

# Лаборатория высоких энергий им. В.И.Векслера и А.М.Балдина

## 1. Вместо введения

Изучение фундаментальных свойств элементарных частиц и их структуры, а также свойств атомного ядра в релятивистских ядерных столкновениях — важнейшие и традиционные научные направления исследований Лаборатории высоких энергий (ЛВЭ).

Актуальность и научная значимость этих направлений определяются двумя главными, постоянно действующими факторами: запросом теории и поиском новых экспериментальных фактов, выходящих за рамки уже установленных закономерностей и принципов физики микромира.

Из-за бурного развития физики элементарных частиц и релятивистской ядерной физики содержание этих факторов меняется во времени, изменяется и конкретная постановка экспериментов. Если в 50-х и 60-х годах прошлого столетия запросы теории концентрировались вокруг вопросов, связанных с систематикой элементарных частиц, проверкой дисперсионных соотношений, асимптотических теорем и теории комплексных моментов, то в настоящее время наибольшее значение приобрели исследования, связанные с прецизионной проверкой теории электрослабого взаимодействия и предсказаний за ее пределами, изучением кварк-глюонной структуры ядерной материи и поиском новых экспериментальных закономерностей, имеющих принципиальное значение для построения единой теории фундаментальных взаимодействий. В соответствии с этим изменялось и содержание программы экспериментов ЛВЭ: сначала исследования концентрировались вокруг изучения характеристик разного типа бинарных реакций, а позже — вокруг изучения процессов множественного образования частиц, глубоконеупругих взаимодействий и релятивистских ядерных взаимодействий.

В настоящее время программа теоретических и экспериментальных исследований лаборатории направлена на постановку и проведение экспериментов, существенно влияющих на дальнейшее развитие теории сильных взаимодействий и создание современной теории атомного ядра. В частности, ведутся исследования взаимодействий релятивистских ядер в энергетической области от нескольких сотен МэВ до нескольких ТэВ на нуклон с целью поиска проявлений кварк-глюонных степеней свободы в ядрах, асимптотических законов для ядерной материи, а также изучается спиновая структура легчайших ядер.

Все эти исследования предусматривают получение новой информации о свойствах процессов множественного рождения частиц в столкновениях различных ядер; изучение свойств сильно взаимодействующей материи при экстремальной плотности энергии и в переходной области от адронной материи к кварк-глюонной. Поиск и исследование свойств сильно возбужденной ядерной материи позволит осуществить проверку КХД-теории и дать возможные ответы на фундаментальные вопросы: что такое конфайнмент, каковы механизмы адронизации и нарушения киральной симметрии.

Исследования в указанных выше направлениях проводятся с использованием собственной ускорительной базы лаборатории, а также ускорителей других научных центров: CERN, BNL, GSI, RIKEN и т.д.



Сотрудники ЛВЭ — лауреаты Ленинской премии  
Слева направо: А.П.Зиновьев, В.И.Векслер, В.А.Петухов

В настоящее время на ускорительном комплексе ЛВЭ подготавливается к научным исследованиям или уже действует ряд физических установок (СФЕРА, ГИБС, ФАЗА, ДЕЛЬТА-СИГМА, ДЕЛЬТА-2, ДИСК, СМС, МАРУСЯ, СКАН-1, СКАН-2, СТРЕЛА и т. д.), планируется дальнейшее развитие уже существующих экспериментальных установок и создание новых (СИНГЛЕТ, НИС и др.).

Кроме этого, ЛВЭ вносит большой вклад в создание и проведение исследований на ускорителях других научных центров на экспериментальных установках: NA45, NA49, STAR, CMS, ALICE, NADES, WASA и т.д.

Много внимания уделяется дальнейшему развитию ускорительной базы лаборатории. На базе нуклотрона создается пользовательский центр для исследований по релятивистской ядерной физике и решению прикладных задач с использованием релятивистских пучков ионов в области энергий в несколько ГэВ на нуклон. Свое дальнейшее развитие получают технологии быстроциклирующих сверхпроводящих магнитов.

Создание Лаборатории высоких энергий относится к 1953 году, когда в системе научных учреждений Академии наук СССР была образована Электрофизическая лаборатория (ЭФЛАН), главной целью которой являлись строительство самого мощного в мире ускорителя протонов — синхрофазотрона и проведение на нем широкого круга исследований в области физики высоких энергий.

В 1956 году ЭФЛАН вошла в состав ОИЯИ и стала называться Лабораторией высоких энергий. Основателем и первым директором ЛВЭ был выдающийся советский ученый-физик академик Владимир Иосифович Векслер, который в 1944 году открыл принцип автофазировки, лежащий в основе работы всех циклических ускорителей на высокие и сверхвысокие энергии.

Успешный запуск синхрофазотрона на энергию 10 миллиардов электрон-вольт состоялся в 1957 году. В 1959 году за создание этого ускорителя коллектив авторов в составе: В.И.Векслера, Ф.А.Водопьянова, Д.В.Ефремова, Л.П.Зиновьева, А.А.Коломенского, Е.Г.Комара, А.Л.Минца, Н.А.Моносзона, В.А.Петухова, М.С.Рабиновича, С.М.Рубчинского, А.М.Столова получили Ленинскую премию.

Получение ускоренных пучков протонов на синхрофазотроне с энергией до 10 ГэВ позволило ученым из стран-участниц ОИЯИ активно включиться в исследования по поиску новых элементарных частиц и неизвестных ранее закономерностей загадочного микромира в области энергий, которые до этого времени были недоступны ни одной лаборатории мира.

Первая физическая программа исследований на только что созданном ускорителе осуществлялась под руководством В.И. Векслера, М.А.Маркова и И.В.Чувилло.

С 1956 года по 1968 год И.В.Чувилло был вначале заместителем директора, а затем и директором лаборатории.

Со временем синхрофазотрон превратился в ускоритель релятивистских ядер, ускоряющий ядра вплоть до ядер серы. Кроме того, на нем были ускорены поляризованные дейтроны до рекордных энергий 4,5 ГэВ на нуклон.

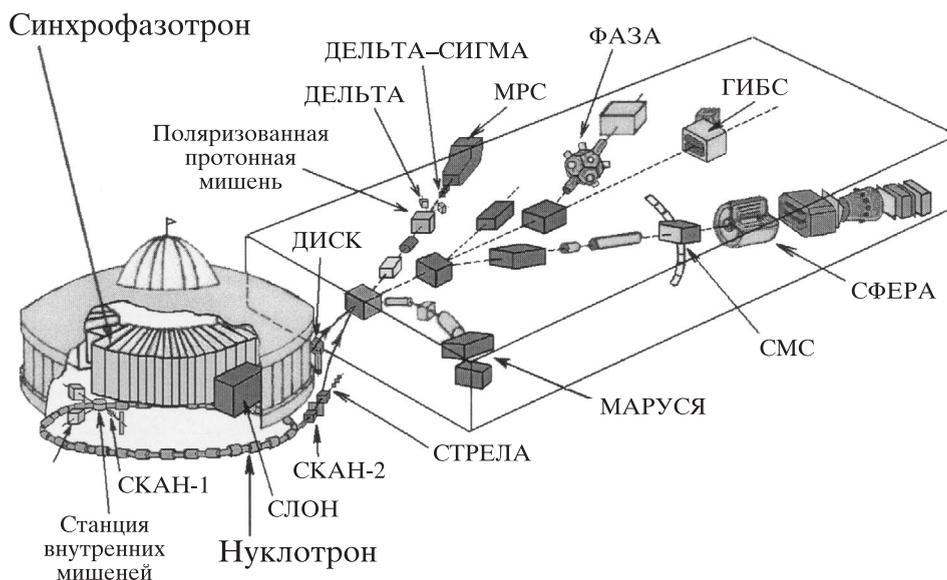
Однако с целью более успешной (на современном уровне) реализации программы исследований по релятивистской ядерной физике в ЛВЭ была выдвинута идея создания нового специализированного сверхпроводящего ускорителя релятивистских ядер — нуклотрона. Этот ускоритель создавался в крайне тяжелых экономических условиях. Он был введен в строй в 1993 году. В конце 1999 года было завершено создание системы медленного вывода и впервые получен выведенный пучок ускоренных протонов из нуклотрона.

Схема современного ускорительного комплекса ЛВЭ синхрофазотрон—нуклотрон приведена на рис. 1.

Современный ускорительный комплекс синхрофазотрон-нуклотрон обязан своим становлением огромной работе, проделанной учеными, инженерами и рабочими лаборатории. Среди них, прежде всего, необходимо отметить таких, как С.А.Аверичев, Н.Н.Агапов, А.М.Балдин, В.И.Батин, О.И.Бровко, М.А.Воеводин, В.И.Волков, Е.Д.Донец, В.П.Заболотин, Л.П.Зиновьев, И.Б.Иссинский, А.С.Исаев, В.Н.Карпинский, А.Д.Кириллов, А.Д.Коваленко, В.Ф.Кокшаров, Б.К.Курятников, В.И.Липченко, Л.Г.Макаров, Е.А.Матюшевский, В.А.Мончинский, А.И.Михайлов, В.А.Михайлов, И.Я.Нефедьев, П.И.Никитаев, С.А.Новиков, Б.Д.Омельченко, Ю.И.Паршаков,



И.В.Чувилло



**Рис. 1.** Схема ускорительного комплекса ЛВЭ синхрофазотрон-нуклотрон

Ю.К.Пилипенко, С.В.Романов, П.А.Рукояткин, И.Н.Семенюшкин, А.А.Смирнов, Ю.И.Тягущкин, С.В.Федуков, Г.Г.Ходжибагян, А.П.Царенков, К.В.Чехлов, В.И.Шарапов, И.А.Шелаев и многих других.

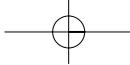
## 2. Физика элементарных частиц

За время своего существования интернациональным коллективом ЛВЭ внесен существенный вклад в развитие физики элементарных частиц и атомного ядра. Физикам ЛВЭ удалось получить целый ряд новых экспериментальных результатов, оказавших принципиальное влияние на создание современного представления о строении вещества. В этот период ими был сделан ряд открытий и впервые установлены многие ранее неизвестные закономерности, сыгравшие важную роль как в дальнейшем развитии теории сильных взаимодействий, так и в создании современной теории атомного ядра. Источниками и составными частями этого успеха в ЛВЭ являлись:

- наличие современного ускорительного комплекса синхрофазотрон-нуклотрон;
- широкое использование в экспериментах новых идей, методических разработок и новейших достижений техники, микроэлектроники и криогеники;
- наличие высококвалифицированного коллектива специалистов.

Подготовка к экспериментам на синхрофазотроне в ЛВЭ шла полным ходом еще до его запуска в следующих главных направлениях исследований:

- изучение бинарных реакций (структура нуклона);



- изучение механизма множественного образования частиц и их распада;
- изучение электромагнитных взаимодействий частиц.

Для проведения экспериментов в этих направлениях было предложено, разработано и создано большое количество разнообразной аппаратуры для экспериментальных установок. В связи с тем что в Советском Союзе не было еще опыта проведения экспериментов на таком крупнейшем в мире ускорителе, каким являлся синхрофазотрон, многое из этой аппаратуры изготавливалось впервые.

Для регистрации и идентификации частиц больших энергий были разработаны и созданы, одновременно и независимо с подобными разработками за рубежом, газовые черенковские счетчики: пороговые (регистрирующие частицы со скоростью больше некоторого порога) и дифференциальные (регистрирующие частицы заданной скорости). Одновременно была начата разработка искровых камер.

В это же время в научно-экспериментальном отделе создается группа (М.Н.Медведев, Е.Н.Матвеева, Л.Я.Жильцова, М.Д.Шафранов и др.) по разработке технологии и изготовлению пластиковых сцинтилляторов, а в криогенном отделе под руководством Л.Б.Голованова разрабатываются разного типа и размера жидководородные мишени.

#### *Изучение бинарных реакций (структура нуклона)*

В связи с тем что для протонов, ускоренных до энергии 10 ГэВ, длина волны де Бройля становится меньше размеров нуклонов, такие частицы становятся хорошим «пробником» для изучения структуры нуклонов с помощью исследования упругого рассеяния протонов на нуклонах.

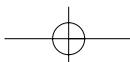
Большое значение имели выполненные в ЛВЭ эксперименты по упругому рассеянию протонов и пионов протонами с передачей очень малых и очень больших импульсов (или упругое рассеяние на очень малые и очень большие углы).

Эти исследования были инициированы классическими работами академика Н.Н.Боголюбова, в которых впервые было строго доказано, что дисперсионные соотношения есть прямое следствие общих принципов локальной квантовой теории поля: причинности, унитарности и релятивистской ковариантности.

#### *Изучение процессов упругого рассеяния на малые углы*

В 60-е годы прошлого столетия широко обсуждаемой проблемой была асимптотика адронных взаимодействий при высоких энергиях. В частности, весьма актуальным направлением исследований являлся ответ на вопрос, как ведут себя полные сечения и амплитуды бинарных реакций при сверхвысоких энергиях.

Основываясь на оптической модели, теоретики предсказывали, что полные сечения  $\sigma_{tot} \sim 2\pi r^2$  и наклон дифракционного конуса  $b = r^2/2$ ,  $d\sigma/dt \sim \exp(bt)$  стремятся к постоянному значению, поскольку адрон представляет собой (как протяженный объект) поглощающую сферу (серую или черную) с постоянным радиусом  $r$ , который много больше длины волны:  $r > \lambda$ , где  $\lambda = h/p$ . При этом действительная часть амплитуды упругого рассеяния, обусловленная в оптике коэффициентом преломления, будет стремиться к нулю:  $\rho(E) = \text{Re}A/\text{Im}A \rightarrow 0$ .



С другой стороны, другая теоретическая модель Редже, в которой была сформулирована концепция полюсов и которая претендовала в это же время стать главным элементом будущей теории сильных взаимодействий, предсказывала, что в бинарные процессы и в полные сечения главный вклад дает один полюс — померон. Предсказательная сила модели Редже была невелика, так как она содержала произвольную функцию  $f(t)$  и два важных параметра  $\alpha(0)$  и  $\alpha'$ , которые и определяли тип асимптотики полных сечений. При  $\alpha(0) \leq 1$  имеем асимптотику с убывающими или постоянными полными сечениями, а при  $\alpha > 1$  сечения полиномиально растут и, чтобы избежать противоречия с другими существующими теоретическими представлениями, модель Редже необходимо значительно усложнить путем учета перерасеяний померона. Если  $\alpha' = 0$ , то имеем аналог классической оптики с  $b = \text{const}$ . Если  $\alpha' > 0$ , то во всех дифракционных процессах будет универсальный логарифмический рост  $b$ -параметра (и радиуса области взаимодействия).

Таким образом, перед экспериментаторами была задача: проверить теоретические модели и определить, по крайней мере, три важных параметра:  $\alpha(0)$ ,  $\alpha'$  и  $\rho(E)$  с точностью не ниже (2–3%) в дифференциальном сечении во всей доступной области энергий.

Прогресс в экспериментах этого направления был достигнут в основном благодаря новой оригинальной методике, предложенной и реализованной тогда еще молодыми физиками ЛВЭ в первых экспериментах на синхрофазотроне.

Это, прежде всего, относится к разработанному в лаборатории (К.Д.Толстов и Э.Н.Цыганов) новому методу облучения ядерных фотоэмульсий пучком ускоренных протонов в направлении, перпендикулярном к их поверхности, что позволило изучать процессы упругого рассеяния на очень малые углы.

Благодаря этому методу удалось впервые исследовать упругое рассеяние протонов на протонах на малые (вплоть до  $2^\circ$  в с.с.м.) углы в интервале энергий от 3 до 9 ГэВ и получить ряд новых важных результатов. В частности, была измерена энергетическая зависимость сечения упругого  $pp$ -рассеяния на малые углы и установлено, что с возрастанием энергии сечение этого процесса сначала быстро растет (до энергии 6,2 ГэВ), а затем медленно убывает. Оценка радиуса взаимодействия при этих энергиях дала величину  $1,15 \cdot 10^{-13}$  см.

При осуществлении опытов по упругому протон-протонному рассеянию на малые углы другой группой физиков лаборатории, возглавляемой В.А.Свиридовым и В.А.Никитиным, был также предложен новый метод изучения этого процесса, обеспечивший на многие годы лидирующее положение физиков ОИЯИ в этом направлении исследований. С помощью этого метода были выполнены, в частности, первые эксперименты на крупнейших ускорителях мира: синхрофазотроне ОИЯИ (Дубна), протонных синхротронах ИФВЭ (Протвино) и ФНАЛ (Батавия, США)<sup>1</sup>.

В основе этого нового метода реализуется возможность использования многократных (около  $10^4$  раз) прохождений внутреннего пучка ускоряемых синхрофазотроном протонов через тонкую (около  $10^{-6}$  г/см<sup>2</sup>) водородосодержащую мишень,

<sup>1</sup> Bartenev V.D. et al. // Phys. Rev. Lett. 1973. V. 31. P. 1367; Yad. Fiz. 1976. V. 23. P. 759; Yad. Fiz. 1972. V. 15. P. 1174; Beznogikh G.G. // Nucl. Phys. B. 1973. V. 54. P. 97; Zolin L.S. // Yad. Fiz. 1973. V. 18. P. 55.

расположенную непосредственно в камере ускорителя, с одновременным измерением в фотоэмульсиях угла вылета и энергии частицы отдачи.

С помощью этой методики в пионерских опытах на синхрофазотроне физики впервые в мире при высоких энергиях (что принципиально) наблюдали новый физический эффект – интерференцию кулоновского и ядерного взаимодействия двух протонов. Эксперимент противоречил общепринятой теории, в том числе оптической модели: существовавшая асимптотическая картина взаимодействия при высоких энергиях оказалась несостоятельной. Явление интерференции возникает тогда, когда при определенных малых значениях угла рассеяния протонов может возникнуть ситуация, при которой роль сил электромагнитной (т.е. кулоновской) и ядерной станет сравнимой между собой. В этом случае, изучая свойства упругого рассеяния на малые углы, можно получить сведения о «размерах» испытываемого объекта и о его «прозрачности».

Описанный выше метод, благодаря высокому разрешению по энергии и углу, позволил использовать эту методику не только для изучения адронных бинарных реакций, но и для исследований процессов упругого (без развала или возбуждения ядер) рассеяния частиц на ядрах. В опытах по изучению свойств упругого протон-дейтронного рассеяния при энергии от 1 до 10 ГэВ было установлено, что дифференциальные сечения этого процесса в области малых переданных импульсов соответствуют, как и в  $pp$ -рассеянии, наличию конструктивной интерференции кулоновского и ядерного рассеяния.

Была измерена и вещественная часть амплитуды упругого протон-дейтронного рассеяния.

Сопоставление полученных этой группой данных о величине действительной части амплитуды упругого рассеяния в протон-протонных и протон-дейтронных столкновениях на малые углы позволило впервые получить также величину действительной части амплитуды протон-нейтронного рассеяния.

Результаты опытов получили широкий резонанс в мире и были зарегистрированы в Государственном реестре открытий СССР как открытие под названием «Явление потенциального рассеяния протонов высоких энергий» с приоритетом, датированным 1963 годом.

Свойства упругого пион-протонного рассеяния в области кулон-ядерной интерференции в той же области энергий были изучены в экспериментах группы физиков ЛВЭ, возглавляемой Л.Н.Струновым.

Получению новых физических результатов в этой серии опытов способствовало осуществление оригинального методического предложения – использование камеры Вильсона в режиме с пониженной чувствительностью. Режим позволял регистрировать в камере только протоны отдачи и не регистрировать поток пучковых пионов с интенсивностью около  $10^4$  частиц за цикл ускорения, пропускаемых через рабочий объем камеры, заполненной водородом.

