

## Лаборатория ядерных проблем им. В.П.Джелепова

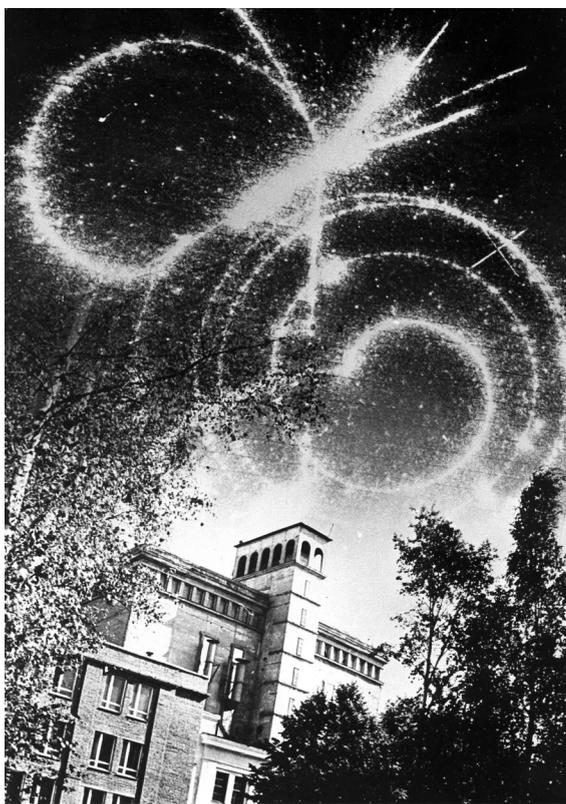
Созданный в 1953 году по решению Правительства страны Институт ядерных проблем Академии наук СССР, при организации в 1956 году международного ядерного центра, Объединенного института ядерных исследований, был преобразован в Лабораторию ядерных проблем ОИЯИ.

Старейшая лаборатория физического центра в Дубне вошла в состав ОИЯИ, имея действующий самый крупный в то время в мире ускоритель частиц – синхротрон с энергией протонов 680 МэВ и сложившийся квалифицированный коллектив сотрудников, имеющих значительный перечень серьезных научных достижений: большая группа инженеров и ученых за создание ускорителя и проведение важных физических исследований была дважды удостоена Сталинской премии и награждена орденами Советского Союза.

Таким образом, Лаборатория ядерных проблем (ЛЯП) явилась первой базой для проведения экспериментальных исследований по физике частиц высоких энергий интернациональными группами ученых социалистических стран. Возможность получения на синхротроне пучков различных частиц (протонов, дейтонов,  $\alpha$ -частиц, нейтронов,  $\pi$ -мезонов, мюонов) позволила научным группам лаборатории проводить интенсивные исследования широкого круга явлений, происходящих при столкновении частиц высоких энергий с нуклонами и атомными ядрами. В круг во-

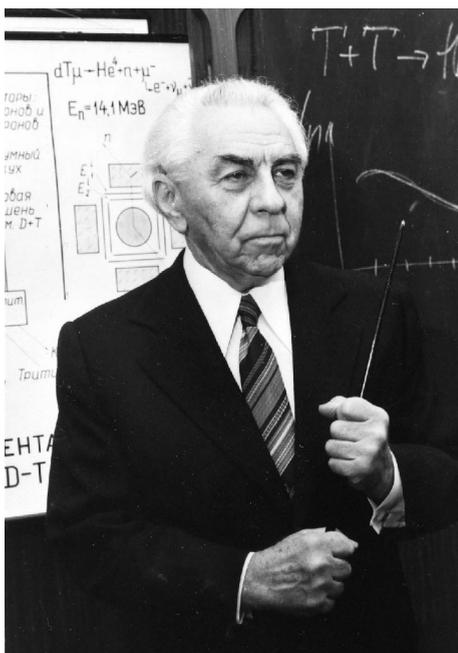
просов, к которым было привлечено особое внимание экспериментаторов ЛЯП, входили: исследование элементарных процессов сильного взаимодействия (нуклон-нуклонные, пион-нуклонные и пион-пионные взаимодействия), изучение слабых и электромагнитных взаимодействий, свойств мюонов,  $\pi$ - и  $\mu$ -мезоатомов, а также взаимодействий нуклонов и мезонов с ядрами. План научно-исследовательских работ лаборатории на 1957 год позволяет получить наглядное представление о приоритетных долгосрочных научных задачах в первые годы ее существования.

Наличие в лаборатории действующего ускорителя и значительного числа физиков, успешно ведущих в течение ряда лет исследования на нем в новой области ядерной физики, под руководством известных ученых – профессоров В.П.Джелепова,



## План научно-исследовательских работ Лаборатории ядерных проблем на 1957 год

Проблема	Методы исследований	Исполнители
<i>Исследования, проводимые на синхроциклотроне</i>		
Изучение упругих соударений нуклонов с нуклонами при энергиях до 660 МэВ в неполяризованных и поляризованных пучках нуклонов. Целью опытов является получение данных для проведения полного фазового анализа и определения коэффициентов амплитуд рассеяния нуклонов нуклонами	Электронные методы регистрации со сцинтилляционными и газовыми счетчиками частиц	Секторы ЛЯП: (Мещеряков М.Г.) (Джелепов В.П.) (Поэе Х.Р.)
Исследование упругого рассеяния $\pi$ -мезонов нуклонами и ядрами в области энергий до 400 МэВ. Получение данных для фазового анализа, установление зависимости фаз от энергии, проверка различных дисперсионных соотношений, а также получение сведений о радиусе мезон-нуклонного взаимодействия	Электронные методы со сцинтилляционными счетчиками и счетчиками черенковского излучения. Диффузионные и пузырьковые камеры. Эмульсионный метод	Секторы ЛЯП: (Понтекорво Б.М.) (Козодаев М.С.) (Джелепов В.П.) (Мещеряков М.Г.) (Сидоров В.М.)
Образование заряженных и нейтральных $\pi$ -мезонов в соударениях нуклонов с нуклонами и ядрами, включая поисковые опыты по парному образованию $\pi$ - и $\mu$ -мезонов. Эксперименты позволяют получить сведения о нуклон-нуклонных и мезон-нуклонных взаимодействиях, а также о справедливости принципа зарядовой независимости ядерных сил. Основное внимание при изучении этих процессов сосредотачивается на исследовании угловых распределений, энергетических спектров мезонов и нуклонов, а также на изучении различных поляризационных эффектов	Электронные методы со сцинтилляционными счетчиками и счетчиками черенковского излучения, диффузионная камера в магнитном поле	Секторы ЛЯП: (Мещеряков М.Г.) (Джелепов В.П.) (Козодаев М.С.)
Образование мезонов мезонами на нуклонах и ядрах вблизи порога. Целью исследований является установление качественных закономерностей этих процессов и выяснение возможности получения сведений о мезон-мезонных взаимодействиях	Электронные методы; эмульсионные, диффузионные и пузырьковые камеры	Секторы ЛЯП: (Мещеряков М.Г.) (Понтекорво Б.М.) (Джелепов В.П.) (Козодаев М.С.)
Создание пучков $\mu$ -мезонов и изучение взаимодействия $\mu$ -мезонов с ядрами	Пузырьковые камеры. Электронные методы со сцинтилляционными и черенковскими счетчиками	Сектор 10: ЛЯП РИАН ТТЛ
Радиохимические исследования ядерных реакций при высоких энергиях	Методы радиохимии; эмульсионные и электронные методы	Сектор 6 ЛЯП: (Мехедов В.Н.) ГЕОХИ РИАН



**Первый директор Лаборатории  
ядерных проблем ОИЯИ  
член-корреспондент РАН,  
профессор В.П.Джелепов**



**Директор Института ядерных  
проблем АН СССР  
член-корреспондент РАН,  
профессор М.Г.Мещеряков**

М.С.Козодаева, М.Г.Мещерякова, Г.Позе, Б.М.Понтекорво – сразу же привлекло к лаборатории внимание ученых из всех стран, ставших участниками ОИЯИ.

В 60-70-х годах, когда интернациональный коллектив стран-участниц ОИЯИ развернул исследования еще и на синхрофазотроне Лаборатории высоких энергий ОИЯИ, а также на синхротроне 70 ГэВ в Протвино (ИФВЭ), штат лаборатории увеличился почти в три раза по сравнению с 1956 годом. Обычно в эти годы в ЛЯП уже работало примерно треть всех приехавших в ОИЯИ специалистов из стран-участниц.

Расширение круга научно-исследовательских работ потребовало организации новых структур лаборатории. Были созданы отделы слабых и электромагнитных взаимодействий, ядерной спектроскопии и радиохимии, ядерной электроники, теоретический сектор, сектор медико-биологических проблем, проведена концентрация научных групп в связи с созданием крупных экспериментальных установок для выполнения исследований на ускорителе в Серпухове.

Для размещения всех этих подразделений при содействии дирекции Института было построено несколько хорошо оборудованных новых зданий.

В целях обеспечения технической базой развивающихся научных отделов были расширены в три раза мастерские лаборатории и вдвое увеличен конструкторский отдел.

Большими достижениями лаборатории явились увеличение почти в 10 раз интенсивности ускоренного пучка протонов синхроциклотрона (до 2,3 мкА) и значитель-



**Американцам синхроциклотрон тоже очень нравится  
Слева направо: В.П.Дмитриевский, В.Пановский, Э.МакМиллан, Е.Д.Лофтрен,  
В.П.Джелепов, Б.И.Замолодчиков**

ное (до 5%) увеличение интенсивностей пучков вторичных частиц, получаемых от внешних мишеней.

Возможности для проведения различных экспериментов были существенно расширены благодаря созданию новых пучков поляризованных протонов и нейтронов,  $\pi^\pm$ -мезонов и, в особенности,  $\mu^\pm$ -мезонов различных энергий, получаемых от распада пионов в 15-метровом жесткофокусирующем канале из магнитных линз.

В результате самоотверженной работы ускорительщиков время работы синхроциклотрона на физический эксперимент было доведено до 6,5 тысяч часов в год и по общему признанию в 60–70-х годах он считался лучшим синхроциклотроном в мире. Это позволило выполнить на нем очень большой комплекс исследований по физике элементарных частиц и атомного ядра и получить много новых научных результатов, в том числе самой высокой научной значимости. Сотрудниками лаборатории в период 1957–1972 годов было сделано четырнадцать открытий новых явлений, зарегистрированных в Государственном реестре открытий СССР.

После 30-летней работы синхроциклотрон, полностью исчерпавший свой ресурс, был реконструирован в фазотрон со спиральной вариацией магнитного поля, который с конца 1984 года успешно работает на физику частиц и атомного ядра, а также используется для прикладных исследований. Параметры пучков нового ускорителя и его надежность существенно превосходят возможности бывшего синхроциклотрона.

В настоящее время тематика физических исследований лаборатории ядерных проблем охватывает область как промежуточных, так и высоких энергий. Ученые



Во время защиты докторской диссертации ученым секретарем Института Ю.А.Щербаковым

ЛЯП работают на ускорителях в Серпухове, Женеве, Батавии, Сакле, Юлихе, Виллингене и др.

Лаборатория ядерных проблем им. В.П.Джелепова — вторая по величине лаборатория ОИЯИ. Ее штат составляет более 600 сотрудников, в том числе более 50 докторов и почти 150 кандидатов наук. В лаборатории работают и работали в разное время академики Б.М.Понтекорво и Ю.Д.Прокошкин, члены-корреспонденты АН СССР В.П.Джелепов, И.Н.Мешков, М.Г.Мещеряков, С.М.Поликанов.

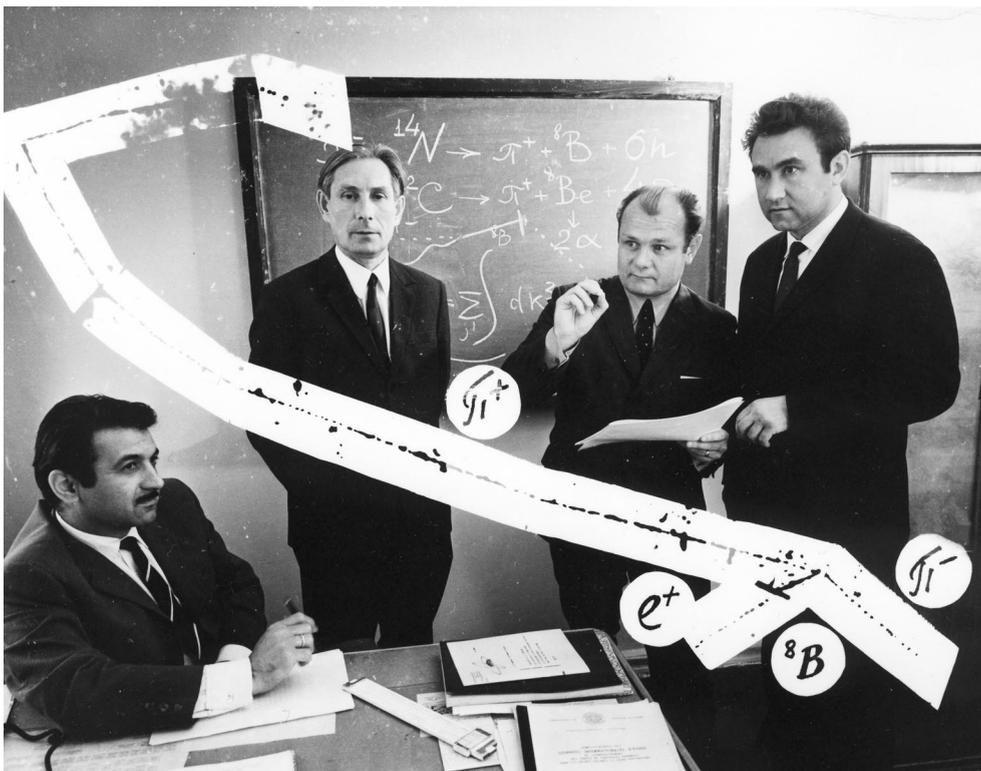
За период работы в Ученом совете ЛЯП защищено более 100 докторских и около 400 кандидатских диссертаций представителями всех стран-участниц ОИЯИ.

Результаты научных исследований лаборатории более 100 раз удостоены премий Объединенного института ядерных исследований.

Лаборатория явилась крупной кузницей высококвалифицированных специалистов для всех стран-участниц Института в области физики высоких энергий, физики и техники ускорителей, в области методов ядерных исследований, в ядерной спектроскопии и радиохимии, в области радиоэлектроники и обработки ядерно-физической информации.

Научные кадры, выросшие в стенах Лаборатории ядерных проблем, пользуются высоким авторитетом и популярностью. Общеизвестно, например, что руководящую основу физического и методического отделов при организации Института физики высоких энергий в Протвино составляли физики, пришедшие из Лаборатории ядерных проблем. Значительное количество ученых, инженерно-технических работников и рабочих высокой квалификации было переведено из лаборатории в создаваемые в ОИЯИ новые подразделения.

Сотрудники ЛЯП принимают самое активное участие в новых современных проектах на передовом крае исследований по физике частиц высоких энергий. Значительный вклад был внесен учеными лаборатории в составе коллабораций DELPHI, DIRAC, NOMAD, PIBETA на ускорителях в Швейцарии, DO и CDF на TEVATRON (США), ANKE и HERMES (Германия), NEMO-3 и TGV (Франция). Под руководст-



Соавторы открытий «Явление двойной перезарядки  $\pi$ -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.Джелепова<sup>1</sup> по взаимодействию нейтронов высокой энергии с нуклонами и ядрами были получены такие фундаментальные ре-

<sup>1</sup> 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  $\pi$ -мезонов был открыт резонансный характер процесса  $p + p \rightarrow \pi^+ + d$ .<sup>1</sup> 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 коллегам<sup>2</sup> 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 физики<sup>3</sup>.

