

УДК 539.12

## **ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ В ЛВЭ, ИФВЭ, ЦЕРН и FNAL**

*А. А. Кузнецов*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Данная работа посвящена краткому описанию важнейших научных результатов 50-летней деятельности одного из крупнейших подразделений ОИЯИ — Лаборатории высоких энергий имени В. И. Векслера и А. М. Балдина (ЛВЭ), полученных в первых экспериментах на ускорителях ОИЯИ, ИФВЭ, ЦЕРН и FNAL.

Рассматривается общая роль ЛВЭ ОИЯИ в постановке и реализации актуальных экспериментальных исследований в области физики высоких энергий и определяется влияние научных результатов, полученных сотрудниками лаборатории в первых совместных экспериментах на крупнейших ускорителях мира, на развитие теории сильных взаимодействий и создание современной теории атомного ядра.

The work presents a brief overview of the most important scientific results of the research at one of the largest laboratories of JINR — the Laboratory of High Energies named after academicians V. I. Veksler and A. M. Baldin obtained in the first experiments at the LHE, IHEP, CERN and FNAL accelerators.

The general role of LHE, JINR, in setting and realization of topical experimental research in the field of high energy physics is considered; the influence of scientific results obtained by LHE researchers in the first joint experiments at the world largest accelerators on the development of the theory of strong interactions and building of the modern theory of atomic nucleus is elucidated.

### **ВМЕСТО ВВЕДЕНИЯ**

Я приехал в Ново-Иваново 1 февраля 1955 г. в составе большой (23 человека!) группы молодых специалистов, только что окончивших физический факультет МГУ и прибывших из Москвы на место своей первой самостоятельной работы в Электрофизической лаборатории АН СССР (фото 1).

Свою трудовую деятельность я начал в отделе синхрофазотрона, где проработал 4 года, активно участвуя в монтаже, наладке и запуске всего комплекса инжектора ускорителя.

В августе 1959 г. я перешел на работу в научный отдел ЛВЭ, в сектор пропановых пузырьковых камер.

Научным руководителем сектора был В. И. Векслер, начальником сектора — профессор Ван Ганчан (фото 2), а его заместителем — М. И. Соловьев.

В отличие от других лабораторий, где с самого начала только что окончившие вузы молодые специалисты попадали под опеку уже опытных наставников, в ЛВЭ ситуация была совсем иная. Молодые специалисты, пришедшие в ЛВЭ, начинали свою научную деятельность в одиночестве: они фактически должны были самостоятельно постигать «азы науки» и «вариться в собственном соку».

Если мне не изменяет память, то к началу 1955 г. в научном отделе лаборатории было всего лишь три сотрудника с ученой степенью: В. И. Векслер, М. А. Марков и

И. В. Чувило. Только к середине 1956 г. к ним присоединились кандидаты наук К. Д. Толстов, М. И. Подгорецкий и А. Л. Любимов, которых В. И. Векслер тоже причислял к молодежи.

Именно в это время многие коллеги В. И. Векслера в Москве часто говорили ему, что он делает ошибку, набирая в лабораторию только молодежь. Однако Владимир Иосифович уверенно отвечал им: «Возможно, вы и правы, но я думаю, что молодежь меня не подведет. Она еще себя покажет!»[1].

С каждым новым годом существования Лаборатории высоких энергий Владимир Иосифович Векслер все больше и больше радовался успехам ее коллектива и той широкой международной известности, которой она стала пользоваться среди других научных центров мира. И уже к десятилетнему юбилею Лаборатории высоких энергий ему стало ясно, что он был прав, делая ставку на молодежь.

В городской газете Дубны, в связи с 10-летием лаборатории, Владимир Иосифович писал [2] следующее: «Несмотря на очень короткий для научного учреждения срок, Лаборатория высоких энергий быстро стала пользоваться международной известностью. . . Отрадным является тот факт, что практически все указанные достижения связаны с именами совсем молодых ученых, пришедших в лабораторию из университетов, учебных институтов нашей страны и братских социалистических стран за последние 5–6 лет. (. . .) Обширные и тщательные исследования (. . .) показывают, что научный отдел лаборатории превратился в настоящую кузницу научных кадров, способных самостоятельно прокладывать новые пути в таком трудном разделе современной физики, как физика элементарных частиц и высоких энергий. . .»

Он был особенно рад этому, так как хорошо знал — как, с кого и с чего все начиналось при создании лаборатории.

В научных группах ЛВЭ подготовка к экспериментам на синхрофазотроне шла полным ходом еще до успешного запуска синхрофазотрона на проектную энергию.

И когда этот день наступил, первыми, кто был готов к работе на ускоренном до рекордных энергий пучке протонов, оказались группы, работающие с ядерными фотоэмульсиями. Именно представители этих групп принесли В. И. Векслеру еще не просохший от проявления фотоснимок с первым изображением «звезды», воспроизводящей столкновение 10-ГэВ протона с ядром фотоэмульсии, и увидели искреннюю радость и счастливую улыбку на лице основателя и первого директора Лаборатории высоких энергий.

Так начиналась, наполненная разными событиями, работа физиков на синхрофазотроне по накоплению уникальной научной информации в области энергий, где еще никто и никогда не работал.

## 1. ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ЛВЭ НА СИНХРОФАЗОТРОНЕ

На синхрофазотроне были начаты первые исследования в следующих основных направлениях физики высоких энергий:

- изучение бинарных реакций (структура нуклона),
- изучение механизма множественного образования частиц и их распада,
- изучение электромагнитных взаимодействий частиц.

