

ОТ ПЕРВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ К ФИЗИКЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР

П. И. Зарубин

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна
Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

Исследования космических лучей в Физическом институте АН СССР привели к созданию синхрофазотрона ОИЯИ. С этой целью в 1953 г. была основана Электрофизическая лаборатория АН СССР, вошедшая в состав ОИЯИ в 1956 г. как Лаборатория высоких энергий. Представлены начальные вехи развития экспериментов в лаборатории на синхрофазотроне. Отмечены лидеры и ключевые участники экспериментов, а также уроки и результаты, актуальные в наши дни.

Research of cosmic rays at the Physical Institute of the USSR Academy of Sciences resulted in the construction of the JINR Synchrophasotron. For this purpose, the electrophysical Laboratory of the USSR Academy of Sciences was founded in 1953, which became part of JINR in 1956 as the laboratory of High Energy Physics. The initial milestones to develop experiments at the Laboratory on the Synchrophasotron are presented. Leaders and key participants of the experiments are highlighted, as well as the lessons and results relevant today.

PACS: 29.20.-c; 29.20.D-; 25.75.Dw

Ускорители частиц высоких энергий иногда образно называют пирамидами XX века. Эти крупнейшие инструменты познания микромира заслуживают такой высокой оценки не только за свои впечатляющие размеры, но и за значительный импульс, который дало их создание коллективному творчеству в науке и технике. Наша эпоха имеет шанс войти в историю человечества как «культурный слой строителей синхротронов». В основе долголетия установок этого класса лежит возможность их качественного совершенствования по мере углубления проводимых на них фундаментальных исследований и развития прикладных разработок.

В 2023 г. Лаборатория физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ отметила 70-летие своего основания. Несколько поколений ее сотрудников и коллег в странах-участницах ОИЯИ пройден славный и полный драматизма путь. Его этапами стали первые эксперименты на синхрофазотроне по физике частиц, становление исследований по релятивистской ядерной и поляризованной физике, создание специализированного синхротрона на основе сверхпроводимости — нуклотрона. С начала 1970-х гг. получили развитие эксперименты на передовых границах физики элементарных частиц в Институте физи-

ки высоких энергий (СССР), Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (США) и Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН).

Долгосрочную перспективу в ЛФВЭ открывает реализация мегапроекта NICA для исследований кварк-глюонных степеней свободы ядерной материи на выведенных и встречных пучках тяжелых релятивистских ядер и поляризованных протонов с энергией несколько ГэВ/нуклон. Поэтапное развитие проекта расширяет возможности экспериментов по ядерной физике и радиационной биологии, а также в смежных прикладных областях. Важным этапом проекта NICA в 2023 г. стало ускорение ядер ксенона до 3,8 ГэВ/нуклон. К настоящему времени ускорительный каскад включает в себя электронно-лучевой источник, новый линейный ускоритель тяжелых ионов NICA, новый бустер на основе сверхпроводимости и нуклотрон с системами вывода пучка для экспериментов ЛФВЭ. Столь масштабное развитие вряд ли было бы возможно без материального и интеллектуального капитала, накопленного за предыдущие десятилетия. Этот капитал включает приоритетные физические результаты, полученные на развивавшейся ускорительной и экспериментальной базе. В его фундаменте лежат достижения в области физики космических лучей советского периода.

За организационное «начало отсчета» ЛФВЭ принимается образование в 1953 г. Электрофизической лаборатории Академии наук СССР (ЭФЛАН) на правах института в составе Отделения физико-математических наук для проведения исследований в области физики высоких энергий на строящемся синхрофазотроне. ЭФЛАН возглавил В. И. Векслер — признанный лидер в исследованиях космических лучей в 1930–1940-е гг., а также руководитель строительства первых синхротронов на основе открытого им принципа автофазировки. В 1956 г. ЭФЛАН вошла в ОИЯИ как лаборатория с наименованием Лаборатория высоких энергий (ЛВЭ). ЭФЛАН заменила собой ТДС — техническую дирекцию строительства, куда принимались будущие сотрудники ЛФВЭ. При объединении ЛВЭ с Лабораторией физики частиц в 2008 г. вернулось полное наименование — ЛФВЭ.

Одним из ключевых моментов в возникновении физики высоких энергий стало наблюдение в 1927 г. Д. В. Скобельцыным следов частиц с импульсами выше 20 МэВ/с в камере Вильсона, помещенной в магнит, указавшее на корпускулярную природу космической радиации. Исследование космических лучей продолжилось под руководством Д. В. Скобельцына в Лаборатории атомного ядра в Физическом институте Академии наук СССР [1]. Для решения фундаментальных проблем требовались новые методы детектирования. Для изучения природы космических лучей в состав комплексной экспедиции АН СССР на Эльбрусе был привлечен В. И. Векслер, ставший признанным специалистом по счетчикам Гейгера. В 1937 г. Н. А. Добротин [2] отмечал следующее: «В. И. Векслер доложил нам о применении к изучению космиче-

ских лучей разработанной им оригинальной методики. Она состоит в использовании для счета частиц газовых пропорциональных усилителей, работающих по схеме совпадений. Это дает возможность определять не только число частиц, прошедших через эти счетчики, но и измерять создаваемую ими ионизацию. В. И. Векслер работал с такой установкой летом этого года во время экспедиции на Эльбрус. При этом оказалось, что на высоте 4200 м над уровнем моря имеются легко поглощаемые и сильно ионизируемые частицы. На уровне же моря число таких частиц заметно меньше, чем на высоте Эльбруса. Число их настолько мало, что эти наблюдения не могут быть согласованы с предположением о наличии в космических лучах интенсивной протонной компоненты. Кроме того, В. И. Векслером были получены указания на вторичный характер этих частиц. На существование таких частиц ряд авторов указывал и раньше. Но с такой отчетливостью они были обнаружены впервые. Таким образом, уже первые опыты с пропорциональными газовыми усилителями дали очень ценные результаты. И можно не сомневаться, что дальнейшее применение этой методики позволит достигнуть весьма существенных успехов как при изучении тяжелых частиц, так и ливней».

Исследования космических лучей были продолжены в экспедиции ФИАН на Памире, начавшейся по поручению советского руководства весной 1944 г. «Открытие в ходе Памирской экспедиции электронно-ядерных ливней и выявление ядерно-каскадного процесса позволило вскрыть механизм, представляющий собой начальное звено в цепи космических лучей, развивающихся в атмосфере. Было показано, что электромагнитные каскадные процессы, с которыми до этого связывали сущность широких атмосферных ливней, являются лишь внешним проявлением ядерных взаимодействий, вызываемых частицами высокой энергии, такими как мезоны, протоны, более тяжелые атомы» [3].

Прошли школу Векслера в памирской экспедиции будущие профессора ЛВЭ К. Д. Толстов, А. Л. Любимов, М. И. Подгорецкий, возглавившие первые научные коллективы на синхрофазотроне. Задачи послевоенного восстановления и обороны страны не располагали к академическим тратам в суровой обстановке 1940-х гг. Однако благодаря тому обстоятельству, что невоенный характер этой области был неочевиден на начальном этапе, фундаментальные исследования в этой области получили беспрецедентную поддержку в рамках Атомного проекта СССР. Сама же логика исследования требовала лабораторных условий для целенаправленного изучения рождения частиц, выявления их внутренней структуры, поиска неизвестных частиц и античастиц. Эпохальный принцип автофазировки [4], независимо предложенный В. И. Векслером в 1944 г. и Э. Макмилланом — в 1945 г. в США, решал проблему создания ускорителей в космическом масштабе энергии.

В конце 1940-х гг. под руководством В. И. Векслера были созданы электронные синхротроны: на 30 МэВ для исследований фотоядерных реакций (С-3, «тройка») и на 250 МэВ (С-25) [5, 6]. Диссертация

И. В. Чувило, посвященная образованию нейтронов γ -квантами, стала первой на С-3. На С-25 с помощью ядерной эмульсии «Ильфторд» было открыто рождение π -мезонов γ -квантами (рис. 1) [6]. Тем самым было положено начало физике электромагнитных взаимодействий адронов, образно именовавшейся тогда «ядерными свойствами света». Основными направлениями стало изучение образования заряженных и нейтральных мезонов на нуклонах, поляризуемости (деформируемости) нуклонов в комптоновском рассеянии γ -квантов. В целом эксперименты продемонстрировали возможность описания адронной физики на основе квантовой теории поля.

На С-25 начинали работу молодые физики, занявшие впоследствии лидирующие позиции в научных центрах: М. И. Адамович, А. М. Балдин, А. С. Белоусов, Б. Б. Говорков, В. И. Гольданский, А. Н. Горбунов, Ю. М. Адо, С. П. Денисов, Р. М. Лебедев, М. Ф. Лихачев, В. И. Мороз, А. П. Онучин, Л. Н. Струнов, Е. И. Тамм, И. В. Чувило, Л. Н. Штарков. Почти наверняка этот список не полон. Освоение инжекции и ускорения медленных протонов потребовало создания модельного синхротрона МКМ (руководители В. А. Петухов и Л. П. Зиновьев), на котором

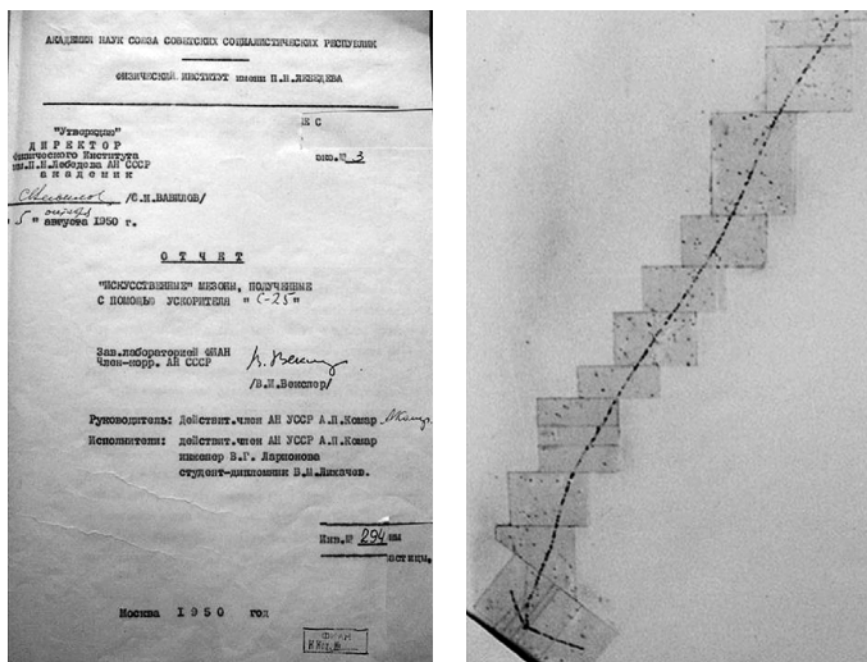


Рис. 1. Титульная страница отчета ФИАН (слева) и извилистый след π^- -мезона, захваченного ядром эмульсии с образованием двух фрагментов (справа) (предоставлено С. П. Харламовым)



Рис. 2. Синхротрон МКМ (ФИАН, 2007 г.)