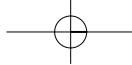
Результаты параллельно проводившегося изучения рассеяния  $\pi^\pm$ -мезонов протонами и поляризации в упругом  $\pi p$ -рассеянии (сектор Б.М.Понтекорво и М.С.Козодаева)<sup>4</sup> позволили осуществить проверку справедливости дисперсионных соотношений, обоснованных Н.Н.Боголюбовым.

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

<sup>2</sup> 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.

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

<sup>4</sup> 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 нуклона<sup>1</sup>.

При исследовании рассеяния пионов на ядрах  ${}^3\text{He}$  и  ${}^4\text{He}$  в области резонанса  $\Delta(1236)$  впервые наблюдалась деструктивная интерференция кулоновского и ядерного рассеяния пионов<sup>2</sup>.

В лаборатории были проведены фундаментальные исследования взаимодействия  $\pi^\pm$ -мезонов с протонами и ядрами в интервале энергий 200–300 МэВ. Детально изучены реакции  $\pi N \rightarrow \pi\pi N$  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  $\pi$ - $\pi$ -рассеяния<sup>3</sup>. 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  $\pi^+$ -мезонов<sup>4</sup>, которое было зарегистрировано как открытие<sup>5</sup>. 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  ${}^8\text{He}$ ,  ${}^8\text{Li}$ ,  ${}^8\text{B}$ . 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 открытия<sup>6</sup>. 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.

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

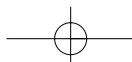
<sup>2</sup> Мах Р. и др. // ЭЧАЯ. 1986. Т. 17. С. 231.

<sup>3</sup> 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.

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

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

<sup>6</sup> 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 уровней<sup>1</sup>.

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  $\pi^-$ -мезонов с протонами и ядрами углерода. Впервые показано, что характеристики инклюзивных реакций с образованием  $\gamma$ -квантов и  $\pi^0$ -мезонов при энергии 5 ГэВ подчиняются таким универсальным закономерностям, как масштабная инвариантность, «скейлинг в среднем», наблюдавшимся при значительно более высоких энергиях<sup>2</sup>.

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 трития<sup>3</sup>. 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  $\pi^-$ -мезонов с импульсом 40 ГэВ/с ускорителя ИФВЭ в сотрудничестве физиков лаборатории с учеными из Италии, Польши и Финляндии были открыты два новых состояния пиона<sup>4</sup> с массами  $(1240 \pm 30)$  и  $(1770 \pm 30)$  МэВ. Эти состояния интерпретируются как радиальные возбуждения пиона и непосредственно свидетельствуют о его кварковой структуре.

Изучение процессов перезарядки  $\pi$ - и  $K$ -мезонов в  $\eta$ -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)<sup>5</sup> явления цветовой прозрачности ядер. Эксперименты были выполнены Н.А.Русаковичем и др. на спектрометре ГИПЕРОН в ИФВЭ<sup>6</sup>.

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

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

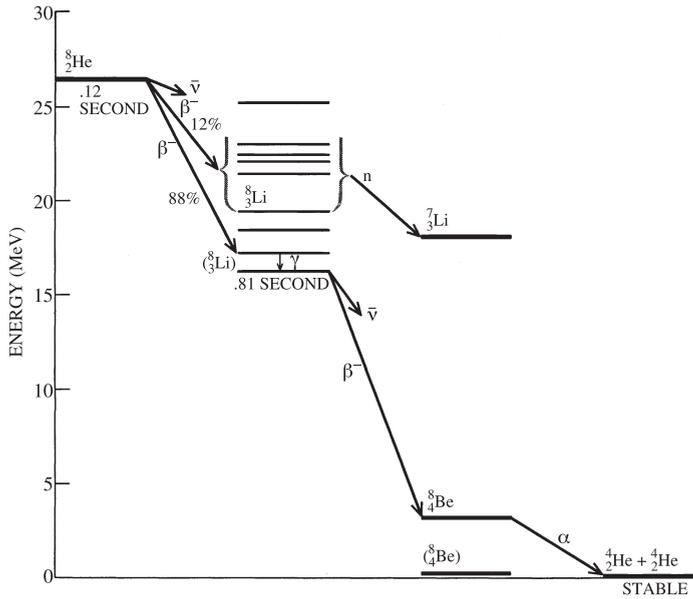
<sup>2</sup> Джелепов В.П. и др. // ПТЭ. 1967. Т. 1. С. 61; ЯФ. 1970. Т. 12. С. 1222; 1975. Т. 22. С. 1269.

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

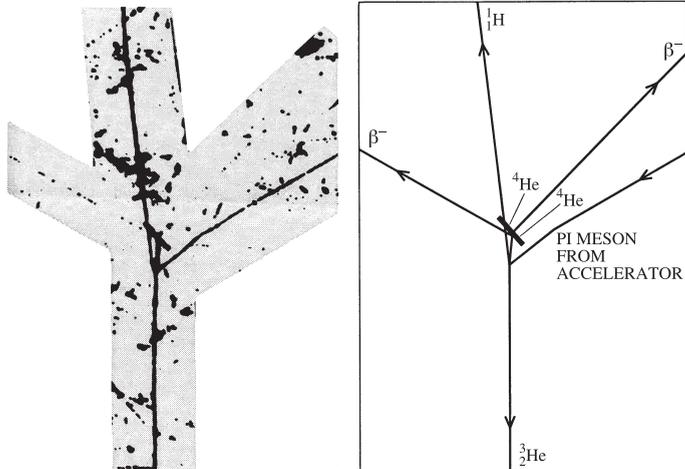
<sup>4</sup> Tuarquin A.A., Bellini G. et al. // Phys. Rev. Lett. 1982. V. 48. P. 1697.

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

<sup>6</sup> 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.



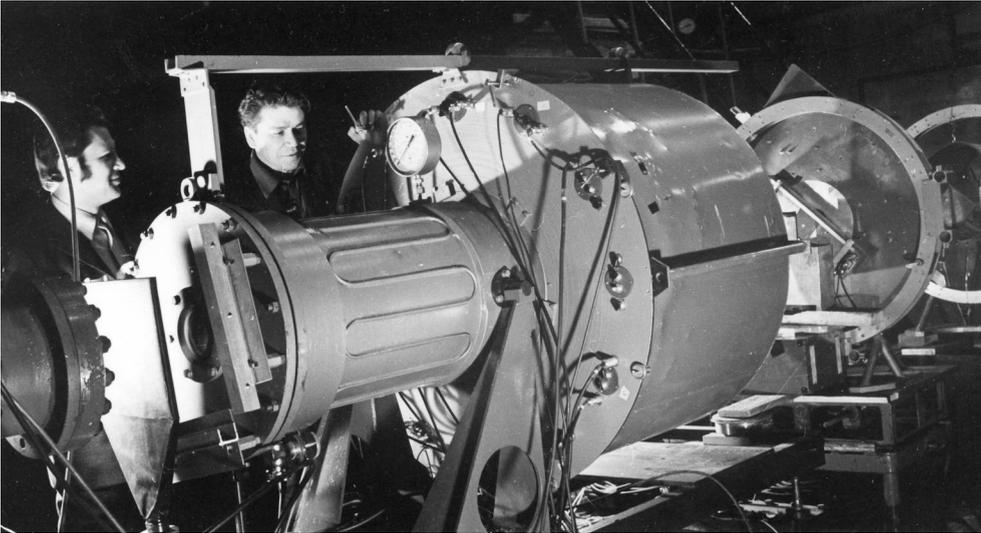
**NEUTRON-RICH ISOTOPE** of helium,  ${}^8_2\text{He}$ , can decay through either of two unusual pathways. In each case the initial event is a beta emission, forming the lithium isotope  ${}^8_3\text{Li}$ . If the  ${}^8_3\text{Li}$  is created in a highly excited state, it promptly emits a neutron, 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.



Многopараметрическая 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  $\eta$ -мезона в качестве объекта наблюдения существенно, поскольку  $\eta$ -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  $\eta$ -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 открытием<sup>1</sup>. Эти результаты были получены при исследовании поляризационных эффектов в области энергий  $20 \div 40$  ГэВ в упругом рассеянии  $\pi^\pm$ -,  $K^\pm$ -мезонов, протонов и антипротонов<sup>2</sup>.

Упругое рассеяние  $\pi$ - 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.

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

<sup>2</sup> 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  $\Lambda^0$ -гиперона<sup>1</sup>. В 1956 году им была обоснована идея о возможности безмезонной и одномезонной аннигиляции антипротонов<sup>2</sup>, 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 самошунтирующейся 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  $\Lambda$ -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 дейтерии<sup>3</sup>.

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  $\Lambda_c^+$ -барион<sup>4</sup>. Эти работы открыли новое направление в изучении низкоэнергетических взаимодействий очарованных барионов с нуклонами, что недоступно для других экспериментов.



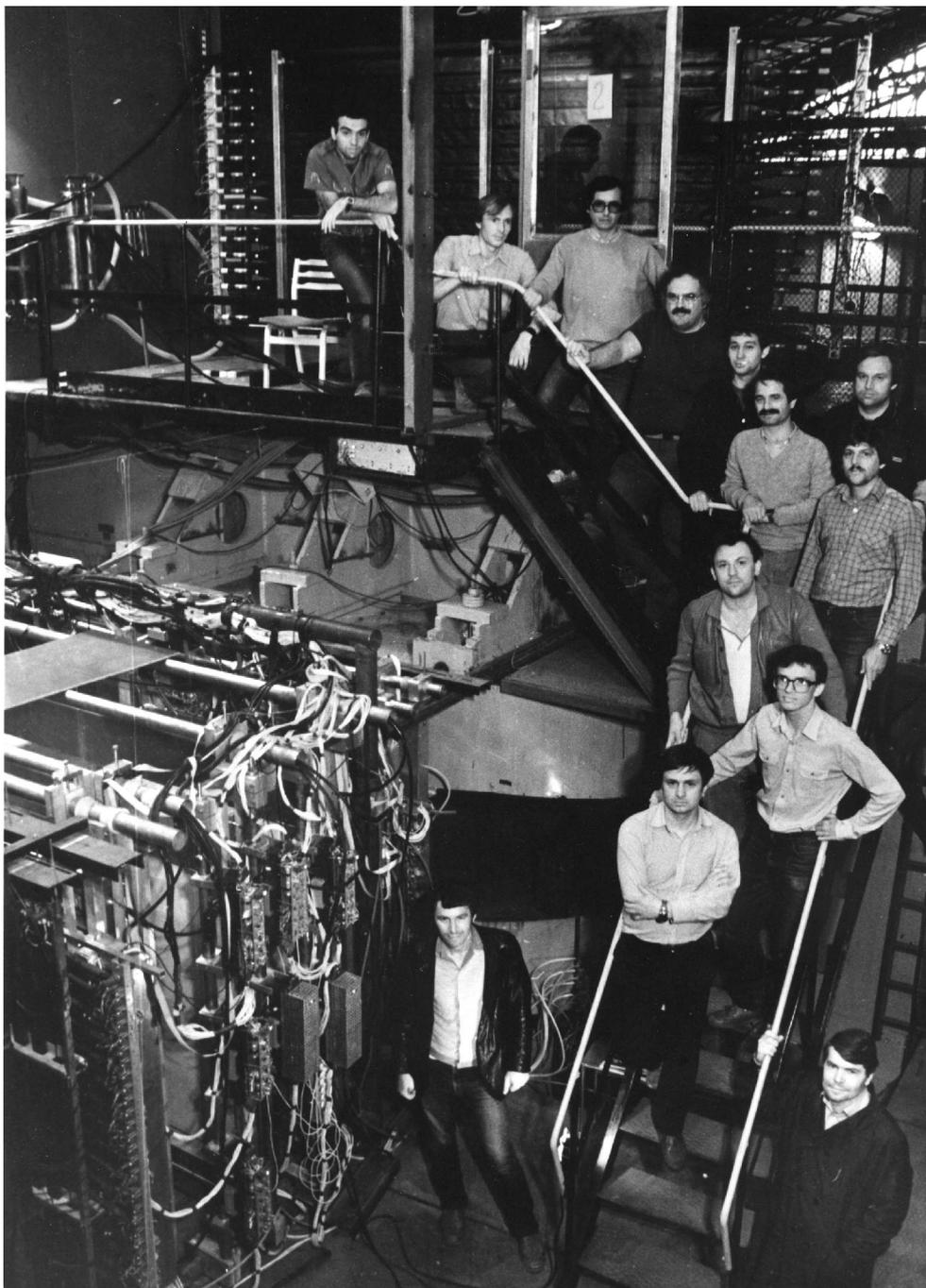
Академик РАН Б.М. Понтекорво

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

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

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

<sup>4</sup> Батусов Ю.А. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1981. Т. 33. С. 56; Буятов 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 мультифрагментацию<sup>1</sup>.

#### *Исследования в области физики электромагнитных взаимодействий*

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

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

рассеяния) была предсказана Л.И.Лапидусом в 1970 году<sup>1</sup>. 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  $\pi^0$ -мезона на  $\gamma$ -квант и атом позитрония  $\pi^0 \rightarrow \gamma + \Lambda_{e^+e^-}$ . Это один из самых редких разрешенных распадов элементарных частиц<sup>2</sup>, 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  $\pi$ -мезоатомов, состоящих из  $\pi^+$ - и  $\pi^-$ -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  $\pi$ -мезоатомов продолжены на ускорителе PS в ЦЕРН в рамках международной коллаборации DIRAC, где лидирующую роль играют физики ЛЯП ОИЯИ<sup>3</sup>.

Важные сведения, касающиеся кварковой структуры пионов, получены в результате исследования комптон-эффекта на  $\pi$ -мезоне с помощью установки СИГМА-АЯКС, созданной сотрудниками Дубны и Протвино<sup>4</sup>. 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  $\pi$ -мезона в электромагнитном поле, — его электрическая и магнитная поляризуемости  $\alpha_\pi = (6,8 \pm 1,4) \cdot 10^{-43}$  см<sup>3</sup> и  $\beta_\pi = (-7,1 \pm 2,8) \cdot 10^{-43}$  см<sup>3</sup>, 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 энергиях<sup>5</sup>.

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 сред<sup>6</sup>.

