

## КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

**Научная сессия Отделения физических наук  
Российской академии наук и объединенное заседание  
Ученых советов ФИАНа, ОИЯИ, ИЯИ РАН  
и Научного совета по ускорителям заряженных частиц,  
посвященная 100-летию  
академика Владимира Иосифовича Векслера**

(5 марта 2007 г.)

5 марта 2007 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева РАН состоялись Научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук и объединенное заседание Ученых советов ФИАНа, ОИЯИ, ИЯИ РАН и Научного совета по ускорителям заряженных частиц, посвященные 100-летию академика Владимира Иосифовича Векслера. На сессии были заслушаны доклады:

1. **Болотовский Б.М., Лебедев А.Н.** (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва). *Академик В.И. Векслер.*

2. **Долбилкин Б.С., Ратнер Б.С.** (Институт ядерных исследований РАН, Москва). *В.И. Векслер и развитие ядерной физики в Советском Союзе.*

3. **Никитин В.А.** (Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Московская обл.). *Исследования на Синхрофазотроне.*

4. **Коваленко А.Д.** (Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Московская обл.). *От синхрофазотрона к Нуклотрону.*

Краткое содержание докладов публикуется ниже.

PACS numbers: 29.20.Hm, 29.20.Lq

### Академик В.И. Векслер

Б.М. Болотовский, А.Н. Лебедев

Владимир Иосифович Векслер родился 4 марта 1907 г. в Житомире. Отцом В.И. Векслера был молодой и талантливый художник Давид Петрович Штеренберг. Еще до рождения ребенка Штеренберг вынужден был эмигрировать, поэтому новорожденный получил фамилию матери, которую и сохранил на всю жизнь.

В Россию Штеренберг вернулся после революции 1917 г. и быстро добился известности, сопровождаемой, правда, модными по тем временам обвинениями в 6 УФН, т. 177, № 8



Владимир Иосифович Векслер  
(04.03.1907 – 22.09.1966)

формализме. Отец очень любил сына, несколько раз возил его в Германию для лечения от предполагаемого заболевания туберкулезом.

Достигнув 14-летнего возраста, Володя, не согласный с обстановкой в семье отчима, ушел в детский дом-

коммуны им. А.В. Луначарского. В нем он прожил 5 лет. Здесь формировался его характер, здесь он нашел друзей, которым остался верен на всю жизнь.

Состав старшей группы, в которой учился Векслер, оказался очень сильным (все получили высшее образование), но после окончания девятилетки весь выпуск решил пойти сначала на производство. Вместе с несколькими товарищами Владимир поступил на ситценабивную фабрику учеником монтера в электромеханическую мастерскую. Уже тогда он проявлял редкую сообразительность и интерес к работе, увлекался техникой и физикой, даже сам собрал радиоприемник — для того времени вещь не простую. Руководство фабрики решило направить его на дальнейшую учебу в Институт народного хозяйства им. Г.В. Плеханова. Позднее, в связи с реорганизацией института, Векслер перешел на заочное отделение Московского энергетического института и одновременно поступил на работу младшим лаборантом во Всесоюзный электротехнический институт (ВЭИ). В 1931 г. он закончил Московский энергетический институт, получив диплом инженера по специальности "рентгенотехник" и перешел в ВЭИ на работу в лабораторию рентгеноструктурного анализа в должности научного сотрудника.

Этот институт был основан в 1921 г. по решению Совета труда и обороны. Его первоначальное название — Государственный экспериментальный электротехнический институт. Он создавался для решения прикладных задач, для развития электротехнической промышленности, но с самого начала в нем большое внимание уделялось перспективным экспериментальным исследованиям и разработке теории электромагнитных процессов. Тематика исследований, проводившихся в ВЭИ, была очень разнообразна: линии высокого напряжения и высоковольтное оборудование, устойчивость электрических цепей, физика газового разряда, распространение электромагнитных и звуковых волн и многое другое. В институте работали и с ним сотрудничали известные ученые — П.А. Флоренский, Л.И. Мандельштам, И.Е. Тамм, Б.А. Введенский, П.А. Круг, С.И. Вавилов, Г.С. Ландсберг.

В лаборатории Векслер занялся проблемой детектирования рентгеновского излучения. Классический метод регистрации рентгеновского излучения на фотопластинке был к тому времени хорошо изучен и повсеместно применялся. Владимир Иосифович разрабатывал другой способ регистрации рентгеновского излучения, в котором вместо фотопластинки использовалась ионизационная камера. За несколько лет он создал достаточно чувствительные камеры и добился того, что точность измерений рентгеновского излучения с помощью ионизационных камер могла конкурировать с точностью фотографических измерений, при этом ионизационная камера позволяла вести непрерывный контроль за интенсивностью рентгеновского излучения. Все придуманные им установки он собирал и монтировал сам. Векслер не удовлетворялся чисто технической, так сказать, аппаратной стороной задачи. Он изучил и теоретическую основу работы ионизационной камеры: теорию газового разряда, теорию тормозного излучения и особенности взаимодействия рентгеновских квантов с атомами газа, наполняющего камеру. Некоторые из созданных им приборов (например, цилиндрический пропорциональный газовый счетчик) нашли широкое применение при изучении космических лучей.

В 1935 г. Векслер защитил кандидатскую диссертацию и вскоре стал заведующим лабораторией. В институте Владимир Иосифович быстро приобрел авторитет. В своей области он знал и физику рентгеновского излучения, и аппаратуру, которая использовалась для измерений его интенсивности, внес большой вклад в разработку этой аппаратуры. Но он также хорошо знал и другие разделы электромагнитной науки — и теорию, и эксперимент.

Жизнь в 1930-е годы была не легкой, она медленно налаживалась после гражданской войны и разрухи. В институте не хватало измерительных приборов, осциллографы были на вес золота. Многое приходилось делать своими руками. Бытовые условия тоже желали много лучшего. Семья Векслера жила в темной и сырой комнате, в старом доме, перестроенном из конюшни. Зимой стены промерзали. Супруга В.И. Нина Александровна заболела туберкулезом, дочка Катя каждую зиму болела воспалением легких. Заработанных денег хватало в основном на еду. Сохранилось свидетельство тех времен — приказ директора ВЭИ от 29 января 1935 г. Этим приказом награждались отличившиеся сотрудники ВЭИ "за высокие показатели в производственной работе за 1934 год". Кто-то получил радиоприемник, кто-то патефон, кто-то ордер на пошивку пальто... Научный сотрудник группы рентгеновских лучей тов. В.И. Векслер награждался отрезом на костюме.

В 1937 г. Владимир Иосифович перешел на работу в Физический институт Академии наук (ФИАН). Фактически он был приглашен в ФИАН по инициативе молодых сотрудников лаборатории атомного ядра И.М. Франка, П.А. Черенкова, Л.В. Грошева и др. Они знали о работах Векслера, были о них высокого мнения и считали, что созданные им приборы и методики измерений необходимо использовать в экспериментах по изучению атомного ядра и космических лучей. Сначала Франк предложил Владимиру Иосифовичу сделать доклад о своих работах для небольшой группы сотрудников ФИАНа, занимавшихся ядерной физикой. После доклада Векслера спросили, не хочет ли он перейти на работу в ФИАН. Перспектива исследовательской работы в области ядерной физики, да еще в ФИАНе, где трудились многие замечательные физики, увлекла Векслера, тем более что это не была для него совсем уж неизвестная область и в предстоящих исследованиях он мог использовать опыт, наработанный в ВЭИ.

Директором и создателем ФИАНа был академик С.И. Вавилов. Его специальностью была физическая оптика. Но будучи человеком широкого кругозора, он заботился и о том, чтобы в институте разрабатывались перспективные направления. К их числу он, один из немногих в то время, относил физику атомного ядра, включая и физику космических лучей. Руководить этой тематикой С.И. Вавилов пригласил академика Д.В. Скобельцына. В то время, в 1936 г., Скобельцын работал в ФИАНе в качестве консультанта, приезжая еженедельно из Ленинграда.

Познакомившись с Векслером и побеседовав с ним, Вавилов высоко оценил его возможности. И.М. Франк в своих воспоминаниях о Векслере пишет: "Талантливость Владимира Иосифовича была настолько очевидна, что таким опытным руководителем, как Сергей Иванович Вавилов, не могла не быть замечена". Чтобы облегчить переход Векслера в ФИАН, Вавилов предложил ему

поступить в докторантуру ФИАНа и даже взял на себя научное руководство.

В те годы существовала Эльбрусская комплексная научная экспедиция. В ее состав входила группа физиков, занятых исследованием космического излучения. Измерения проводились на базах, расположенных на высоте от 2200 до 4200 м. Подготовка аппаратуры, ее монтаж и наладка осуществлялись в Москве, в ФИАНе. В начале лета аппаратура доставлялась в горы, и начинались измерения. В конце августа измерения заканчивались. Векслер сразу же был назначен руководителем группы по исследованию космических лучей в составе этой экспедиции, которая работала в течение четырех довоенных лет — с 1937 г. по 1940 г.

О космических лучах в те годы было мало что известно. В частности, о составе космических лучей существовали весьма скудные представления. Некоторые физики придерживались мнения, что космические лучи состоят из электронов. Результаты измерений на Эльбрусе позволили расширить представления о космическом излучении: было обнаружено большое количество вторичных частиц — медленных мезонов. В 1940 г. Векслер защитил докторскую диссертацию "Тяжелые частицы в составе космических лучей". Одним из его оппонентов был Скобельцын. Он высоко оценил и методику, разработанную диссертантом, и полученные им результаты. В отзыве Скобельцын писал: "... можно констатировать, что в представленной диссертации мы имеем выдающуюся работу... Обнаруженное (автором) впервые в мире новое явление — наличие в большом числе вторичных медленных мезотронов — в настоящее время констатировано также и другими наблюдателями. Этот результат представляет, несомненно, большой интерес, в особенности, поскольку он, видимо, совершенно не укладывается в рамки того круга явлений, которые могут быть предсказаны принятой в настоящее время теорией".

В отзыве Скобельцын особо отметил высокую эрудицию Векслера — знание им ядерной физики и физики космических лучей. Векслер всего четыре года занимался исследованием космических лучей, а уже настолько хорошо ориентировался в проблеме, что это специально отметил человек с многолетним опытом, хорошо знакомый с состоянием дел и обычно скупой на похвалу. И на протяжении всей своей жизни если Владимир Иосифович начинал заниматься чем-либо, то быстро вникал в суть проблемы и выходил на передний край исследования.

Война прервала проведение Эльбрусской экспедиции. ФИАН был эвакуирован в Казань. Физики переключились на военную тематику. Первоначально Векслер с группой сотрудников стал разрабатывать установку, которая позволила бы определить местоположение самолета по шуму, исходящему от его мотора. Была создана аппаратура, которой оснащались армейские рупоры-звукоулавливатели. Правда, вскоре появились радиолокаторы. Они определяли положение самолета с гораздо большей точностью и к тому же не так зависели от погоды, как акустические методы наблюдения. Звукоулавливатели были сняты с вооружения. Однако в гидроакустике применение идеи Векслера, основанной фактически на характерном для ядерной физики методе совпадений, оказалось плодотворным.

Предложение о разработке гидроакустического варианта В.И. Векслер и Е.Л. Фейнберг сделали в 1944 г. Фейнберг показал, что гидролокация подводных объектов может осуществляться с помощью системы гидрофонов, при этом следует учитывать корреляцию сигналов, поступающих от разных гидрофонов. Векслеру и Фейнбергу было выдано авторское свидетельство на пеленгатор, который впоследствии получил название коррелятора. В дальнейшем корреляционные методы обработки информации нашли широкое применение.

В трудных условиях эвакуации Владимир Иосифович занимался не только решением прикладных задач в помощь фронту. Он сознавал, что не меньшее значение имеет и развитие фундаментальной науки — физики атомного ядра, физики космических лучей, физики высоких энергий. В частности, он считал необходимым продолжить высокогорные исследования по физике космических лучей. База на Эльбрусе попала в опасную прифронтную зону, надо было искать другое место. И оно было найдено в Средней Азии, в центре Восточного Памира, в урочище Чечекты, на высоте 3860 м над уровнем моря. Здесь находилась Памирская биостанция Академии наук, на этой же площадке было решено организовать и высотную станцию по изучению космических лучей. К ее созданию приступили в 1944 г., и тогда же были проведены первые измерения. Организатором и руководителем всех работ был Векслер. В 1946 г. началось строительство большого здания для экспедиции ФИАНа, а уже летом 1947 г. стало возможным проводить измерения круглый год.



В.И. Векслер с женой Ниной Александровной Сидоровой на Памире. Чечекты, 1947 г.

Векслер был руководителем Памирской экспедиции в 1944–1946 гг., затем передал руководство экспедицией и лабораторией космических лучей ФИАНа Н.А. Добротину. Сам же он к тому времени уже полностью переключился на физику ускорителей (об этом речь пойдет ниже).

Эксперименты, которые проводились на Памирской станции ФИАНа под руководством Векслера, позволили существенно расширить наши знания о составе космических лучей и взаимодействии элементарных частиц при высоких энергиях. До этих исследований бытовало мнение, что космические лучи состоят из электронов высокой энергии. Когда такой электрон попадает в вещество, он образует так называемую электронно-фотонную лавину, развитие которой было достаточно подробно рассмотрено в ряде теоретических работ. Измерения на Памире привели к открытию нового типа ливней, точнее говоря, к пониманию того факта, что развитие ливня определяется как электромагнитными, так и ядерными взаимодействиями. В таких ливнях происходило не только "размножение" электронов и фотонов, но и множественное рождение других частиц, которые активно взаимодействовали с атомными ядрами вещества. Впоследствии эти ливни получили название электронно-ядерных.