были ускорены протоны до 160 МэВ (рис.2). Отмечая этот успех, В.И.Векслер заявил, что синхрофазотрон «на Волге» точно заработает. Позже МКМ был переделан в ускоритель электронов С-60 и служил в ФИАН как источник синхротронного излучения до демонтажа в 2000-х гг.

В Лаборатории им. Лоуренса в Беркли (США) под руководством Э.Макмиллана создавался слабофокусирующий синхротрон для ускорения протонов до 6 ГэВ. Благодаря разработкам, которые велись в лабораториях под руководством В.И.Векслера и А.Л.Минца, советским ответом американцам стал запуск синхрофазотрона на энергию протонов 10 ГэВ весной 1957 г. (рис.3 и 4). Физическое обоснование технического проекта разрабатывалось в 1950 г. группой В.И.Векслера, в составе которой были А.М.Балдин, А.А.Коломенский, А.П.Комар, В.В.Михайлов, М.С.Рабинович. Стоит отметить, что, опираясь на свой опыт исследований, «фиановцы» во главе с М.А.Марковым настаивали на электронном варианте, который и реализовался в 1960-х гг. под руководством Е.И.Тамма как С-25Р в отделе физики высоких энергий ФИАН в г.Троицке. В случае синхрофазотрона победила точка зрения физиков, связанных с Лабораторией №2 И.В.Курчатова, выступивших за протонный вариант. Этот выбор определил научную судьбу ЛВЭ спустя 20 лет: возникновение на базе синхрофазотрона релятивистской ядерной физики.



Рис. 3. Здание синхрофазотрона в 1956 г.

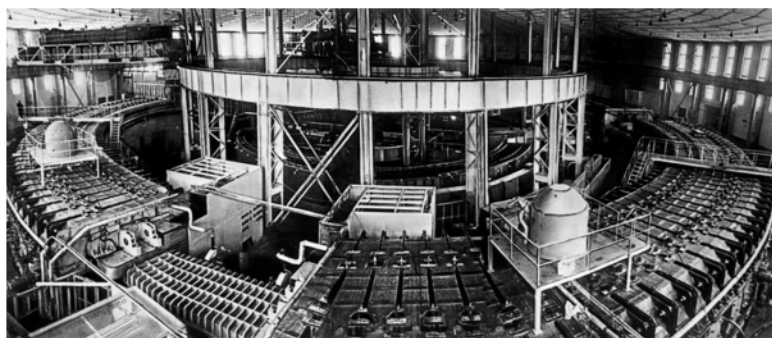


Рис. 4. Внутри здания синхрофазотрона (1957 г.)

Так стартовала эпоха мирного соревнования в физике микромира. Вскоре она позволила создать наукограды и ускорительные центры в СССР, США и Западной Европе, уже открытые для самого широкого международного сотрудничества. Их можно считать общими вехами прогресса человечества за прошедшие десятилетия. Осенью того же года был запущен первый искусственный спутник — «*piccola luna russa*», согласно одному из газетных заголовков за рубежом, как вспоминал А. М. Балдин.

В Москве были освоены технологические и аналитические основы метода ядерной эмульсии в отношении релятивистских частиц, позволившего выполнить основополагающие наблюдения релятивистских частиц в высотных облучениях. На рис. 5 представлена проективная фотография взаимодействия ядра с гигантской энергией в ядерной эмульсии, приведшего к грандиозной множественности вторичных частиц. Следы в струе фрагментов могут быть полностью разрешены. Полнота и достоверность

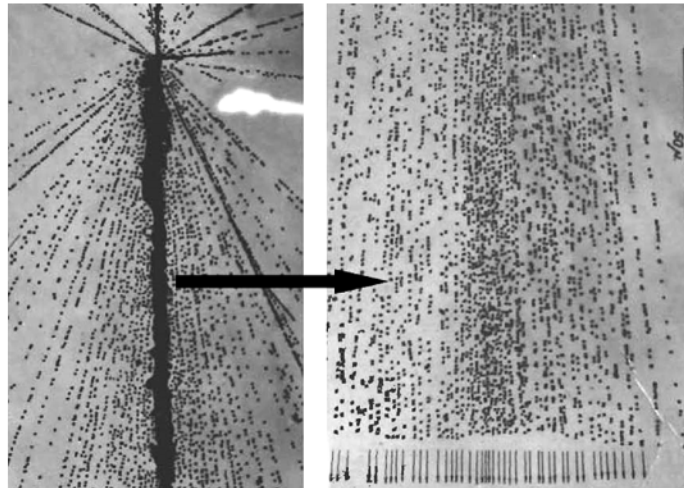


Рис. 5. Макрофотография взаимодействия ядра космического происхождения в ядерной эмульсии (ФИАН, начало 1950-х гг., предоставлено Г. И. Орловой)

наблюдения следов ядерных реакций, уникальное разрешение и гибкость применения этого метода остаются непревзойденными и поныне.

Создание отечественной толстослойной ядерной эмульсии к запуску синхрофазотрона стало отправным пунктом получения первых физических результатов. Стоит напомнить, что это событие вызывало сомнение за рубежом. Так, нобелевский лауреат С. Поуэлл, открывший π -мезон, связал согласие физикам ФИАН на переиздание своего фундаментального труда в СССР с предоставлением фотопластинок, объективно подтверждающих успех ускорителя. Фотографии характерных взаимодействий вошли в русское издание (рис. 6) [7]. Анализ первых облучений позволил дать обзор топологии ядерных звезд и провести угловые измерения выходящих следов [8–10]. До настоящего времени сохраняют уникальность наблюдения полного разрушения ядер мишени и когерентного образования мезонов в событиях, не сопровождающихся следами фрагментации мишени. Облучения стопок эмульсии продолжались в 1960-е гг. в отношении упругого рассеяния как источника информации о структуре протонов.

Открытие распадов странных частиц в ядерной эмульсии, облучавшейся в стратосфере, привело к созданию пузырьковых камер, охватывавших на много порядков большие объемы детектирования в магнитном поле. С уровнем исследований и размахом инноваций в США в этом направлении позволяет ознакомиться нобелевская лекция Л. Альвареса [11]. Решением для ЛВЭ стало создание 40-см пузырьковой камеры на основе сжиженного пропана. Для ее облучения был сформирован внешний пучок π^- -мезонов с импульсом 8,3 ГэВ/с.

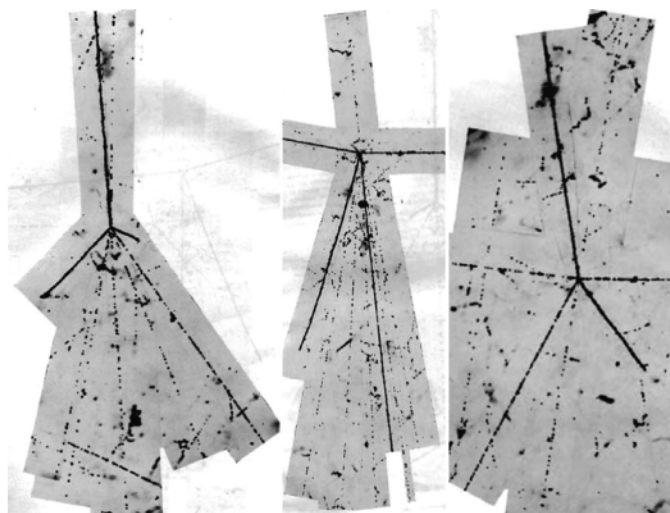


Рис. 6. Взаимодействия протонов, ускоренных на синхрофазотроне, из русского издания [7]

Анализ 40 тыс. фотографических кадров, сделанных на этой камере, оказался исключительно продуктивным (рис. 7–9). Флагманским результатом ЛВЭ стала идентификация в 1960 г. распада, не наблю-

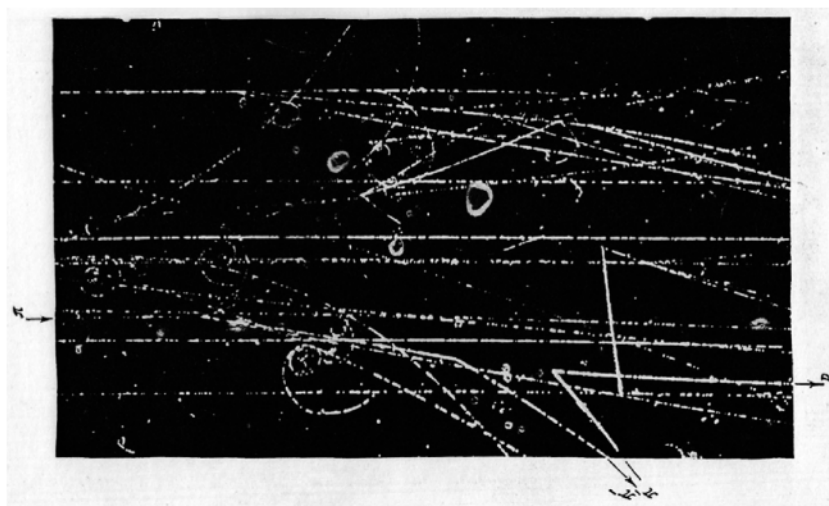


Рис. 7. Образование Ξ^- -гиперона в пузырьковой камере, распадающегося на пару $\Lambda\pi^-$ (предоставлено А. А. Кузнецовым)

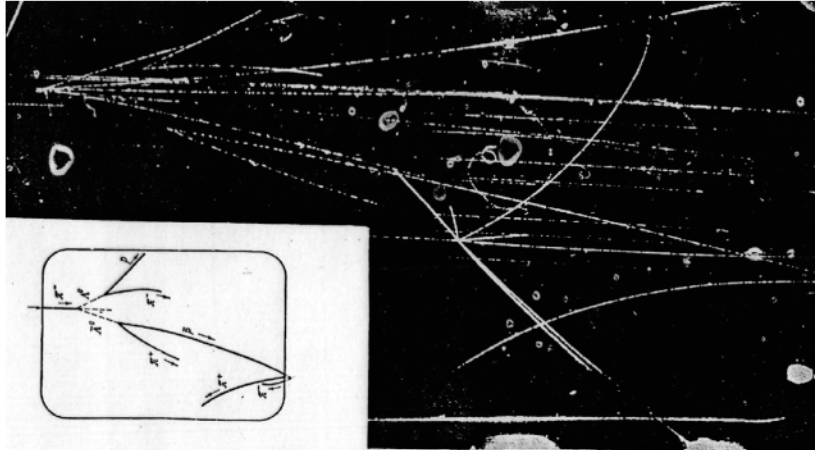


Рис. 8. Редкое событие в пузырьковой камере — образование и распад пары Λ -и анти- Λ -гиперонов (предоставлено А. А. Кузнецовым)

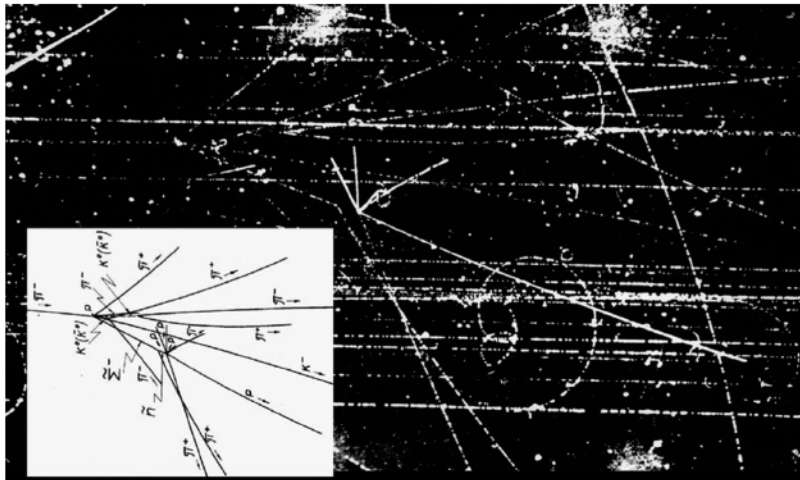


Рис. 9. Образование и распад анти- Σ^- -гиперона на антинейтрон в пузырьковой камере, проявившийся в звезде аннигиляции, и π^+ -мезон (предоставлено А. А. Кузнецовым)

давшегося ранее, анти- Σ^- -гиперона на π^+ -мезон и антинейтрон [12, 13]. Последний проявился в звезде аннигиляции (см. рис. 9). В вершине образования анти- Σ^- -гиперона присутствуют следы K^- и распадов пары K^0 -анти- K^0 -мезонов. (Так много «странности» сразу!) Столь ясно интерпретируемая фотография использовалась как символ физики элементарных частиц в изданиях ОИЯИ. Приятно отметить, что этот канал иден-

тификации был использован недавно в эксперименте ALICE на Большом адронном коллайдере.