Для проведения экспериментов в этих направлениях исследований в ЛВЭ было предложено, разработано и создано большое количество разнообразной аппаратуры для экспериментальных установок. Так как в то время в Советском Союзе не было еще опыта проведения экспериментов на таком крупнейшем в мире ускорителе, каким являлся синхрофазотрон, то многое из этой аппаратуры изготавливалось впервые в СССР.

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, исследованию и изготовлению пластиковых сцинтилляторов (фото 3); а в криогенном отделе под руководством Л. Б. Голованова разрабатываются жидководородные мишени разного размера.

**1.1. 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 и других частиц с нуклонами.

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). Первые руководители этих экспериментов: К. Д. Толстов, А. Л. Любимов и М. И. Подгорецкий.

Эти исследования были инициированы классическими работами 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.

Успеху исследований в этих направлениях значительная роль принадлежит новой оригинальной методике, предложенной и реализованной молодыми физиками ЛВЭ в первых экспериментах на синхрофазотроне.

*Изучение процессов упругого рассеяния на малые углы.* Прежде всего это относится к разработанному в лаборатории новому методу облучения пучком ускоренных протонов ядерных фотоэмульсий (К. Д. Толстов и Э. Н. Цыганов (фото 4)) в направлении, перпендикулярном их поверхности, что позволило изучать процессы упругого рассеяния на очень малые (до  $2^\circ$  в с. ц. м.) углы. Благодаря этому методу удалось впервые исследовать упругое рассеяние протонов на протонах на малые 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 впервые 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 ЛВЭ, возглавляемой В. А. Свиридовым (фото 5) и В. А. Никитиным (фото 6), был также предложен новый метод изучения этого процесса, обеспечивший на многие годы лидирующее положение физиков ОИЯИ в этом направлении исследова-

ний. С помощью этого метода были выполнены первые эксперименты на крупнейших ускорителях мира: синхрофазотроне ОИЯИ (Дубна) и протонных синхротронах ИФВЭ (Протвино) и FNAL (Батавия, США) [3].

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

С помощью новой методики в пионерских опытах на синхрофазотроне физики ЛВЭ впервые наблюдали интерференцию кулоновского и ядерного рассеяния.

В эксперименте была также впервые обнаружена значительная по величине вещественная часть амплитуды упругого рассеяния при энергиях выше 1 ГэВ. Эти данные серьезно поколебали распространенное тогда мнение о чисто мнимой амплитуде упругого рассеяния при высоких энергиях.

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 рассеяния частиц на ядрах (без развала или возбуждения ядер).

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.

Наиболее значимые результаты этого цикла работ в 1981 г. были зарегистрированы как открытие.

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 (фото 7).

Получению новых физических результатов в этой серии опытов способствовало осуществление оригинального методического предложения по использованию 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 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 г. 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 ЛВЭ 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 (фото 8). 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!

*Измерение упругого рассеяния странных частиц.* Исследования упругого рассеяния лямбда-гиперонов на протонах в области высоких импульсов были начаты группой пропановой пузырьковой камеры (Е. Н. Кладницкая (фото 9) и В. Пенев).

Результаты первых измерений для лямбда-гиперонов со средним импульсом 2,7 ГэВ/с установили, что процесс их упругого рассеяния на протоне описывается с помощью модели обмена омега-мезоном, а величина сечения равняется  $(15 \pm 4)$  мб.

Впоследствии исследования упругого рассеяния странных частиц стали регулярными на всех ускорителях высоких энергий.

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 «ядра» 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 ЛВЭ, возглавляемой М. Н. Хачатуряном (фото 10), 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 сечения 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.



Фото 1. Группа молодых специалистов, окончивших физический факультет МГУ и приехавших на работу в ЭФЛАН 1 февраля 1955 г. Верхний ряд (слева направо): Е. С. Соколова, А. А. Кузнецов, Р. А. Асанов, А. Г. Заставенко, Э. Г. Бубелев, В. Г. Гришин, В. Ф. Грушин, М. А. Ганьжин, В. Г. Зинов, С. В. Медведев, С. В. Мухин; нижний ряд (слева направо): И. А. Савин, В. В. Вишняков, И. С. Саитов, С. А. Денисик, Ю. А. Троян, В. В. Глаголев, А. Д. Кириллов, А. А. Номофилов, М. И. Соловьев, Н. А. Митин, Ю. А. Матуленко, В. С. Ставинский



Фото 2. В. И. Векслер (слева) и Ван Ганчан в кабинете В. И. Векслера обсуждают научную программу сектора



Фото 3. Группа химиков  
Лаборатории высоких энергий.  
Верхний ряд (слева направо): М. Г. Костырко,  
М. Ф. Пермякова, А. И. Бородулина,  
В. М. Пономарева, Т. Д. Пилипенко;  
нижний ряд (слева направо): О. Г. Рубина,  
Е. Н. Матвеева, П. Ф. Мякина

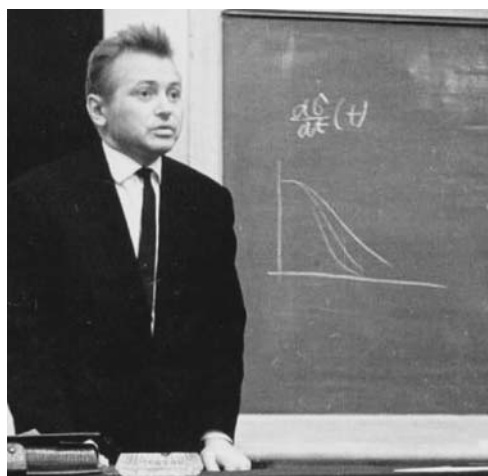


Фото 4. Э. Н. Цыганов. 1962 г.



