Следует подчеркнуть, что этот механизм не затрагивает физики больших энергетических масштабов $M_{\text{int}} \sim \mathcal{O}(10^{12} \text{ ГэВ})$, как это имело место в известном «see-saw»-механизме,

а наоборот, определяется свойствами нейтрино на электрослабом масштабе, физические проявления которого поддаются экспериментальной проверке. Оказывается, что данные «SuperKamioKande» накладывают значительно более жесткие ограничения на параметры (билинейные) нарушения R -четности первого поколения, чем существующие в настоящее время данные экспериментов по поиску $0\nu\beta\beta$ -распада. До появления данных «SuperKamioKande» эти $0\nu\beta\beta$ -эксперименты давали лучшие ограничения такого типа [87]. На основе наилучших экспериментальных ограничений на полупериод распада $0\nu\beta\beta$ для ${}^{76}\text{Ge}$ [84] $T_{1/2}^{0\nu\beta\beta}(0^+ \rightarrow 0^+) \geq 1,1 \cdot 10^{25}$ лет (90 % у.д.) можно получить $\langle m_\nu \rangle \leq 0,50$ эВ. Из данных экспериментов «SuperKamioKande» получается значительно более жесткое ограничение [88]:

$$\langle m_\nu \rangle \leq 0,80 \cdot 10^{-2} \text{ эВ.}$$

Таким образом, можно заключить, что в настоящее время эксперименты по поиску нейтринных осцилляций оказываются более чувствительными к параметрам билинейного нарушения R -четности, чем эксперименты по распаду $0\nu\beta\beta$ (В. А. Бедняков, С. Г. Коваленко). Для того чтобы конкурировать по части чувствительности к этому параметру с современными осцилляционными экспериментами, $0\nu\beta\beta$ -эксперименты должны достичь нижнего предела на время полураспада $T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 10^{29}$ лет. Это представляется нереалистичным для уже идущих экспериментов и, вероятно, может быть достигнуто лишь в эксперименте с крупномасштабным азотогерманиевым детектором GENIUS [89].

В рамках суперсимметричных моделей (сохраняющих R -четность) естественным образом возникает наиболее реалистичский кандидат на роль частицы так называемой холодной темной материи во Вселенной*. Это легчайшая из суперсимметричных частиц (LSP) — нейтралино. Поскольку R -четность сохраняется, LSP — стабильная частица. В SUSY-моделях эта частица обладает массой $10 \div 300$ ГэВ, она нейтральная, слабо взаимодействующая (WIMP-частица), и реликтовая плотность LSP замечательным образом удовлетворяет современным астрофизическим данным. В результате удается вплотную подойти к решению старой проблемы темной материи, связанной с возрастом Вселенной, и генезисов крупномасштабных структур в ней.

Перспективы прямого детектирования LSP за счет упругого и неупругого рассеяния LSP на ядрах в настоящее время всесторонне изучаются как теоретически, так и экспериментально. Настоящий прорыв в этой области ожидается с вводом в строй сверхчувствительных детекторов нового поколения типа GENIUS (рис. 26).

*По разным оценкам холодная темная материя дает в плотность Вселенной вклад на уровне $20 \div 70$ %.

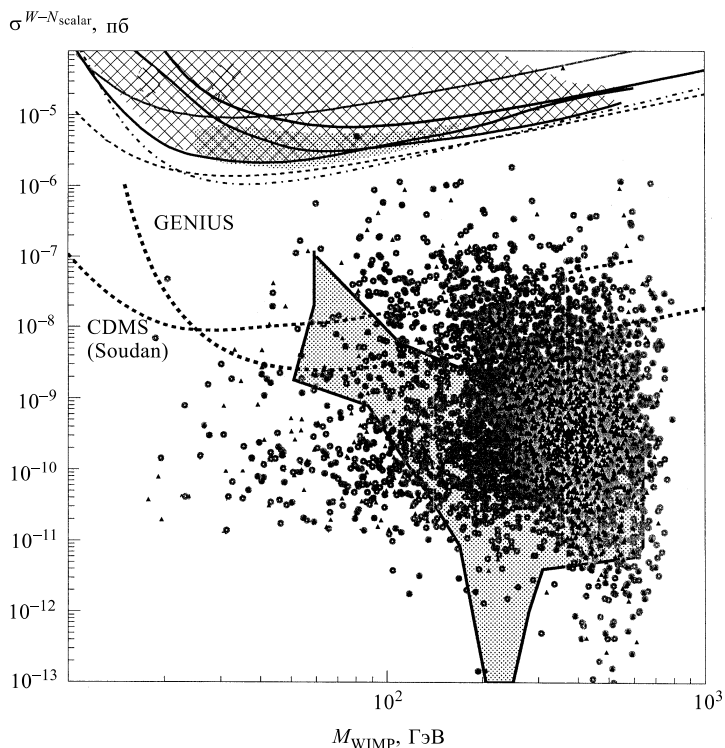


Рис. 26. Сечение скалярного взаимодействия слабозаимодействующих массивных частиц (WIMP) с нуклонами как функция массы WIMP-частиц. Показаны достигнутые экспериментальные пределы (сплошные кривые) и наиболее жесткие ожидаемые ограничения планируемых экспериментов нового поколения (штриховые кривые). Замкнутый контур (из [91]) и распределенные точки (В. А. Бедняков), как светлые, так и темные [90], — теоретические ожидания для данного сечения, найденные на основе анализа параметрического пространства SUSY-моделей с учетом имеющихся ускорительных, неускорительных и астрофизических ограничений. Видно, что только в экспериментах GENIUS и CDMS возможно исследование теоретически предпочтительной области значений параметров. Чувствительности современных и большинства планируемых детекторов явно недостаточно

ВКЛАД СОТРУДНИКОВ ЛЯП В РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА И МЕТОДОВ РЕГИСТРАЦИИ ЧАСТИЦ

Сотрудниками ЛЯП внесен большой вклад в развитие методики физического эксперимента и методов регистрации частиц. Исследования молодых сотрудников в этой области успешно развивались с первых лет создания ла-

боратории благодаря стимулирующему влиянию и прямой поддержке научного руководства — М. С. Козодаева, Б. М. Понтекорво, М. Г. Мещерякова и В. П. Желепова.

Руководители исследований М. С. Козодаев и Б. М. Понтекорво имели определенные достижения в области развития методики эксперимента. Так, например, после того как известный итальянский исследователь космических частиц Б. Росси догадался включить гейгеровские счетчики в схему совпадений и создать на этой основе первый телескоп для исследования космических лучей, М. С. Козодаев осуществил схему антисовпадений, включив в нее «ковер» счетчиков, расположенных после поглотителя, для эффективной регистрации актов остановки частиц.

Б. М. Понтекорво начиная с 1947 г. выполнил ряд оригинальных исследований пропорционального режима разряда в счетчике, позволивших использовать его для измерения выделившейся полной энергии в газе счетчика при остановке частицы.

Под влиянием старших руководителей в ЛЯП создавалась благоприятная обстановка для молодых экспериментаторов не только в освоении уже известных сложных методов, но и для проявления своих творческих способностей в прокладывании новых путей в методике регистрации частиц. Под руководством М. С. Козодаева в ЛЯП была создана первая многоканальная электронная установка. Это была 12-канальная физическая установка для регистрации электронно-позитронных пар от γ -квантов, образующихся от распада π^0 -мезонов. Она регистрировала пары в 36 энергетических комбинациях и суммировала их по 12 различным энергетическим интервалам. В установке использовались разработанные Ю. Д. Баюковым и А. А. Тяпкиным оригинальные счетчики с большим газовым усилением, наполненные парами метилала при давлении 180 мм рт. ст. Они использовались в особом режиме, условно названном режимом ограниченной пропорциональности, когда возникало большое различие в амплитудах получаемого сигнала в зависимости от близости трека проходящей частицы к радиальному направлению электрического поля в счетчике. В таких счетчиках разряд не распространяется вдоль анодной нити и потому в них не возникает мертвое время, при диаметре в 1 см они имели запаздывания начала развития разряда меньше 0,1 мкс и могли работать при больших нагрузках. Для эффективной регистрации частиц с минимальной ионизацией требовалось электронное усиление сигнала всего в тысячу раз, что обеспечивалось двухкаскадным усилителем. Эти счетчики были описаны в работах [92]. Такие же счетчики использовались затем В. Б. Флягиным и К. О. Оганесяном в многоканальном спектрометре для заряженных π -мезонов (см. ЖЭТФ. 1958. Т. 32. С. 667).

Известно, что первый директор ЛЯП М. Г. Мещеряков, узнав из научной литературы о намечившемся нашем отставании в методах использования черенковского излучения, непосредственно поручил молодому тогда сотруд-

нику В. П. Зрелову изучить это, открытое в России, явление и заняться внедрением в практику полученных сведений о средней скорости пучка ускоренных протонов. Молодой специалист сумел не только развить основанный на этом явлении прецизионный метод измерения средней скорости пучков частиц и разработать систему пороговых счетчиков, использованных сотрудниками ЛЯП в важнейших экспериментах на 70 ГэВ ускорителе ИФВЭ (Протвино), но и заняться экспериментальными исследованиями новых свойств самого черенковского излучения в анизотропных средах, которые подтвердили теоретические предсказания В. Л. Гинзбурга для одноосных кристаллов и Ч. Музикаржа для двухосных кристаллов, а также позволили автору в распределении интенсивности излучения впервые обнаружить двухконусное излучение в анизотропных средах и так называемое игольчатое излучение. Многие полученные В. П. Зреловым результаты исследований вошли в его монографию [93].

Детектор γ -квантов от распада π^0 -мезонов на основе регистрации черенковского света был создан А. А. Тяпкиным в 1953 г. и применен в 1954 г. для измерения сечений образования нейтральных пионов протонами с энергией 670 МэВ на ядрах различных элементов [94]. Судя по дате публикации, это был первый в нашей стране электронный детектор черенковского излучения, на котором были выполнены физические исследования.

Разработка метода регистрации треков частиц с помощью пузырьковой пропановой камеры была начата сотрудниками ЛЯП М. П. Баландиным и В. А. Моисеенко, которые сначала убедились, что в пробном объеме пропана в камере объемом 0,5 л происходит вскипание этой жидкости на треках заряженных частиц [95]. Затем они создали рабочую пропановую камеру длиной 30 см, на которой были успешно проведены физические исследования.

В 1955 г. А. А. Тяпкиным было оформлено авторское свидетельство [97] на предложение использовать импульсное управляемое питание счетчиков Гейгера, которое позволяло эффективно использовать эти счетчики в условиях интенсивного излучения на современных ускорителях за счет устранения просчетов, связанных с мертвым временем счетчиков. После регистрации этого предложения и получения соответствующего разрешения оно было опубликовано [96]. Проведенные В. В. Вишняковым испытания различных счетчиков, изготовленных московским заводом, в новом импульсном режиме питания превзошли все ожидания: счетчики отлично работали при амплитуде импульса до 2 кВ и давали импульс регистрации от проходящей частицы $\sim 1,5$ кВ, что означало возникновение искрового пробоя [98].