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

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

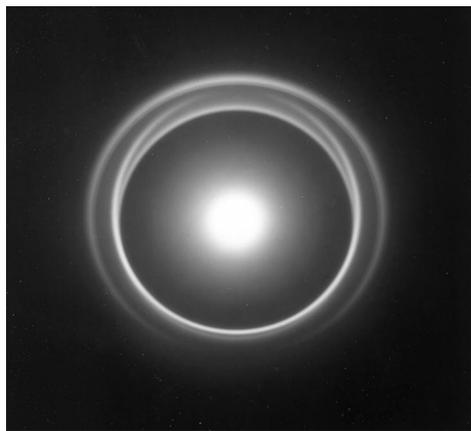
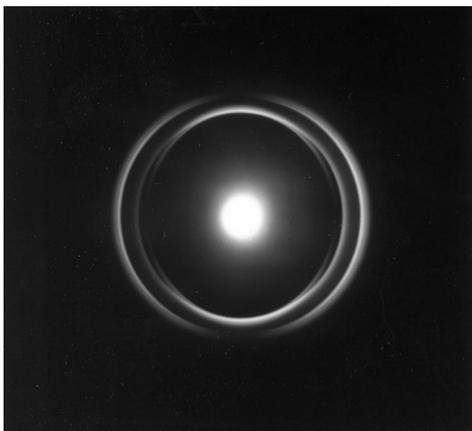
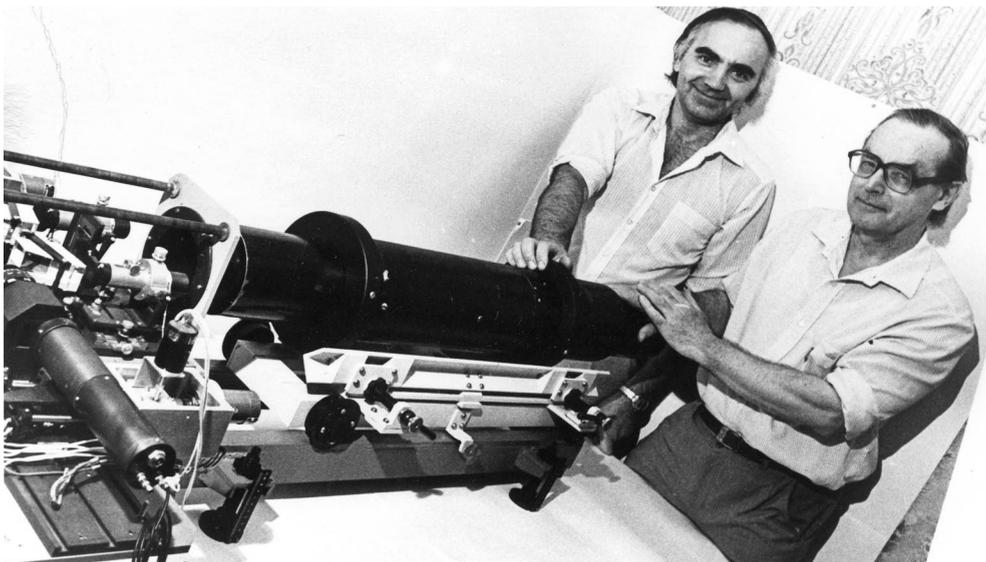
<sup>2</sup> Неменов Л.Л. и др. // ЯФ. 1990. Т. 51. С. 1040.

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

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

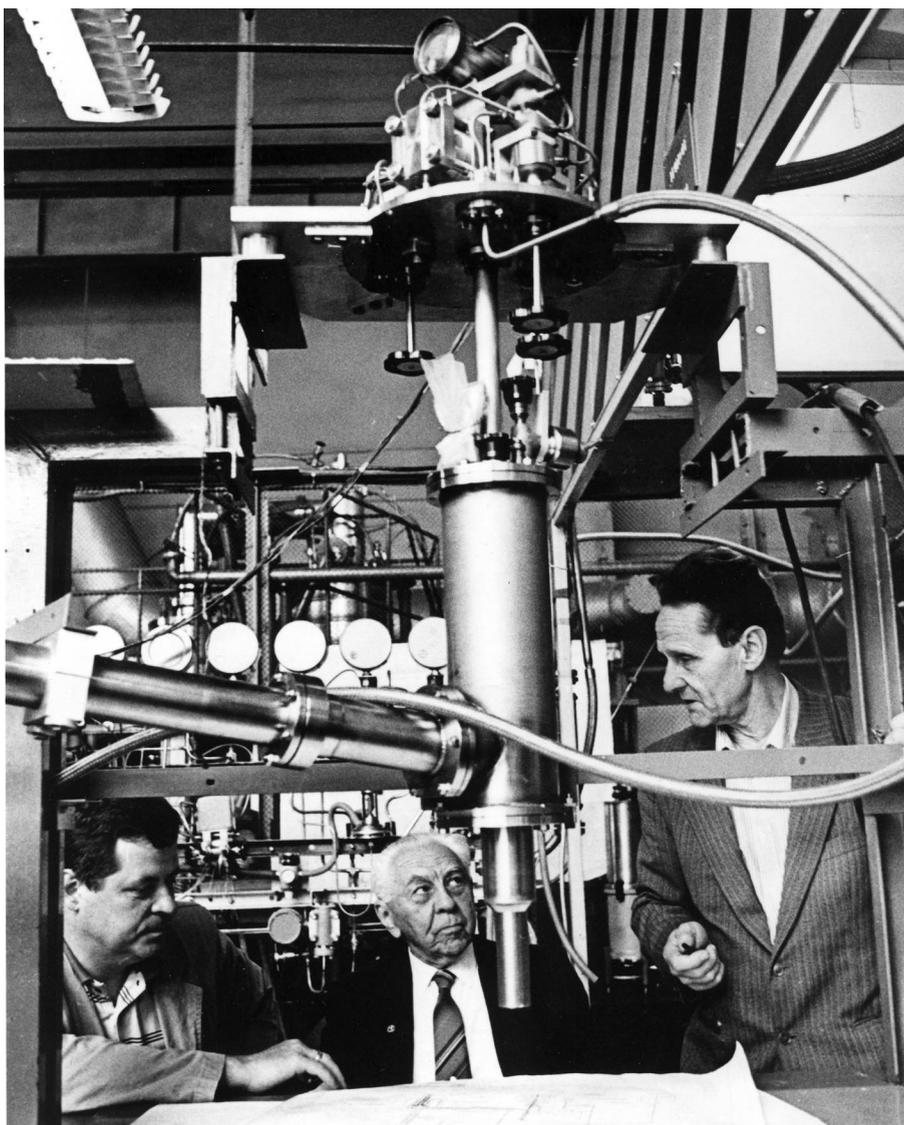
<sup>5</sup> Ольшевский А.Г. и др. Препринт ОИЯИ. P1-86-710. P1-89-202. Дубна.

<sup>6</sup> 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

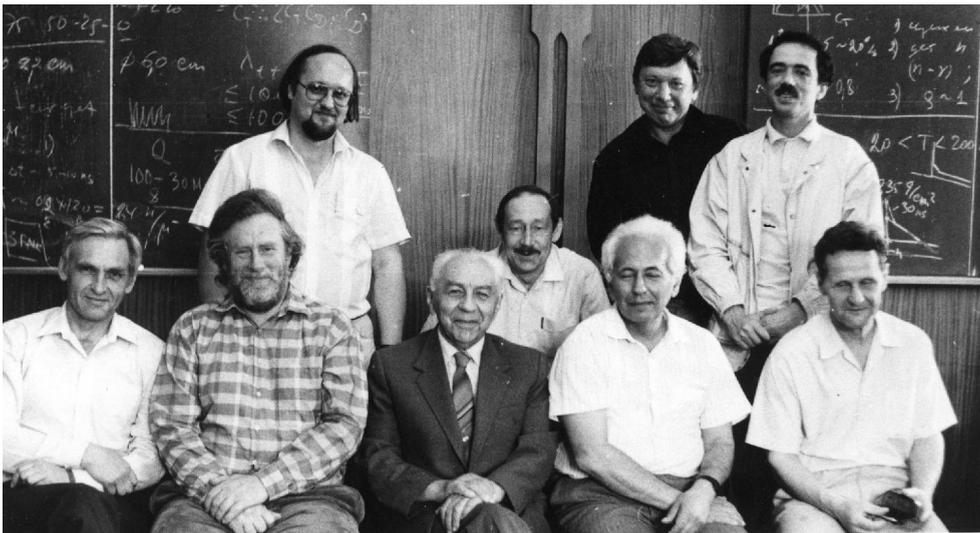
мезомолекулы  $d\bar{\mu}$ , сближает ядра дейтерия и трития настолько, что они со скоростью  $\sim 10^{-11} \div 10^{-12}$  с сливаются в ядро гелия и выделяют энергию 17,6 МэВ. Важно, что мюон при этом освобождается (реакция  $d + t + \mu^- \rightarrow d\bar{\mu} \rightarrow {}^4\text{He} + n + \mu$ ) 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

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



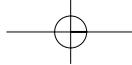
Советание в Дубне по проблемам мю-катализа (1990 г.)  
 В первом ряду слева направо: А.И.Пономарев, Дж.Дэвис, В.П.Джелепов,  
 С.С.Герштейн, В.Г.Зинов. Во втором ряду: А.М.Арциш, В.В.Фильченков,  
 А.П.Пичугин, А.А.Микаэлян

причиной резонанса является существование у  $dd\mu$ -молекул слабосвязанного уровня с энергией  $\sim 2$  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  $\lambda_c$ , выхода нейтронов  $Y_n$  и потери мюонов  $\omega$ ) процесса мюонного катализа<sup>1</sup>. 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

<sup>1</sup> 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.Соловьева<sup>1</sup>.

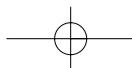
Под руководством Ц.Вылова путем выделения в  $\gamma$ -спектре узкой компоненты аннигиляционного пика ( $e^+e^-$ ) была измерена масса электрона ( $m_e c^2 = 511,003 \pm 0,005$  кэВ), а также с наибольшей точностью измерена энергия связи дейтона ( $E_d = 2224563 \pm 10$  эВ)<sup>2</sup>.

Обширная программа ядерной спектроскопии на протонном пучке (ЯСНАПП-2)<sup>3</sup> 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  $\alpha$ -эмиттеров редкоземельной области привели к обнаружению крайне слабых ( $\sim 10^{-5}\%$  на распад) излучателей ( $^{156}\text{Er}$ ,  $^{157}\text{Tm}$ ) и тонкой структуры  $\alpha$ -распада  $^{151}\text{Ho}$  и  $^{154}\text{Tm}$ ; путем измерения энергий  $\alpha$ - и  $\beta$ -переходов нуклидов, связанных «цепочкой» последовательных превращений, установлены с точностью  $\leq 100$  кэВ массы 25 ядер от Pг до Tm; влияние формы ядра на вероятность ядерных процессов прослежено на примере  $\alpha$ - ,  $\beta$ -распада  $^{156}\text{Er}$  и обнаруженного M-3

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

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

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



изомера в  $^{156}\text{Ho}$  (9,5 с); обнаружена мюонная структура изоспина  $M_T = 1$  резонанса Гамова—Тейлора в  $\beta$ -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.Ольшевский<sup>2</sup>. 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.

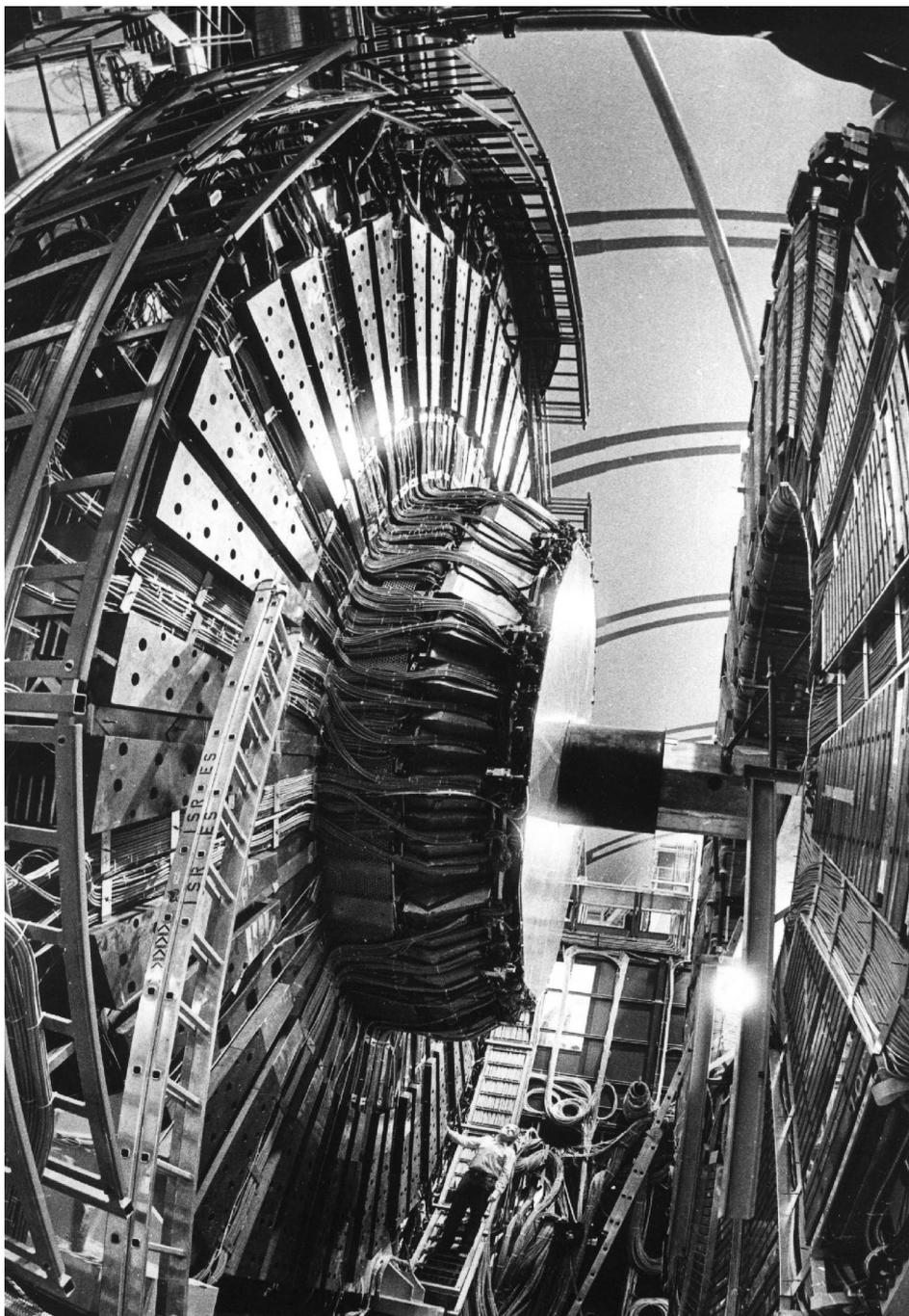
Лаборатория ядерных проблем им. В.П.Джелепова является пионером в исследованиях по физике слабых взаимодействий в ОИЯИ. Здесь выполнен ряд фундаментальных экспериментов, направленных на проверку выводов универсальной теории слабого взаимодействия с участием пионов и мюонов.