В эксперименте была впервые получена оценка реальной части амплитуды этого процесса.

Было также установлено, что экспериментальные значения дифференциального сечения соответствовали деструктивной интерференции. Как и в  $pp$ -рассеянии, действующие здесь силы имеют характер отталкивания.

### *Изучение процессов упругого рассеяния на большие углы*

Исследования упругого рассеяния адронов на протонах на большие углы имеют большое значение для изучения структуры нуклона, так как в этих процессах, в отличие от процессов упругого рассеяния на малые углы, зондируется центральная область нуклона.

В 1962 году усилия физиков ЛВЭ были направлены на изучение неизвестных ранее свойств упругого пион-нуклонного рассеяния на угол  $180^\circ$  в лабораторной системе координат. Эти исследования были проведены группой физиков под руководством А.Л.Любимова.

Для проведения эксперимента впервые был создан магнитный спектрометр с жесткой фокусировкой для анализа частиц по импульсам, разработаны и созданы новые конструкции черенковских счетчиков. На синхрофазотроне в первых измерениях дифференциальных сечений упругого рассеяния положительных пионов на протонах на угол  $180^\circ$  при импульсе пионов 3,15 ГэВ/с (и выше) удалось впервые обнаружить существование резонансной структуры энергетической зависимости сечения указанного процесса.

Таким образом, уже в первых экспериментах на синхрофазотроне результаты исследований по упругому рассеянию адронов на нуклоне внесли много нового в представление о структуре нуклона.

В частности, нуклон стали рассматривать состоящим из некоторого «керна» плотного вещества с размерами около  $10^{-14}$  см, окруженного более «рыхлой» пионной «атмосферой» размером  $10^{-13}$  см.

### *Измерение сечений взаимодействия адронов с нуклонами*

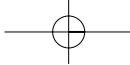
Для понимания структуры элементарных частиц и природы сил их взаимодействия на синхрофазотроне была проведена серия экспериментов, в которых измерялись полные сечения взаимодействия пионов, каонов и нейтронов с протонами при энергиях выше 1 ГэВ. Эксперименты проводились под руководством А.Л.Любимова, И.А.Савина, В.С.Ставинского и М.Н.Хачатуряна.

В результате проведенных измерений было установлено, что полные сечения взаимодействия отрицательных пионов с протонами в интервале импульсов 3–9 ГэВ/с убывают с ростом энергии падающих пионов вопреки общепринятому в то время мнению об их постоянстве.

С помощью больших жидководородных мишеней и черенковских счетчиков было впервые измерено полное сечение каон-протонного взаимодействия в области импульсов каонов от 2,7 до 4,75 ГэВ/с. Полученные данные свидетельствовали о постоянстве поведения сечений в указанной области энергий.

Наиболее трудными методически были эксперименты по измерению полных сечений взаимодействия нейтронов с протонами. Группе физиков, возглавляемой М.Н.Хачатуряном, потребовалось разработать принципиально новую аппаратуру для эффективной регистрации нейтронов с энергией в несколько ГэВ.

С помощью сложной установки, в которой использовался разработанный ими черенковский счетчик из свинцового стекла, удалось впервые измерить полные сече-



ния взаимодействия нейтронов с протонами при энергии от 2,6 до 8,3 ГэВ. Результаты измерений позволили установить, что величина этого сечения мало меняется в указанном интервале энергий, а при энергии выше 5,5 ГэВ совпадает с сечением  $pp$ -взаимодействия.

Этой же группой было также впервые измерено сечение процесса перезарядки отрицательного пиона в нейтральный пион ( $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ ) в области очень высоких (4 ГэВ/с) импульсов пионов.

### *Изучение механизма множественного образования частиц и их распада*

Изучение механизма множественного образования является одним из важнейших направлений ядерной физики как доминирующий процесс при взаимодействии адронов высоких энергий.

В этих экспериментах впервые родилась новая форма сотрудничества научных коллективов разных стран — «физика на расстоянии», позволившая вовлечь в проведение исследований на переднем рубеже знаний коллективы ученых, которым самостоятельное проведение подобных работ на крупнейших ускорителях было бы не под силу.

- *Методика ядерных фотоэмульсий*

В серии первых опытов фотоэмульсионных групп, руководимых К.Д.Толстовым и М.И.Подгорецким, изучались импульсные и угловые характеристики вторичных частиц в неупругих нуклон-нуклонных и пион-нуклонных взаимодействиях в области энергий от 6 до 10 ГэВ, а также зависимости этих характеристик от множественности генерируемых вторичных частиц.

В частности, в случае протон-протонных взаимодействий было установлено, что в процессах с множественностью пионов от одного до четырех распределение нуклонов в с.ц.м. резко анизотропное, причем в протон-протонных взаимодействиях максимумы соответствуют направлению первоначального движения нуклонов (т.н. «рога Граменицкого»).

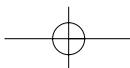
С ростом множественности пионов анизотропия несколько уменьшается, а при увеличении множественности до восьми пионов практически не наблюдается.

При изучении множественного рождения частиц в пион-нуклонных взаимодействиях с импульсами налетающих отрицательных пионов 6,8, 7,3 и 7,5 ГэВ/с было впервые установлено существование двух типов пион-нуклонного взаимодействий, соответствующих разным степеням неупругости процессов.

- *Камерная методика*

Почти одновременно с успешным запуском синхрофазотрона в ЛВЭ было завершено изготовление 24-литровой пропановой пузырьковой камеры, сыгравшей в последующие годы чрезвычайно важную роль в получении большого объема экспериментальной информации, в становлении и развитии международного научно-технического сотрудничества ученых стран-участниц ОИЯИ и других стран.

С помощью этой пузырьковой камеры проведены облучения в пучке отрицательных пионов с импульсом до 8 ГэВ/с и на Международной конференции по физике высоких энергий 1959 года в Киеве (т. е. через два года после запуска синхрофазотро-





Сотрудники группы ядерных фотоэмульсий (слева направо): Р.М.Лебедев, И.М.Граменицкий, В.Б.Любимов

на!) были представлены первые результаты по исследованию свойств рождения странных частиц в пион-нуклонных взаимодействиях при высоких (выше 6 ГэВ) энергиях.

В частности, группой (руководители В.И.Векслер, Ван Ганчан и М.И.Соловьев) на этой конференции впервые сообщалось об обнаружении выполнения общеизвестного сейчас закона сохранения инерции барионного заряда, а также новые данные о свойствах кси-минус-гиперонов, антипротонов и антилямбда-гиперонов, образующихся в указанных выше взаимодействиях.

На следующей Рочестерской конференции в Беркли (1960 г.) физиками этой группы впервые было сообщено об обнаружении случаев множественного (более двух!) образования странных частиц, установлении явления роста сечений образования каонов и кси-минус-гиперонов с энергией налетающих пионов, а также об обнаружении случая образования и распада новой античастицы – антисигма-минус-гиперона<sup>1</sup>.

А еще через год, на такой же конференции в ЦЕРНе, та же группа впервые продемонстрировала данные об обильном рождении резонансов с участием странных частиц и сообщила об обнаружении неизвестного ранее резонанса  $f^0(980)$  – мезона, распадающегося на два короткоживущих нейтральных каона. Этот резонанс включен в таблицы мировых данных о частицах со ссылкой на первую работу группы ЛВЭ.

<sup>1</sup> Ван Ганчан и др. Рождение  $\Sigma$ -гиперона с отрицательными  $\pi$ -мезонами с импульсом 8,3 ГэВ/с // ЖЭТФ. 1960. Т. 38, вып. 4. С. 1356–1359.



Сотрудники группы ядерных фотоэмульсий (слева направо):  
В.Петержилка (ЧССР), В.В.Глаголев, В.А.Беляков

Роль сложного ядра в механизме рождения странных частиц изучалась с помощью 50-сантиметровой ксеноновой пузырьковой камеры, созданной в ЛВЭ группой под руководством Г.М. Сташкова.

Камера облучалась пучком отрицательных пионов с импульсом 9 ГэВ/с. Анализ полученных с помощью этой пузырьковой камеры фотографий проводился группой ЛВЭ (совместно с физиками ИТЭФ) под руководством И.В.Чувило и З.Стругальского.

Сравнение измеренных сечений рождения лямбда-гиперонов и нейтральных каонов на ядрах ксенона с пион-нуклонными взаимодействиями указывало на существенный вклад вторичных взаимодействий внутри ядра в сечение рождения странных частиц.

Другим достижением ЛВЭ в создании и развитии камерной методики было создание метровой жидководородной пузырьковой камеры. При конструировании и создании ее было найдено много оригинальных и изящных решений и в этом несомненная заслуга коллектива инженеров, — криогеников, физиков, конструкторов и рабочих ЛВЭ.

За время работы камеры на ней было получено около двух миллионов стереофотографий. Камера экспонировалась в пучках  $\pi^-$ -мезонов, нейтронов и легких ядер, ускоренных на синхрофазотроне — дейтронов, в том числе поляризованных, ядер  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^{16}\text{O}$ .

Большим международным коллективом под руководством Р.М.Лебедева и В.В.Глаголева по материалам с камеры опубликовано более 150 научных работ. Основная часть из них посвящена релятивистской ядерной физике.



Группа сотрудников сектора 24-литровой пропановой пузырьковой камеры (слева направо): Нгуен Дин Ты (НРВ), Ван Юнчан (КНР), Чен Ванлинь (КНР), В.А.Беляков, Н.А.Смирнов (СССР), Ван Цузен (КНР), Т.Хофмоэль (ПНР), А.А.Кузнецов (СССР), Ван Ганчан (КНР), А.В.Никитин, М.И.Соловьев (СССР), И.Врана (ЧССР), Дин Дацао (КНР), З.Трка (ЧССР) в 1959 году

Новые результаты получены по разделам: спектры и волновые функции легких ядер, виртуальные изобарные состояния и коалесценция, дибарионные эффекты, сравнение  $dp$ - и  $np$ -взаимодействий, фрагментация ядер на протонах.

Наибольшее количество материала было получено в пучках дейтронов (более 230 тысяч событий), что позволило использовать эти данные при разработке новых физических проектов. Созданная база данных сотрудничества по материалам экспозиций в пучках легких ядер успешно используется и сегодня при постановке новых экспериментов и анализе результатов.

При анализе снимков с метровой водородной и частично с 24-литровой пропановой пузырьковых камер, облученных в пучках монохроматических нейтронов на синхрофазотроне, были впервые обнаружены экзотические типы резонансных состояний с изотопическим спином  $5/2$  в системах  $\Delta^{++}\pi^{+}$  и  $\Delta^{-}\pi^{-}$ , а также новые резонансы, распадающиеся на два протона или два отрицательных пиона (руководитель Ю.А.Троян).

Этой же группой физиков при анализе фотографий нейтрон-протонных взаимодействий при импульсе монохроматических нейтронов  $(5,20 \pm 0,12)$  ГэВ/с было уста-



**Группа участников открытия антисигма-минус гиперона**  
 Верхний ряд (слева направо): А.А.Кузнецов, М.И.Соловьев, А.В.Никитин,  
 Е.Н.Кладницкая, Н.М.Вирясов (СССР); нижний ряд (слева направо): В.И.Векслер  
 (СССР), Дин Дацао (КНР), Ким Хи Ин (КНДР), Нгуен Дин Ты (НРВ),  
 А. Михул (СРР) у микроскопа. Перед микроскопом показана фотография  
 события с рождением антисигма-минус-гиперона

новлено также существование нового семейства неизвестных ранее резонансов в системе  $\pi^+\pi^-$ -мезонов с квантовыми числами  $\sigma_0$ -мезона. В этом семействе наиболее статистически обеспеченный резонанс при массе  $757 \text{ МэВ}/c^2$  внесен в 2000 году в таблицы мировых данных об элементарных частицах. Существование таких мезонов, как квантов скалярного поля, принципиально важно для теории.

Эта же группа также сообщила, что при изучении реакции  $np \rightarrow npK^+K^-$  наблюдается образование пятикварковых резонансов со странностью  $S=+1$  в спектре эффективных масс системы  $(nK^-)$  при значениях масс  $1,541 \pm 0,004$ ;  $1,606 \pm 0,005$ ;  $1,687 \pm 0,007$  и  $1,870 \pm 0,019 \text{ ГэВ}/c$ . Их ширина сравнима с разрешением по массе. Для наиболее значимых резонансов были определены их спины.

Таким образом, результаты всех перечисленных опытов дали возможность открыть много неизвестных ранее физических явлений и показали существенную роль



Участники международного сотрудничества метровой жидководородной пузырьковой камеры. Руководители сотрудничества: В.В.Глаголев (3-й слева в первом ряду) и Р.М.Лебедев (6-й слева во втором ряду)

периферических взаимодействий (и ограниченную применимость статистических методов) для описания процессов генерации частиц при энергии до 10 ГэВ.

#### *Изучение электромагнитных взаимодействий частиц*

В ЛВЭ группой физиков под руководством М.Н.Хачатуряна с помощью электронной установки «Фотон» (двухплечевой черенковский масс-спектрометр) был проведен большой цикл исследований по поискам новых электромагнитных распадов резонансов, а в 1964 году поставлен решающий эксперимент, доказавший существование прямого перехода векторного мезона в фотон. Эти эксперименты в прессе того времени назывались «открытием ядерных свойств света». Результаты эксперимента подтвердили предсказания модели векторной доминантности и впервые экспериментально обнаружили явление прямого перехода «фотон–вещество».

Это явление в 1971 году было зарегистрировано как открытие.

На синхрофазотроне, используя быстродействующую камеру Вильсона, группа физиков ЛВЭ (рук. Э.О.Оконов), ЛЯП и ИФВЭ ТГУ провела серию опытов по изучению свойств распадов нейтральных долгоживущих каонов.

В этих экспериментах впервые были получены данные о нарушении  $C$ -инвариантности в распадах нейтральных каонов, установлена справедливость правила  $\Delta I = 1/2$  для лептонных распадов каонов, проверено важнейшее следствие  $CP$ -инвариантности о совпадении масс покоя частиц и античастиц. Кроме того, было установлено, что гравитационные массы нейтральных каонов и антикаонов совпадают с точностью  $10^{-15}\%$ .

Анализируя снимки, полученные с помощью 50-сантиметровой ксеноновой пузырьковой камеры, группой физиков ЛВЭ, возглавляемой З.Стругальским и И.В.Чувило, совместно с физиками ИТЭФ была впервые надежно определена величина параметра нарушения  $CP$ -четности (т.е. отношение вероятности распада долгоживущих каонов на два нейтральных пиона к вероятности аналогичного распада нейтральных короткоживущих каонов). Эта величина равна  $(2,02 \pm 0,23) \cdot 10^{-3}$ .

Успеху в получении этого результата способствовала разработка и создание оригинального метода определения энергии гамма-квантов по суммарному пробегу электронов и позитронов в образованных гамма-квантами ливнях. Используя этот метод, оказалось возможным в системе из нескольких гамма-квантов надежно выделить все гамма-кванты, возникшие от распада нейтрального пиона.

Впервые явление радиационного распада положительных каонов, распадающихся на положительный пион, нейтральный пион и гамма-квант, наблюдалось в 50-сантиметровой ксеноновой пузырьковой камере, облученной положительными каонами с импульсом 470 МэВ/с.

Группой физиков ЛВЭ (руководители И.В.Чувило и Э.М.Мальцев) на этом же материале изучались свойства трех частичных распадов положительных каонов. Установлено, что эти свойства соответствуют векторному варианту универсальной четырехфермионной теории слабого взаимодействия.

В ЛВЭ первые эксперименты по изучению рассеяния частиц на электронах были начаты В.Г.Гришиным и Э.Кистеневым с помощью 24-литровой пропановой пузырьковой камеры, облученной отрицательными пионами с импульсом 4 ГэВ/с.

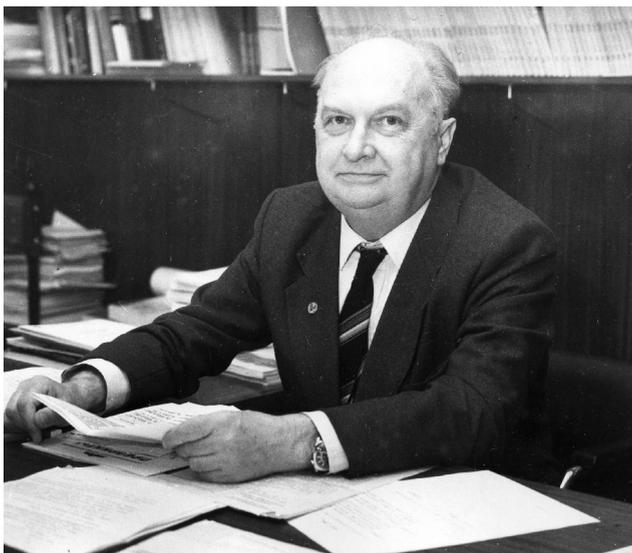
Результаты эксперимента установили, что величина дифференциального сечения пион-электронного рассеяния при указанной энергии хорошо согласуется с теоретическими расчетами для рассеяния на точечном электроны, при этом оценка размеров пиона дает значение  $\leq 6,6 \cdot 10^{-13}$  см.

Этот эксперимент позже нашел свое продолжение в большом цикле исследований электромагнитных размеров пионов и каонов на ускорительных комплексах ИФВЭ (Протвино) и ФНАЛ (Батавия).

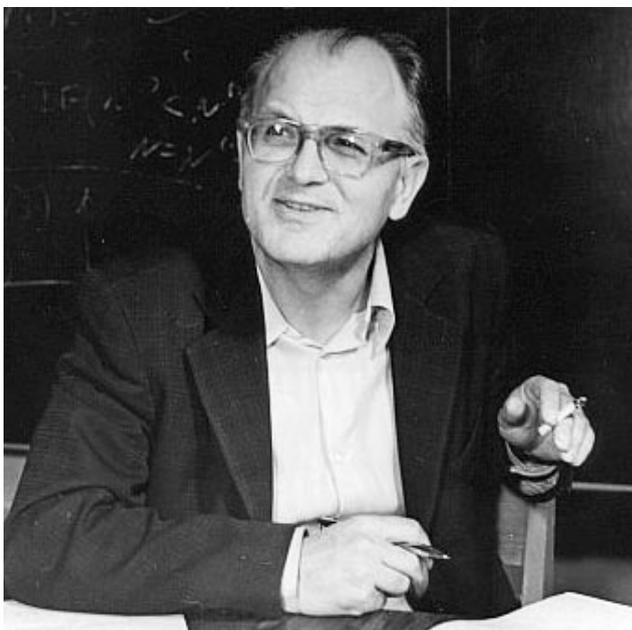
### 3. Релятивистская ядерная физика

Исследования, проводимые в последнее время в ЛВЭ, главным образом относятся к области релятивистской ядерной физики.

Говоря о развитии нового научного направления — релятивистской ядерной физике в ЛВЭ, следует отметить, что оно стало возможным благодаря наличию мощной экспериментальной базы лаборатории и накопленному опыту с момента ее создания. К моменту зарождения релятивистской ядерной физики в начале 70-х годов сотруд-



Академик А.М.Балдин



В.С.Ставинский

никами ЛВЭ был выполнен большой объем экспериментальных работ, сделана масса открытий и получено много интересных результатов мирового уровня

Академик А.М.Балдин, будучи директором ЛВЭ с 1968 года по 1997 год, а затем научным руководителем лаборатории, возглавил создание нового направления — релятивистской ядерной физики (РЯФ).