Фото 5. В. А. Свиридов



Фото 6. В. А. Никитин (крайний справа)  
и Ц. Ву (США)



Фото 7. Слева направо: Ким Хи Ин (КНДР), Л. Н. Струнов, И. В. Чувило, Г. Г. Воробьев  
в ожидании импульса срабатывания камеры Вильсона

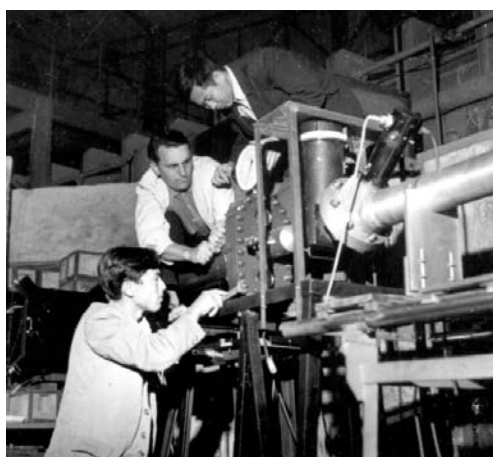


Фото 8. М. Ф. Лихачев (в центре)  
с сотрудниками у спектрометра



Фото 9. Слева направо: Е. Н. Кладницкая  
и К. Гроге (ГДР)





Фото 10. Слева направо: Л. Ождыни (ВНР),  
Хуан Ганихе (КНДР), М. Н. Хачатурян,  
Н. Леонов, В. С. Пантуев на установке  
гамма-спектрометра

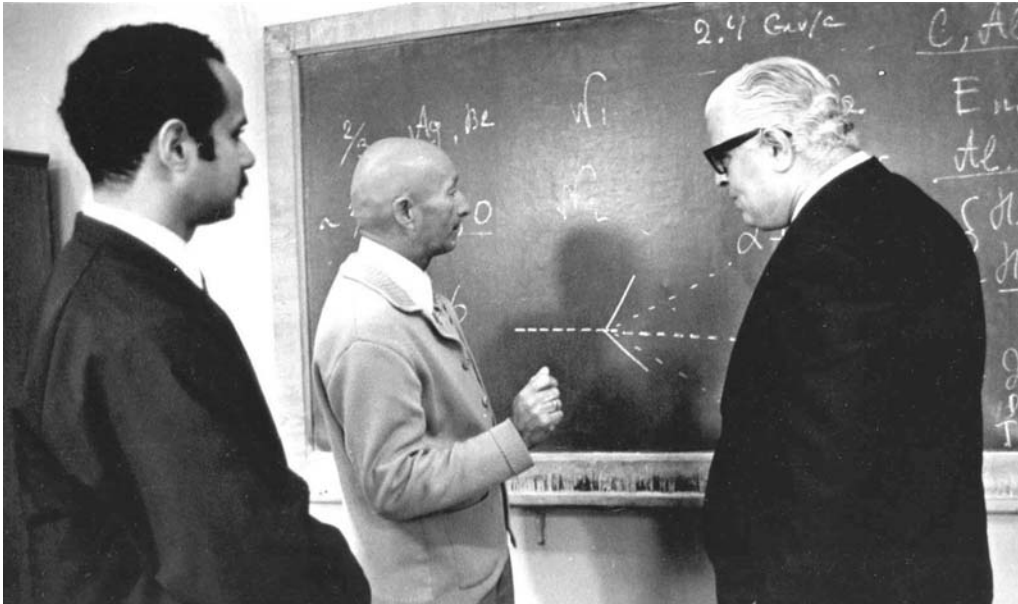


Фото 11. К. Д. Толстов с физиками из Египта  
обсуждает планы совместного научного сотрудничества



Фото 12. Участники группы ядерных фотоэмульсий (слева направо):  
Р. М. Лебедев, И. М. Граменицкий, В. Б. Любимов



Фото 13. Участники группы ядерных фотоэмульсий (слева направо):  
В. Петержилка (ЧССР), В. В. Глаголев, В. А. Беляков



Фото 14. Группа сотрудников сектора 24-л 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. Хофмокль (ПНР), А. А. Кузнецов (СССР), Ван Ганчан (КНР), А. В. Никитин, М. И. Соловьев (СССР), И. Врана (ЧССР), Дин Дацао (КНР), З. Трка (ЧССР). 1959 г.



Фото 15. Группа участников открытия антисигма-минус-гиперона. Верхний ряд (слева направо): А. А. Кузнецов, М. И. Соловьев, А. В. Никитин, Е. Н. Кладницкая, Н. М. Вирасов (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 антисигма-минус-гиперона