Принципиальным фактором успехов стало привлечение В. И. Векслером на синхрофазотрон как проект общегосударственного значения двух групп выпускников физического факультета МГУ. Отвечая скептикам, он настаивал: «Молодежь меня не подведет!». Одна группа представлена в полном составе на фотографии (рис. 10). Среди соавторов первых публикаций встречаем имена молодых ученых: Е. Н. Кладницкой, Л. Н. Струнова, Э. Н. Цыганова, В. А. Белякова, В. А. Никитина, А. В. Никитина. Мировой уровень, на который вышел ОИЯИ, способствовал выбору Дубны в 1964 г. для проведения XII Международной конференции (Рочестерской) по физике высоких энергий.

Для развития физики частиц вплоть до антипротонов в 1965 г. была предложена концепция синхрофазотрона как источника вторичных частиц, генерируемых на его внутренних мишенях [14]. Прежде всего требовался рост на три-четыре порядка интенсивности циркулирующих протонов, что означало создание нового линейного ускорителя для инжекции. Возник проект создания мощной бетонной защиты над кольцом. Затем требовалось создание каналов сепарированных пучков вторичных частиц, включая электростатические сепараторы K -мезонов и антипротонов, которые размещались в пристроенном корпусе 1Б. Нейтронный



Рис. 10. Выпускники одной из двух групп физического факультета МГУ, приглашенные В. И. Векслером: Е. С. Соколова (Кузнецова), А. А. Кузнецов, Р. А. Асанов, Л. Г. Заставенко, Э. Г. Бубелев, В. Г. Гришин, А. Ф. Грушин, М. А. Ганьжин, В. Г. Зинов, С. В. Медведь, 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 (предоставлено В. В. Глаголевым)

канал с проводкой через 1Б в корпус водородной камеры был реализован при фрагментации релятивистских дейтронов.

Предложенная парадигма оказалась мощным стимулом для развития в ЛВЭ экспериментальных методов, сделавших возможными эксперименты по релятивистской ядерной физике в 1970-е гг. В фокусе усилий оказалось создание 2-м пропановой, ксеноновой, 1-м водородной и стримерной камер. Развивались методы электронных экспериментов — черенковские газовые счетчики, органические пластические сцинтилляторы, многопроволочные искровые и пропорциональные камеры, черенковские детекторы полного поглощения, наносекундная электроника, сопряжение с компьютерами. Требовалось развитие криогенных мишеней, ядерной электроники и сопряжение с электронными вычислительными машинами, которые только стали появляться. Наверняка этот список неполон, и стоит обратиться к годовым отчетам ОИЯИ того периода.

На этом пути были не только успехи, но и разочарования. Прежде всего, не удалось получить ожидаемую интенсивность сепарированных пучков. В то же время ресурсы и опыт ученых и специалистов ЛВЭ потребовались для престижных экспериментов в Институте физики высоких энергий, где в 1967 г. был пущен в работу жесткофокусирующий синхротрон У-70 на рекордную энергию протонов к 50-летию Великой Октябрьской социалистической революции. Появившись на новой границе физики высоких энергий, этот ускоритель переключил на себя внимание не только физиков Советского Союза и стран-участниц ОИЯИ, но и ЦЕРН, и США.

Усугубил сложности безвременный уход из жизни в 1966 г. В. И. Векслера — харизматической личности, умевшей брать на себя ответственность, решать не только научно-технические, но и организационные вызовы беспрецедентной сложности. И. В. Чувило («правая рука Векслера») возглавил Институт экспериментальной физики, где уже действовал жесткофокусирующий синхротрон У-10, служивший прототипом Серпуховского ускорителя У-70. Возникли предложения о полной ориентации ЛВЭ на работу в ИФВЭ с соответствующими решениями в отношении синхрофазотрона и главной части коллектива ЛВЭ, связанного с ним.

Для вывода ситуации из кризиса и сохранения в действии дорого давшего научного капитала требовалось в сжатые сроки обновить программу-повестку внутренних экспериментов ЛВЭ. Условия определяли, с одной стороны, научная актуальность и перспективность, а с другой — реальные заделы ЛВЭ и бюджетный компромисс с возникшими внешними обязательствами. М. А. Марков, сменивший В. И. Векслера на посту академика-секретаря Отделения ядерной физики Академии наук СССР, выдвинул на пост директора ЛВЭ своего ученика А. М. Балдина (рис. 11).

Начав свою работу в ФИАН по физическому обоснованию синхрофазотрона, А. М. Балдин к тому времени получил признание как теоретик в области физики электромагнитных взаимодействий адронов и ядер. Он



Рис. 11. М. А. Марков и А. М. Балдин (фото Ю. А. Туманова)

сотрудничал с ЛВЭ в поиске электромагнитных распадов векторных мезонов, увенчавшимся первым наблюдением $\varphi \rightarrow e^+e^-$ [15, 16]. Неслучайно, что это направление стало темой первого международного семинара по проблемам физики высоких энергий, проведенного в сентябре 1969 г. под председательством А. М. Балдина [17]. Со временем тематика этого форума расширилась на множественные процессы, предельную фрагментацию ядер, квантовую хромодинамику. Семинар приобрел статус крупной конференции со значительным международным и российским участием.

Отправными пунктами для А. М. Балдина в формулируемом им научном направлении и названном им релятивистская ядерная физика стали только что появившиеся в ИФВЭ данные, продемонстрировавшие масштабно-инвариантное поведение инклюзивных спектров рожденных адронов. С другой стороны, исследование глубоконеупругого рассеяния электронов в Стэнфорде (США) указывало на точечноподобную (или партонную) структуру нуклонов. Также в пользу такой картины свидетельствовала справедливость правил кваркового счета Матвеева–Мурадяна–Тавхелидзе для упругого рассеяния адронов с большими передачами импульсов [18].

А. М. Балдин предложил распространить гипотезу масштабной инвариантности на столкновение релятивистских ядер как следствие точечного механизма взаимодействия ядерных нуклонов. Проверка гипотезы требовала исследования образования пионов в области предельной фрагментации, что при энергии около 3 ГэВ/нуклон требовало выхода за пределы нуклон-нуклонной кинематики [19]. А. М. Балдин вспоминал

краткий обмен с Р. Фейнманом во время конференции Американского института физики в 1971 г., который звучал примерно так: «Я знаю, когда переменная Фейнмана может быть больше единицы». Ответ: «Нет, это невозможно... (пауза) ..., а, ну, конечно, в ядрах!».

В 1970–1980-х гг. были проведены исчерпывающие измерения инклюзивных спектров кумулятивных адронов, включая антипротоны, барионных фрагментов в группе В. С. Ставинского в ЛВЭ и Г. А. Лексина в Институте теоретической и экспериментальной физики в Москве. Они составляют уникальный пласт физической картины партонных степеней свободы в ядерной материи (обзоры [20–23]) и дали основу для развития под руководством А. М. Балдина представлений об автомодельном поведении множественного рождения частиц в столкновениях адронов и ядер на основе данных с пузырьковых камер [24, 25].

Ускорение на синхрофазотроне дейтронов, приведшее к открытию кумулятивного эффекта, стало предпосылкой начала новых экспериментов под руководством Л. Н. Струнова и Л. С. Ажгирея по изучению волновой функции дейтрона на малых межнуклонных расстояниях. Мировой уровень в исследовании спиновых аспектов в структуре дейтрона был достигнут благодаря созданию в 1980-е гг. под руководством Ю. К. Пилипенко источника поляризованных дейтронов. На его основе в 1990-е гг. были начаты эксперименты с поляризованной протонной мишенью, доставленной из DAPHNIA (Сакле).

Выведенные пучки легких ядер, полученные от электронно-лучевого и лазерного источников, позволили провести обзорные исследования методом ядерной эмульсии в 2-м пропановой камере (рис. 12), а также в 1-м пузырьковой и стримерной камерах (рис. 13). Все затронутые темы заслуживают отдельных ретроспективных обзоров.

В практическом плане эксперименты по релятивистской ядерной физике, проведенные в 1970-х гг., дали жизненно важный импульс для модернизации и регулярной работы синхрофазотрона. Под руководством Л. П. Зиновьева был запущен в работу новый линейный инжектор, а под руководством И. Б. Иссинского осуществлен медленный вывод пучка на 4 порядка большей интенсивности, чем у внутреннего пучка в 1960-е гг. Тем самым защита над ускорителем утратила актуальность. Министр среднего машиностроения СССР Е. П. Славский поддержал инициативу А. М. Балдина о строительстве нового 205-го корпуса выведенных пучков, что было осуществлено под руководством Л. Г. Макарова (впоследствии «локомотив» проекта нуклотрон). Имея по оценке Д. В. Скобельцына 20-летний ресурс, огромный вакуумный объем камеры синхрофазотрона поддерживался в работоспособном состоянии до завершения его эксплуатации в конце 1990-х гг. Таким образом, целенаправленное совершенствование ускорителя, активное проведение экспериментов на нем, формулирование выводов и обобщений взаимно подталкивали друг друга, привлекая все более широкий круг пользователей. Представляется, что в этой тесной взаимосвязи кроется секрет ста-

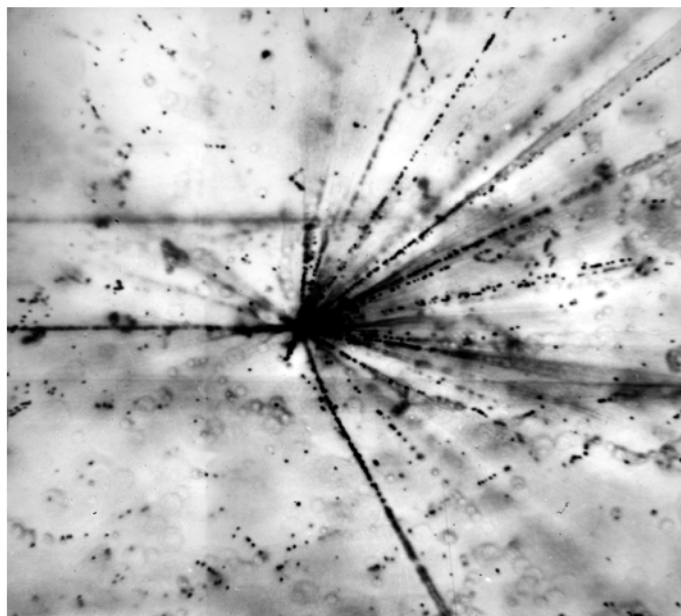


Рис. 12. Центральное соударение ядра ^{12}C с энергией 3,65 ГэВ/нуклон в ядерной эмульсии (предоставлено К. Д. Толстовым)