В его статье «Масштабная инвариантность адронных столкновений и возможность получения пучков частиц высоких энергий при релятивистском ускорении многозарядных ионов»<sup>1</sup> была высказана новая идея о возможности существования в ядрах коллективных эффектов, которые (при ускорении тяжелых ядер) могут быть использованы для получения вторичных пучков частиц с энергией, превышающей энергию ускоренных ядер в расчете на один нуклон.

Для проверки этой идеи на синхрофазотроне ЛВЭ были ускорены дейтроны и поставлен эксперимент по поиску коллективного эффекта в ядрах, который получил название «ядерный кумулятивный эффект». Эксперимент был выполнен группой под руководством В.С.Ставинского. Результа-

<sup>1</sup> Балдин А.М. Краткие сообщения по физике. ФИАН, 1971. С. 35.

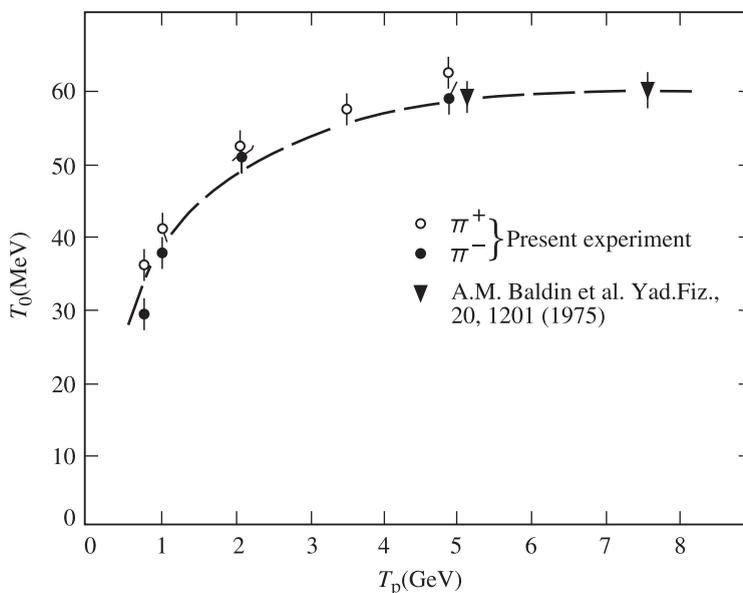
ты по экспериментальному открытию ядерного кумулятивного эффекта были опубликованы в 1973 году<sup>1</sup>.

Суть кумулятивного эффекта состоит в том, что группа нуклонов  $N_I$  из ядра I с атомным номером  $A_I$  может взаимодействовать с группой нуклонов  $N_{II}$  из ядра II с атомным номером  $A_{II}$ . Область, в которой  $N_I$  или  $N_{II}$  превышают единицу, является кумулятивной областью, запрещенной для однонуклонных взаимодействий.

В данном эксперименте было измерено отношение дифференциальных сечений выхода пионов в переднем направлении  $\alpha$  под действием дейтронов и протонов на медной мишени в зависимости от переменной  $x = p_\pi/p_\pi^{\max}$ . Здесь  $p_\pi$  – импульс пионов, а  $p_\pi^{\max}$  – максимальное значение импульса пионов. Отношение дифференциальных сечений оказалось примерно равным 0,06 и практически не зависящим от  $x$ , что можно было объяснить только на основе кумулятивного эффекта. Теоретические расчеты с учетом ферми-движения нуклонов в ядре и различных предположений в рамках однонуклонных механизмов в ядре не описывали эффекта.

За первым экспериментом по обнаружению кумулятивного эффекта последовало его детальное исследование в Дубне и в других центрах, таких как Беркли (США, группа Л.Шредера), ИТЭФ (Москва, группа Г.А.Лексина), ИФВЭ (Протвино, группа Л.С.Золина из ЛВЭ) и др.<sup>2</sup>

Исследования кумулятивных явлений также были продолжены в Беркли Л.Шредером<sup>3</sup>. На приведенном рис. 2 видна закономерность выхода характеристик кумулятив-



**Рис. 2.** Зависимость параметра  $T_0$  для пионов под углом  $180^\circ$  для  $p$ -Cu столкновений от энергии налетающих протонов  $T_p$  ( $E d^3 \sigma / d p^3 \sim e^{(-T_p/T_0)}$ )

<sup>1</sup> Балдин А.М., Герасимов С.Б. и др. // ЯФ. 1973. Т. 18, вып. 1. С. 79.

<sup>2</sup> Беляев И.М., Гавришук О.П., Золин Л.С., Переседов В.Ф. // ЯФ. 1993. Т. 56. С. 135.

<sup>3</sup> Schroeder L.S. et al. // Phys. Rev. Lett. 1979. V. 43. No. 24. P. 1787.

ного эффекта на асимптотический режим в районе энергий 4–5 ГэВ. Такое поведение говорит о том, что в этой области энергий в ядерной материи начинают проявляться коллективные эффекты (или многокварковые состояния), то есть имеет место реализация перехода от нуклонных степеней свободы к кварк-глюонным.

В дальнейшем релятивистская ядерная физика развилась в самостоятельное научное направление и стала одной из важнейших частей в научно-исследовательских программах крупнейших мировых ускорительных центров.

Большой вклад в работы ЛВЭ по релятивистской ядерной физике внесли следующие ученые: С.В.Афанасьев, А.М.Балдин, А.А.Балдин, Е.Бартке, Ц.Баатар, В.К.Бондарев, В.В.Глаголев, Н.Гиордэнеску, Ш.Гмуца, А.И.Голохвастов, Л.Б.Голованов, И.М.Граменицкий, В.Г.Гришин, Л.А.Диденко, П.И.Зарубин, Ю.В.Заневский, Л.С.Солин, В.А.Карнаухов, Е.Н.Кладницкая, В.А.Краснов, А.А.Кузнецов, Б.А.Кулаков, Б.Кюн, В.П.Ладыгин, Р.М.Лебедев, Ф.Легар, А.Г.Литвиненко, Ю.Лукстиньш, А.И.Малахов, Г.Мартинска, А.Т.Матюшин, В.Т.Матюшин, Г.Л.Мелкумов, В.А.Никитин, П.В.Номоконов, Н.Нургожин, Э.О.Оконов, Ю.А.Панебратцев, В.Пенев, Н.М.Пискунов, М.И.Подгорецкий, И.А.Савин, И.С.Сайтов, Б.Словински, М.И.Соловьев, В.С.Ставинский, Е.А.Строковский, И.М.Ситник, Л.Н.Струнов, З.Стругальский, К.Д.Толстов, Ю.А.Троян, М.Н.Хачатурян, С.А.Хорозов, И.Цаков, Э.Н.Цыганов, Д.Чултэм, М.Д.Шафранов, М.Г.Шафранова, В.И.Шаров и многие другие.

В настоящее время физические исследования в области релятивистской ядерной физики в ЛВЭ в основном проводятся по трем направлениям: исследование кварк-глюонных степеней свободы в ядрах, изучение асимптотических законов и исследование спиновой структуры легких ядер<sup>1</sup>.

Совместно с группой сотрудников, работающих на двухметровой пропановой пузырьковой камере ЛВЭ, академик А.М.Балдин<sup>2</sup> предложил изучать столкновения релятивистских ядер в пространстве четырехмерных скоростей. В этом подходе впервые использовались инвариантные, безразмерные и измеримые переменные  $b_{ik}$ , являющиеся квадратом разности четырехскоростей между любыми частицами, участвующими во взаимодействии:

$$b_{ik} = -(u_i - u_k)^2,$$

где  $u_i$  и  $u_k$  – четырехмерные скорости частиц.

С помощью этой переменной оказалось возможным предложить удобную и наглядную классификацию ядерных взаимодействий:

область  $0 \leq b_{ik} \leq 10^{-2}$  соответствует классической ядерной физике, когда нуклоны можно рассматривать как элементарные частицы;

если  $b_{ik} \sim 1$ , то начинают возбуждаться внутренние адронные степени свободы (переходная область);

в случае  $b_{ik} \geq 1$  преобладают внутренние степени свободы и взаимодействие необходимо рассматривать на кварк-глюонном уровне.

<sup>1</sup> Baldin A.M., Malakhov A.I., and Sissakian A.N. // Physics of Particles and Nuclei. 2001. V. 32, Suppl.1. P. S4–S30.

<sup>2</sup> Baldin A.M. and Didenko L.A. // Fortschr. Phys. 1990. V. 38. No. 4. P. 261–332.

Итогом многолетних исследований кумулятивного эффекта явилось обнаружение кварк-протонной структурной функции ядра

$$G(x) = \exp(-x/\langle x \rangle),$$

характеризующей распределение кварков в ядрах. Здесь  $x$  — кумулятивное число, а  $\langle x \rangle \sim 0,14$  характеризует размер мультикварковой системы, из которой излучаются кумулятивные частицы.

В пространстве четырехскоростей А.М.Балдиным был введен принцип ослабления корреляций (ПОК). ПОК был впервые предложен академиком Н.Н.Боголюбовым в статистической физике как универсальное свойство распределений для частиц в обычном пространстве-времени. Принцип основан на интуитивном представлении о том, что корреляции между удаленными частями макроскопической системы практически исчезают и распределение факторизуется (распадается на независимые множители). В соответствии с ПОК Боголюбова корреляции между системами ослабевают с увеличением расстояния между ними в обычном пространстве-времени. Согласно ПОК Балдина, корреляции между системами ослабевают с увеличением расстояния в четырехмерном пространстве скоростей, что соответствует малым расстояниям в обычном пространстве. В связи с этим ПОК Балдина как бы противоположен ПОК Боголюбова.

Таким образом, если мы имеем группу частиц  $\alpha$  и группу частиц  $\beta$  в пространстве четырехскоростей, то при удалении этих групп друг от друга, то есть при  $b_{\alpha\beta} \rightarrow \infty$ , распределение  $W$ , характеризующее систему, примет вид

$$W(b_{\alpha\beta} \rightarrow \infty) = W_{\alpha} W_{\beta},$$

где  $W_{\alpha}$  и  $W_{\beta}$  — распределения, характеризующие системы  $\alpha$  и  $\beta$ .

Для случая взаимодействия двух релятивистских ядер  $I + II \rightarrow 1 + \dots$  полагаем  $\alpha = I$  и  $\beta = II$ . Тогда можно записать инвариантное сечение взаимодействия ядер в виде

$$d^2\sigma/db_{II1} dx_1 \sim F_I F_{II}(b_{II1}, x_1),$$

где  $b_{II1} = -(u_{II} - u_1)^2$ ,  $x_1$  — кумулятивная переменная.

Отсюда видно, что свойства структурной функции  $F_{II}(b_{II1}, x_1)$  не зависят от параметров налетающего ядра.

Это свойство позволило детально исследовать кумулятивный эффект, ускоряя, например, протоны (что сделать гораздо легче, чем ускорять ядра) и изучая кварк-партонную структурную функцию ядра-мишени путем регистрации вторичных частиц в задней полусфере. Это явление использовал В.С.Ставинский с сотрудниками для детального изучения структурных функций ядер в интенсивных потоках протонов синхрофазотрона ЛВЭ.

Экспериментально ПОК был впервые подтвержден в опытах группы сотрудничества двухметровой пропановой пузырьковой камеры. ПОК позволил ввести понятие изолированной системы и, тем самым, понятие струй в пространстве четырехскоростей<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Балдин А.М. и др. Кластеризация в пространстве четырехмерных относительных скоростей и инвариантные распределения адронных струй // ЯФ. 1988. Т. 48, вып. 4(10). С. 995–1004.

Было дано инвариантное определение адронных струй в отличие от традиционных неинвариантных подходов.

Релятивистски-инвариантные переменные  $b_{ik}$  были также использованы для определения областей образования струй.

Можно определить квадрат четырехскорости частицы  $k$  относительно оси струи:

$$b_k = -(V - u_k)^2.$$

Распределения пионов по четырехскоростям относительно оси струи  $b_k$  в адрон-адронных и адрон-ядерных столкновениях при высоких энергиях оказались универсальными. Они не зависят в широких пределах ни от энергии взаимодействия, ни от типа фрагментирующей системы.

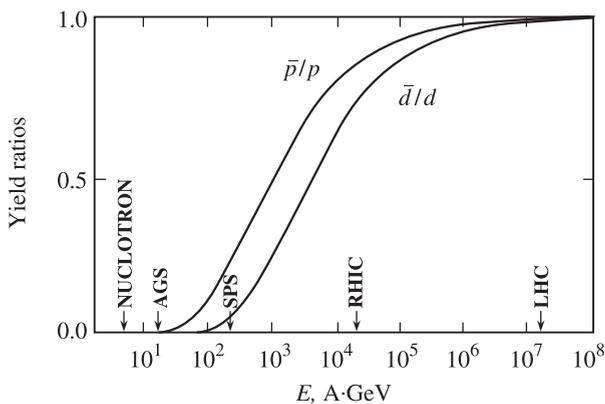
Использование А.М.Балдиным принципов симметрии позволило ему ввести параметр подобия  $\Pi$  для ядерных взаимодействий  $\Pi = \min\{1/2[(u_1 N_I + u_2 N_{II})^2]^{1/2}\}$ , где  $N_I$  и  $N_{II}$  – кумулятивные числа для ядер I и II, а  $u_1$  и  $u_2$  – четырехскорости этих ядер.

Оказалось, что инвариантные сечения выхода инклюзивных частиц различного типа при взаимодействии ядер с атомными номерами  $A_I$  и  $A_{II}$  описываются универсальной закономерностью в широком диапазоне энергий и атомных номеров сталкивающихся ядер:

$$Ed^3\sigma/dp^3 = C_1 A_I^{\alpha(N_I)} A_{II}^{\alpha(N_{II})} \exp(-\Pi/C_2),$$

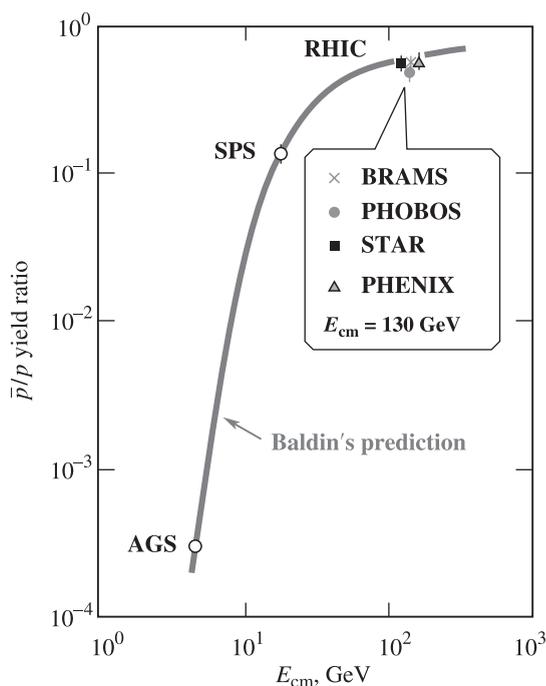
где  $\alpha(N_I) = 1/3 + N_I/3$ ,  $\alpha(N_{II}) = 1/3 + N_{II}/3$ , а  $C_1 = 1,9 \cdot 10^4$  мб ГэВ<sup>-2</sup>ср<sup>-1</sup> и  $C_2 = 0,125 \pm 0,002$ .

А.М.Балдин нашел аналитическое выражение для параметра  $\Pi$  для центральной области быстрот инклюзивной частицы<sup>1</sup>. Это позволило ему предсказать, например, отношение выходов античастиц и частиц в зависимости от энергии, в том числе и в асимптотической области (рис. 3).



**Рис. 3.** Отношения выходов антипротонов к протонам и антидейтронов к дейтронам в зависимости от энергии в лабораторной системе координат

<sup>1</sup> Baldin A.M., Malakhov A.I. // JINR Rapid Communications. 1998. No. 1 (87). P. 5–12.



**Рис. 4.** Отношение выходов анти-протонов к выходам протонов в зависимости от энергии в системе центра масс. Значками отмечены экспериментальные данные. Кривая – предсказания, полученные с помощью метода Балдина

Эти предсказания довольно хорошо подтверждаются экспериментальными данными вплоть до последних предварительных данных, полученных на недавно запущенном в США коллайдере релятивистских тяжелых ионов RHIC (рис. 4).

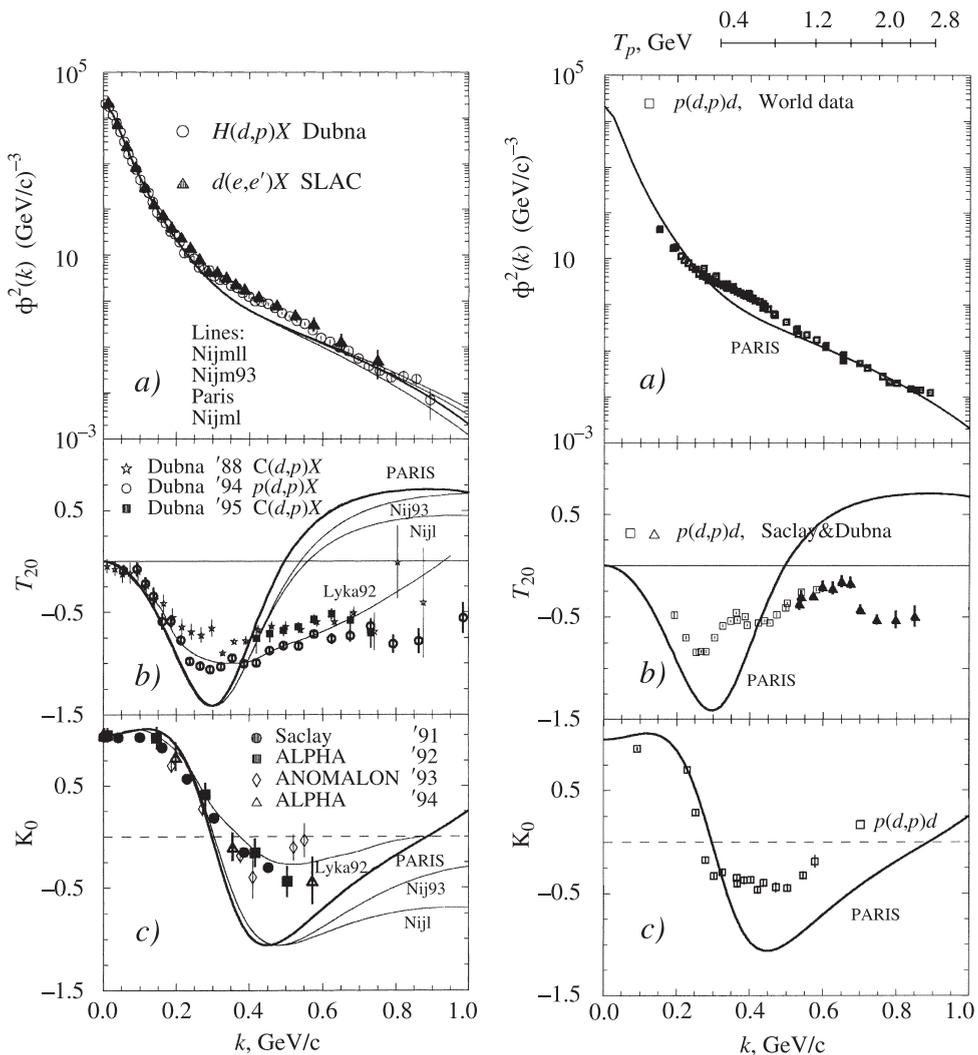
Другое направление исследований связано с получением поляризованного дейтронного пучка на синхрофазотроне. Благодаря энтузиазму группы Ю.К.Пилипенко ЛВЭ обладает уникальным источником поляризованных дейтронов.