Новый принцип управляемого высоковольтного питания простейших в физике газоразрядных детекторов открывал большие перспективы исследования редких процессов на ускорителе. Он позволял сочетать широкоапертурный метод быстродействующих сцинтилляционных счетчиков с детальным исследованием редкого процесса с помощью годоскопических систем из не-

скольких сотен гейгеровских счетчиков. На созданной по этому принципу установке И. М. Василевский и В. В. Вишняков провели на синхроциклотроне ЛЯП исследования редчайшего процесса, связанного с измерением поляризации протонов отдачи в упругом пион-протонном рассеянии при 300 МэВ. Столь же сложный эксперимент, связанный также с регистрацией редких событий тройного ядерного взаимодействия, был проведен по измерению коэффициента спиновой корреляции в упругом протон-протонном рассеянии. Причем этот эксперимент дополнительно осложнялся тем, что проводился при энергии протонов 315 МэВ, которая соответствовала энергии выведенного пучка протонов в Беркли, где для однозначного отбора решений фазового анализа потребовалось знание указанного выше коэффициента.

В 1961 г. в связи с высказанной теоретической гипотезой о том, что мюонное нейтрино должно иметь сечение взаимодействия с ядрами во столько же раз большее, во сколько масса мюона превышает массу электрона, Б. М. Понтекорво решил провести проверочный эксперимент в Дубне на синхрофазотроне ЛВЭ, где интенсивности пучка хватало для обнаружения такого аномально большого взаимодействия при условии достаточно массивного детектора и надежной защиты от остальных частиц (прежде всего от мюонов и нейтронов), генерируемых на внутренней мишени ускорителя. Этот многообещающий эксперимент возглавил директор ЛВЭ академик В. И. Векслер. Он распорядился собрать весь металл от неиспользованных магнитов и построить из него домик для размещения в нем аппаратуры нейтринного детектора, а также выложить бетонную защиту от ускорителя до этого домика. В качестве детектора была выбрана имевшаяся в отделе А. А. Тяпкина годоскопическая система из больших счетчиков Гейгера длиной 1 м и диаметром 3 см. Между коврами счетчиков размещались металлические фильтры.

Система годоскопических счетчиков включалась в момент сброса внутреннего пучка на мишень и отдельно для измерения фона в середине промежутка времени между моментами сброса пучка на мишень. Превышение счета во время облучения мишени ускорителя над измеряемым фоном означало бы, что генерируемые протонным пучком мюонные нейтрино действительно взаимодействуют с ядрами в детекторе с аномально большим сечением, если только обычные частицы от ускорителя не нашли путей для проникновения внутрь защищенного домика. Первая экспозиция показала, что счет детектора в момент сброса пучка на мишень в два раза превышал регистрируемый фон. Этот результат вызвал, естественно, большое волнение в авторском коллективе. Стали вновь смотреть, надежно ли уложена бетонная защита перед металлическим домиком. Убедились, что в бетонной защите не было никаких щелей для прямого проникновения частиц от ускорителя. Тогда во главе с Б. М. Понтекорво стали обсуждать окольные пути для проникновения обычных частиц. В результате нашли только один возможный путь для такого проникновения: это отражение частиц от металлических конструкций верх-

него перекрытия экспериментального павильона. Положить дополнительную защиту сверху домика не представлялось возможным из-за мостового крана, который едва проходил над верхними металлическими плитами защитного домика. Тогда решено было перекрыть путь частицам от мишени к верхнему перекрытию павильона, уложив бетонную балку над мишенью непосредственно на квадранты самого ускорителя. Это было сделано по распоряжению директора ЛВЭ вопреки возражению главного инженера. После этого включили ускоритель и убедились в отсутствии эффекта. Природа не избрала этот, казалось бы, естественный путь осуществления нетождественности двух нейтрино. Об этом первом проведенном на ускорителе нейтринном эксперименте было сообщено в статье [99].

В 1964 г. на синхроциклотроне ЛЯП с целью проверки гипотезы о существовании второго изоскалярного нейтрального мезона группами физиков под руководством Ю. Д. Прокошкина и А. А. Тяпкина был предпринят специальный эксперимент, в котором исследовалась угловая корреляция γ -квантов от распада нейтральных мезонов, образующихся при захвате отрицательных пионов протонами. В этом эксперименте было проведено точнейшее измерение разности масс заряженного и нейтрального пионов, которая в течение 20 лет оставалась непревзойденной по точности.

Но уже начиная с 1960 г. на смену импульсным годоскопам пришла более совершенная методика так называемых искровых камер. И для специалистов приход этой методики не был неожиданным. Эта методика была предсказана еще в 1956 г., и несколько групп уже упорно трудились над ее осуществлением.

Успешные результаты испытаний цилиндрических счетчиков, в которых при прохождении через них заряженных частиц в импульсном режиме питания происходил электрический пробой, приводили к естественному выводу о необходимости применить импульсное питание и для плоских счетчиков и, регистрируя в них искры, создать искровую камеру. Полученные результаты проведенных испытаний были описаны в статье [98]. Но редактор журнала не пропустил имеющийся в рукописи статьи призыв к созданию искровой камеры, ссылаясь на то, что этот вариант не был опробован в данной статье. Еще в 1956 г. в Тбилиси на республиканской конференции по космическим лучам А. А. Тяпкин сделал доклад на ту же тему, и в этом докладе содержался тот же призыв к созданию искровой камеры. Об этом факте сохранилось упоминание в книге [100, с. 188]. И все же этот призыв имел определенные последствия. В Советском Союзе возникло пять групп, пытавшихся осуществить эту идею. И когда из Японии пришло сообщение о том, что Фукуи и Миamoto создали первую искровую камеру, названную ими разрядной камерой, то достаточно было по примеру японских коллег укоротить почти на порядок длительность высоковольтного импульса, чтобы получить на уже существующих в лабораториях камерах стабильные искровые следы от про-

ходящих частиц. В августе 1960 г. на международной конференции в Беркли наши ученые (М. С. Козодаев и А. А. Тяпкин) сделали два сообщения о первых результатах проведенных испытаний искровых камер в Дубне, Москве и Ереване [101].

В Дубне под руководством А. А. Тяпкина и в Москве под руководством Б. А. Долгошеина успешно велись работы по развитию так называемого следящего режима работы искровой камеры, когда в определенной области углов трека частицы искра возникала не по направлению электрического поля, а по самому наклонному к полю треку частицы. Эта особенность разряда в пределах угла наклона до 15° наблюдалась на фотографиях, приведенных в первой же работе японских авторов. Для практического использования этого явления, например, в поляризационных измерениях, важно было бы довести область следящего разряда до углов $\sim 30^\circ$. Проведенные же исследования показали, что за счет обострения переднего фронта высоковольтного импульса в камерах с межэлектродным промежутком 2 см область следящего разряда наблюдалась до угла 45° [102]. Этот следящий режим работы использовался в ЛЯП в 9-электродной камере для поляризационных измерений. Фотография этой камеры приводилась в той же работе [102] и на конференции в CERN [106]. Камерами в том же следящем режиме работы был оснащен 5-метровый магнитный искровой спектрометр (МИС), созданный сотрудниками ЛЯП для исследования процессов дифракционной диссоциации пионов при 40 ГэВ на 70 ГэВ ускорителе ИФВЭ. Выполненный на этой установке эксперимент был первым совместным экспериментом ОИЯИ–CERN. Как отмечалось выше, в проведенном на этой установке большом цикле исследований были открыты радиально-возбужденные состояния пиона.

При исследованиях импульсного питания низковольтных галогенных счетчиков были обнаружены некоторые аномалии в их свойствах, выяснение которых привело к установлению механизма разряда в этих счетчиках [107]. При этом была также выяснена важная роль газа неона с малой примесью аргона, относящегося к типу смесей Пеннинга, в которых ионизация идет за счет ударов второго рода: метастабильные атомы основного газа ионизуют атомы примеси при соударении с ними. В техническом неоне всегда присутствует примесь атомов аргона, за счет которой и возникает низковольтный разряд в неоне. В искровых камерах, наполненных таким неоном, память о прошедшей частице осуществляется за счет появления электронов в результате такого процесса, а электроны первичной ионизации, созданные регистрируемой частицей, убираются на анодный электрод еще начальной частью фронта высоковольтного импульса, оставляя после себя метастабильные атомы неона, от которых затем и образуются электроны, вызывающие искровой разряд в камере.

По заказу на заводе были изготовлены специальные счетчики из тонких стеклянных трубок (диаметром 5 мм) с анодной нитью в центре. Эти

счетчики отлично работали в импульсном годоскопе, обеспечивая точность измерения координат $\pm 2,5$ мм, а электрические сигналы на нитях позволяли использовать автоматический съем информации, реализацией которого в ЛЯП предлагал заняться Ю. А. Щербаков. Такая система оказалась подобной предложенной затем в CERN Ф. Криненом так называемой проволочной или нитяной искровой камере с выводом информации на ферритовые кольца, которая, фактически, представляла собой модернизированный вариант прежнего управляемого импульсного годоскопа счетчиков [105].

Первый важный шаг в развитии целого направления был сделан в ЛЯП А. Ф. Писаревым, который впервые исследовал разряд в искровой камере увеличенного разрядного промежутка. Высоковольтный выпрямитель от рентгеновского аппарата из чистого любопытства он использовал для исследования разряда в камере с межэлектродным промежутком в 7 см, который в 3,5 раза превышал исследованные до этого промежутки. Результат проведенных испытаний превзошел все ожидания. Режим следования разряда по треку частицы происходил без серьезных искажений у электродов и прежних высоких требований к времени нарастания высоковольтного импульса, хотя предельный угол для следования разряда возрос всего до 50° . Об этих неожиданных результатах ярко свидетельствовала приведенная в работе фотография разряда в камере. Помимо препринта 1961 г. [103], работа эта была представлена в 1962 г. на конференции в CERN в совместном докладе сотрудников ЛЯП, в котором к исследованию разряда при увеличенном межэлектродном промежутке до 10 см имели отношение только два первых автора: Г. Петер и А. Ф. Писарев, и затем доклад этот был опубликован в журнале [106]. Вскоре после первой публикации А. Ф. Писарева в СССР произошло весьма серьезное увлечение созданием широкоазорных камер и исследованием их дальнейших богатых возможностей. Первыми на яркую фотографию в препринте А. Ф. Писарева обратили внимание сотрудники из группы Б. А. Долгошеина еще в 1961 г., которые для убедительности повторили фотографирование при межэлектродных промежутках до 10 см [104]. В 1963 г. исследованиями разрядов при еще больших промежутках начали заниматься почти все группы, которые с 1959 г. приступили к созданию первых искровых камер. Успешные исследования таких камер, наряду с достигнутым ранее расширением области следящего разряда, легли в основу крупнейшего достижения — создания группами Г. Е. Чиковани в Тбилиси и Б. А. Долгошеина в Москве стримерной камеры.

Следует отметить также разработанный и апробированный сотрудниками ЛЯП О. В. Савченко и Н. В. Комаровым оригинальный путь создания изотропной разрядной камеры. Они с помощью электронно-оптического преобразователя сфотографировали трек частицы по начальной стадии (лавинного) разряда в камере. Полученная авторами фотография приводилась на международной конференции в 1964 г. в обзорном докладе, в котором было отмечено, что такие камеры могут найти важное применение, так как в них можно

достигнуть наибольшей точности измерения всех трех координат трека с одновременным измерением ионизирующей способности частицы.

Большие возможности в освоении новых подходов к применению сцинтилляционной методики появились в ЛЯП после того, как С. Л. Лапидус освоила выпуск в лаборатории качественной сцинтиллирующей пластмассы. Из такой пластмассы в 1959 г. О. В. Савченко стал успешно вытягивать сцинтилляционные нити диаметром 1 мм [108]. Из таких нитей Ю. К. Акимов, О. В. Савченко и Л. М. Сороко создали управляемую люминесцентную камеру объемом 2,5 л и провели ее испытания с различными электронно-оптическими преобразователями.

