

Соавторы открытий «Явление двойной перезарядки π -мезонов»
и «Явление образования и распада сверхтяжелого гелия — гелия 8»
Слева направо: С.А.Бунятов, В.М.Сидоров, Ю.А.Батусов, В.А.Ярба

вом Н.А.Русаковича ОИЯИ участвует в создании установки ATLAS для строящегося в ЦЕРН нового протон-протонного коллайдера (LHC) на 14 ТэВ.

1. Основные направления исследований

Исследования по физике сильных взаимодействий

Традиционно эти исследования были одним из магистральных направлений для Лаборатории ядерных проблем. Эксперименты в этой области проводились и проводятся физиками ЛЯП на различных ускорителях в широком интервале первичных энергий.

Среди комплекса работ важное место занимают детальные исследования на пучках синхроциклотрона бинарных реакций упругого и неупругого (с рождением пионов) рассеяния нуклонов и пионов нуклонами.

В цикле исследований сектора В.П.Джелепова¹ по взаимодействию нейтронов высокой энергии с нуклонами и ядрами были получены такие фундаментальные ре-

¹ Джелепов В.П. и др. // ЖЭТФ. 1957. Т. 32. С. 678; 1958. Т. 35. С. 854.

зультаты, как доказательство зарядовой симметрии ядерных сил при высоких энергиях, обнаружена спиновая зависимость обменных сил в системе нейтрон-протон, а в опытах по изучению рождения пионов в нуклонных соударениях подтверждена гипотеза зарядовой инвариантности ядерных сил. Изучение поляризационных явлений при двойном и тройном рассеянии нуклонов позволило установить значительный вклад во взаимодействие тензорных сил.

М.Г.Мещеряковым и его сотрудниками при изучении протон-протонных взаимодействий выше порога образования π -мезонов был открыт резонансный характер процесса $p + p \rightarrow \pi^+ + d$.¹ Эти результаты, наряду с экспериментальными данными секторов В.П.Джелепова, М.С.Козодаева и Б.М.Понтекорво, заложили новое направление в физике нуклон-нуклонных взаимодействий, которое в определенной мере явилось базой для создания теории резонансного образования пионов. Кроме того, было впервые обнаружено, что выше порога образования пионов упругое $p + p$ -рассеяние все более принимает черты дифракционного рассеяния. Изучение поляризационных эффектов позволило определить в ранее не исследованной области энергий элементы матрицы и фазы $p + p$ -рассеяния, что явилось основой для современной формулировки однобозонной обменной модели ядерных сил.

Анализ большого объема данных ЛЯП и ряда других лабораторий по упругому и неупругому взаимодействию как неполяризованных, так и поляризованных нуклонов позволил Ю.М.Казаринову и его коллегам² провести фазовый анализ и однозначно определить матрицу NN -рассеяния в области энергии до 1 ГэВ.

Исследование структуры ядер с помощью протонов высокой энергии привело к обнаружению ранее неизвестного процесса — прямого выбивания дейтронов с импульсом 1,6 ГэВ/с из ядер протонами с энергией 675 МэВ. Этот результат явился доказательством того, что имеют место процессы коллективного взаимодействия падающих нуклонов с внутриядерными нуклонами. К аналогичному заключению привели также эксперименты, в которых определялись импульсные распределения нуклонов в ядрах. Использование методов магнитной спектроскопии для прецизионных измерений импульсных спектров пионов позволило обнаружить образование пионов в соударениях падающих протонов с группами внутриядерных нуклонов — «флуктонов» по интерпретации Д.И.Блохинцева, а также ранее никем не наблюдавшаяся «изотопическую деполяризацию» пионов в исходных ядрах. Этот цикл исследований структуры ядер в пучках протонов с энергией 660 МэВ был зарегистрирован как открытие и оказал существенное влияние на последующее развитие релятивистской ядерной физики³.

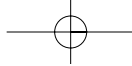
Результаты параллельно проводившегося изучения рассеяния π^\pm -мезонов протонами и поляризации в упругом πp -рассеянии (сектор Б.М.Понтекорво и М.С.Козодаева)⁴ позволили осуществить проверку справедливости дисперсионных соотношений, обоснованных Н.Н.Боголюбовым.

¹ Мещеряков М.Г. и др. // ДАН. 1956. Т. 109; ЖЭТФ. 1956. Т. 33. С. 45.

² Казаринов Ю.М. и др. // ЯФ. 1983. Т. 37. С. 158; Rev. Mod. Phys. 1967. V. 39. P. 706; Nucl. Phys. 1969. A127. P. 449.

³ Ажгирей Л.С., Мещеряков М.Г. и др. Диплом № 221 (1979). Приоритет от 01.07.1957.

⁴ Зинов В.Г. и др. // ЖЭТФ. 1957. Т. 33. С. 307, 1308.



В большом цикле работ по изучению процесса обратного электророждения пиона $\pi^- + p \rightarrow e^+ + e^- + n$ при $E_{\pi^-} = 275$ МэВ были измерены нуклонный и пионный форм-факторы в интервале времениподобных четырехимпульсов от (1,5 до 3,0) f^{-2} . В результате этих измерений были определены среднеквадратичные электромагнитный радиус пиона и нуклона¹.

При исследовании рассеяния пионов на ядрах ^3He и ^4He в области резонанса $\Delta(1236)$ впервые наблюдалась деструктивная интерференция кулоновского и ядерного рассеяния пионов².

В лаборатории были проведены фундаментальные исследования взаимодействия π^\pm -мезонов с протонами и ядрами в интервале энергий 200–300 МэВ. Детально изучены реакции $\pi N \rightarrow \pi N$ вблизи порога образования пионов: измерены величины поперечных сечений различных каналов этой реакции; исследованы угловые и энергетические характеристики вторичных частиц; определены фазы и длины пион-пионного рассеяния; показано отсутствие так называемой АВС-аномалии в спектре эффективных масс двух пионов; экспериментально подтверждено, что причиной малой величины длин рассеяния является наличие подпороговых нулей в реальной части амплитуды π - π -рассеяния³. Все эти данные получены впервые, они вошли во многие монографии и учебники. Этими исследованиями заложено научное направление по изучению взаимодействия двух нестабильных частиц.

При изучении процессов образования мезонов мезонами в ядерной фотоэмульсии в 1963 году было обнаружено новое явление – двойная перезарядка π^+ -мезонов⁴, которое было зарегистрировано как открытие⁵. Реакция двойной перезарядки пионов происходит с участием двух нуклонов ядра и нашла широкое применение при изучении структуры ядер, их аналоговых состояний с большим избытком протонов и нейтронов, при исследовании парных корреляций нуклонов в ядре. В дальнейшем это новое научное направление получило широкое применение на ускорителях типа «мезонная фабрика».

В лаборатории впервые детально изучены всевозможные реакции поглощения отрицательных пионов и мюонов с образованием в конечном состоянии ядер ^8He , ^8Li , ^8B . Было показано, что в такого сорта процессах важным механизмом является захват мезонов на многонуклонных кластерах в легких ядрах (C, N, O). Обнаруженное в 1965 году в этих исследованиях явление образования и бета-распада нуклоностабильного сверхтяжелого ядра гелия-8 было признано и зарегистрировано в качестве открытия⁶. Таким образом было установлено существование нуклоностабильного ядра с максимальным отношением числа нейтронов к числу протонов $N/Z = 3$. Поиск в реакциях захвата пионов и мюонов легкими ядрами ядерностабильных многонейтронных систем и необычных тяжелых изотопов водорода послужил в дальнейшем отправной точкой для новых поисков таких экзотических ядер.

¹ Неменов Л.Л. и др. // ЯФ. 1976. Т. 24. С. 1127.

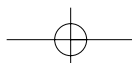
² Мах Р. и др. // ЭЧАЯ. 1986. Т. 17. С. 231.

³ Батусов Ю.А., Бунятов С.А. и др. // ЯФ. 1965. Т. 1. С. 687; 1973. Т. 18. С. 829. Бунятов С.А. // ЭЧАЯ. 1982. Т. 13. С. 5.

⁴ Batusov Yu.A., Becker F. // Riv del N.C. 1971. V. 1. P. 309.

⁵ Батусов Ю.А., Бунятов С.А. и др. Диплом № 77 (1970). Приоритет от ноября 1963.

⁶ Батусов Ю.А., Бунятов С.А. и др. Диплом № 119 (1972). Приоритет от 30.10.1965.



Б.М.Понтекорво с сотрудниками из Института теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ) было установлено неизвестное ранее свойство мезоатомов передавать без излучения всю энергию перехода мезона ядру, когда она близка к разности энергии ядерных уровней¹.

На пучке отрицательных пионов с импульсом 5 ГэВ/с синхрофазотрона ЛВЭ с помощью созданной в ЛЯП первой в ОИЯИ большой (метровой) пропановой пузырьковой камеры объемом 200 л была получена важная информация о малоизученных в то время процессах множественного рождения нейтральных и странных частиц во взаимодействиях π^- -мезонов с протонами и ядрами углерода. Впервые 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», наблюдавшимся при значительно более высоких энергиях².

Для проведения исследований на пучках введенного в действие в 1967 году 70 ГэВ протонного синхротрона (ИФВЭ, Протвино) учеными ЛЯП самостоятельно и совместно с физиками ИФВЭ были созданы шесть комплексных экспериментальных установок, в основном на базе магнитных спектрометров.

Одним из первых результатов высокой научной значимости совместных (ЛЯП ОИЯИ–ИФВЭ) исследований явилось открытие самого тяжелого из известных пока антиядер — ядра трития³. 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 *CPT*-инвариантности взаимодействия частиц.

В исследованиях на пятиметровом магнитном искровом спектрометре (МИС ЛЯП) на пучке π^- -мезонов с импульсом 40 ГэВ/с ускорителя ИФВЭ в сотрудничестве физиков лаборатории с учеными из Италии, Польши и Финляндии были открыты два новых состояния пиона⁴ с массами (1240 ± 30) и (1770 ± 30) МэВ. Эти состояния интерпретируются как радиальные возбуждения пиона и непосредственно свидетельствуют о его кварковой структуре.

Изучение процессов перезарядки π - и K -мезонов в η -мезон (реакции $\pi^+(K^+) + A \rightarrow \eta X$, где $X = (H, D, Li, Be, Al, Cu)$, привело к обнаружению не наблюдавшегося ранее и предсказанного теоретиками ЛЯП (Л.И.Лапидус, Б.З.Копелиович)⁵ явления цветовой прозрачности ядер. Эксперименты были выполнены Н.А.Русаковичем и др. на спектрометре ГИПЕРОН в ИФВЭ⁶.

В КХД мезоны рассматриваются как цветовые диполи, образованные парой кварков. Прозрачность ядерной материи по отношению к цветовому диполю определяет-

¹ Понтекорво Б.М. и др. Диплом № 100 (1971). Приоритет от 17.06.1959.

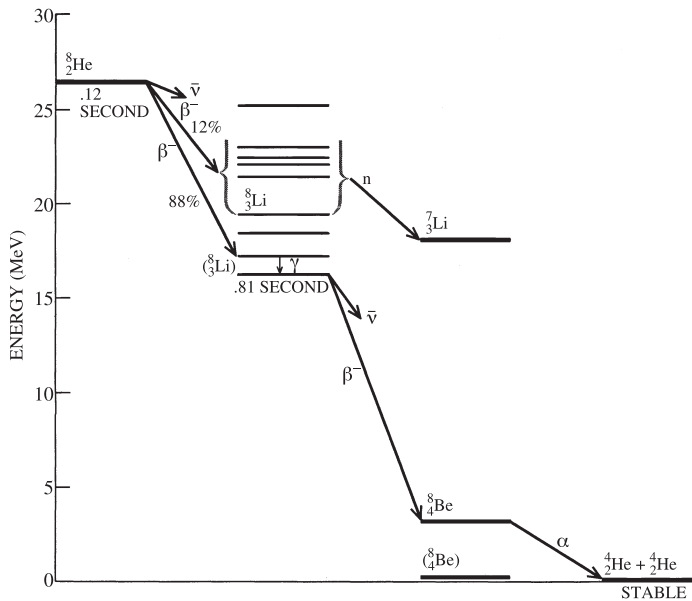
² Джелепов В.П. и др. // ПТЭ. 1967. Т. 1. С. 61; ЯФ. 1970. Т. 12. С. 1222; 1975. Т. 22. С. 1269.

³ Петрухин В.И., Рыкалин В.И. и др. // ЯФ. 1974. Т. 20. С. 694.

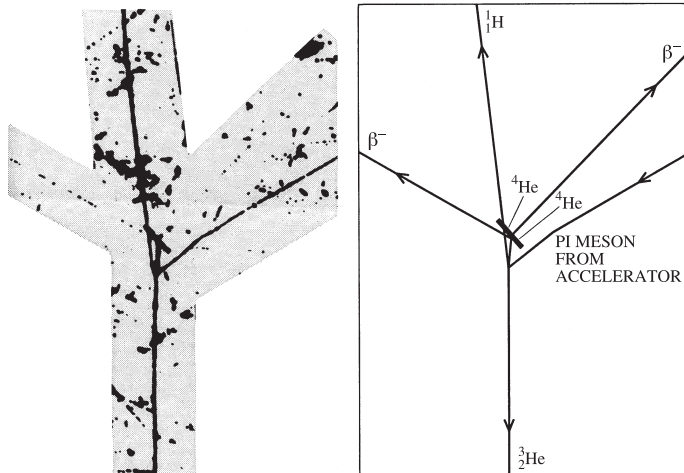
⁴ Tuarquin A.A., Bellini G. et al. // Phys. Rev. Lett. 1982. V. 48. P. 1697.

⁵ Lapidus L.I. et al. // JETP Lett. 1981. V. 33. P. 595, 612; ЭЧАЯ. 1990. Т. 21. С. 117.

⁶ Акименко С.А. и др. // ЯФ. 1984. Т. 39. С. 649; Rusakovich N.A. et al. // Nucl. Phys. B. 1985. V. 260. P. 497; Phys. Lett. B. 1986. V. 167. P. 138.