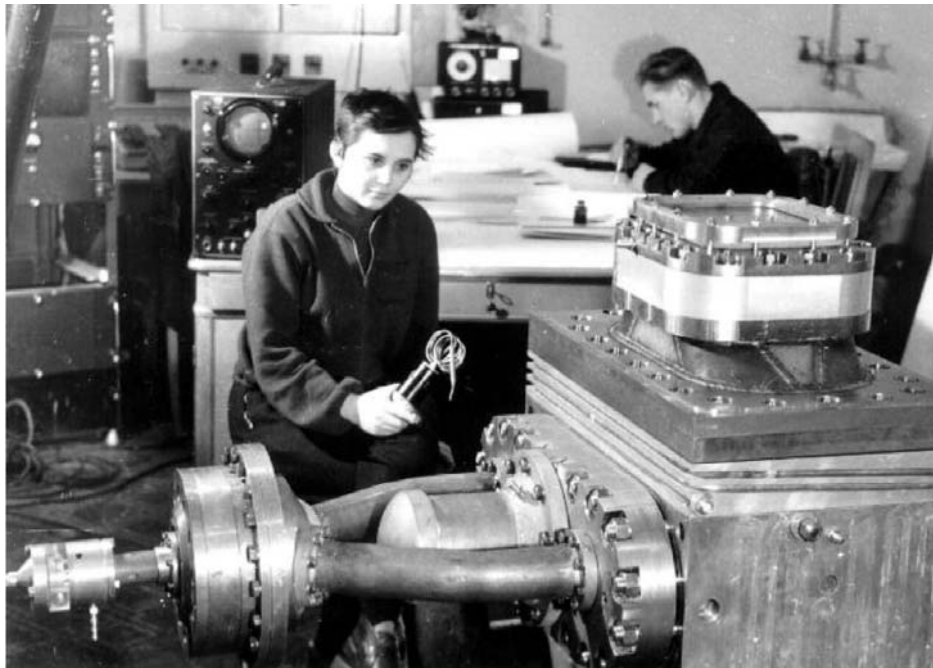


Фото 16. 50-см ксеноновая пузырьковая камера  
на испытательном стенде



Фото 17. Участники международного  
сотрудничества однометровой  
жидководородной пузырьковой камеры.  
Руководители сотрудничества:  
В. В. Глаголев (3-й слева  
в первом ряду) и Р. М. Лебедев  
(6-й слева во втором ряду)



Фото 18. Ю. А. Троян



Фото 19. М. Н. Хачатурян  
у черенковского счетчика. 1964 г.



Фото 20. Группа грузинских физиков из ИФВЭ  
ТГУ (слева направо): Н. С. Амаглобели,  
Г. Л. Варденга, А. Н. Месвершили,  
Л. В. Чхаидзе, Д. М. Котляревский

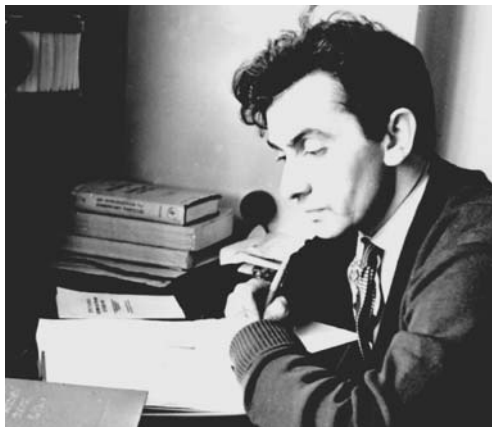


Фото 21. Э. О. Оконов в библиотеке



Фото 22. И. В. Чувило.  
1964 г.

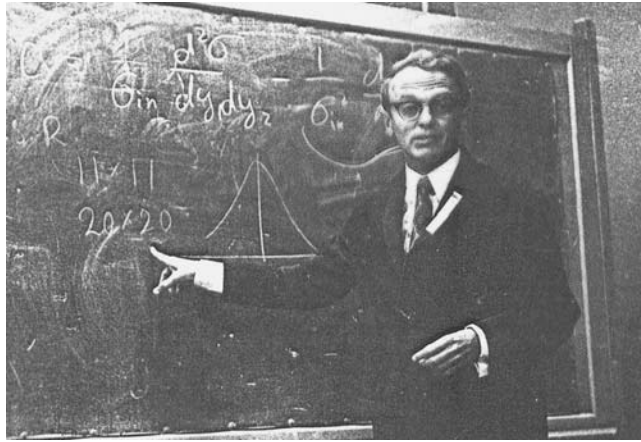


Фото 23. В. Г. Гришин выступает на семинаре ЛВЭ



Фото 24. В. А. Никитин и А. А. Кукушкин возле  
устройства ввода внутренней мишени  
в ускорителе ИФВЭ

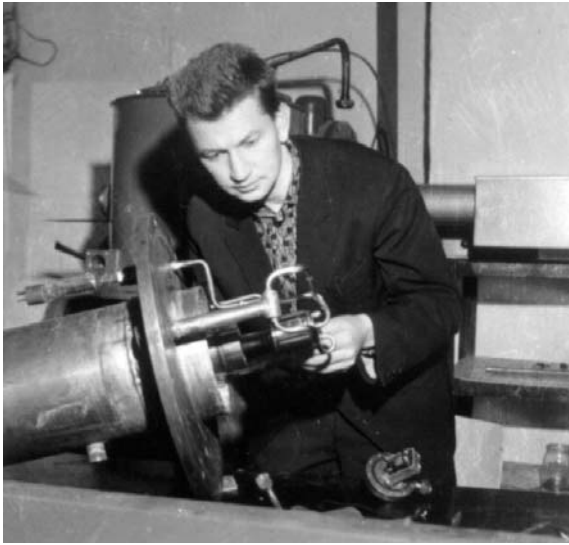


Фото 25. Ю. К. Пилипенко  
в криогенном отделе

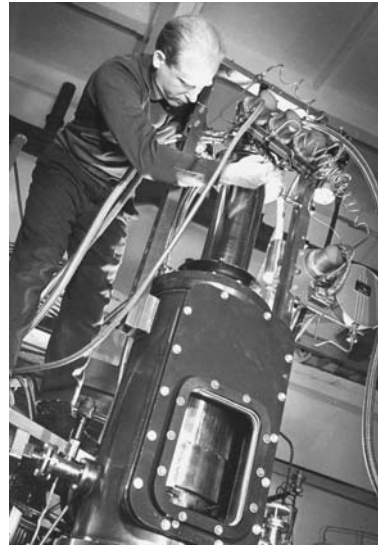


Фото 26. Инженер криогенного  
отдела В. В. Смелянский  
готовит струйную газовую  
водородную мишень  
к работе на ускорителе ИФВЭ