Дейтрон представляет собой сложное образование, включающее  $S$  – состояние с нулевым орбитальным моментом нуклонов и  $D$  – состояние с орбитальным моментом нуклонов  $L = 2$ . Исследование взаимодействий поляризованных дейтронов крайне важно для понимания природы спина.

В данной статье невозможно рассказать обо всех результатах, полученных в лаборатории в области исследования поляризационных явлений в релятивистской ядерной физике. Поэтому далее будут упомянуты только некоторые результаты, касающиеся исследований с пучками поляризованных дейтронов и нейтронов.

На рис. 5 приведена сводка данных экспериментов по фрагментации (слева) и упругому рассеянию «назад» (справа) поляризованных и неполяризованных дейтронов.

Данные представлены в зависимости от относительного импульса нуклонов в дейтроне, вычисленного согласно правилам релятивистской квантовой механики. Для сравнения показаны предсказания теоретических моделей, не учитывающих кварковую структуру нуклонов дейтрона. На верхней шкале правого рисунка отложена эквивалентная кинетическая энергия протонов, если бы эта реакция исследовалась в рассеянии ускоренных протонов покоящимися дейтронами. Результаты, представ-



**Рис. 5.** Сводка данных экспериментов по фрагментации (слева) и упругому рассеянию «назад» (справа) поляризованных и неполяризованных дейтронов

ленные на среднем и нижнем графиках правого рисунка, получены сотрудничеством АЛЬФА в Дубне (синхрофазотрон) и Сакле (Сатурн-2).

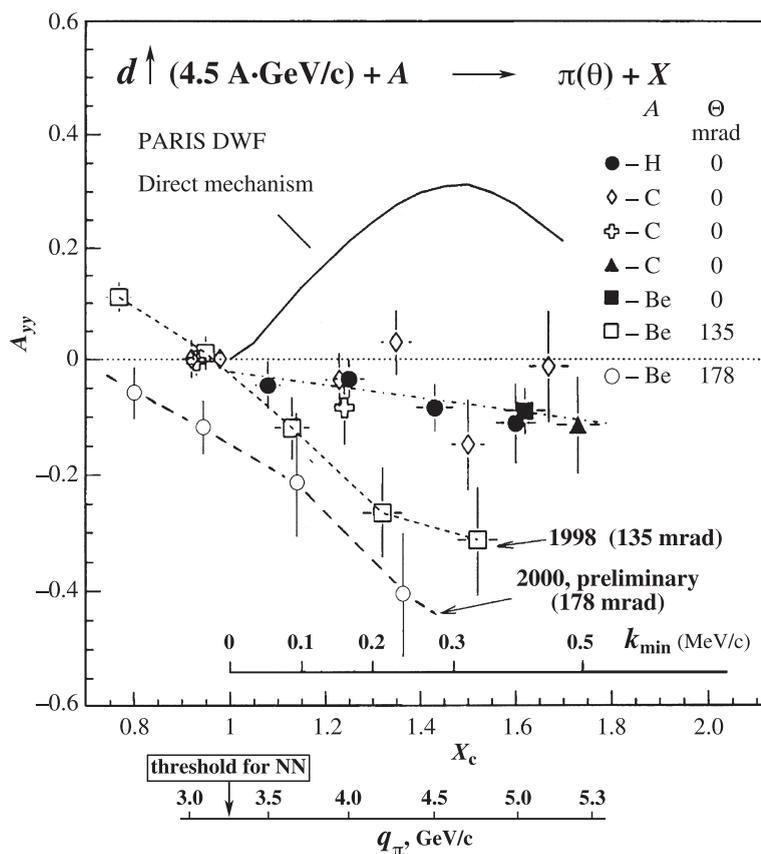
Начиная с момента осуществления медленного вывода поляризованных дейтронов, на установке АЛЬФА была начата программа исследования поляризационных явлений в реакциях фрагментации дейтрона с вылетом фрагментов «вперед» адронными мишенями и в упругом рассеянии дейтронов протонами «назад» в системе центра масс (Л.Н.Струнов, Е.А.Строковский, И.М.Ситник, Н.М.Пискунов). Эта программа продолжалась почти 20 лет. Результаты, полученные в ее рамках, заложили

основу для сотрудничества между ЛВЭ и Лабораторией ядерных исследований в Сакле, Лабораторией имени Т.Джефферсона в США, Центром ядерных исследований в RIKEN (Япония). В результате были выполнены прецизионные измерения поляризационных характеристик этих реакций и обнаружены новые, неизвестные ранее, закономерности, свидетельствующие о проявлении эффектов кварковой структуры нуклонов в дейтроне. Неполная сводка полученных данных представлена на рис. 5, где показаны как результаты измерений эмпирической плотности вероятности (EMD) распределения протонов в дейтроне по импульсам (полученные с неполяризованным дейтронным пучком, см. верхние графики рис. 5), так и результаты измерений тензорной анализирующей способности (средние графики) и коэффициента передачи векторной поляризации дейтрона протону (фрагменту дейтрона или протону отдачи — в зависимости от типа реакции; нижние графики). Эти данные до сих пор являются «крепким орешком» для теории, требуя построения непротиворечивого теоретического описания релятивистских составных систем.

Дальнейшее развитие исследований поляризационных явлений в реакциях с поляризованными дейтронами пошло в направлении их изучения в реакциях рождения частиц. Наряду с экспериментами по неупругому рассеянию с регистрацией дейтрона (реакция  $(d, d')$ ) проводились опыты с регистрацией кумулятивных мезонов. В частности, здесь остановимся только на последнем эксперименте на установке СФЕРА, который объединил в себе исследования кумулятивных и поляризационных явлений. Эти исследования предложены Л.С.Золиным и А.Г.Литвиненко. Были выполнены исследования тензорной анализирующей способности  $A_{yy}$  реакции взаимодействия поляризованных дейтронов с ядрами с вылетом пионов под различными углами в кумулятивной области (рис. 6). Данные представляют исключительно большой интерес, так как существующие теоретические модели не только не описывают ход зависимости, но и предсказывают противоположный знак эффекта по сравнению с наблюдаемым в эксперименте.

Важно продолжить эти измерения для другого типа частиц, например каонов, в состав которых входят кварки, отсутствующие в исходных объектах. Эти исследования будут проводиться в рамках нового проекта PIKASO. Сильная зависимость тензорной анализирующей способности  $A_{yy}$  от поперечного импульса при фрагментации тензорных поляризованных дейтронов с энергией 9 ГэВ в кумулятивные пионы была установлена в результате анализа данных эксперимента PIKASO. При увеличении импульса пиона от 0,4 до 0,8 ГэВ/с тензорная анализирующая способность  $A_{yy}$  падает от нуля до 0,4. Стартовая точка падения  $A_{yy}(p_t)$  соответствует кумулятивной переменной  $x_c = 1$ , что является началом кумулятивного режима. Изменение  $A_{yy}(p_t)$  является линейным при двух углах пионной эмиссии в 135 и 180 мрад.

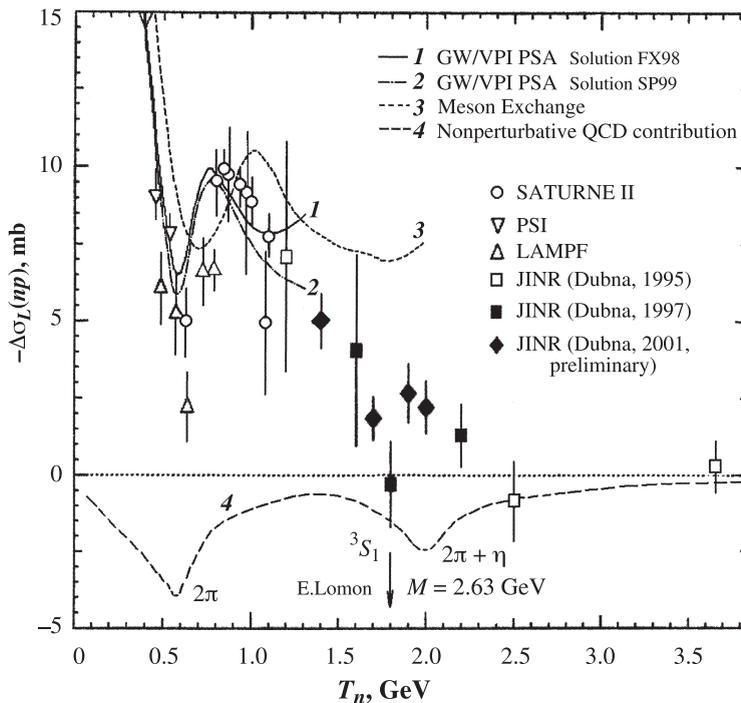
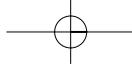
Недавно опубликованы последние данные, полученные на установке ДЕЛЬТА-СИГМА (руководители Л.Н.Струнов и В.И.Шаров). Получены новые результаты для  $np$  спин-зависимой разницы полных сечений  $\Delta\sigma_L(np)$  в зависимости от кинетической энергии поляризованного нейтронного пучка (рис. 7). Квазимонохроматический пучок нейтронов получался из ускоренных и выведенных векторно поляризованных дейтронов синхрофазотрона. Нейтроны проходили через большую поляризованную протонную мишень. Величины  $\Delta\sigma_L(np)$  измерялись как разность между  $np$  полными сечениями для параллельных и антипараллельных поляризаций пучка и мишени,



**Рис. 6.** Зависимость тензорной анализирующей способности  $A_{yy}$  реакции  $d \uparrow + A \rightarrow \pi(\theta) + X$  от кумулятивной переменной для различных углов вылета пионов

ориентированных вдоль импульса пучка. Наблюдается быстрый спад  $\Delta\sigma_L(np)$  с ростом энергии выше 1,1 ГэВ. Для того, чтобы завершить эти исследования, планируется измерить энергетическую зависимость  $\Delta\sigma_T(np)$  с поперечной поляризацией пучка нейтронов и протонов мишени. Эти эксперименты будут продолжены на нуклотроне.

В начале 80-х годов на синхрофазотроне были начаты исследования нового типа возбуждений ядерной материи, когда в ядерную материю «закачивается» большая по ядерным масштабам энергия – несколько сотен МэВ. Это так называемые «дельта-изобарные» возбуждения. Эксперименты были проведены на установке АЛЬФА в зарядово-обменной реакции ( ${}^3\text{He}, t$ ) под руководством Е.А.Строковского и Л.Н.Струнова, независимо и одновременно с аналогичными опытами в Сакле. Впервые было обнаружено существенное влияние ядерной среды на свойства возбуждаемых в ней нуклонных резонансов, что проявляется в видимом сдвиге положения ядерного дельта-изобарного пика относительно положения дельта-пика в реакции с протонной мишенью (рис. 8) (в некотором смысле это явление можно назвать ядерным аналогом эффекта Мёссбауэра). Были изучены зависимости этого эффекта от энергии пучка,

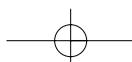


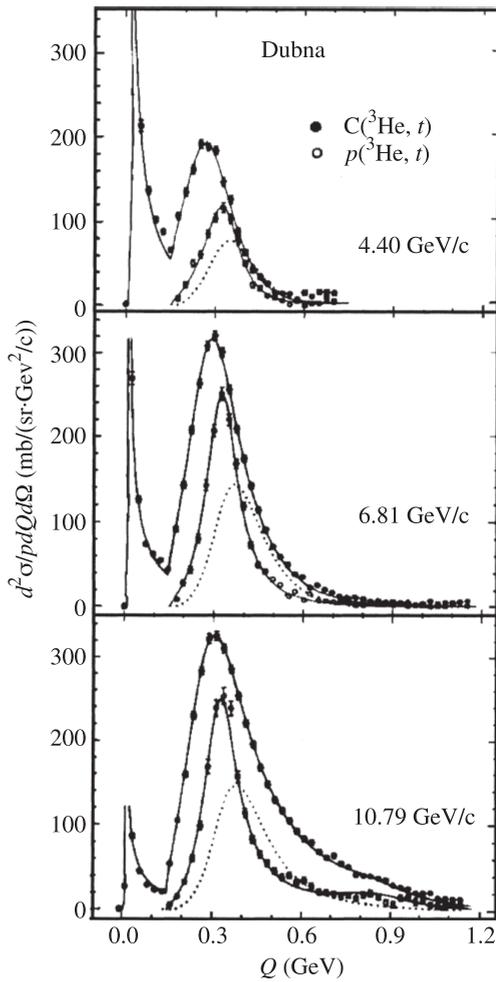
**Рис. 7.** Зависимость  $\Delta\sigma_L(np)$  от кинетической энергии поляризованного нейтронного пучка

углов рассеяния, атомного номера мишени. Позже, под влиянием полученных в этих опытах результатов, аналогичные исследования были выполнены другими группами в ЛВЭ (коллорабация ГИБС) и в других центрах (ПИЯФ, Сакле, КЕК), в том числе с использованием поляризованных пучков. В настоящее время эта тематика — изменение свойств адронов в ядерной среде — активно развивается как теоретиками, так и экспериментаторами других исследовательских центров.

Интересные результаты были получены на синхрофазотроне коллаборацией ГИБС под руководством Ю.Лукстиныша, в частности — по исследованию образования гиперядер, изучению возбуждения дельта-изобар в ядре, полным сечениям ядроядерных взаимодействий. Весьма интересен также результат по наблюдению расширения объема, из которого излучаются узкие пионные пары в Mg-Mg-взаимодействиях.

М.И.Подгорецкий предложил метод измерения скорости (и размеров) источника интерференционным методом. Этот метод позволяет получить прямое экспериментальное доказательство нестационарности объема генерации пионов. Доказательство было впервые получено на установке ГИБС в ЛВЭ для центральных Mg-Mg-взаимодействий при 4,4 ГэВ/с М.Х.Аникиной, А.И.Голохвастовым и С.А.Хорозовым. Пионы из различных областей кинематического спектра испускаются различными элементами источника, движущимися относительно друг друга. На рис. 9, получившем название GIBS plot, представлены корреляция быстрот элементов объема  $Y_{source}$ ,

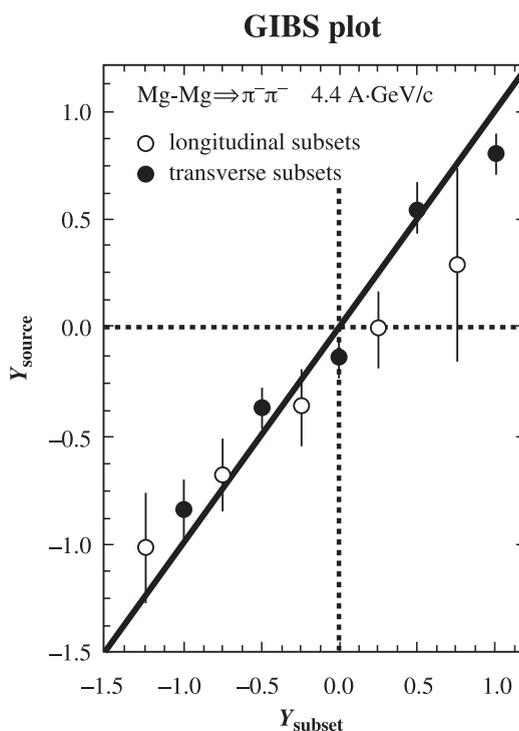




**Рис. 8.** Зависимость инвариантного сечения перезарядки ядер гелия-3 в тритоны от переданной мишени энергии  $Q$ . Верхние линии проведены через данные (точки) для перезарядки на ядре. Нижние сплошные линии проведены через данные для протонной мишени. Пунктирные линии соответствуют ожидаемому дельта-пику при перезарядке на квазисвободном нуклоне ядра-мишени с учетом его фермиевского движения в ядре. Данные «очищены» от эффектов инструментального разрешения

излучающего пионы, и быстрот пионных пар  $Y_{\text{subset}}$  в продольном и поперечном направлении относительно оси реакции в системе покоя Mg-Mg. Для случая стационарного источника корреляции между этими быстротами должны отсутствовать. Позднее аналогичная картинка была получена коллаборацией NA49 в ЦЕРН на ускорителе SPS в столкновениях ядер свинца при энергии 158 ГэВ на нуклон.

Сотрудничество ГИБС планирует продолжить исследования на нуклотроне зарядово-обменной реакции ( $t, {}^3\text{He}$ ) на углероде и магнии, используя пучок трития с импульсом от 2,2 до 3,0 А·ГэВ/с. Также планируется участниками сотрудничества изучать рождение гиперядер с импульсом в несколько ГэВ/с. Это возможно в связи с тем, что гиперядра распадаются на расстояниях 20–30 см от точки рождения. Таким образом, будут исследоваться гиперядерные взаимодействия с различными поглотителями. В случае гипертритона метод позволяет оценить энергию связи  $\Lambda$ .



**Рис. 9.** Корреляция быстрот элементов объема  $Y_{source}$ , излучающего пионы, и быстрот пионных пар  $Y_{subset}$  в продольном и поперечном направлении относительно оси реакции в системе покоя Mg-Mg

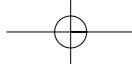
На ускорительном комплексе ЛВЭ работают установки из других лабораторий ОИЯИ и научных центров. Одним из таких примеров является установка Лаборатории ядерных проблем им. В.П.Джелепова ФАЗА (руководитель В.А.Карнаухов). Целью проекта ФАЗА является исследование механизма ядерной мультифрагментации, которая имеет место в ядро-ядерных взаимодействиях при промежуточных и высоких энергиях.

Ряд экспериментов уже был проведен с пучками протонов и альфа-частиц синхрофазотрона на  $4\pi$ -спектрометре ФАЗА. Были получены следующие главные результаты: «холодный» спектрометр мишени расширяется перед испусканием фрагментов. Плотность при этом составляет примерно  $1/3$  нормальной плотности. Этот эффект можно интерпретировать как наблюдение фазового перехода в ядерной материи типа газ–жидкость.

Программа исследований сотрудничества ФАЗА на нуклотроне направлена на дальнейшее изучение механизма тепловой мультифрагментации в ядро-ядерных столкновениях.

Это многотельный тип распада горячих ядер, взрывоподобный процесс, сопровождающийся множественной эмиссией фрагментов промежуточной массы (ФПМ,  $2 < Z < 20$ ). Горячие ядра образуются как спектрометры мишени в соударениях легких релятивистских ионов с тяжелыми ядрами.

Доказано, что тепловая мультифрагментация является новым ядерным фазовым переходом (I рода) «жидкость–туман», происходящим при  $T_f = 5-7$  МэВ. Горячее ядро, расширяясь за счет теплового давления, попадает в область фазовой неустойчиво-



сти (спинодальная область). В результате флуктуаций плотности гомогенная ядерная система распадается на ансамбль, состоящий из капелек и ядерного газа (нуклоны). Это — «ядерный туман», который разлетается под действием кулоновских сил и регистрируется как мультифрагментация.

Значение фазового перехода «жидкость—туман» для ядерной физики очевидно, хотя, возможно, он и не столь «фундаментален», как переход ядерной материи в кварк-глюонную плазму. Но зато он заведомо существует. Более того, получаемые при его исследовании данные полезны для понимания динамики сверхновых звезд.

Другой тип ядерного фазового перехода (уже II рода), «жидкость—газ», ожидается при более высокой температуре. Вершиной спинодальной области является особая точка — критическая температура  $T_c$  фазового перехода «жидкость—газ». В критической точке жидкая и газовая фазы становятся идентичными, граница раздела между ними исчезает, коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma_s(T)$  обращается в нуль. При  $T > T_c$  существует только газовая фаза.