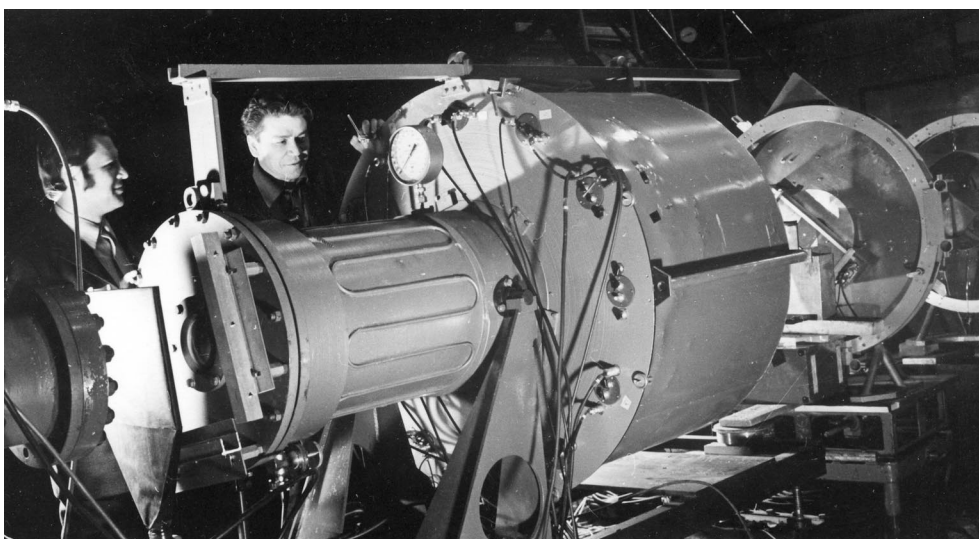
NEUTRON-RICH ISOTOPE of helium, ${}^8_2\text{He}$, can decay through either of two unusual pathways. In each case the initial event is a beta emission, forming the lithium isotope ${}^8_3\text{Li}$. If the ${}^8_3\text{Li}$ is created in a highly excited state, it promptly emits a neutron, giving rise to the stable product ${}^7_3\text{Li}$. The overall process is beta-delayed neutron emission. If the ${}^8_3\text{Li}$ is formed in its lower excited states, those states decay to the ground state by gamma radiation; the ground state then beta decays to yield an unstable excited state of ${}^8_4\text{Be}$. The beryllium nuclide in turn promptly emits an alpha particle, or in other words splits into two nuclei of ${}^4_2\text{He}$, the commonest isotope of helium. In the latter pathway decay of ${}^8_3\text{Li}$ can be described as beta-delayed alpha emission.



Открытие ядра ${}^8\text{He}$, сделанное в ЛЯП ОИЯИ, получило широкий отклик в научном мире.

Страница из журнала an Article from SCIENTIFIC AMERICAN, June, 1978. V. 238. No. 6. Авторы J.Cerny, A.M.Poskazer

DECAY OF A HELIUM-8 NUCLEUS is recorded in a photographic emulsion at the left; the same events are diagrammed at the right. The ${}^8_2\text{He}$ nucleus was one of three fragments created when a low-energy pi meson was captured by a carbon nucleus in the emulsion. The other two fragments, a proton (${}^1_1\text{H}$) and a helium-3 nucleus (${}^3_2\text{He}$) are shown leaving the field of view. The ${}^8_2\text{He}$ nucleus moved only a short distance before it came to rest, and then it underwent two successive beta decays to ${}^8_4\text{Be}$, which split into two ${}^4_2\text{He}$ nuclei. Tracks of the two ${}^4_2\text{He}$ nuclei go in opposite directions because ${}^8_4\text{Be}$ nucleus was essentially at rest when it split up. The photograph was supplied by Yu. Batusov of the Joint Institute for Nuclear Research in the U.S.S.R.



Многопараметрическая установка, с помощью которой обнаружено новое ядро антивещества — ядро антитрития. Слева направо: В.И.Рыкалин, В.И.Петрухин

ся 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 $q_{q\bar{q}}/q_{s\bar{s}} = (1,8 \pm 0,2)$.

На этой же установке с наиболее высокой в мире точностью измерены параметры ряда распадов К-мезонов, формфакторы процессов $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$ и $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$, а также установлен верхний предел для вероятности запрещенного правилами сохранения кварковых ароматов распада $K_s^0 \rightarrow e^+ e^-$ (на 90%-ном уровне достоверности), равный $2,8 \cdot 10^{-6}$.

На установке «Проза», созданной сотрудничеством физиков ЛЯП ОИЯИ, ИФВЭ (Протвино) и Сакле (Франция), было обнаружено новое явление изменения знака поляризации протонов при их упругом рассеянии на протонах при высоких энергиях, которое было признано открытием¹. Эти результаты были получены при исследовании поляризационных эффектов в области энергий $20 \div 40$ ГэВ в упругом рассеянии π^\pm -, K^\pm -мезонов, протонов и антипротонов².

Упругое рассеяние π - и К-мезонов на протонах с высокой точностью было измерено в совместном ОИЯИ–ИФВЭ эксперименте СИГМА–АЯКС (руководители от ОИЯИ Г.В.Мицельмахер и А.Г.Ольшевский). В дальнейшем в этом эксперименте также изучался кумулятивный эффект и был проведен поиск тяжелых дибарионных состояний.

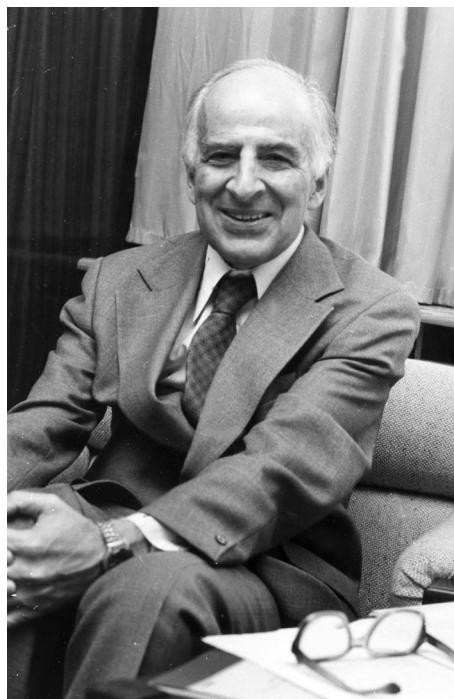
¹ Казаринов Ю.М. и др. Диплом № 387 (1990). Приоритет от 09.07.1975.

² Казаринов Ю.М., Нурушев С.Б. и др. // Phys. Lett. B. 1976. V. 61. P. 103.

Б.М.Понтекорво наряду с А.Пайсом высказал и обосновал гипотезу о совместном рождении гиперонов и странных мезонов, а в экспериментах на синхроциклотроне ЛЯП подтвердил отсутствие одиночного рождения Λ^0 -гиперона¹. В 1956 году им была обоснована идея о возможности безмезонной и одномезонной аннигиляции антипротонов², которая положила начало исследованиям в лаборатории взаимодействия антипротонов с веществом в рамках экспериментов PS-179 и OVELIX (ЦЕРН) на пучке антипротонов накопителя LEAR.

В совместных экспериментах Италия–ЛЯП ОИЯИ (руководитель Г.Пираджино) с использованием самошунтирующей стримерной камеры в магнитном поле, фотоэмульсии и установки OVELIX (руководитель М.Г.Сапожников) был обнаружен ряд принципиально новых эффектов: сильная изоспиновая зависимость амплитуды аннигиляции в высших парциальных волнах; существенное подавление реакции развала ядер антипротоны; большой выход Λ -гиперонов даже при аннигиляции антипротонов малой энергии, включая аннигиляцию покоящихся антипротонов; впервые обнаружен выход легких гиперфрагментов из легких и тяжелых ядер в фотоэмульсии; измерение вероятности выхода ядра ${}^3\text{He}$ в $\bar{p}^4\text{He}$ -аннигиляции позволило получить ограничение на предельно допустимое количество антивещества в ранней Вселенной (в виде отношения числа антипротонов к числу протонов $\bar{p}/p < (0,7 \div 1,1) \cdot 10^{-3}$); обнаружено сильное нарушение правила Окубо–Цвейга–Иизуки для тензорных мезонов ($Y(f_2(1525)\pi^0)/Y(f_2(1270)\pi^0) = (73 \pm 25) \cdot 10^{-3}$ при ожидаемом значении $(3 \div 16) \cdot 10^{-3}$); впервые наблюдается реакция Понтекорво $\bar{p}d \rightarrow \phi n$ при аннигиляции остановившихся антипротонов в газообразном дейтерии³.

В фотоэмульсионном секторе ЛЯП в 1975–1981 годах были выполнены первые эксперименты по поиску очарованных суперядер – ядер нового типа, содержащих в своем составе легчайший очарованный Λ_c^+ -барион⁴. Эти работы открыли новое направление в изучении низкоэнергетических взаимодействий очарованных барионов с нуклонами, что недоступно для других экспериментов.



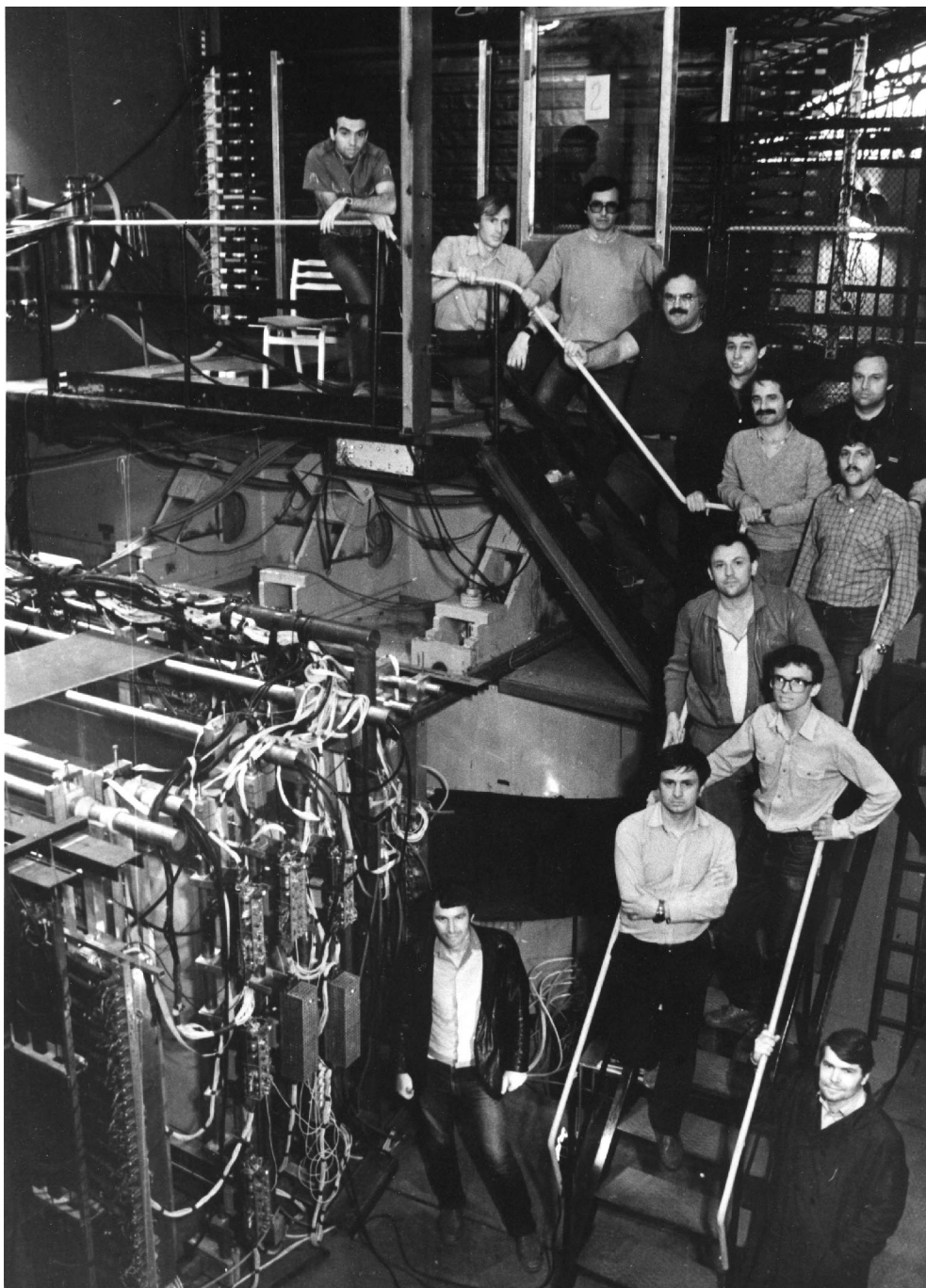
Академик РАН Б.М. Понтекорво

¹ Понтекорво Б.М. и др. // ЖЭТФ. 1955. Т. 29. С. 265.

² Понтекорво Б.М. // ЖЭТФ. 1956. Т. 30. С. 947.

³ Сапожников М.Г. // УФН. 1989. Т. 159. С. 739; ЭЧАЯ. 2003. Т. 34. С. 184.

⁴ Батусов Ю.А. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1981. Т. 33. С. 56; Бунятов С.А. // ЭЧАЯ. 1992. Т. 23. С. 581.



Коллектив физиков из ОИЯИ, ИФВЭ, ЦЕРН, Италии,
участвующих в экспериментах на установке СИГМА-АЯКС



Сборка высоковольтного генератора для стримерной камеры
Слева направо: Ю.А.Щербаков, Н.А.Лебедев, Г.Пираджино

Выяснение механизма множественной эмиссии фрагментов промежуточной массы «очень горячими» ядрами, который связан с фазовым переходом «жидкость—газ» в ядерном веществе, является целью проекта ФАЗА, осуществляемого сотрудничеством ученых ЛЯП с физиками Москвы, Кракова и Дармштадта на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ.

Впервые 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 мультифрагментацию¹.

Исследования в области физики электромагнитных взаимодействий

Важная роль электромагнитного взаимодействия в поляризационных эффектах при рассеянии адронов на малые углы (эффект интерференции кулоновского и ядерного

¹ Карнаухов В.А. и др. // Eur. Phys. J. A. 1998. V. 3. P. 75.

рассеяния) была предсказана Л.И.Лапидусом в 1970 году¹. Основываясь на этих работах, на электронном синхротроне ЕрФИ физиками ЛЯП были проведены измерения медленных протонов и дейтонов отдачи, получавшихся при упругом рассеянии электронов на малые углы. Эти опыты позволили наиболее прямым методом определить электромагнитные радиусы протона и дейтона, а также формфакторы этих частиц.