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  $\gamma$ -лучей от распада  $\pi^0$ -мезона и детектора позитронов. Импульсы регистрируемых частиц наблюдались на специально разработанном скоростном пентилучевом осциллографе<sup>3</sup>. Авторы этой работы Ю.Д.Прокошкин, А.Ф.Дунайцев, В.И.Петрухин, В.И.Рыкалин, Я.Б.Зельдович, С.С.Герштейн были удостоены Акаде-

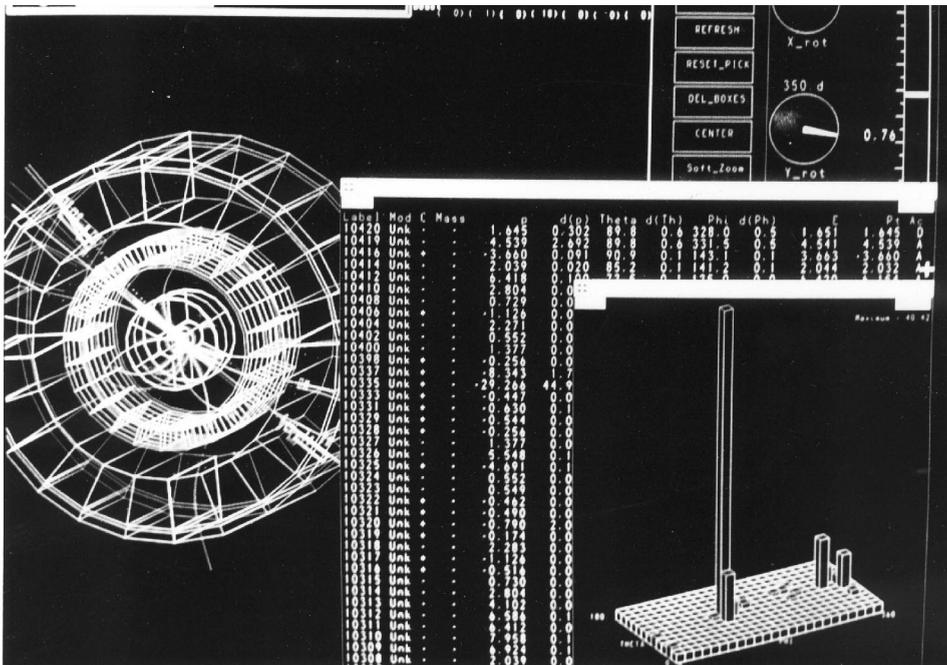
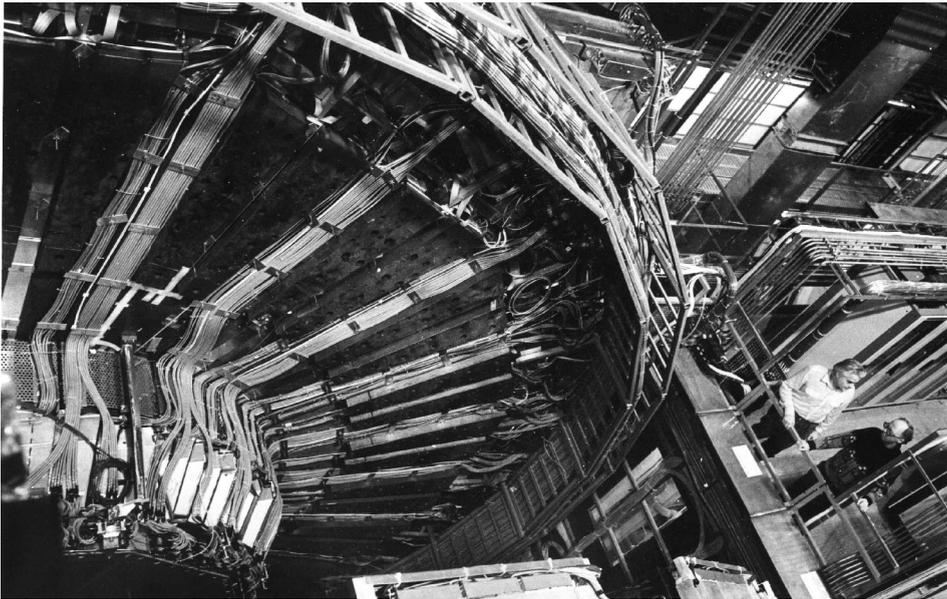
<sup>1</sup> Калининков В.Г. и др. // Изв. РАН (серия физическая). 1994. Т. 58. С. 41; Письма в ЭЧАЯ. 2000. Т. 4. С. 40.

<sup>2</sup> 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.

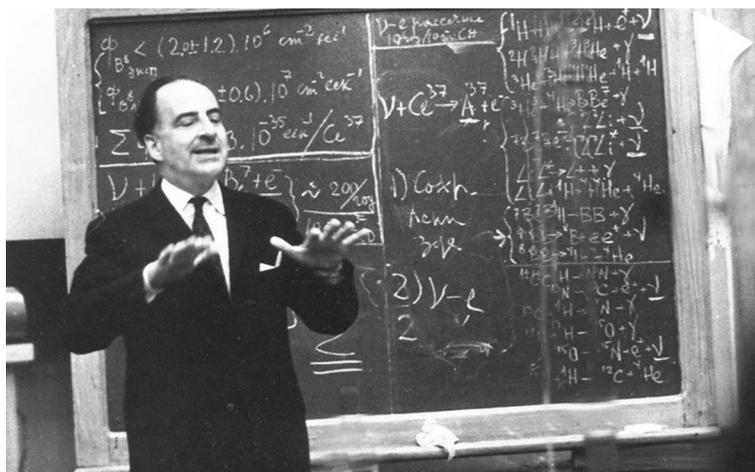
<sup>3</sup> Прокошкин Ю.Д. и др. // ЖЭТФ. 1962. Т. 42. С. 632; 1964. Т. 47. С. 84.



**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 открытие<sup>1</sup>.

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 энергий<sup>2</sup>. Выполненные позднее в США эксперименты действительно позволили открыть мюонные нейтрино (нейтрино второго поколения) и положили начало новой области исследований — физике нейтрино высоких энергий на ускорителе<sup>3</sup>.

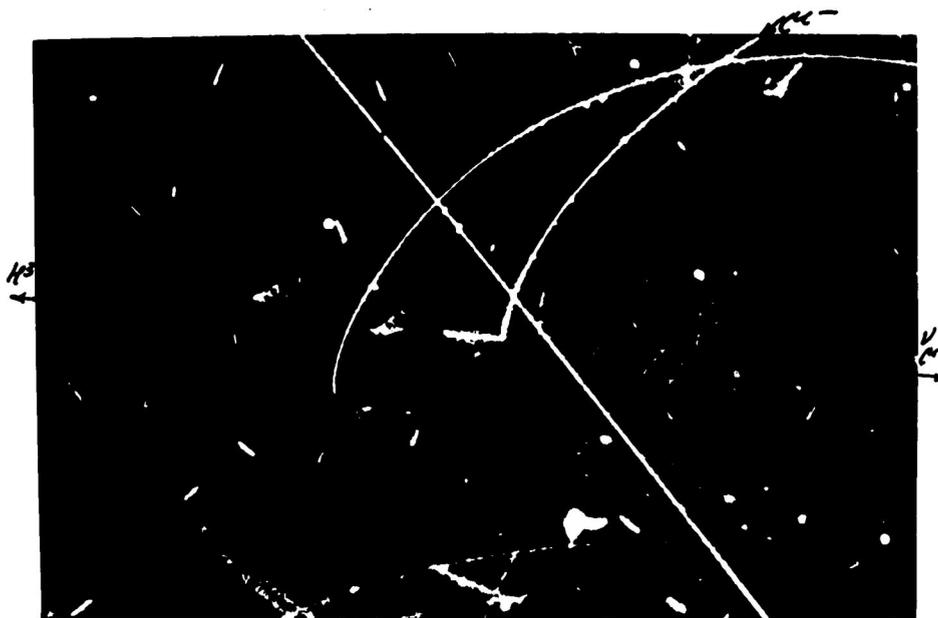
С целью проверки основных законов симметрии в слабых взаимодействиях в лаборатории был выполнен опыт по захвату отрицательного мюона в гелии-3 — реакция  $\mu^- + {}^3\text{He} \rightarrow {}^3\text{H} + \nu_{\mu}$ .<sup>4</sup> В эксперименте была использована диффузионная камера, наполненная тщательно 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).

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

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

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

<sup>4</sup> 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 взаимодействия<sup>1</sup>.

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/см<sup>2</sup> 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  $4\pi$ -детекторе<sup>2</sup>.

Ц.Выловым с сотрудниками было проведено измерение спиральности электронного нейтрино от распада  $^{152}\text{Eu}$  с помощью Ge(Li)-детектора. Получено значение  $-0,87 \pm 0,10$ , хорошо согласующееся с предположением о полной левой продольной поляризации нейтрино<sup>3</sup>.

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 массы<sup>4</sup>. Важ-

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

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

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

<sup>4</sup> 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  $\beta$ -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  $\Delta m^2$  ( $>50 \text{ эВ}^2$ ) 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  $\Delta m^2$  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  $\Delta m^2 > 10 \text{ эВ}^2$ .<sup>1</sup>

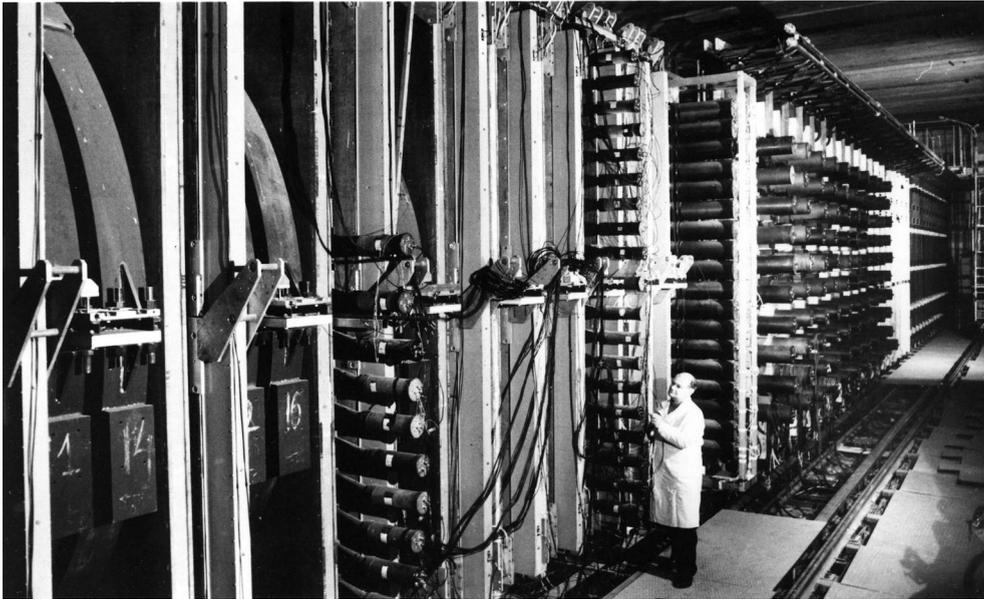
Помимо поиска осцилляций на этих установках выполняется широкая программа исследований взаимодействия нейтрино с веществом. В экспериментах на ускорителе У-70 (Протвино) получены наиболее точные данные о сечениях взаимодействия мюонных нейтрино и антинейтрино по каналу заряженного тока в интервале энергий  $3 \div 30 \text{ ГэВ}$ . 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  $70 \text{ ГэВ}$  («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  $\nu_\mu$  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 взаимодействия<sup>2</sup>  $\alpha_s(M_z) =$

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

<sup>2</sup> 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 NOMAD<sup>1</sup> получены важные данные о поляризации  $\Lambda^0$ -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  $\Lambda^0$ -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  $\Lambda^0$ -гиперону  $c_u^{\Lambda} = -P_x$ . Впервые в нейтринных экспериментах наблюдалась значительная поперечная поляризация в направлении, перпендикулярном к плоскости образования  $\Lambda^0$ -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  $\Lambda^0$ -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-

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

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

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  $4\pi$ -магнитного спектрометра с 18 искровыми пропорциональными цилиндрическими камерами (установка АРЕС)<sup>2</sup> 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 ( $e^+\mu^-$ ).<sup>3</sup> 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  $G_{MM} \leq 0,14 G_F$ .<sup>4</sup> 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  $M \rightarrow \bar{M}$  —  $G_{M\bar{M}} \leq 3 \cdot 10^{-3} G$ .<sup>5</sup> 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-

<sup>1</sup> Ольшевский А.Г. Диссертация. 1-2002-256. Дубна: ОИЯИ, 2002.

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

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

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

<sup>5</sup> 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)<sup>1</sup> 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 состояний<sup>2</sup>.

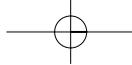
С целью поиска запрещенного в Стандартной Модели чисто лептонного распада очарованного мезона по каналу  $D^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  в рамках сотрудничества BEATRICE (WA91 CERN) был предпринят анализ данных с  $\Omega$ -спектрометра. На основе анализа  $1,25 \cdot 10^5$   $\mu^+\mu^-$ -пар, образовавшихся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

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-

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

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

<sup>3</sup> 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  $\beta$ -распада ( $2\beta 0\nu$ ) ядер  $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{130}\text{Te}$ ,  $^{82}\text{Se}$ ,  $^{150}\text{Nd}$ ,  $^{96}\text{Zr}$ ,  $^{48}\text{Ca}$  (масса изотопически обогащенных образцов  $\sim 10$  кг) и измерений эффективной майорановской массы нейтрино ( $m_\nu$ ) на уровне  $0,1$  эВ.<sup>1</sup> Эта установка является дальнейшим развитием спектрометра NEMO-2, на котором (1993–1997 гг.) для безнейтринной моды двойного  $\beta$ -распада получена нижняя граница на время полураспада  $10^{21}$  лет.

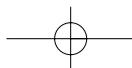
Интерес к измерению  $2\beta 0\nu$ -распада, запрещенного в Стандартной Модели (СМ), сейчас существенно повысился в связи с тем, что найдены новые механизмы этого процесса, реализующиеся в суперсимметричных моделях. При определенных условиях новые механизмы абсолютно доминируют в этом процессе. Расчеты показали<sup>2</sup>, 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  $\beta$ -нейтринных угловых корреляций при сверхразрешенных  $\beta$ -распадах короткоживущих ядер посвящен проект AnCor<sup>3</sup>. Фундаментальная цель этого проекта состоит в прецизионном измерении в процессах  $\beta$ -распада и  $\mu$ -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  $\gamma$ -детекторов) исследованы электрон-нейтринные

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

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

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



угловые корреляции в процессе  $\beta$ -распада  $^{18}\text{Ne}$ , 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  $\gamma$ -спектроскопии за счет доплеровского сдвига  $\gamma$ -квантов, сопровождающих  $\beta$ -распад.

Прецизионное измерение уширения  $\gamma$ -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)<sup>1</sup>. 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  $\gamma$ -линии найден коэффициент  $\gamma$ -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  $\pi$ -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  $\beta$ -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

<sup>1</sup> 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  $\gamma$ -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 взаимодействий<sup>1</sup>.

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  $\pi$ -мезонов на химически связанном водороде<sup>2</sup>, установление влияния химического строения вещества на мезорентгеновские спектры, а также свойства одноэлектронных атомов в кристаллических полупроводниках быть глубокими донорами<sup>3</sup>.

Физиками лаборатории установлено неизвестное ранее явление изменения относительной интенсивности рентгеновских линий К-серии  $\mu$ -мезоатома, обусловленное захватом мюонов на молекулярные уровни при вступлении химического элемента в реакцию<sup>4</sup>.

При исследовании захвата мюонов ядрами впервые обнаружено резонансное поглощение отрицательных мюонов атомными ядрами, что свидетельствует о коллективном возбуждении ядер в этом процессе<sup>5</sup>.

Сотрудниками ЛЯП проведены эксперименты по выяснению основных особенностей поведения мюония в веществе<sup>6</sup>.

С помощью наблюдения релаксации спина мюона в конденсированных средах ( $\mu SR$ -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 криокристаллов<sup>7</sup>.