По существу, исследование ядерных каскадов открыло новое научное направление — физику высокой энергии, что отнюдь не одно и то же с ядерной физикой. Для целей ядерной физики необходимы энергии первичных частиц на уровне единиц или десятков мегаэлектронвольт. Они обеспечивались в то время разнообразными высоковольтными ускорителями, а также изобретенными в 1930-х годах циклотронами, получившими распространение в разных лабораториях мира, в том числе и в СССР. Однако в своем классическом варианте циклотрон мог обеспечить только нерелятивистскую энергию, даже и сейчас при довольно изощренных методах фокусировки он позволяет достигнуть лишь одного-двух гигаэлектронвольт. Уже в описываемые годы была видна заманчивая область более высоких энергий, обещавшая принципиально новую физику, однако для этого необходимы были энергии частиц, достижимые только в космических лучах, интенсивность которых не только очень мала, но еще и экспоненциально падает с энергией. Неудивительно, что для человека с характером и способностями Векслера создание "искусственных" космических лучей, свободных от этого "природного недостатка", стало делом всей последующей жизни.

Пожалуй, по складу характера Владимир Иосифович был изобретателем-одиночкой, хотя и щедро делившимся идеями с окружающими. Так или иначе, но в коллективе физиков-космиков некоторое время ходили слухи, что он занят каким-то очень специальным делом. Прямых соавторов в этом у него не было. Даже самое первое обсуждение предлагавшихся идей было встречено не очень серьезно — уж слишком они выпадали из общего круга интересов.

Как упоминалось, ФИАНОм, вернувшись к тому времени в Москву, руководил С.И. Вавилов — человек, обладавший великолепной эрудицией и чутьем нового. В данном случае, лишь бегло ознакомившись с идеями Векслера, он мгновенно освободил его от всех остальных дел и отправил в дом отдыха, обязав за две недели написать соответствующую статью. Векслер опубли-

ковал в *Докладах АН СССР* две статьи, первая из которых относилась к изобретению электронного (читай: релятивистского) циклотрона, а вторая открыла вообще новую эпоху в физике высоких энергий и ускорителей.

Новый ускоритель — микротрон был основан на простой и изящной идее. Существенный недостаток классического циклотрона — постепенное отставание с ростом энергии частоты обращения от частоты ускоряющего поля — был использован во благо. Заметив, что период обращения в однородном магнитном поле линейно зависит от полной энергии, В.И. Векслер предложил обеспечить на каждом обороте настолько большой ее прирост, чтобы частица отставала от поля ровно на один период, повторяя тем самым условия ускорения на предыдущем обороте. Правда, осуществить эту идею можно только для сильно релятивистских частиц (электронов). Кроме того, чтобы обеспечить достаточно большой сдвиг фазы, требовалась мощная микроволновая электроника, в то время только начавшая развиваться (отсюда приставка "микро" в названии "микротрон"). Да и магнитное поле не могло быть большим, вследствие чего возрастал размер ускорителя. Впрочем, в дальнейшем усилиями Института физических проблем и ФИАНа эти недостатки были преодолены, и на основе изящной схемы был создан вполне работоспособный ускоритель электронов средних энергий, сыгравший важную роль во многих прикладных задачах. Более того, замена единственного ускоряющего промежутка на линейный ускоритель, помещенный в разрез магнита, с сохранением принципа пропуска нескольких периодов на одном обороте привела к концепции так называемых рециркуляторов. К ним относится, например, один из лучших электронных ускорителей мира СЕВАФ (США).

Полагаем, что именно микротрон натолкнул Векслера на его главное открытие — принцип автофазировки. Во всяком случае, не мог Владимир Иосифович не понимать, что в микротроне крайне обостряется проблема отклонения от строго резонансных условий, ибо частица, даже чуть-чуть недополучившая энергию на одном из оборотов (т.е. недостаточно ушедшая по фазе), мгновенно выпадала бы из описанной идеальной схемы. Наверное, именно так и родилась идея автоматического поддержания фазы.

В современной трактовке принцип фазовой устойчивости проще всего связать с явлением захвата частиц волной. Если фазовая скорость волны равна скорости попутной частицы, то последняя в своей системе отсчета чувствует почти постоянное поле, близкое к потенциальному. При достаточно большой амплитуде горбы потенциальной энергии удерживают частицу в ложбине между ними, обеспечивая постоянство фазы в среднем по периоду колебаний (так называемых синхротронных колебаний) в потенциальной яме. Если такая внутренняя устойчивость обеспечена, то скорость волны можно увеличивать во времени и пространстве, и все захваченные частицы будут ускоряться. Очевидные ограничения — невозможность превышения скорости света и нежелательность слишком резких рывков — составили так называемые условия Векслера. Остальное же — обеспечение достаточно медленных волн поля и перенос основного принципа на циклические ускорители — с физической (конечно, не с технической!) точки зрения вообще было тривиально, имело второстепенное значе-

ние. Сразу же были предложены варианты применения принципа к ускорителям с постоянным магнитным полем (фазотроны или синхроциклотроны), с переменным полем (синхрофазотроны и синхротроны) и вообще без магнитного поля (линейные ускорители).

Характерная для Владимира Иосифовича аргументация, всегда отдававшего предпочтение качественным соображениям перед строгой теорией, и кажущаяся простота принципа не могли не вызвать некоторого скепсиса. Обстановка вокруг идей Векслера, пожалуй, хорошо иллюстрируется решением жюри конкурса научных работ ФИАНА: "Если работа В.И. Векслера правильна, то не нам давать ему премию, а если неправильная, то тем более премии не давать... Но работа интересная, ее нужно поддержать".

Фиановские легенды утверждают, что очень известный физик даже доказал невозможность автофазировки чуть ли не в тот день, когда был запущен первый синхротрон. Соответствующие теоретические представления были развиты благодаря советам Е.Л. Фейнберга и работам учеников Владимира Иосифовича — Э.Л. Бурштейна, А.А. Коломенского и М.С. Рабиновича, но полное признание пришло только после драматического события: независимой публикации аналогичной идеи Э. Макмилланом из Лоуренсовской лаборатории в США.

Мы называем это событие драматическим не только из-за персональных переживаний Векслера. Еще свежа была в памяти ФИАНа не очень чисто плотная история с экспериментальным открытием Л.И. Мандельштамом и Г.С. Ландсбергом комбинационного рассеяния, странным образом лишенным Нобелевской премии в пользу индийского физика. Кстати, начиная именно с этого события, а также с открытия излучения Вавилова — Черенкова и работ Векслера, несколько высокомерно-нисходительное отношение Запада к советской физике быстро стало меняться.

Всеми этими обстоятельствами и был, вероятно, обусловлен несколько суховатый стиль письма, посланного Владимиром Иосифовичем по совету С.И. Вавилова в редакцию "The Physical Review". Векслер писал: "В двух статьях, появившихся в 1944 г. под вышеуказанным названием ("О некоторых новых методах ускорения релятивистских частиц"), автор настоящей публикации указал на два новых принципа ускорения релятивистских частиц, которые обобщают резонансный метод... Таким образом, названные выше статьи полностью охватывают содержание заметки Макмиллана, в которой нет ссылки на мои исследования".

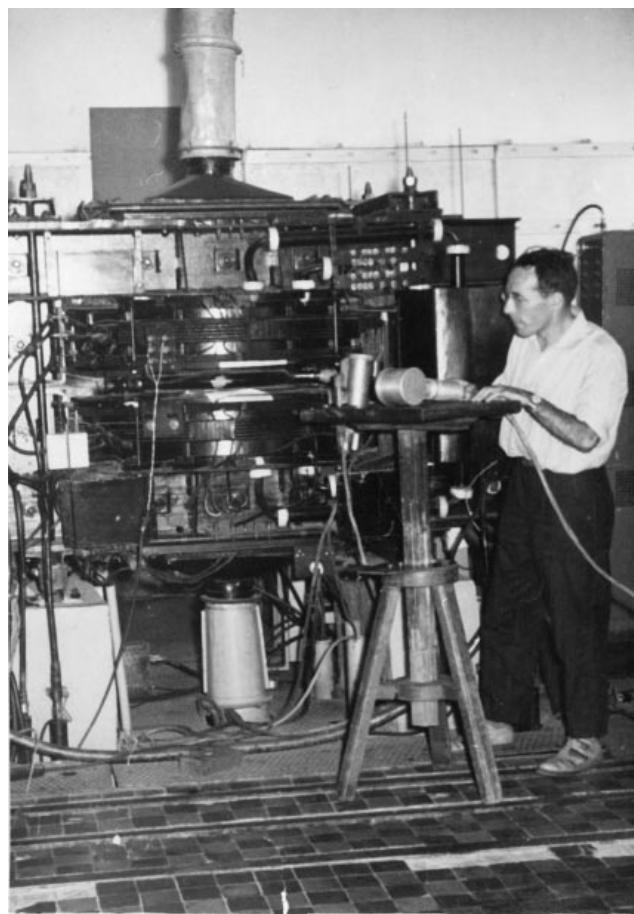
К чести Макмиллана, ответ последовал незамедлительно: "Я хотел бы объяснить те обстоятельства, которые сложились вокруг моей заметки, ... для того, чтобы прояснить произведенное ею неприятное впечатление. В 1944 г. и практически в течение всего 1945 г. журналы, в которых была опубликована Ваша работа, были мне недоступны... Поэтому, когда я послал свою заметку в сентябрьский выпуск "Phys. Rev.", я совсем не подозревал о Вашей работе... Хочу снова заверить Вас, что мое невнимание к Вашей работе было непреднамеренным и что, узнав о ней, я хотел бы подтвердить, что Ваше открытие предшествовало моему".

Знаменитый Э. Лоуренс, получивший в 1939 г. Нобелевскую премию за изобретение циклотрона, выступил со специальным заявлением о приоритете В.И. Векслера,

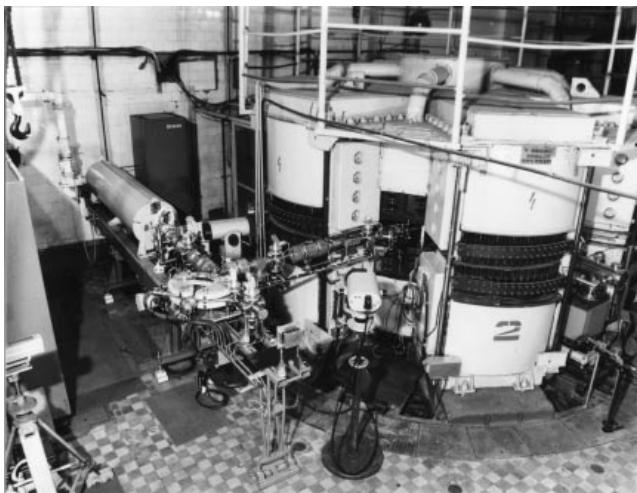
подчеркнув, что в развитии науки есть своя логика, приводящая к почти одновременному рождению открытий в разных частях света.

Кроме приоритетных вопросов, драматизма добавляла и общая обстановка в ядерной физике. В середине 1940-х годов ускорители довольно естественно стали частью ядерных проектов и в СССР, и в США со всеми вытекающими отсюда положительными и отрицательными следствиями. С одной стороны, иначе вряд ли тогда могли быть осуществлены столь дорогостоящие и сложные проекты, особенно в послевоенном СССР. С другой стороны, неизбежная секретность надолго прервала обмен информацией в области ядерной физики. Наверное, именно этим объясняется, почему Нобелевский комитет прошел мимо открытия Векслера — Макмиллана, хотя впоследствии справедливость была частично восстановлена присуждением им почти столь же почетной премии "Атом для мира".

Со свойственным ему оптимизмом и энтузиазмом Владимир Иосифович еще в военное время пытался соорудить первый синхротрон силами института. Под руководством Б.Л. Белоусова установка действительно была построена, но при монтаже и запуске возникли трудности, которые неизменно возникают во всяком новом деле, в частности возникли трудности с созданием необходимого магнитного поля. Первый магнит оказался низкого качества. Его пришлось заменить, и это задержало запуск. Ускоритель начал работать в



Первый ускоритель синхротрон С-3, ускорявший электроны до энергии 30 МэВ. (Б.С. Ратнер во время работы на ускорителе.)



Ускоритель С-25 — синхротрон, ускорявший электроны до энергии 250 МэВ.

середине января 1948 года. Он разгонял электроны до энергии 30 МэВ. Одновременно в ФИАНе приступили к сооружению, но уже с привлечением промышленности, синхротрона на энергию 250 МэВ. Он был запущен в 1949 г., что сразу позволило начать эксперименты по фотомезонной физике. Так было положено начало руководимой Векслером лаборатории под несколько таинственным названием "Эталонная", быстро ставшей самой крупной в ФИАНе. Между прочим, тогдашние сотрудники Владимира Иосифовича отмечают, что он охотно делился с ними своими идеями и соображениями, но категорически отказывался от включения своей фамилии в список авторов публикуемых статей. Может быть, отчасти такой стиль общения и руководства способствовал тому, что в лаборатории выросла плеяда блестящих самостоятельных экспериментаторов в совершенно новой области физики, отмеченных впоследствии несколькими Государственными премиями.

В этой связи несколько слов следует сказать и о синхротронном излучении, столь модном сейчас в исследованиях по физике твердого тела, биологии, нанотехнологиям и т.д. Теоретически предсказанное еще в начале прошлого века, оно экспериментально наблюдалось лишь на относительно небольших бетатронах в длинноволновой области спектра. Хотя для В.И. Векслера как ускорительщика синхротронное излучение в первую



Гигантский ускоритель протонов в Дубне — синхрофазотрон на 10 млрд электронвольт.

очередь было препятствием для повышения энергии ускорителей, оно сразу после запуска синхротрона стало объектом самостоятельного изучения и использования (в частности, для измерения размеров сгустка в ускорителе).