На установке ПОЗИТРОНИЙ, созданной совместно ЛЯП и ИФВЭ, открыт и изучен новый распад π^0 -мезона на γ -квант и атом позитрония $\pi^0 \rightarrow \gamma + \Lambda_{e^+e^-}$. Это один из самых редких разрешенных распадов элементарных частиц², его относительная вероятность составляет $W(\pi^0 \rightarrow \gamma + \Lambda_{e^+e^-})/(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) = (1,84 \pm 0,29) \cdot 10^{-9}$. Наблюдено также образование π -мезоатомов, состоящих из π^+ - и π^- -мезонов, и получена оценка времени их существования ($\tau = 3,1_{-0,9}^{+0,9}$ (стат.) $\pm 0,8$ (сист.) $\cdot 10^{-15}$ с). В настоящее время исследования π -мезоатомов продолжены на ускорителе PS в ЦЕРН в рамках международной коллаборации DIRAC, где лидирующую роль играют физики ЛЯП ОИЯИ³.

Важные сведения, касающиеся кварковой структуры пионов, получены в результате исследования комптон-эффекта на π -мезоне с помощью установки СИГМА–АЯКС, созданной сотрудниками Дубны и Протвино⁴. По предложению дубненских теоретиков и экспериментаторов (А.С.Гальперин, В.Н.Первушин, Г.В.Мицельмахер и А.Г.Ольшевский) был поставлен эксперимент, в котором впервые были измерены фундаментальные константы, характеризующие деформацию π -мезона в электромагнитном поле, – его электрическая и магнитная поляризуемости $\alpha_\pi = (6,8 \pm 1,4) \cdot 10^{-43}$ см³ и $\beta_\pi = (-7,1 \pm 2,8) \cdot 10^{-43}$ см³, 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 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, 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 энергиях⁵.

Значительное внимание в исследованиях на синхроциклотроне ЛЯП было уделено экспериментальному изучению свойств излучения Вавилова–Черенкова (ИВЧ) в анизотропных средах. Обнаружено двухконусное ИВЧ с различными разновидностями: «эллипсоидальное», «двухэллипсоидальное», «овально-лепестковое», «игольчатое», «асимметричное». Эти опыты не только подтвердили предсказания теории ИВЧ для одноосных кристаллов, развитой В.Л.Гинзбургом, но и способствовали развитию теории ИВЧ для других анизотропных сред⁶.

Лаборатория ядерных проблем является родоначальницей изучения мюонного катализа – реакций слияния ядер изотопов водорода. Суть мюонного катализа заключается в том, что отрицательный мюон, образуя с ядрами изотопов водорода

¹ Лапидус Л.И., Акимов Ю.К. и др. // ЖЭТФ. 1972. Т. 62. С. 1231; ЯФ. 1979. Т. 29. С. 649, 922.

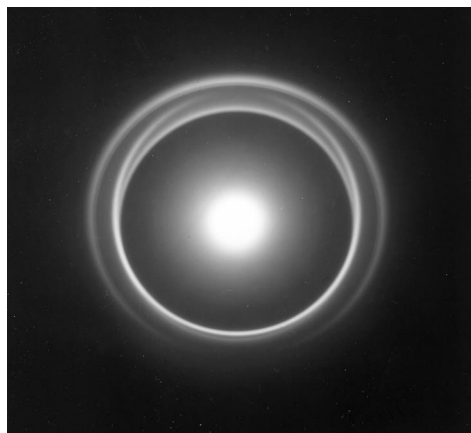
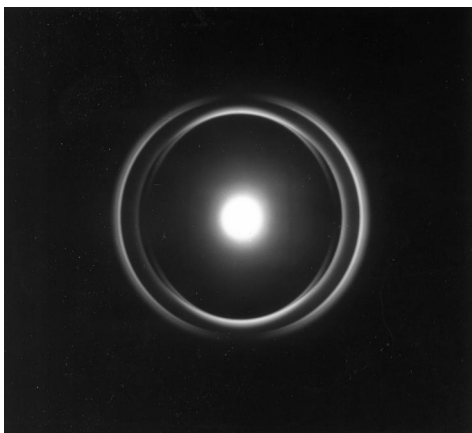
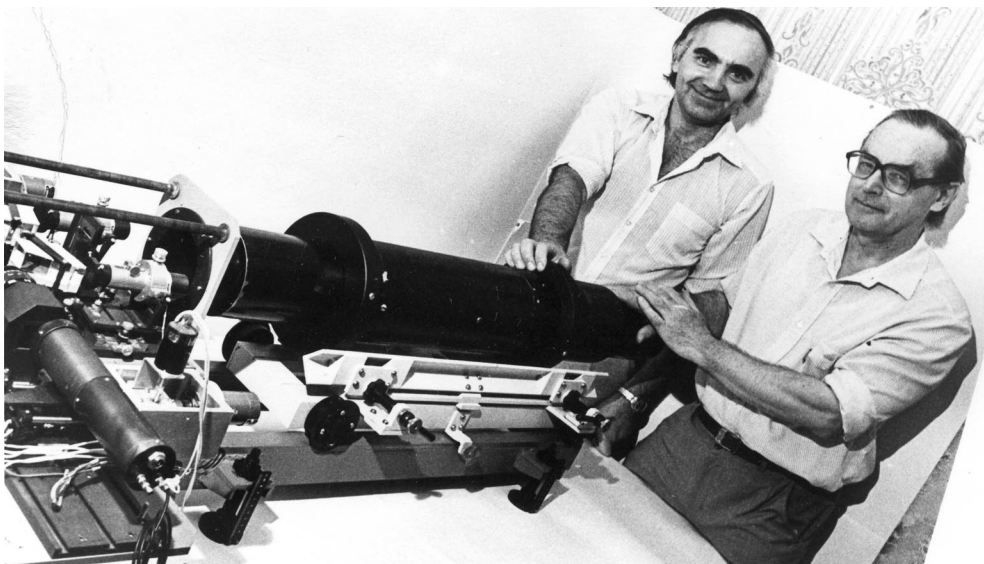
² Неменов Л.Л. и др. // ЯФ. 1990. Т. 51. С. 1040.

³ Неменов Л.Л. и др. // ЯФ. 1997. Т. 60. С. 1049.

⁴ Мицельмахер Г.В., Антипов Ю.М. и др. // Nucl. Phys. A. 1992. V. 536. P. 637.

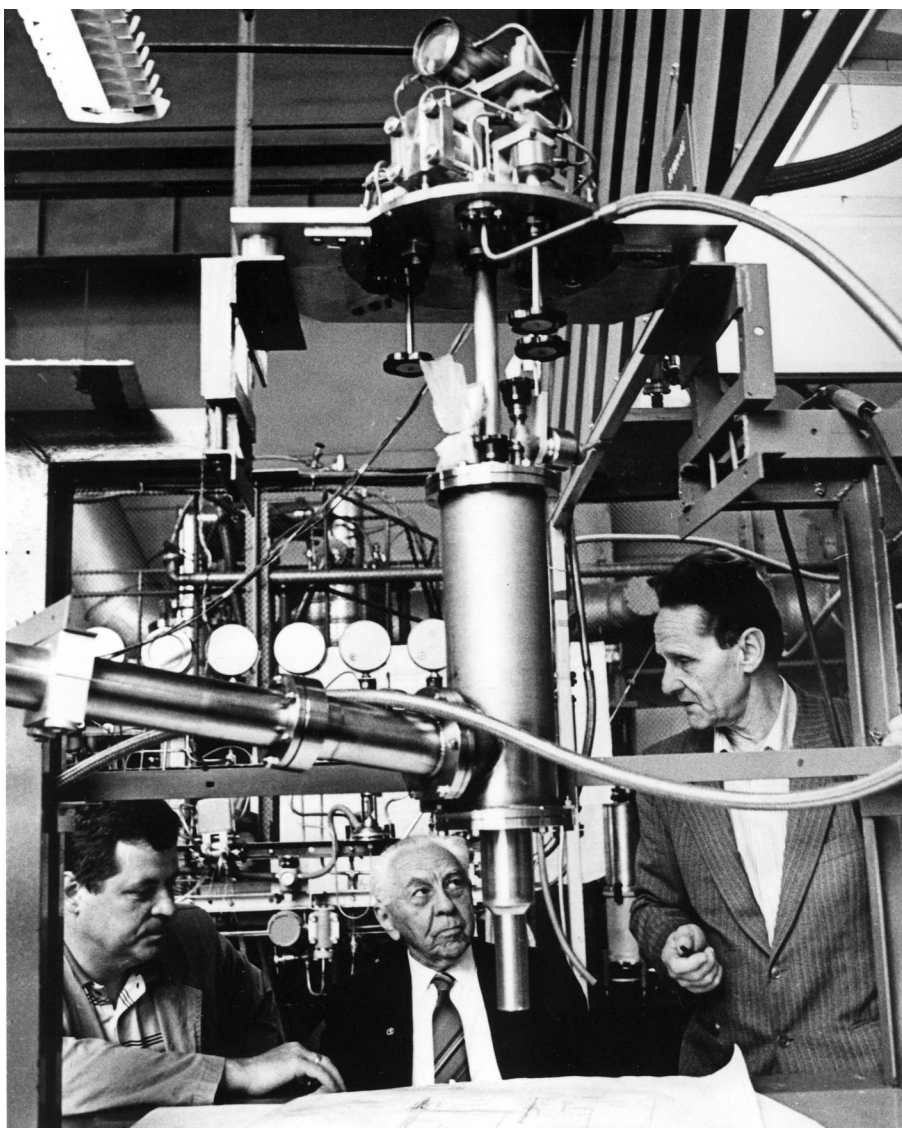
⁵ Ольшевский А.Г. и др. Препринт ОИЯИ. P1-86-710. P1-89-202. Дубна.

⁶ Зрелов В.П. // ЖЭТФ. 1964. Т. 46. С. 447; 1973. Т. 64. С. 245; 1994. Т. 105. С. 515.



Создатели уникальной фотокамеры для экспериментальных исследований эффектов излучения Вавилова—Черенкова Я.Ружичка и В.П.Зрелов и фотографии этого излучения

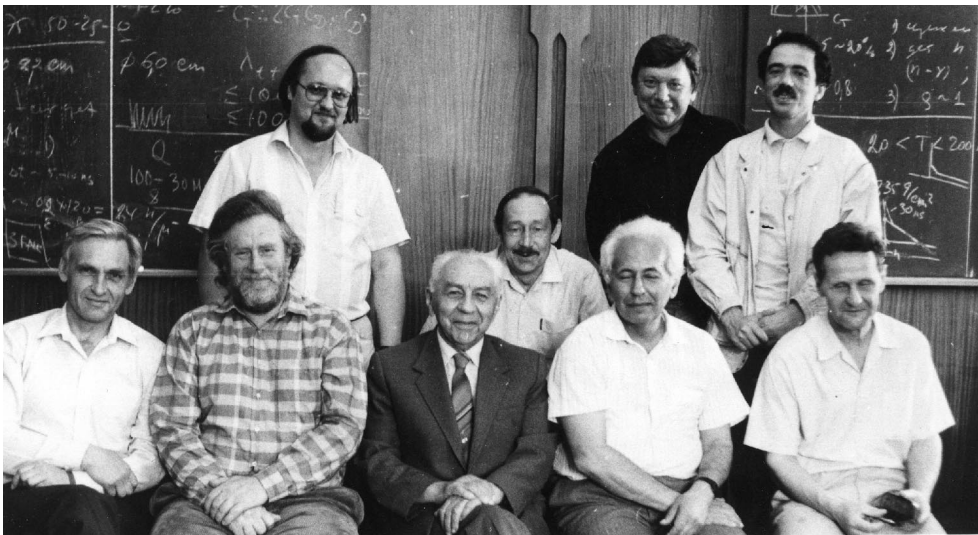
мезомолекулы $d\bar{t}\mu$, сближает ядра дейтерия и трития настолько, что они со скоростью $\sim 10^{-11} \div 10^{-12}$ с сливаются в ядро гелия и выделяют энергию 17,6 МэВ. Важно, что мюон при этом освобождается (реакция $d + t + \mu^- \rightarrow d\bar{t}\mu \rightarrow {}^4\text{He} + n + \mu$) и может катализировать целую цепочку следующих таких же реакций, пока не распадется. Этот специфический процесс с выходом нейтронов при слиянии легчайших 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.



На установке для исследования процессов мю-катализа
Слева направо: Н.А.Русакович, В.П.Джелепов, В.Г.Зинов

Детальное экспериментальное изучение явления мю-катализа началось в ЛЯП в первой половине 60-х годов под руководством В.П.Джелепова, которое увенчалось открытием нового явления – резонансного образования мезомолекул, состоящих из двух атомов дейтерия и мюона: $dd\mu^1$. Объяснение этому результату дали теоретики ЛТФ ОИЯИ С.С.Герштейн, Э.А.Весман и Л.И.Пономарев, которые показали, что

¹ Джелепов В.П. и др. Диплом № 349 (1988). Приоритет от 23.12.1965.



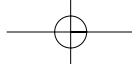
Советание в Дубне по проблемам мю-катализа (1990 г.)
 В первом ряду слева направо: А.И.Пономарев, Дж.Дэвис, В.П.Джелепов,
 С.С.Герштейн, В.Г.Зинов. Во втором ряду: А.М.Арциш, В.В.Фильченков,
 А.П.Пичугин, А.А.Микаэлян

причиной резонанса является существование у $dd\mu$ -молекул слабосвязанного уровня с энергией ~ 2 эВ. За работы по мю-катализу В.П.Джелепов и Л.И.Пономарев были удостоены Золотой медали и премии им. И.В.Курчатова АН СССР. Изучение мюонного катализа стало самостоятельным направлением в физике, ему посвящены специальные международные конференции, издается журнал «Muon Catalyzed Fusion».

В ЛЯП успешно продолжается исследование этих процессов в двойных (дейтерий и тритий) и тройных (протий, дейтерий и тритий) смесях изотопов водорода при высоких температурах и давлениях на мюонном канале фазотрона ОИЯИ. Главной целью экспериментов является измерение эффективных параметров (скорости цикла λ_c , выхода нейтронов Y_n и потери мюонов ω) процесса мюонного катализа¹. В 1998 году впервые в плотной смеси двойных и тройных изотопов водорода выполнены прямые измерения коэффициентов прилипания мюонов к гелию, а также измерена зависимость скорости цикла (нейтронного выхода) от температуры, давления (плотности) и концентрации изотопов.