Особо следует отметить научно-просветительскую деятельность в области методики регистрации частиц, широко развернутую научным сотрудником ЛЯП Ю. К. Акимовым. Он написал и издал первую у нас в стране монографию о сцинтилляционных счетчиках в годы, когда эта методика быстродействующих детекторов становилась основной в исследованиях по физике высоких энергий, проводимых на современных ускорителях [109]. Он участвовал в создании авторского коллектива для написания под его редакцией монографии, посвященной полупроводниковым детекторам [110], и затем совместно с В. А. Никитиным, В. А. Свиридовым и другими была найдена редкая возможность использования методики полупроводниковых детекторов в важнейшем эксперименте по физике высоких энергий. Этой группой экспериментаторов было предложено в опыте по исследованию упругого дифракционного рассеяния протонов на малые углы заменить фотоэмульсионное детектирование протонов отдачи на полупроводниковые счетчики [111]. Это ценное предложение сначала было успешно реализовано на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ [112]. Такой же опыт был проведен в 1968 г. на ускорителе ИФВЭ при энергии протонов 70 ГэВ. А затем дубненская группа из ЛВЭ и ЛЯП была приглашена для выполнения совместного эксперимента на самом крупном ускорителе в FNAL (Батавия, США), где в течение 1973–1975 гг. при различных энергиях протонного пучка, начиная с 400 ГэВ, были исследованы дифракционные рассеяния на малые углы на водородной и дейтериевой мишенях. За весь этот цикл важнейших исследований авторам в 1983 г. была присуждена Государственная премия. Та же методика полупроводниковых счетчиков была успешно использована авторами для наиболее точного измерения электромагнитного радиуса протона при рассеянии электронов, проведенного на ускорителе ЕрФИ [113]. Производство полупроводниковых детекторов в ЛЯП освоил Б. П. Осипенко.

В 1968 г. известный французский ученый Ж. Шарпак на международном симпозиуме в Версале сделал интересное предложение об использовании для детектирования частиц пропорциональных нитяных камер, в отличие от нитяных искровых камер, высоковольтное напряжение постоянно во времени, а высокое временное разрешение обеспечивается пропорцио-

нальным режимом разряда и применением для каждой нити отдельного миниатюрного усилителя с применением последних достижений интегральной электроники. Этот доклад был опубликован в том же году в журнале [114]. Для решения новых задач, стоящих перед физикой высоких энергий, автор, фактически, предложил вернуться на новой технической основе к старой методике пропорциональных счетчиков, широко использовавшейся ранее и в исследованиях космических частиц, и в первых опытах по физике высоких энергий на ускорителях. В объединении отдельных пропорциональных счетчиков в общую камеру тоже ничего принципиально нового не было. Еще в 50-е годы В. А. Любимов и Г. П. Елисеев провели измерения ионизирующей способности космических частиц в созданном ими пятислойном пропорциональном детекторе и разработали 50-слойный пропорциональный детектор, с помощью которого планировали проводить в индивидуальном измерении разделение K - и π -мезонов в космических лучах [95]. Объединение нитяных счетчиков в одной камере известно с 30-х годов, оно реализовано в счетчике Розенблюма, затем широкое использование получили импульсные искровые нитяные камеры.

Возврат к старой методике на новой технической основе заслуженно получил самую высокую оценку: известный американский физик Л. Ледерман назвал его «новой революцией в методике детектирования частиц». «Г. Шарпак и его сотрудники, — писал Л. Ледерман, — применили старую технику пропорциональных счетчиков для решения новых проблем, используя преимущества современной интегральной электроники, что дало возможность поставить вопрос об отдельном усилителе и формирователе импульса для каждой из проволочек в системе» [115].

Такая оценка сделанного шага в развитии методики детектирования частиц весьма справедлива. И преимущество тут не только в использовании миниатюрной электроники, но и в высокой точности достигнутого временного разрешения. Пропорциональный разряд в счетчиках и раньше использовался для регистрации момента и координаты прохождения заряженной частицы. Но достигнутая временная точность в 20 нс открывала совершенно новые возможности перед методикой пропорциональных камер. Они способны эффективно работать с потоком до миллиона частиц на отдельную нить. Между тем пространственная точность, достигнутая в этих камерах, такая же, как и в проволочных искровых камерах в управляемом импульсном режиме питания. Хотя в пропорциональных камерах имеется возможность в 2–3 раза повысить ее за счет добавления фреона-13, захватывающего электроны первичной ионизации, отчего улучшается и временное, и пространственное разрешение, так как захватываются больше всего удаленные от анодной нити электроны первичной ионизации. Правда, при этом падает эффективность каждой отдельной плоскости камеры, но на это идут сознательно при большом числе плоскостей в регистрирующей системе.

Мы подробно рассказали о рождении этой современной методики регистрации частиц, поскольку намерены отметить, что та же идея о возврате к использованию плоских нитяных камер на основе регистрации импульсов пропорционального разряда возникла совершенно независимо в Дубне. Но идея о нитяной пропорциональной камере появилась с некоторой весьма характерной особенностью, продиктованной отсутствием тогда у нас в стране миниатюрных усилителей на основе интегральной электроники, выполненной на одной кристаллической пластинке.

Предложение это сделал сотрудник ЛЯП, известный физик и специалист по быстрой электронике В. Г. Зинов. Первоначально он предложил вариант камеры, в которой все параллельные нити одной плоскости на одном конце подсоединены к различным точкам делителя напряжений так, что каждая пара соседних нитей разделена резистором делителя. Это предложение было оформлено в качестве авторского свидетельства на изобретение с приоритетом от 2 февраля 1968 г. [116]. Эта зафиксированная дата указывала на полную независимость сделанного предложения от доклада Г. Шарпака 10 сентября 1968 г. и от препринта, изданного им с сотрудниками в CERN 23 февраля 1968 г.

Позднее В. Г. Зинов вместе с другими сотрудниками опубликовали эту идею пропорциональной камеры, добавив описание результатов проведенного испытания несколько измененного варианта камеры [117]. Вместо делителя напряжения на резисторах они использовали общую нить со сравнительно большим удельным сопротивлением, натянутую на крепежной рамке из оргстекла последовательными параллельными участками. На концах этой общей нити с помощью усилителей регистрировались сигналы с амплитудами A и B . Измерение отношения амплитуды A к амплитуде суммарного сигнала $A + B$ позволяло определить участок нити, на котором произошел разряд в камере. Для определения второй координаты прошедшей через камеру заряженной частицы применялась аналогичная система с общей нитью и двумя усилителями на концах ее, но натянутой в направлении, перпендикулярном к нитям первой плоскости.

Тем, кто в 50-х годах использовал метилалевые пропорциональные счетчики с временным разрешением 0,1 мкс для регистрации пространственной координаты частицы с точностью ± 5 мм, оставалось только сожалеть, что они не увидели простой возможности повышения почти на порядок временного разрешения таких детекторов и увлеклись возможностями импульсного питания гейгеровских счетчиков. Действительно, в этом была основная недооценка таившихся возможностей таких детекторов и, как следствие этого, неспособность использовать возникшие позже перспективы применения быстрой и миниатюрной электроники.

Если во многих зарубежных ускорительных центрах экспериментаторы уже в 1969 г. приступили к созданию пропорциональных камер малого раз-

мера, то в ЛЯП в то же время начали с реализации весьма характерного упрощенного варианта такой камеры, который был пригоден только при низкой интенсивности излучения. Группа авторов, возглавляемая В. Г. Зиновым, прежде всего согласилась с основной идеей Г. Шарпака о необходимости возврата к прежде широко использовавшемуся пропорциональному режиму разряда, но сразу же приступила к реализации этого, казавшегося им «более рациональным», варианта осуществления такой камеры с общей анодной нитью с большим сопротивлением, которая заполняла всю плоскость камеры, проходя параллельными рядами через каждые 7 мм. Таким образом, был предложен весьма экономный вариант по числу используемых усилителей: вместо сотни усилителей в камере Шарпака тут требовалось всего два усилителя для отдельной плоскости, но при этом, правда, терялось преимущество работы при высокой интенсивности, которая была допустима для камер с индивидуальными усилителями для каждой нити. Действительно, этот оригинальный упрощенный вариант пропорциональной камеры был предложен с учетом ограниченных возможностей, имевшихся тогда в ЛЯП, но сама идея В. Г. Зинова о необходимости возврата к далеко еще не использованным богатым возможностям методики пропорционального разряда была, безусловно, прогрессивной и соответствовала сложным задачам, стоящим перед экспериментальной физикой высоких энергий.

Развитие криогенной техники в ЛЯП началось с первых попыток создания мишеней из сжиженного водорода и дейтерия, а закончилось выдающимися достижениями рекордных температур в 0,001 К за счет освоенного Б. С. Негановым глубокого охлаждения методом растворения гелия-3 в гелии-4. Как напоминает Л. М. Сороко: «Первая жидководородная мишень была изготовлена в Лаборатории ядерных проблем в 1956 г. под руководством В. М. Сидорова» [118, с. 3]*. Это была мишень, пригодная только для измерения полного сечения. Затем О. В. Савченко и Л. М. Сороко использовали стандартный дьюар со стеклянными стенками, который заполнялся на водородной станции, созданной при экспериментальных мастерских ЛЯП и руководимой В. Н. Дмитриевской. Позднее мишень для жидкого водорода была создана С. М. Коренченко. Она была сделана в форме легкого контейнера из пенополистирола с азотной рубашкой. Затем в 1958 г., после того как к этой важной для лаборатории задаче подключили опытного конструктора А. В. Богомолова и умелого мастера И. А. Штырина, в экспериментальных мастерских ЛЯП под руководством К. А. Байчера удалось создать универсальную

*Выбранное яркое название данного сообщения ОИЯИ, казалось бы, обязывает автора подкрепить свои воспоминания ссылками на публикации, однако в данном труде нет ни одной литературной ссылки и вообще отсутствует соответствующий раздел под названием «литература». В результате интересные личные воспоминания автора переплетаются с рядом явных пробелов и просто не соответствующих действительности исторических утверждений.

мишень, пригодную и для жидкого водорода, и для жидкого дейтерия. Ее более 10 лет широко использовали в важнейших экспериментах, проводившихся на синхротронном ЛЯП. С созданием этой мишени в лаборатории закончился кустарный, дилетантский подход физиков к созданию жидководородных мишеней. А насколько опасен жидкий испаряющийся водород даже в малом количестве, это все поняли только после того, как у научного сотрудника ЛВЭ Э. Н. Цыганова в первом корпусе ЛЯП случайно произошел небольшой взрыв гремучей смеси из испаряющегося водорода от кустарно изготовленной жидководородной мишени.