Известность и авторитет Векслера быстро росли, и еще до физического запуска синхротрона он возглавил проект гигантского по тем временам протонного синхротрона (синхрофазотрона) на энергию 10 ГэВ, запущенного в 1957 г. в Дубне. (Ближайший по энергии американский ускоритель — Бэватрон был рассчитан лишь на 6,3 ГэВ.) Даже сейчас это сооружение поражает своими масштабами, обусловленными господствовавшими тогда представлениями о методах удержания ускоренных частиц в кольцевой вакуумной камере. Достаточно сказать, что вес электромагнита, остающийся самым большим в мировой практике, составляет 36 тыс. т, а запасенная магнитная энергия была бы достаточна, чтобы поднять этот гигантский вес на высоту около метра. Недаром Н. Бор даже через несколько лет, когда уже были освоены и более высокие энергии, стоя на смотровой площадке синхрофазотрона, сказал: "Чтобы задумать и построить такое сооружение, нужна была очень большая смелость". Именно этим качеством Векслер и обладал, как мало кто другой.

Сопутствующие инженерные трудности были успешно преодолены благодаря прекрасно организованному сотрудничеству самых разнопрофильных научных и производственных организаций. Запуск синхрофазотрона стал признанным в мире триумфом советской науки, а сообщение о нем Векслера на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева 1958 г.) произвело сенсацию. В 1959 г. за эту работу В.И. Векслеру вместе с Л.П. Зиновьевым, Д.В. Ефремовым, Е.Г. Комаром, Н.А. Моносоном, А.М. Столовым, А.Л. Минцем, Ф.А. Водопьяновым, С.И. Рубчинским, А.А. Коломенским, В.А. Петуховым и М.С. Рабиновичем была присуждена Ленинская премия. В 1958 г. В.И. Векслер (член-корреспондент с 1946 г.) избирается действительным членом АН СССР.

Синхрофазотрон (в то время самый большой ускоритель в мире) до сих пор находится в строю, и на нем был выполнен целый ряд работ мирового уровня. Естественно, интересы Владимира Иосифовича все больше смещались в Дубну, где он основал Лабораторию высоких энергий и провел всю оставшуюся и столь короткую жизнь (он скончался 22 сентября 1966 г.). Память о нем в этом прекрасном городе — не только ускорительные установки Объединенного института ядерных исследований, но и красивейшая набережная, названная именем Векслера. Кстати, его имя носит и улица в Европейском центре ядерных исследований (CERN).

Во второй половине 1950-х годов нам, молодым сотрудникам ФИАН, выпало счастье быть свидетелями зарождения идей Векслера, которые в те годы не без оснований рассматривались как фантастические. В опубликованных впоследствии статьях их официальное обоснование начиналось с того, что магнитное поле ускорителя, технически крайне дорогое, используется весьма неэффективно, так как присутствует даже там, где частиц нет и оно совсем не нужно. Следовательно, электромагнитное поле целесообразно создавать только в непосредственной окрестности ускоряемых частиц с

помощью дополнительных зарядов и токов. Более правдоподобна история о том, как И.Е. Тамм однажды обронил, что эффект Черенкова обратим: если достаточно быстрая частица в среде теряет энергию и тормозится, то покоящаяся частица при обдуве ее быстрой средой должна ускоряться. Само по себе это очевидно, но суть идеи состоит в том, что увлекающая сила пропорциональна квадрату заряда, как и должно быть для радиационных процессов. Поэтому на сгусток из  $N$  одинаковых частиц должна действовать сила, пропорциональная  $N^2$ , тогда как масса сгустка возрастает только как  $N$ . Поскольку число частиц может быть весьма велико, темп ускорения резко увеличивается. Из-за характерной зависимости от числа частиц, типичной для этого класса физических процессов, метод получил название когерентного (впоследствии — коллективного) ускорения.

С самого начала было ясно, что единственной материальной средой, обдувающей электронный сгусток, может быть только сильноточный электронный пучок. Однако по тем временам его требуемые параметры казались немислимыми. Несколько лучшие перспективы имело когерентное рассеяние достаточно мощной электромагнитной волны на сгустке квазинейтральной плазмы. В этом случае достижимая энергия была бы относительно невелика, но отчасти это искупалось бы большим количеством ускоряемых частиц. Наконец, еще один механизм, предложенный В.И. Векслером, состоял в ударной передаче энергии сгустка большого числа электронов малому числу протонов, также сконцентрированных в компактный сгусток.

Физические возможности, открываемые использованием коллективного ускорения, были настолько разнообразны, что, по воспоминаниям А.А. Коломенского и М.С. Рабиновича, практически каждая неделя начиналась с заявления несколько смущенного Владимира Иосифовича: "А я опять изобрел ускоритель...". Метод коллективного ускорения вместе с идеологически близкими предложениями Я.Б. Файнберга и А.М. Будкера произвели буквально сенсацию на первом Международном симпозиуме по ускорителям в CERNе. С этого момента стали восстанавливаться контакты между ускорительщиками разных стран. Неожиданность идеи была настолько велика, что вызвала недоумение у одного из патриархов физики, получившего, к вящей радости аудитории, мгновенный и довольно экспрессивный ответ Владимира Иосифовича: "А это у нас каждому студенту известно".

В несколько эйфорийной атмосфере этих предложений как-то отступало на второй план, что даже сколь угодно малый сгусток — это не элементарная частица, что ему обязательно свойственны внутренние степени свободы. Очевидным было только требование удержания его как целого. Даже в этих рамках техническое осуществление коллективного ускорения оказалось далеко не простым. Первоначальный энтузиазм многочисленных лабораторий быстро сменился пониманием того, что требуются долговременные и терпеливые исследования в совершенно новой области коллективного взаимодействия очень большого числа частиц, до некоторой степени аналогично тому, как это происходило в управляемом термоядерном синтезе. Самыми настойчивыми оказались одна американская и одна немецкая лаборатории и, конечно, лаборатория Век-

слера в Дубне. Под руководством ближайшего из учеников Векслера, В.П. Саранцева, было сооружено и опробовано несколько модификаций смекотрона, названного так из-за сходства ускоряющего электронного сгустка с кольцом дыма, выпускаемого курильщиком. Работы долгое время оставались секретными и были опубликованы только после кончины Векслера в 1966 г.

Несмотря на колоссальные пройденные и предстоящие трудности, проблематика коллективных методов ускорения не теряет актуальности и, безусловно, еще заявит о себе, но, к сожалению, уже без Владимира Иосифовича. Наиболее впечатляющие достижения были получены в последнее время на базе возбуждения плазменных волн большой амплитуды мощным коротким лазерным импульсом (так называемое кильватерное ускорение).

Векслер сделал в жизни удивительно много, сочетая работу физика-экспериментатора, изобретателя и организатора науки. Напомним лишь о созданных им двух крупнейших лабораториях — в Москве и в Дубне, отделе новых методов ускорения в Объединенном институте ядерных исследований, Отделении ядерной физики АН СССР, которое он возглавил, об организации двух научных журналов *Ядерная физика* и *Атомная энергия*, а также о деятельности в директорате Объединенного института ядерных исследований. В этом маленьком человеке с довольно хрупким здоровьем жили удивительная энергия и настойчивость. Да, он не был голубем, как сказал один из его учеников. Он мог ошибаться, иногда был предвзят, мог и ненароком обидеть. Но он всегда находил в себе силы публично признать свои ошибки, даже в споре с младшим научным сотрудником. Только после его смерти выяснилось, что он помогал материально (тайно!) нескольким студентам, будучи сам крайне неприспособленным в жизни. Имея за плечами трудную юность, он, как и его супруга, был комсомольцем 1920-х годов в лучшем смысле этого слова и, как многие из того поколения, испытывал впоследствии серьезные внутренние конфликты. Здесь трудно описать сколько-нибудь подробно жизнь и деятельность В.И. Векслера. Для этого больше подошла бы книга. Надеемся, что она будет написана.

PACS number: 25.20. – x

## В.И. Векслер и развитие ядерной физики в Советском Союзе

Б.С. Долбилкин, Б.С. Ратнер

### 1. Введение

Отмечая 100-летие со дня рождения академика В.И. Векслера (4 марта 1907 г.), кратко проследим его становление как выдающегося ученого. Оно тесно связано с развитием в нашей стране физики ядра и элементарных частиц — он был одним из первых исследователей космических лучей в середине 30-х годов. После войны Векслер возглавил большие коллективы, в частности ФИАНа и ОИЯИ, изучающие проблемы микромира на ускорителях, построенных за десятилетие 1948–1957 гг. на основе открытого им в 1944 г. принципа автофазировки. Первый отечественный ускоритель



электронов — синхротрон С-3 на энергию 30 МэВ был запущен группой энтузиастов во главе с В.И. Векслером в 1948 г. и около 40 лет являлся основным инструментом физических исследований в Лаборатории фотоядерных реакций ФИАНа (с 1971 г. — ИЯИ РАН).

Создание Лаборатории фотоядерных реакций (ЛФЯР ФИАН) неразрывно связано с именем Владимира Иосифовича Векслера после сооружения в начале 1948 г. первого отечественного и третьего в мире ускорителя электронов на энергию 30 МэВ — синхротрона С-3 в Эталонной лаборатории ФИАНа на территории корпуса "Б" старого здания ФИАНа по адресу 3-я Миусская ул., 3. Название лаборатории было обусловлено обстановкой секретности, связанной с атомным проектом, в котором участвовали специалисты, работавшие в то время в области атомного ядра.

Запуск синхротрона С-3 был для В.И. Векслера завершением первого этапа его становления как ученого, во время которого у него возникло твердое убеждение в необходимости нового подхода в экспериментальной ядерной физике для исследования структуры ядра и элементарных частиц, а именно перехода от изучения космических лучей, где Векслером были получены совершенно новые результаты, к экспериментам на ускорителях элементарных частиц с энергией, сравнимой с первичной энергией космического излучения.

Стремительное развитие экспериментальной ядерной физики в Советском Союзе в целом и в ФИАНе в частности было во многом определено В.И. Векслером (далее — В.И.).

Физические исследования в начале XX века проводились как в Академии наук, так и вне ее (Физико-технический институт в Ленинграде, Физическая лаборатория П.Н. Лебедева в Москве). Академия и Физико-математический институт находились в Ленинграде. В октябре 1928 г. из его состава выделился в отдельный институт наиболее обширный сейсмический отдел. После этого весь штат Физико-математического института состоял из директора, двух зав. отделами (зав. физическим отделом — Т.П. Кравец) и четырех научных сотрудников. В 1932 г. физический отдел Института возглавил С.И. Вавилов и началась его реорганизация. Летом 1934 г. по постановлению Правительства Академия и в том числе Физико-математический институт были переведены в Москву. Институт расположился в здании на 3-й Миусской улице, построенном московской общественностью в 1912 г. для лаборатории П.Н. Лебедева. Вскоре математики окончательно выделились из его состава, и Институт получил свое современное наименование — Физический институт им. П.Н. Лебедева. Именем П.Н. Лебедева как бы связывалась старая академическая школа физиков с московской [1, с. 43].

В те же годы происходило становление научного работника В.И. Векслера. После окончания в детдоме в 1925 г. школы 9-летки он по комсомольской путевке был направлен на ситценабивную фабрику им. Свердлова учеником и подручным монтера. В 1927 г. по рекомендации МГК ВЛКСМ поступил в Институт народного хозяйства им. Плеханова на электротехнический факультет. При реорганизации вузов был переведен со всем факультетом в МЭИ, который окончил экстерном в 1931 г. по специальности "рентгенотехника". Одновременно с учебой в 1930 г. поступил в ВЭИ (Всесоюзный электротехнический институт), где работал лаборантом,

старшим лаборантом, научным сотрудником, ст. научным сотрудником и зав. лабораторией. В 1934 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему "Измерение интенсивности рентгеновских лучей с помощью счетчиков Гейгера — Мюллера и разрядной камеры" (Автобиография В.И. Векслера от 11.02. 1953 г.) [2].

В то время многие приборы приходилось делать самим. В частности, В.И. сам изготавливал счетчики Гейгера, позднее — пропорциональные счетчики. Трудно себе представить столь короткий путь от поступления в вуз до получения ученой степени и от лаборанта в научно-исследовательском институте до зав. лабораторией.

Не менее яркой была деятельность В.И. после прихода в ФИАН и в дальнейшем. Он поступил 1.09.1936 г. в аспирантуру (или докторантуру, как тогда именовалась последняя) по рекомендации академика С.И. Вавилова в Лабораторию атомного ядра, руководителем которой он был в то время. В нее входило только несколько молодых специалистов, впоследствии широко известных ученых, — И.М. Франк, Л.В. Грошев, П.А. Черенков, С.Н. Вернов, М.А. Марков, Н.А. Добротин и ряд других, большая часть которых занималась Эльбрусскими космическими лучами. Исследования проводились Эльбрусской комплексной научной экспедицией (ЭКНЭ), в те годы организованной Институтом теоретической геофизики и состоявшей из физиологов, биохимиков, метеорологов, физиков. В.И. Векслер после перехода в ФИАН вскоре был назначен руководителем группы физиков по изучению космических лучей, участвовавших в работе ЭКНЭ. Измерения проводились на высотах от 2200 м (Терскол) до 4200 м ("Приют 11") и иногда 5300 м (седловина Эльбруса) в течение 1937–1940 гг. Вся аппаратура, основу которой составляли пропорциональные счетчики, разработанные В.И., изготавливалась в ФИАНе; в начале лета ее поднимали в горы и до осени проводили измерения. Доставка груза была большой проблемой, особенно на "Кругозор" и "Приют 11", куда можно было добраться только на ишаках, а поднять аппаратуру выше можно было на своих плечах или прибегая к помощи носильщиков [3]. В результате измерений было обнаружено, что на указанных высотах в составе космического излучения находится много вторичных, более тяжелых, чем электроны, частиц, идентифицированных как медленные мезоны. Докторскую диссертацию на тему "Тяжелые частицы в космических лучах" В.И. защитил в 1940 г. В то время это был передний край физики ядра, Юкава в 1935 г. предсказал мезотрон (мезон по общепринятой терминологии, введенной Гейзенбергом), а в 1937 г. с помощью фотопластинок, поднятых на воздушном шаре, были получены данные о наличии в атмосфере частиц более тяжелых, чем электроны.