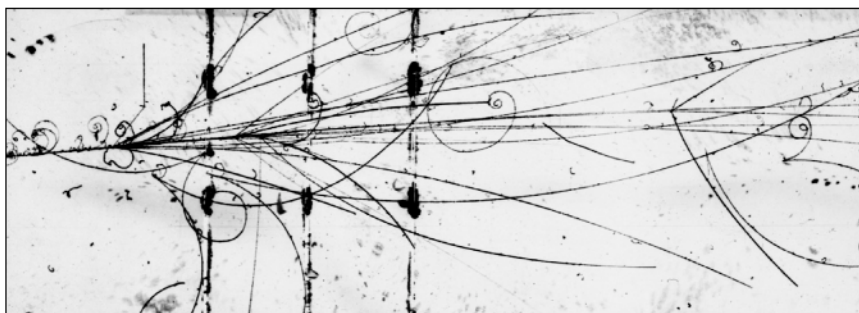


Рис. 13. Центральное соударение ядра ^{12}C с энергией 3,65 ГэВ/нуклон в пропановой пузырьковой камере (предоставлено М. И. Соловьевым)

новления релятивистской ядерной физики и ее выхода на мировой уровень и создания предпосылок для строительства нуклотрона в 1980-е гг. Этот научно-исторический урок В. И. Векслера и А. М. Балдина, их предшественников, соратников и последователей сохраняет свою актуальность. На этой платформе формировалось участие в экспериментах по релятивистской ядерной физике в ведущих ускорительных центрах мира.

Ретроспективный взгляд на историю ЛФВЭ поучителен и по сей день, так как позволяет приложить и экстраполировать своего рода стрелу времени. Факсимиле почти забытых статей и воспоминаний, накапливаемых на сайте эмульсионного эксперимента БЕККЕРЕЛЬ, вслед за изданиями ОИЯИ и Интернет, позволяют проникнуться вдохновляющей атмосферой первых шагов в этом направлении и проследить на фактах научный рост ЛФВЭ.

Поскольку ЛФВЭ в фокусе очерка, то автор позволил себе не останавливаться на зарубежных этапах, ведущих отсчет с открытия в 1949 г. релятивистских ядер в стратосфере [26]. Среди них развертывание в 1970-х гг. исследований с релятивистскими тяжелыми ионами на Бевалаке в Лаборатории им. Лоуренса в Беркли (США) [27]. Еще один крупный шаг — физика релятивистских малонуклонных систем, составившая повестку сначала на слабо фокусирующем САТУРН (СЕА, Сакле, Франция), продолжавшуюся на жесткофокусирующем САТУРН-2 (Лаборатория DAPhNIA-СЕА). Ретроспективное рассмотрение прогресса этих лабораторий было бы весьма поучительным. Их достижения представлены и отмечены в трудах международных семинаров, превратившихся в 1970–1980-х гг. в признанную международную конференцию (рис. 14). Наш сайт [28], ориентированный в основном на идущий эксперимент БЕККЕРЕЛЬ, может служить отправным пунктом в отечественную историю физики высоких энергий. Исторические материалы накапливаются в фоновом режиме во избежание утраты или забвения. В противном случае есть риск забыть о впечатляющем развитии физики микромира больше, чем зачастую наши современники знают. Поскольку



Рис. 14. А. Д. Коваленко, А. И. Малахов и А. М. Балдин на заседании Международного семинара по проблемам физики высоких энергий (1990-е гг., фото Ю. А. Туманова)

непосредственное цитирование здесь затруднено, автор готов помочь в поиске как цитируемых материалов, так и многих других, а также заинтересован в его пополнении. По очевидным историческим причинам большая часть раритетов на сайте БЕККЕРЕЛЬ представлена на русском языке, а давние публикации добавляются по мере обнаружения. Сборник аннотаций конференции в Дубне в 1964 г. недавно добавлен в раздел «papers/books». Через этот же раздел доступны главы годовых отчетов ЛВЭ ОИЯИ с 1965 г. Удачным источником для самостоятельных поисков служит база данных INSPIRE, на которой имеются материалы международных конференций по физике высоких энергий с 1950-х гг.

Автор благодарен проф. А. И. Малахову за приглашение представить доклады по случаю 65-летия синхрофазотрона в 2022 г. и открытия XXV Международного семинара по физике высоких энергий («Балдинская осень-2023»). Личная работа И. Г. Зарубиной над сайтом БЕККЕРЕЛЬ, начатая по ее инициативе в 2004 г. и продолженная по настоящее время, заслуживает искренней признательности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геккер И. Р., Стародуб А. Н., Фридман С. А. Физический институт Академии наук на Миусской площади. Препринт № 78. М.: ФИАН, 1989.
2. Добротин Н. II Всесоюзная конференция по атомному ядру // УФН. 1937. Т. 10. С. 583–592.
3. Скобельцын Д. В. О работах Памирской экспедиции ФИАН 1944 года по изучению космической радиации // УФН. 1946. Т. 28. С. 51–68.
4. 50th Anniversary of the Discovery of Phase Stability Principle: Proc. of Intern. Symp. Дубна, 1996.
5. Ратнер Б. С. Создание первого отечественного синхротрона. Препринт ИЯИ 1108/2003. М., 2003.
6. Искусственные мезоны, полученные с помощью ускорителя С-25: Отчет. М.: ФИАН, 1950.
7. Powell C. F., Fowler P. H., Perkins D. H. Study of Elementary Particles by the Photographic Method. London: Pergamon, 1959; Пауэлл С., Фаулер П., Перкинс Д. Исследование элементарных частиц фотографическим методом. М.: Изд-во иностр. лит., 1962.
8. Veksler V. I. Nucleon–Nucleon and Pion–Nucleon Interaction // 9th Intern. Ann. Conf. on High Energy Physics (ICHEP59), Kiev, USSR, 1959. P. 211.
9. Barashenkov V. S., Belyakov V. A., Bubelev E. G., Wang Shou Feng, Maltsev V. M., Tolstov K. D. Multiple Production of Particles in Collisions between 9-GeV Protons and Nucleons // Nucl. Phys. 1958/1959. V. 9. P. 74–82.
10. Bogachev N. P., Bunyatov S. A., Gramenitskii I. M., Lyubimov V. B., Merokov Yu. P., Podgoretskii M. I., Sidorov V. M., Tuwendendorzh D. Interaction of 9-BeV Protons with Free and Quasifree Nucleons in Photographic Emulsions // Sov. Phys. JETP. 1960. V. 10. P. 872–877.
11. Альварец Л. Современное состояние физики элементарных частиц // УФН. 1970. Т. 100. С. 93–133.

12. Wang Kan-Chang, Wang Tzu-Ten, Veksler V. I., Viryasov N. M., Vrana I., Ding Da-Tzao, Kim Hi In, Kladitzkaya E. N., Kuznetsov A. A., Mihil A., Nuyen Dinh Tu, Nikitin A. V., Soloviev M. I. Production of an Anti- Σ^- -Hyperon by 8.3 BeV/c Negative Pions. JINR Preprint D-508. Dubna, 1960.
13. Ван Ган-Чан, Ван Цу-Цзен, Векслер В. И., Вирясов Н. М., Врана И., Дин Да-цао, Ким Хи Ин, Кладницкая Е. Н., Кузнецов А. А., Михил А., Нгуен Дин Ты, Никитин А. В., Соловьев М. И. Рождение анти- Σ^- -гиперона отрицательными π^- -мезонами с импульсом 8,3 БэВ/с // ЖЭТФ. 1960. Т. 8. С. 1356.
14. Отчет о деятельности Объединенного института ядерных исследований в 1965 г. Дубна, 1966.
15. Khachatryan M. N., Azimov M. A., Baldin A. M., Belousov A. S., Chuvilo I. V., Firkowski R., Hladky J., Khvastunov M. S., Manca J., Matyushin A. T., Matyushin V. T., Ososkov G. A., Shtarkov L. N., Zhuravleva L. I. Observation of the (e^+e^-) -Decay Modes of Neutral Vector Mesons // Phys. Lett. B. 1967. V. 24. P. 349–352.
16. Astvacaturov R. G., Azimov M. A., Chuvilo I. V., Hladky J., Ivanov V. I., Khachatryan M. N., Khvastunov M. S., Matyushin A. T., Matyushin V. T., Zhuravleva L. I., Baldin A. M., Belousov A. S., Shtarkov L. N. Observation of the $\phi \rightarrow e^+e^-$ Decay // Phys. Lett. B. 1968. V. 27. P. 45–48.
17. Векторные мезоны и электромагнитные взаимодействия: Тр. междунар. семинара. Дубна, 1969.
18. Matveev V. A., Muradyan R. M., Tavkhelidze A. N. Automodelism in the Large-Angle Elastic Scattering and Structure of Hadrons // Lett. Nuovo Cim. 1973. V. 7. P. 719–723.
19. Baldin A. M., Ghiordanescu N., Stavinsky V. S. Backward Meson Production in $p(d)$ -Nucleus Collisions or the Experimental Study of Cumulative Meson Productions on Nuclei by Protons and Deuterons // Topical Meeting on High-Energy Collisions Involving Nuclei, Trieste, 1975. P. 171–182.
20. Балдин А. М. Физика релятивистских ядер // ЭЧАЯ. 1977. Т. 8. С. 429–477.
21. Ставинский В. С. Предельная фрагментация ядер — кумулятивный эффект // ЭЧАЯ. 1979. Т. 10. С. 949–995.
22. Baldin A. M. Multibaryon Interactions at Relativistic Energies // Prog. Part. Nucl. Phys. 1980. V. 4. P. 95–132.
23. Baldin A. M. Nuclear Reactions with Large Momentum Transfers as a Source of Information about Multiquark States in Nuclei // Nucl. Phys. A. 1985. V. 434. P. 695.
24. Baldin A. M., Didenko L. A., Grishin V. G., Kuznetsov A. A., Metreveli Z. V. Universality of Hadron Jets in Soft and Hard Particle Interactions at High Energies // Z. Phys. C. 1987. V. 33. P. 363.
25. Baldin A. M., Didenko L. A. Asymptotic Properties of Hadron Matter in Relative Four-Velocity Space // Fortsch. Phys. 1990. V. 38. P. 261.
26. Bradt H. L., Peters B. The Heavy Nuclei of the Primary Cosmic Radiation // Phys. Rev. 1950. V. 77. P. 54.
27. Steiner H. M. Particle Production by Relativistic Heavy Ions // Topical Meeting on High-Energy Collisions Involving Nuclei, Trieste, 1975. P. 151–170.
28. The BECQUEREL Project. <http://becquerel.jinr.ru/>.