Из условия наилучшего согласия эксперимента с модельными предсказаниями найдено, что критическая температура для ядерного фазового перехода «жидкость—газ»  $T_c = (17 \pm 2)$  МэВ.

Другим примером успешного сотрудничества с российскими институтами является работа на установке ДЕЛЬТА Института ядерных исследований (Троицк) (руководители В.А.Краснов и А.Б.Курепин). На этой установке были, в частности, получены первые данные на внутренней мишени нуклотрона по рождению  $K^+$ -мезонов. В настоящее время установка готова также для работы на выведенном пучке нуклотрона.

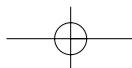
Начались исследования на выведенных пучках нуклотрона на установке МАРУСЯ (руководитель А.А.Балдин), предназначенной для исследований «переходного режима» в ядерной материи от нуклонных степеней свободы к кварк-глюонным.

Новизна предлагаемого исследования состоит в изучении редких подпороговых кумулятивных процессов и рождении антиматерии с учетом поляризации сталкивающихся объектов и степени центральности на основе дополнительного измерения множественности и идентификации ядерных фрагментов, не участвующих во взаимодействии. Исследование таких процессов возможно только с применением магнитооптических спектрометров, имеющих большой аксептанс и высокую селективность вторичных частиц. Магнитооптический спектрометр МАРУСЯ введен в строй в 2002 году.

Были проанализированы новые экспериментальные данные по односпиновым анализирующим способностям при рождении  $\pi^+$ ,  $p$ ,  $d$  во взаимодействиях поляризованных протонов с энергией 3,3 ГэВ/с и тензорных поляризованных дейтронов с энергией 5 ГэВ/с с углеродной мишенью на пучках синхрофазотрона.

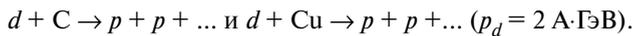
Группа коллаборации МАРУСЯ также провела исследования выхода вторичных фрагментов в результате взаимодействия внутреннего пучка нуклотрона с тяжелыми мишенями, используя тонкий полупроводниковый детектор. Эта группа получила хорошее разделение вторичных фрагментов с очень низкими энергиями в области от 2 до 25 МэВ в  $d+Au$  взаимодействии при энергии дейтронов 1,044 ГэВ. Эти данные необходимы для изучения эффекта полного разрушения ядер, открытого ранее в ЛВЭ группой К.Д.Толстова.

В декабре 2003 года получены первые экспериментальные данные по рождению антипротонов и  $K^-$ -мезонов в реакциях  $p+Pb$ ,  $p+Al$ . Вторичные пучки, полученные



на магнитооптическом спектрометре МАРУСЯ, обеспечивают экспериментальные условия для развития и испытания детекторов новых типов.

Продолжаются исследования на внутреннем пучке нуклотрона. В частности, проводится исследование процессов фрагментация ядер мишени в два кумулятивных протона с помощью установки СКАН-1 (руководитель С.В.Афанасьев) на внутреннем пучке нуклотрона. Изучаются корреляционные функции кумулятивных протонов, испущенных с малым относительным импульсом  $q$  для  $d + C$  и  $d + Cu$  реакций. Целью эксперимента является измерение поперечного размера области ядро-ядерных взаимодействий. Используется метод измерения корреляций кумулятивных протонов, испущенных при малых относительных импульсах. Корреляции протонов, испущенных в угловом интервале между  $106-112^\circ$  в лабораторной системе, изучаются в реакциях



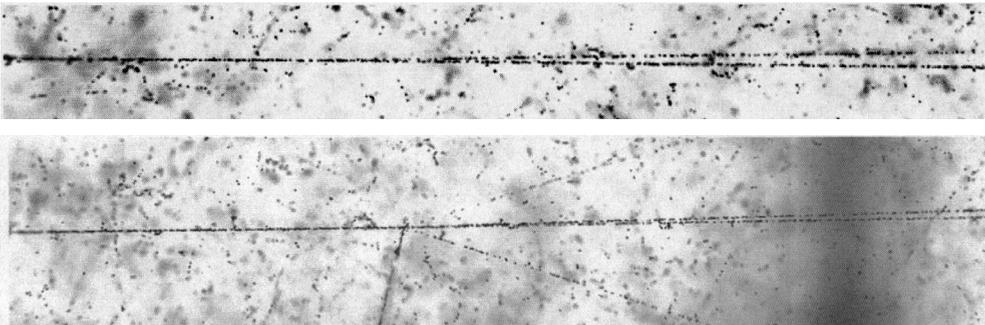
В результате этих измерений были получены приблизительно одинаковые радиусы для  $dC$  и  $dCu$  взаимодействий:  $r_{dC} = 3,0 \pm 0,4^{0,5} \text{ fm}$  и  $r_{dCu} = 2,6 \pm 0,7^{0,8} \text{ fm}$ . Эти исследования продолжены для других налетающих частиц и мишеней.

Активно проводятся исследования на выведенном пучке нуклотрона в рамках проекта СТРЕЛА (руководители В.В.Глаголев и Н.М.Пискунов). Целью эксперимента СТРЕЛА является изучение зависящей от спина компоненты амплитуды нуклонного рассеяния в зарядово-обменном процессе  $np \rightarrow pn$  с использованием выведенного из нуклотрона дейтронного пучка. При нулевой передаче импульса дифференциальное сечение реакции  $dp \rightarrow (pp)n$  определяется спин-флиповой частью амплитуды зарядово-обменного процесса  $np \rightarrow pn$ .

Планируется измерить сечение рождения двух протонов при малом переданном импульсе в  $dp$  взаимодействиях в области импульсов дейтронов от 3,0 ГэВ/с до 4,0 ГэВ/с. Существует возможность получения информации относительно амплитуды элементарной зарядово-обменной реакции  $np \rightarrow pn$  с помощью зарядово-обменного процесса  $dp \rightarrow (pp)n$  из экспериментов с неполяризованными дейтронами. Простейшее описание этих двух реакций в рамках импульсного приближения заключается в рассмотрении двух процессов: а)  $np \rightarrow pn$  зарядово-обменный процесс и б)  $dp \rightarrow (pp)n$  реакция, т. е. зарядовый обмен на простейшем ядре – дейтроне. В первом случае (а) обе спиновых ориентации разрешены, в то время как во втором случае (б) при малом угле рассеяния (два протона движутся в переднем направлении с малым относительным импульсом) реакция может проходить, только если спин у рассеянного протона переворачивается (в соответствии с принципом Паули). При нулевом переданном импульсе дифференциальное сечение реакции  $dp \rightarrow (pp)n$  определяется частью амплитуды с переворотом спина зарядово-обменного процесса  $np \rightarrow pn$ .

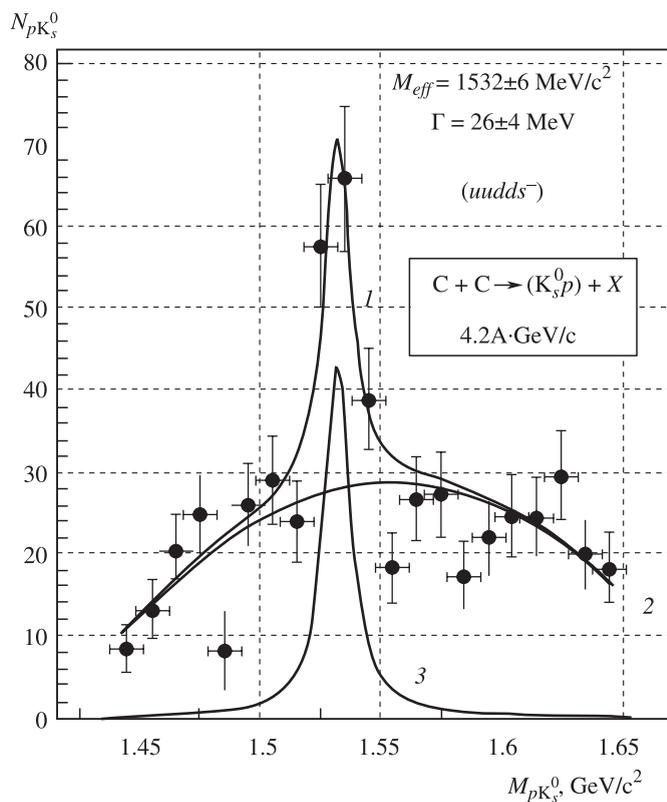
Большой интерес представляют исследования экзотических ядер, проводимых совместно с ФИАН под руководством П.И.Зарубина в рамках проекта БЕККЕРЕЛЬ (BECQUEREL – BEryllium (Boron) Clustering QUEst in RELativistic Multifragmentation).

Этот проект ориентирован на облучение фотоэмульсий легкими стабильными и радиоактивными ядрами с энергией порядка нескольких ГэВ на нуклон в пучках нуклотрона. Планируется облучать ядерные эмульсии пучками различных релятивист-



**Рис. 10.** Примеры периферической диссоциации ядер  ${}^7\text{Be}$

ских ядер. Исследовательская программа концентрируется на детальном изучении фрагментации легких радиоактивных и стабильных ядер. Ожидаемые результаты позволят ответить на некоторые вопросы кластерной структуры легких ядер. Особый интерес представляют облучения вторичными пучками радиоактивных ядер He, Be, B,



**Рис. 11.** Спектр эффективных масс системы  $(pK_s^0)$  в реакции  $\text{C} + \text{C} \rightarrow (\text{K}_s^0 p) + \text{X}$  при импульсе  $4,2 \text{ A} \cdot \text{ГэВ}/\text{c}^2$  в области  $\theta^+$ -резонанса

С и N. Наличие экзотических пучков в ЛВЭ и автоматического сканирующего микроскопа в ФИАН делает эти исследования весьма перспективными.

Цель исследования — прояснить роль  $^3\text{He}$  кластеризации в предстоящих облучениях с использованием  $^7\text{Be}$  ( $^4,^3\text{He}-^3\text{He}$ ),  $^8\text{B}$  ( $^1,^2\text{H}-^4,^3\text{He}-^3\text{He}$ ),  $^9\text{Be}$  ( $^4\text{He}-^4\text{He}$ ),  $^9\text{C}$  ( $^3\text{He}-^3\text{He}$ ),  $^{10}\text{C}$  ( $^3\text{He}-^3\text{He}-^4\text{He}$ ),  $^{11}\text{C}$  ( $^3\text{He}-^4\text{He}-^4\text{He}$ ).

На рис. 10 можно видеть примеры периферической диссоциации ядер  $^7\text{Be}$  с энергией 1,23 А·ГэВ на пары ядер He (верхнее фото: диссоциация без возбуждения ядра мишени и без рождения заряженных мезонов; нижнее фото: диссоциация, сопровождаемая рождением фрагмента мишени и мезонной пары).

Вторичный пучок, содержащий значительную часть ядер  $^7\text{Be}$  с энергией 1,23 А·ГэВ, был сформирован во время сеанса на нуклотроне путем отбора продуктов перезарядки первичных ядер  $^7\text{Li}$  с помощью канала транспортировки пучка. Проводилось облучение эмульсионных стопок. Ядра  $^7\text{Be}$  удобны для выбора магнитной оптики благодаря максимальной величине отношения заряда к весу. Это обстоятельство позволяет проводить наиболее полное наблюдение конечных фрагментов. Путем визуального сканирования треков были найдены 22 распада входящих ядер на гелиевые фрагменты без других сопровождающих треков. Изотопы гелия были идентифицированы по их полному импульсу, полученному из данных измерений многократного рассеяния. Это позволяет заключить, что доминирующая доля этих распадов связана с когерентной диссоциацией  $^3\text{He} + ^4\text{He}$ , и только 3–4 распада — с  $^3\text{He} + ^3\text{He} + n$ . Можно заключить, что  $^3\text{He}$  кластеризация проявляется в распадах возбужденных релятивистских ядер  $^7\text{Be}$ .

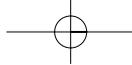
Совсем недавно группой сотрудников ЛВЭ и монгольских физиков ИФТ (Улан-Батор) были заново проанализированы экспериментальные материалы с двухметровой пропановой пузырьковой камеры с целью поиска экзотических многокварковых резонансных состояний в СС-взаимодействиях при импульсе 4,2 ГэВ/с на нуклон. В результате анализа было установлено, что в спектре эффективных масс системы ( $pK_s^0$ ) наблюдается образование резонансов при значениях масс  $1535 \pm 2$ ;  $1739 \pm 3$  и  $1911 \pm 2$  МэВ/ $c^2$  с шириной, равной разрешению по массе. На рис.11 в качестве иллюстрации приводится изображение спектра эффективных масс в области резонанса с массой 1530 МэВ/ $c^2$ .

#### 4. Эксперименты ЛВЭ на ускорителе ИФВЭ

Лаборатория высоких энергий проводит исследования не только на своей ускорительной базе.

В октябре 1967 года в ИФВЭ фактически на первых оборотах пучка нового ускорителя объединенная группа физиков ОИЯИ–ИФВЭ уже приступила к исследованию упругого рассеяния протонов на протонах на малые углы.

Группой, возглавляемой В.А.Свиридовым (а впоследствии — В.А.Никитиным), была проведена существенная модернизация экспериментальной установки. Ядерные фотоэмульсии были заменены на полупроводниковые детекторы (Ю.К.Акимов, Л.С.Золин и др.), а тонкая пленочная мишень — на струйную газовую водородную мишень, созданную в ЛВЭ группой специалистов под руководством Ю.К.Пилипенко.



Одной из важнейших характеристик дифракционного рассеяния частиц, имеющих фундаментальное значение для теории, является величина дифракционного конуса при малых углах рассеяния, а также его поведение в зависимости от энергии. В различных лабораториях мира пытались разными методами решить эту проблему, но определенного ответа о поведении дифракционного конуса при малых переданных импульсах получить не удалось.

В экспериментах на ускорителе ИФВЭ была впервые обнаружена энергетическая зависимость дифракционного конуса рассеяния протонов на протонах до 70 ГэВ, что указывало на несоответствие простой дифракционной модели взаимодействия частиц; а также было установлено, что радиус сильного нуклон-нуклонного взаимодействия растет с увеличением энергии налетающих нуклонов.

В этой же серии экспериментов при изучении упругого рассеяния протонов на дейтроне были получены новые важные сведения о распределении ядерной материи в дейтроне.

Экспериментальные данные по упругому рассеянию протонов на малые углы, полученные физиками ЛВЭ на ускорителе ИФВЭ, вызвали большой интерес мировой научной общественности. Они впервые показали, что для указанного явления фундаментальные принципы теории (причинность, унитарность) не нарушаются вплоть до энергий 70 ГэВ.

Этот принципиально важный для теории результат был признан открытием и зарегистрирован в Государственном реестре открытий СССР под названием «Закономерность изменения радиуса сильного взаимодействия протонов при высоких энергиях» с приоритетом от 1961 года в части теоретического обоснования и 1969 года – в части экспериментального подтверждения.

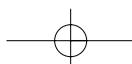
Большим международным коллективом ученых, возглавляемым В.Г.Гришиным и М.И.Соловьевым, при обработке снимков с двухметровой пропановой пузырьковой камеры, облученной отрицательными пионами с импульсом 40 ГэВ/с на ускорителе ИФВЭ, впервые наблюдалось обильное образование короткоживущих частиц-резонансов, установлено явление «раннего скейлинга» в пион-нуклонных взаимодействиях при импульсе 40 ГэВ/с и обнаружено существование в этих взаимодействиях линейной корреляции при рождении отрицательных и заряженных пионов.

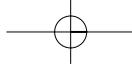
В цикле работ А.М.Балдина, В.Г.Гришина, Л.А.Диденко и А.А.Кузнецова по поиску и изучению свойств сильно возбужденной ядерной материи в релятивистских ядерных столкновениях на основе нового релятивистски-инвариантного метода описания этих процессов в пространстве четырехмерных скоростей обнаружен асимптотический характер таких процессов и их свойства самоподобия.

Этой же группой физиков ЛВЭ впервые экспериментально подтверждена классификация ядерных систем и установлено существование барионных кластеров и адронных струй в этом пространстве, а также показано, что их свойства универсальны (т. е. не зависят ни от энергии взаимодействия, ни от типа фрагментирующей системы) и представляют собой наиболее достижимые возбуждения ядерной материи в релятивистских ядерных взаимодействиях<sup>1</sup>. Обнаруженная универсальность указывает

---

<sup>1</sup> Baldin A.M., Malakhov A.I. // JINR Rapid Communications. 1998. No. 1 (87). P. 5–12.





**Участники международного сотрудничества 2-метровой пропановой пузырьковой камеры. Руководители сотрудничества: М.И.Соловьев (1-й справа в первом ряду) и В.Г.Гришин (1-й справа во втором ряду)**

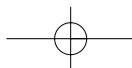
на то, что адронизация кварковых систем определяется динамикой взаимодействия цветного заряда с КХД-вакуумом.

По методу, разработанному в ЛВЭ Г.И.Копыловым и М.И.Подгорецким, были подробно исследованы интерференционные корреляции тождественных частиц и определены пространственно-временные параметры области генерации адронов в широкой области энергий.

Сегодня эта методика получила общее признание: она успешно развивается и активно используется в исследованиях на всех крупнейших ускорительных комплексах мира.

С помощью двухметровой жидководородной пузырьковой камеры «Людмила», созданной специалистами ЛВЭ под руководством Н.М.Вирясова, при изучении свойств антипротон-протонных взаимодействий при импульсе 22,4 ГэВ/с группой физиков лаборатории (руководитель И.М.Граменицкий) были измерены топологические сечения и инклюзивные спектры вторичных частиц в этих взаимодействиях, детально изучены интерференционные эффекты идентичных пионов и определена их область испускания.

Кроме этого, этой же группой была обнаружена выстроенность спина ро-мезона, что прямо указывает на наличие поляризации кварков на стадии перед их соединением в мезон, и изучены свойства образования других резонансов.





Г.И.Копылов

Используя грекочувствительную жидкодейтериевую мишень внутри рабочего объема камеры, они также измерили свойства топологических сечений и характеристик инклюзивных спектров частиц в никем еще не наблюдавшихся антинейтрон-дейтронных столкновениях при импульсе 12 ГэВ/с.

Этой же группой были впервые измерены сечения антинейтрон-нейтронной аннигиляции, а также изучены свойства образования резонансов в антинейтрон-протонных столкновениях при импульсе антинейтронов 6,1 ГэВ/с.

Проверка выполнимости гипотезы И.Я.Померанчука о том, что при очень высоких энергиях сечения взаимодействия частиц и античастиц с веществом совпадают (т. н. теорема Померанчука), проводилась на ускорителе ИФВЭ под руководством И.А.Савина (и впоследствии – М.Ф.Лихачева).

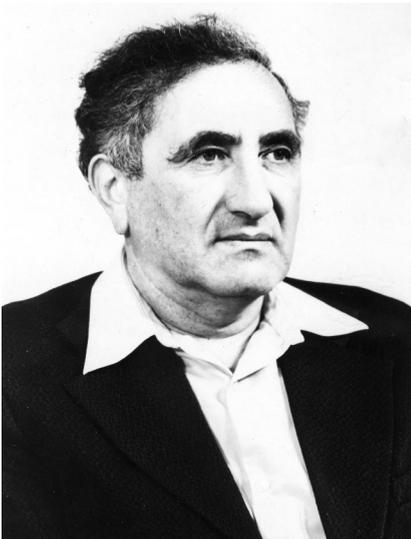
Эксперимент выполнялся с помощью бесфильмового искрового спектрометра (БИС) на линии с ЭВМ. В качестве мишени – регенератора использовались трехметровые жидководородная и жидкодейтериевая мишени, разработанные в ЛВЭ под руководством Л.Б.Голованова, и мишень из углерода.