Параллельно с работой в экспедиции Президиумом АН СССР 17 мая 1938 г. В.И. утверждается зам. заведующего ЛАЯ и членом Ученого совета ФИАНа. Несколько позднее, 25.11.1938 г., принимается важнейшее для развития ядерной физики Постановление Президиума АН СССР "Об организации в Академии наук работ по исследованию атомного ядра", в котором, в частности, было сказано: (...)

"4. Просить СНК СССР разрешить АН приступить в 1939 г. к строительству нового здания Физического



института с таким расчетом, чтобы возможно скорее сосредоточить работы по ядерной физике в Москве...

7. Создать при Физико-математическом Отделении АН СССР постоянную комиссию по атомному ядру в составе:

- 1) акад. С.И. Вавилова — председатель,
- 2) акад. А.Ф. Иоффе,
- 3) проф. И.М. Франка,
- 4) проф. А.И. Алиханова,
- 5) И.В. Курчатова,
- 6) Шпетного (украинский ФТИ),
- 7) В.И. Векслера — секретарь..."

Началом реального перехода В.И. от исследования космических излучений к разработке ускорителей элементарных частиц можно считать его участие в "циклотронной бригаде", созданной по инициативе С.И. Вавилова в 1940 г. в ФИАНе для постройки циклотрона. Кроме В.И. Векслера в нее входили С.Н. Вернов, Л.В. Грошев, П.А. Черенков и теоретик Е.Л. Фейнберг.

Первый в мире ускоритель — циклотрон на энергию протонов 1,2 МэВ был создан Лоуренсом в лаборатории Беркли. Попытки получить большие энергии (60 МэВ) на ускорителях этого типа окончились неудачей — после ускорения до 20 МэВ пучок частиц разваливался. В Советском Союзе циклотрон с диаметром полных носителей наконечников  $\sim 1$  м был сооружен во ФТИ в Ленинграде И.В. Курчатовым и запущен в 1940 г. Расчеты, сделанные в циклотронной бригаде, привели к выводу, что верхний предел энергии этого типа ускорителей составляет около 25 МэВ. Дальнейшую работу в этом направлении приостановила война.

ФИАН находился в эвакуации в Казани, физики переключились на оборонную тематику. После возвращения в Москву обсуждения проблемы, как преодолеть релятивистский барьер, ограничивающий предельную энергию ускоряемых частиц, возобновились. И хотя В.И. был чрезвычайно занят подготовкой первой Памирской экспедиции 1944 г., мысли о возможности создания ускорителей с энергиями на порядки большими, чем в циклотронах, постоянно "сидели" в его голове [3]. И в начале 1944 г. у В.И. возникла идея, как использовать релятивистский эффект для преодоления барьера, вскоре оформившаяся в открытие нового принципа ускорения частиц — автофазировки. Первая короткая статья В.И. была опубликована в журнале *Доклады Академии наук* (8) за 1944 г. под названием "Новый метод ускорения релятивистских частиц". Вывод из статьи звучал так: "Эта автоматически осуществляемая фазировка, обусловленная тем, что величина интервала времени между двумя последовательными ускорениями зависит от ускоряющей разности потенциалов, является общим свойством ускорителей подобного типа, позволяющим (по крайней мере, в принципе) осуществить ускорение самыми разнообразными способами и, в частности, даже в том случае, когда магнитное поле будет возрастать со временем".

Во второй статье "О новом методе ускорения релятивистских частиц" в *ДАН* (9) 1944 г. рассматривалась автофазировка в переменном во времени магнитном поле. Ускорители с постоянным полем были названы В.И. микротронами, с переменным — по предложению Э. Макмиллана (годом позже Векслера, независимо открывшего явление автофазировки) синхротронами. В.И. был готов немедленно взяться за воплощение в

жизнь своей идеи, несмотря на тяжелую ситуацию в стране и полное отсутствие опыта не только создания, но и эксплуатации каких-либо ускорителей. Такой подход был характерным для всей его деятельности.

## 2. Создание и запуск синхротрона С-3 (1945–1947 гг.)

Создание первого ускорителя было невероятно сложным. Таких устройств, как многотонные электромагниты с обмотками переменного тока, высокочастотные системы большой мощности, высоковакуумные системы, практически не было в стране. В это же время, в 1945 г., вскоре после победы в Отечественной войне, начал реализовываться атомный проект с задачей разработки атомного оружия, что в кратчайшие сроки привело к взрывному развитию атомной промышленности и ядерной физики. Вновь организованная лаборатория В.И. Векслера была включена в 1946 г. по постановлению правительства в атомный проект для сооружения ускорителей с целью быстрого развития ядерной физики и названа по соображениям секретности "Эталонной". Вскоре рядом со старым зданием ФИАНа на Миуссах были построены два здания: одно — для лаборатории Векслера (корпус "Б"), другое — для ЛАЯ, также включенной в атомный проект.

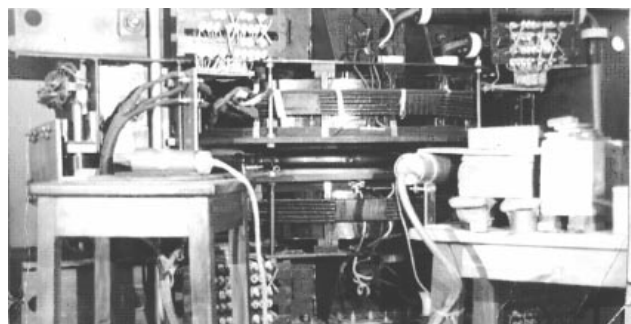
В 1946 г. лаборатория В.И. Векслера приступила к практической работе по созданию синхротрона с максимальной энергией электронов 30 МэВ. На работу был принят только окончивший МГУ физик Б.Л. Белоусов, ставший руководителем группы по сооружению синхротрона. Для проведения теоретических расчетов В.И. привлек аспиранта Е.Л. Фейнберга, теоретика М.С. Рабиновича, перед которым была поставлена задача рассмотреть проблемы устойчивости пучка будущего реального ускорителя. К середине 1946 г. в группе Белоусова работали только два человека — инженер Э.Г. Горжевская и лаборант И.Д. Кедров. В июне 1946 г. к ним присоединился демобилизованный из армии Б.С. Ратнер, перед войной окончивший МЭИ [4]. К концу 1946 г. в группе синхротрона работали уже 19 человек. Трудно представить, но к этому времени не только был собран синхротрон, но и проверены все системы и сделаны пробные запуски. С.И. Вавилову и В.И. удалось добиться изготовления электромагнита на Московском трансформаторном заводе; в Институте физических проблем была изготовлена вакуумная камера. Магнит располагался на втором этаже, там же находились вакуумная камера и система откачки, аккумуляторная батарея, подключенная к резонансному контуру, и пульт управления. Под ними на первом этаже был установлен высоковольтный трансформатор для питания магнита. Сначала планировалось в качестве инжектора воспользоваться уже изготовленным радиоактивным источником электронов, но в процессе работы было принято решение предварительно ускорять электроны до  $\sim 3$  МэВ в бетатронном режиме вихревым электрическим полем, а затем до максимальной энергии 30 МэВ — в режиме синхротрона. Для этого в центре магнита был собран сердечник из отрезков пермаллоевой проволоки, изолированных бакелитовым лаком с обмоткой, создававшей такое поле, и на нем смонтирована корректирующая обмотка. Положение равновесной бетатронной орбиты определялось минимумом градиента элект-

рического поля, который "нулевым методом" с высокой точностью измерялся обмотками, навитыми на плексигласовую шайбу, помещенную по радиусу зазора магнита, для ее перемещения на сердечнике была смонтирована корректирующая катушка. Для фокусировки пучка необходима определенная форма полюсных наконечников, дающая нужную зависимость магнитного поля от радиуса магнита. Она была подобрана В.Е. Писаревым, использовавшим специально изготовленный магнит. Над созданием высокочастотного электрического поля работали Е.М. Мороз, А.В. Беляк, Н.Г. Котельников. Сначала планировалось делать врезной резонатор, для чего надо было резать ускорительную камеру. Сотрудники предложили и сделали не требующий этого накладной резонатор, состоявший из двух половин на полистироловых изоляторах. Рационализация сэкономила месяцы работы. Для удаления электрического заряда от незахваченных в процесс ускорения электронов, скапливавшихся на внутренней поверхности камеры, она была покрыта тонким слоем серебра по методике, разработанной В.Г. Ларионовой. Чтобы избавиться от токов Фуко, в проводящем слое камеры была сделана щель. На инжектор подавался импульс амплитудой 30 кВ и длительностью 5 мкс. Каждый цикл ускорения начинался при нулевом значении магнитного поля, определяемого импульсом от катушки, намотанной на пермаллоевый сердечник, находящийся в зазоре магнита. Сдвиг во времени между инжекцией и подачей ускоряющего электрического поля варьировался формирующим устройством. Оно, как и большинство аппаратуры, было изготовлено в лаборатории.

Осенью 1946 г. начались пробные запуски ускорителя в бетатронном режиме, продолжавшиеся примерно два месяца. При этом постоянно велась доводка аппаратуры. Были уменьшена величина фазовой асимметрии магнитного поля, улучшен вакуум и т.д. Несмотря на это инжектированный в камеру импульс электронов после оборота разваливался, а причины отсутствия пучка на выходе были непонятны.

Большое началоство атомного проекта оказывало сильное давление на Векслера. Через некоторое время В.И. принял важное и смелое решение прекратить попытки запуска этого варианта ускорителя и создавать более совершенный. После анализа всех возможных слабых мест выявилась необходимость изготовить электромагнит со значительно большей рабочей областью. Он относился к тем немногим частям синхротрона, которые изготавливались промышленным способом. В первой половине 1947 г. в работе Эталонной лаборатории стали заметны преимущества от ее включения в атомный проект: улучшилось финансирование, снабжение, количество сотрудников, вступил в строй новый корпус. При Московском трансформаторном заводе было создано специальное конструкторское бюро (СКБ), занимавшееся электромагнитами для ускорителей.

По техническому заданию, разработанному в лаборатории, там сконструировали и изготовили новый электромагнит с большими габаритами и межполюсным зазором со специальными обмотками для компенсации фазовой асимметрии. С учетом полученного опыта модернизировались многие узлы синхротрона. По формам мастерских ФИАН на стекольном заводе были сделаны заготовки стеклянных ускорительных камер



Синхротрон С-3 перед запуском в конце 1947 г. (Вид со стороны выхода пучка.)

эллипсоидального сечения бóльших размеров, чем первоначальные. Стеклодувы института, братья Воронковы, сваривали полукольца и впаивали шлифы для установки инжектора и мишени, откачки камеры. После этого камера отжигалась в специально изготовленной электропечи. Новая вакуумная установка была сконструирована Ю.С. Ивановым. К этому времени в стране освоили производство высоковакуумных насосов и вакуумметров.

Новый ускоритель был смонтирован уже в новом здании — корпусе "Б". Электромагнит находился на первом этаже, в подвале под ним — агрегат питания на частоту 150 Гц (также новый) и конденсаторные батареи, образующие со вторичной обмоткой электромагнита резонансный контур. В конце 1947 г. все системы прошли пробные испытания. 28 декабря 1947 г. был произведен запуск ускорителя в режиме бетатрона. Ускоренный пучок электронов зарегистрировали при первом же включении напряжения на инжектор, которое было сделано Б.Л. Белоусовым, счетчиками Гейгера, установленными в разных точках зала. Все бывшие при этом сотрудники бросились качать В.И. К 11 января 1948 г. ускоритель работал в синхротронном режиме с проектными параметрами [5]:

Максимальное магнитное поле $H$	4200 Э
Стационарная орбита электронов $R$	21,6 см
Частота ускоряющего электрического поля	216 МГц
Длительность импульса пучка $t$	1–2 мкс
Интенсивность	10 электрон $c^{-1}$
Энергия электронов	30 МэВ

Один из участников создания синхротрона, Б.С. Ратнер, вспоминает о В.И. так [6]: "Душой работ по созданию ускорителя был В.И. Векслер. Он сумел за короткий срок организовать небольшой, но очень работоспособный коллектив, увлечь людей своей идеей и успешно решить весьма сложную задачу, потребовавшую объединенных усилий физиков (экспериментаторов и теоретиков), инженеров, техников и рабочих. В.И. Векслер всячески поощрял самостоятельность и инициативу своих сотрудников. Он не прибегал к мелочной опеке, но постоянным вниманием к работе каждого поддерживал ее весьма высокий темп: люди работали с утра до позднего вечера. При этом обстановка в лаборатории была спокойной, без нервозности и суеты, которые

нередко сопутствуют срочной работе. Ближайшим помощником В.И. Векслера был Б.Л. Белоусов: его группа непосредственно собирала и запускала синхротрон".

В работе над созданием и запуском синхротрона принимали участие: А.Я. Беляк, К.И. Блинов, Л.Н. Бородовская, С.С. Бородин, Э.Л. Бурштейн, Б.Б. Гальперин, В.И. Драган-Суцев, Ф.М. Елизаров, Ю.С. Иванов, И.Д. Кедров, А.А. Коломенский, А.П. Комар, Н.Г. Котельников, Д.Д. Красильников, В.Г. Ларионова, А.В. Макаров, Э.А. Манькин, Е.М. Мороз, А.А. Николаев, В.Е. Писарев, А.В. Поросятников, М.С. Рабинович, Б.С. Ратнер, И.О. Сталь, Г.М. Страховский, П.А. Черенков, К.В. Чехлов, В.Е. Якушкин, рабочие механических и стеклотрувной мастерских, приборной группы [6]. (Примерно через 30 лет магнит синхротрона передали Политехническому музею в Москве.)