ОТ ПЕРВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ К ФИЗИКЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР

П. И. Зарубин

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна
Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

Исследования космических лучей в Физическом институте АН СССР привели к созданию синхрофазотрона ОИЯИ. С этой целью в 1953 г. была основана Электрофизическая лаборатория АН СССР, вошедшая в состав ОИЯИ в 1956 г. как Лаборатория высоких энергий. Представлены начальные вехи развития экспериментов в лаборатории на синхрофазотроне. Отмечены лидеры и ключевые участники экспериментов, а также уроки и результаты, актуальные в наши дни.

Research of cosmic rays at the Physical Institute of the USSR Academy of Sciences resulted in the construction of the JINR Synchrophasotron. For this purpose, the electrophysical Laboratory of the USSR Academy of Sciences was founded in 1953, which became part of JINR in 1956 as the laboratory of High Energy Physics. The initial milestones to develop experiments at the Laboratory on the Synchrophasotron are presented. Leaders and key participants of the experiments are highlighted, as well as the lessons and results relevant today.

PACS: 29.20.-c; 29.20.D-; 25.75.Dw

Ускорители частиц высоких энергий иногда образно называют пирамидами XX века. Эти крупнейшие инструменты познания микромира заслуживают такой высокой оценки не только за свои впечатляющие размеры, но и за значительный импульс, который дало их создание коллективному творчеству в науке и технике. Наша эпоха имеет шанс войти в историю человечества как «культурный слой строителей синхротронов». В основе долголетия установок этого класса лежит возможность их качественного совершенствования по мере углубления проводимых на них фундаментальных исследований и развития прикладных разработок.

В 2023 г. Лаборатория физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ отметила 70-летие своего основания. Несколькими поколениями ее сотрудников и коллег в странах-участницах ОИЯИ пройден славный и полный драматизма путь. Его этапами стали первые эксперименты на синхрофазотроне по физике частиц, становление исследований по релятивистской ядерной и поляризованной физике, создание специализированного синхротрона на основе сверхпроводимости — нуклотрона. С начала 1970-х гг. получили развитие эксперименты на передовых границах физики элементарных частиц в Институте физи-

ки высоких энергий (СССР), Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (США) и Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН).

Долгосрочную перспективу в ЛФВЭ открывает реализация мегапроекта NICA для исследований кварк-глюонных степеней свободы ядерной материи на выведенных и встречных пучках тяжелых релятивистских ядер и поляризованных протонов с энергией несколько ГэВ/нуклон. Поэтапное развитие проекта расширяет возможности экспериментов по ядерной физике и радиационной биологии, а также в смежных прикладных областях. Важным этапом проекта NICA в 2023 г. стало ускорение ядер ксенона до 3,8 ГэВ/нуклон. К настоящему времени ускорительный каскад включает в себя электронно-лучевой источник, новый линейный ускоритель тяжелых ионов NICA, новый бустер на основе сверхпроводимости и нуклотрон с системами вывода пучка для экспериментов ЛФВЭ. Столь масштабное развитие вряд ли было бы возможно без материального и интеллектуального капитала, накопленного за предыдущие десятилетия. Этот капитал включает приоритетные физические результаты, полученные на развивавшейся ускорительной и экспериментальной базе. В его фундаменте лежат достижения в области физики космических лучей советского периода.

За организационное «начало отсчета» ЛФВЭ принимается образование в 1953 г. Электрофизической лаборатории Академии наук СССР (ЭФЛАН) на правах института в составе Отделения физико-математических наук для проведения исследований в области физики высоких энергий на строящемся синхрофазотроне. ЭФЛАН возглавил В. И. Векслер — признанный лидер в исследованиях космических лучей в 1930–1940-е гг., а также руководитель строительства первых синхротронов на основе открытого им принципа автофазировки. В 1956 г. ЭФЛАН вошла в ОИЯИ как лаборатория с наименованием Лаборатория высоких энергий (ЛВЭ). ЭФЛАН заменила собой ТДС — техническую дирекцию строительства, куда принимались будущие сотрудники ЛФВЭ. При объединении ЛВЭ с Лабораторией физики частиц в 2008 г. вернулось полное наименование — ЛФВЭ.

Одним из ключевых моментов в возникновении физики высоких энергий стало наблюдение в 1927 г. Д. В. Скобельцыным следов частиц с импульсами выше 20 МэВ/с в камере Вильсона, помещенной в магнит, указавшее на корпускулярную природу космической радиации. Исследование космических лучей продолжилось под руководством Д. В. Скобельцына в Лаборатории атомного ядра в Физическом институте Академии наук СССР [1]. Для решения фундаментальных проблем требовались новые методы детектирования. Для изучения природы космических лучей в состав комплексной экспедиции АН СССР на Эльбрусе был привлечен В. И. Векслер, ставший признанным специалистом по счетчикам Гейгера. В 1937 г. Н. А. Добротин [2] отмечал следующее: «В. И. Векслер доложил нам о применении к изучению космиче-

ских лучей разработанной им оригинальной методики. Она состоит в использовании для счета частиц газовых пропорциональных усилителей, работающих по схеме совпадений. Это дает возможность определять не только число частиц, прошедших через эти счетчики, но и измерять создаваемую ими ионизацию. В. И. Векслер работал с такой установкой летом этого года во время экспедиции на Эльбрус. При этом оказалось, что на высоте 4200 м над уровнем моря имеются легко поглощаемые и сильно ионизируемые частицы. На уровне же моря число таких частиц заметно меньше, чем на высоте Эльбруса. Число их настолько мало, что эти наблюдения не могут быть согласованы с предположением о наличии в космических лучах интенсивной протонной компоненты. Кроме того, В. И. Векслером были получены указания на вторичный характер этих частиц. На существование таких частиц ряд авторов указывал и раньше. Но с такой отчетливостью они были обнаружены впервые. Таким образом, уже первые опыты с пропорциональными газовыми усилителями дали очень ценные результаты. И можно не сомневаться, что дальнейшее применение этой методики позволит достигнуть весьма существенных успехов как при изучении тяжелых частиц, так и ливней».

Исследования космических лучей были продолжены в экспедиции ФИАН на Памире, начавшейся по поручению советского руководства весной 1944 г. «Открытие в ходе Памирской экспедиции электронно-ядерных ливней и выявление ядерно-каскадного процесса позволило вскрыть механизм, представляющий собой начальное звено в цепи космических лучей, развивающихся в атмосфере. Было показано, что электромагнитные каскадные процессы, с которыми до этого связывали сущность широких атмосферных ливней, являются лишь внешним проявлением ядерных взаимодействий, вызываемых частицами высокой энергии, такими как мезоны, протоны, более тяжелые атомы» [3].

Прошли школу Векслера в памирской экспедиции будущие профессора ЛВЭ К. Д. Толстов, А. Л. Любимов, М. И. Подгорецкий, возглавившие первые научные коллективы на синхрофазотроне. Задачи послевоенного восстановления и обороны страны не располагали к академическим тратам в суровой обстановке 1940-х гг. Однако благодаря тому обстоятельству, что невоенный характер этой области был неочевиден на начальном этапе, фундаментальные исследования в этой области получили беспрецедентную поддержку в рамках Атомного проекта СССР. Сама же логика исследования требовала лабораторных условий для целенаправленного изучения рождения частиц, выявления их внутренней структуры, поиска неизвестных частиц и античастиц. Эпохальный принцип автофазировки [4], независимо предложенный В. И. Векслером в 1944 г. и Э. Макмилланом — в 1945 г. в США, решал проблему создания ускорителей в космическом масштабе энергии.

В конце 1940-х гг. под руководством В. И. Векслера были созданы электронные синхротроны: на 30 МэВ для исследований фотоядерных реакций (С-3, «тройка») и на 250 МэВ (С-25) [5, 6]. Диссертация

И. В. Чувило, посвященная образованию нейтронов γ -квантами, стала первой на С-3. На С-25 с помощью ядерной эмульсии «Ильфторд» было открыто рождение π -мезонов γ -квантами (рис. 1) [6]. Тем самым было положено начало физике электромагнитных взаимодействий адронов, образно именовавшейся тогда «ядерными свойствами света». Основными направлениями стало изучение образования заряженных и нейтральных мезонов на нуклонах, поляризуемости (деформируемости) нуклонов в комптоновском рассеянии γ -квантов. В целом эксперименты продемонстрировали возможность описания адронной физики на основе квантовой теории поля.

На С-25 начинали работу молодые физики, занявшие впоследствии лидирующие позиции в научных центрах: М. И. Адамович, А. М. Балдин, А. С. Белоусов, Б. Б. Говорков, В. И. Гольданский, А. Н. Горбунов, Ю. М. Адо, С. П. Денисов, Р. М. Лебедев, М. Ф. Лихачев, В. И. Мороз, А. П. Онучин, Л. Н. Струнов, Е. И. Тамм, И. В. Чувило, Л. Н. Штарков. Почти наверняка этот список не полон. Освоение инжекции и ускорения медленных протонов потребовало создания модельного синхротрона МКМ (руководители В. А. Петухов и Л. П. Зиновьев), на котором

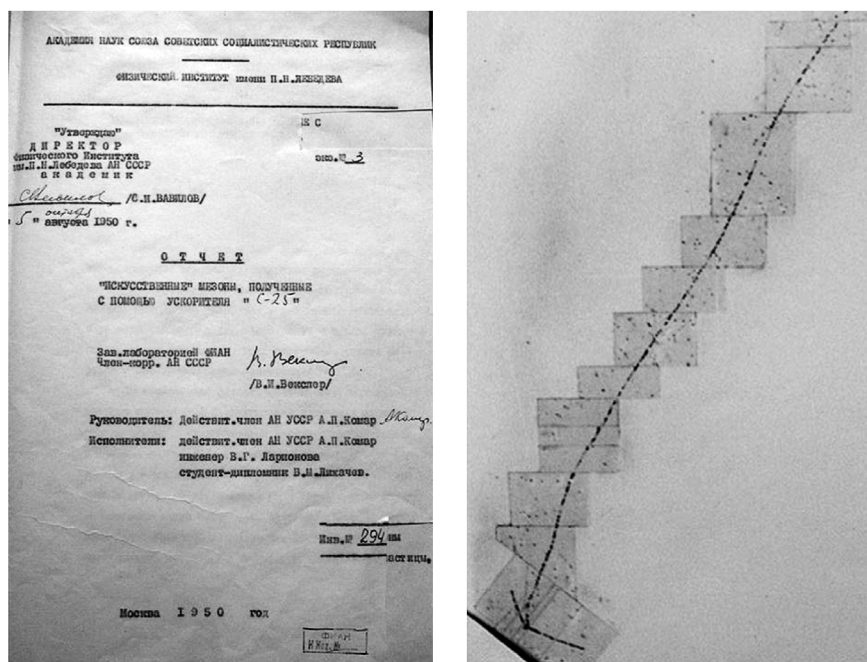


Рис. 1. Титульная страница отчета ФИАН (слева) и извилистый след π^- -мезона, захваченного ядром эмульсии с образованием двух фрагментов (справа) (предоставлено С. П. Харламовым)



Рис. 2. Синхротрон МКМ (ФИАН, 2007 г.)

были ускорены протоны до 160 МэВ (рис.2). Отмечая этот успех, В.И.Векслер заявил, что синхрофазотрон «на Волге» точно заработает. Позже МКМ был переделан в ускоритель электронов С-60 и служил в ФИАН как источник синхротронного излучения до демонтажа в 2000-х гг.