Фото 27. Участники международного сотрудничества двухметровой пропановой  
пузырьковой камеры. Руководители сотрудничества: В. Г. Гришин (1-й справа  
во втором ряду) и М. И. Соловьев (1-й справа в первом ряду)



Фото 28. Г. И. Копылов

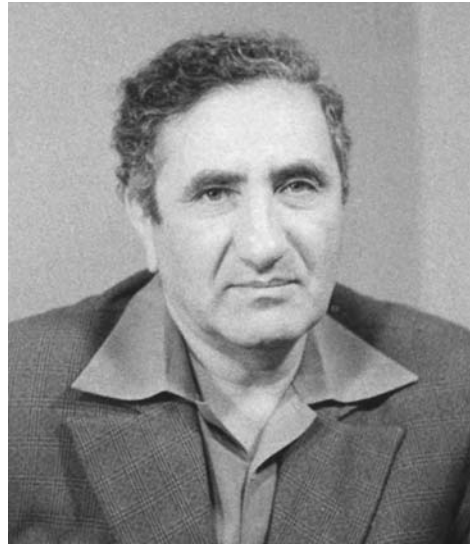


Фото 29. М. И. Подгорецкий



Фото 30. Н. М. Вирясов



Фото 31. Слева направо: А. Прокеш (ЧССР) и И. М. Граменицкий за просмотром стереофотографий, полученных на двухметровой жидководородной пузырьковой камере



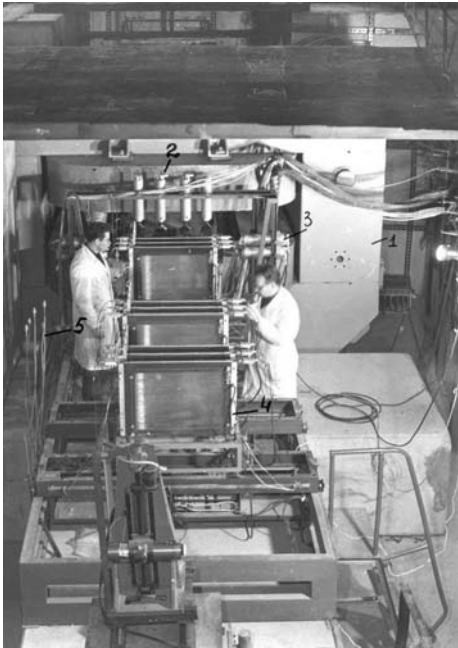


Фото 32. Справа налево: И. А. Савин и В. Г. Кривохижин у бесфильмового іскрового спектрометра (БИС-1) в ІФВЭ



Фото 33. В дирекції ЛВЭ (слева направо): А. М. Балдин, Э. Н. Цыганов, Д. Дрикки (США) и А. А. Кузнецов обсуждают вопросы проведения совместного эксперимента на ускорителе в ИФВЭ



Фото 34. Председатель ГКАЭ СССР А. М. Петросянц (в центре) с советскими участниками эксперимента NA-4 в ЦЕРН

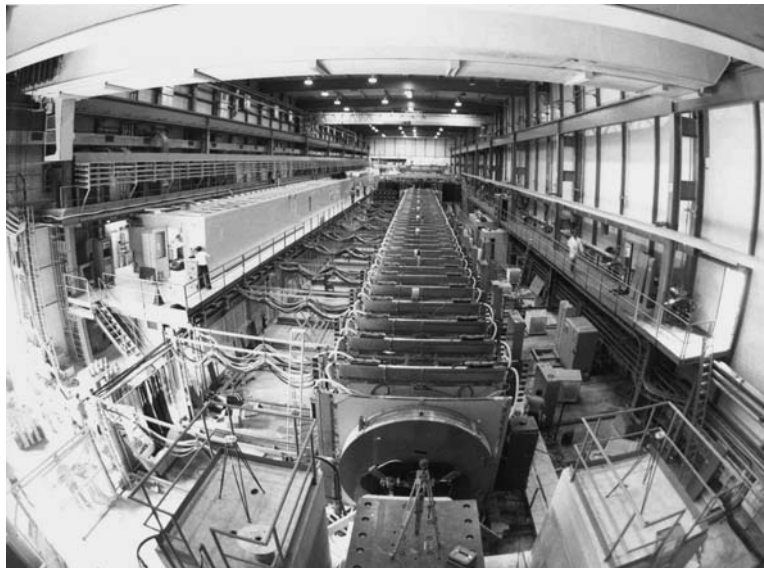


Фото 35. Общий вид сверху на установку NA-4 в ЦЕРН



Фото 36. 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–FNAL эксперимента в Батавии (США). Дубна, июль 1975 г.