Важнейшим научно-техническим достижением ЛЯП стало создание под руководством Г. И. Селиванова первой в ОИЯИ пузырьковой жидководородной камеры. Это был следующий крупный шаг в развитии криогенной техники ЛЯП, потребовавший разработки сложного расширяющего устройства для жидкого водорода [119]. В связи с необходимостью постановки полного опыта по рассеянию нуклонов в ЛЯП возникла настоятельная потребность в мишени из поляризованных протонов. За труднейшую задачу создания такой мишени с энтузиазмом взялся известный своим мастерством физик-экспериментатор Б. С. Неганов. Прежде всего он решил заняться реализацией ранее предложенного нового метода глубокого охлаждения за счет растворения гелия-3 в обычном жидком гелии-4. Первые же опыты указали на большие возможности нового метода для глубокого охлаждения значительных по массе образцов мишеней (1957 г.). Разработки криостатов растворения успешно проводились в ЛЯП возглавляемым Б. С. Негановым коллективом сотрудников в составе Н. С. Борисова, М. Ю. Либурга, Ю. Ф. Киселева, В. Н. Матафонова и Э. И. Бунятовой [120] и завершились крупнейшим научно-техническим достижением рекордных сверхнизких температур. На базе разработанного метода охлаждения Б. С. Негановым были впервые созданы мишени нового типа, в которых замороженные ядра протонов сохраняли длительное время высокую поляризацию, близкую к 100 %, выдерживая значительную тепловую нагрузку ~ 100 мВт. [121]. За эти работы в области низких температур Б. С. Неганову была присуждена премия им. М. В. Ломоносова.

В дальнейшем Б. С. Неганов поднял вопрос о разработке нового типа детекторов — тепловых, основанных на эффекте регистрации усиленных микротепловых сигналов на уровне порядка электронвольта. Этому эффекту в настоящее время присвоено имя его автора. На основе использования такого детектора Б. С. Неганов предложил весьма важный, грандиозный эксперимент для решения фундаментальной проблемы о существовании аномального магнитного момента у электронного антинейтрино на уровне 10 пмВ (μ_B — магнетон Бора) с помощью огромной интенсивности потока антинейтрино, излучаемого от распада ядер атомов газа трития, заключенного для безопасности в стальную сферу.

В течение последнего десятилетия Б. С. Неганов, работая в ЛФЧ, обеспокоен еще одной фундаментальной проблемой экспериментальной физики: он полагает, что использование в специальном эксперименте так называемой спиновой прецессии Томаса позволит обнаружить отклонение от фундаментального принципа относительности специальной теории [122]. Конечно, современные физики из всего предыдущего полного подтверждения опытом этой теории уверены в том, что и предлагаемый эксперимент обязательно даст подтверждение этой фундаментальной теории. Но все же опытную проверку данного вопроса можно считать обоснованной до тех пор, пока не будет показано, что выполненное детальное теоретическое рассмотрение прецессии спина дает одинаковый результат в разных системах отсчета.

Электронные детекторы, о которых шла речь выше, могли быть созданы и внедрены в физические исследования в ЛЯП только при параллельном развитии в лаборатории передовых методов современной электроники. В первые 15 лет существования лаборатории этой необходимой деятельностью занимались радиоинженеры и техники, а также сотрудники, имевшие инженерно-физическое образование и работавшие в научных секторах и группах. Они внесли большой вклад в годы становления физики высоких энергий и, как правило, входили в авторские коллективы при опубликовании первых результатов, полученных на новой установке.

Некоторые из них опубликовали обзорные статьи и подготовили тогда к публикации монографию по ядерной электронике [123]. В секторе М. Г. Мещерякова ядерной электроникой занимались Ю. К. Акимов, А. С. Кузнецов, а также, отчасти, и Б. С. Неганов. В секторе М. С. Козодаева — Н. А. Синаев, М. И. Попов, А. Ф. Дунайцев, В. И. Рыкалин, В. М. Цупко-Ситников и техник Г. П. Зорин. В секторе В. П. Джеллепова — известный экспериментатор Ю. М. Казаринов, С. В. Медведь, Ю. Н. Симонов и М. Н. Омеляненко. В секторе Б. М. Понтекорво — В. Г. Зинов, С. М. Коренченко и И. Ф. Колпаков. Среди этих людей, явно способных к творчеству в области ядерной электроники, есть и люди с университетским образованием — В. Г. Зинов и С. М. Коренченко. Занимались этой работой и физики-экспериментаторы (Ю. М. Казаринов). Но больше всего среди них было выпускников Московского инженерно-физического института. Так, выпускники этого института А. Ф. Дунайцев и В. И. Рыкалин создали уникальный пятилучевой спектрометр на основе осциллографической трубки, который позволил Ю. Д. Прокошкину вместе с сотрудниками открыть в 1962 г. закон сохранения векторного тока.

Рассказывая о внедрении новых образцов детекторов частиц, мы уже касались установок, созданных трудом и талантом этих людей. Когда обсуждалось внедрение новых образцов детекторов частиц, мы всегда упоминали физические установки, созданные трудом не только мастеров и механиков мастерских, но и перечисленных специалистов, развивавших ядерную

электронику в особых условиях импульсного излучения ускорителя. Так, например, к тому, что мы говорили о созданной первой в ОИЯИ многоканальной установке — парном гамма-спектрометре М. С. Козодаева, следует добавить, что усилители к специальным метилалевым счетчикам были разработаны известным специалистом по ядерной электронике А. А. Марковым и его учеником А. Н. Синаевым, а монтаж всей электронной установки проведен Г. П. Зориним. Следует также добавить, что операция сложения всех парных комбинаций каналов, соответствующих одной и той же энергии, была разработана и осуществлена А. Н. Синаевым с помощью оригинальной релейной системы. Следует также отметить, что эта система была первой, использованной в физической установке, фактически, специальной вычислительной машиной, выполняющей операцию суммирования числа событий в различных комбинациях каналов, соответствующих одной энергии гамма-кванта. А к рассказу о первых применениях импульсных годоскопов счетчиков следует добавить, что все эти системы, из нескольких сотен счетчиков каждая, были смонтированы умелыми руками механика отдела Б. М. Антонова.

В начале 1965 г. директор ЛЯП В. П. Джелепов решил произвести крупную реорганизацию — создать общий отдел для централизованного решения задач ядерной электроники. Такой отдел был создан в марте того же года общей численностью 36 сотрудников. В него вошли первоначально три группы: № 1 — Синаева, № 2 — Акимова и № 3 — Попова. Позднее в отдел была переведена и группа Зинова. В 1970 г. группы отдела были преобразованы в сектора. С самого начала в составе сектора № 1 находилась группа С. В. Медведя, которая занималась внедрением в эксперимент вычислительной техники, и затем в 1974 г. она была преобразована в отдельный сектор того же отдела.

Основная цель образованного отдела заключалась в создании новой электронной аппаратуры для физических исследований, проводимых на синхротроне ЛЯП ОИЯИ. В связи с этой основной задачей в отделе производилась разработка электронной аппаратуры широкого профиля, начиная с приема сигналов, поступающих от детекторов разных типов, и кончая обработкой зарегистрированной информации в ЭВМ. Более конкретно эта общая задача включала разработку: 1) системы логической аппаратуры наносекундного диапазона для отбора полезных событий; 2) системы спектрометрической аппаратуры для амплитудного и временного анализа зарегистрированных сигналов; 3) системы аппаратуры для накопления и предварительной обработки получаемой информации с последующей передачей ее на ЭВМ. Перед отделом также стояла общая организационная задача создания лабораторного вычислительного центра.

Отдел с успехом выполнял все эти порученные задачи общелабораторного значения, постоянно оказывая помощь физическим отделам, сфера деятельности которых за прошедшие годы постепенно расширялась для уча-

ствия в совместных экспериментах на многих основных ускорителях мира. О сделанных разработках свидетельствуют многочисленные статьи в журнале ПТЭ, а также авторские свидетельства на изобретения [124]. За разработки электронных блоков на основе международного стандарта КАМАК и за организацию производства аппаратуры для систем автоматизации научных исследований руководителю отдела А. Н. Синаеву была присуждена премия Совета Министров СССР и вручена медаль (постановление Сов. Мин. СССР от 16 апреля 1985 г.; медаль № 04845). В 1986 г. несколько сотрудников отдела представили свою разработку на конкурс и удостоились награды Главного комитета ВДНХ СССР: «За достигнутые успехи» — награждены серебряной медалью А. Н. Синаев и бронзовыми медалями Н. И. Журавлев и В. Т. Сидоров (постановление от 24 июля 1986 г. № 502-Н). За успешную работу начальнику сектора этого отдела С. В. Медведю присвоено звание почетного сотрудника ОИЯИ.

В отделе ядерной спектроскопии и радиохимии ЛЯП под руководством К. Я. Громова по инициативе В. М. Цупко-Ситникова были проведены работы по автоматизации всего комплекса измерений. Созданный комплекс измерительной и накопительной аппаратуры был непосредственно связан с ЭВМ [125], он включал системы для многомерных измерений, автомат для обработки фотопластинок от магнитных спектрографов [126], а также блок программного обеспечения для обработки и анализа спектрометрической информации [127, 128] и экспрессные программы анализа спектров [129]. Опыт проведенной автоматизации спектрометрических измерений широко распространился в аналогичных лабораториях СССР и стран-участниц ОИЯИ.

Прежде чем бегло перечислить основные физические установки, созданные в ЛЯП, мы упомянем о некоторых пропущенных в нашем повествовании оригинальных идеях, реализованных сотрудниками лаборатории.

Так, в конце 50-х годов в секторе В. П. Джеллепова в группе Б. М. Головина была предложена и реализована идея эффективной регистрации рассеяния на малые углы быстрых нейтронов «точечным» детектором, но с кольцевым рассеивателем, расстояние которого от детектора плавно менялось в процессе эксперимента [130].

В эксперименте по захвату мюонов в гелии-3, проведенном Б. М. Понтекорво, использовалась диффузионная камера группы Р. М. Суляева. Гелий-3 содержит примесь трития $\sim 0,1\%$. Для того чтобы диффузионная камера могла надежно работать, примесь трития в промышленном гелии-3 должна быть уменьшена еще на 12 порядков. Чтобы поставить фундаментальный эксперимент [57], потребовалось провести значительную очистку гелия-3 от радиоактивной примеси трития. Такая рекордная очистка была проведена в Институте физических проблем под руководством зам. директора института В. П. Пешкова, который был включен в число авторов этого эксперимента, и проводилась она непосредственно сотрудниками ЛЯП А. И. Филипповым

и О. А. Займидорогой [58]. Зарегистрированное как открытие явление прямого выбивания дейтронов [11] было выполнено на магнитном спектрометре, разработанном М. Г. Мещеряковым, В. П. Зреловым и Б. С. Негановым.

В дальнейшем более крупные физические установки создавались в ЛЯП для проведения исследований при больших энергиях на более крупных ускорителях. Так, первая в ОИЯИ большая пропановая пузырьковая камера была создана в ЛЯП под руководством В. П. Желепова и Ю. А. Будагова. Это была однометровая камера объемом 200 л, которую установили в экспериментальном зале синхрофазотрона ЛВЭ на пучке отрицательных пионов с импульсом 5 ГэВ/с [131].

С вводом в действие самого крупного в СССР ускорителя — протонного синхротрона на энергию 70 ГэВ (ИФВЭ, Протвино) началось участие ЛЯП в проведении исследований в этой новой области энергий. Первым экспериментом на новом ускорителе был эксперимент по поиску монополя Дирака. Установка для поиска этой экзотической частицы создавалась в ЛЯП под руководством В. П. Зрелова группой талантливых инженеров, в которую входили П. Павлович, Р. Яник, Д. Коллар и его супруга Л. Коллар, а также П. Шулук. В самом эксперименте в ИФВЭ деятельное участие принял позднее приехавший Я. Ружичка.

Следующей крупной установкой ЛЯП в ИФВЭ была установка, созданная под руководством В. И. Петрухина, с помощью которой были надежно обнаружены в пучке отрицательных частиц ядра антитрития.