Отчет по созданию и запуску синхротрона С-3 был написан в 1949 г. под названием "Отчет по установке". Первый отдел кодовое название "С-3" зачеркнул. О физических исследованиях на нем будет рассказано ниже.

Во время постройки синхротрона появилась информация об экспериментальном подтверждении принципа автофазировки. В Англии состоялся пуск синхротрона, переделанного из бетатрона, а в США — синхротрона на энергию 70 МэВ. Началось соревнование, и В.И. не собирался уступать первенство. Еще во время работы над синхротроном С-3 в Эталонной лаборатории началось проектирование и создание узлов нового более мощного ускорителя с энергией на порядок больше первого. В 1947 г. результаты были опубликованы в отчетах ФИАНа "Физическое обоснование проектного задания на мощный резонансный ускоритель (синхротрон)", "Обоснование выбора конструкции электромагнита установки С. Технические условия на модель электромагнита для установки С".

В то время застройка Москвы заканчивалась площадью Калужской заставы (ныне — площадь Гагарина). Граница города проходила по линии окружной железной дороги, на внешней стороне которой была недавно сооружена ТЭЦ-20, далее лежали луга, поля, деревни. Напротив ТЭЦ-20 располагался питомник Ботанического сада, известный плантацией разных сортов роз, между ними пролегал узкий, чрезвычайно грязный проезд, заканчивающийся грандиозной свалкой около речки Чуры. Он так и назывался — Свалочное шоссе. Здесь, видимо рядом с требуемым мощным источником электроэнергии ТЭЦ-20, В.И. выбрал место для нового ускорителя, получившее адрес Свалочное шоссе, 19А (сейчас — проспект 60-летия Октября, 7А). Здесь в 1947–1948 гг. для ускорителя было построено новое здание. По уже упомянутым соображениям секретности оно получило название "Питомник". В этом здании в 1949 г. был запущен новый синхротрон С-25 с энергией электронов 250 МэВ, на котором впервые начались исследования фотомезонных взаимодействий, комптоновского рассеяния и др.

Практически в то же время вступает в действие протонный синхроциклотрон на 500 МэВ в Дубне, переделанный из циклотрона с применением принципа автофазировки. В конце 1948 г. появляется Отчет ФИАНа (авторы В.И. Векслер, А.А. Коломенский, В.А. Петухов, М.С. Рабинович) "Физические обоснова-

ния проектирования синхрофазотрона АН СССР на 10 ГэВ". Вскоре началось теоретическое и экспериментальное проектирование синхрофазотрона на 10 ГэВ с участием НИИЭФА в Ленинграде, лаборатории № 11 ФИАНа под руководством А.Л. Минца и др. Параллельно в ФИАНе создается его модель с энергией 180 МэВ (кодовое название проект "МКМ") для обработки задач, связанных с большой машиной, после запуска которой ускоритель был переделан в электронный синхротрон.

В.И. Векслер — главный научный руководитель и идейный лидер проекта. Для строительства синхрофазотрона была выбрана также Дубна, поселок вблизи Ивановской ГЭС на Волге. В начале 1952 г. для реализации постройки ускорителя организуется техническая дирекция строительства (ТДС-533), затем — Электрофизическая лаборатория АН (ЭФЛАН). По распоряжению Президиума АН СССР с 26 октября 1954 г. Векслер зачислен в штат ЭФЛАН с переводом на полставки по совместительству заведующим Эталонной лабораторией в ФИАНе. Фактически В.И. работал тогда в трех местах — ФИАНе, МГУ и Дубне и всюду успевал.

Сооружение такого уникального комплекса потребовало слаженной работы многих организаций — КБ, НИИ, промышленных предприятий. В кратчайшие сроки были построены железнодорожная ветка Вербилки–Дубна, электроподстанция на 140 МВт, здания физического и энергетического корпусов, появился поражающий своими размерами котлован. В 1955–1956 гг. осуществлялся монтаж магнита ускорителя, различных его узлов, контрольно-измерительной аппаратуры. Сроки были чрезвычайно сжатыми. Снова возникала масса проблем, и только энергия В.И. способствовала их решению в кратчайшее время.

К работам по запуску ускорителя приступили в начале 1957 г. Уже 15 марта 1957 г. Л.П. Зиновьев во время дежурства С.К. Есина (впоследствии руководителя строительства сильноточного протонного ускорителя — так называемой Мезонной фабрики в ИЯИ, Троицк) получил "бетатронный режим" — вводимые в ускоритель из инжектора протоны продолжали вращаться без ускоряющего поля. Через месяц, 15 апреля 1957 г., после подачи номинального тока (12500 А) в обмотки электромагнита энергия ускоренных протонов достигла 10 ГэВ. Первый в мире ускоритель с такой высокой энергией заработал. После ряда модернизаций инжектора, интенсивность пучка была повышена почти на три порядка. В 1960 г. появилась публикация о новой частице — антисигмаминусгипероне, был обнаружен D-резонанс, сделаны другие открытия.

На базе ЭФЛАН в 1956 г. был организован Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), в котором В.И. стал директором Лаборатории высоких энергий, исследовавшей физику элементарных частиц. Выдающиеся успехи В.И. неразрывно связаны с его физической интуицией, инженерным талантом. Многие годы он сам собирал изобретаемые им установки, добываясь задуманного и не чураясь никакой работы. Он был прирожденный организатор, умеющий заражать сотрудников своим энтузиазмом [3]. В 1958 г. В.И. избирают действительным членом АН СССР, с 1963 г. он, академик, — секретарь вновь созданного тогда Отделения ядерной физики. И здесь весь свой огромный талант он отдает дальнейшему развитию ядерной физики.

Параллельно В.И. продолжал заниматься исследованиями в ФИАНе, в частности на объекте "Питомник". В 1956 г. было закончено строительство второй очереди здания (левое крыло, ближе к проходной). Туда перевезли через настоящий питомник, который в то время еще частично сохранялся, синхротрон С-3, тройку, как называли его в просторечии. Переездом руководил гл. инженер установки В.Н. Логунов, а несколько студентов физфака МГУ — Ю. Гончаров (научный руководитель — Б.С. Ратнер, фотопротоны), Б. Долбилкин (научный руководитель — О.В. Богданкевич, неупругое рассеяние фотонов на ядрах индия и серебра), Ю. Меликов (научный руководитель — Е.П. Овчинников, улучшение параметров С-3), пришедших на практику в лабораторию Векслера в 1954 г., составляли "физическую" силу, работали "по специальности", как говорили физики. На "Питомник" переехала дольше других оставшаяся в старом здании часть лаборатории В.И., занятая на С-3. Другая часть сотрудников, занимавшаяся физикой электронной плазмы, коллективными методами ускорения, еще в 1951 г. переехала в новое здание ФИАНа на Ленинском проспекте. Синхротрон был смонтирован в полуподвальном этаже здания и скоро заработал снова, исследования на его пучке возобновились, положив начало изучению ядерной физики электромагнитных взаимодействий в нашей стране.

В 1948 г. Б.С. Ратнер, Ю.К. Сженев, В.Ф. Козлов провели исследование спектра тормозного излучения С-3 (Отчет ФИАНа, 1949). В то время теоретическое сечение Бете–Гайтлера еще не было проверено экспериментально. Для определения энергии фотона использовалась регистрация электронно-позитронных пар, образованных им в мишени с большим  $Z$ . Для измерений в зазор магнита с постоянным магнитным полем помещали вакуумную камеру с мишенью и двумя самодельными счетчиками Гейгера. Экспериментальный спектр оказался в согласии с теоретическим в пределах погрешности измерений, что дало возможность в дальнейшем определять сечения фотоядерных реакций. Позднее, в 1962 г., тормозной спектр фотонов С-3 был измерен с лучшей точностью [7].

В здании ФИАНа на Миуссах кабинет В.И. находился рядом с комнатой № 16, в которой располагался ускоритель С-3. Векслер не часто бывал там после начала исследований на С-25, но всегда интересовался, как идут дела, какие проблемы, и обычно давал полезные советы. Это случалось, правда, реже, когда группа С-3 переехала на "Питомник", и совсем редко после перехода В.И. на постоянную работу в Дубну. Однако В.И. успевал руководить в ФИАНе начатыми работами, особенно его интересовали идеи коллективных методов ускорения. На семинарах в лаборатории В.И. был очень активен, глубоко погружаясь в каждую тему. Так бы, наверное, продолжалось и далее, но в 1959 г. было принято Постановление Совета Министров СССР "Об ограничении совместительства по службе".

Официальным днем создания Лаборатории фотоядерных реакций ФИАНа следует считать 1 декабря 1959 года. За три недели до этого, 9 ноября 1959 г., директором ФИАНа академиком Д.В. Скобельцыным был подписан приказ о разделении лаборатории, возглавляемой В.И. Векслером, который в сокращенном виде приводится ниже [2].

**ПРИКАЗ**  
**ПО ФИЗИЧЕСКОМУ ИНСТИТУТУ**  
**им. П.Н. ЛЕБЕДЕВА АКАДЕМИИ НАУК СССР**  
г. Москва                      № 369                      от 9 ноября 1959 г.

1. В соответствии с решением Ученого Совета Института разделить с 1 декабря с/г Лабораторию ускорителей и фотоядерных реакций на три самостоятельных лаборатории с подчинением их непосредственно Дирекции Института:

а) Лаборатория ускорителей (зав. Лабораторией акад. В.И. Векслер, зам. зав. Лабораторией — зав. сектором д-р ф.м.н. М.С. Рабинович, главный инженер Лаборатории М.Г. Седов, зам. зав. по АХЧ Леман).

б) Лаборатория фотомезонных процессов (и.о. зав. лабораторией — зав. сектором д-р ф.м.н. П.А. Черенков, зам. зав. лабораторией канд. ф.м.н., мл. научн. сотр. А.Н. Горбунов, зам. зав. лабораторией по АХЧ С.А. Покровский).

в) Лаборатория фотоядерных реакций (и.о. зав. лабораторией — ст.н.сотр. Л.Е. Лазарева, главный инженер лаборатории В.Н. Логунов).

По утверждении разделения Лаборатории ускорителей и фотоядерных реакций в Президиуме АН СССР объявить конкурс на вакантные должности заведующих лабораториями фотомезонных процессов и фотоядерных реакций.

2. Поручить ученому секретарю Института профессору Н.Н. Соболеву и пом. директора по кадрам Р.Г. Трофименко в недельный срок подготовить все материалы по разделению Лаборатории ускорителей и фотоядерных реакций, необходимые для представления в Отделение физ.мат. наук АН СССР.

п.п. Директор ФИАН, академик Д.В. Скобельцын

Однако через три месяца в исполнение Постановления Совмина СССР был издан Приказ по ФИАНу [2], где сказано: "3. Освободить от работы с 15 февраля 1960 г. заведующего лабораторией ускорителей академика В.И. Векслера". Поэтому несколько позднее уже Лаборатория ускорителей разделилась на лаборатории собственно ускорителей (зав. А.А. Коломенский), физики плазмы (зав. М.С. Рабинович) и синхротрона С-68, созданного в начале 50-х в качестве модели протонного синхрофазотрона (проект МКМ), а затем, после его запуска, переделанного в ускоритель электронов с максимальной энергией 680 МэВ, так называемый "склад-2" (зав. В.А. Петухов).

Итак, только из лаборатории, созданной непосредственно В.И. Векслером и называемой со времени подключения ядерных лабораторий ФИАНа к атомному проекту Эталонной, вышло пять полноценных лабораторий. Кроме того, В.И. вел очень большую научно-организаторскую работу по космическим лучам в ЛАЯ, где он с 1938 г. был заместителем заведующего, в рамках которой он организовал Эльбрусскую и Памирскую экспедиции, а также в лаборатории космических лучей. Биография В.И., в целом, неразрывно связана с необычайно быстрым развитием в стране ядерной физики. Если в 1936 г. ядерной физикой занимался десяток ученых, то в 60-х годах исследования проводились большими трудовыми коллективами. Установки для экспериментов в области физики высоких энергий стали грандиозными по размеру и несоизмеримо более слож-

ными по сравнению с предшествующими. Их созданием в СССР занимались новые отрасли промышленности. В 1963 г. было создано Отделение ядерной физики АН СССР во главе с Векслером. Такова краткая предыстория появления Лаборатории фотоядерных реакций в ФИАНе.

### 3. Лаборатория фотоядерных реакций ФИАНа (с 1971 г. — ИЯИ АН)

Заведующей ЛФЯР с 1960 по 1986 гг. была Любовь Ефремовна Лазарева. Основные вехи ее научной биографии до 1960 г.:

— пришла в ФИАН студенткой-дипломницей физфака МГУ (1936 г.);

— поступила на работу в ФИАН (1937 г.);

— участвовала в экспедиции на Памир, урочище Чечекты, под руководством В.И. осенью 1944 г., где вела эксперименты по регистрации тяжелых частиц в космических лучах пропорциональными счетчиками с аспирантами В.И. Векслера — Л. Беллом и Н. Биргер. Были обнаружены ливни, состоящие из большого числа частиц высоких энергий, проходящих через 6 см свинца;

— защитила под руководством Д.В. Скобелевца и В.И. Векслера кандидатскую диссертацию на тему "Атмосферные ливни космических лучей на высоте 3860 м над уровнем моря" в конце 1945 г.

В течение 40 лет ускоритель С-3 был основным инструментом для физических исследований ЛФЯР, на его пучке детально изучались фотоядерные реакции в области гигантского дипольного резонанса (ГДР). Основными направлениями экспериментов были

— реакции с испусканием протонов и нейтронов;

— фотоделение;

— неупругое рассеяние фотонов;

— сечения поглощения легкими и средними ядрами, тонкая структура ГДР;

— сечения поглощения тяжелыми ядрами, деформация ядер.