В Лаборатории им. Лоуренса в Беркли (США) под руководством Э.Макмиллана создавался слабофокусирующий синхротрон для ускорения протонов до 6 ГэВ. Благодаря разработкам, которые велись в лабораториях под руководством В.И.Векслера и А.Л.Минца, советским ответом американцам стал запуск синхрофазотрона на энергию протонов 10 ГэВ весной 1957 г. (рис.3 и 4). Физическое обоснование технического проекта разрабатывалось в 1950 г. группой В.И.Векслера, в составе которой были А.М.Балдин, А.А.Коломенский, А.П.Комар, В.В.Михайлов, М.С.Рабинович. Стоит отметить, что, опираясь на свой опыт исследований, «фиановцы» во главе с М.А.Марковым настаивали на электронном варианте, который и реализовался в 1960-х гг. под руководством Е.И.Тамма как С-25Р в отделе физики высоких энергий ФИАН в г.Троицке. В случае синхрофазотрона победила точка зрения физиков, связанных с Лабораторией №2 И.В.Курчатова, выступивших за протонный вариант. Этот выбор определил научную судьбу ЛВЭ спустя 20 лет: возникновение на базе синхрофазотрона релятивистской ядерной физики.



Рис. 3. Здание синхрофазотрона в 1956 г.

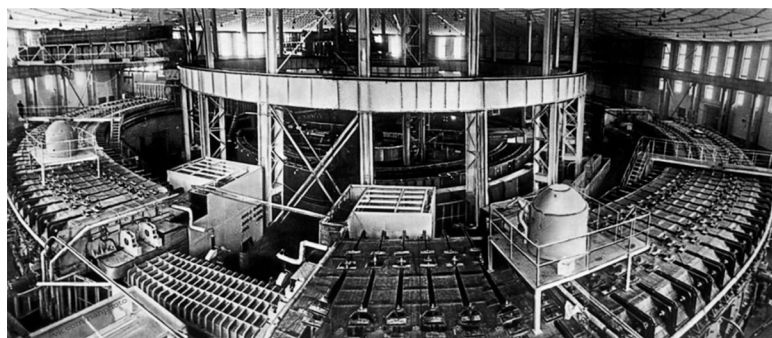


Рис. 4. Внутри здания синхрофазотрона (1957 г.)

Так стартовала эпоха мирного соревнования в физике микромира. Вскоре она позволила создать наукограды и ускорительные центры в СССР, США и Западной Европе, уже открытые для самого широкого международного сотрудничества. Их можно считать общими вехами прогресса человечества за прошедшие десятилетия. Осенью того же года был запущен первый искусственный спутник — «*piccola luna russa*», согласно одному из газетных заголовков за рубежом, как вспоминал А. М. Балдин.

В Москве были освоены технологические и аналитические основы метода ядерной эмульсии в отношении релятивистских частиц, позволившего выполнить основополагающие наблюдения релятивистских частиц в высотных облучениях. На рис. 5 представлена проективная фотография взаимодействия ядра с гигантской энергией в ядерной эмульсии, приведшего к грандиозной множественности вторичных частиц. Следы в струе фрагментов могут быть полностью разрешены. Полнота и достоверность

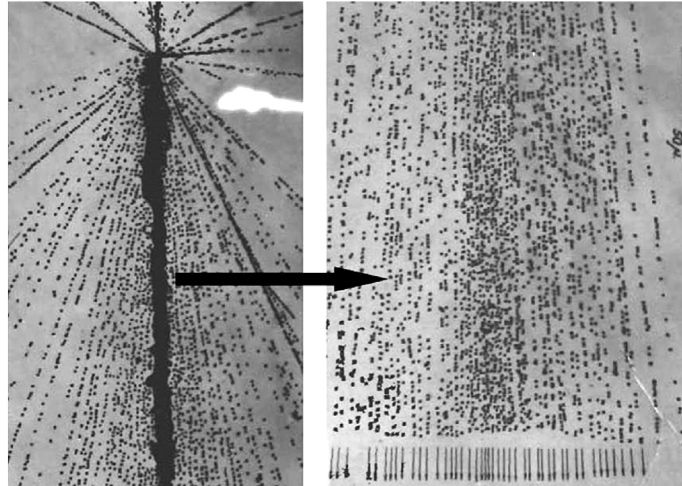


Рис. 5. Макрофотография взаимодействия ядра космического происхождения в ядерной эмульсии (ФИАН, начало 1950-х гг., предоставлено Г. И. Орловой)

наблюдения следов ядерных реакций, уникальное разрешение и гибкость применения этого метода остаются непревзойденными и поныне.

Создание отечественной толстослойной ядерной эмульсии к запуску синхрофазотрона стало отправным пунктом получения первых физических результатов. Стоит напомнить, что это событие вызывало сомнение за рубежом. Так, нобелевский лауреат С. Поуэлл, открывший π -мезон, связал согласие физикам ФИАН на переиздание своего фундаментального труда в СССР с предоставлением фотопластинок, объективно подтверждающих успех ускорителя. Фотографии характерных взаимодействий вошли в русское издание (рис. 6) [7]. Анализ первых облучений позволил дать обзор топологии ядерных звезд и провести угловые измерения выходящих следов [8–10]. До настоящего времени сохраняют уникальность наблюдения полного разрушения ядер мишени и когерентного образования мезонов в событиях, не сопровождающихся следами фрагментации мишени. Облучения стопок эмульсии продолжались в 1960-е гг. в отношении упругого рассеяния как источника информации о структуре протонов.

Открытие распадов странных частиц в ядерной эмульсии, облучавшейся в стратосфере, привело к созданию пузырьковых камер, охватывавших на много порядков большие объемы детектирования в магнитном поле. С уровнем исследований и размахом инноваций в США в этом направлении позволяет ознакомиться нобелевская лекция Л. Альвареса [11]. Решением для ЛВЭ стало создание 40-см пузырьковой камеры на основе сжиженного пропана. Для ее облучения был сформирован внешний пучок π^- -мезонов с импульсом 8,3 ГэВ/с.

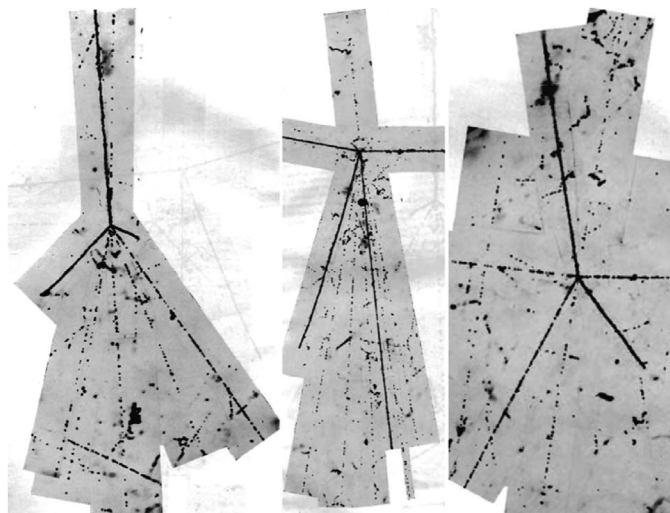


Рис. 6. Взаимодействия протонов, ускоренных на синхрофазотроне, из русского издания [7]

Анализ 40 тыс. фотографических кадров, сделанных на этой камере, оказался исключительно продуктивным (рис. 7–9). Флагманским результатом ЛВЭ стала идентификация в 1960 г. распада, не наблю-

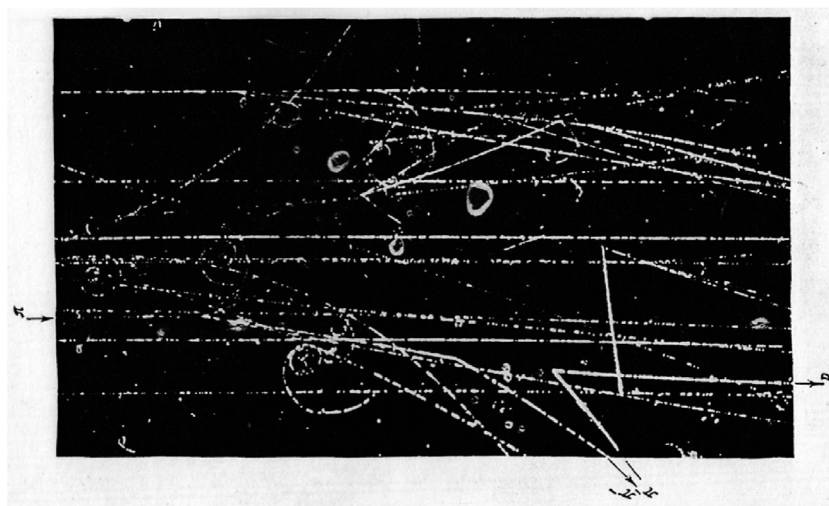


Рис. 7. Образование Ξ^- -гиперона в пузырьковой камере, распадающегося на пару $\Lambda\pi^-$ (предоставлено А. А. Кузнецовым)

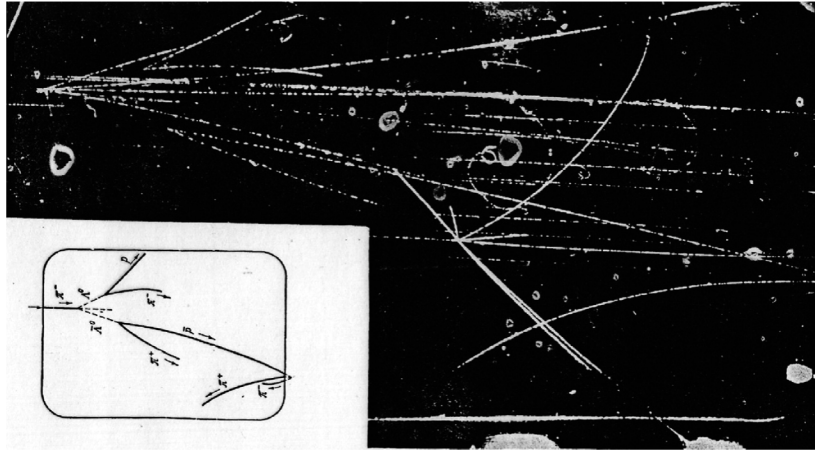


Рис. 8. Редкое событие в пузырьковой камере — образование и распад пары Λ -и анти- Λ -гиперонов (предоставлено А. А. Кузнецовым)

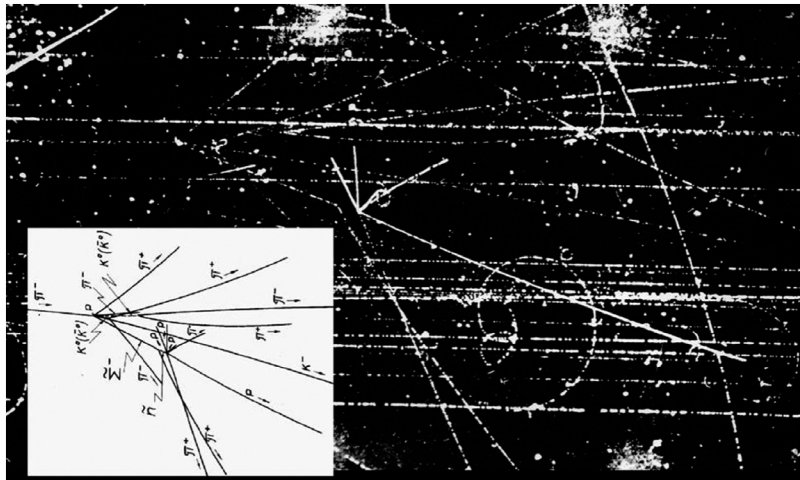


Рис. 9. Образование и распад анти- Σ^- -гиперона на антинейтрон в пузырьковой камере, проявившийся в звезде аннигиляции, и π^+ -мезон (предоставлено А. А. Кузнецовым)

давшегося ранее, анти- Σ^- -гиперона на π^+ -мезон и антинейтрон [12, 13]. Последний проявился в звезде аннигиляции (см. рис. 9). В вершине образования анти- Σ^- -гиперона присутствуют следы K^- и распадов пары K^0 -анти- K^0 -мезонов. (Так много «странности» сразу!) Столь ясно интерпретируемая фотография использовалась как символ физики элементарных частиц в изданиях ОИЯИ. Приятно отметить, что этот канал иден-

тификации был использован недавно в эксперименте ALICE на Большом адронном коллайдере.