Наиболее крупными установками ЛЯП в ИФВЭ, предназначенными для исследования множественных процессов, были МИС и ГИПЕРОН. Основу первой установки составляет специальный пятиметровый магнит, заказанный ЛЯП ОИЯИ на ленинградском заводе «Электросила» (от ЛЯП этот заказ постоянно курировал И. М. Василевский). Именно он обеспечил соответствие электромагнита техническому заданию. А другому участнику эксперимента — О. А. Займидороге мы обязаны тем, что он сумел развернуть на этом приборе эффективное международное сотрудничество, позволившее прийти к важному физическому результату — обнаружению радиально возбужденных состояний наилегчайших адронных кварковых систем.

О результатах, полученных на установке ГИПЕРОН, уже говорилось выше, здесь мы только добавим, что эта физическая установка в ИФВЭ была создана совместными усилиями группы Ю. А. Будагова из ЛЯП ОИЯИ и группы В. М. Кутына из ИФВЭ.

Установка АЯКС–СИГМА была создана в ИФВЭ также совместными усилиями группы Г. В. Мицельмахера из ЛЯП и группы Ю. М. Антипова из ИФВЭ.

Особо следует отметить крупное международное сотрудничество на электрон-позитронном коллайдере LEP в CERN. Здесь произошла полезная концентрация усилий трех групп из России на одной установке DELPHI. Группа

из Протвино и две группы из Дубны (ЛЯП и ЛВЭ) создали адронный калориметр для установки DELPHI в Женеве. В настоящее время под руководством Н. А. Русаковича ОИЯИ участвует в создании установки ATLAS для строящегося в Женеве нового протон-протонного коллайдера на 14 ТэВ.

При обработке данных в физике элементарных частиц чаще всего встают задачи косвенных измерений, когда по результатам измерений определяются другие величины и параметры, теоретически связанные с измеренными величинами. Современные методы обработки данных используют статистический анализ, в основе которого лежит так называемый метод максимального правдоподобия. Группа математиков и физиков из CERN дала наиболее полное описание этого метода с многими конкретными примерами из физики высоких энергий [132]. Распространению этих знаний у нас значительно содействовало издание перевода этой ценной книги, выполненного научным сотрудником ЛЯП В. С. Курбатовым, под редакцией проф. А. А. Тяпкина [133].

В русское издание этой книги вошли три важных дополнения, сделанные специалистами ОИЯИ. В первом дополнении, написанном Тяпкиным, рассказано о трудностях, которые испытывала классическая теория ошибок в формулировке статистических выводов о явно неслучайной, но неизвестной измеряемой величине. В современной теории, использующей понятие правдоподобия, эта задача получила строгое решение, была объяснена статичность самих выводов об оценке измеряемой величины. Это дополнение интересно также примерами ошибочного применения χ^2 -критерия. Автор объясняет, что этот критерий применим только для решения вопроса о совместимости принятой теоретической гипотезы с полученными решениями в рамках статистической природы их отклонения от принятой теории. Вопрос о достоверности каждого полученного решения должен определяться отношением соответствующих функций правдоподобия. Ошибочность решения этого вопроса на основании χ^2 -критерия широко распространилась в связи с допущенными погрешностями изложения в одних монографиях, как, например, [134], или с полным умалчиванием о широко распространенной ошибке, как в издании данной книги на английском языке [132], а также в связи с многими примерами использования этой ошибки на практике авторитетными учеными.

Во втором дополнении, написанном В. С. Курбатовым и А. А. Тяпкиным, излагается впервые решенная задача о вычитании результатов фоновых измерений, когда ведется анализ методом максимального правдоподобия.

В третьем дополнении сотрудником ЛВТА ОИЯИ И. Н. Силиным излагается весьма эффективный метод поиска максимума функции правдоподобия с помощью процедуры линеаризации. Этот метод был разработан в 1961 г. С. Н. Соколовым и И. Н. Силиным и затем реализован и внедрен в практику И. Н. Силиным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем обзоре мы попытались представить основные достижения Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Джелепова за более чем пятидесятилетний период ее существования. Авторы сознательно ограничили себя изложением лишь тех страниц в истории лаборатории, которые связаны с яркими физическими результатами, новыми экспериментальными приборами и методиками. За рамками нашего повествования осталась история запуска и освоения первого ускорителя Дубны — синхроциклотрона, созданного в послевоенные годы советской промышленностью и послужившего основой многих открытий. Мы оставили в стороне важное направление деятельности лаборатории, связанное с разработкой новых ускорителей (в частности, сильноточных), а также ряд уникальных методов, направленных на применение пучков тяжелых ядерных частиц для терапии злокачественных опухолей. Нельзя не отметить, что Лаборатория ядерных проблем ОИЯИ — и в этом ярко отразилась личность руководившего ею много лет Венедикта Петровича Джелепова — всегда была открыта для новых идей, для выхода за пределы привычных тематик. Примерами тому служат, в частности, мощный прорыв в области физики высоких энергий с запуском серпуховского ускорителя, становление в ОИЯИ радиобиологического направления и т. д. Сегодняшний интеллектуальный и технический потенциал лаборатории позволяет эффективно участвовать в совместных экспериментах на крупнейших ускорителях мира — LEP, TEVATRON, LHC.

Наконец, отметим еще одну особенность Лаборатории ядерных проблем. Присущая ей атмосфера открытого научного поиска, демократичность обсуждений в сочетании с высоким уровнем требований к качеству научных работ, отсутствие каких бы то ни было барьеров для общения молодежи с «корифеями науки» — все это способствовало успешному развитию лаборатории как школы научных кадров, начиная с первых дней работы. Авторы настоящей статьи с благодарностью вспоминают помощь и организационный вклад Венедикта Петровича Джелепова в наши экспериментальные исследования. Мы завершаем этот обзор документом, напоминающим о тех днях, — «явочным листом» участников одного из первых научных семинаров лаборатории, прошедшего 25 мая 1950 г. под председательством И. В. Курчатова в присутствии целой плеяды выдающихся физиков — директоров московских институтов Н. Н. Семенова, А. А. Алиханова; физиков-теоретиков Л. Д. Ландау, Я. Б. Зельдовича, И. Я. Померанчука, Е. М. Лифшица, А. Б. Мигдала; Г. Н. Флерова, И. И. Гуревича, а также научной молодежи лаборатории тех лет — Л. М. Сороко, Ю. М. Казаринова, Г. И. Селиванова, А. И. Мухина.

СПИСОК №20

ПОСЕТИТЕЛЕЙ НАУЧНОГО СЕМИНАРА АН СС С Р

№ 25 мая 1950г.

№ п/п	Фамилия, имя, отчество	Где работает	Роспись
1.	Курбанов И. В.	МАН	И. Курбанов
2.	И. Салимов	ИХФ	И. Салимов
3.	Зеленый	ИХФ	Зеленый
4.	Мамин С. М.	ИХФ	С. Мамин
5.	Коминин	ИХФ	Коминин
6.	Менделеев И.	ИХФ	И. Менделеев
7.	Смоловский Я. А.	МАН	Я. С.
8.	Ландау Л. Д.	ИХФ	Ландау
9.	Миллер А. Б.	МАН	А. Миллер
10.	Колесников И. Я.		И. Колесников
11.	Киселев Б. Т.	МАН	Б. Киселев
12.	"Фидель" Г. Н.	МАН	Г. Фидель
13.	Карапетян	ГТА	Карапетян
14.	Рупин А. А.	"	А. Рупин
15.	Тимуров	"	Тимуров
16.	Танкун	"	Танкун
17.	Курбан	"	Курбан
18.	Дуван	"	Дуван
19.	Турецов	"	Турецов
20.	Тимофеев	"	Тимофеев
21.	Мельник К.	"	К. Мельник
22.	Каминин	"	Каминин
23.	Вухин К.	МАН	К. Вухин
24.	Курбанов Б.	МАН	Б. Курбанов
25.	Курбанов	"	Курбанов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Джелепов В. П.* Лаборатория ядерных проблем // Объединенному институту ядерных исследований — 40 лет. Хроника. Воспоминания. Размышления. Дубна, 1996. С. 79.
Джелепов В. П., Липидус Л. И. Тридцать лет работы первой ядерной лаборатории Дубны // АЭ. 1978. Т. 44. С. 50.
2. *Батусов Ю. А., Бунятов С. А., Сидоров В. М., Ярба В. А.* Явление двойной перезарядки π -мезонов. Диплом № 77. 1970. Приоритет от ноября 1963 г.
Формула открытия: Экспериментально установлено ранее неизвестное явление двойной перезарядки π -мезонов, выражающееся в том, что при взаимодействии с атомным ядром положительный π -мезон превращается в отрицательный π -мезон или отрицательный π -мезон превращается в положительный без образования дополнительных π -мезонов.
3. *Понтекорво Б. М. (ОИЯИ), Зарецкий Д. Ф., Балац М. Я., Лебедев П. И., Обухов Ю. В., Кондратьев Л. Н. (ИТЭФ), Ландсберг Л. Г. (ИФВЭ).* Безрадиационные переходы в мезоатомах. Диплом № 100. 1971. Приоритет от 17.06.1959.
Формула открытия: Установлено неизвестное ранее свойство мезоатомов передавать без излучения всю энергию перехода мезона ядру, когда она близка к разности энергии ядерных уровней.
4. *Батусов Ю. А., Бунятов С. А., Сидоров В. М., Ярба В. А. (ОИЯИ), Гольданский В. И. (ИХФАН), Зельдович Я. Б. (ИПМАН), Ложкин О. В., Римский-Корсаков А. А. (РИ).* Явление образования и распада сверхтяжелого гелия — гелия-8. Диплом № 119. 1972. Приоритет от 22.10.1959 — в части теоретического обоснования, от 30.10.1965 — в части экспериментального доказательства.
Формула открытия: Установлено ранее неизвестное явление образования и β -распада нуклонно-стабильного ядра с наибольшим известным отношением числа нейтронов к числу протонов $N/Z = 3$ на примере сверхтяжелого гелия — ${}^8\text{He}$.
5. *Дунайцев А. Ф., Прокошкин Ю. Д., Рыкалин В. И., Петрухин В. И. (ОИЯИ), Зельдович Я. Б. (ИПМАН), Герштейн С. С. (ИФВЭ).* Закон сохранения векторного тока в слабых взаимодействиях элементарных частиц. Диплом № 135. 1973. Приоритет от 8.09.1955 — в части теоретического обоснования закона, от 12.04.1962 — в части экспериментального подтверждения закона.
Формула открытия: Установлен неизвестный ранее закон сохранения слабого векторного тока элементарных частиц-адронов, подтвержденный экспериментальным обнаружением и измерением вероятности бета-распада положительно заряженного пи-мезона.
Дунайцев А. Ф. и др. // ЖЭТФ. 1962. Т. 42. С. 632; 1421; 1964. Т. 47. С. 84.
6. *Бабаев А. И., Балац М. Я., Мясничева Г. Г., Обухов Ю. В., Фирсов В. Г. (ИТЭФ), Роганов В. С. (ОИЯИ).* Явление существования мюония в конденсированных средах. Диплом № 161. 1975. Приоритет от 3.11.1965.
Формула открытия: Экспериментально установлено неизвестное ранее явление существования атомарного мюония, впервые наблюдавшегося в конденсированных химически инертных средах по ларморовой прецессии системы спинов его триплетного состояния в поперечном магнитном поле.
7. *Гуревич И. И., Ивантер И. Г., Макарьина Л. А., Мелешко Е. А., Никольский Б. А., Селиванов В. И., Смилга В. П., Соколов Б. Б., Шестаков В. Д., Яковлева И. В. (ИАЭ), Роганов В. С. (ОИЯИ).* Явление двухчастотной прецессии положительного мю-мезона в атоме мюония в магнитном поле. Диплом № 162. 1975. Приоритет от 1.05.1969.
Формула открытия: Установлено неизвестное ранее явление двухчастотной прецессии спина положительного мю-мезона в атоме мюония, обусловленное контактным взаимодействием магнитных моментов положительного мю-мезона и электрона мюония в слабом поперечном магнитном поле.