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

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

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

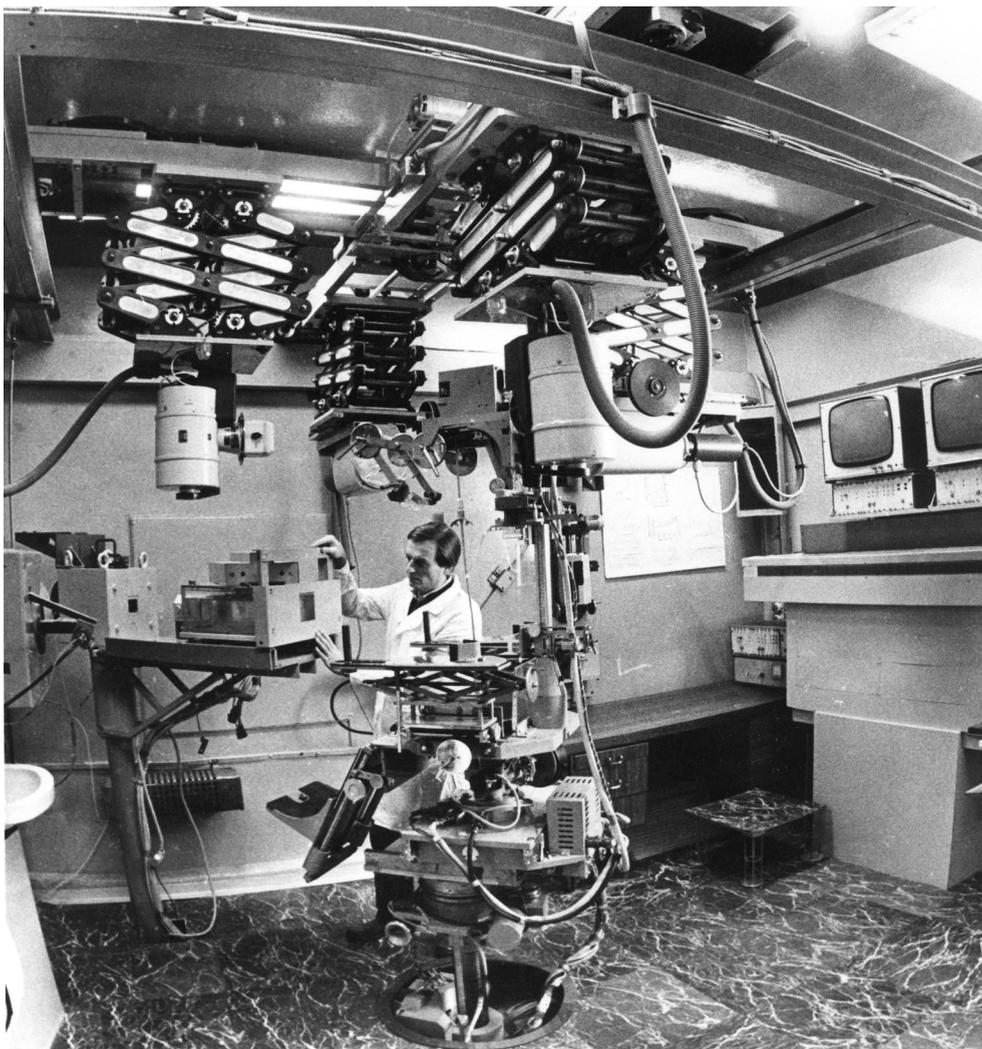
<sup>3</sup> *Роганов В.С. и др. Диплом № 259 (1982). Приоритет от 12.12.1969.*

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

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

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

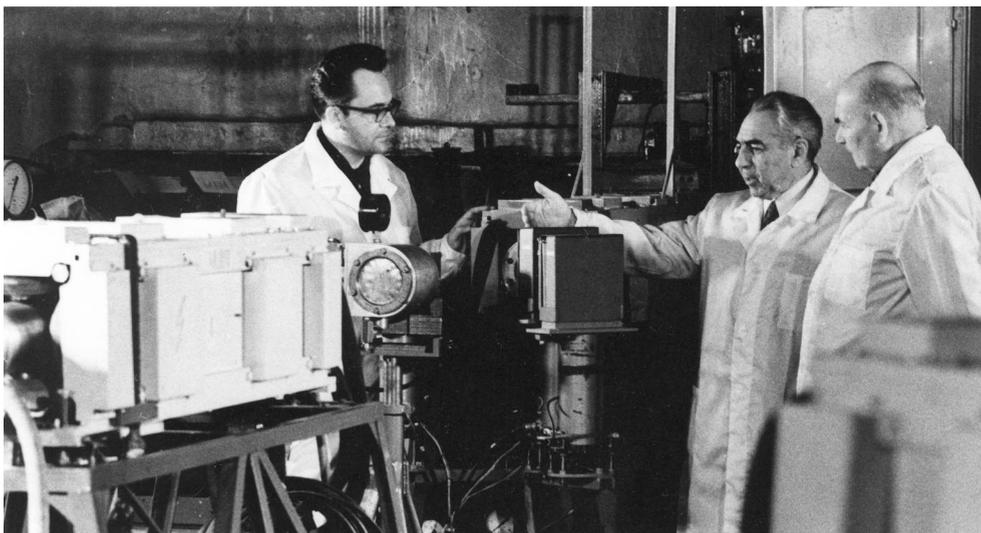
<sup>7</sup> *Жуков В.А. и др. Диплом № 268 (1982). Приоритет от 18.04.1972.*



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 опухолей, для облучения с помощью терапевтической гамма-установки и четыре — для облучения в протонных пучках<sup>1</sup>. В содружестве с Институтом медико-биологических проблем под руководством В.П.Джелепова на синхротронной ЛЯП осуществлена большая программа биофизических исследований, связанных

<sup>1</sup> 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.Тяпкиным<sup>1</sup>, 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-

<sup>1</sup> 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.Писаревым<sup>1</sup>, 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 мажоритирования», обеспечивающий большую яркость свечения и хорошую локализацию треков. Были разработаны как водородная, так и гелиевая стримерные камеры и создан магнитный спектрометр высокой эффективности<sup>2</sup>.

Новый способ регистрации частиц – координатный пропорциональный счетчик, предложенный и осуществленный под руководством В.Г.Зинова, получил широкое распространение в практике физического эксперимента<sup>3</sup>.

Важнейшим научно-техническим достижением ЛЯП стало создание под руководством Г.И.Селиванова первой в ОИЯИ пузырьковой жидководородной камеры<sup>4</sup>.

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.<sup>5</sup> 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 камер<sup>6</sup>; 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 мкм<sup>7</sup>; созданы и широко используются в экспериментах пропорциональные проволочные камеры, работающие в пучках высокой интенсивности с плотностью  $10^7 \div 10^8$  с<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup>. Размеры камер  $350 \times 350$  мм<sup>2</sup> с временным разрешением на полувысоте 5 нс.<sup>8</sup>

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

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

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

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

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

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

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

<sup>8</sup> 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  $\gamma$ -квантами малых энергий в лаборатории созданы высокочувствительные прецизионные полупроводниковые детекторы на основе сверхчистого германия<sup>1</sup>.

Эффективные методы получения высокоактивных препаратов редкоземельных элементов для ядерной спектроскопии были разработаны в ЛЯП под руководством В.А.Халкина<sup>2</sup>.

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-

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

<sup>2</sup> 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)<sup>1</sup>. 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 спектров<sup>2</sup>. 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 ускорителях<sup>3</sup>. 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 монографии<sup>4</sup>, 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 энергий<sup>5</sup>.

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.Сороко<sup>6</sup>, в которой рас-

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

<sup>2</sup> 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.

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

<sup>4</sup> Вылов Ц.Д. Спектры излучений радиоактивных нуклидов. Ташкент: ФАН. 1981.

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

<sup>6</sup> 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.

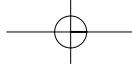
Большой цикл работ был посвящен разработке проблемы изотопической инвариантности сильных взаимодействий. Предложен и выполнен эксперимент (на синхротроне ЛЯП) по проверке этого фундаментального закона с помощью исследования запрещенной законом сохранения изотопического спина реакции  $d + d \rightarrow {}^4\text{He} + \pi^0$ . 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  $\gamma$ -квантов нуклонами в широкой области энергий. Установлена зависимость знака амплитуды распада нейтрального пиона на два  $\gamma$ -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.

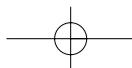
Обнаруженный на ускорителях Серпухова и ЦЕРНа рост полных сечений взаимодействия адронов был впервые объяснен на основе идеи «подкритического» померона, интерсепт которого превышает единицу (Л.И.Лапидус, Б.З.Копелиович и др.). Эта самосогласованная теоретическая схема, удовлетворяющая  $s/t$ -унитарности 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  $\pi^+$ - и  $K^+$ -мезонов с импульсом  $\sim 10$  ГэВ/с в  $\eta$ -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  $\Lambda$ , 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/c<sup>2</sup>. 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.

Структурная перестройка отдела, занимавшегося сооружением, эксплуатацией и совершенствованием синхроциклотрона, началась в 1954 году и завершилась к 1956 году одновременно с вступлением ЛЯП в ОИЯИ. Из отдела эксплуатации синхроциклотрона была выделена группа инженеров и разработчиков по направлениям: формирование и расчеты магнитных полей сложных конфигураций, создание приборов для измерения в них полей с высокой степенью точности, по расчетам и созданию высокочастотных ускоряющих полей, систем радиоэлектроники и специализированных ионных источников для ускорителей различных конструкций. Во главе этого коллектива с 1955 года – В.П.Дмитриевский. Этот коллектив несколько позже стал называться отделом новых ускорителей.

В 1955 году выходит в свет работа Д.Керста и К.Саймона, в которой с целью повышения энергии в циклотроне предложена пространственная вариация магнитного поля, то есть такое магнитное поле циклотрона, которое изменяется как по азимуту, так и по радиусу. В том же 1955 году выходит отчет ИЯП АН СССР № 167 В.П.Дмитриевского: «О предельной энергии частиц в ускорителях типа циклотрон с пространственной вариацией магнитного поля».

В 1955–1958 годах отделом новых ускорителей ведутся интенсивные исследования как по теории движения частиц в магнитных полях сложных конфигураций, так и стендовые испытания структур со спиральной вариацией магнитного поля, создаются модели этих полей, приборы, способные измерять величины магнитного поля с высокой точностью и т. д. Одновременно на магните классического циклотрона У-120 создается модель циклотрона со спиральной структурой магнитного поля. Итогом этих работ в 1958 году был успешный запуск первого в мире изохронного циклотрона со спиральной структурой магнитного поля, на котором были ускорены дейтроны до энергии 12 МэВ при наборе энергии за оборот 5 кэВ. Это означало, что спиральная структура магнитного поля способна обеспечить устойчивое ускорение частиц в циклотронном режиме на протяжении нескольких тысяч оборотов по сравнению со 100 оборотами классического циклотрона или несколькими сотнями оборотов для структуры магнитного поля типа Томаса.

Успехи теории фазового движения и пространственной устойчивости в магнитных полях со спиральной структурой магнитного поля, развитой в Дубне, Харуэлле (Англия) и Ок-Ридже (США), а также экспериментальное подтверждение возможности изохронного ускорения практически до 1 ГэВ вдохновили мировую научную общественность на создание новых приборов для научных исследований, так называемых мезонных фабрик, то есть мощных ускорителей на энергию до 1 ГэВ с токами ускоренных в них частиц, превышающими на 3 порядка токи, которые были получены на синхроциклотронах.

В начале шестидесятых годов разрабатывается сразу четыре проекта мезонных фабрик: в Ок-Ридже под руководством Р.С.Ливингстона ( $Mc^2$ ), в Дубне под руководством В.П.Дмитриевского (РЦ), в Лос-Анджелесе под руководством Р.Ричардсона ( $H^-$ ), в Цюрихе под руководством Г.Виллакса (SIN).

В дальнейшем решениями правительств различных стран к реализации были приняты только два из вышеперечисленных проектов, это: ( $H^-$ ), строительство которого было перенесено в Канаду (ныне известен как проект ТРИУМФ) и шедевр мезонной фабрики SIN (ныне PSI), который плавно прошел все стадии от проектирования до

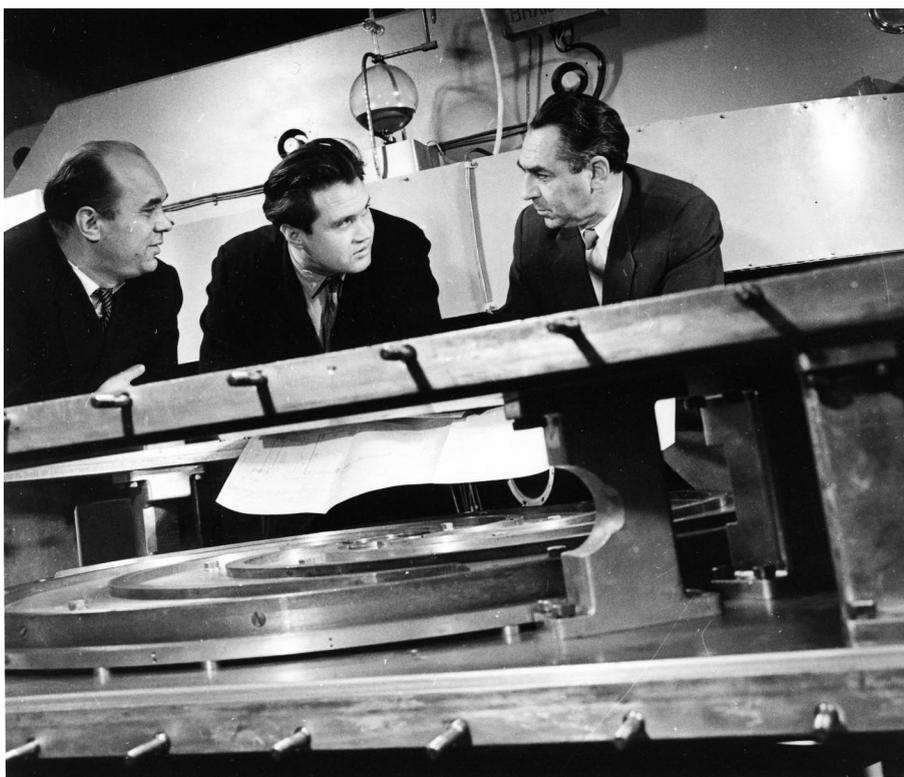


Актуальные задачи физики частиц в ЛЯП всегда решаются  
в тесном содружестве теории и эксперимента  
Слева направо: Б.И.Замолодчиков, Ю.Д.Прокошкин,  
В.П.Дмитриевский, Л.И.Лапидус

строительства, имея лучшие параметры как по интенсивности ускоренного пучка, по коэффициенту вывода пучка, близкого к 1, так и по потерям пучка в процессе ускорения.

В 1958–1962 годах под руководством Б.И.Замолодчикова на синхроциклотроне ЛЯП были проведены работы, результаты которых привели к десятикратному повышению интенсивности ускоренного внутреннего пучка протонов синхроциклотрона. Работы проводились в три этапа. На первом этапе ток пучка был увеличен с 0,25 мкА до 0,8 мкА за счет изменения формы «кривой частота–время» на захвате. На втором этапе работ была изменена форма статорных пакетов вариатора частоты, тем самым удалось устранить фазовые потери тока пучка на средних радиусах (40–80) см, что привело к его повышению на конечном радиусе ускорителя до величины 1,2 мкА. Третий этап заключался в постановке в центральную область синхроциклотрона специальных электростатических электродов, которые увеличили фокусировку по вертикали. При значении фокусирующего напряжения на электроде  $U_{\text{ф}} = -13$  кВ величина тока пучка на конечном радиусе была увеличена примерно в 2 раза и составила 2,3–2,4 мкА.

Возможности для проведения различных физических экспериментов на синхроциклотроне были существенно расширены благодаря созданию новых пучков поляризованных протонов,  $\pi^{\pm}$ -мезонов, нейтронов и в особенности пучков мюонов, полученных от распада  $\pi$ -мезонов в 15-метровом жесткофокусирующем канале из магнитных линз (руководители Б.И.Замолодчиков и А.А.Кропин). В результате пере-



**Создатели первого в мире циклотрона  
со спиральной вариацией магнитного поля (Дубна, 1961 г.)  
Слева направо: Б.И.Замолодчиков, В.П.Дмитриевский, В.П.Джелепов**

численных выше работ синхроциклотрон ЛЯП начал работать на физический эксперимент по  $6 \div 6,5$  тысяч часов в год и по общему признанию стал лучшим синхроциклотроном в мире.

В 1960–1962 годах в отделе новых ускорителей ведутся разработки элементов и систем кольцевого фазотрона со спиральной структурой магнитного поля. По этой программе разрабатывались элементы ведущего магнитного поля фазотрона со спиральной структурой, модели отдельных секторов с таким полем, специализированная высокочастотная система, инжектор в виде одиночного резонатора на энергию протонов 1 МэВ, источник ионов с холодным полым катодом на ток протонов в импульсе длиной 20 мкс до 40 мА.