В эксперименте изучалась регенерация нейтральных каонов на водороде, дейтерии и углероде при энергии от 10 до 50 ГэВ.

Обнаруженные закономерности полностью исключали нарушение теоремы Померанчука об асимптотическом равенстве полных сечений взаимодействия частиц и античастиц, на возможность чего указывали некоторые имевшиеся в то время данные. Результаты эксперимента устанавливали также справедливость основных выводов теории комплексных угловых моментов и дисперсионных соотношений о поведении амплитуд рассеяния в новой тогда области энергий.

С помощью этой установки изучены также некоторые свойства распада нейтральных каонов, которые позволили выяснить многие вопросы теории слабых взаимодействий.

Эти результаты вошли в банк мировых данных.



М.И.Подгорецкий



В дирекции ЛВЭ (слева направо): А.М.Балдин, Э.Н.Цыганов, Д.Дрилки (США) и А.А.Кузнецов обсуждают вопросы проведения совместного эксперимента на ускорителе ИФВЭ

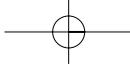
Началом долговременного советско-американского сотрудничества в области физики высоких энергий явились первые совместные эксперименты по изучению структуры пионов в опытах по упругому пион-электронному рассеянию при энергии 50 ГэВ, поставленные на ускорителе ИФВЭ группами физиков ЛВЭ и Калифорнийского университета (Лос-Анджелес, США) под руководством Э.Н.Цыганова и Д.Дрилки соответственно.

Исследования реакции пион-электронного рассеяния изучались в области переданных импульсов от  $0,013$  до  $0,036$  (ГэВ/с)<sup>2</sup>, поэтому необходимо было точно измерять углы и импульсы рассеянных пионов и электронов. В эксперименте впервые безмодельным образом был также измерен электромагнитный радиус заряженного пиона. Он оказался равным  $(0,78 \pm 0,10)$  фм (напомним, что результат пропановой камеры ранее давал оценку электромагнитного радиуса пиона  $\leq 6,6$  фм).

Дальнейшие исследования электромагнитной структуры заряженных адронов, проведенные в ФНАЛ и ЦЕРН, базировались в значительной степени на методике, апробированной в данном опыте.

## 5. Эксперименты ЛВЭ на ускорителях Западной Европы

Группой физиков и специалистов ЛВЭ под руководством И.А.Савина и И.А.Голутвина в сотрудничестве с учеными других лабораторий ОИЯИ и ЦЕРНа была создана установка NA4 для поиска новых частиц и изучения глубоконеупругого рассеяния мю-



онов на мишенях из водорода, дейтерия и углерода в области максимально возможных энергий и переданных четырехимпульсов.

На этой установке, которая с 1979 года начала работать на ускорителе в ЦЕРН в пучке мюонов с энергией от 100 до 280 ГэВ, был проведен цикл исследований глубоконаепругих взаимодействий мезонов с нуклонами и ядрами с целью изучения их структуры вплоть до расстояний  $10^{-15}$  см.

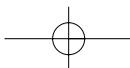
Помимо этого в эксперименте исследовались и ядерные эффекты. В частности, были проведены измерения структурных функций нуклонов в различных ядрах и определены их отношения в зависимости от переменных  $x$  и  $Q^2$ . Измерения были выполнены с целью проверки EMC эффекта, указывавшего на то, что в области масштабной переменной  $x \leq 0,6$  нуклоны в ядрах могут существовать в другом виде (например, в виде многокварковых состояний), чем в свободном состоянии. Впервые этот факт был установлен в экспериментах группы физиков ЛВЭ, возглавляемых А.М.Балдиным и В.С.Ставиным.

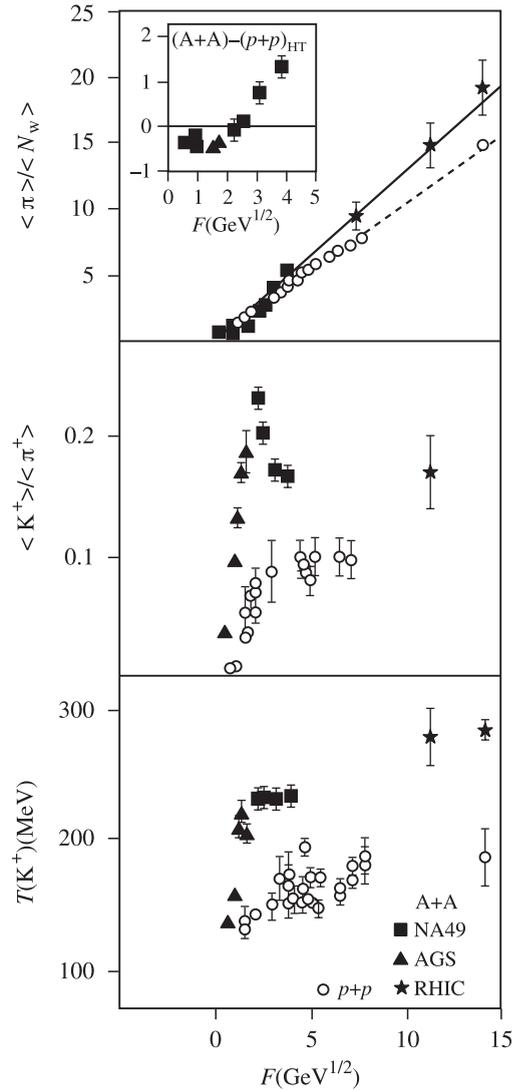
Сейчас изучение кварковых степеней свободы в ядрах — весьма актуальная область исследований, реализацией которых заняты многие группы физиков на всех крупнейших ускорительных комплексах мира.

Активно участвуют группы из лаборатории в исследованиях на пучках ядер свинца с энергией 158 ГэВ на нуклон в ЦЕРН на ускорителе SPS в коллаборациях NA45 (руководитель Ю.А.Панебратцев) и NA49 (руководители А.И.Малахов и Г.Л.Мелкумов). Сигналы, полученные в этих экспериментах, были интерпретированы как указание на существование нового состояния материи (кварк-глюонная плазма).

Наблюдение фазового перехода при деконфайнменте наблюдалось в NA49 в эксперименте при активном участии группы специалистов из ЛВЭ, которые отвечали за измерение и анализ спектров заряженных каонов и спектров протонов и дейтронов в Pb+Pb соударениях при 20 и 30 А·ГэВ, а также участвовали в завершении программы сканирования по энергии (при энергиях пучка 20, 30, 40, 80 и 158 А·ГэВ). Были получены следующие основные результаты анализа спектров: число рожденных пионов при нормировке на число нуклонов, участвующих в соударении, возрастает с ростом энергии и в  $p$ - $p$ - и в  $NN$ -реакциях. Однако скорость возрастания в  $NN$ -реакции становится выше в области энергии SPS, а затем стабилизируется при энергиях RHIC (верхний график на рис.12); наиболее драматичный эффект наблюдается в энергетической зависимости отношения  $\langle K^+ \rangle / \langle \pi^+ \rangle$  средних множественностей  $K^+$  и  $\pi^+$ -мезонов, рожденных в центральных Pb+Pb соударениях (средний график на рис.12); третий важный результат состоит в том, что температура  $K^+$ -мезонов в центральных Pb+Pb соударениях при энергиях SPS является постоянной (нижний график рис.12). На основании этих результатов можно предположить, что фазовый переход при деконфайнменте существует и что в Pb+Pb соударениях в области энергий SPS он начинает проявляться.

Недавно сотрудники коллаборации NA49, исследуя спектр эффективных масс в  $\Xi^- \pi^-$ ,  $\Xi^- \pi^+$ ,  $\Xi^+ \pi^-$ ,  $\Xi^+ \pi^+$  системах, образующихся в протон-протонных столкновениях при энергии 150 ГэВ ( $\sqrt{s} = 17,2$  ГэВ), обнаружили (оценка дает  $4,0\sigma$ ) новое многокварковое резонансное состояние с массой  $1,862 \pm 0,002$  ГэВ/с и шириной, меньшей разрешения детектора  $\sim 0,018$  ГэВ/с (рис. 13). Это состояние является кандидатом на гипотетическое экзотическое  $\Xi^- \bar{\Xi}^- (3/2)$  барионное состояние с  $S = -2$ ,  $I = 3/2$  и квар-



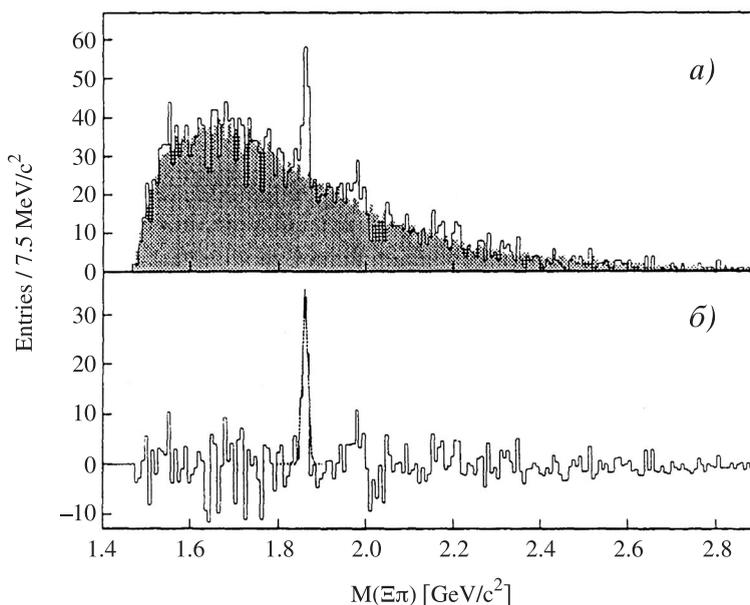


**Рис. 12.** Зависимость от энергии соударения выходов различных адронов, измеренных в центральных Pb+Pb и Au+Au соударениях (заштрихованные символы) по сравнению с результатами, полученными для реакций  $p+p$  (незаштрихованные кружки). Изменения в области SPS энергии (заштрихованные квадраты) предполагают начало фазового перехода ( $F = (\sqrt{S_{NN}} - 2m_0)^{3/4} / (\sqrt{S_{NN}})^{1/4} \sim S_{NN}^{1/2}$ , где  $m_0$  – масса нуклона)

ковым составом ( $dsd\bar{s}\bar{u}$ ). При той же массе наблюдается пик в  $\Xi^-\pi^+$  спектре, который является кандидатом в члены  $\Xi^0(3/2)$  этого изоспинового квартета с кварковым содержанием ( $dsus\bar{d}$ ).

Ряд групп физиков лаборатории принимает активное участие в проектах ALICE (руководитель А.С.Водопьянов), CMS (руководитель А.И.Малахов) и NA45 (руководитель Ю.А.Панебратцев).

Проект ALICE предназначен для изучения Pb+Pb взаимодействий на LHC при энергии в системе центра масс около 5,5 ТэВ на нуклон. Целью эксперимента является изучение свойств сильно взаимодействующей материи при экстремально высоких плотностях. Основной вклад ОИЯИ в создание установки – разработка и изгото-



**Рис. 13.** Спектры суммы инвариантных масс  $a$ :  $\Xi\pi^-$ ,  $\Xi\pi^+$ ,  $\bar{\Xi}\pi^-$ ,  $\bar{\Xi}\pi^+$ , заштрихованная гистограмма – фон, полученный путем перемешивания событий;  $b$ : спектр суммы инвариантных масс после вычитания фона. Сплошная линия – гауссова аппроксимация пика

товление ярма дипольного магнита мюонного плеча установки и участие в разработке и изготовлении элементов системы идентификации частиц на основе детекторов переходного излучения (TRD). Также ведется работа по разработке физической программы и моделированию процессов, которые планируется исследовать. Группа Дубны прорабатывает вопросы, связанные с исследованием рождения векторных мезонов и Бозе–Эйнштейна корреляциям вторичных частиц.

Проект CMS, кроме задач на адронных пучках, содержит программу исследований Pb+Pb взаимодействий на LHC. В разработке этой программы активное участие принимают физики ЛВЭ. В частности, в рамках модели HIJING были изучены глобальные характеристики ядро-ядерных столкновений для области энергий LHC. Интересным предсказанием модели оказалось указание на наличие широкого максимума в центральной области быстрот на фоне плато в распределении по псевдобыстроте полной поперечной энергии. Этот подъем вызван эффектом гашения струй в плотной ядерной материи. Показано, что калориметр с широким захватом по псевдобыстроте  $-5 < \eta < 5$  позволит получить экспериментальную проверку существования такого эффекта.

Эксперимент NA45 ориентирован на регистрацию электрон-позитронных пар и прямых фотонов, рождаемых в адронных, адрон-ядерных и ядерных столкновениях. Главной целью этого эксперимента является систематическое изучение спектра электрон-позитронных пар в области масс от 50 МэВ/с<sup>2</sup> до 2 ГэВ/с<sup>2</sup> и рождения  $\rho$ -,  $\omega$ - и

$\phi$ -мезонов. Благодаря отсутствию взаимодействий в конечном состоянии регистрируемых в этом эксперименте вторичных частиц, он является уникальным для изучения динамики ультрарелятивистских взаимодействий тяжелых ионов.

В ОИЯИ для установки NA45 были созданы элементы системы быстрого триггера и изготовлен большой магнит для времяпроекционной камеры (TPC).

Довольно активное участие принимает группа Ю.В.Заневского в эксперименте HADES в GSI (Германия). Для этого эксперимента специалисты группы изготовили систему уникальных дрейфовых камер. Установка HADES представляет собой широкоапертурный диэлектронный спектрометр для изучения рождения лептонных пар в столкновениях тяжелых ядер в области кинетических энергий до 2 ГэВ на нуклон. Эта установка способна работать при интенсивностях пучка до  $10^8$  частиц/с. Детектор имеет геометрический акцептанс почти 40% для  $e^+e^-$  пар и разрешение по массам 0,8% для  $\rho$ - и  $\omega$ -мезонов.

В настоящее время началось плодотворное сотрудничество ЛВЭ с GSI по участию в работах по новому проекту Международного ускорительного центра для исследований с ионами и антипротонами.

Многолетнее плодотворное международное научное сотрудничество в рамках проекта WASA/PROMICE осуществляется ЛВЭ (руководитель Б.А.Морозов) с Университетом в Уппсала (Швеция). В этом проекте с помощью  $4\pi$ -детектора проводятся прецизионные исследования порогового образования и редких распадов легких мезонов на ускорительном накопительном комплексе CELSIUS с использованием внутренней каплеобразной водородно-дейтериевой мишени.

На установке WASA/PROMICE в пучках ускорителя CELSIUS получены экспериментальные данные о механизмах взаимодействий протонов с протонами и дейтронами в надпороговой области энергий. Измерены дифференциальные сечения реакции  $pd \rightarrow {}^3\text{He} + \eta$  в интервале энергий протонов от 930 до 1100 МэВ. Впервые в эксклюзивной постановке экспериментально изучена реакция  $dp \rightarrow dp\gamma$  в интервале энергий дейтронов от 436,7 до 559,0 МэВ. Впервые экспериментально изучена реакция  $pp \rightarrow pp\pi^+\pi^-$  с большой статистикой вблизи энергетического порога.

## 6. Эксперименты ЛВЭ на ускорителях ФНАЛ и БНЛ

Дальнейшее развитие методики исследования упругого рассеяния протонов на малые углы (ранее успешно использованной в экспериментах на синхрофазотроне и ускорителе ИФВЭ) позволило группам физиков ЛВЭ под руководством В.Г.Кадышевского, А.А.Кузнецова, В.А.Матвеева, С.В.Мухина и В.А.Никитина провести первые совместные эксперименты на вновь созданном в то время крупнейшем в мире ускорителе ФНАЛ (Батавия, США). Огромная заслуга в организации этого сотрудничества и успешном проведении этого цикла экспериментов принадлежит ГКАЭ СССР, дирекции ОИЯИ, а также дирекции ФНАЛ.

В совместных советско-американских экспериментах, начиная с марта 1972 года, была детально изучена закономерность поведения вещественной части амплитуды упругого рассеяния протонов и дифракционного конуса в широком интервале энер-



В дирекции ОИЯИ (слева направо): Н.Н.Боголюбов, Р.Вильсон (США), К.Ланиус (ГДР) и А.А.Кузнецов обсуждают итоги работы первой группы совместного ОИЯИ—ФНАЛ эксперимента в Батавии (США). Июль 1975 г., Дубна

гий от 8 до 400 ГэВ (см. рис. 14а и 14б); а также установлены неизвестные ранее свойства дифракционной диссоциации протонов на протонах и легких ядрах<sup>1</sup>.

В частности, было обнаружено явление антиэкранировки нуклонов в дейтроне, которое состоит в том, что в определенной кинематической области при неупругой дифракции когерентные волны от отдельных нуклонов складываются конструктивно и дифференциальное сечение рассеяния на дейтроне превышает удвоенное сечение.

Полученные результаты экспериментально подтвердили справедливость предсказаний дисперсионных соотношений в новой области энергий.

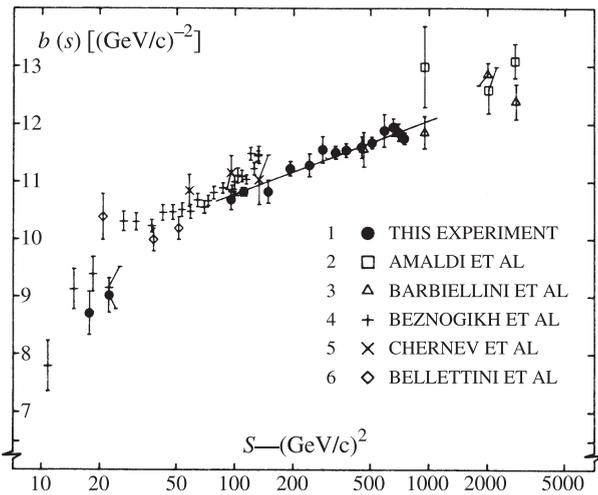
Впервые было экспериментально подтверждено, что основные представления о микропричинности справедливы до расстояний  $10^{-15}$  см.

Совокупность результатов, полученных на трех крупнейших в то время ускорителях мира, обогатила науку выдающимися достижениями и была широко признана на мировом уровне. Эти работы в 1983 году были отмечены Государственной премией СССР. Лауреатами Государственной премии за цикл работ «Дифракционное рассеяние протонов при высоких энергиях» стали Ю.К.Акимов, В.А.Никитин, Б.А.Морозов, Ю.К.Пилипенко, Л.С.Золин, С.В.Мухин, М.Г.Шафранова, В.А.Копылов-Свиридов, А.А.Кузнецов (ОИЯИ), А.А.Воробьев (ЛИЯФ), Е.Л.Фейнберг (ФИАН), В.А.Царев (ФИАН).