8. Герштейн С. С., Пономарев Л. И., Дунайцев А. Ф., Прокошкин Ю. Д., Рыкалин В. И., Петрухин В. И. Явление захвата отрицательно заряженных пи-мезонов ядрами химически связанного водорода. Диплом № 164. 1975. Приоритет от 4.04.1962.
Формула открытия: Установлено неизвестное ранее явление захвата отрицательно заряженных пи-мезонов ядрами химически связанного водорода с предварительным образованием возбужденных мезомолекулярных комплексов, определяющих интенсивность ядерного захвата мезонов.
9. Балаиов В. В., Кабачник Н. М. (МГУ), Беллев В. Б., Эрамжян Р. А., Войтковска И., Козловски Т., Евсеев В. С., Роганов В. С. (ОИЯИ). Явление резонансного поглощения отрицательных мюонов атомными ядрами. Диплом № 173. 1976. Приоритет от 22.10.1963 — в части теоретического доказательства, от 8.10.1968 — в части экспериментального подтверждения.
Формула открытия: Установлено неизвестное ранее явление резонансного поглощения отрицательных мюонов атомными ядрами, заключающееся в том, что при поглощении отрицательных мюонов происходит коллективное возбуждение атомных ядер.
10. Зинов В. Г., Конин А. Д., Мухин А. И. Явление изменения относительной интенсивности рентгеновских линий *K*-серии мю-мезоатома. Диплом № 201. 1978. Приоритет от 1.03.1965.
Формула открытия: Экспериментально установлено неизвестное ранее явление изменения относительной интенсивности рентгеновских линий *K*-серии мю-мезоатома, обусловленное захватом мюонов на молекулярные уровни при вступлении химического элемента в реакцию.
11. Ажирей Л. С., Взоров И. К., Зрелов В. П., Мещеряков М. Г., Неганов Б. С., Шабудин А. Ф. Явление прямого выбивания дейтронов из атомных ядер нуклонами высоких энергий. Диплом № 221. 1979. Приоритет от 1.07.1957.
Формула открытия: Экспериментально установлено неизвестное ранее явление прямого выбивания дейтронов из атомных ядер нуклонами высоких энергий, обусловленное тем, что при облучении атомных ядер нуклонами высоких энергий, например, протонами, происходит квазиупругое рассеяние налетающих нуклонов на дейтронных группах в ядрах, приводящее к испусканию дейтронов с импульсами, отвечающими кинематике упругого рассеяния нуклонов на свободных дейтронах.
12. Мясцицева Г. Г., Савельев Г. И., Обухов Ю. В., Фирсов В. Г., Минайчев Е. В., Андрианов Д. Г., Фистуль В. И. (ИТЭФ), Роганов В. С. (ОИЯИ). Свойство одноэлектронных атомов в кристаллических полупроводниках быть глубокими донорами. Диплом № 259. 1982. Приоритет от 12.12.1969.
Формула открытия: Экспериментально установлено неизвестное ранее свойство одноэлектронных атомов, внедренных в кристаллическую решетку полупроводника, быть глубокими донорами, проявляющееся в существенном уменьшении размеров области локализации принадлежащего им электрона по сравнению с аналогичной характеристикой для мелких водородоподобных донорных центров.
13. Гуревич И. И., Никольский Б. А., Селиванов В. И., Суетин В. А. (ИАЭ), Гребинник В. Г., Жуков В. А. (ОИЯИ). Явление квантовой некогерентной диффузии положительных мю-мезонов в твердом веществе. Диплом № 268. 1982. Приоритет от 18.04.1972.
Формула открытия: Экспериментально установлено неизвестное ранее явление квантовой некогерентной диффузии положительных мю-мезонов в твердом теле, обусловленное их проникновением сквозь потенциальный барьер между эквивалентными положениями в кристаллической решетке.
14. Весман Э. А., Герштейн С. С., Желепов В. П., Ермолов П. Ф., Фильченков В. В. Закономерность резонансного образования мюонных молекул дейтерия. Диплом № 349. 1988. Приоритет от 23.12.1965.
Формула открытия: Установлена неизвестная ранее закономерность образования мюонных молекул дейтерия, заключающаяся в значительном увеличении скорости образования

этих молекул в газообразном дейтерии при повышении температуры, обусловленная существованием в мюонной молекуле дейтерия слабосвязанного колебательно-вращательного уровня.

15. Головин Б. М., Джелепов В. П. Исследование упругого рассеяния нейтронов с энергией 590 МэВ нейтронами // ЖЭТФ. 1956. Т. 31. С. 194;
Джелепов В. П., Оганесян К. О., Флягин В. Б. Образование нейтральных π -мезонов нейтронами на дейтроне и сложных ядрах // ЖЭТФ. 1957. Т. 32. С. 678;
Флягин В. Б. и др. Изучение реакции $n + p \rightarrow \pi^0 + d$ при эффективной энергии нейтронов 600 МэВ и гипотеза зарядовой независимости // ЖЭТФ. 1958. Т. 35. С. 854;
Мещеряков М. Г. и др. Магнитный анализ реакций $pp \rightarrow n\pi^+$, $pp \rightarrow pp\pi^0$, $pp \rightarrow d\pi^+$ при энергии 660 МэВ // ДАН. 1956. Т. 109. С. 499; ЖЭТФ. 1956. Т. 31. С. 45.
16. Зинов В. Г., Коренченко С. М. Рассеяние π^- -мезонов на водороде при энергии 333 МэВ // ЖЭТФ. 1957. Т. 33. С. 1307; Рассеяние π^- -мезонов на водороде с перезарядкой при энергии 307 МэВ // ЖЭТФ. 1957. Т. 33. С. 1308.
17. Акимов Ю. К. и др. // ЯФ. 1971. Т. 13. С. 748;
Бережнев С. Ф. и др. // ЯФ. 1972. Т. 16. С. 185;
Бережнев С. Ф. и др. // ЯФ. 1976. Т. 24. С. 1127.
18. Баландин М. П. и др. О возможности образования Λ^0 -частиц протонами с энергией до 700 МэВ // ЖЭТФ. 1955. Т. 29. С. 265.
19. Понтекорво Б. М. Одномерная и безмезонная аннигиляция антинуклонов // ЖЭТФ. 1956. Т. 30. С. 947.
20. Джелепов В. П. и др. Общая схема расчета прочности корпуса метровой пропановой камеры. ОИЯИ, Б1-2334; Б1-2388; Б1-2389. Дубна, 1965;
Будагов Ю. А. и др. Схема фотографирования метровой пузырьковой камеры // ПТЭ. 1967. Т. 1. С. 61.
21. Будагов Ю. А. и др. Измерение сечений реакций с образованием нейтральных частиц в π^-p -взаимодействиях при 5 ГэВ/с // ЯФ. 1970. Т. 12. С. 1222;
Будагов Ю. А. и др. Образование двух Λ^0 -гиперонов во взаимодействиях π^- -мезонов с ядрами углерода при импульсе 5 ГэВ/с // ЯФ. 1971. Т. 14. С. 363;
Амаглобели Н. С. и др. Исследование инклюзивных распределений γ -квантов, образующихся в π^-p -взаимодействиях при 5 ГэВ/с // ЯФ. 1975. Т. 22. С. 1269.
22. Балдин Б. Ю. и др. // ЯФ. 1974. Т. 20. С. 694.
23. Bellini G. et al. // Phys. Rev. Lett. 1982. V. 48. P. 1697.
24. Kopeliovich B. Z., Lapidus L. I., Zamolodchikov A. B. Dynamics of Color in Hadron Diffraction on Nuclei // JETP Lett. 1981. V. 33. P. 595; JETP Lett. 1981. V. 33. P. 612;
Копельович Б. З. Эффекты экранирования цвета при взаимодействии адронов и ядер // ЭЧАЯ. 1990. Т. 21. С. 117;
Kopeliovich B. Z. Color transparency // Sov. J. Nucl. Phys. 1992. V. 55. P. 752.
25. Акименко С. А. и др. // ЯФ. 1983. Т. 38. С. 1212; 1984. Т. 39. С. 649.
26. Bitsadze G. S. et al. Study of the Hypercharge Exchange Reactions $\pi^+ + p \rightarrow K^+\Sigma^+$; $K^+\Sigma^+(1385)$ at 12 GeV/c // Nucl. Phys. B. 1985. V. 260. P. 497;
Bitsadze G. S. et al. A New Upper Limit for the Branching Ratio of the Decay $K_s^0 \rightarrow e^+e^-$ // Phys. Lett. B. 1986. V. 167. P. 138.
27. Туаркин А. А. JINR Preprint E1-8657. Dubna, 1975; ЯФ. 1975. Т. 22. С. 1181.
28. Бунятов С. А. и др. // ЭЧАЯ. 1992. Т. 23. С. 581;
Bunyatov S. A. // Nuovo Cim. A. 1991. V. 104. P. 1361.