Б.С. Ратнер вместе с Е.М. Лейкиным и Р.М. Осокиной были пионерами в исследовании фотопротонных реакций на С-3. В 1954 г. он защитил кандидатскую диссертацию "Изучение реакции  $(\gamma, p)$ , вызванной квантами с энергией до 30 МэВ". В ней приведены результаты

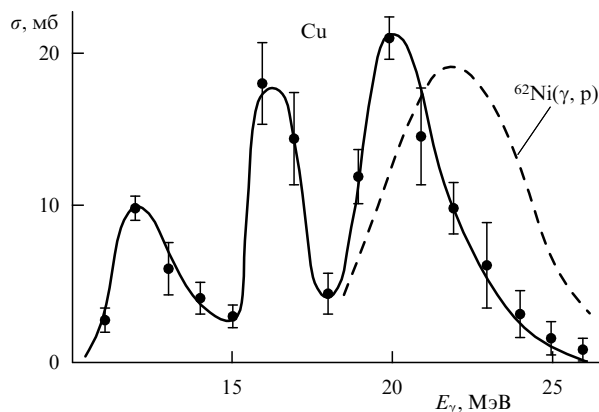


Рис. 1. Сечение реакции  $\text{Cu}(\gamma, p)$  для протонов с энергией  $> 5$  МэВ [8].

исследований энергетического и углового распределения протонов, испускаемых ядрами Al, Cu, Ni, Pb, и показано существование другого механизма распада, кроме статистического. Его признаком являлась сильная зависимость в ядре Cu доли быстрых протонов при изменении максимальной энергии спектра фотонов, по видимому, отражающая оболочечную структуру ядра. Сечение реакции  $\text{Cu}(\gamma, p)$  для протонов с энергией больше 5 МэВ имеет три резонанса примерно равной амплитуды [8] (рис. 1). Были также измерены сечения испускания быстрых нейтронов для ядер с  $A \sim 60$  для изучения распада входных состояний этих ядер в области ГДР. Нейтроны с энергией  $\epsilon_n \geq 3,7$  МэВ регистрировались быстродействующим спектрометром из стильбена по протонам отдачи. Выяснилось, что структура сечения энергичных нейтронов реакции  $^{58}\text{Ni}(\gamma, n)$  имеет вид, в целом характерный для аналогичной структуры полного сечения этой реакции. Однако положение двух максимумов в области 21–23 МэВ было смещено на величину  $\sim 1$  МэВ. Измерения при максимальной энергии фотонов 19,0 МэВ показали, что спектр фотонейтронов имеет равновесный характер, т.е. распад при  $E < 19$  МэВ происходит лишь в более сложные состояния [8].

Важным фактором надежности результатов являлась стабильность верхней границы тормозного спектра. Работа по ее стабилизации велась сначала в группе О.В. Богданкевича, затем — Б.С. Ратнера. В итоге ошибка в определении  $E_{\gamma\text{max}}$  составила  $\pm 1,5$  кэВ, абсолютная калибровка шкалы энергии — 10 кэВ. Такие параметры дали возможность измерять тонкую структуру ГДР около порогов реакции  $(\gamma, p)$  на ядрах  $^{53}\text{Cr}$ ,  $^{62,64}\text{Ni}$  [9] и продолжить изучение входных состояний ядер при формировании ГДР. Позднее надежность данных была повышена в результате автоматизации эксперимента на базе ЭВМ "Электроника-60" и СМ-4 для измерения набора кривых выхода и поддержания стабильности спектра.

Прямые измерения полного сечения фотопоглощения легких ядер с целью обнаружения тонкой структуры гигантского резонанса методом ослабления стали пионерской работой мирового уровня. В то время структура в полных сечениях взаимодействия фотонов с ядрами экспериментально не была установлена, известны были лишь глобальные параметры ГДР. Для надежной регистрации требовалась аппаратура с высоким энергетиче-



В.И. Векслер, заведующий лабораторией космических лучей, и м.н.с. Л.Е. Лазарева на семинаре в лаборатории (1945 г.).

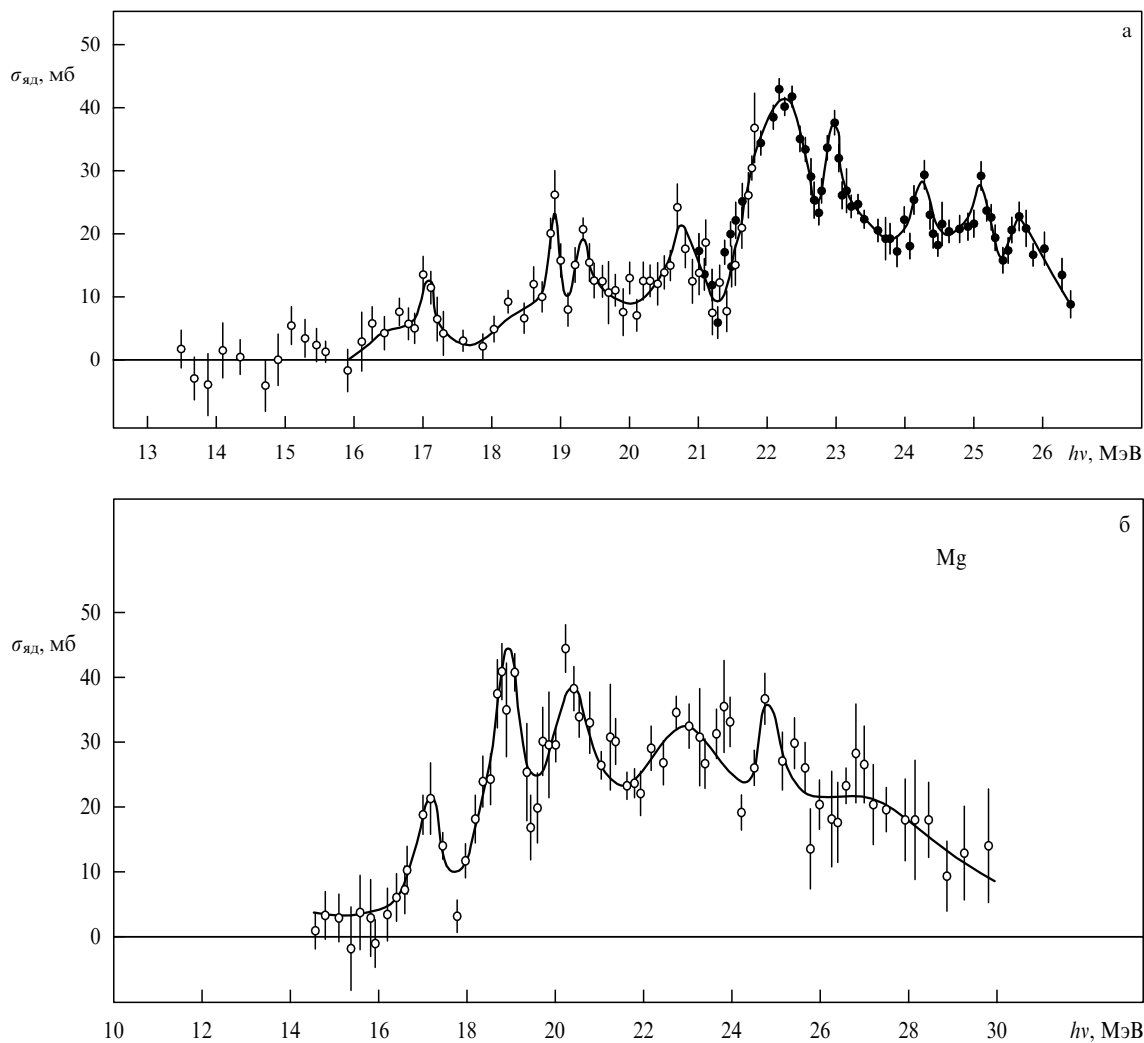


Рис. 2. (а) Сечение поглощения  $\gamma$ -квантов ядром  $^{16}\text{O}$  в области ГДР [10]. (б) Сечение поглощения фотонов ядром Mg в области ГДР [11].

ским разрешением. Для этого в ЛФЯР был создан магнитный парный спектрометр. Магнитное поле в рабочей области диаметром 40 см было однородным в пределах 0,05 % и поддерживалось ЯМР с точностью 0,01 %. В вакуумной камере помещался радиатор (золотая фольга толщиной  $10 \text{ мг см}^{-2}$ ), на который попадал после ослабления тормозной спектр фотонов. Позади щелей с размерами 0–6 мм, ограничивающих телесный угол, находились сцинтилляционные счетчики, включенные на совпадения и антисовпадения. Разрешение по энергии при 20 МэВ составляло 100 кэВ при ширине щелей 2 мм и  $\sim 200$  кэВ при ширине 4 мм. Для уменьшения систематических ошибок попеременно измерялось отношение  $N_0/N$  числа истинных совпадений без поглотителя к числу совпадений, когда поглотитель находился в пучке. Ядерное сечение определялось вычитанием из полного сечения взаимодействия фотонов сечений атомных процессов с дополнительной нормировкой ниже порога парциальных реакций. Для повышения статистической точности с 1962 г. в лаборатории использовался 9-канальный парный спектрометр со светосилой почти на порядок большей, чем предыдущий. С той же целью часть измерений была сделана на С-25; интенсивность фотонов в области ГДР оказалась в несколько раз выше, чем на С-3. (Методика подробно изложена в [10, 11].)

В области ГДР были определены сечения поглощения фотонов ядрами [10–12]

$$^9\text{Be}, ^{12}\text{C}, ^{16}\text{O}, ^{19}\text{F}, ^{\text{nat}}\text{Mg}, ^{27}\text{Al}, ^{32}\text{S}, ^{40}\text{Ca}, ^{55}\text{Mn}, ^{56}\text{Fe}.$$

С более высокой точностью и лучшим ( $\leq 0,5\%$ ) энергетическим разрешением было измерено дважды магическое ядро  $^{16}\text{O}$  [10]. В его сечении поглощения в интервале 13,5–27,0 МэВ было зафиксировано девять резонансов (рис. 2а). Нижние три (17,2, 19,0, 19,4 МэВ) расположены на низкоэнергичном склоне ГДР и на них приходится 14 % его интенсивности.

Интегральное сечение в указанном интервале равно  $170 \pm 20$  МэВ мб или 50 % величины, определяемой правилами сумм ТРК. Теоретические расчеты ГДР в ядре  $^{16}\text{O}$  предсказывали пять резонансов, причем 67–74 % интенсивности сосредоточено в максимуме  $22,3 \pm 0,2$  МэВ, что противоречит эксперименту. Лучшее согласие получено с расчетом, учитывающим примесь более высоких конфигураций. В нем предсказано шесть резонансов, из них пять оказались близкими по распределению к экспериментальному результату, но в первом при 18 МэВ расчетная интенсивность (1 %) была значительно меньше, чем для измеренного сечения (14 %) [10].

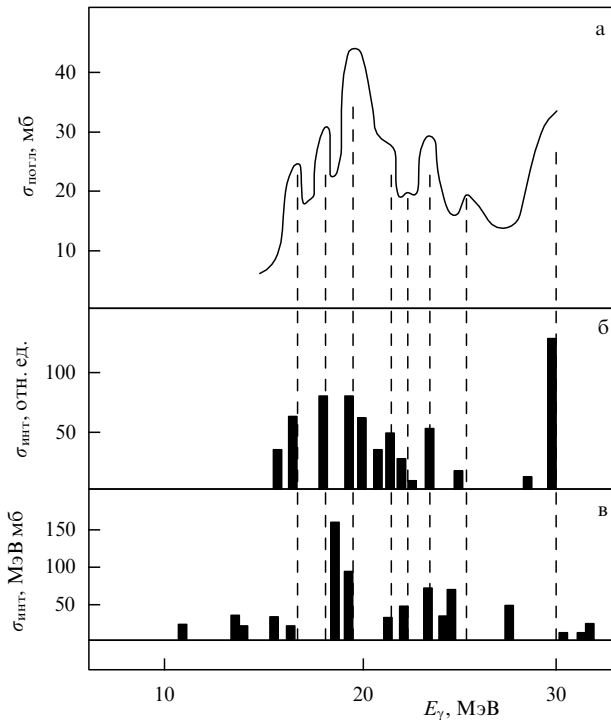


Рис. 3. Сравнение экспериментального сечения поглощения  $\gamma$ -квантов ядром  $^{32}\text{S}$  (а) с теоретическими расчетами (б, в) [12].

Практически полное совпадение структуры в сечении поглощения и основных парциальных реакций ( $\gamma, p$ ) и ( $\gamma, n$ ) можно рассматривать как указание на проявление зарядовой симметрии ядерных сил.

Результат измерения сечения поглощения фотонов ядром  $^{16}\text{O}$  и его структуры был признан классической работой по фотоядерным реакциям. (Он приводится и обсуждается в книге Н. Бора и В. Моттельсона *Структура атомного ядра*.)

Примером измерения сечения поглощения ядра из следующей sd-оболочки является эксперимент с  $^{nat}\text{Mg}$ . В области энергий возбуждения 15,0–30,0 МэВ в сечении Mg находится шесть резонансов, причем среднее сечение практически постоянно в интервале 19–26 МэВ (рис. 2б), в то время как теоретические расчеты предсказывают две группы переходов ( $K = 0$  и 1) с максимальными значениями при 17–18 и 22–25 МэВ [11].

Структура сечения поглощения  $\gamma$ -квантов была исследована также и для ядра  $^{32}\text{S}$  с замкнутыми подоболочками  $1d_{5/2}$  и  $2s_{1/2}$  [12]. При энергии 19,6 МэВ находится основной максимум ГДР, ему соответствует 38% интегрального сечения по измеренному интервалу. Резонансы в полном сечении повторяются в парциальных реакциях ( $\gamma, n$ ) и ( $\gamma, p_0$ ).