Особое внимание в этот период времени в отделе новых ускорителей уделялось обоснованию и разработке технического проекта совместно с НИИ ЭФА, МРТИ, ГСПИ и другими ведущими организациями на переоборудование действующего синхроциклотрона ЛЯП в релятивистский протонный циклотрон РЦ на энергию 700 МэВ с током до 1 мА в рамках создания в ОИЯИ мезонной фабрики. Однако по ряду причин этот проект не был реализован.

В 1962 году появляется первое предложение по реализации циклотрона с жесткой фокусировкой. В кольцевом циклотроне делается попытка впервые объединить два таких важных свойства, как изохронность замкнутых орбит и жесткая фокусировка, то есть такая фокусировка, которая обеспечивает частоту радиальных (поперечных) и вертикальных колебаний больше единицы за один полный оборот в ведущем магнитном поле циклотрона.

Проверку динамики пучка ускоряемых частиц в условиях предельных значений пространственного заряда решено было экспериментально на электронной модели кольцевого циклотрона (ЭМКЦ) с соответствующими параметрами подобия к протонному варианту кольцевого циклотрона.

С начала 1963 года в отделе новых ускорителей начались работы по моделированию магнитного поля ЭМКЦ и по созданию электронной пушки и трактов инжекции электронного пучка на первую орбиту циклотрона. Первое сообщение о разработке ЭМКЦ (и фотографии основных ее элементов в процессе сборки) было сделано на IV Международной конференции по циклотронам в Гатлинбурге в 1966 году<sup>1</sup>.

Физический запуск ЭМКЦ состоялся в январе 1967 года. В течение нескольких лет на ЭМКЦ проводились интенсивные исследовательские работы по изучению динамики пучка при больших значениях величины собственного пространственного заряда. В результате этих работ получены предельные значения достижимого тока пучка, проверена теория смещения рабочей точки некогерентных колебаний к ближайшему целочисленному значению параметрического резонанса, отработана система стабилизации и подавления фазового смещения центра тяжести пучка в процессе ускорения, по-новому была решена задача абсолютной привязки фазы пучка. С помощью цифрового частотомера, разработанного к.т.н. П.Т.Шишлянниковым, в режиме циркуляции пучка в ЭМКЦ измерены частоты обращения сгустка частиц по радиусу ускорения с точностью  $\pm 2 \cdot 10^{-5}$ , что использовалось позже для автоматической (с привлечением ЭВМ) коррекции среднего магнитного поля ускорителя по пучку.

В 1967–1969 годах в связи с успехами в физических исследованиях, проведенных на тандемных электростатических ускорителях, появился заметный интерес к моноэнергетическому пучку ускоренных ионов с разбросом энергии  $\Delta W/W \sim 10^{-4}$ . В этот период в НЭОНУ появилось предположение, а затем и отдельные наработки по созданию циклотрона с регулируемой энергией и моноэнергетическим пучком. В апреле 1969 года в Дубне состоялось рабочее совещание по созданию моноэнергетического циклотрона<sup>2</sup>. Однако и эти работы не получили дальнейшего развития из-за отсутствия достаточного для них финансирования.

В 1970 году было сформировано окончательное предложение НЭОНУ по модернизации У-120, работающего в Ржеже (ЧССР), в современный изохронный циклотрон с регулируемой энергией, который был обозначен как У-120М. В 1970 году в Дубне состоялось первое рабочее совещание по У-120М с привлечением большого числа специалистов-ускорительщиков из стран-участниц ОИЯИ<sup>3</sup>. В октябре 1971 года в Дубне прошло аналогичное 2-е рабочее совещание по У-120М, а в 1973 году в Ческе-Будеёвице (ЧССР) прошло завершающее 3-е рабочее совещание по У-120М.

<sup>1</sup> IEEE Trans, NS-13. 1966. No. 4. P. 215.

<sup>2</sup> ОИЯИ, 13-4496. Дубна, 1969.

<sup>3</sup> ОИЯИ, P9-5498. Дубна, 1971.

Весной 1976 года в Дубне был осуществлен физический пуск циклотрона У-120М, и после транспортировки при помощи 11 большегрузных трейлеров всех его элементов в Ржеж (ЧССР) в октябре 1977 года успешно прошел основной запуск на его рабочем месте в Институте ядерных исследований ЧСАН, где он проработал, выполняя большую программу физических исследований и осуществляя наработку медицинских фармпрепаратов многие годы.

После того как на электронной модели кольцевого циклотрона были исследованы основные процессы поведения пучка при предельных значениях пространственного заряда, на повестку дня был поставлен вопрос об эффективном, близком к 100%, выводе пучка из циклотрона.

В отделе велись как интенсивные работы с применением численного моделирования на ЭВМ, так и эксперименты на ЭМКЦ с использованием прецессии орбиты на конечном радиусе ускорения. В 1972 году была опубликована работа В.П.Дмитриевского, В.В.Кольги и Н.И.Полумордвиновой<sup>1</sup>, в которой предложен метод вывода пучка из циклотрона с эффективностью, близкой к 100%, получивший затем термин «эффект расширения замкнутых орбит».

В 1972–1973 годах после модернизации систем, обеспечивающих требуемый закон изменения магнитного поля на конечных радиусах ЭМКЦ, на электронной модели проведены первые эксперименты по поиску эффекта расширения замкнутых орбит, которые подтвердили, что энергетический шаг орбиты в зоне вывода может быть увеличен в 10–15 раз. Дальнейшие расчеты и моделирование процесса ускорения на ЭВМ показали, что для улучшения условий вывода при помощи эффекта расширения требуется существенно улучшить качество ускоряемого пучка в циклотроне. Из этих расчетов следовало, что в зоне вывода колебания частиц пучка при их ускорении не должны превышать 4–5 мм, а амплитуды низших гармоник аксиальной составляющей магнитного поля должны быть существенно ниже тысячных долей от основного поля. Для ЭМКЦ это составляет значение 0,05 Гс, то есть в десять раз ниже магнитного поля Земли. На первом этапе работ с целью уменьшения амплитуды колебаний частиц пучка, связанных с асимметрией энергии набора энергии за оборот, один 90° дуант был заменен двумя 45° дуантами, расположенными симметрично напротив друг друга и возбужденными в противофазе. С этой же целью была смонтирована система корректирующих обмоток, позволяющих изменять величину и фазы низших гармоник магнитного поля во всей области ускорения от инъекции до вывода. Всего было установлено четыре группы по одиннадцать пар корректирующих обмоток. После проведенных модернизаций в экспериментах на ЭМКЦ с пучком было показано, что поставленные требования по качеству пучка выполнены: амплитуды колебаний частиц в пучке были доведены до 4–5 мм по всей зоне ускорения. Далее надо было выполнить еще одно требование по улучшению качества пучка – уменьшению энергетического разброса в пучке. Поставленное требование можно было решить двумя способами. В первом способе необходимо было создать такую систему инъекции, которая обеспечила бы очень короткие по времени сгустки пучка частиц. Если в стандартном циклотроне азимутальная протяженность ускоряемого пучка составляет примерно 30–40°, то требование к моноэнергетичности пучка в ЭМКЦ при-

<sup>1</sup> ОИЯИ Р9-7633. Дубна, 1972.

водило к значению не более  $5^\circ$  и то только в том случае, когда фаза центра ступка при ускорении в зависимости от радиуса ускорения остается неизменной. В реальном же магнитном поле циклотрона фаза центра ступка в процессе ускорения изменяется в пределах  $\pm 15^\circ$ , только при применении специальной системы коррекции эти изменения могут быть уменьшены до значения  $\pm 5^\circ$ . Поставленная задача инъекции короткого ступка частиц была решена при помощи специального высокочастотного инжектора.

Следующим шагом в обеспечении условий, улучшающих моноэнергетичность частиц в пучке, стали создание и реализация новой ускоряющей системы с применением сложения гармонических колебаний первой и последующих кратностей, так называемый режим с плоской вершиной. В таком режиме ускорения пучок частиц значительной протяженности может двигаться по плоской вершине синусоиды и набирать в процессе ускорения практически одну и ту же энергию для всех частиц, находящихся в пучке. При реализации режима ускорения с плоской вершиной на ЭМКЦ были разработаны дополнительный третий гармонический дуант с замысловатым профилем по радиусу, изготовлен сложный комплекс радиочастотной аппаратуры, включающей в себя восемь самостоятельных блоков. Следует отметить, что для того чтобы указанный режим работы ВЧ-системы оказался эффективным, необходимо создать условия для поддержания синхронной работы двух основных и третьего гармонического дуантов с точностью по времени  $3 \cdot 10^{-12}$  с. Описанное выше сложное оборудование изготовлено, запущено в действие и показало полную свою работоспособность. Эксперименты, проведенные на ЭМКЦ, показали, что разработанный комплекс обеспечивает лучший режим токопрохождения с разделением орбит практически до конечного радиуса и эффективное разделение орбит на радиусе вывода. Коэффициент вывода пучка с эффектом разделения составил  $\eta = 99,5\%$ .

Как уже отмечалось выше, по финансовым соображениям не был принят к реализации проект релятивистского циклотрона РЦ, который должен был заменить успешно работающий синхроциклотрон. Но общеизвестно, что любой ускоритель, достигший даже рекордных параметров по интенсивности и качеству пучков, примерно через 15–20 лет теряет эти преимущества и не в состоянии обеспечить условия для получения новых высокозначимых физических результатов, поэтому в 1967 году как альтернатива проекту «РЦ» в отделе новых ускорителей был предложен к реализации проект фазотрона со спиральной структурой магнитного поля на энергию протонов 680 МэВ<sup>1</sup>. Этот проект был обозначен как проект «Ф».

Руководство по реализации проекта «Ф» осуществлялось В.П.Джелеповым, В.П.Дмитриевским и на завершающей стадии – Л.М.Онищенко. При реконструкции машины были заменены практически все основные элементы и системы синхроциклотрона. Из старого оборудования ускорителя использованы только ярмо основного магнита и высоковакуумные агрегаты. При громадных размерах основных деталей (полюс магнита составляет 6 м) необходимо было изготавливать сложные по форме многотонные детали с ювелирной точностью (доли мм), что требовало уникальных механических станков, имеющихся в наличии только в единичном исполнении на

<sup>1</sup> Глазов А.А. и др. ОИЯИ 9-3211. Дубна, 1967; Glazov A.A. et al. // Proc of 6-th Int. Conf. On High Energy Accel. Cambridge, 1967.

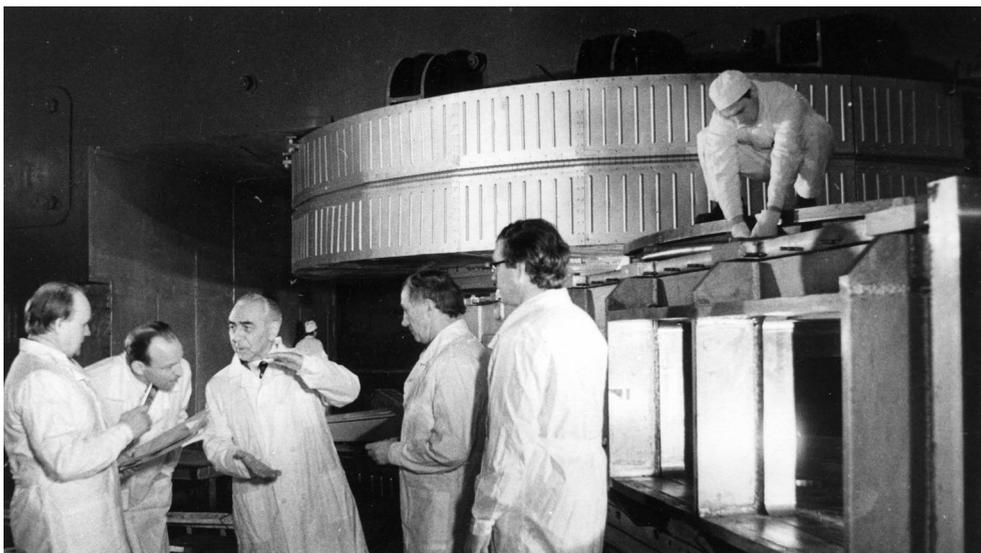


Главный зал фазотрона ОИЯИ

специализированных предприятиях страны. Изготовление двух вариаторов частоты, представляющих собой практически высокооборотные турбины, требовало также решения целого ряда как механических, так и технологических проблем. На сооружение всего комплекса уникального оборудования установки «Ф» потребовалось в общей сложности более 12 лет.

Физический пуск фазотрона был осуществлен летом 1984 года<sup>1</sup>. После доводки некоторых систем ускорителя и усиления фокусировки в его центральной области с

<sup>1</sup> Аленицкий Ю.Г. и др. Фазотрон ОИЯИ – физический пуск // 9-е Всесоюз. совещ. по уск. зар. частиц. ОИЯИ Р9-84-641. Дубна, 1984.



**Обсуждение насущных проблем фазотрона**  
Слева направо: В.И.Данилов, А.М.Онищенко, В.П.Джелепов, Ю.А.Кузнецов,  
Ю.Н.Осадченко

1985 года фазотрон ОИЯИ начал работать на физический эксперимент по полной программе.

Величина тока внутреннего пучка фазотрона была доведена до 10 мкА, а коэффициент вывода с новым железно-токовым каналом составил ~50%. Это означало, что интенсивность частиц в каналах пучков была увеличена в 25–40 раз.

Одновременно с сооружением фазотрона был построен ряд новых павильонов и зданий: павильон для размещения физической аппаратуры и измерительного центра, специальный зал для комплекса ЯСНАПП-2 с сепаратором ионов, лаборатория для экспериментов, требующих низкого фона посторонних излучений. Сооружен павильон с шестикабинным комплексом медицинских пучков для лечения онкологических больных.

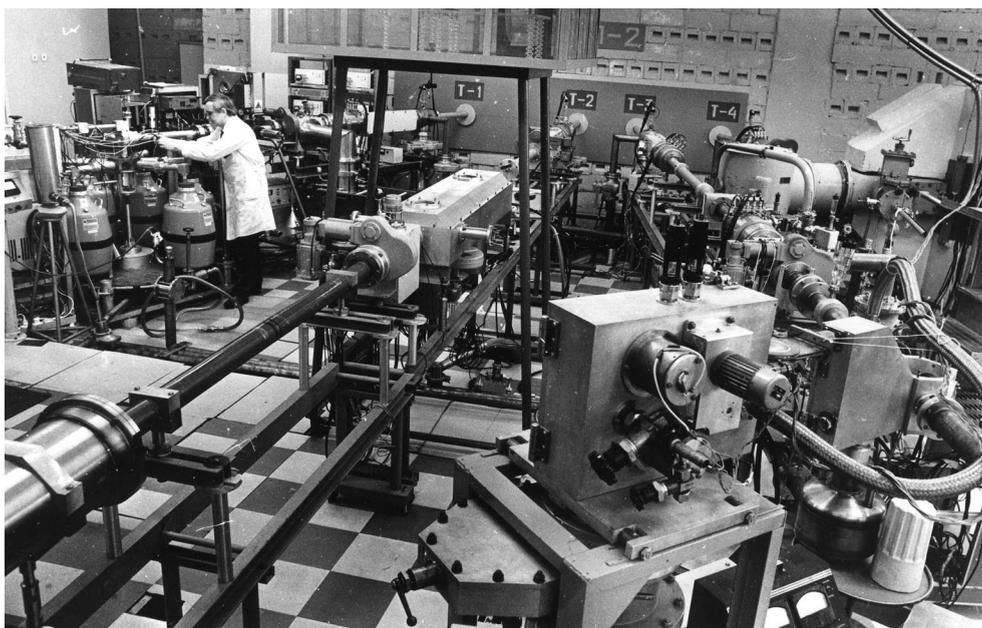
Естественно, эти работы выполнялись общими усилиями всего коллектива сотрудников Лаборатории ядерных проблем и имели четкую координацию.