29. Батусов Ю. А. и др. Препринт ОИЯИ Д1-80-676. Дубна, 1980; Письма в ЖЭТФ. 1981. Т. 33. С. 56.
30. Батусов Ю. А. и др. // ЯФ. 1985. Т. 45. С. 1165.
31. Gaidot A. et al. // Phys. Lett. B. 1975. V. 57. P. 389; 1976. V. 61. P. 103; Nucl. Phys. B. 1977. V. 124. P. 391.
32. Adamo A. et al. (OBELIX Collaboration). First Physics Results from OBELIX // Yad. Fiz. 1992. V. 55. P. 3099.
33. Ableev V. G. et al. // Nucl. Phys. A. 1995. V. 585. P. 577; Nucl. Phys. A. 1995. V. 594. P. 375; Bertin A. et al. Study of the $\bar{p}p \rightarrow K^+K^-\pi^0$ Reaction in Antiproton Annihilation at Rest // Proc. of Conf. «Hadron'95». Manchester, 1995; Bertin A. et al. // Phys. Lett. B. 1997. V. 403. P. 177.
34. Авдеев С. П. и др. // ПТЭ. 1996. Т. 3. С. 1; Avdeyev S. P. et al. Thermal Multifragmentation in $p + \text{Au}$ Interactions at 2.16, 3.6 and 8.1 Incident Energies // Eur. Phys. J. A. 1998. V. 3. P. 75; Karnaukhov V. A. // Yad. Fiz. 1997. V. 60. P. 1780; Karnaukhov V. A. et al. // Acta Phys. Polonica B. 1999. V. 30. P. 429; Wagner P. et al. // Phys. Lett. B. 1999. V. 460. P. 31.
35. Avdeyev S. P. et al. // Part. and Nucl. Lett. 2000. No. 2[99]. P. 70.
36. Bystritsky V. M. et al. The Astrophysical S -Factor for the dd -Reactions at Ultralow Energies. JINR Preprint D15-99-163. Dubna, 1999.
37. Неменов Л. Л. // ЯФ. 1972. Т. 15. С. 1047; Алексеев Г. Д. и др. // ЯФ. 1984. Т. 40. С. 139; Афанасьев Л. Г. и др. // ЯФ. 1990. Т. 51. С. 1040; Афанасьев Л. Г. et al. // Phys. Lett. B. 1990. V. 236. P. 116.
38. Неменов Л. Л. // ЯФ. 1985. Т. 41. С. 980; Афанасьев Л. Г. et al. // Phys. Lett. B. 1993. V. 308. P. 200; Афанасьев Л. Г. и др. // ЯФ. 1990. Т. 52. С. 1046; ЯФ. 1997. Т. 60. С. 1049.
39. Adeva D. et al. Lifetime Measurements of $\pi^+\pi^-$ Atoms to Test Low Energy QCD Predictions. Proposal to the SPSLC. CERN/SPSLC 95-1. Geneva, 1995; Schacher J. The experiment DIRAC at CERN // Workshop on Chiral Dynamics. Mainz, Germany, Sept. 1997.
40. Vishnevsky A. V. et al. SIGMA-AJAX Setup for the Study of Elastic πp and $K - p$ Scattering. JINR, P1-89-202. Dubna, 1989; Antipov Yu. M. et al. Elastic Scattering of π - and K -Mesons on Protons at 43 GeV/c Momentum // Yad. Fiz. 1988. V. 48. P. 138; Antipov Yu. M. et al. // Nucl. Phys. A. 1992. V. 536. P. 637.
41. Demin D. L. et al. The investigation of the dependence of the parameters of muon catalyzed fusion on the protium concentration in triple H/D/T mixture at high temperature and density. JINR Commun. E15-2000-156. Dubna, 2000; The investigation of the parameters of muon catalyzed fusion in double D/T mixture at high temperature and density. JINR Commun. E15-2000-157. Dubna, 2000.
42. Demin D. L. et al. Solid deuterium target; Measurement of the spin and temperature dependence of $dd\mu$ -molecule formation rate in solid and liquid deuterium // Proc. of Intern. Symp. on μCF -95. Dubna, 1995; Filchenkov V. V. Kinetics of the μCF process in deuterium at the lowest temperatures // Proc. of Intern. Symp. on μCF -95. Dubna, 1995.

43. *Arnold R. et al.* // Письма в ЖЭТФ. 1995. Т. 61. С. 168;
Быстров В. А. и др. α -распад ^{156}Er и ^{157}Tm . Энергия β -распада ^{156}Ho // Тез. докл. междунар. совещ. по физике ядра. М., 1996;
Izositov I. N. et al. // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 1998. V. 24. P. 831;
Данагулян А. С. и др. // ЯФ. 1997. Т. 60. С. 965;
Wan J.-S. et al. // *Renntech.* 1998. V. 63. P. 167;
Морозов В. А. и др. Препринт ОИЯИ Р6-99-3. Dubna, 1999;
Морозов В. А., Морозова Н. В. Препринт ОИЯИ Р6-99-4. Дубна, 1999;
Adam I. et al. // JINR Rapid Commun. 1999. No. 2[94]. P. 37;
Stegailov V. I. et al. // Czech. J. Phys. 1999. V. 49/S2. P. 247; *Izvestija RAN (phys.)*. 1999. V. 63. P. 860;
Kovalik A. et al. // J. Electron Spectrosc. and Relat. Phenom. 1999. V. 105. P. 219.
44. *Alexeev G. D. et al.* The DELPHI experiment at LEP // *Part. and Nucl. Lett.* 2000. No. 1. P. 5.
45. *Karlen D.* // Plenary talk at ICHEP'98.
46. *Ruhlmann-Kleider V.* DELPHI report to the LEP. 12 Nov. 1998. CERN, Geneva.
47. DELPHI Collaboration // *Phys. Lett. B.* 1997. V. 401. P. 181;
 DELPHI Collaboration // ICHEP'98 Conf. No. 288.
48. DELPHI Collaboration // ICHEP'98 Conf. No. 341.
49. *Туаркин И.* (DELPHI Collaboration) // Proc. of Photon'97 Conf. Egmond aan Zee, 1997; Proc. of Workshop on Two-Photon Interactions δ Lund, Sept. 10–13, 1998;
Abreu P. et al. (DELPHI Collaboration) // Determination of the $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma(\gamma)$ cross-section at centre-of-mass energies ranging from 189 GeV to 202 GeV // *Phys. Lett. B.* 2000. V. 491. P. 67.
50. *Abreu P. et al.* (DELPHI Collaboration). W pair production cross-section and W branching fractions in e^+e^- interactions at 189 GeV // *Phys. Lett. B.* 2000. V. 479. P. 89;
Abreu P. et al. (DELPHI Collaboration). Measurement and interpretation of fermion-pair production at LEP energies of 183 GeV and 189 GeV // *Phys. Lett. B.* 2000. V. 485. P. 45;
Abreu P. et al. (DELPHI Collaboration). Cross-sections and leptonic forward-backward asymmetries from the Z^0 running of LEP // *Eur. Phys. J. C.* 2000. V. 16. P. 371.
51. *Герштейн С. С., Зельдович Я. Б.* // ЖЭТФ. 1955. Т. 29. С. 698.
52. *Понтекорво Б. М.* Электронные и мюонные нейтрино // ЖЭТФ. 1959. Т. 37. С. 1751.
53. *Биленький С. М.* // Бруно Понтекорво: Избр. тр. М., 1997. Т. 1. С. 6.
54. *Понтекорво Б. М.* Мезоний и антимезоний // ЖЭТФ. 1957. Т. 33. С. 549; Обратные β -процессы и несохранение лептонного числа // ЖЭТФ. 1958. Т. 34. С. 247;
Feinberg G. et al. // *Phys. Rev.* 1961. V. 123. P. 1439.
55. *Valuev V.* (NOMAD Collaboration) // Proc. of Europhys. Conf. on H.E.P., Jerusalem, Aug. 1997; NOMAD Collaboration. Recent results from the NOMAD experiment // Intern. Europhys. Conf. on High Energy Physics, Vancouver, Canada, July 1998.
56. *Astier P. et al.* (NOMAD Collaboration). A more sensitive search for $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ oscillations in NOMAD // *Phys. Lett. B.* 1999. V. 453. P. 168;
Astier P. et al. (NOMAD Collaboration). Limit on $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$ oscillations from the NOMAD experiment. Updated results from ν_τ appearance search in NOMAD // *Phys. Lett. B.* 2000. V. 483. P. 387.
57. *Займидорога О. А. и др.* Измерение вероятности реакции $^3\text{He} + \mu^- \rightarrow ^3\text{H} + \nu_\mu$ // ЖЭТФ. 1962. Т. 43. С. 355;
Zaimidoroga O. A. // *Phys. Lett.* 1962. V. 1. P. 318; *Phys. Lett.* 1963. V. 6. P. 100;
Займидорога О. А. Измерение полной вероятности захвата мюонов в гелии-3 // ЖЭТФ. 1963. Т. 45. С. 1803.

58. *Займидорога О. А. и др.* Применение гелия-3 для наполнения диффузионных камер высокого давления // ПТЭ. 1964. Т. 1. С. 69.
59. *Быстрицкий В. М. и др.* Измерение скорости захвата мюона в газообразном водороде // ЖЭТФ. 1974. Т. 66. С. 43.
60. *Баладин М. П. и др.* // ЖЭТФ. 1974. Т. 67. С. 1631.
61. *Vylov Ts. et al.* Neutrino helicity measurement from Eu-152 M decay by means of Ge(Li) detector. JINR, P6-84-149. Dubna, 1984. 10 p.
Brudanin V.B. et al. K electron capture decay of Tb-158: a disappointment for the neutrino mass «balance» experiment // J. Phys. G. 1985. V. 11. P. L119;
Vylov Ts. et al. Measuring the helicity of neutrinos from the decay of Eu-152 (M) using a Ge(Li) detector // Bull. Acad. Sci. USSR, Ser. Fiz. 1984. V. 48, No. 9. P. 155; *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Fiz.* 1984. V. 48. P. 1809.
62. *Коренченко С. М. и др.* // ЯФ. 1971. Т. 13. С. 339; 341; 1265; ЖЭТФ. 1976. Т. 70. С. 3; 1976. Т. 71. С. 69.
63. *Aleshin N.P. et al.* LNPI Research report 1990–1991. St. Petersburg, 1992. P. 43;
Gordeev V.A. et al. // JETP Lett. 1993. V. 57. P. 262; 1994. V. 59. P. 565.
64. *Jungmann K. et al.* Testing Lepton Number Conservation by Searching for Muonium to Antimuonium Oscillations // Proc. of Intern. Conf. on Nuclear and Particle Physics with Mesons in the 1 GeV/c Region. Tokyo, 1995. P. 137;
Willman L. et al. A Sensitive Search for Muonium- Antimuonium Oscillation // AIP Conf. Proc. Intersections between Particle and Nuclear Physics. 1995. V. 338. P. 973.
65. *Kisel I. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 387. P. 433;
Kisel I., Konotopskaya E., Kovalenko V. // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 389. P. 167;
Bussa M.P. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 389. P. 208.
66. *Astier P. et al.* (NOMAD Collaboration). Measurement of the Λ^0 -polarization in ν_μ charged current interactions in the NOMAD experiment // Nucl. Phys. B. 2000. V. 588. P. 3.
67. *Barabash L.S. et al.* Total cross section measurement for ν_μ , $\bar{\nu}_\mu$ interactions in 3–30 GeV energy range with ИИЕР–JINR Neutrino Detector. Препринт ИФВЭ, 95-50. Протвино, 1995; Принято к печати в «Z. fur Phys.»;
Bunyatov S.A., Nefedov Y. A. Cross-section for production of charmed particles in pN interaction at 70 GeV in proton beam dump experiment at ИИЕР–JINR Neutrino Detector. JINR Preprint E1-95-398. Dubna, 1995.
68. *Sidorov A. V. et al.* (ИИЕР–JINR Neutrino Detector Collaboration). Measurement of xF_3 and F_2 structure functions in the low Q^2 region with the ИИЕР–JINR neutrino detector // Eur. Phys. J. C. 1999. V. 10. P. 405.
69. Материалы XX рабочего совещ. по «Нейтринному детектору», Дубна, 21–23 янв. 1998 г.
70. *Isaev P. S., Ivanov Yu. P.* QCD analysis of deep inelastic lepton scattering data // Yad. Fiz. 1983. V. 38. P. 744.
71. *Zrelov V.P. et al.* // Czech. J. Phys. B. 1976. V. 26. P. 1306;
Зрелов В. П. и др. Препринт ОИЯИ Р1-7996. Дубна, 1974.
72. *Adamovich M. et al.* (WA91 Collaboration) // Phys. Lett. B. 1995. V. 353. C. 563–570.
73. NEMO Collaboration // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 389. P. 169; 433.
74. *Arnold R. et al.* // Nucl. Phys. A. 2000. V. 678. P. 341.
75. *Babu K. S., Mohapatra R. N.* // Phys. Rev. Lett. 1995. V. 75. P. 2276;
Hirsch M., Klapdor-Kleingrothaus H. V., Kovalenko S. G. // Phys. Lett. B. 1996. V. 372. P. 181.
76. *Brudanin V.B. et al.* // Phys. Lett. B. 2000. V. 495. P. 63.