В 1959 году по инициативе члена-корреспондента АН СССР В.П.Джелепова, активно поддержанной ведущими учеными из стран-участниц ОИЯИ профессорами Б.С.Джелеповым, Г.В.Неводничанским, Г.С.Наджаковым, И.Шинтельмайстером, в ЛЯП был создан отдел ядерной спектроскопии и радиохимии. За истекшие годы отдел был оснащен целой серией совершенных спектрометров и масс-сепараторов высокого разрешения, а созданные высококвалифицированными радиохимиками лаборатории быстрого выделения, очистки и концентрирования радиоактивных

¹ Zinov V.G. et al. // JINR Commun. E15-2000-156, 157. Dubna, 2000.



Обсуждение программы исследований коллаборацией по изучению свойств нейтрино в процессах радиоактивного распада (проект «Нейтрино»)

веществ в количествах $\sim 10^{-10}$ г с высокими полными и удельными активностями способствовали широкому развитию ядерно-спектроскопических исследований. Работы проводились в основном в области сильно деформированных ядер редкоземельных элементов, где открыто более ста новых радиоактивных нуклидов и изучены схемы их распада. Полученная в исследованиях новая экспериментальная информация о свойствах деформированных ядер широко использована для обоснования и развития обобщенной модели ядра Бора–Моттельсона и сверхтекучей модели В.Г.Соловьева¹.

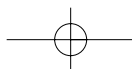
Под руководством Ц.Вылова путем выделения в γ -спектре узкой компоненты аннигиляционного пика (e^+e^-) была измерена масса электрона ($m_e c^2 = 511,003 \pm 0,005$ кэВ), а также с наибольшей точностью измерена энергия связи дейтона ($E_d = 2224563 \pm 10$ эВ)².

Обширная программа ядерной спектроскопии на протонном пучке (ЯСНАПП-2)³ развернута в связи с успешным вводом в эксплуатацию в 1987 году сложного экспериментального комплекса с электромагнитным сепаратором изотопов. В ходе работ на этом комплексе получен ряд важных методических и физических результатов: систематические исследования α -эмиттеров редкоземельной области привели к обнаружению 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 точностью ≤ 100 кэВ массы 25 ядер от Pг до Tm; влияние формы ядра на вероятность ядерных процессов прослежено на примере α - , β -распада ^{156}Er и обнаруженного M-3

¹ Громов К.Я. и др. // ЭЧАЯ. 1975. Т. 6. С. 971.

² Вылов Ц.Д. и др. Препринт ОИЯИ Е6-95-259. Дубна, 1995; Сообщение ОИЯИ. 13–29. Дубна, 1988.

³ Калинин В.Г. и др. // NIM. 1992. В 70. Р. 62.



изомера в ^{156}Ho (9,5 с); обнаружена мюонная структура изоспина $M_T = 1$ резонанса Гамова—Тейлора в β -распаде $^{147}\text{Tb}^1$.

Одной из приоритетных задач лаборатории является участие в крупных международных проектах самого высокого уровня. Наиболее важным из таких проектов за последнее десятилетие является эксперимент DELPHI на коллайдере LEP в ЦЕРН, которым в разное время руководили В.Г.Кадышевский, П.Н.Боголюбов, Г.В.Мицельмахер и А.Г.Ольшевский². Среди множества важных результатов сотрудничества DELPHI, касающихся физики как сильных, так и электрослабых взаимодействий, следует отметить полученное ограничение на массу бозона Хиггса: $M_H = 76_{-47}^{+85}$ ГэВ, при этом были использованы все чувствительные к электрослабым взаимодействиям наблюдаемые, в том числе и прямые измерения массы топ-кварка ($m_{\text{top}} = 174,3 \pm 5,1$ ГэВ). Выполнен поиск осцилляций $B_s^0 \leftrightarrow \bar{B}_s^0$ в событиях с большими поперечными импульсами. Получен новый предел на разность масс физических B_s^0 -состояний: $\Delta m_s > 6,5 \text{ пс}^{-1}$ (90% уд.). Измерена константа трехглюонного взаимодействия, которая согласуется с предсказаниями квантовой хромодинамики и доказывает существование цвета у глюонов. Измеренное в процессе $WW \rightarrow q\bar{q}q\bar{q}$ распределение по эффективным массам позволило определить массу W -бозона ($M_W = 80,450 \pm 0,039$ ГэВ). Измерены сечения рождения и вероятности распада Z -бозона на кварки и лептоны. Теоретическая интерпретация этих измерений позволила определить такие фундаментальные параметры Z -бозона, как масса, полная и парциальные ширины и константы связи ($M_Z = 91,1864 \pm 0,0028$ ГэВ, $\Gamma_Z = 2,4876 \pm 0,0041$ ГэВ). Из анализа данных DELPHI при энергии столкновения e^+e^- 188,63 ГэВ получено, что относительные вероятности лептонных мод распада не противоречат лептонной универсальности и относительная вероятность адронной моды распада W -бозона составляет для реакции ($W \rightarrow q\bar{q}$) $= 0,680 \pm 0,008$ (стат.) $\pm 0,004$ (сист.), что согласуется с предсказаниями Стандартной Модели 0,675 и результатами измерений при меньших энергиях. Вычисленная точность экспериментальных данных позволяет сделать вывод о том, что Стандартная Модель по своей точности приближается к точности КЭД.

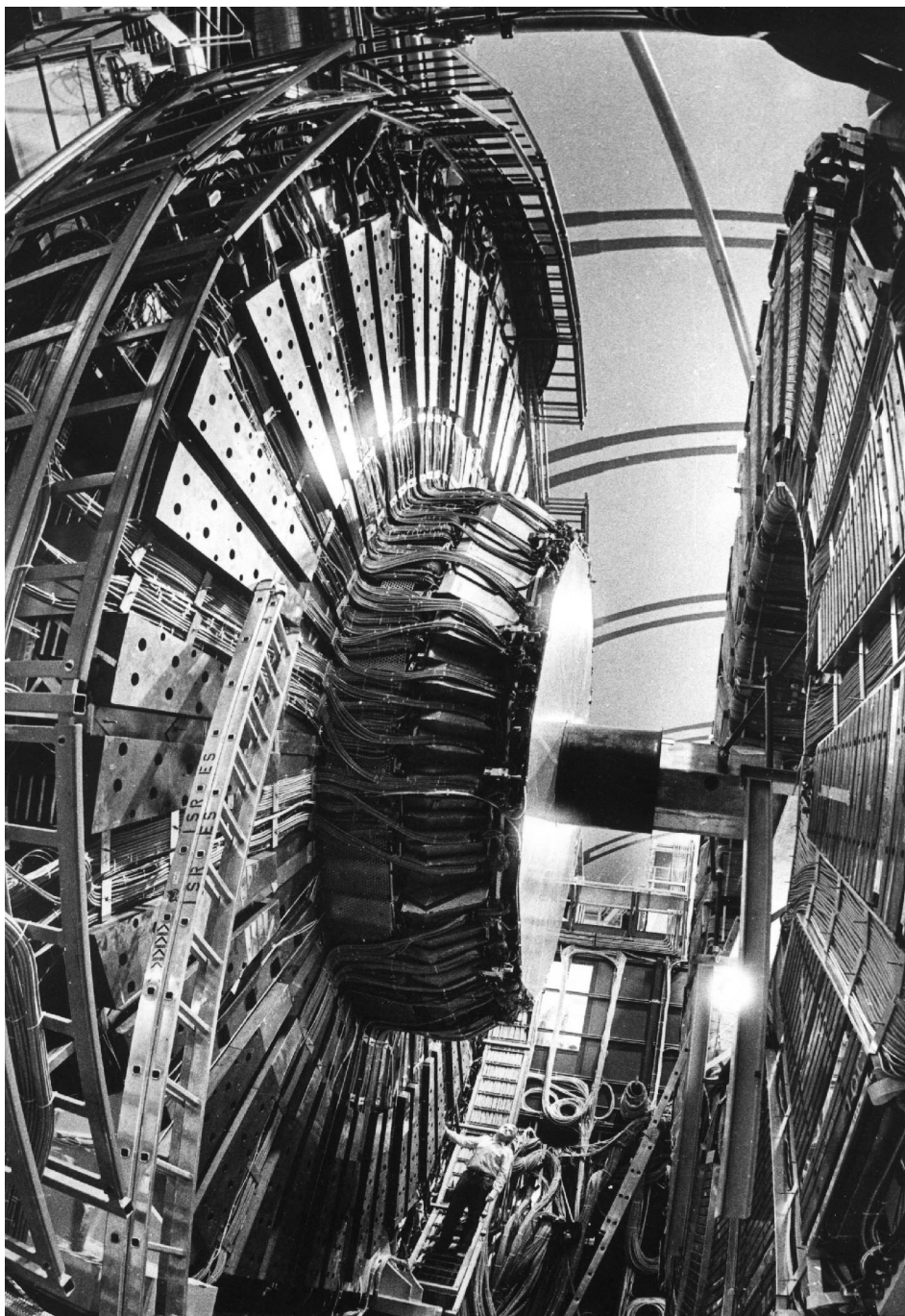
Лаборатория ядерных проблем им. В.П.Джелепова является пионером в исследованиях по физике слабых взаимодействий в ОИЯИ. Здесь выполнен ряд фундаментальных экспериментов, направленных на проверку выводов универсальной теории слабого взаимодействия с участием пионов и мюонов.

Прежде всего, это открытие бета-распада пиона. Измеренная вероятность распада $\pi^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$ оказалась равной $(1,1 \pm 0,1) \cdot 10^{-8}$ по отношению к обычному распаду $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$. Использувавшаяся в опытах установка состояла из высокоэффективного блока регистрации γ -лучей от распада π^0 -мезона и детектора позитронов. Импульсы регистрируемых частиц наблюдались на специально разработанном скоростном пентилучевом осциллографе³. Авторы этой работы Ю.Д.Прокошкин, А.Ф.Дунайцев, В.И.Петрухин, В.И.Рыкалин, Я.Б.Зельдович, С.С.Герштейн были удостоены Акаде-

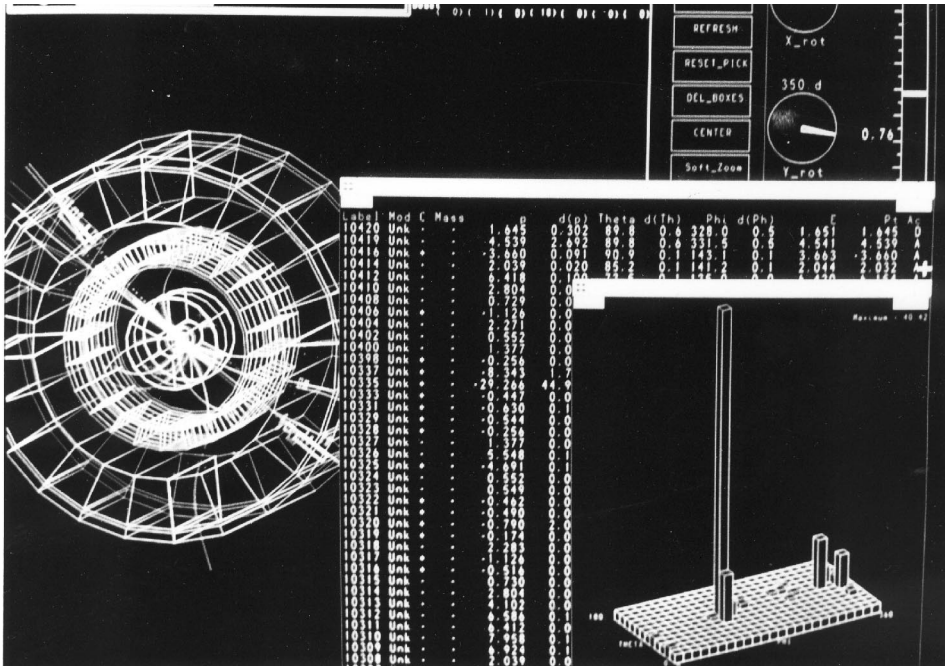
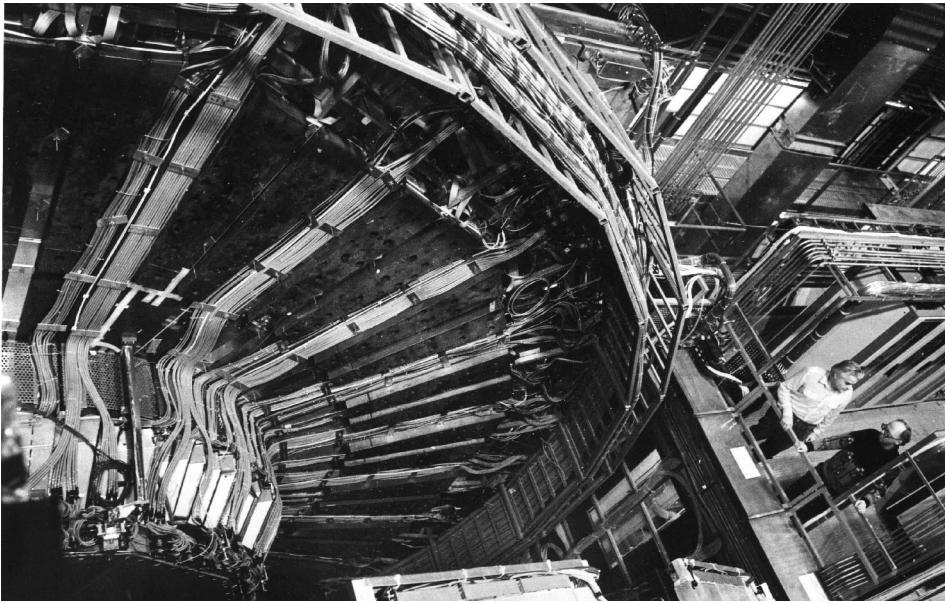
¹ Калининков В.Г. и др. // Изв. РАН (серия физическая). 1994. Т. 58. С. 41; Письма в ЭЧАЯ. 2000. Т. 4. С. 40.

² Ольшевский А.Г. и др. // Partaid Nucl. Lett. 2000. No. 1. P. 5; Phys. Lett. B. 1997. V. 401. P. 181; 2000. V. 479. P. 89; V. 491. P. 67.