Из сравнения сильно структурированного экспериментального сечения (рис. 3а) с двумя вариантами теоретических расчетов по модели оболочек (рис. 3б, в) можно заключить об их удовлетворительном согласии [12]. Теория предсказывает расщепление ГДР ядра  $^{32}\text{S}$  в соответствии с переходами из незаполненной ( $1d-2s \rightarrow 1f-2p$ )- и заполненной ( $1p \rightarrow 1d-2s$ )-оболочек. Первой группе отвечают резонансы в области 16,5–18,5 МэВ, второй — резонансы при более высоких энергиях. Совокупность полных сечений по легким ядрам дает возможность проверить различные модельные подходы

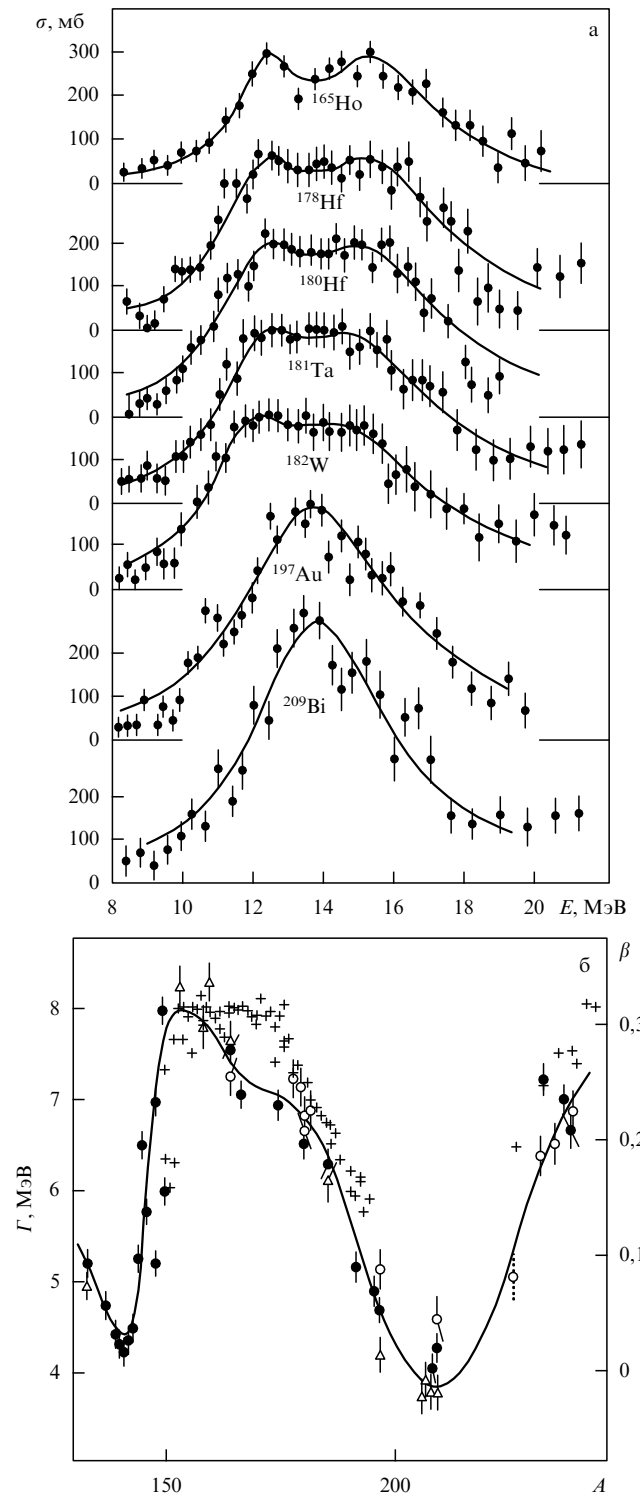


Рис. 4. Полные сечения поглощения  $\gamma$ -квантов ядрами с  $165 \leq A \leq 209$  (а) и разница ширины гигантского резонанса  $\Gamma$  и параметра ядерной деформации  $\beta = (E_2 - E_1)/A^{1/3}$  вблизи заполненной нейтронной оболочки  $N = 108$  (б) [13].

к расчетам ГДР, в том числе и расщепление ГДР в ядрах ( $1d-2s$ )- и ( $1f-2p$ )-оболочек.

В последующие годы метод поглощения применяли для измерения полных сечений фотопоглощения тяжелых ядер, для которых ядерная часть сечения не превышает 1% от измеряемого для суммарного (атомное + ядерное) сечения. Связанная с малостью ядерной



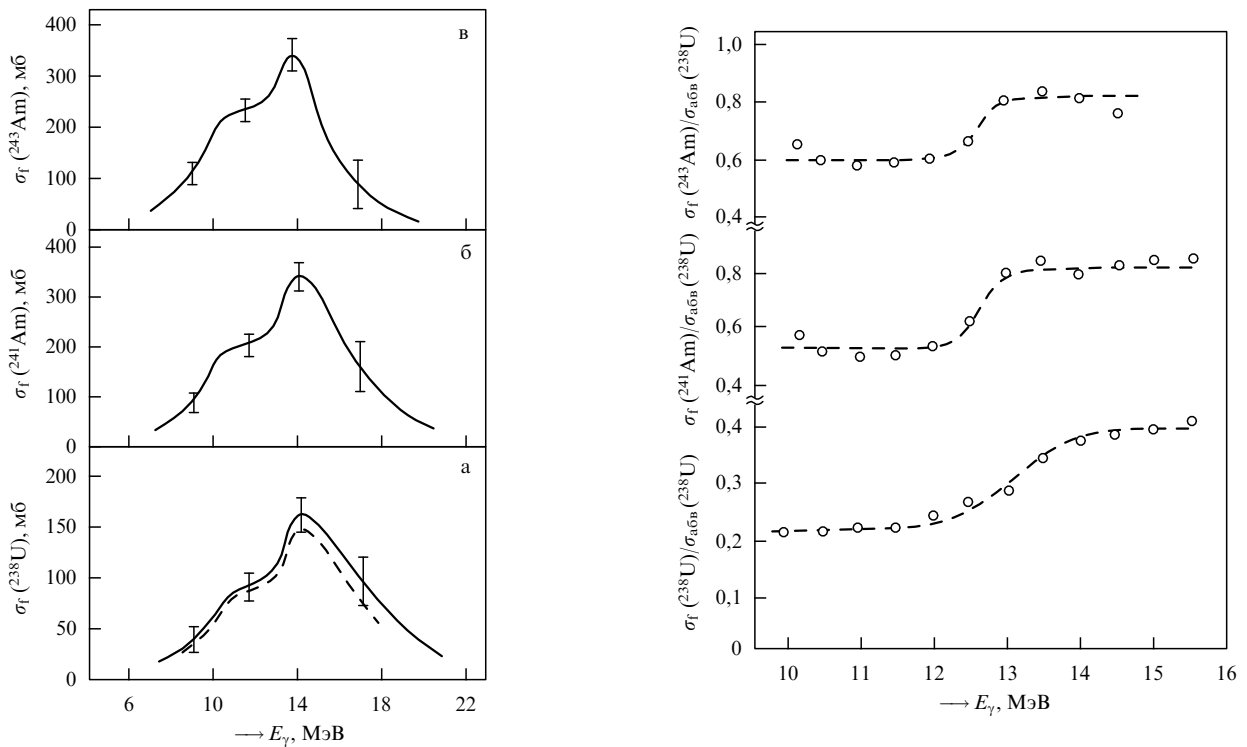


Рис. 5. Сечения фотоделения ядер  $^{238}\text{U}$  (а),  $^{241}\text{Am}$  (б) и  $^{243}\text{Am}$  (в) в зависимости от энергии фотонов. Справа показаны отношения сечений деления к полным сечениям фотопоглощения (делимости) для этих ядер [15].

составляющей сечения необходимость измерений с очень высокой статистической точностью (лучше 0,1 %) потребовала использования спектрометра с эффективностью регистрации, близкой к 100 %. Для этой цели был создан сцинтилляционный спектрометр полного поглощения на основе кристалла NaJ(Tl) большого объема, на котором были выполнены две серии многочисленных измерений на ядрах лантанидов и актинилов (всего 18 изотопов) [13, 14].

Влияние оболочечных эффектов на характер ГДР изучалось на ядрах в районе деформированной нейтронной подоболочки  $N = 108$ . Полученные полные сечения фотопоглощения для ядер в диапазоне  $165 < A < 209$  (рис. 4) позволили прояснить причины экспериментально наблюдаемого расхождения в поведении ширины гигантского резонанса  $G$  и параметра ядерной деформации  $\beta$ . На рисунке отчетливо прослеживается влияние на ширину гигантского резонанса эффекта заполнения нейтронной подоболочки  $N = 108$  [13]. Результаты уникальных до сих пор измерений на группе ядер актинилов указывают на схожесть "переходных" эффектов, наблюдаемых на ядрах с количеством нейтронов и протонов вблизи магического числа 90, что подтверждает справедливость принципа зарядовой независимости ядерных сил [14].

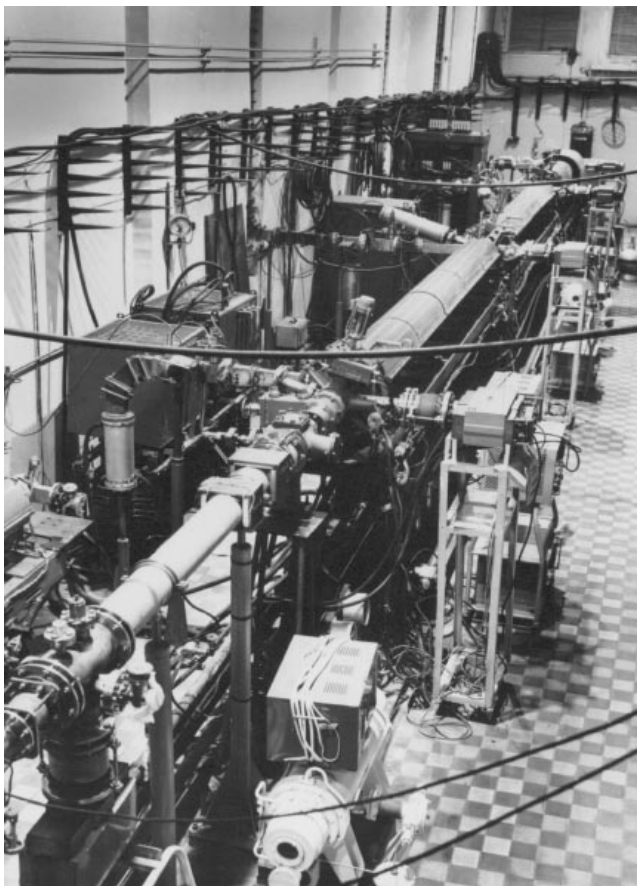
Полученные данные по полным сечениям фотопоглощения тяжелых ядер стали важным материалом для проверки справедливости многочисленных коллективных моделей ядер, в том числе постоянства отношения  $\sigma^{\text{int}}/\Sigma^{\text{TRK}}$  для ядер с  $232 \leq A \leq 239$ .

На синхротроне С-3 впервые измерены сечения фотоделения трансурановых ядер  $^{241}\text{Am}$  и  $^{243}\text{Am}$  в области гигантского дипольного резонанса и определены нейтронные и делительные ширины для указанных ядер [15]. Точность определения и стабильность энергии электро-

нов, ускоренных в синхротроне, в течение длительного времени измерений была не хуже  $\pm 10$  кэВ. Осколки деления регистрировались искровыми камерами с коронным разрядом. Результаты измерений представлены на рис. 5, откуда видно, что в области энергий от  $\sim 8$  МэВ до порога реакции  $(\gamma, \text{nf})$ , равного примерно 12,5 МэВ, делимости постоянны в пределах ошибок ( $\pm 8$  %) и для всех исследованных ядер ведут себя подобным образом. Полученные отношения выходов дают следующие значения делимостей:  $^{241}\text{Am} — 0,53 \pm 0,03$ ,  $^{243}\text{Am} — 0,61 \pm 0,04$ . Эти данные не согласуются с предсказаниями модели жидкой капли и указывают на то, что структура барьера имеет сложный (двугорбый) характер.

В 1963 г. с помощью В.И. Векслера, для которого создание ускорителей продолжало оставаться высшим приоритетом, принимается решение о строительстве двух новых ускорителей — синхротрона С-25Р с энергией 1,3 ГэВ в фотомезонной лаборатории ФИАНа в Троицке, запущенного в 1972 г. (большая территория за городом была выбрана с расчетом на сооружение в будущем ускорителя с более высокой энергией), и линейного ускорителя электронов на энергию 50 МэВ в ЛФЯР, подвальное помещение для которого было построено к зданию "Питомника". В 1970 г. ускоритель начал работать (впоследствии (1978 г.) его энергия была увеличена до 100 МэВ).

Начало работы ускорителя совпало с переводом ЛФЯР во вновь организованный в 1971 г. Институт ядерных исследований АН (ИЯИ). Были образованы новые группы по изучению рассеяния электронов и квазимонохроматических аннигиляционных фотонов. В течение нескольких лет эти небольшие группы занимались созданием сложных комплексов современной аппаратуры для исследования электро- и фотоядерных реакций. Для изучения рассеяния электронов была создана



Линейный ускоритель электронов на энергию 50 МэВ, после модернизации — на 100 МэВ (ЛУЭ-100) ЛФЯР.

уникальная установка мирового уровня [16]. Ее основу составлял магнитный спектрометр с "магическим углом" с собственным разрешением  $\sim 10^{-4}$  и стабильностью  $\sim 10^{-5}$ . Пучок электронов на мишень подавался оригинальной трехмагнитной системой формирования, обеспечивающей разрешение по энергии электронов  $10^{-3}$ . Общее разрешение установки составило  $\sim 2 \times 10^{-3}$ . Из экспериментов по рассеянию электронов были определены распределение заряда на ядре  $^{12}\text{C}$ , параметры основного и низколежащих возбужденных состояний ядра  $^{27}\text{Al}$ .