77. Egorov V. et al. // Nucl. Phys. A. 1997. V. 621. P. 745.
78. Shitov Yu. et al. Doppler-broadening of gamma-rays following muon capture: search for scalar coupling. Submitted to «Nucl. Phys. B».
79. Gordeev V. A. et al. Preprint PNPI NP-37-2000. Gatchina, 2000.
80. Frlež E. et al. PSI Scientific Report 1999. Particles and Matter. Villigen PSI, March 2000. V. I.
81. Bolotov V. N. et al. // Phys. Lett. B. 1990. V. 243. P. 308.
82. Kopeliovich B. Z. Partial conservation of the axial current and nuclear screening of the interaction of high-energy neutrinos // Zh. Eksp. Teor. Fiz. 1990. V. 97. P. 1418;
Kopeliovich B. Z. Nuclear opacity for neutrinos at small Q^2 // Phys. Lett. B. 1989. V. 227. P. 461;
Belkov A. A., Kopeliovich B. Z. Adler relation and neutrino production of single hadrons // Yad. Fiz. 1987. V. 46. P. 874;
Kopeliovich B. Z., Marage P. Low Q^2 , high neutrino physics (CVC, PCAC, hadron dominance) // Int. J. Mod. Phys. A. 1993. V. 8. P. 1513.
83. Hirsch M., Klapdor-Kleingrothaus H. V., Kovalenko S. G. // Phys. Lett. B. 1995. V. 352. P. 1;
Phys. Rev. Lett. 1995. V. 75. P. 17; Phys. Rev. D. 1996. V. 53. P. 1329.
84. Günther M. et al. Heidelberg–Moscow collaboration // Phys. Rev. D. 1997. V. 55. P. 54;
Baudis L. et al. // Phys. Lett. B. 1997. V. 407. P. 219.
85. Faessler A. et al. // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 78. P. 183.
86. Fukuda Y. et al. (Super-Kamiokande Collaboration). hep-ex/9803006;
hep-ex/9805006; hep-ex/9807003.
87. Faessler A., Kovalenko S., Šimkovic F. // Phys. Rev. D. 1998. V. 58. P. 055004.
88. Bednyakov V. A., Faessler A., Kovalenko S. G. Super-Kamiokande Constraints on R -parity Violating Supersymmetry // Phys. Lett. B. 1998. V. 442. P. 203.
89. Germanium in Nitrogen Underground Set-up, Heidelberg // CERN Cour. 1997. V. 37. P. 18;
Helmig J., Klapdor-Kleingrothaus H. V. // Z. Phys. A. 1997. V. 359. P. 361;
Klapdor-Kleingrothaus H. V., Hirsch M. // Z. Phys. A. 1997. V. 359. P. 382;
Klapdor-Kleingrothaus H. V. // Phys. At. Nucl. 1998. V. 61. P. 967; hep-ex/9802007.
90. Bednyakov V. A. et al. // Z. Phys. A. 1997. V. 357. P. 339;
Bednyakov V. A., Klapdor-Kleingrothaus H. V. // Phys. Rev. D. 2000. V. 62. P. 043524;
hep-ph/9908427; hep-ph/0011233.
91. Ellis J., Ferstl A., Olive K. A. // Phys. Lett. B. 2000. V. 481. P. 304; hep-ph/0001005;
hep-ph/0007113.
92. Баюков Ю. Д. и др. // ПТЭ. 1958. № 6. С. 30;
Тяпкин А. А. Препринт ОИЯИ 1146. Дубна, 1962.
93. Зрелов В. П. Излучение Вавилова–Черенкова и его применение в физике высоких энергий. М.: Атомиздат, 1968.
94. Тяпкин А. А., Козодаев М. С., Прокошкин Ю. Д. // ДАН СССР. 1955. Т. 100, № 4. С. 689.
95. Баландин М. П., Моисеенко В. А. Металлическая пузырьковая камера диаметром 90 мм // Тез. докл. на всесоюз. конф., май 1956. С. 210.
Любимов В. А., Елисеев Е. П. Определение ионизирующей способности быстрых заряженных частиц // Тез. докл. на всесоюз. конф., май 1956. С. 105.
96. Тяпкин А. А. // ПТЭ. 1956. № 3. С. 51.
97. Тяпкин А. А. Авт. свид. № 01904 МСМ СССР с приоритетом от 27 июня 1955 г.

98. Вишняков В. В., Тяпкин А. А. // АЭ. 1957. Т. III. С. 298.
99. Vasilevsky I. M. et al. // Phys. Lett. 1962. V. 1. P. 345.
100. Беккерман И. М. Невидимое оставляет след. 2-е изд. М.: Атомиздат, 1970.
101. Proc. of Intern. Conf. on High Energy Instrumentation, Berkeley, USA, Aug. 1960.
102. Тяпкин А. А., Цзоу Чжу-лянь. Получение разряда в искровой камере вдоль трека частицы // ПТЭ. 1962. № 5. С. 84.
103. Говоров А. М. и др. Газоразрядная камера. Препринт ОИЯИ Д-715. Дубна, 1961; ПТЭ. 1961. № 6. С. 49.
104. Борисов А. А., Долгошеин Б. А., Лучков Б. И. Искровой счетчик с большим межэлектродным промежутком // ПТЭ. 1962. № 2. С. 170.
105. Krienen F. Digitized Spark Chamber // Proc. of the 1962 Conf. on Instrument for High-Energy Phys., CERN, Geneva, July 16–18, 1962; Nucl. Instr. Meth. 1963. V. 20. P. 168.
106. Peter G. et al. (Presented by Kaftanov V. C.) // Proc. of the 1962 Conf. on Instrument for High-Energy Phys., CERN, Geneva, July 16–18, 1962; Nucl. Instr. Meth. 1963. V. 20. P. 201.
107. Вишняков В. В., Тан Сяо-вей, Тяпкин А. А. // УФН. 1960. Т. 72. С. 133.
108. Савченко О. В. // ПТЭ. 1959. № 4. С. 142.
109. Акимов Ю. К. Сцинтилляционные методы регистрации частиц больших энергий. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1963;
Akimov Yu. Scintillation Counters in High Energy Physics. London: Academic Press, 1965.
110. Акимов Ю. К. и др. Полупроводниковые детекторы ядерных частиц и их применение / Под ред. Ю. К. Акимова. М.: Атомиздат, 1967.
111. Акимов Ю. К. и др. // ЖЭТФ. 1965. Т. 48. С. 767.
112. Акимов Ю. К. и др. // ЯФ. 1966. Т. 4. С. 88.
113. Акимов Ю. К. и др. // ЖЭТФ. 1972. Т. 62. С. 1231.
114. Charpak G. et al. // Nucl. Instr. Meth. 1968. V. 62. P. 262; Preprint of CERN, 23 Febr. 1968, Geneva, Switzerland.
115. Ледерман Л. М. // УФН. 1970. Т. 100. С. 505;
Lederman L. M. // Comm. Nucl. Part. Phys. 1969. V. 3. P. 101.
116. Зинов В. Г. Авт. свид. по заявке от 2 февраля 1968 г. // Бюллетень открытий и изобретений. 1969. № 14.
117. Бирюков В. А., Зинов В. Г., Конин А. Д. Координатный пропорциональный счетчик // ЖЭТФ. 1970. Т. 58, вып. 1. С. 104.
118. Сороко Л. М. Всегда впереди. К 50-летию Лаборатории ядерных проблем, 1949–1999 гг. Сообщение ОИЯИ Р1-2000-74. Дубна, 2000.
119. Блохинцева Т. Д. и др. Восьмилитровая водородно-дейтериевая пузырьковая камера в магнитном поле // ПТЭ. 1962. № 5. С. 51.
120. Борисов Н. С. и др. // ЖЭТФ. 1966. Т. 50. С. 1445.
121. Неганов Б. С. // Вестник АН СССР. 1968. Т. 12. С. 49; ПТЭ. 1978. № 2. С. 15.
122. Неганов Б. С. О принципе относительности и нарушении его в явлениях спиновой прецессии движущ. заряж. частиц. Препринт ОИЯИ Р4-89-837. Дубна, 1989;
Neganov B. S. // Hadr. J. 1991. V. 14. P. 377.

123. *Синаев А. Н.* Многоканальные системы, применяемые в исследованиях ОИЯИ // Nuclear Electronics III. Viena, 1962. P. 287; Электронные системы многоканальных спектрометров ядерных частиц: Обзор. 1962. С. 95; // Тр. 5-й конф. по радиоэлектронике. М., 1963. Т. II, ч. 1. С. 87;
Акимов Ю. К. и др. Быстродействующая электроника для регистрации ядерных частиц. М.: Атомиздат, 1970.
124. *Вишняков В. В. и др.* Измерение профиля пучков частиц синхротрона // ПТЭ. 1970. № 2. С. 32;
Медведь С. В. и др. Аппаратура для автоматического накопления и обработки информации в экспериментах на синхротроне // ПТЭ. 1970. № 4. С. 109;
Вишняков В. В. и др. Измеритель пространственного профиля пучков // ПТЭ. 1973. № 6. С. 21;
Вишняков В. В., Синаев А. Н. Устройство для измерения формы пучка заряженных частиц. Авт. свид. № 271668. Заявка от 29 декабря 1968 г.;
Синаев А. Н. Устройство для преобразования двойного кода в двоично-десятичный. Авт. свид. № 521565. Заявка от 29 мая 1974 г.;
Синаев А. Н. Способ съема информации с дрейфовых камер. Авт. свид. № 553559. Заявка от 21 октября 1975 г.
125. *Громов К. Я., Звольски И., Цупко-Ситников В. М.* Многоуровневая система измерений, накопления и обработки информации в ядерной спектроскопии // Прикладная ядерная спектроскопия. М., 1983. Вып. 12. С. 3.
126. *Абдуразаков А. А. и др.* Атлас спектров внутренней конверсии нейтронодефицитных нуклидов в области $A = 131-172$. Ташкент: Узбекистон, 1991. 346 с.
127. *Булла Ф. и др.* Методика автоматизированной обработки трехмерных амплитудно-временных спектров гамма-гамма совпадений на ЭВМ ЕС-1040 с использованием графического дисплея // Прикладная ядерная спектроскопия. М., 1982. Вып. 11. С. 102.
128. *Бялко А. А., Волков Н. Г., Цупко-Ситников В. М.* Методы сжатия данных в задачах экспериментальной ядерной физики: Обзор // Прикладная ядерная спектроскопия. М., 1984. Вып. 13. С. 35.
129. *Adam J. et al.* Method and program for decay scheme reconstruction based on formal logical analysis // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 385. P. 492.
130. *Головин Б. М. и др.* Установка с кольцевым рассеивателем для изучения рассеяния нейтронов высокой энергии на малые углы // ПТЭ. 1959. № 5. С. 23.
131. *Богомолов А. В. и др.* Метровая пузырьковая камера в магнитном поле // ПТЭ. 1964. № 1. С. 61.
132. *Eadie W. T. et al.* Statistical Methods in Experimental Physics. Amsterdam; London: North-Holland Publ. Comp., 1971.
133. *Eadie W. T. et al.* Статистические методы в экспериментальной физике / Под ред. А. А. Тяпкина. М.: Атомиздат, 1976.
134. *Клепиков Н. П., Соколов С. Н.* Анализ и планирование эксперимента методом максимального правдоподобия. М.: Наука, 1964.