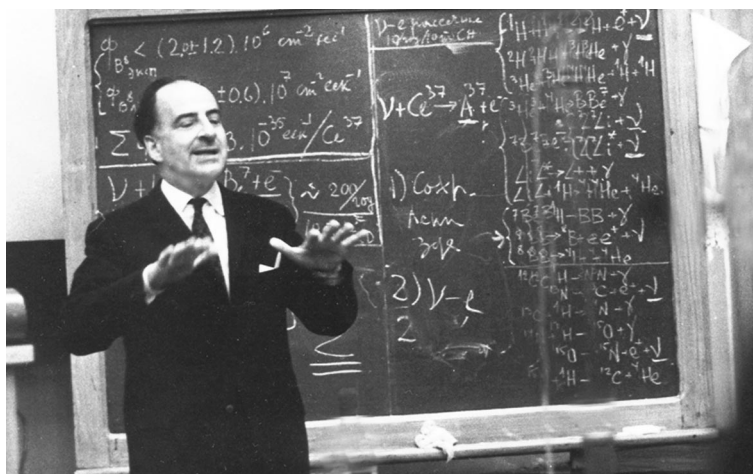
³ Прокошкин Ю.Д. и др. // ЖЭТФ. 1962. Т. 42. С. 632; 1964. Т. 47. С. 84.



**Адронный калориметр DELPHI (ЦЕРН)
Совместный эксперимент физиков ЦЕРН и ОИЯИ на ускорителе LEP**



Центральная часть установки на пучках LEP и снимок с дисплея при on-line обработке физических результатов



Академик АН СССР Б.М.Понтекорво
Начало новой области исследований — физики нейтрино
высоких энергий на ускорителе

мией наук СССР Золотой медали и премии им. И.В.Курчатова. Важность полученного результата состоит в том, что он является прямым доказательством фундаментального закона сохранения векторного тока в слабом взаимодействии, впервые теоретически обоснованного Я.Б.Зельдовичем и С.С.Герштейном. В совокупности эти экспериментальные и теоретические работы зарегистрированы как открытие¹.

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. За эти работы он был удостоен Ленинской премии. Без преувеличения можно сказать, что главными достижениями прошлых лет в этой области лаборатория обязана Бруно Максимовичу.

Он (вместе с М.А.Марковым) обосновал возможность существования мюонного нейтрино, а также в 1959 году предложил эксперимент по обнаружению этого нейтрино на ускорителях высоких энергий². Выполненные позднее в США эксперименты действительно позволили открыть мюонные нейтрино (нейтрино второго поколения) и положили начало новой области исследований — физике нейтрино высоких энергий на ускорителе³.

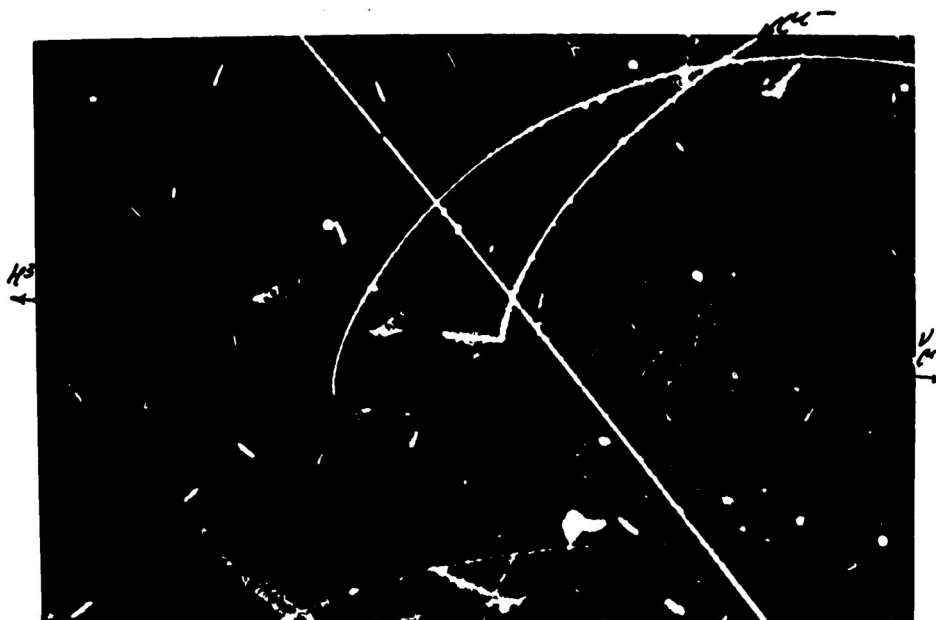
С целью проверки основных законов симметрии в слабых взаимодействиях в лаборатории был выполнен опыт по захвату отрицательного мюона в гелии-3 — реакция $\mu^- + {}^3\text{He} \rightarrow {}^3\text{H} + \nu_{\mu}$.⁴ В эксперименте была использована диффузионная камера, наполненная тщательно очищенным от трития ${}^3\text{He}$. Впервые наблюдалась отдача от мюонного нейтрино, что позволило определить верхний предел массы этой частицы. Опыт подтвердил тождественность мюона и электрона в слабом взаимодействии ($\mu - e$ -универсальность).

¹ Прокошкин Ю.Д. и др. Диплом № 135 (1973). Приоритет от 8.06.1955.

² Понтекорво Б.М. // ЖЭТФ. 1959. Т. 37. С. 1751.

³ Биленький С. М., Понтекорво Б.М. Избр. тр. М.: Наука. Физматлит, 1997. Т. 1. С. 6.

⁴ Понтекорво Б.М. и др. // ЖЭТФ. 1963. Т. 45. С. 1803; ПТЭ. 1964. Т. 1. С. 69.



Впервые наблюдавшийся «автограф» мюонного нейтрино
Снимок сделан в диффузионной камере высокого давления

В экспериментах В.П.Джелепова и др. по захвату мюонов протонами с использованием газовой водородной мишени с давлением 40 атм была определена вероятность процесса $\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$. Полученные результаты подтвердили справедливость $V-A$ -варианта и универсальность слабого взаимодействия¹.

С рекордной точностью в чисто лептонном процессе $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$ определено время жизни мюона ($\tau_{\mu^+} = 2,19711 \pm 0,00008$ мкс) – это важно для более строгого вычисления константы слабого взаимодействия $g_\mu = (1,43544 \pm 0,00004) \cdot 10^{-49}$ эрг/см² и определения роли радиационных поправок в процессах слабого взаимодействия. Регистрация позитронов от исследуемого распада осуществлялась путем наблюдения вспышек черенковского излучения, возникавших от них в водяном 4π -детекторе².

Ц.Выловым с сотрудниками было проведено измерение спиральности электронного нейтрино от распада ^{152}Eu с помощью Ge(Li)-детектора. Получено значение $-0,87 \pm 0,10$, хорошо согласующееся с предположением о полной левой продольной поляризации нейтрино³.

В 1957 году 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 массы⁴. Важ-

¹ Джелепов В.П. и др. // ЖЭТФ. 1974. Т. 66. С. 43.

² Зинов В.Г. и др. // ЖЭТФ. 1974. Т. 67. С. 1631.

³ Вылов Ц.Д. и др. Препринт ОИЯИ Р6-84-148. Дубна, 1984.

⁴ Понтекорво Б.М. // ЖЭТФ. 1957. Т. 33. С. 549; 1958. Т. 34. С. 247.

ность 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 нейтрино от Солнца, эволюция звезд, взрывы сверхновых, проблема так называемой темной или скрытой материи, образование космических лучей сверхвысокой энергии и т.д.). После создания теории электрослабых взаимодействий поиск нейтринных осцилляций наряду с поиском безнейтринного двойного β -распада ядер является основным направлением современной нейтринной физики, поскольку в случае регистрации этих эффектов они позволяют определить все свойства нейтрино (дираковские или майорановские массы и смешивание), а также имеют ключевое значение для современной теории элементарных частиц, астрофизики и космологии.

Физики лаборатории с 1989 года проводят два совместных с ИФВЭ (Протвино) и ЦЕРН эксперимента по поиску осцилляций нейтрино $\nu_e \rightarrow \nu_x$, $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ и $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ на установках «Нейтринный детектор ИФВЭ–ОИЯИ» и NOMAD (WA96)» (руководитель от ОИЯИ С.А.Бунятов). Было найдено, что в области больших значений Δm^2 ($>50 \text{ эВ}^2$) пределы на 90%-ном уровне достоверности для амплитуды и вероятности ($\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$)-осцилляций равны $\sin^2 2\Theta_{\nu\nu\tau} < 3,3 \cdot 10^{-4}$ и $P_{\nu_\mu\nu\tau} < 1,63 \cdot 10^{-4}$, аналогично пределы для амплитуды и вероятности ($\nu_e \rightarrow \nu_\tau$)-осцилляций при больших Δm^2 имеют значения $\sin^2 2\Theta_{\nu e\nu\tau} < 1,5 \cdot 10^{-2}$ и $P_{\nu e\nu\tau} < 0,74 \cdot 10^{-2}$, а полученные результаты по поиску осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ полностью исключают интерпретацию коллаборации LSND (США) о возможном измерении ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$)-осцилляций при $\Delta m^2 > 10 \text{ эВ}^2$.¹

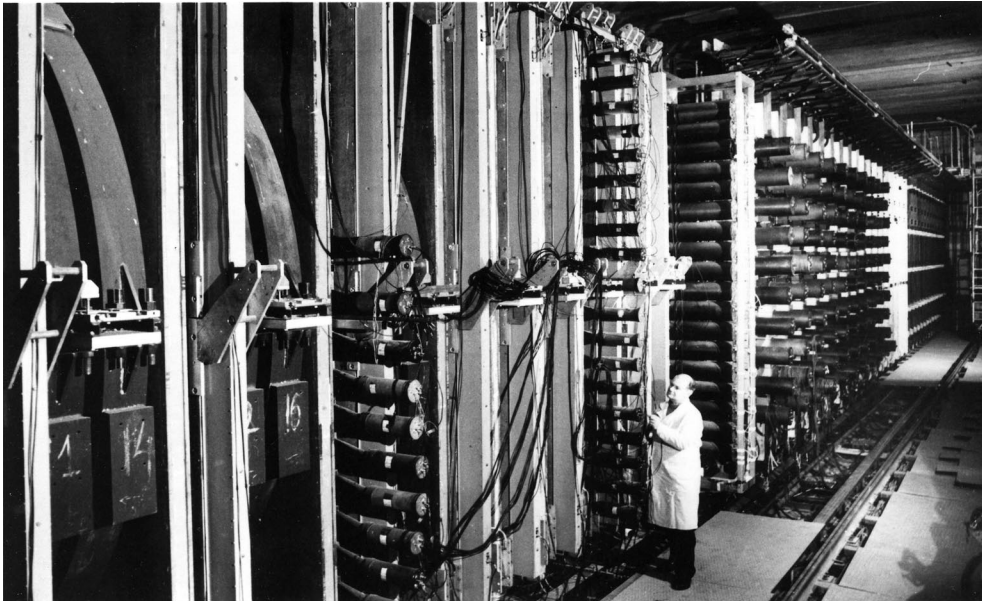
Помимо поиска осцилляций на этих установках выполняется широкая программа исследований взаимодействия нейтрино с веществом. В экспериментах на ускорителе У-70 (Протвино) получены наиболее точные данные о сечениях взаимодействия мюонных нейтрино и антинейтрино по каналу заряженного тока в интервале энергий $3 \div 30 \text{ ГэВ}$. Полученные на «Нейтринном детекторе ИФВЭ–ОИЯИ» результаты измерения полных сечений взаимодействия нейтрино с нуклонами определенно указывают на отклонение от линейной зависимости между полным сечением и энергией мюонного нейтрино в интервале $3 \div 15 \text{ ГэВ}$ ($\sigma_T/E_\nu \neq \text{const}$).

Измерено полное сечение образования очарованных частиц в протон-нуклонных взаимодействиях при 70 ГэВ («beam-dump» эксперимент). Величина сечения определялась по выходам прямых нейтрино, образованных в распадах очарованных частиц, и было установлено, что в околопороговой области энергий оно составляет $\sigma(pN \rightarrow c\bar{X}) = 0,9 \pm 1,1 \text{ мкб/нуклон}$. Эта величина является лучшей оценкой сечения образования очарованных частиц в этой области энергий и согласуется с теоретическими расчетами на основе квантовой хромодинамики.

Данные по измерению дифференциальных сечений взаимодействий ν_μ и $\bar{\nu}_\mu$ с нуклонами по каналу заряженного тока использовались для определения структурных функций нуклона в области относительно малых значений квадрата переданного импульса Q^2 ($0,55 < Q^2 < 4 \text{ ГэВ}^2/c^2$). Анализ структурной функции $x_B F_3$, выполненный во втором порядке КХД с учетом вклада высших твистовых поправок НТ (High Twist), позволил оценить величину константы сильного взаимодействия² $\alpha_s(M_z) =$

¹ Бунятов С.А. и др. // Phys. Lett. 2003. V. B570. P. 19.

² Бунятов С.А. и др. // ЯФ. 1994. Т. 57. С. 2050; 1997. Т. 60. С. 1045; Eur. Phys. J. 1999. V. C10. P. 405.



Установка для исследований в области физики нейтрино —
«Нейтринный детектор ИФВЭ–ОИЯИ»

$0,123^{+0,010}_{-0,013}$, которая хорошо согласуется с измерениями, выполненными на Z -пике (LEP и SLC), с результатами коллаборации CCFR, а также с анализом данных дубненской мюонной коллаборации.

В эксперименте NOMAD¹ получены важные данные о поляризации Λ^0 -гиперонов в нейтринных взаимодействиях $\nu_{\mu} N \rightarrow \mu^{-} \Lambda^0 X$. Было проанализировано $15075 k_s^0$, $8087 \Lambda^0$ и $649 \bar{\Lambda}^0$ случаев рождения, что на порядок больше, чем во всех прежних нейтринных экспериментах. Продольная поляризация Λ^0 -гиперонов измерена 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 $c_u^{\Lambda} = -P_x$. 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.). Полученные 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.

Весомый вклад в исследования физики нейтрино внесла группа ученых лаборатории (руководитель А.Г.Ольшевский) в сотрудничестве с DELPHI. Первостепенное значение как для физики частиц, так, особенно для астрофизики, несомненно, име-

¹ Бунятов С. А. и др. // Phys. Lett. 2003. V. B570. P. 19.