Красной нитью в работах В.П.Дмитриевского и под его руководством в НЭОНУ проходят работы по электроядерному способу получения атомной энергии и конкретно по изучению, исследованию и созданию ускорителей заряженных частиц, способных быть использованными в этой проблеме.

Более 20 лет отделяет первую фундаментальную работу В.П.Дмитриевского, написанную совместно с В.И.Гольданским и др.: «Электроядерный метод генерации нейтронов»<sup>1</sup> от широко нашумевшей в научной общественности статьи К.Руббиа с сотрудниками по поводу возможности создания так называемого «Усилителя мощности», вышедшей в 1993 году<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Атомная энергия. Т. 29, вып. 3. 1970. С. 151–158.

<sup>2</sup> CERN. Препринт ЦЕРН 15С 93-31, 18,10, 1993.



Установка ЯСНАИП

В ряду большого числа работ по созданию сильноточных ускорителей, предназначенных, в частности, и для электрояда, следует отметить работы В.П.Джелепова, В.В.Кольги и других.

В этом же русле выполняются работы по разработке циклотрона с жесткой фокусировкой, по исследованию динамики ускоряемого пучка частиц при больших плотностях пространственного заряда на ЭМКЦ, по исследованию эффекта расширения замкнутых орбит.

Предложение, появившееся в 1981 году, по созданию циклотронного комплекса на базе каскада из трех секторных циклотронов потребовало проведения объемного цикла исследовательских работ, включающих как многочисленные расчеты на базе ЭВМ с привлечением самого современного программного обеспечения, так и моделирование отдельных элементов циклотронного комплекса, проведение экспериментальных исследований на созданных моделях и макетах. Перечисленные работы заняли во временном интервале около 15 лет и продолжались с должной интенсивностью до середины 90-х годов.

К этому циклу работ необходимо отнести исследования возможности создания специализированного секторного циклотрона-инжектора с теплым магнитом СИЦ-1, предназначенного для инъекции в дейтронный циклотрон второй ступени комплекса ДЦ-1 вместо линейного ускорителя QRF.

Наиболее тщательно были исследованы элементы второй ступени комплекса ДЦ-1, в котором предполагалось ускорять частицы от энергии 7,5 МэВ/нуклон до 45 МэВ/нуклон. Для экспериментальных исследований изготовлены полномасштаб-

ные прототипы сверхпроводящего секторного магнита (один элемент из четырех) и полномасштабный прототип ускоряющего  $\Delta$ -резонатора (один из двух).

Для обеспечения требуемых температур хладагента сверхпроводящего магнита практически создана целая криогенная лаборатория на основе криогенной гелиевой установки КГУ-150/4,5. Собственными силами изготовлена сверхпроводящая обмотка секторного магнита. Изготовлены и смонтированы железное ярмо магнита и вакуумная камера криостата. Проведены многочисленные расчеты и эксперименты по работоспособности и надежности при эксплуатации выбранной конструкции, расчеты механических напряжений и возможных деформаций элементов криосистемы, создана система криообеспечения магнита и система защиты в аварийных ситуациях и т.д.

В циклотронах, имеющих секторную структуру магнита, могут быть использованы объемные резонаторы, обладающие высокой запасенной энергией ВЧ поля и способные обеспечить ускоряющее напряжение величиной до (500–600) кВ. Для исследования подобного резонатора изготовлена полномасштабная модель такого резонатора, на котором проведены детальные радиотехнические исследования, оптимизирующие набор энергии ускоряемыми частицами как на стадии инжекции, так и в зоне вывода пучка частиц на конечных радиусах ускорения.

В 1987 году выходит работа В.П.Дмитриевского с сотрудниками НЭОНУ, обосновывающая возможность одновременного ускорения в циклотроне протонов и  $H^-$  отрицательных ионов водорода<sup>1</sup>. Цель этого предложения – увеличение интенсивности при использовании одновременно положительной и отрицательной полуволны ускоряющего электрического поля. При этом накладываются специальные требования на сдвиг фазы ускоренных одновременно положительных и отрицательных ионов из-за разницы их массы покоя. В 1988 году это предложение было экспериментально реализовано на циклотроне У-120М Института ядерной физики ЧСАН в Ржеже (ЧССР)<sup>2</sup>.

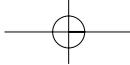
В 1989–1993 годах по заказу Республики Куба, страны-участницы ОИЯИ, в НЭОНУ разрабатывался проект целевого циклотрона У-120К, проект был тщательно разработан, доведен до технического выполнения и согласован со страной – заказчицей проекта.

В марте 1991 года был подписан контракт ОИЯИ с Институтом ядерной физики Узбекской ССР о создании специализированного циклотрона У-115 на энергию протонов 20 МэВ для производства в промышленном масштабе коммерческих изотопов. С конца апреля 1992 года в пристройке № 2 ЛЯП, принадлежащей НЭОНУ, начинается сборка основных узлов У-115Т, изготовленных в механических мастерских ЛЯП. Летом этого же года сформировано магнитное поле циклотрона, получены рабочий вакуум в камере ускорителя и рабочее напряжение на дуанте циклотрона (50–60) кВ. В октябре 1992 года основные элементы циклотрона У-115Т были оттранспортированы заказчику в Институт ядерной физики Узбекской ССР в Улугбек под Ташкентом.

В ноябре 1999 года коллектив сотрудников НЭОНУ приступил к выполнению проектных работ по созданию циклотрона ЦИТРЕК для производства трековых мембран по заказу холдинговой компании «ТРЕКПОР ТЕХНОЛОДЖИ». По проекту

<sup>1</sup> Дмитриевский В.П. и др. ОИЯИ Р9-87-703. Дубна, 1987; EPAC, Rome. 1998. V. 1. P. 616–618.

<sup>2</sup> Бейшовец В. и др. ОИЯИ Р9-88-249. Дубна, 1988.



циклотрон должен быть компактен, иметь внешнюю инжекцию с источником ионов типа ECR, обеспечивать интенсивность пучка ионов  $84 \text{ Кг}^{+17} \cdot 10^{11}$  ч/с. Основные узлы этого циклотрона изготавливались в цехах опытного производства в Дубне. Сдача в эксплуатацию циклотрона ЦИТРЕК осуществлена летом 2002 года.

### 3. Пучки синхроциклотрона и фазотрона ЛЯП ОИЯИ

В 1949–1974 годах наряду с постепенным развитием и совершенствованием синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем происходило количественное увеличение и качественное улучшение первичных и вторичных пучков, получаемых на внутренних и внешних мишенях этого ускорителя. Повышение интенсивности внутреннего протонного пучка до 2,3 мкА и увеличение коэффициента его вывода, осуществление медленного вывода протонов и появление ряда новых пучков существенно расширили возможности постановки принципиально новых экспериментов и значительно улучшили условия проведения на синхроциклотроне физических и прикладных исследований.

Схема образования и разводки пучков синхроциклотрона ЛЯП к началу его реконструкции в фазотрон с пространственной вариацией магнитного поля показана на рис. 1.

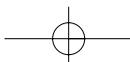
Пионные пучки с энергией от 140 до 370 МэВ с мезонного пробника № 4 попадают в мезонную лабораторию через коллиматоры 1, 2, 3 в ярме магнита. Поляризованные протоны с нейтронного пробника № 2 выводятся через коллиматор № 4 с энергией 635 МэВ в поляризационную лабораторию. Поляризованные протоны получают с внешней мишени, расположенной на выведенном протонном пучке, и через коллиматоры № 5–№ 9 попадают в зал экспериментальных установок. Мезонные пучки с импульсом около 180 МэВ/с, образованные на мезонном пробнике № 1 внутри ускорителя, выводятся в этот же зал через коллиматоры от № 6 до № 10 с помощью отклоняющего магнита СП37.

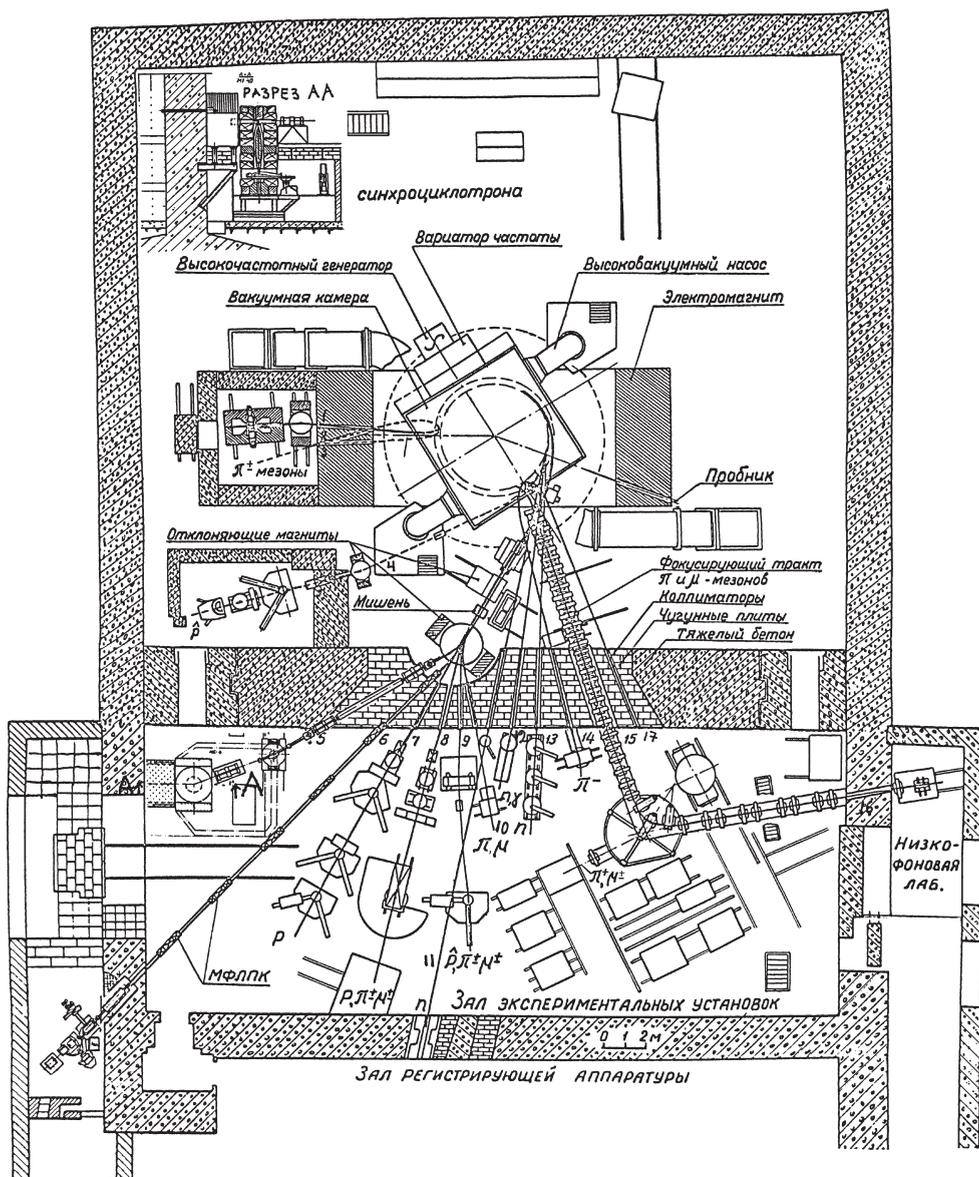
Используя внешнюю мишень, расположенную на выведенном протонном пучке, через СП37 и коллиматор № 6 в зал экспериментальных установок выводятся пучки положительных мезонов с энергией 30–70 МэВ и 170–350 МэВ. Через этот же коллиматор получают пучки очень медленных мюонов (~ 5 МэВ) при торможении мезонного пучка с импульсом около 180 МэВ/с.

Через коллиматоры № 6, № 7, № 8 в зал экспериментальных установок выводятся протоны с энергией 667 МэВ с помощью магнитного канала, расположенного внутри ускорителя.

В зале экспериментальных установок нейтронные пучки получают через коллиматоры № 11, № 12, № 13 с нейтронного пробника № 2. Этот пробник используется также для получения пучков  $\gamma$ -квантов и электронов через те же коллиматоры.

С мезонного пробника № 1 образуются мезонные пучки с энергией 300 и 160 МэВ через коллиматоры № 14 и № 17. Для другого азимутального расположения мезонной мишени через коллиматор № 14 получают пучки  $\gamma$ -квантов и электронов. С этого же пробника через мезонный канал № 15 образуются чистые мюонные пучки с энергией от 30 до 250 МэВ и пионные пучки с энергией от 80 до 300 МэВ, которые выво-





**Рис. 1.** Схема разводки пучков синхроциклотрона ЛЭП ОИЯИ (1974 г.)

дятся в зал экспериментальных установок, а также через дискретный фокусирующий канал и коллиматор № 16 в низкофоновую лабораторию.

Использование внутреннего пучка, помимо образования вторичных пучков, осуществляется также с помощью радиохимического пробника № 3, на котором производится облучение различных материалов.

Через коллиматоры № 5, № 6 и № 7 выводятся пучки для прикладных исследований. На продолжении коллиматора № 6 создан фокусирующий протонный канал, который транспортирует протоны с энергией от 90 до 200 МэВ, образованные путем торможения выведенного протонного пучка, в процедурную кабину для проведения медико-биологических и клинических исследований по лечению онкологических больных.

На направлении коллиматора № 5 с помощью широкоугольной соленоидальной линзы с неоднородным аксиально-симметричным магнитным полем получен  $\pi$ -мезонный пучок высокой интенсивности для медико-биологических и физических исследований. Через коллиматор № 7 выводится нейтронный пучок, образованный под углом  $0^\circ$  на внешней бериллиевой мишени толщиной 36 см. Пучок предназначен для проведения дозиметрических и радиобиологических измерений.

Параметры пучков синхроциклотрона по состоянию на июнь 1971 года приведены в таблице 1.