Фото 37. Участники первой совместной советско-американской группы эксперимента № 36 в FNAL (Батавия, США). Сидят (слева направо): Д. Гросс (США), Б. А. Морозов (СССР), А. Мелиссинос (США), В. В. Попов (СССР), В. Д. Бартнев (СССР), В. А. Никитин (СССР); стоят (слева направо): Р. Ямада (США), С. Олсен (США), Л. С. Золин (СССР), Э. Маламуд (США), Ю. К. Пилипенко (СССР), А. А. Кузнецов (СССР), Р. Карргин (США), Р. Кул (США), К. Гулянос (США). Март 1972 г.



Фото 38. Д. Дрикки (США), М. Турала (ПНР), Э. Н. Цыганов во время подготовки спектрометра к рабочему сеансу на ускорителе ИФВЭ

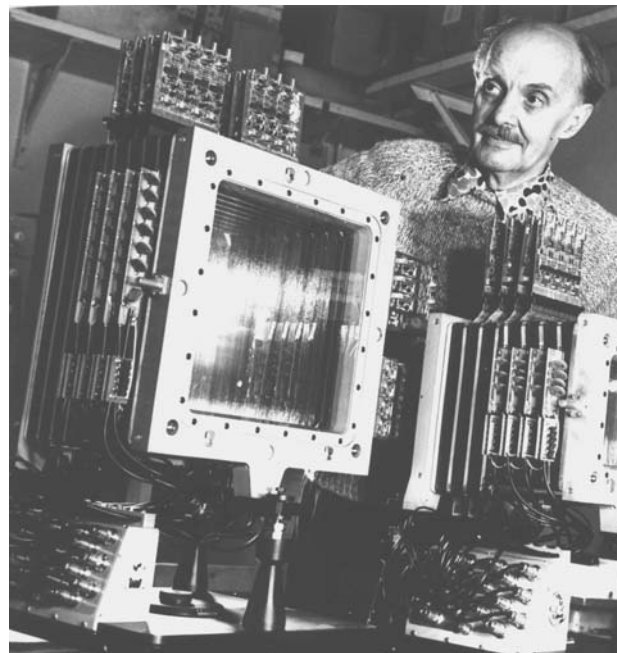


Фото 39. В. П. Пугачевич за сборкой дрейфовых камер. 1975 г.



Фото 40. В. И. Векслер



Фото 41. А. М. Балдин

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.

**1.2. Изучение механизма множественного образования частиц и их распада.** Изучение свойств элементарных частиц и их 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 вовлекать 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 (фото 11) и М. И. Подгорецким (фото 29), 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.

Приводимые фотографии (фото 12, 13) представляют некоторых из ведущих участников этих групп.

В частности, в случае протон-протонных взаимодействий было установлено, что в процессах с множественностью пионов от 1 до 4 распределение нуклонов в с.ц.м. резко анизотропно, причем в протон-протонных взаимодействиях максимумы соответствуют направлению первоначального движения нуклонов (так называемые «рога Грамшицкого»).

С ростом множественности пионов анизотропия несколько уменьшается, а при увеличении множественности до 8 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-нуклонных взаимодействий, соответствующих разным степеням неупругости процессов.

*Камерная методика.* Почти одновременно с успешным запуском синхрофазотрона в ЛВЭ было завершено изготовление 24-л пропановой пузырьковой камеры, сыгравшей в последующие годы чрезвычайно большую роль в становлении и развитии международного научно-технического сотрудничества ученых стран-участниц ОИЯИ и других стран.

Наибольшую часть сотрудников сектора 24-л пропановой пузырьковой камеры можно видеть на снимке, сделанном в 1959 г. (фото 14).

С помощью этой пузырьковой камеры, облученной в пучке отрицательных пионов с импульсом до 8 ГэВ/с, на международной конференции по физике высоких энергий в Киеве (1959 г., т.е. через два года после запуска синхрофазотрона!) уже были представлены первые результаты по исследованию рождения странных частиц в пион-нуклонных взаимодействиях при высоких (выше 1 ГэВ) энергиях.

В частности, на этой конференции впервые сообщалось об обнаружении выполнения общеизвестного сейчас закона сохранения инерции барионного заряда, а также были сообщены 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 сообщалось 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 [4]. Большинство участников открытия антисигма-минус-гиперона можно видеть на фото 15, смонтированном из нескольких самостоятельных снимков.

А еще через год на такой же конференции в ЦЕРН 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, распадавшегося на два короткоживущих нейтральных каона. Этот резонанс включен в таблицы мировых данных о частицах со ссылкой на первую работу группы 24-л пропановой пузырьковой камеры ЛВЭ.

Роль сложного ядра в механизме рождения странных частиц изучалась с помощью 50-см ксеноновой пузырьковой камеры (фото 16), 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 (фото 22) и З. Стругальского.

Сравнение измеренных этой группой 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 однометровой жидководородной пузырьковой камеры. На мой взгляд, эта пузырьковая камера по конструкции и техническим характеристикам является одной из самых красивых пузырьковых камер в ОИЯИ! При конструировании и создании ее было найдено много оригинальных и изящных решений, и в этом несомненная заслуга коллектива инженеров-криогенистов, 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 He-3, He-4, O-16.

Большой международной коллаборацией (сотрудничеством) под руководством Р. М. Лебедева и В. В. Глаголева (фото 17) на основе материалов с камеры опубликовано более 150 научных работ. Большая часть из них посвящена релятивистской ядерной физике.