ет убедительное доказательство существования только трех поколений легких нейтрино ν_e , ν_μ и ν_τ ($m_\nu < 45 \text{ ГэВ}/c^2$), $N_\nu = 2,9841 \pm 0,0083$ и измерение с высокой точностью эффективного угла смешивания $\sin^2\Theta_{eff}^{lept} = 0,23152 \pm 0,00017$.¹

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 Лаборатории ядерных проблем — искать новые явления на границе между известным и еще непознанным.

В экспериментах на синхроциклотроне и фазотроне лаборатории с помощью 4π -магнитного спектрометра с 18 искровыми пропорциональными цилиндрическими камерами (установка АРЕС)² было достигнуто рекордное (в десятки раз более жесткое, чем полученное где-либо ранее) ограничение $R < 3,6 \cdot 10^{-11}$ на вероятность распада по каналу $\mu \rightarrow 3e$, а в опытах физиков этой группы на аналогичной установке в PSI (Цюрих) это ограничение доведено до $R < 1,1 \cdot 10^{-12}$. Таким образом, пока нарушения закона сохранения лептонных чисел в такого сорта процессах не обнаружено.

В 1957 году Б.М.Понтекорво высказал идею о возможном существовании переходов мюония (атома, состоящего из двух лептонов, $M \equiv \mu^+e^-$) в антимюоний ($e^+\mu^-$).³ 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 фазотроне ЛЯП в 1993 году в совместном ЛЯП ОИЯИ–ПИЯФ (Гатчина) эксперименте по поиску $\mu^+e^- \rightarrow \mu^-e^+$ была установлена граница вероятности перехода $M \rightarrow \bar{M}$: $P < 4,7 \cdot 10^{-7}$, что соответствовало $G_{MM} \leq 0,14 G_F$.⁴ В дальнейшем международная коллаборация «Мюоний-антимюоний» провела с участием сотрудников ЛЯП (руководитель С.М.Коренченко) в PSI другой эксперимент по поиску $M \rightarrow \bar{M}$ -переходов. Полученные данные позволили установить новое ограничение на верхнюю границу вероятности этого перехода $P_{M\bar{M}} \leq 2,3 \cdot 10^{-10}$, а соответствующее ограничение на величину константы связи для переходов $M \rightarrow \bar{M}$ — $G_{M\bar{M}} \leq 3 \cdot 10^{-3} G$.⁵ Полученное значение $G_{M\bar{M}}$ позволяет исключить некоторые модели и дает новые ограничения на параметры ряда других.

Физика нейтрино и слабых взаимодействий посредством исследования редких процессов теснейшим образом граничит с областью так называемой новой физики за рамками Стандартной Модели. Основной интерес исследователей лежит в сфере поиска новых, неизвестных ранее процессов и закономерностей, противоречащих господствующим теоретическим представлениям. Наиболее многообещающие построения за рамками Стандартной Модели базируются на идеях суперсимметрии, которые разрешают ряд общих проблем теории, таких как проблема иерархии массовых масштабов, и дают возможность осуществить объединение всех взаимодействий, вклю-

¹ Ольшевский А.Г. Диссертация. 1-2002-256. Дубна: ОИЯИ, 2002.

² Коренченко С.М. и др. // ЯФ. 1991. Т. 53. С. 1302.

³ Понтекорво Б.М. // ЖЭТФ. 1957. Т. 33. С. 549.

⁴ Савченко О.В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1993. Т. 57. С. 262; 1994. Т. 59. С. 565.

⁵ Коренченко С.М. // Nucl. Phys. 1995. V. 338. P. 973.

чая 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. 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 качестве примера поиска необычного явления, предсказанного еще П.Дираком, физики ЛЯП (руководитель В.П.Зрелов)¹ выполнили тонкий опыт на У-70 ИФВЭ по поиску магнитных монополей Дирака с помощью оригинального метода, основанного на различии поляризации черенковского излучения 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. Этот эксперимент можно расценивать как одну из первых попыток сотрудников лаборатории 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 (CERN) 183 и 189 ГэВ. Это позволило установить новые ограничения на интенсивность контактного взаимодействия фермионов, на параметры нарушения R -четности в процессе обмена снейтрино, на массы Z' -бозонов и вероятность существования гравитационного взаимодействия за счет так называемых дополнительных размерностей. В случае обмена снейтрино с нарушением R -четности лептонная константа связи суперпотенциала $\lambda > 0,1$ исключается для масс $m_{\bar{\nu}}$ в области 130 \div 190 ГэВ для всех лептонных конечных состояний на 95%-ном уровне достоверности. Исключаются дополнительные Z' -бозоны, массы которых не превышают 300 ГэВ/ c^2 (95% у.д.). Нижние пределы в 542 и 680 ГэВ (95% у.д.) получены для масштаба струны M_s в гравитационных моделях с дополнительными размерностями, соответственно, для $\mu^+\mu^-$ - и $\tau^+\tau^-$ -конечных состояний².

С целью поиска запрещенного в Стандартной Модели чисто лептонного распада очарованного мезона по каналу $D^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ в рамках сотрудничества BEATRICE (WA91 CERN) был предпринят анализ данных с Ω -спектрометра. На основе анализа $1,25 \cdot 10^5$ $\mu^+\mu^-$ -пар, образовавшихся во взаимодействиях 350 ГэВ π^- -мезонов с медной и вольфрамовой мишенями, установлена верхняя граница (90% у.д.) вероятности этого распада ($D^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$) = $7,6 \cdot 10^{-6}$.³

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 (руководители Ц.Вывлов и В.Б.Бруданин) в подземной (на глубине, соответствующей защите в 4800 м водного эквивалента) низкофоновой лаборатории Фрежюс (Франция) в настоящее время создан крупный спектрометр NEMO-3 с целью поиска безнейтринной и двухнейтрин-

¹ Зрелов В.П. и др. // Czech. J. Phys. B. 1976. V. 26. P. 1306.

² Ольшевский А.Г. и др. // Phys. Lett. B. 2000. V. 479. P. 89; ЭЧАЯ. 2003. Т. 34. С. 1091.

³ Русакович Н.А. и др. // Phys. Lett. B. 1995. V. 353. P. 563.



У рабочего макета установки для исследования электрон-нейтринных угловых корреляций в бета-распаде Ш.Бриансон, В.Б.Бруданин

ной мод двойного β -распада ($2\beta 0\nu$) ядер ^{100}Mo , ^{130}Te , ^{82}Se , ^{150}Nd , ^{96}Zr , ^{48}Ca (масса изотопически обогащенных образцов ~ 10 кг) и измерений эффективной майорановской массы нейтрино (m_ν) на уровне $0,1$ эВ.¹ Эта установка является дальнейшим развитием спектрометра NEMO-2, на котором (1993–1997 гг.) для безнейтринной моды двойного β -распада получена нижняя граница на время полураспада 10^{21} лет.

Интерес к измерению $2\beta 0\nu$ -распада, запрещенного в Стандартной Модели (СМ), сейчас существенно повысился в связи с тем, что найдены новые механизмы этого процесса, реализующиеся в суперсимметричных моделях. При определенных условиях новые механизмы абсолютно доминируют в этом процессе. Расчеты показали², 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.

Исследованию β -нейтринных угловых корреляций при сверхразрешенных β -распадах короткоживущих ядер посвящен проект AnCor³. Фундаментальная цель этого проекта состоит в прецизионном измерении в процессах β -распада и μ -захвата констант связи скалярного и тензорного слабого взаимодействий, которые запрещены в СМ. В рамках этого совместного (ЛЯП ОИЯИ–Франция) проекта на тандемном ускорителе Института физики в Орсе с помощью многодетекторной установки (14 Si(Li) позитронных и 2HPGe γ -детекторов) исследованы электрон-нейтринные

¹ Vylov Ts., Brudanin V.B. et al. // Nucl. Phys. A. 2000. V. 678. P. 341.

² Kovalenko S.G. et al. // Phys. Lett. B. 1996. V. 372. P. 181.

³ Egorov V.G. // Nucl. Phys. A. 1997. V. 621. P. 745.

угловые корреляции в процессе β -распада ^{18}Ne , образованного в реакции $^{16}\text{O}(^3\text{He}, n)^{18}\text{Ne}$. Полученные результаты соответствуют векторному варианту слабого взаимодействия. Из анализа данных извлечен верхний предел для величины эффективной скалярной константы связи слабого взаимодействия $C_s/C_v \leq 0,26$ (95% уд.). Измерение угловой корреляции между импульсами нейтрино и позитрона осуществлялось путем прецизионной γ -спектроскопии за счет доплеровского сдвига γ -квантов, сопровождающих β -распад.

Прецизионное измерение уширения γ -линии (277 кэВ) в результате захвата мюона газообразным кислородом $\mu^- + ^{16}\text{O} \rightarrow \nu_\mu + ^{16}\text{N}^{*} \rightarrow ^{16}\text{N}^* + \gamma$ выполнено сотрудниками ЛЯП на пучке $\mu\text{E4 PSI}$ (Швейцария)¹. Доплеровское уширение данной линии излучения чувствительно к возможному вкладу скалярного взаимодействия в процессе ядерного захвата мюона. Хотя в СМ 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 экспериментальных данных, полученных при захвате мюона. Из формы γ -линии найден коэффициент γ -нейтринной корреляции $a_2^1 = 0,096 \pm 0,041$ (95% уд.), откуда получена оценка константы связи $-0,25 < C_s < -0,07$ слабого скалярного взаимодействия, запрещенная в стандартной $V-A$ -модели. Имеющаяся неопределенность в получении этой константы обусловлена недостаточной точностью знания ядерных матричных элементов.

В сотрудничестве физиков ЛЯП (руководитель С.М.Коренченко) и ученых из Швейцарии, США, Польши, Грузии и Хорватии на пучке пионов «Мезонной фабрики» PSI (Швейцария) была создана оригинальная установка RIBETA – шарообразный спектрометр полного поглощения на кристаллах из чистого CsI в комплексе с тонкостенными цилиндрическими пропорциональными камерами и цилиндрическим сцинтилляционным годоскопом. Целью исследований на этой установке является прецизионное измерение радиационных распадов положительных π -мезонов и мюонов по каналам: $\pi^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$, $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$, $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \gamma$ и $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu \bar{\nu} \gamma$ со статистикой, превышающей современную мировую на два порядка. Измеренные на этой установке экспериментальные данные позволят с рекордной точностью проверить справедливость гипотезы универсальности заряженного кварк-лептонного тока, а также оценить степень универсальности матрицы смешивания Кабиббо–Кобаяси–Маскава (с возможным проявлением новой физики за пределами Стандартной Модели (СМ) электрослабого взаимодействия).

В настоящее время коллаборацией RIBETA получено значение вероятности β -распада пиона, равное $BR_{\text{эксп.}} = 1,038 \pm 0,004$ (стат.) $\pm 0,007$ (сист.) $\cdot 10^{-8}$, что хорошо согласуется с расчетами по СМ – $BR_{\text{теор.}} = 1,038 \div 1,041 \cdot 10^{-8}$ (90% С.Л.).

На основе анализа 50 тысяч событий радиационного распада пиона ($\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \gamma$), в которых регистрируемые частицы разлетаются в противоположные полусферы с энергиями $E_{\gamma, e} > 52$ МэВ, получено значение аксиального формфактора пиона

¹ Egorov V.G. // Nucl. Phys. A. 2002. V. 699. P. 917.

$F_A = 0,0123(4)$. Это значение также хорошо совпадает с результатами расчетов по модели с киральным лагранжианом.

Однако анализ 5233 событий $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \gamma$ распада в области фазового пространства, где наиболее отчетливо могло бы проявиться, по оценкам теоретиков, гипотетическое тензорное взаимодействие, показал, что полученное в опыте распределение позитронов и γ -квантов по углам и энергиям действительно невозможно описать в рамках СМ. И только при наличии небольшой примеси тензорного взаимодействия, характеризуемой формфактором $F_T = -0,0022(4)$, это удастся сделать.

Таким образом, впервые в этом эксперименте обнаружен эффект, выходящий за рамки Стандартной Модели электрослабых взаимодействий¹.

В Лаборатории ядерных проблем постоянно проводится широкий круг прикладных исследований. Прежде всего, она явилась колыбелью нового научного направления в исследовании структуры материи — так называемой мезонной химии. Цель этого направления состоит в разработке принципиально новых методов изучения электронной структуры вещества и кинетики химических реакций. Исходной базой для развития этих исследований послужили открытия в лаборатории явлений перезарядки отрицательных π -мезонов на химически связанном водороде², установление влияния химического строения вещества на мезорентгеновские спектры, а также свойства одноэлектронных атомов в кристаллических полупроводниках быть глубокими донорами³.

Физиками лаборатории установлено неизвестное ранее явление изменения относительной интенсивности рентгеновских линий К-серии μ -мезоатома, обусловленное захватом мюонов на молекулярные уровни при вступлении химического элемента в реакцию⁴.

При исследовании захвата мюонов ядрами впервые обнаружено резонансное поглощение отрицательных мюонов атомными ядрами, что свидетельствует о коллективном возбуждении ядер в этом процессе⁵.

Сотрудниками ЛЯП проведены эксперименты по выяснению основных особенностей поведения мюония в веществе⁶.

С помощью наблюдения релаксации спина мюона в конденсированных средах (μSR -метод) на мюонных пучках фазотрона выполняется широкая программа по изучению свойств твердого тела. В большей мере это относится к изучению магнитных свойств различных высокотемпературных сверхпроводников: исследовались внутренние магнитные поля, что сделать другими методами не удастся, а также определялась температурная зависимость глубин проникновения поля. Значительный цикл работ выполнен по исследованию криожидкостей и криокристаллов⁷.