**Таблица 1. Параметры пучков синхроциклотрона при токе внутреннего пучка 2,3 мкА (июнь 1971 г.)**

Частицы	Энергия (МэВ)	Коллиматор	Интенсивность ( $c^{-1}$ ) на всю площадь детектора	Площадь детектора ( $cm^2$ )
Протоны (выведенный пучок)	$667 \pm 3$	6,7,8	$1 \cdot 10^{12}$	12
Поперечно поляризованные протоны	$635 \pm 9$	4	$4,5 \cdot 10^7$	10
	$612 \pm 9$	5,9*	$6 \cdot 10^7$	10
Продольно поляризованные протоны	$612 \pm 9$	5,9*	$6 \cdot 10^7$	10
Протоны (медицинский канал)	$90 \pm 16$	6*	$4 \cdot 10^8$	20
Протоны (медицинский канал)	$185 \pm 11$	6*	$1,2 \cdot 10^9$	20
Нейтроны (по всей площади спектра)	500÷650	11,12,13	$3 \cdot 10^6$	18
Нейтроны от толстой внешней мишени	350 (средняя энергия)	7	$10^8$	75
Гамма-кванты	10÷600	11	$2,4 \cdot 10^5$	20
$\pi^+$ -мезоны	$60 \pm 2$	6*	$4 \cdot 10^4$	75
	$70 \pm 3$	8,9	$8 \cdot 10^4$	75
	$307 \pm 6$	9,6*	$4 \cdot 10^5$	75
	$346 \pm 9$	9*	$4 \cdot 10^4$	75
$\pi^-$ -мезоны	$70 \pm 3$	8,9,10	$8 \cdot 10^4$	75
	$155 \pm 5$	17	$4 \cdot 10^4$	60
	$250 \pm 9$	1	$3 \cdot 10^4$	16
	$300 \pm 8$	14	$4 \cdot 10^4$	75
	$370 \pm 8$	1	$5 \cdot 10^3$	16

Таблица 1 (окончание)

Частицы	Энергия (МэВ)	Коллиматор	Интенсивность ( $c^{-1}$ ) на всю площадь детектора	Площадь детектора ( $cm^2$ )
$\mu^+$ -мезоны	$95 \pm 7$	8,9,10	$1 \cdot 10^4$	60
$\mu^-$ -мезоны	$95 \pm 7$	8,9,10	$6 \cdot 10^4$	75
$\pi^+$ -мезоны (соленоидальная линза)	$30 \pm 4$		$4 \cdot 10^7$	80
$\pi^-$ -мезоны (соленоидальная линза)	$30 \pm 4$		$1 \cdot 10^7$	80
<i>Пучки мезонного канала</i>				
$\mu^-$ -мезоны (примесь пионов 7%)	$30 \pm 3$ $76 \pm 6^{**}$		$3,5 \cdot 10^4$ $1,5 \cdot 10^5$	75 75
$\mu^-$ -мезоны (низкофоновая лаборатория)	$73 \pm 6$		$3,0 \cdot 10^4$	75
$\mu^-$ -мезоны (примесь пионов ~5%)	$167 \pm 13$		$1,4 \cdot 10^5$	75
$\mu^-$ -мезоны	$275 \pm 22$		$5 \cdot 10^5$	75
$\mu^+$ -мезоны	$115 \pm 11$		$6 \cdot 10^4$	75
$\pi^+$ -мезоны	$89 \pm 4$		$2,0 \cdot 10^5$	75
$\pi^-$ -мезоны	$89 \pm 4^{**}$ $160 \pm 9$		$5,9 \cdot 10^5$ $1,0 \cdot 10^6$	75 75
$\pi^-$ -мезоны (низкофоновая лаборатория)	$150 \pm 10$		$2,5 \cdot 10^5$	75
$\pi^-$ -мезоны	$294 \pm 15$		$1,2 \cdot 10^6$	75

Интенсивности мезонных пучков даны для растянутого пучка.

\* Внешняя мишень.

\*\* Число мюонных и пионных остановок в максимуме кривой пробега для мишени из углерода площадью 80 см и толщиной 1 г/см составляет  $1,6 \cdot 10^4 c^{-1}$  и  $4,8 \cdot 10^4 c^{-1}$  соответственно.

Достигнутые интенсивности нуклонных и мезонных пучков позволили выполнить на синхроциклотроне ЛЯП большой комплекс исследований по физике элементарных частиц и атомного ядра и получить много новых научных результатов. Среди них тринадцать новых явлений, зарегистрированных в СССР как открытия.

В 1979–1984 годах синхроциклотрон Лаборатории ядерных проблем был реконструирован в фазотрон с пространственной вариацией магнитного поля. Повышение интенсивности внутреннего пучка, наряду с ростом в несколько раз коэффициента вывода протонного пучка, позволило увеличить интенсивность выведенного пучка протонов в 20–25 раз и отказаться от использования внутренних мишеней для генерации вторичных пучков, за исключением облучения материалов для некоторых радиохимических экспериментов.

На реконструированном фазотроне создана и действует разветвленная система из 10 каналов пучков, которые используются для физических и прикладных экспериментов с пи-мезонами, нейтронами и протонами.

Схема расположения реконструированного фазотрона и трактов его пучков изображена на рис. 2.

Мезонные каналы I и II предназначены для получения сепарированных и несепарированных мюонных, пионных и электронных пучков с энергией 30–300 МэВ. Основное назначение канала II – формирование сепарированных мюонных пучков в низкофоновой лаборатории. После модернизации этих каналов, проведенной в 2000–2003 годах, на них стало возможным и получение низкоэнергетических мюонных пучков, включая «поверхностные» мюоны с энергией около 4 МэВ.

Канал III предназначен для получения пионных пучков с энергией 50–250 МэВ. Проведенная в 2000–2003 годах модернизация этого канала расширила диапазон энергий получаемых пионных пучков до 15 МэВ в низкоэнергетичной области и до 400 МэВ в сторону высоких энергий.

Для получения протонных пучков с энергией 70–660 МэВ используется канал VI.

На канале VIII формируются широкие и узкие заторможенные протонные пучки в диапазоне энергий от 100 до 660 МэВ с возможностью уменьшения разброса по импульсу до 0,5%.

Интенсивные мезонные пучки получают на канале IX с помощью широкоугольной соленоидальной магнитной линзы. В 1992–1993 годах этот канал был дополнен магнитным спектрометром, позволившим получать интенсивные пучки сепарированных «поверхностных» мюонов и сепарированные пионные пучки с энергией до 20 МэВ.

Канал X предназначен для формирования нейтронного пучка со средней энергией около 350 МэВ. Узкие протонные пучки (диаметром от 5 до 20 мм) формируются на канале XI.

Для транспортировки протонного пучка в здание ЯСНАПП используется канал XII.

Канал XIII формирует пионные пучки на установку СТРИМЕР.

Облучение мишеней для радиохимических исследований производится на внутреннем пучке фазотрона в диапазоне энергий от 70 до 660 МэВ при интенсивности пучка протонов до 6 мкА.

Основные характеристики нуклонных, мезонных и электронных пучков фазотрона приведены в таблицах 2 и 3. Физико-дозиметрические характеристики медицинских пучков реконструированного фазотрона приведены в таблице 4. Интенсивности вторичных пучков в таблицах приведены в расчете на 1 мкА выведенного протонного пучка.

В результате реконструкции синхроциклотрона в фазотрон с пространственной вариацией магнитного поля интенсивности пучков положительных пионов увеличились на один-два порядка, а интенсивность пучка сепарированных положительных мюонов возросла примерно в десять раз. Стало возможным получение интенсивных пучков медленных пионов и мюонов, в том числе сепарированного пучка «поверхностных» мюонов.

Для проведения широкого круга медико-биологических и клинических исследований сформированы широкие и узкие пучки протонов с энергией от 70 до 660 МэВ,



Таблица 2. Параметры нуклонных пучков фазотрона

Номер канала	Вид частиц	Энергия (МэВ)	Интенсивность	Диаметр пучка (см)	Примечание
VI	<i>P</i>	70–660	$10^{8*}$		Получаются торможением в углеродном замедлителе
VIII	<i>P</i>	200	$5 \cdot 10^8$	2–6	
VIII	<i>P</i>	100	$10^8$	2–6	
VIII	<i>P</i>	660	$10^6$	0,3	
VIII	<i>P</i>	130	$5 \cdot 10^6$	3–5	
IX	<i>P</i>	660	$1,2 \cdot 10^{13*}$		
X	<i>N</i>	350	$(3-5) \cdot 10^8$	5–15	Нейтроны получают на бериллиевой мишени толщиной 36 см
XI	<i>P</i>	660	$5 \cdot 10^7$	0,5–2	
XII	<i>P</i>	660	$1,2 \cdot 10^{13*}$	0,5–1,0	

\* Максимальная интенсивность протонного пучка, допускаемая ограничениями системы дозиметрического контроля фазотрона.

интенсивный пучок отрицательных  $\pi$ -мезонов с энергией от 30 до 80 МэВ, пучок сверхбыстрых нейтронов со средней энергией 350 МэВ.

Фазотрон является сейчас наиболее интенсивным источником мезонных пучков в странах-участницах ОИЯИ. Два мезонных канала I и II обеспечивают получение сепарированных пучков с интенсивностью  $6 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$  для положительных мюонов и  $2 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$  для отрицательных мюонов с наилучшей эффективностью на 1 мкА протонного пучка для жесткофокусирующих каналов такого типа. С помощью широкоугольной магнитной линзы на канале IX при интенсивности выведенного протонного пучка 2 мкА достигнуты интенсивности мезонных пучков  $\sim 3 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$  для положительных и отрицательных пи-мезонов. Кроме того, на канале IX получен пучок так называемых «поверхностных» мюонов (энергия 4 МэВ) с интенсивностью  $\sim 5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ , что сопоставимо с интенсивностями таких пучков на мезонных фабриках.

Для сепарированного пучка поверхностных мюонов на канале IX достигнута интенсивность  $5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$  при соотношении  $N_{e^+}/N_{\mu^+} \approx 2$ .

На канале III в диапазоне энергий 200–300 МэВ получены интенсивности  $2 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$  для положительных пи-мезонов и  $4 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$  для отрицательных пи-мезонов.

Конкурентоспособность фазотрона в современных условиях обеспечивается полученными интенсивностями первичных и вторичных пучков, достаточными для проведения широкого круга электронных экспериментов, где регистрируется каждая входящая в установку частица, наличием интенсивного пучка сепарированных «поверхностных» мюонов, наличием низкофоновой лаборатории, где уровень нейтронного фона позволяет проводить эксперименты, трудновыполнимые на других ускорителях.

В настоящее время научные исследования на пучках реконструированного фазотрона ведутся на следующих основных направлениях: исследования мю-катализа,

Таблица 3. Параметры мезонных и электронных пучков фазотрона

Номер канала	Вид частиц	Энергия (МэВ)	Импульс (МэВ/с)	Поток частиц ( $c^{-1}$ ) через площадь 100 $cm^2$	Разброс $\Delta p/p$	Поляризация	Примесь
I	$\mu^-$	40	100	$4,5 \cdot 10^4$	10%	80%	8% $e^-$
I	$\mu^-$	58	125	$10^5$	10%	80%	8% $e^-$ ; 2,4% $\pi^-$
I	$\mu^+$	58	125	$3 \cdot 10^5$	10%	80%	3% $e^+$
I	$\pi^-$	100	220	$10^6$	10%		
I	$\pi^+$	100	220	$2,5 \cdot 10^6$	10%		
II	$\mu^-$	34	90	$1,5 \cdot 10^4$	10%	75%	7% $e^-$
II	$\mu^-$	58	125	$6 \cdot 10^4$	10%	75%	9% $e^-$ ; 0,4% $\pi^-$
II	$\mu^+$	58	125	$2 \cdot 10^5$	10%	75%	3% $e^+$ ; 0,45% $\pi^+$
II	$e^-$	30	30	$1,4 \cdot 10^5$			$\leq 0,2\% \mu^-$ ; $\leq 0,2\% \pi^-$
II	$e^-$	60	60	$2 \cdot 10^5$			1,2% $\mu^-$ ; $\leq 0,2\% \pi^-$
II	$e^-$	125	125	$6 \cdot 10^5$			17% $\mu^-$ ; $\leq 4\% \pi^-$
II	$e^+$	125	125	$6 \cdot 10^5$			64% $\mu^+$ ; $\leq 12\% \pi^+$
III	$\pi^+$	15–400	65–525	$1,3 \cdot 10^7$	16%		
III	$\pi^-$	15–400	65–525	$2 \cdot 10^6$ при 300 МэВ/с (190 МэВ)	16%		
IX	$\pi^+$	20–77	76–165	$6,6 \cdot 10^7$ при 112 МэВ/с (40 МэВ)	6%		24% $e^+$ ; 6% $\mu^+$ при 112 МэВ/с
IX	$\pi^-$	30–77	95–165	$2,6 \cdot 10^7$ при 123 МэВ/с (47 МэВ)	6%		32% $e^-$ ; 35% $\mu^-$ при 123 МэВ/с
IX	$\mu^+$	$\sim 4$	26–30	$5,3 \cdot 10^5$ при 28 МэВ/с	6%	>90%	$N_{\mu^+}/N_{e^+} = 0,033$ при 28 МэВ/с
IX	$\mu^+$	$\sim 3$	21	$2,5 \cdot 10^5$	9,5%	>90%	$N_{\mu^+}/N_{e^+} = 0,43$
IX	$\pi^+$ (сепарир.)	20	76	$6,8 \cdot 10^5$	9,5%		$N_{\pi^+}/N_{e^+} = 3,0$

**Таблица 4. Физико-дозиметрические характеристики медицинских пучков реконструированного фазотрона**

Номер канала	Энергия транспортируемых протонов (МэВ)	Номер кабины	Вид частиц в кабине и их энергия (МэВ)	Интенсивность частиц в кабине ( $c^{-1}$ )	Диаметр пучков в кабине (см)	Мощность дозы в месте нахождения облучаемого объекта (рад/мин)
VIII	200	1	протоны 200	$5 \cdot 10^8$	2–6	10–200
VIII	100	1	протоны 100	$10^8$	2–6	30–120
VIII	660	1	протоны 660	$10^6$	0,3	6,0
VIII	130	2	протоны 130	$2 \cdot 10^8$	3–6	25–100
XI	660	3	протоны 660	$5 \cdot 10^7$	0,5–2	600
IX	660	4	$\pi^-$ -мезоны 30–80	$2 \cdot 10^7$	2–10	4–6
X	660	5	Нейтроны, средняя энергия 350	$5 \cdot 10^8$	5–15	2,5–9
X	250	5	протоны 250	$5 \cdot 10^9$	До 21	До 2000
VI	70–100	7	протоны 70–100	$3 \cdot 10^8$	0,5–2	До 3000

изучение редких и экзотических распадов пионов и мюонов и процессов взаимодействия пионов с легкими ядрами, исследование конденсированных сред  $\mu SR$ -методом, ядерная спектроскопия на комплексе ЯСНАПП-2, исследования электроядерного способа получения энергии и трансмутации радиоактивных отходов, медико-биологические и клинические исследования по адронной терапии онкологических больных.

В планах дальнейшего развития трактов пучков фазотрона намечены разработка и создание канала транспортировки выведенного протонного пучка с вертикальным направлением подвода пучка снизу-вверх к мишени подкритической сборки установки SAD.

#### 4. Заключение

Сфера научной деятельности сотрудников Лаборатории ядерных проблем им. В.П.Джелепова 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); исследования слабых взаимодействий и физики нейтрино; экспериментальное изучение конденсированных сред; теоретическую поддержку экспериментальных исследований; изучение

медико-биологических проблем; разработку новых методов ускорения частиц и новых экспериментальных установок и приборов.

Характерной чертой коллектива лаборатории, руководимого бессменно В.П.Джелеповым в течение 32 лет, является высокая инициативность в постановке оригинальных исследований, в развитии новых научных направлений и передовой методики современного эксперимента, а также высокая надежность научных результатов. Лаборатория всегда открыта для новых идей, для выхода за пределы привычных тематик – в этом ярко отразилось ценное качество Венедикта Петровича Джелепова как директора и научного руководителя – чувство новизны, стремление выявить наиболее перспективные направления, понимание тенденции развития современной науки.

В лаборатории создан особый, характерный микроклимат, который в значительной мере явился зеркальным отражением обаятельной природы ее директора: 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 получению ряда фундаментальных физических результатов и воспитанию целого поколения физиков, продолживших эту творческую традицию и в других научных центрах. Ядерно-физические исследования Лаборатории ядерных проблем им. В.П.Джелепова имеют широкую международную известность и признание в научном мире.

### **Литература**

- Абазов В.М.* и др. Препринт ОИЯИ Р9-86-648. Дубна, 1986; Мед. радиология. 1988. №1. С. 67.  
*Андреев Е.М.* и др. Сообщения ОИЯИ 9-92-225. Дубна, 1992.  
*Джелепов В.П.* и др. III Совещание по использованию ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. ОИЯИ. Дубна, 1979.  
*Джелепов В.П.* и др. // Мед. радиология. 1987. № 8. С. 81.  
*Роганов В.С.* Публикация ОИЯИ В 1-9-4707. Дубна, 1969. ПТЭ. 1970. № 2. С. 254.