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 тыс. 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 однометровой водородной и частично с 24-л пропановой пузырьковых камер, облученных на синхрофазотроне пучками монохроматических ней-

тронов, группой физиков ЛВЭ под руководством Ю. А. Трояна были 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 (фото 18).

Этой же группой физиков при анализе фотографий нейтрон-протонных взаимодействий при импульсе монохроматических нейтронов  $5,2$  ГэВ/с было установлено 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  $757$  МэВ/с<sup>2</sup> внесен в 2000 г. в таблицы мировых данных об элементарных частицах [5].

Существование таких мезонов как квантов скалярного поля принципиально важно для теории.

Таким образом, за несколько лет работы, при использовании методики фотоэмульсий и пузырьковых камер, в результате постановки всех перечисленных опытов обнаружено много неизвестных ранее физических явлений и показана существенная роль периферических взаимодействий и ограниченность применения статистических методов для описания процессов генерации частиц при энергии до  $10$  ГэВ.

**1.3. Изучение электромагнитных взаимодействий частиц.** В ЛВЭ группой физиков под руководством М. Н. Хачатуряна (фото 19) с помощью электронной установки «Фотон» (двухплечевой 90-канальный черенковский масс-спектрометр) был проведен большой цикл исследований по поискам новых электромагнитных распадов резонансов, а в 1964 г. 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 привели к обнаружению явления прямого перехода «фотон–вещество». Это явление в 1971 г. было зарегистрировано как открытие.

На синхрофазотроне, используя быстродействующую камеру Вильсона, группа физиков ЛВЭ (рук. Э. О. Оконов (фото 21)), ЛЯП и ИФВЭ ТГУ (фото 20) 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  $CPT$ -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-см ксеноновой пузырьковой камеры, группа физиков ЛВЭ, возглавляемая З. Стругальским (совместно с физиками ИТЭФ), впервые надежно определила величину 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  $\gamma$ -квантов по суммарному пробегу электронов и позитронов в образованных  $\gamma$ -квантами ливнях. Используя этот метод, оказалось возможным в системе из нескольких  $\gamma$ -квантов надежно выделить все  $\gamma$ -кванты, возникшие от распада нейтрального пиона.



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

Группой физиков ЛВЭ под руководством И. В. Чувило (фото 22) и Э. М. Мальцева на этом же материале изучались свойства трехчастичных распадов положительных каонов. Ими было установлено, что эти свойства соответствуют векторному варианту универсальной четырехфермионной теории слабого взаимодействия.

В ЛВЭ эксперименты по изучению рассеяния частиц на электронах были впервые начаты В. Г. Гришиным (фото 23) и Э. Кистеневым с помощью 24-л пропановой пузырьковой камеры, облученной отрицательными пионами с импульсом 4 ГэВ/с.

Результаты эксперимента показали, 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 FNAL (Батавия).

## 2. ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ЛВЭ НА УСКОРИТЕЛЕ ИФВЭ

В октябре 1967 г. 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 (и впоследствии В. А. Никитиным (фото 24)), была проведена существенная модернизация экспериментальной установки: фотоэмульсии были заменены на полупроводниковые детекторы, а тонкая пленочная мишень — на струйную газовую водородную мишень (фото 26), созданную в ЛВЭ группой специалистов под руководством Ю. К. Пилипенко (фото 25).

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 в области до 70 ГэВ обнаружена энергетическая зависимость дифракционного конуса рассеяния протонов на протонах, что указывало на несоответствие простой дифракционной модели природе взаимодействия частиц; а также 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 получены новые важные сведения о распределении ядерной материи в дейтроне.

Совокупность этих результатов в 1981 г. была зарегистрирована в качестве открытия.

Большим международным коллективом ученых (фото 27), 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 большом цикле работ А. М. Балдина, В. Г. Гришина, Л. А. Диденко и А. А. Кузнецова по поиску и изучению свойств сильновозбужденной 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, предложенная А. М. Балдиным, и установлено существование барионных кластеров и адронных струй в этом пространстве, а также показано, что их свойства универсальны (т. е. они не зависят ни от энергии взаимодействия, ни от типа фрагментирующей системы) и представляют собой наиболее достижимые в релятивистских ядерных взаимодействиях возбуждения ядерной материи [6].

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

По методу, разработанному в ЛВЭ Г. И. Копыловым (фото 28) и М. И. Подгорецким (фото 29), 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 (фото 30), при изучении свойств антипротон-протонных взаимодействий при импульсе 22,4 ГэВ/с группой физиков ЛВЭ, руководимой И. М. Граменицким (фото 31), были измерены топологические сечения и инклюзивные спектры вторичных частиц в этих взаимодействиях, детально изучены интерференционные эффекты идентичных пионов и определена их область испускания.

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

Используя трекоувствительную жидкодейтериевую мишень внутри рабочего объема камеры, они также измерили свойства топологических сечений и характеристик инклюзивных спектров частиц в никем еще не наблюдавшихся антидейтрон-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 (так называемая теорема Померанчука) проводилась на ускорителе ИФВЭ под руководством И. А. Савина (фото 32) (и впоследствии М. Ф. Лихачева).

Эксперимент выполнялся с помощью бесфильмового искрового спектрометра (БИС) на линии с ЭВМ. В качестве мишени-регенератора использовались трехметровые жид-

ководородная 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 были изучены также некоторые свойства распада нейтральных каонов, которые позволили выяснить многие вопросы теории слабых взаимодействий.

Эти результаты вошли в мировой банк данных.