Значительное место в лаборатории занимают работы по применению протонных пучков для лечения злокачественных опухолей, которые проводятся совместно с вра-

¹ *Korenchenko S.M. et al. hep-ex/0312029; hep-ex/0312030. 2003.*

² *Прокошкин Ю.Д. и др. Диплом № 164 (1975). Приоритет от 04.04.1962.*

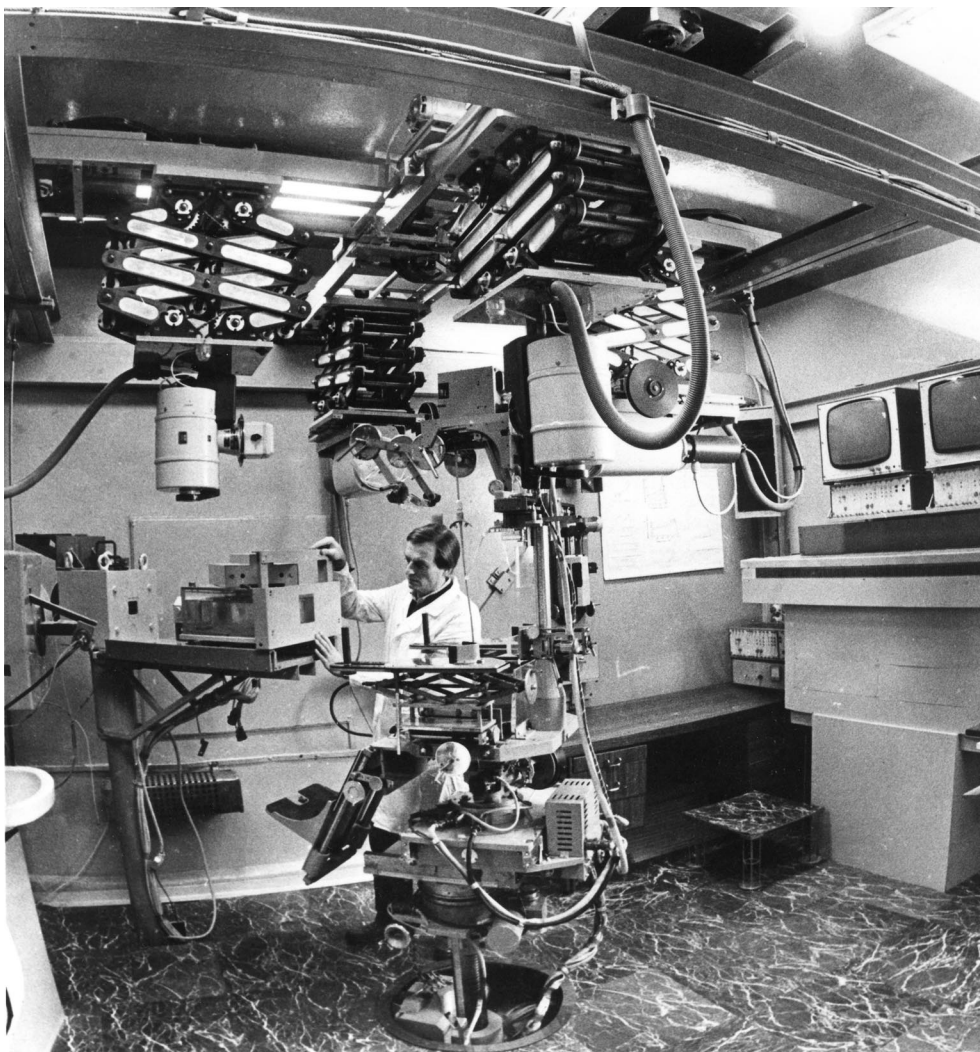
³ *Роганов В.С. и др. Диплом № 259 (1982). Приоритет от 12.12.1969.*

⁴ *Зинов В.Г. и др. Диплом № 201 (1978). Приоритет от 01.03.1965.*

⁵ *Евсеев В.С. и др. Диплом № 173 (1976). Приоритет от 22.10.1963.*

⁶ *Роганов В.С. и др. Диплом № 161 (1975). Приоритет от 3.11.1965.*

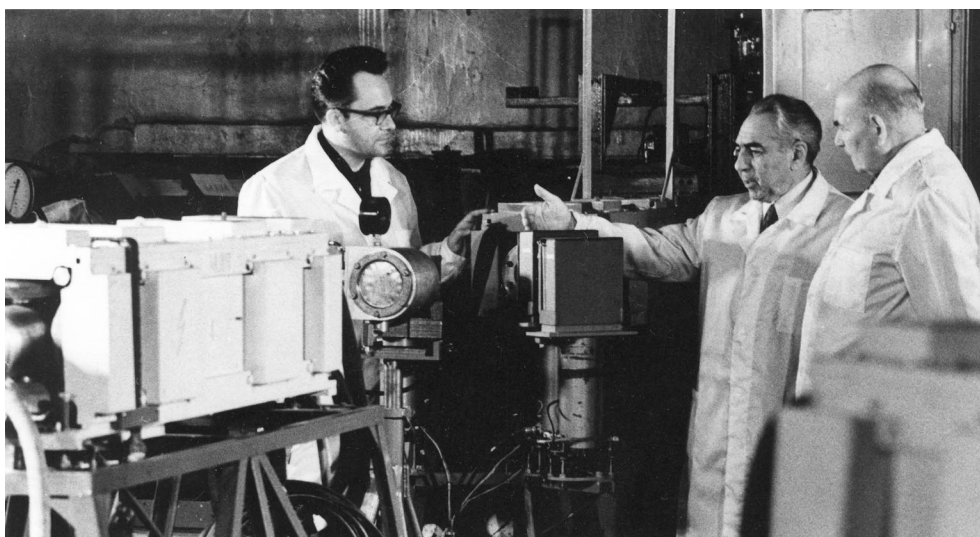
⁷ *Жуков В.А. и др. Диплом № 268 (1982). Приоритет от 18.04.1972.*



Клинико-физический комплекс ОИЯИ

чами-радиологами Российского онкологического центра (руководители В.П.Джелепов и О.В.Савченко). На пучках фазотрона создан специальный клинико-физический комплекс, включающий семь кабин для облучения опухолей: для облучения отрицательными пионами, для облучения нейтронами высоких энергий большими резистентными опухолями, для облучения с помощью терапевтической гамма-установки и четыре — для облучения в протонных пучках¹. В содружестве с Институтом медико-биологических проблем под руководством В.П.Джелепова на синхротронном ЛЯП осуществлена большая программа биофизических исследований, связанных

¹ Савченко О.В. Препринт ОИЯИ У18-96-124. Дубна, 1996.



Создатели медицинского пучка О.В.Савченко, В.П.Джелепов и А.И.Рудерман

с выяснением условий радиационной безопасности полетов человека на космических кораблях.

Была выполнена программа радиохимических исследований по получению радионуклидов для ядерной диагностики различных заболеваний совместно с учеными ГДР, НРБ, СРВ (руководитель В.А.Халкин). На пучках ускорителя ЛЯП изучаются вопросы устойчивости материалов в сильных полях излучений.

В 1977 году в лаборатории был организован специальный сектор биологических исследований (в настоящее время преобразован в крупный отдел ОИЯИ), в котором установлены важные закономерности летального действия ионизирующих излучений с различными характеристиками на клетки бактерий, дрожжей и млекопитающих (руководитель Е.А.Красавин).

Сотрудниками ЛЯП внесен большой вклад в развитие *методики физического эксперимента и методов регистрации частиц*. Исследования в этой области успешно развивались с первых лет создания лаборатории благодаря стимулирующему влиянию и прямой поддержке научного руководства В.П.Джелепова, М.С.Козодаева, Л.И.Липидуса, М.Г.Мещерякова и Б.М.Понтекорво. Под влиянием старших руководителей в ЛЯП создалась 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.

Метод управляемого импульсного питания газоразрядных детекторов частиц, впервые предложенный и осуществленный А.А.Тяпкиным¹, явился основой дальнейшего развития методики искровых и стримерных камер, открывшей большие перспективы изучения новых процессов на ускорителях. Он позволил сочетать широкоапертурную возможность быстродействующих сцинтилляционных счетчиков с де-

¹ Тяпкин А.А., Вишняков В.В. // АЭ. 1957. Т. III. С. 298.

тальным исследованием редких процессов с помощью годоскопических систем из нескольких сотен гейгеровских счетчиков.

Важный шаг в развитии целого направления был сделан в ЛЯП А.Ф.Писаревым¹, который впервые исследовал разряд в искровой камере увеличенного разрядного промежутка. Эти опыты легли в основу крупнейшего достижения физиков – создание широкоазорных стримерных камер.

В лаборатории осуществлен новый режим работы стримерных камер – «режим шамунтирования», обеспечивающий большую яркость свечения и хорошую локализацию треков. Были разработаны как водородная, так и гелиевая стримерные камеры и создан магнитный спектрометр высокой эффективности².

Новый способ регистрации частиц – координатный пропорциональный счетчик, предложенный и осуществленный под руководством В.Г.Зинова, получил широкое распространение в практике физического эксперимента³.

Важнейшим научно-техническим достижением ЛЯП стало создание под руководством Г.И.Селиванова первой в ОИЯИ пузырьковой жидководородной камеры⁴.

Развитие криогенной техники в лаборатории 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 впервые в мире глубокого охлаждения методом растворения жидкого гелия-3 в жидком гелии-4.⁵ На базе разработанного метода с использованием специально подобранных органических веществ с высоким содержанием водорода или дейтерия были созданы уникальные по своим параметрам мишени нового типа, в которых замороженные ядра протонов и дейтронов сохраняли длительное время (до тысячи часов) высокую поляризацию, близкую к 100%, выдерживая значительную тепловую нагрузку ~10 МВт. За эти работы в области низких температур Б.С.Неганову была присуждена премия им. М.В.Ломоносова.

В лаборатории созданы проволочные дрейфовые камеры, работающие в сильно-точном самогасящемся режиме, при высоких нагрузках $\sim 3 \cdot 10^6$ имп./с и высоких давлениях, дающие сигнал, на два порядка превышающий по амплитуде сигналы от пропорциональных камер⁶; разработаны широкоазорные дрейфовые камеры с хорошим пространственным разрешением ($\sim 0,2$ мм) и высокой эффективностью, а также узкоазорные так называемые «мини-дрейфовые» камеры с рекордным пространственным разрешением 60 мкм⁷; созданы и широко используются в экспериментах пропорциональные проволочные камеры, работающие в пучках высокой интенсивности с плотностью $10^7 \div 10^8$ с⁻¹·см⁻². Размеры камер 350×350 мм² с временным разрешением на полувысоте 5 нс.⁸

¹ Pisarev A.Ph. et al. // Nucl. Inst. Meth. 1963. V. 20. P. 201.

² Щербаков Ю.А., Пираджано Г. и др. // Nucl. Inst. Meth. 1975. V. 125. P. 157; 1985. V. 234. P. 30.

³ Зинов В.Г. и др. // ЖЭТФ. 1970. Т. 58, вып. 1. С. 104.

⁴ Селиванов Г.И. и др. // ПТЭ. 1962. № 5. С. 51.

⁵ Неганов Б.С. и др. // ЖЭТФ. 1966. Т. 50. С. 1445; Вестник АН СССР. 1968. Т. 12. С. 49; ПТЭ. 1978. № 2. С. 15.

⁶ Хазинс Д.М. и др. // ЭЧАЯ. 1982. Т. 13. С. 703; ПТЭ. 1985. № 2. С. 52.

⁷ Будагов Ю.А. и др. // NIM. 1987. A. V. 255. P. 493; V. 260. P. 142.

⁸ Залиханов Б.Ж. и др. // ICP/COSY Annual Report. F2. Yulich, 1998; ЭЧАЯ. 1998. Т. 29. С. 1194.



Лауреат премии им. М.В.Ломоносова доктор физико-математических наук
Б.С.Неганов (справа) и директор ЛЯП член-корреспондент
АН СССР В.П.Джелепов

Для исследований с частицами и γ -квантами малых энергий в лаборатории созданы высокочувствительные прецизионные полупроводниковые детекторы на основе сверхчистого германия¹.

Эффективные методы получения высокоактивных препаратов редкоземельных элементов для ядерной спектроскопии были разработаны в ЛЯП под руководством В.А.Халкина².

Электронные детекторы регистрации частиц могли быть созданы и внедрены в физические исследования лаборатории только при параллельном развитии передовых методов современной электроники.

В 1965 году по решению В.П.Джелепова был образован общий отдел для централизованного решения задач ядерной электроники, основная цель которого заключалась в создании новой электронной аппаратуры широкого профиля для проводимых на синхротроне ЛЯП физических экспериментов. Были разработаны: 1) системы логической аппаратуры наносекундного диапазона для отбора полезных событий; 2) системы спектрометрической аппаратуры для амплитудного и временного анализа зарегистрированных сигналов; 3) аппаратура для накопления и предварительной обработки получаемой информации с последующей передачей ее на ЭВМ, а также решена задача по созданию лабораторного вычислительного центра.

За разработки электронных блоков на основе международного стандарта КАМАК и за организацию производства аппаратуры для систем автоматизации научных ис-

¹ Вывод Ц.Д., Осипенко Б.П. и др. // Рабочее совещ. 1972. ОИЯИ. 13-7098. Дубна, 1998. С. 32.

² Халкин В.А. и др. // J. Rad. An. Nucl. Art. 1985. V. 88. P. 153; Радиохимия. 1984. № 2. С. 210.

следований руководителю отдела А.Н.Синаеву была присуждена премия Совета Министров СССР и вручена медаль (1985, № 01845)¹. Разработки отдела тиражировались в тысячах экземпляров в ОП ОИЯИ и использовались в многочисленных институтах стран-участниц, включая Россию.

В отделе ядерной спектроскопии и радиохимии ЛЯП под руководством К.Я.Громова был создан комплекс измерительной и накопительной аппаратуры, непосредственно связанной с ЭВМ. Он включал системы для многомерных измерений, автомат для обработки фотопластинок от магнитных спектрографов, а также блок программного обеспечения для обработки и анализа спектрометрической информации и экспрессные программы анализа спектров². Опыт проведенной автоматизации спектрометрических измерений широко распространился в аналогичных лабораториях России и других стран-участниц ОИЯИ.

Особо следует отметить научно-просветительскую деятельность в области методики регистрации частиц, широко развернутую научными сотрудниками ЛЯП.

Ю.К.Акимов написал и издал первую в нашей стране монографию о сцинтилляционных счетчиках в годы, когда эта методика быстродействующих детекторов становилась основной в исследованиях по физике высоких энергий, проводимых на современных ускорителях³. Он также участвовал в написании монографии под его редакцией, посвященной полупроводниковым детекторам, а за использование методики полупроводниковых счетчиков в цикле важнейших экспериментов по исследованию упругого дифракционного рассеяния протонов на малые углы Ю.К.Акимову вместе с коллективом ученых из ЛВЭ в 1983 году была присуждена Государственная премия СССР.

Итоги разработок прецизионных методов исследований спектров ядерных излучений с помощью полупроводниковых детекторов, выполненных сотрудниками лаборатории под руководством Ц.Вылова, просуммированы в монографии⁴, которая до настоящего времени является наиболее полным изложением этой методики и является настольной книгой специалистов России и других стран-участниц ОИЯИ.