Принципиальным фактором успехов стало привлечение В. И. Векслером на синхрофазотрон как проект общегосударственного значения двух групп выпускников физического факультета МГУ. Отвечая скептикам, он настаивал: «Молодежь меня не подведет!». Одна группа представлена в полном составе на фотографии (рис. 10). Среди соавторов первых публикаций встречаем имена молодых ученых: Е. Н. Кладницкой, Л. Н. Струнова, Э. Н. Цыганова, В. А. Белякова, В. А. Никитина, А. В. Никитина. Мировой уровень, на который вышел ОИЯИ, способствовал выбору Дубны в 1964 г. для проведения XII Международной конференции (Рочестерской) по физике высоких энергий.

Для развития физики частиц вплоть до антипротонов в 1965 г. была предложена концепция синхрофазотрона как источника вторичных частиц, генерируемых на его внутренних мишенях [14]. Прежде всего требовался рост на три-четыре порядка интенсивности циркулирующих протонов, что означало создание нового линейного ускорителя для инжекции. Возник проект создания мощной бетонной защиты над кольцом. Затем требовалось создание каналов сепарированных пучков вторичных частиц, включая электростатические сепараторы K -мезонов и антипротонов, которые размещались в пристроенном корпусе 1Б. Нейтронный



Рис. 10. Выпускники одной из двух групп физического факультета МГУ, приглашенные В. И. Векслером: Е. С. Соколова (Кузнецова), А. А. Кузнецов, Р. А. Асанов, Л. Г. Заставенко, Э. Г. Бубелев, В. Г. Гришин, А. Ф. Грушин, М. А. Ганьжин, В. Г. Зинов, С. В. Медведь, И. А. Савин, В. В. Вишняков, И. С. Сaitов, 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 (предоставлено В. В. Глаголевым)

канал с проводкой через 1Б в корпус водородной камеры был реализован при фрагментации релятивистских дейтронов.

Предложенная парадигма оказалась мощным стимулом для развития в ЛВЭ экспериментальных методов, сделавших возможными эксперименты по релятивистской ядерной физике в 1970-е гг. В фокусе усилий оказалось создание 2-м пропановой, ксеноновой, 1-м водородной и стримерной камер. Развивались методы электронных экспериментов — черенковские газовые счетчики, органические пластические сцинтилляторы, многопроволочные искровые и пропорциональные камеры, черенковские детекторы полного поглощения, наносекундная электроника, сопряжение с компьютерами. Требовалось развитие криогенных мишеней, ядерной электроники и сопряжение с электронными вычислительными машинами, которые только стали появляться. Наверняка этот список неполон, и стоит обратиться к годовым отчетам ОИЯИ того периода.

На этом пути были не только успехи, но и разочарования. Прежде всего, не удалось получить ожидаемую интенсивность сепарированных пучков. В то же время ресурсы и опыт ученых и специалистов ЛВЭ потребовались для престижных экспериментов в Институте физики высоких энергий, где в 1967 г. был пущен в работу жесткофокусирующий синхротрон У-70 на рекордную энергию протонов к 50-летию Великой Октябрьской социалистической революции. Появившись на новой границе физики высоких энергий, этот ускоритель переключил на себя внимание не только физиков Советского Союза и стран-участниц ОИЯИ, но и ЦЕРН, и США.

Усугубил сложности безвременный уход из жизни в 1966 г. В. И. Векслера — харизматической личности, умевшей брать на себя ответственность, решать не только научно-технические, но и организационные вызовы беспрецедентной сложности. И. В. Чувило («правая рука Векслера») возглавил Институт экспериментальной физики, где уже действовал жесткофокусирующий синхротрон У-10, служивший прототипом Серпуховского ускорителя У-70. Возникли предложения о полной ориентации ЛВЭ на работу в ИФВЭ с соответствующими решениями в отношении синхрофазотрона и главной части коллектива ЛВЭ, связанного с ним.

Для вывода ситуации из кризиса и сохранения в действии дорого давшего научного капитала требовалось в сжатые сроки обновить программу-повестку внутренних экспериментов ЛВЭ. Условия определяли, с одной стороны, научная актуальность и перспективность, а с другой — реальные заделы ЛВЭ и бюджетный компромисс с возникшими внешними обязательствами. М. А. Марков, сменивший В. И. Векслера на посту академика-секретаря Отделения ядерной физики Академии наук СССР, выдвинул на пост директора ЛВЭ своего ученика А. М. Балдина (рис. 11).

Начав свою работу в ФИАН по физическому обоснованию синхрофазотрона, А. М. Балдин к тому времени получил признание как теоретик в области физики электромагнитных взаимодействий адронов и ядер. Он



Рис. 11. М. А. Марков и А. М. Балдин (фото Ю. А. Туманова)

сотрудничал с ЛВЭ в поиске электромагнитных распадов векторных мезонов, увенчавшимся первым наблюдением $\varphi \rightarrow e^+e^-$ [15, 16]. Неслучайно, что это направление стало темой первого международного семинара по проблемам физики высоких энергий, проведенного в сентябре 1969 г. под председательством А. М. Балдина [17]. Со временем тематика этого форума расширилась на множественные процессы, предельную фрагментацию ядер, квантовую хромодинамику. Семинар приобрел статус крупной конференции со значительным международным и российским участием.

Отправными пунктами для А. М. Балдина в формулируемом им научном направлении и названном им релятивистская ядерная физика стали только что появившиеся в ИФВЭ данные, продемонстрировавшие масштабно-инвариантное поведение инклюзивных спектров рожденных адронов. С другой стороны, исследование глубоконеупругого рассеяния электронов в Стэнфорде (США) указывало на точечноподобную (или партонную) структуру нуклонов. Также в пользу такой картины свидетельствовала справедливость правил кваркового счета Матвеева–Мурадяна–Тавхелидзе для упругого рассеяния адронов с большими передачами импульсов [18].

А. М. Балдин предложил распространить гипотезу масштабной инвариантности на столкновение релятивистских ядер как следствие точечного механизма взаимодействия ядерных нуклонов. Проверка гипотезы требовала исследования образования пионов в области предельной фрагментации, что при энергии около 3 ГэВ/нуклон требовало выхода за пределы нуклон-нуклонной кинематики [19]. А. М. Балдин вспоминал

краткий обмен с Р. Фейнманом во время конференции Американского института физики в 1971 г., который звучал примерно так: «Я знаю, когда переменная Фейнмана может быть больше единицы». Ответ: «Нет, это невозможно... (пауза) ..., а, ну, конечно, в ядрах!».

В 1970–1980-х гг. были проведены исчерпывающие измерения инклюзивных спектров кумулятивных адронов, включая антипротоны, барионных фрагментов в группе В. С. Ставинского в ЛВЭ и Г. А. Лексина в Институте теоретической и экспериментальной физики в Москве. Они составляют уникальный пласт физической картины партонных степеней свободы в ядерной материи (обзоры [20–23]) и дали основу для развития под руководством А. М. Балдина представлений об автомодельном поведении множественного рождения частиц в столкновениях адронов и ядер на основе данных с пузырьковых камер [24, 25].

Ускорение на синхрофазотроне дейтронов, приведшее к открытию кумулятивного эффекта, стало предпосылкой начала новых экспериментов под руководством Л. Н. Струнова и Л. С. Ажгирея по изучению волновой функции дейтрона на малых межнуклонных расстояниях. Мировой уровень в исследовании спиновых аспектов в структуре дейтрона был достигнут благодаря созданию в 1980-е гг. под руководством Ю. К. Пилипенко источника поляризованных дейтронов. На его основе в 1990-е гг. были начаты эксперименты с поляризованной протонной мишенью, доставленной из DAPHNIA (Сакле).

Выведенные пучки легких ядер, полученные от электронно-лучевого и лазерного источников, позволили провести обзорные исследования методом ядерной эмульсии в 2-м пропановой камере (рис. 12), а также в 1-м пузырьковой и стримерной камерах (рис. 13). Все затронутые темы заслуживают отдельных ретроспективных обзоров.

В практическом плане эксперименты по релятивистской ядерной физике, проведенные в 1970-х гг., дали жизненно важный импульс для модернизации и регулярной работы синхрофазотрона. Под руководством Л. П. Зиновьева был запущен в работу новый линейный инжектор, а под руководством И. Б. Иссинского осуществлен медленный вывод пучка на 4 порядка большей интенсивности, чем у внутреннего пучка в 1960-е гг. Тем самым защита над ускорителем утратила актуальность. Министр среднего машиностроения СССР Е. П. Славский поддержал инициативу А. М. Балдина о строительстве нового 205-го корпуса выведенных пучков, что было осуществлено под руководством Л. Г. Макарова (впоследствии «локомотив» проекта нуклотрон). Имея по оценке Д. В. Скобельцына 20-летний ресурс, огромный вакуумный объем камеры синхрофазотрона поддерживался в работоспособном состоянии до завершения его эксплуатации в конце 1990-х гг. Таким образом, целенаправленное совершенствование ускорителя, активное проведение экспериментов на нем, формулирование выводов и обобщений взаимно подталкивали друг друга, привлекая все более широкий круг пользователей. Представляется, что в этой тесной взаимосвязи кроется секрет ста-

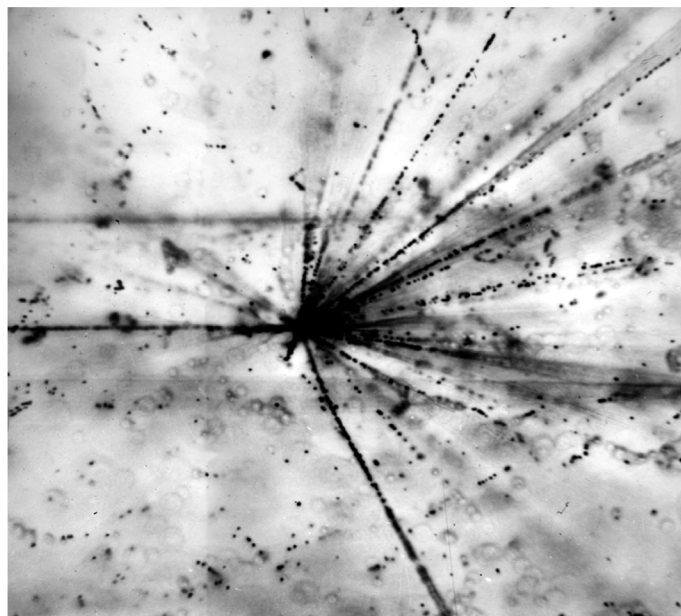


Рис. 12. Центральное соударение ядра ^{12}C с энергией 3,65 ГэВ/нуклон в ядерной эмульсии (предоставлено К. Д. Толстовым)