Началом долговременного советско-американского сотрудничества в области физики высоких энергий явились первые эксперименты по изучению структуры пионов в опытах по упругому пион-электронному рассеянию при энергии 50 ГэВ, поставленные на ускорителе ИФВЭ (фото 33) группами физиков ЛВЭ и Калифорнийского университета (Лос-Анджелес, США) под руководством Э. Н. Цыганова и Д. Дрикки соответственно.

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

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

### 3. ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ЛВЭ НА УСКОРИТЕЛЕ ЦЕРН

Группой физиков и специалистов ЛВЭ под руководством И. А. Савина и И. А. Голувина (фото 34) в сотрудничестве с учеными других лабораторий ОИЯИ и ЦЕРН была создана установка NA-4 (фото 35) для поиска новых частиц и изучения глубоконеупругого рассеяния мюонов на мишенях из водорода, дейтерия и углерода в области максимально возможных энергий и переданных четырехимпульсов.

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

Анализ полученных в эксперименте данных позволил проверить впервые правильность предсказаний теории основных взаимодействий между частицами в области энергий и переданных импульсов, максимально возможных на ускорителях того времени. В

частности, в эксперименте NA-4 была проведена проверка КХД, а именно законов эволюции структурных функций от переданного четырехимпульса в области значений от 8 до 260 ГэВ<sup>2</sup>, и исследована электрослабая  $\gamma$ - $Z$ -интерференция, результаты изучения которой указывали на существование  $Z$ -бозона за три года до прямого открытия этого переносчика слабого взаимодействия группой UA-1 в 1984 г.

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

Сейчас изучение кварковых степеней свободы в ядрах — весьма актуальная область исследований, реализацией которых заняты многие группы физиков на всех крупнейших ускорительных комплексах мира. Эта новое научное направление ядерной физики называется «релятивистская ядерная физика», и место ее рождения — Лаборатория высоких энергий ОИЯИ!

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ЛВЭ НА УСКОРИТЕЛЕ FNAL

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 А. А. Кузнецова, В. А. Никитина, С. В. Мухина, В. А. Матвеева и В. Г. Кадышевского провести первые совместные эксперименты на вновь созданном в то время крупнейшем в мире ускорителе FNAL (Батавия, США). Огромная заслуга в организации этого сотрудничества и успешном проведении этого цикла экспериментов принадлежит ГКАЭ СССР, дирекции ОИЯИ (фото 36), а также дирекции FNAL.

В совместных советско-американских экспериментах (фото 37), начиная с марта 1972 г., была детально изучена закономерность поведения вещественной части амплитуды упругого рассеяния протонов и дифракционного конуса в широком интервале энергий (от 8 до 400 ГэВ); а также установлены неизвестные ранее свойства дифракционной диссоциации протонов на протонах и легких ядрах [7].

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 рассеяния на одном нуклоне.

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

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

В 1983 г. цикл работ «Дифракционное рассеяние протонов при высоких энергиях» был удостоен Государственной премии СССР.

В 1975 г. группой физиков ОИЯИ и Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе под руководством Э. Н. Цыганова и Д. Дрикки (фото 38) были совместно предложены и осуществлены на ускорителе FNAL эксперименты по измерению электромагнитных формфакторов пиона и каона в упругом пион-электронном и каон-электронном рассеянии при энергии 100 и 250 ГэВ. Поскольку требовалось 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 изготовлены В. П. Пугачевичем (фото 39).

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 FNAL 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 электроне 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.

## 5. ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Из сказанного выше следует, что уже в первых экспериментах на крупнейших ускорителях мира научно-техническому коллективу специалистов Лаборатории высоких энергий ОИЯИ 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, внесла заметный вклад в развитие теории сильных взаимодействий и создание современной теории атомного ядра (фото 40).

Успех ЛВЭ в получении новых важных физических результатов в первых 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 вследствие широкого использования в экспериментах новейших достижений техники, микроэлектроники и ЭВМ (фото 41).

Выполнение коллективом Лаборатории высоких энергий экспериментальной программы в этих фундаментальных направлениях теории весьма успешно продолжается и в настоящее время!

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов А. А. Молодежь меня не подведет, она еще себя покажет! // Дубна: Наука. Содружество. Прогресс. №11(3599). 7 марта 2002 г.;  
Кузнецов А. А. Открытие антисигма-минус-гиперона // Дубна: Наука. Содружество. Прогресс. № № 31(3669); 32(3670); 33(3671). 8, 15, 22 авг. 2003 г.
2. Векслер В. И. Славное десятилетие // За коммунизм. Дубна. 21 марта 1963 г.

3. *Bartenev V. D. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1973. V. 31. P. 1367; Yad. Fiz. 1976. V. 23. P. 759; 1972. V. 15. P. 1174;  
*Bezdogikh G. G.* // Nucl. Phys. B. 1973. V. 54. P. 97;  
*Zolin L. S.* // Yad. Fiz. 1973. V. 18. P. 55.
4. *Ван Ганчан и др.* Рождение  $\Sigma^-$ -гиперона отрицательными  $\pi$ -мезонами с импульсом 8,3 ГэВ/с // ЖЭТФ. 1960. Т. 38, вып. 4. С. 1356–1359.
5. *Troyan Yu. A. et al.* Resonances in the system of  $\pi^+\pi^-$ -mesons from  $np \rightarrow np\pi^+\pi^-$  reaction at  $P_n = 5.20$  GeV/c: search, results of direct observations, interpretation. JINR Preprint E1-2002-214. Dubna, 2002. 7 p.
6. *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.
7. *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.