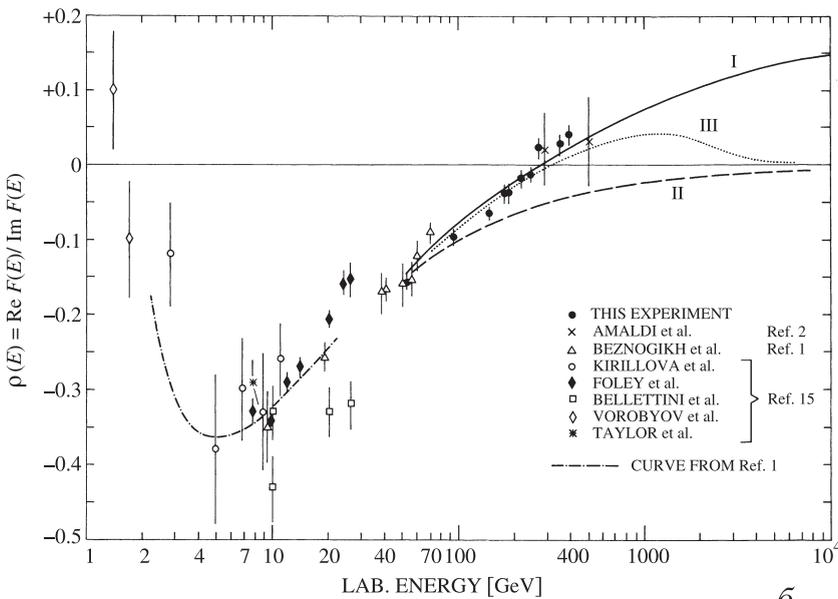
В 1975 году группой физиков ОИЯИ и Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе под руководством Э.Н.Цыганова и Д.Дрипки были совместно предложены и осуществлены на ускорителе ФНАЛ эксперименты по измерению электромагнитных формфакторов пиона и каона в упругом пион-электронном и каон-электронном рас-

<sup>1</sup> Gross D. et al. Real part of the  $p$ - $p$ ,  $p$ - $d$ , and  $p$ - $n$  forward scattering amplitudes from 50 to 400 GeV // Phys. Rev. Lett. 1978. V. 41. No. 4. P. 217–220.

**Рис. 14а.** Компиляция данных по параметру наклона дифракционного конуса  $pp$ -рассеяния  $b(s)$ . Данные получены в ЛВЭ ОИЯИ, ИФВЭ и ФНАЛ



a



б

**Рис. 14б.** Компиляция данных по  $\rho(E)$  – параметру упругого  $pp$ -рассеяния. Данные получены в ЛВЭ ОИЯИ, ИФВЭ и ФНАЛ. Кривые – различные варианты расчета по дисперсионному соотношению

сеянии при энергии 100 и 250 ГэВ. Поскольку было необходимо существенно улучшить пространственное и угловое разрешение спектрометра, в него были включены прецизионные дрейфовые камеры, имевшие рекордную координатную точность, составляющую 55 мкм. Камеры с такими параметрами были созданы В.П.Пугачевичем, Д.В.Уральским и М.Д.Шафрановым.



Д.Дрички (США), М.Турала (ПНР), Э.Н.Цыганов во время подготовки спектрометра к рабочему сеансу на ускорителе ИФВЭ

В этой серии экспериментов был впервые измерен электромагнитный радиус отрицательного каона, который оказался равным  $(0,53 \pm 0,05)$  фм.

Совместная аппроксимация результатов упругого пион-электронного рассеяния экспериментов ИФВЭ и ФНАЛ при энергиях 50, 100 и 250 ГэВ позволила получить значение радиуса пиона, равное  $(0,636 \pm 0,024)$  фм.

Одновременное (в одном эксперименте) измерение упругого рассеяния пионов и каонов на электроны при энергии 250 ГэВ позволило впервые провести прямое экспериментальное определение разности их формфакторов:  $\langle r_{\pi}^2 \rangle - \langle r_k^2 \rangle = (0,16 \pm 0,06)$  фм<sup>2</sup>, что хорошо согласуется с указанными выше отдельными измерениями.

Группа Ю.А.Панебратцева активно участвует в эксперименте STAR, а группа А.Г.Литвиненко – в эксперименте PHENIX на встречных пучках коллайдера RHIC. Коллайдер релятивистских адронов и ядер (RHIC), расположенный в Брукхейвенской национальной лаборатории (BNL), был введен в эксплуатацию в 2000 году. Он ориентирован на изучение столкновений ядер вплоть до золота (Au) при энергии до  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ на нуклонную пару, а также поляризованных протонов.

Таким образом, до запуска LHC на RHIC будет изучаться столкновения ядер при самых высоких энергиях (больше чем в 10 раз превышающих энергию столкновений на SPS в ЦЕРНе).

В скором времени после обнаружения эффекта гашения струй (в первом сеансе 2000 года) коллаборацией PHENIX было принято решение расширить область идентификации частиц до импульсов порядка 10 ГэВ/с. Группы из университета Цукубо, научных центров ОИЯИ и BNL приняли участие в реализации этого проекта, полу-

чившего название «High  $p_t$  project». В проекте предполагалось расширить область идентификации частиц за счет установки стенки из черенковских счетчиков с аэрогелевым радиатором. Детектор PHENIX имеет развитую систему идентификации частиц и ориентирован на изучение ядерных столкновений с большим набором пробников, прежде всего тех, что несут информацию о ранней стадии реакции. Вместе с существующей системой идентификации частиц аэрогелевые счетчики с коэффициентом преломления  $n$  порядка 1,01 позволяют разделять пионы, каоны и протоны (антипротоны) до импульсов порядка 10 ГэВ/с.

В результате напряженной совместной работы групп первая половина аэрогелевого детектора была успешно смонтирована в ноябре 2003 года. В настоящее время продолжается набор статистики с новой детекторной подсистемой. Аэрогелевый детектор работает без сбоев, и коллаборация PHENIX планирует иметь новые экспериментальные данные, проливающие свет на природу эффекта гашения струй.

Большая работа проведена сотрудниками лаборатории по эксперименту STAR.

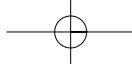
В результате были измерены инклюзивные распределения адронов по поперечному импульсу в широком диапазоне по центральности в Au+Au столкновениях при  $\sqrt{s_{NN}} = 130$  ГэВ. Выход адронов оказался подавлен в области больших поперечных импульсов в центральных событиях по сравнению с периферическими столкновениями и нуклон-нуклонными. В периферических взаимодействиях подавления по отношению к нуклон-нуклонным не наблюдается. Подавление непрерывно меняется в области промежуточных центральностей столкновений. Полученные результаты свидетельствуют о сильном влиянии ядерной среды в области больших поперечных импульсов адронов в столкновениях тяжелых ионов при высоких энергиях.

Сотрудничество с американскими физиками принесло и другие новые ценные результаты.

В 1976 году Э.Н.Цыгановым была теоретически предсказана возможность отклонения траекторий заряженных частиц изогнутыми монокристаллами. Утверждалось, что траектории частиц, захваченных в режим каналирования в кристалле, будут следовать за направлением изогнутых кристаллографических плоскостей вплоть до некоторого критического радиуса, который зависит от массы и скорости частицы, ее заряда и от интенсивности межатомного электрического поля кристалла. При каналировании реализуется режим устойчивого движения, в который могут захватываться положительно заряженные частицы, вошедшие в кристалл под углом относительно кристаллографических осей или плоскостей меньше некоторого критического значения. Критический угол характеризует предельную поперечную кинетическую энергию частицы и определяет условие ее захвата в процессе каналирования.

Для проверки возможности отклонения пучка изогнутым монокристаллом в 1979 году был поставлен опыт на синхрофазотроне ОИЯИ. В коллектив экспериментаторов вошли специалисты из ЛВЭ, Института ядерных исследований в Сверке (Польша), Физико-технического института в Харькове (Украина), Томского политехнического института, Радиового института в Ленинграде, Фермиевской ускорительной лаборатории и Государственного университета в Нью-Йорке.

В результате тонкого эксперимента было установлено, что пучок протонов с энергией 8,4 ГэВ, попавших в режим каналирования, отклоняется на различные углы в диапазоне до 26 мрад от направления падающего пучка.



Так было установлено существование нового, не известного ранее явления, показано, что с помощью изогнутого кристалла можно управлять траекториями заряженных частиц.

Следующим шагом было доказательство возможности вывода пучка из ускорителя с помощью изогнутого монокристалла. Эксперимент был поставлен на пучке протонов синхрофазотрона ОИЯИ при трех значениях их энергии: 4,2, 6,0 и 7,5 ГэВ.

В 1984 году результаты этого эксперимента подтвердили, что с помощью изогнутого монокристалла пучок протонов выведен из синхрофазотрона.

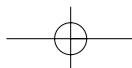
Таким образом, на стыке наук – кристаллографии, физики электромагнитных взаимодействий частиц высоких энергий и физики ускорителей – родилось новое научное направление.

Работа получила высокую оценку – в 1996 за цикл работ «Разработка новых методов управления пучками частиц высоких энергий на современных ускорителях с помощью изогнутых кристаллов и их реализация» Э.Н.Цыганов и А.М.Таратин от ОИЯИ и ряд сотрудников Института физики высоких энергий (Серпухов) и Санкт-Петербургского института ядерной физики были удостоены Государственной премии РФ в области науки и техники.

## 7. Совместные исследования ЛВЭ–RIKEN

Основной целью совместного ЛВЭ–RIKEN эксперимента явилось изучение спиновой структуры  ${}^3\text{He}$  ( ${}^3\text{H}$ ) на расстояниях, недостижимых в настоящий момент, с использованием электромагнитных пробников посредством измерения угловых зависимостей тензорных анализирующих способностей  $A_{yy}$ ,  $A_{xx}$ ,  $A_{xz}$  в реакциях  $d+d \rightarrow {}^3\text{He}+n$  и  $d+d \rightarrow {}^3\text{H}+p$ . Эти поляризационные наблюдаемые величины чувствительны к спиновому распределению нейтрона (протона) в  ${}^3\text{He}$  ( ${}^3\text{H}$ ) на малых расстояниях в рамках приближения однонуклонного обмена. Наблюдается сильная чувствительность этих поляризационных наблюдаемых величин к использованной волновой функции трехнуклонной связанной системы, в особенности при малых углах испускания. С другой стороны, так как  ${}^3\text{He}$  и  ${}^3\text{H}$  являются зеркальными по зарядовой симметрии, отличие в их наблюдаемых величинах может быть интерпретировано в терминах нарушения зарядовой симметрии. Измерение тензорных анализирующих способностей, которые в первом порядке не чувствительны к кулоновским коррекциям, в реакциях  $d+d \rightarrow {}^3\text{He}+n$  и  $d+d \rightarrow {}^3\text{H}+p$ , особенно при больших импульсах, могло бы обеспечить дополнительную информацию о природе нарушения зарядовой симметрии. Коллаборация ЛВЭ–RIKEN провела измерение на установке SMART тензорных  $A_{yy}$ ,  $A_{xx}$ ,  $A_{xz}$  и векторной  $A_y$  анализирующих способностей на пучке поляризованных дейтронов циклотрона осенью 2000 года. Данные были измерены со статистической погрешностью  $\pm 0,02$  при энергиях 270 и 200 МэВ во всем угловом диапазоне для реакции  $d+d \rightarrow {}^3\text{H}+p$ . Тот же самый набор анализирующих способностей был получен для канала  $d+d \rightarrow {}^3\text{He}+n$  при 270 МэВ между  $0^\circ$  и  $120^\circ$  в системе центра масс.

Эти исследования планируется продолжить на пучках поляризованных дейтронов ускорительного комплекса ЛВЭ.



## 8. Нуклотрон

Нуклотрон – базовая установка ОИЯИ, предназначенная для получения многозарядных ионов (ядер) с энергией до 6 ГэВ на нуклон, пучков протонов, а также поляризованных дейтронов.

Ускоритель – нуклотрон был сооружен в течение 1987–1993 годов. Он создан на основе уникальной технологии сверхпроводящих магнитов, предложенной и развитой в Лаборатории высоких энергий. Конструкторские разработки, испытания и монтаж элементов нуклотрона целиком выполнены силами коллектива лаборатории.

Производство структурных элементов осуществлено в Центральных экспериментальных мастерских ОИЯИ. Результаты первых испытаний ускорителя были опубликованы в 1994 году<sup>1,2</sup>.

Все проектные параметры машины в основном достигнуты. На практике продемонстрирована высокая надежность системы обеспечения жидким гелием и работающей при температуре около 4,5 К магнито-криостатной системы. В 1994 году были начаты физические эксперименты на внутренней мишени. К 1999 году закончено сооружение и проведены первые испытания системы медленного вывода пучков из нуклотрона. Первые физические эксперименты на выведенном пучке состоялись в марте 2000 года.

За период с марта 1993 года по февраль 2004 года было проведено 28 сеансов работы ускорителя. Проведенная в 1999 году модернизация криогенной системы позволила значительно увеличить длительность непрерывной работы ускорителя и улучшить технико-экономические показатели.

Дополнительно следует отметить, что ускоритель отличается превосходной гибкостью в управлении как при изменении энергии ускоренных частиц, так и при регулировании длительности «стола» магнитного поля.

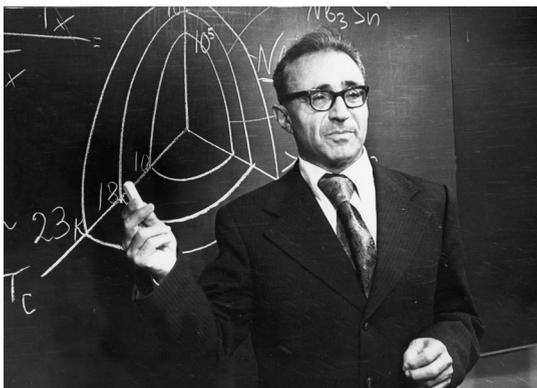
В ходе работ на нуклотроне апробирована новая технология сверхпроводящих магнитов и получен положительный опыт их применения в ускорителе. Полученные результаты будут весьма полезны при проектировании новых быстроциклирующих сверхпроводящих синхротронов для различных приложений.

## 9. ЛВЭ – научная школа криогеники

Становление криогеники в лаборатории целиком и полностью связано с именем профессора Александра Григорьевича Зельдовича. Он перешел на работу в ЛВЭ по инициативе В.И.Векслера в 1957 году, будучи уже известным ученым, доктором технических наук, участником завершенных к тому времени крупнейших проектов, оказавших существенное влияние на развитие промышленности в СССР. Результаты его труда при создании промышленных кислородных установок нового типа и разра-

<sup>1</sup> *Kovalenko A.D.* // «Status of the Nuclotron», EPAC'94, London, June 1994. Proceedings. 1995. V. 1. P. 161–164.

<sup>2</sup> *Baldin A.M.* et al. Cryogenic System of the Nuclotron – a New Superconducting Synchrotron // Advances in Cryogenic Engineering. New York, 1994. V. 39. P. 501–508.



А.Г.Зельдович

ботке метода низкотемпературной дистилляции для выделения дейтерия были удостоены высоких правительственных наград – Государственная премия СССР (1953) и Ленинская премия (1960).

При переходе из Института физических проблем (ИФП) в ЛВЭ ОИЯИ А.Г.Зельдович получил «в приданое» маленький лабораторный ожижитель водорода ВОС-3. В 1957 году он был запущен и стал базой для быстрого развития исследований по созданию жидководородных пузырьковых камер, сооружение ко-

торых было первой задачей, поставленной директором ЛВЭ В.И.Векслером перед вновь создаваемым коллективом специалистов по низким температурам.

В Дубне, сразу после образования криогенного отдела в ЛВЭ под руководством А.Г.Зельдовича, начал действовать специализированный семинар по низкотемпературной тематике<sup>1</sup>.

Ко времени перехода на работу в ЛВЭ А.Г.Зельдович уже имел огромный опыт совместной работы с промышленностью. Он считал, что взаимодействие наука–промышленность чрезвычайно нужно, плодотворно, и последовательно проводил эту мысль в жизнь. В результате по чертежам, разработанным в криогенном отделе ЛВЭ, промышленностью изготовлены водородно-гелиевые установки, которыми в свое время были оснащены многие исследовательские институты в СССР. В начале работ по использованию жидкого водорода, особенно для космических программ, была выпущена целая серия ожижительных установок ВО-2М, разработанных в криогенном отделе ЛВЭ. Сотрудники лаборатории оказали существенную помощь в их наладке и запуске. Головные образцы крупнейших турбодетандерных гелиевых установок КГУ-250/4,5 и КГУ-1600/4,5 также прошли наладку под опекой ученых ЛВЭ, причем ими были внесены весьма существенные вклады в технологию.

*Жидководородные пузырьковые камеры* – первые физические приборы, созданные вновь образованным молодым коллективом криогенщиков ЛВЭ.

Началом работ по жидководородным камерам, по-видимому, следует считать организованный в октябре 1956 года по инициативе В.И.Векслера проезд группы сотрудников ИФП, уже имевших к тому времени значительный опыт работы при экзотически низких температурах конденсации водорода (около 20,4 К).

Первой была создана 40-сантиметровая камера. Под непосредственным руководством А.В.Белоногова в 1957–1958 годах шло ее проектирование, в 1958 году – сбор-

<sup>1</sup> Агапов Н.Н., Баландинов Н.И., Белушкин В.А., Голованов Л.Б., Зельдович А.Г., Хухарева И.С., Шишов Ю.А. Криогенные приборы и устройства в ядерной физике / Под ред. А.Г.Зельдовича. М.: Энергоиздат, 1982.

ка и, наконец, в 1959 — запуск с наблюдением треков. В течение 1959—1967 годов было получено 240 тысяч стереофотографий, а затем прибор был передан Физико-техническому институту АН УССР. Этот первый опыт приобретался с великими трудностями. В корпусе камеры оказалась коварная микротечь, которая открывалась только в присутствии жидкого водорода. Борьба с этой «холодной» течью продолжалась около года, но пройденная при этом школа не пропала даром. Полученный опыт позволил вскоре создать один из лучших в мире прибор, по точности и надежности превосходящий все существовавшие в то время аналоги.

Это была 100-сантиметровая водородная камера. Ее разработка началась в 1960 году, и уже в 1964 году был осуществлен запуск и получены первые треки. На пучках синхрофазотрона ЛВЭ в период до 1971 года было сделано более 600 тысяч четырехкадровых стереофотографий. Конечно, создание такого крупного устройства как водородная камера — результат труда большого коллектива. Однако определяющий вклад, безусловно, был сделан руководителем работ Е.И.Дьячковым. Так, им были предложены дьюарный способ теплоизоляции, термостатирование с помощью радиатора, дьюар многогранной формы с гибкой внутренней оболочкой, меры по обеспечению чистоты оптических поверхностей, система отдельной стабилизации температуры и давления в камере. Успешная реализация именно этих предложений позволила получить точный, простой в изготовлении, надежный прибор.

Впоследствии все эти решения были полностью перенесены на двухметровую водородную камеру «Людмила», созданную и испытанную в ЛВЭ, а затем длительное время успешно проработавшую на ускорителе У-70 в Институте физики высоких энергий в Протвино.

*Криогенные мишени* — другой тип низкотемпературного инструмента для физических исследований. В течение всего времени существования ЛВЭ этим направлением деятельности криогенного отдела руководил заслуженный конструктор РФ Л.Б.Голованов.

Ясно, что криогенная мишень представляет собой сложный физический прибор, к которому предъявляются особые, весьма специфические, часто противоречащие друг другу требования. Основные из них: наполнение мишени жидкими криоагентами  $H_2$ ,  $D_2$  или He; точность определения количества вещества в мишени (до 0,1–0,05%); минимальное количество материала стенок сосуда (металлы практически неприменимы); малое количество взрывоопасного водорода — реконденсация жидким гелием; возможность и безопасность использования мишени в электромагнитных полях; ограничение жидких  $H_2$  и  $D_2$  плоскими стенками; возможность длительной работы, то есть малая испаряемость.

За время работы было создано множество разных типов мишеней, успешно отработавших в физических центрах разных стран: Дубне, Серпухове, Ереване, Сакле (Франция), Брукхейвене (США). Это были секционные мишени, мишени с плоскими окнами, с камерой, имеющей плоские стенки, подвижные с четырьмя камерами, специальные для стриммерных камер и великое множество других. Только до 1972 года их было создано более десяти.