Широко известная в мире двухтомная монография В.П.Зрелова, переведенная на английский язык, посвящена результатам исследований открытого российскими учеными излучения Вавилова—Черенкова и методике его применения в физике частиц высоких энергий⁵.

Введенный в Лаборатории ядерных проблем термин «мезооптика» получил одобрение на XIII конгрессе Международной комиссии по оптике (Саппоро, Япония, 1984 г.). В настоящее время мезооптикой называют раздел оптики, в котором изучают свойства и применение в науке, промышленности и медицине конических волновых полей. В 1996 году была опубликована монография Л.М.Сороко⁶, в которой рас-

¹ Синаев А.Н. // Nucl. Elek. III. Viena, 1962. P. 287.

² Громов К.Я. и др. // Прикладная ядерная спектроскопия. 1982. Вып. 11. С. 102; 1983. Вып. 12. С. 3; Nucl. Inst. Meth. A. 1997. V. 385. P. 492.

³ Акимов Ю.К. Сцинтилляционные методы регистрации частиц. М.: Изд-во МГУ. 1963; Academic Press, 1965; Атомиздат, 1967.

⁴ Вылов Ц.Д. Спектры излучений радиоактивных нуклидов. Ташкент: ФАН. 1981.

⁵ Зрелов В.П. Излучение Вавилова—Черенкова и его применение в физике высоких энергий. М.: Атомиздат, 1962. Т. 1, 2.

⁶ Сороко Л.М. Mesooptics. Foundations and Applications. Singapore: World Scientific, 1996.

смотрены различные мезооптические элементы, гравитационные линзы, мезооптические микроскопы для физики частиц высокой энергии, устройства для транспортировки синхротронного излучения, а также описание истории мезооптики.

Теоретические исследования лаборатории

Отличительной особенностью работы теоретиков ЛЯП является тесная связь их научных интересов с широким кругом проводимых в лаборатории экспериментальных исследований. Эта традиция, несомненно, восходит своими корнями к тем временам, когда в Дубне еще не было и в помине специализированной Теоретической лаборатории. В целях выработки программы наиболее актуальных и перспективных ядерно-физических исследований на дубненском ускорителе, а также подготовки на высоком уровне молодых физиков И.В.Курчатов поручил четырем известным теоретикам И.Я.Померанчуку, Я.А.Сморозинскому, А.Б.Мигдалу и Б.Т.Гейликману читать в Дубне лекции по теории элементарных частиц и атомного ядра, участвовать в работе научных семинаров, обсуждать с экспериментаторами намечаемые исследования и оказывать помощь в интерпретации полученных результатов. Им поручалось также руководство работами молодых тогда еще и самых первых дубненских теоретиков (Л.И.Липидус, В.Г.Соловьев, Б.М.Барбашов, Н.А.Черников, С.М.Биленький, Р.М.Рындин и др.).

Теоретические исследования в ЛЯП можно разделить на несколько этапов или направлений. Начало первого этапа связано с именами Льва Иосифовича Липидуса и Бруно Максимовича Понтекорво.

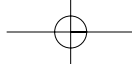
Большой цикл работ был посвящен разработке проблемы изотопической инвариантности сильных взаимодействий. Предложен и выполнен эксперимент (на синхротроне ЛЯП) по проверке этого фундаментального закона с помощью исследования запрещенной законом сохранения изотопического спина реакции $d + d \rightarrow {}^4\text{He} + \pi^0$. Изучены сечения взаимодействия и поляризационные явления в ряде процессов при высоких энергиях. Предсказан процесс двойной перезарядки каонов (Л.И.Липидус).

В 1957 году было введено и теоретически всесторонне развито понятие «полного опыта», необходимое для однозначного определения амплитуды взаимодействия между различными сильновзаимодействующими частицами (Я.А.Сморозинский, Р.М.Рындин, Л.И.Липидус, С.М.Биленький и др.).

Указаны и теоретически обоснованы пути проверки C -, P - и T -инвариантности сильных взаимодействий в экспериментах при высоких энергиях с поляризованными частицами (Л.И.Липидус, С.М.Биленький и др.).

В связи с обширной программой экспериментов по исследованию взаимодействия частиц высокой энергии с ядрами предложен и развит метод, обобщающий известную глауберовскую модель (А.В.Тарасов).

Развита основанная на дисперсионных соотношениях теория рассеяния γ -квантов нуклонами в широкой области энергий. Установлена зависимость знака амплитуды распада нейтрального пиона на два γ -кванта от модели взаимодействия. Получены правила сумм для магнитного и электрического дипольного моментов нуклона. Впервые дана теоретическая оценка магнитной поляризуемости протона (Л.И.Липидус и др.).



На основе анализа данных об упругом и неупругом $\mu(e)p$ -взаимодействиях получена важная информация о формфакторах нуклонов. Предложены новые опыты, необходимые для значительного уточнения сведений о мюон-электронной универсальности на малых расстояниях и проверки гипотезы скейлинга для структурных функций протона (Л.И.Лапидус, С.М.Биленький и др.).

Была показана важная роль электромагнитного взаимодействия в поляризационном рассеянии барионов на малые углы — интерференция кулоновского (электромагнитного) и ядерного (сильного) взаимодействий. Эта интерференция приводит к значительным эффектам в упругом рассеянии мезонов и нуклонов протонами и атомными ядрами, а также в процессах дифракционной диссоциации частиц. Впервые было указано на незатухание поляризации, обусловленной этим эффектом при возрастании энергии частиц, что в дальнейшем позволило осуществлять измерение поляризации пучков частиц высоких и сверхвысоких энергий (Л.И.Лапидус, Б.З.Копелиович и др.). Выводы всех этих работ в сильной степени стимулировали проведение соответствующих экспериментальных исследований физиками нашей лаборатории и многих других институтов.

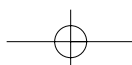
Обнаруженный на ускорителях Серпухова и ЦЕРНа рост полных сечений взаимодействия адронов был впервые объяснен на основе идеи «подкритического» померона, интерсепт которого превышает единицу (Л.И.Лапидус, Б.З.Копелиович и др.). Эта самосогласованная теоретическая схема, удовлетворяющая s/t -унитарности и сохранению энергии, получила подтверждение данными при более высоких энергиях и в настоящее время является общепринятой версией реджевской теории.

В 80-е годы выполнены очень важные работы по развитию кварк-партонной схемы сильных взаимодействий на основе КХД диполей на световом конусе (Л.И.Лапидус, Б.З.Копелиович и др.). Впервые было теоретически предсказано явление цветовой прозрачности ядерной материи для малых кварк-глюонных систем типа цветowych диполей, каковыми в КХД являются мезоны. Экспериментально это явление впервые обнаружено и изучено в ЛЯП при исследовании на установке «Гиперон» процессов перезарядки π^+ - и K^+ -мезонов с импульсом ~ 10 ГэВ/с в η -мезон.

Большой комплекс фундаментальных теоретических и экспериментальных исследований по физике слабых взаимодействий и физике нейтрино был выполнен в лаборатории академиком Б.М.Понтекорво и под его руководством.

В 1980 году была образована теоретическая группа (руководитель П.С.Исаев), целью которой было проведение исследований по проблемам глубоконеупругого взаимодействия лептонов с адронами при высоких энергиях.

Путем обобщения известной партонной модели Kuti-Weisskopf была предложена новая статистическая партонная модель с логарифмическим нарушенным скейлингом, которая была использована для получения функций распределения кварков и глюонов, а также для вычисления структурных функций нуклонов, измеряемых в процессах глубоконеупругого лептон-нуклонного рассеяния (П.С.Исаев, С.Г.Коваленко). В рамках данной модели удалось получить самосогласованные выражения для многочастичных партонных функций распределения, которые использованы в контексте разработки программы исследований на «Нейтринном детекторе ИФВЭ—ОИЯИ». Были изучены различные механизмы образования очарованных адронов как в адрон-адронных, так и нейтрино-нуклонных взаимодействиях, а также



естественным образом объяснен эффект лидирования очарованных мезонов, образующихся в пион-ядерных столкновениях (П.С.Исаев, С.Г.Коваленко, В.А.Бедняков, Ю.П.Иванов).

Исходя из статистических свойств модели, впервые введено понятие сингулярной компоненты глюонной функции распределения и указана процедура ее возможной регистрации в экспериментах по глубоконеупругому рассеянию при сверхвысоких энергиях. Впервые с учетом КХД-эволюции предложены самосогласованные распределения кварков и глюонов в пионе (С.Г.Коваленко, В.А.Бедняков).

В 1984–1985 годах на базе разработанной кварк-глюонной партонной модели в рамках КХД проведен тщательный анализ данных и впервые, вопреки принятым тогда представлениям о малости КХД параметра Λ , получено значение $\Lambda \sim 300$ МэВ, что было подтверждено впоследствии другими исследованиями.

В 1989 году сектор теоретических исследований возглавил Б.З.Копелиович. Им с соавторами был впервые проведен строгий расчет эффекта цветовой прозрачности в реакции электророждения векторных мезонов на ядрах. Эти предсказания успешно проверены в эксперименте HERMES, что позволило авторам эксперимента сделать заключение об обнаружении эффекта цветовой прозрачности.

Было обнаружено, что глюонное экранирование существенным образом зависит от вклада высших твистовых поправок, которые привносят в описание исследуемого процесса зависимость от массы тяжелого кварка и нарушают тем самым условие КХД факторизации.

Разработана новая модель кварк-глюонных струн, учитывающая продольное и поперечное движение кварков в адроне (ядре). Предложенная версия модели кварк-глюонных струн была применена к анализу неупругих взаимодействий лептонов с ядрами при высоких энергиях с учетом кварковой структуры ядра.

Исследованы свойства взаимодействий нейтрино с нуклонами, ядрами и веществом при небольших квадратах переданного четырехимпульса Q^2 . Обнаружено отклонение от СМ электрослабого взаимодействия при анализе экспериментальных данных NOMAD по множественному рождению адронов в неупругом рассеянии нейтрино (антинейтрино) на протонах при $Q^2 < 10$ ГэВ/c². Предложен новый подход к анализу процессов такого типа, учитывающий непертурбативные эффекты, связанные с однопомеронным обменом в t -канале, что позволило вполне удовлетворительно описать всю совокупность экспериментальных данных коллаборации NOMAD (Г.И.Лыкасов).

Исследованы эффекты азимутальной асимметрии в процессах рассеяния поляризованных частиц $\gamma Z \rightarrow e^+ e^- Z$ и $e^- Z \rightarrow e^- \gamma Z$ на ядрах. Экспериментальный спектр процесса $dd \rightarrow dX$ при $p_d = 3,5$ ГэВ/c был описан в предположении о доминировании в механизме данной реакции двух подпроцессов – $dd \rightarrow (d\pi)NN$ (эффект Дэка) и $dd \rightarrow d(\Delta\Delta)$ (образование двух изобар).

Третий этап теоретических исследований в ЛЯП можно ассоциировать с новым направлением исследований – поиском и обоснованием возможности наблюдения явлений, лежащих за рамками СМ физики элементарных частиц. Это в первую очередь касалось новых значительных работ по проблеме безнейтринного двойного бета-распада ядер (выполненных под руководством С.Г.Коваленко) и возможности регистрации в наземных условиях частиц так называемой темной (скрытой) материи во Вселенной (В.А.Бедняков, С.Г.Коваленко).

Доказана общая теорема, связывающая параметр расщепления в спектре с нейтрино с майорановской массой нейтрино и матричным элементом безнейтринного двойного бета-распада. Предсказан эффект ядерного усиления вклада суперсимметрии и лептокварков в безнейтринный двойной бета-распад. Получены важные ограничения на фундаментальные параметры новой физики, исходя из данных экспериментов по поиску безнейтринного двойного бета-распада. Эти ограничения стали общепринятыми, на их основе планируются многие эксперименты по поиску суперсимметрии (С.Г.Коваленко). Показано, что наилучшие перспективы для исследования суперсимметрии путем поиска $0\nu\beta\beta$ -распада имеют германиевый эксперимент «Гейдельберг–Москва» и эксперимент с молибденом NEMO-3 (В.А.Бедняков, С.Г.Коваленко).

В настоящее время в лаборатории успешно работает группа под руководством Д.Ю.Бардина, в задачу которой входит создание вычислительных программ обработки данных по коллайдерной физике сверхвысоких энергий.

2. Развитие ускорительной базы ЛЯП

В 1953 году — после увеличения диаметра полюсов магнита синхроциклотрона ЛЯП до 6 метров и существенной реконструкции его ВЧ-системы — был введен в действие протонный вариант ускорителя на энергию протонов 680 МэВ с интенсивностью пучка протонов $0,25 \div 0,3$ мкА; на то время синхроциклотрон ЛЯП стал самым мощным ускорителем протонов в мире.

Одновременно с проведенной реконструкцией магнитной и ВЧ-систем В.П.Дмитриевским на синхроциклотроне был осуществлен новый, регенеративный метод вывода частиц из ускорителя, что позволило увеличить интенсивность выведенного пучка в десятки раз. В зале ускорителя был создан экспериментальный павильон, отделенный от ускорителя четырехметровой стеной из тяжелого бетона и закрытый толстым 1,5 м бетоно-потолочным перекрытием. В этот зал были выведены с помощью отклоняющего магнита и коллиматоров 14 пучков протонов, пионов и нейтронов различных энергий. Это открыло большой простор для исследований не только физиков ЛЯП, но и ученых из Москвы, Ленинграда, Харькова и других городов.

Годом раньше, в 1952 году, появилась публикация М.Ливингстона с сотрудниками с предложением использовать жесткую фокусировку в кольцевых протонных синхротронах с целью значительного снижения веса используемых в них магнитов. Это предложение по жесткой фокусировке в ускорителях создавало предпосылки для использования специальных структур магнитного поля и в других классах ускорителей с целью увеличения достижимых в них энергий и интенсивностей ускоренных пучков.

К обсуждению возможностей и перспектив жесткой фокусировки для ускорителей со сплошным магнитом (циклотрон, синхроциклотрон) директор ЛЯП М.Г.Мешеряков привлек академика И.В.Курчатова, который продолжал поддерживать связь с работами, проводимыми в ЛЯП по всем направлениям. Специальные мини-семинары по проблемам жесткой фокусировки в ускорительной технике, проходившие с участием И.В.Курчатова, завершились поручением дирекции ЛЯП создать специализированное подразделение с целью разработки и создания в нем циклотрона со спиральной структурой магнитного поля.