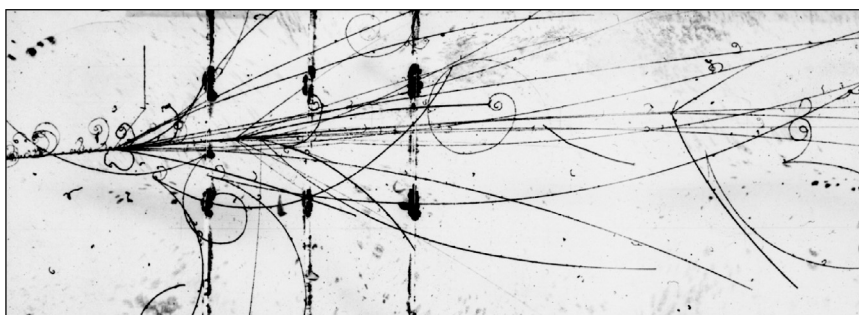


Рис. 13. Центральное соударение ядра ^{12}C с энергией 3,65 ГэВ/нуклон в пропановой пузырьковой камере (предоставлено М. И. Соловьевым)

новления релятивистской ядерной физики и ее выхода на мировой уровень и создания предпосылок для строительства нуклотрона в 1980-е гг. Этот научно-исторический урок В. И. Векслера и А. М. Балдина, их предшественников, соратников и последователей сохраняет свою актуальность. На этой платформе формировалось участие в экспериментах по релятивистской ядерной физике в ведущих ускорительных центрах мира.

Ретроспективный взгляд на историю ЛФВЭ поучителен и по сей день, так как позволяет приложить и экстраполировать своего рода стрелу времени. Факсимиле почти забытых статей и воспоминаний, накапливаемых на сайте эмульсионного эксперимента БЕККЕРЕЛЬ, вслед за изданиями ОИЯИ и Интернет, позволяют проникнуться вдохновляющей атмосферой первых шагов в этом направлении и проследить на фактах научный рост ЛФВЭ.

Поскольку ЛФВЭ в фокусе очерка, то автор позволил себе не останавливаться на зарубежных этапах, ведущих отсчет с открытия в 1949 г. релятивистских ядер в стратосфере [26]. Среди них развертывание в 1970-х гг. исследований с релятивистскими тяжелыми ионами на Бевалаке в Лаборатории им. Лоуренса в Беркли (США) [27]. Еще один крупный шаг — физика релятивистских малонуклонных систем, составившая повестку сначала на слабо фокусирующем САТУРН (СЕА, Сакле, Франция), продолжавшуюся на жесткофокусирующем САТУРН-2 (Лаборатория DAPhNIA-СЕА). Ретроспективное рассмотрение прогресса этих лабораторий было бы весьма поучительным. Их достижения представлены и отмечены в трудах международных семинаров, превратившихся в 1970–1980-х гг. в признанную международную конференцию (рис. 14). Наш сайт [28], ориентированный в основном на идущий эксперимент БЕККЕРЕЛЬ, может служить отправным пунктом в отечественную историю физики высоких энергий. Исторические материалы накапливаются в фоновом режиме во избежание утраты или забвения. В противном случае есть риск забыть о впечатляющем развитии физики микромира больше, чем зачастую наши современники знают. Поскольку



Рис. 14. А. Д. Коваленко, А. И. Малахов и А. М. Балдин на заседании Международного семинара по проблемам физики высоких энергий (1990-е гг., фото Ю. А. Туманова)

непосредственное цитирование здесь затруднено, автор готов помочь в поиске как цитируемых материалов, так и многих других, а также заинтересован в его пополнении. По очевидным историческим причинам большая часть раритетов на сайте БЕККЕРЕЛЬ представлена на русском языке, а давние публикации добавляются по мере обнаружения. Сборник аннотаций конференции в Дубне в 1964 г. недавно добавлен в раздел «papers/books». Через этот же раздел доступны главы годовых отчетов ЛВЭ ОИЯИ с 1965 г. Удачным источником для самостоятельных поисков служит база данных INSPIRE, на которой имеются материалы международных конференций по физике высоких энергий с 1950-х гг.

Автор благодарен проф. А. И. Малахову за приглашение представить доклады по случаю 65-летия синхрофазотрона в 2022 г. и открытия XXV Международного семинара по физике высоких энергий («Балдинская осень-2023»). Личная работа И. Г. Зарубиной над сайтом БЕККЕРЕЛЬ, начатая по ее инициативе в 2004 г. и продолженная по настоящее время, заслуживает искренней признательности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геккер И. Р., Стародуб А. Н., Фридман С. А. Физический институт Академии наук на Миусской площади. Препринт № 78. М.: ФИАН, 1989.
2. Добротин Н. II Всесоюзная конференция по атомному ядру // УФН. 1937. Т. 10. С. 583–592.
3. Скобельцын Д. В. О работах Памирской экспедиции ФИАН 1944 года по изучению космической радиации // УФН. 1946. Т. 28. С. 51–68.
4. 50th Anniversary of the Discovery of Phase Stability Principle: Proc. of Intern. Symp. Дубна, 1996.
5. Ратнер Б. С. Создание первого отечественного синхротрона. Препринт ИЯИ 1108/2003. М., 2003.
6. Искусственные мезоны, полученные с помощью ускорителя С-25: Отчет. М.: ФИАН, 1950.
7. Powell C. F., Fowler P. H., Perkins D. H. Study of Elementary Particles by the Photographic Method. London: Pergamon, 1959; Пауэлл С., Фаулер П., Перкинс Д. Исследование элементарных частиц фотографическим методом. М.: Изд-во иностр. лит., 1962.
8. Veksler V. I. Nucleon–Nucleon and Pion–Nucleon Interaction // 9th Intern. Ann. Conf. on High Energy Physics (ICHEP59), Kiev, USSR, 1959. P. 211.
9. Barashenkov V. S., Belyakov V. A., Bubelev E. G., Wang Shou Feng, Maltsev V. M., Tolstov K. D. Multiple Production of Particles in Collisions between 9-GeV Protons and Nucleons // Nucl. Phys. 1958/1959. V. 9. P. 74–82.
10. Bogachev N. P., Bunyatov S. A., Gramenitskii I. M., Lyubimov V. B., Merkov Yu. P., Podgoretskii M. I., Sidorov V. M., Tuwendendorzh D. Interaction of 9-BeV Protons with Free and Quasifree Nucleons in Photographic Emulsions // Sov. Phys. JETP. 1960. V. 10. P. 872–877.
11. Альварец Л. Современное состояние физики элементарных частиц // УФН. 1970. Т. 100. С. 93–133.

12. Wang Kan-Chang, Wang Tzu-Ten, Veksler V. I., Viryasov N. M., Vrana I., Ding Da-Tzao, Kim Hi In, Kladitzkaya E. N., Kuznetsov A. A., Mihil A., Nuyen Dinh Tu, Nikitin A. V., Soloviev M. I. Production of an Anti- Σ^- -Hyperon by 8.3 BeV/c Negative Pions. JINR Preprint D-508. Dubna, 1960.
13. Ван Ган-Чан, Ван Цу-Цзен, Векслер В. И., Вирясов Н. М., Врана И., Дин Да-цао, Ким Хи Ин, Кладницкая Е. Н., Кузнецов А. А., Михил А., Нгуен Дин Ты, Никитин А. В., Соловьев М. И. Рождение анти- Σ^- -гиперона отрицательными π^- -мезонами с импульсом 8,3 БэВ/с // ЖЭТФ. 1960. Т. 8. С. 1356.
14. Отчет о деятельности Объединенного института ядерных исследований в 1965 г. Дубна, 1966.
15. Khachatryan M. N., Azimov M. A., Baldin A. M., Belousov A. S., Chuvilo I. V., Firkowski R., Hladky J., Khvastunov M. S., Manca J., Matyushin A. T., Matyushin V. T., Ososkov G. A., Shtarkov L. N., Zhuravleva L. I. Observation of the (e^+e^-) -Decay Modes of Neutral Vector Mesons // Phys. Lett. B. 1967. V. 24. P. 349–352.
16. Astvacaturov R. G., Azimov M. A., Chuvilo I. V., Hladky J., Ivanov V. I., Khachatryan M. N., Khvastunov M. S., Matyushin A. T., Matyushin V. T., Zhuravleva L. I., Baldin A. M., Belousov A. S., Shtarkov L. N. Observation of the $\phi \rightarrow e^+e^-$ Decay // Phys. Lett. B. 1968. V. 27. P. 45–48.
17. Векторные мезоны и электромагнитные взаимодействия: Тр. междунар. семинара. Дубна, 1969.
18. Matveev V. A., Muradyan R. M., Tavkhelidze A. N. Automodelism in the Large-Angle Elastic Scattering and Structure of Hadrons // Lett. Nuovo Cim. 1973. V. 7. P. 719–723.
19. Baldin A. M., Ghiordanescu N., Stavinsky V. S. Backward Meson Production in $p(d)$ -Nucleus Collisions or the Experimental Study of Cumulative Meson Productions on Nuclei by Protons and Deuterons // Topical Meeting on High-Energy Collisions Involving Nuclei, Trieste, 1975. P. 171–182.
20. Балдин А. М. Физика релятивистских ядер // ЭЧАЯ. 1977. Т. 8. С. 429–477.
21. Ставинский В. С. Предельная фрагментация ядер — кумулятивный эффект // ЭЧАЯ. 1979. Т. 10. С. 949–995.
22. Baldin A. M. Multibaryon Interactions at Relativistic Energies // Prog. Part. Nucl. Phys. 1980. V. 4. P. 95–132.
23. Baldin A. M. Nuclear Reactions with Large Momentum Transfers as a Source of Information about Multiquark States in Nuclei // Nucl. Phys. A. 1985. V. 434. P. 695.
24. Baldin A. M., Didenko L. A., Grishin V. G., Kuznetsov A. A., Metreveli Z. V. Universality of Hadron Jets in Soft and Hard Particle Interactions at High Energies // Z. Phys. C. 1987. V. 33. P. 363.
25. Baldin A. M., Didenko L. A. Asymptotic Properties of Hadron Matter in Relative Four-Velocity Space // Fortsch. Phys. 1990. V. 38. P. 261.
26. Braat H. L., Peters B. The Heavy Nuclei of the Primary Cosmic Radiation // Phys. Rev. 1950. V. 77. P. 54.
27. Steiner H. M. Particle Production by Relativistic Heavy Ions // Topical Meeting on High-Energy Collisions Involving Nuclei, Trieste, 1975. P. 151–170.
28. The BECQUEREL Project. <http://becquerel.jinr.ru/>.