В 1981 году один из приборов — прецизионная установка с жидководородной мишенью, которая позволяла поддерживать количество водорода на пути частиц с точ-



Ю.К.Пилипенко

ностью до 0,05%, — был отмечен золотой медалью ВДНХ СССР.

Говоря о работах сектора Л.Б.Голованова, нельзя не упомянуть и еще об одном важном направлении деятельности этого коллектива: разработаны столь необходимые для начала работ в области криогенных температур первые сосуды для хранения и транспортировки жидкого водорода и гелия. Эти надежные и экономичные 50- и 100-литровые сосуды Дьюара и сегодня находятся в эксплуатации. Они серийно выпускались в Центральных экспериментальных мастерских ОИЯИ, причем было получено свидетельство на промышленный образец.

Интересной разновидностью мишенной стала «мишень — водородная струя». Работы по ее созданию возглавлял Ю.К.Пилипенко. Впоследствии он стал начальником криогенного отдела ЛВЭ.

С помощью такого типа мишени в конце 60-х и начале 70-х годов были получены важные физические результаты на ускорителях в ИФВЭ (Россия) и ФНАЛ (США). Принцип работы струйной мишени состоит в том, что струя плотного холодного водорода впрыскивается непосредственно в вакуумную камеру ускорителя, а затем улавливается, то есть эксперимент проводится непосредственно на внутреннем пучке ускорителя.

Основные преимущества использования струйной мишени: большая вероятность ядерного взаимодействия за счет многократного прохождения пучка, отсутствие вторичных взаимодействий в струе из-за малого количества вещества и длительная и равномерная растяжка первичного пучка. Основные проблемы — формирование и улавливание струи водорода в вакууме. Эта проблема была решена путем использования конденсационного насоса с жидким гелием.

*Сверхпроводимость* стала достоянием техники после того как в 1961 году было открыто, что соединение  $Nb_3Sn$  сохраняет сверхпроводящее состояние при плотности тока до  $10^5$  А/см<sup>2</sup> в магнитном поле 9 Тл ( $T = 4,2$  К). Развернулись работы по изучению этого уникального явления.

В 1964 году И.Н.Гончаровым создана группа для исследований физических свойств сверхпроводящих материалов. Группа явилась первым зародышем для последующего бурного развития изучения и использования сверхпроводимости в ОИЯИ. Уже в 1965 году была получена премия ОИЯИ за цикл работ по исследованию сверхпроводящих сплавов и создание магнита с полем 8,5 Тл. К 1972 году разработан и пущен в эксплуатацию комплекс исследовательской аппаратуры: криостаты, ряд сверх-

проводящих магнитов с полем до 10 Тл, источники питания, системы контроля и измерения.

Был предложен и использован метод низкотемпературной обработки сверхпроводящих сплавов для получения высоких критических токов, изучены зависимости критического тока от магнитного поля и температуры ряда классов сверхпроводников. Исследовалось резистивное состояние СП сплавов, что было необходимо как для их практического использования, так и для построения теории критических токов.

Ю.А.Шишовым в 1966 году образована группа, деятельность которой была направлена на практическое использование крупных устройств на основе сверхпроводимости. Уже в 1969 году создан и испытан сверхпроводящий соленоид с диаметром отверстия 340 мм. Это был первый крупный соленоид, в момент создания рекордный по ряду параметров как в СССР, так и странах-участницах ОИЯИ: ток в ленте 1,8 кА, поле – 2,5 Тл, вес – 600 кг. Необычно большим по тому времени было и количество гелия, заливаемого в криостат, – 300 литров. С 1970 года велись работы по созданию сверхпроводящей магнитной системы «кольцетрон» – соленоид с внутренним диаметром 0,62 и длиной 2,5 метра, поле 2,0 Тл.

Проводилось очень много важных, в сущности пионерских работ, по сопутствующим проблемам: сильноточные токовводы, обнаружение нормальной зоны, вывод запасенной энергии, сверхпроводящие ключи, термометрия и др.

Большое значение для развития применений технической сверхпроводимости в наши дни имели исследования так называемого «косвенного» криостатирования, когда обмотка не имеет непосредственного контакта с жидким гелием: тепло отводится посредством теплопроводящих мостов.

Значительный вклад в развитие технической сверхпроводимости сделал сектор, руководимый Е.И.Дьячковым. С начала 70-х годов этот коллектив с водородных пузырьковых камер полностью переключился на тематику, связанную с созданием нуклотрона. Он создал стенды для испытаний импульсных сверхпроводящих магнитов, проводил конструкторские разработки и испытания на стендах магнитов будущего ускорителя, занимался исследованиями потерь (тепловыделений) в сверхпроводнике при импульсной нагрузке. Была разработана аппаратура и осуществлена на практике методика теплотехнических исследований импульсных сверхпроводящих магнитов нуклотрона.

Сектор произвел комплексные испытания и проверку всех магнитов нуклотрона при рабочих токах и температуре 4,5 К. Каким темпом развивались работы по сверхпроводимости в ходе создания нуклотрона, может проиллюстрировать таблица 1, в которой приведено количество жидкого гелия, произведенное в разные годы.

Необходимо отметить, что полученные знания оказали значительное влияние на технологию и конструкции рекордных по параметрам источников частиц, созданных впоследствии в ЛВЭ: в 1977 году начата эксплуатация криогенного источника ядер КРИОН, на синхрофазотроне ускорены до 5 ГэВ на нуклон ядра С, N, Ne. Позже на нуклотроне получен пучок ядер Fe (руководитель Е.Д.Донец); в 1981 году введен в эксплуатацию источник «Полярис», с помощью которого ускорены поляризованные дейтроны до энергии 4,2 ГэВ на нуклон (руководитель Ю.К.Пилипенко).

Таблица 1. Производство жидкого гелия в ЛВЭ

| Период            | Объем, литр | Этап работ                             |
|-------------------|-------------|--|
| 1961 – осень 1962 | 750         | До развития работ по сверхпроводимости |
| 1972              | 25 000      | Первые работы по сверхпроводимости     |
| 1982              | 40 000      | Развитие работ по сверхпроводимости    |
| 1992              | 380 000     | Испытания магнитов нуклотрона          |
| 1993              | 1 303 000   | Работа для промышленности              |
| 2003              | 2 000 000   | Нуклотрон                              |

*Ожижители водорода и гелия* промышленностью в 50-х годах не выпускались. Для нужд криостатирования вновь создаваемых физических приборов их было необходимо разработать и изготовить. Это направление весьма успешно стартовало под руководством Ю.К.Пилипенко, впоследствии важную роль сыграли начальник сектора В.А.Белушкин, заместитель начальника отдела Н.И.Баландиков и начальник группы В.В.Крылов.

Помимо сложностей, связанных с низкими температурами и чрезвычайной взрывоопасностью, при ожижении и хранении водорода существовала еще одна проблема, связанная с двумя возможными типами объединения атомов в молекулу. При антипараллельной ориентации ядерных спинов образуется молекула параводорода, при параллельной – ортоводорода. Ортопара – состав водорода зависит от температуры. При комнатной температуре он состоит из 25% пара- и 75% ортомодификации (нормальный водород). Устойчивой формой при температуре жидкости 20,4 К является почти чистый параводород. Основная проблема состояла в том, что ортопарапереход происходит самопроизвольно и сопровождается большим выделением тепла, приводящим к полному испарению жидкости даже при идеальной теплоизоляции. Впервые в СССР жидкий параводород был получен на ожижительной установке ВГО-1, созданной в ЛВЭ. Это устройство могло производить до 80 л/ч нормального жидкого водорода, 50 л/ч параводорода или 30 л/ч жидкого гелия.

Следующей ожижительной установкой стал ожижитель ВО-2, предназначенный для обслуживания крупных жидководородных пузырьковых камер. Его производительность составляла 230 л/ч жидкого нормального или 140 л/ч параводорода. Эта разработка сотрудников ЛВЭ принадлежала к числу наиболее современных установок данного типа, которая впоследствии выпускалась серийно. На ожижителе ВО-2 в 1965 году впервые в мире была продемонстрирована возможность замены процесса дросселирования адиабатическим расширением в поршневом детандере. При этом производительность ожижителя была повышена на 50–60%. Этот способ существенного повышения энергетической эффективности теперь используется повсеместно.

В связи с потребностями ОИЯИ и в особенности из-за бурного развития исследований по сверхпроводимости развивалась база и по производству жидкого гелия. Были последовательно спроектированы и введены в действие установка ВГО-1М производительностью 75 л/ч, первый детандерный, не требовавший встроенного водородного цикла, ожижитель МГО на 90 л/ч.

Начиная с 1975 года, в связи с началом использования сверхпроводимости возникла настоятельная необходимость в эффективных и надежных промышленных гелиевых рефрижераторах. Вместе с НПО «Гелиймаш» были освоены головные образцы гелиевых ожижителей с турбодетандерами: установка КГУ-250/4,5 – 90 л/ч жидкого гелия и прототип криогенных установок нуклотрона КГУ-1600/4,5 на 500 л/ч жидкого гелия.

Установки МГО и КГУ-250/4,5 применялись для криостатирования крупнейшего в то время сверхпроводящего соленоида установки «кольцетрон» – прототипа будущего коллективного ускорителя заряженных частиц. Скептики утверждали, что принятая схема КГУ-250/4,5 (два последовательно включенных через теплообменник турбодетандера) будет неприемлема в практике, а сами высокооборотные турбины на газовых опорах весьма ненадежны. Действительно, вначале от операторов требовалось прямо-таки искусство для запуска установки и поддержания необходимых параметров. Затем эти процессы были отлажены, и головной образец установки КГУ-250/4,5 активно используется в ОИЯИ вплоть до настоящего времени. Теперь эта установка имеет марку КГУ-500/4,5, то есть ее производительность увеличилась в 2 раза. В период создания новой турбодетандерной установки, впервые работающей в комплексе с крупным сверхпроводящим устройством, сформировались тесные профессиональные взаимоотношения между сотрудниками московского НПО «Гелиймаш» и ОИЯИ, как правило, носившие характер научного соревнования. При этом огромную роль в развитии работ сыграли В.Г.Пронько и А.Г.Зельдович – руководители научных коллективов НПО «Гелиймаш» и ОИЯИ. Заложенная здесь основа во многом определила успешное создание в будущем не только криогеники для нуклотрона, но и способствовала успешному развитию ряда других криогенных комплексов.

С конца 70-х годов в ЛВЭ начались работы по созданию сверхпроводящего ускорителя. НПО «Гелиймаш» получило от ОИЯИ заказ на создание новой крупной гелиевой установки КГУ-1600/4,5 холодопроизводительностью около 1600 Вт. Головной образец рефрижератора предполагалось использовать для обеспечения жидким гелием предстоящих испытаний сотен различных элементов нуклотрона и их сборок, а также с целью отработки технических решений, заложенных в гелиевые рефрижераторы вновь создаваемой крупнейшей в стране системы криогенного обеспечения сверхпроводящего ускорителя. На этапе проектирования головного образца КГУ-1600/4,5 коллектив НПО «Гелиймаш» добился такого высокопрофессионального результата, что даже по прошествии более двух десятилетий эксплуатации нет никаких идей по улучшению компоновки рефрижератора – настолько она удобна, продумана и технологична. В определенной степени на этот результат повлияли и дискуссии между сотрудниками ОИЯИ и НПО «Гелиймаш», проходившие почти еженедельно. Например, в результате ряда обсуждений, инициатором которых выступал от ОИЯИ В.А.Белушкин, была все же принята схема с очисткой, встроенной в холодильный цикл. Именно благодаря этому стала возможной работа криогенного комплекса нуклотрона без использования жидкого азота.

Главным отличием установки КГУ-1600/4,5 от установки КГУ-250/4,5 было применение парожидкостного детандера. Идея замены дросселя на детандер в ступени окончательного охлаждения была предложена (Ю.К.Пилипенко и А.Г.Зельдович) и впервые реализована (В.А.Белушкин) в цикле водородного ожижителя в 1965 году в

ОИЯИ. Для гелиевого оживителя такую модернизацию впервые (1970 г.) удалось осуществить американскому инженеру С.Коллинзу. В обоих случаях были использованы детандеры поршневого типа.

В ходе работ стало очевидным, что созданные коллективом сотрудников НПО «Гелиймаш» гелиевые турбодетандеры по надежности далеко превосходят, а по КПД практически не уступают поршневым машинам. Однако неясно было, работоспособны ли они при окончании процесса расширения гелия в двухфазной парожидкостной области. Такой опыт в мировой практике отсутствовал. Оказалось, что для принятой конструкции турбодетандера каких-либо проблем нет: при первом же включении парожидкостного турбодетандера (1985 г.) была достигнута холодопроизводительность 1700 Вт, что на 50% больше, чем в дроссельном режиме. В настоящее время в цикле с четырьмя турбодетандерами (три последовательно включенных газовых и один парожидкостной) холодопроизводительность рефрижератора КГУ-1600/4,5 составляет более 2000 Вт, причем жидкий азот в цикле не используется.

Полученный положительный опыт применения парожидкостного гелиевого турбодетандера на головном образце КГУ-1600/4,5 позволил в дальнейших работах по созданию нуклотрона полностью отказаться от расширительных машин поршневого типа. Это существенно сказалось на повышении надежности всей системы. Длительная эксплуатация показала абсолютное отсутствие каких-либо технических проблем, которых можно было ожидать в режимах работы системы при окончании процесса расширения в двухфазной парожидкостной области. Следует особо подчеркнуть, что мировой приоритет в таком важнейшем направлении, как замена процесса дросселирования в криогенных установках на адиабатное расширение в детандерах как поршневого, так и турбинного типа, закреплен за ОИЯИ.

*Криогенная система нуклотрона*<sup>1</sup> начала создаваться в 1986 году, после того как в Дубне состоялась встреча делегации НПО «Гелиймаш» и руководителей проекта «Нуклотрон» директора ЛВЭ А.М.Балдина и главного инженера лаборатории Л.Г.Макарова. Был оформлен и согласован в деталях новый заказ на три установки КГУ-1600/4,5, криогенные трубопроводы, промежуточные сепараторы и другое вспомогательное оборудование. Именно с этого момента начались активные работы по созданию криогенного комплекса нового сверхпроводящего ускорителя. В короткие сроки были сооружены площадки обслуживания для агрегатов охлаждения, построены новые здания компрессорной и газгольдерной, смонтировано хранилище газообразного гелия. Общую координацию проектных и монтажных работ, проработку и согласование элементов схемы криогенного обеспечения нуклотрона осуществляла вновь созданная группа сотрудников ОИЯИ. Для сокращения сроков проектные, строительные и монтажные работы велись одновременно, и разумное согласование всех этих дел было весьма хлопотно. Неизбежные на этом этапе просчеты отсутствовали только благодаря активнейшему лидеру группы – В.И.Липченко. Таким образом, ввод в действие криогенной системы нуклотрона состоялся чрезвычайно быстро – 1991 год. В феврале 1992 года был успешно испытан при гелиевой

<sup>1</sup> *Аганов Н.Н.* Криогенные технологии в сверхпроводящем ускорителе релятивистских ядер – нуклотроне // ЭЧАЯ. 1999. Т. 30, вып. 3. С. 760.

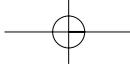
температуре первый квадрант нуклотрона — четвертая часть кольца ускорителя. В марте 1993 года было впервые охлаждено до гелиевых температур полное кольцо и начата его эксплуатация.

В связи с созданием и запуском нового сверхпроводящего ускорителя ЛВЭ уже к 1991 году имела четыре действующих установки КГУ-1600/4,5. Три из них, объединенные в единую систему криогенного обеспечения нуклотрона и работающие на общий коллектор выдачи жидкого гелия потребителю, обеспечивали суммарную производительность в количестве 1500 л/ч.

По существу это был крупнейший в стране завод по сжижению гелия, в котором крайне нуждалась отечественная гелиевая промышленность для поставки данного продукта высокой технологии на экспорт. Руководство Оренбургского гелиевого завода обратилось в ОИЯИ с предложением наладить совместное производство жидкого гелия и заправку им автомобильных контейнеров вместимостью 40000 л. После проведения подготовительных работ, в июле-августе 1992 года, в качестве технологического эксперимента, было заполнено два пробных контейнера для инофирм «Эр Продактс» и «БОК», а затем была организована непрерывная их отгрузка. Газообразный гелий под давлением до 25 МПа доставлялся в Дубну по железной дороге в специальных агрегатах. Для заправки жидким гелием каждого контейнера требовалось пять-шесть вагонов сжатого газа. После доработки системы заправки жидким гелием в 1993 году было заполнено жидким гелием и отправлено на экспорт 32 автоконтейнера, то есть получено более одного миллиона литров жидкого гелия в год. Такое дополнительное использование криогенной системы нуклотрона обеспечило приток внебюджетных финансовых средств, которые помогли завершить создание нового ускорителя в чрезвычайно трудных экономических условиях 1992–1993 годов. Один из редких примеров, когда наука сама смогла себя поддержать — профинансировать эксперименты.

Естественно, что параллельно с ожижением гелия проводились и сеансы экспериментов на нуклотроне, причем отказов и простоев по вине криогенной системы практически не было. Этот результат достигнут благодаря не только высокой надежности машин и аппаратов криогенной системы, но и принятой гибкой системы резервирования, возможности замены любого из турбодетандеров без приостановки криостатирования кольца ускорителя. Важную роль играло и правильное применение так называемых «спутельных режимов», когда циркуляция гелия в кольце осуществлялась за счет использования жидкости, ранее накопленной в сборниках установок КГУ-1600/4,5 и промежуточных сепараторах. Большое значение в повышении надежности системы имело внедрение нового винтового компрессора КАСКАД-80/25, разработанного в НПО «Казанькомпрессормаш» для системы криогенного обеспечения ускорительно-накопительного комплекса, создание которого планировалось в Институте физики высоких энергий (Протвино). Головной образец проходил испытания и сдачу Межведомственной комиссии в составе криогенного комплекса нуклотрона.

В целом проект системы криогенного обеспечения нуклотрона отличается необычайно большим количеством новых технических идей и решений, никогда ранее не применявшихся в мировой практике. Криогенная система нуклотрона описывается в таких основных терминах, как: быстроциклирующие сверхпроводящие магниты,



криостатирование двухфазным парожидкостным потоком гелия, экстремально короткое время захлаживания системы, параллельное соединение по криоагенту сотен сверхпроводящих магнитов, парожидкостный гелиевый турбодетандер, винтовой гелиевый компрессор со степенью сжатия более 25 всего в двух ступенях, применение струйных аппаратов для циркуляции жидкого гелия, и многое другое. Каждая из перечисленных выше характеристик – новый важный шаг в развитии криогенной гелиевой техники.

## 10. Вместо заключения

Из сказанного выше следует, что за 50 лет существования ОИЯИ коллективу специалистов Лаборатории высоких энергий удалось успешно провести целый ряд исследований и получить выдающиеся научные результаты по изучению фундаментальных свойств и структуры элементарных частиц и атомного ядра. Совокупность этих результатов, а также результатов, полученных в последующие годы, внесут заметный вклад в развитие теории сильных взаимодействий и создание современной теории атомного ядра.

Успех ЛВЭ в получении новых важных физических результатов в экспериментах на крупнейших в мире ускорителях всегда приходил благодаря использованию предложенных физиками и инженерами лаборатории новых идей и методических разработок, многие из которых соответствовали мировому уровню, а также за счет широкого использования в экспериментах новейших достижений техники.

Проводимые в ЛВЭ фундаментальные исследования в области релятивистской ядерной физики, помимо чисто научных исследований, дают также возможность решать важные прикладные задачи.

Выполнение коллективом Лаборатории высоких энергий экспериментальной программы успешно продолжается и в настоящее время.