Вторая система формирования пучка создавалась и настраивалась для экспериментов с  $\gamma$ -квантами от аннигиляции позитронов. В частности, на ней было измерено сечение реакции  $^{63}\text{Cu}(\gamma, n)$  в области энергий 12–25 МэВ [17].

В ЛФЯР активно велись актуальные теоретические работы (Б.А. Тулупов, Р.А. Эрамжян). После Л.Е. Лазаревой заведующим ЛФЯР по 1998 г. стал Р.А. Эрамжян, затем — В.Г. Недорезов. Ускорители С-3 и ЛУЭ-100 закончили работу в начале 90-х годов.

Выросшая из лаборатории ускорителей и фотоядерных реакций В.И. Векслера ЛФЯР по количеству и качеству научных результатов стала одной из ведущих лабораторий мира по исследованию электромагнитных взаимодействий ядер в области энергий, получаемых на ускорителях С-3, ЛУЭ-100, частично С-25. Многие из работ ЛФЯР получили международное признание и стали классическими.

## Список литературы

1. Вавилов С И *УФН* **28** 1 (1946)
2. *Материалы Мемориального кабинета В.И. Векслера* (М.: ЛФЯР ИЯИ РАН)
3. *Воспоминания о В.И. Векслере* (Отв. ред. М А Марков, А Н Горбунов) (М.: Наука, 1987)
4. Ратнер Б С, Препринт № 1108 (М.: ИЯИ, 2003); Болотовский Б М, Ратнер Б С, Препринт № 1177 (М.: ИЯИ, 2007)
5. "Отчет по установке, ФИАН им. П.Н. Лебедева, лаборатория В.И. Векслера (1949)" *Труды ФИАН* **19** 98 (1963)
6. Ратнер Б С *Атомная энергия* **34** 499 (1973)
7. Долбилкин Б С, Запечалов В А, Корин В И, Николаев Ф А *ЖЭТФ* **44** 866 (1963)
8. Ратнер Б С *ЖЭТФ* **46** 1480 (1964); *ЯФ* **21** 1147 (1975)
9. Вербицкий С С, Лапик А М, Ратнер Б С, Щитов В П *Изв. АН СССР. Сер. физ.* **48** 1023 (1984); Ратнер Б С *Изв. РАН Сер. физ.* **62** 1726 (1999)
10. Долбилкин Б С, Корин В И, Лазарева Л Е, Николаев Ф А *Письма в ЖЭТФ* **1** (5) 47 (1965); Долбилкин Б С *Труды ФИАН* **36** 18 (1966)
11. Dolbilkin B S, Korin V I, Lazareva L E, Nikolaev F A, Zapevalov V A *Nucl. Phys.* **72** 137 (1965)
12. Долбилкин Б С, Исаков А И, Корин В И, Лазарева Л Е, Николаев Ф А *ЯФ* **8** 1080 (1968)
13. Гуревич Г М, Лазарева Л Е, Мазур В М, Солодухов Г В *Письма в ЖЭТФ* **23** 411 (1976)
14. Gurevich G M, Lazareva L E, Mazur V M, Soloduchov G V, Tulupov V A *Nucl. Phys. A* **273** 326 (1976)
15. Корецкая И С, Кузнецов В П, Лазарева Л Е, Недорезов В Г, Никитина Н В *ЯФ* **30** 910 (1979)
16. Batjunin A V, Dolbilkin B S, Kondratiev R L, Lisin V P *Proc. Sendai Conf. Electro- and Photoexcitations. Suppl. Res. Rep. Lab. Nucl. Sci. Jpn* **10** 313 (1977)
17. Джилавян Л З, Кучер Н П *ЯФ* **30** 294 (1979)

PACS number: 29.20.Lq

## Исследования на Синхрофазотроне

В.А. Никитин

### 1. Введение

Выдающийся советский ученый В.И. Векслер имел блестящий талант ученого и организатора. В сложные послевоенные годы он возглавил смелый проект создания самого большого в то время ускорителя — Синхрофазотрона. На Синхрофазотроне был сделан ряд фундаментальных открытий и выполнены пионерские исследования в физике высоких энергий: изучены распадные свойства К-мезонов и векторных мезонов, измерены полные и дифференциальные сечения взаимодействия пионов, протонов и К-мезонов с протонами, получены пучки ядер, в том числе поляризованных дейтронов, заложены основы релятивистской ядерной физики и др. Исследования на Синхрофазотроне создали основу для широкого международного сотрудничества ученых. Развитие техники эксперимента привело к прогрессу в смежных областях науки и прикладных исследованиях.

### 2. Нестареющее наследство В.И. Векслера

В этом году (2007 г.) научная общественность отмечает 100-летие со дня рождения выдающегося советского

ученого Владимира Иосифовича Векслера. Физикам всего мира он известен как автор одного из крупнейших открытий XX века — принципа автофазировки, который лежит в основе работы всех ныне действующих циклических ускорителей релятивистских частиц. В сложные послевоенные годы В.И. Векслер возглавил чрезвычайно смелый проект создания в Дубне самого большого в то время ускорителя — Синхрофазотрона (СФ). Проект готовился в Физическом институте АН СССР им. П.Н. Лебедева. Он был утвержден директором ФИАНа Д.В. Скобельцыным в январе 1951 г. Руководителями проекта были назначены В.И. Векслер, А.П. Комар, М.А. Марков, В.А. Петухов, М.С. Рабинович, А.А. Коломенский, К.И. Блинов. Физическую программу исследований подготовили в 1952 г. М.А. Марков, И.В. Чувило, В.И. Гольданский, А.А. Коломенский, А.Н. Горбунов, А.Е. Чудаков. В ней формулируются задачи исследования множественного рождения частиц в протон-протонных столкновениях, измерения упругих и полных сечений взаимодействия  $\pi$ -мезонов с протонами, поиск новых частиц, в частности антипротонов. Указывается на возможность образования ядерной материи, состоящей из пионов. В марте 1957 г. на СФ был получен пучок протонов с рекордной энергией 10 ГэВ. Лаборатория высоких энергий, возглавляемая В.И. Векслером, вошла в состав Объединенного института ядерных исследований и стала основой для широкого международного сотрудничества ученых. Пуск СФ вызвал широкий резонанс в мире и был признан выдающимся достижением науки. Пресса писала об этой машине как о "восьмом чуде света". Нильс Бор, посетивший ОИЯИ в 1961 г., произнес емкую и точную фразу: "Чтобы задумать и построить такое сооружение, нужна была очень большая смелость".

На СФ был сделан ряд фундаментальных открытий в физике высоких энергий, а развитие техники эксперимента привело к прогрессу в смежных областях науки и прикладных исследованиях. В.И. Векслер имел блестящий талант ученого и организатора. Его нестарееющее наследство включает труды по физике ускорителей и экспериментальной физике. Он был основателем и лидером школы инженеров и ученых, которые продолжают развивать его идеи во многих лабораториях мира [1].



Слева направо: Н. Бор, И.Е. Тамм и В.И. Векслер в Дубне (1961 г.).

### 3. Первые обороты пучка ускорителя

Коллектив (будущей) Лаборатории высоких энергий в Дубне формировался с 1953–1955 гг. В это же время начались методические разработки. Сразу после получения пучка протонов с энергией 10 ГэВ стартовала программа физических исследований. Назовем лишь некоторые наиболее значимые работы, выполненные в начальный период (1957–1965 гг.) и приведем также имена их основных исполнителей. Почти все эти работы имели успешное продолжение на ускорителе У-70 в ИФВЭ и других ускорителях при более высокой энергии.

В.И. Векслер, И.Н. Семенович, А.Б. Кузнецов — создание пучка антипротонов методом высокочастотной сепарации [2].

А.Л. Любимов, Л.Н. Струнов — создание меченого пучка антипротонов и регистрация антигиперонов в камере Вильсона.

А.Л. Любимов — измерение полного и дифференциального сечения  $pp$ -рассеяния [3].

А.С. Вовенко, Б.А. Кулаков, М.Ф. Лихачев, Ю.А. Матуленко, И.А. Савин, В.С. Ставинский — разработка газовых черенковских счетчиков [4].

Э.О. Оконов, Д. Нягу, В.А. Русаков — исследование распадов  $K^0$ -мезонов — поиск эффекта антигравитации  $K^0$ -мезона [5]. Наблюдение регенерации  $K_2^0 \rightarrow K_1^0$  и проверка теоремы Померанчука [6].

М.И. Соловьев, Г.М. Сташков, Н.М. Вирясов, Р.М. Лебедев — создание пузырьковых камер и программа исследований на них [7].

М.И. Подгорецкий, К.Д. Толстов, В.В. Глаголев, И.М. Граменицкий, В.И. Любимов, В.А. Никитин, М.Г. Шафранова — облучение эмульсий и широкая программа исследований на них [8].

В.И. Мороз, М.Н. Хачатурян, И.В. Чувило — формирование нейтронного пучка и измерение полных сечений  $pp$ -взаимодействия.

М.Н. Хачатурян, А.М. Балдин, М.А. Азимов — создание черенковского  $\gamma$ -спектрометра и наблюдение распада векторных мезонов на  $e^+e^-$ -пары [9].

В.А. Свиридов, В.А. Никитин, Л.Н. Струнов — упругое рассеяние частиц на малые углы [10].

К.Д. Толстов, В.А. Никитин, Л.С. Золин, Ю.К. Пилипенко — создание сверхзвуковой струйной газовой мишени [11].

### 4. Исследования с пузырьковыми камерами

В 1950–1960-е годы важным инструментом наблюдения взаимодействия частиц были пузырьковые камеры. Пузырьковая камера имеет ряд замечательных достоинств: возможность заполнения камеры различными веществами (водород, пропан, ксенон и др.), которые служат мишенью и чувствительной средой, большой объем регистрации частиц — до нескольких кубических метров, высокая точность измерения координат точек на треках  $\sim 200$  мкм, возможность регистрации  $\gamma$ -квантов (особенно в ксеноновой камере), наблюдение картины взаимодействия в полном телесном угле  $4\pi$  и др. В период 1955–1970 гг. в ЛВЭ ОИЯИ был создан ряд газовых и пузырьковых камер: камеры Вильсона (газообразный водород, гелий, аргон) с размером по пучку 40 см, 50 см, 1 м; пропановые пузырьковые камеры (24 л, 2 м); ксеноновая пузырьковая камера (50 см);



Водородная пузырьковая камера 2 м на сборочном стенде.

водородные пузырьковые камеры (40 см, 1 м, 2 м); водородная камера (2 м) с дейтериевой мишенью [7].

Перечислим коротко некоторые результаты исследований на пузырьковых камерах. Работы выполнены на СФ при энергии пучков 3 – 10 ГэВ и на ускорителе ИФВЭ У-70 при энергии протонов 70 ГэВ и пионов 40 ГэВ [12].

Обнаружена инерция барионного заряда: в событиях  $pp$ - и  $p\pi$ -взаимодействия с множественностью пионов  $n_\pi \leq 4$  угловое распределение барионов в с.ц.м. резко анизотропно. Для  $pp$ -взаимодействия барионы образуют два конуса: вперед и назад. Эти частицы были названы лидирующими, так как их импульсы заметно больше среднего импульса частиц в данном событии. В событиях  $p\pi$ -столкновения барионы образуют только один конус — назад. В событиях с  $n_\pi \geq 8$  наблюдается угловая изотропия. Для конусов вперед-назад введено понятие области фрагментации мишени и пучка. Остальная часть события названа областью пионизации. Позже ее стали также называть центральной областью.

Измерены импульсные корреляции тождественных и нетождественных частиц. Определены пространственно-

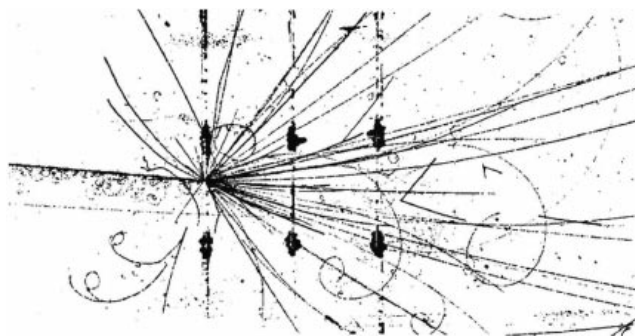


Рис. 1. Событие СТ $\pi$ -взаимодействия при энергии пучкового ядра С 4,5 А ГэВ. Снимок сделан в пропановой камере размером 2 м с танталовыми пластинами в качестве мишеней.

временные размеры области взаимодействия. Совокупность данных качественно согласуется с мультипериферической моделью множественного рождения частиц.

Получен обширный материал по ядро-ядерным взаимодействиям:  $dC$ ,  $CC$ ,  $ST\pi$  и др. Эти данные сохраняют актуальность и служат для развития теоретических моделей АА-столкновений. Характерное событие АА-взаимодействия показано на рис. 1.

Получены характеристики рождения странных частиц, антипротонов и антигиперонов. Обнаружено множественное рождение странных частиц. Открыты резонансы  $f(980) \rightarrow 2K$ ,  $f(600) \rightarrow 2\pi$  ( $\sigma$ -мезон) [13, 14].

В пропановой камере объемом 24 л в 1960 г. впервые наблюдали событие образования антигиперона  $\bar{\Sigma}^-$ . В силу уникальности оно заслуживает особого упоминания. Камера облучалась пучком  $\pi^-$ -мезонов с энергией 7 ГэВ. На рисунке 2 показана фотография этого события и ее расшифровка. Интересно также отметить, что при этом наблюдаются четыре странные частицы. Это первое экспериментальное свидетельство множественного рождения странных частиц [16].

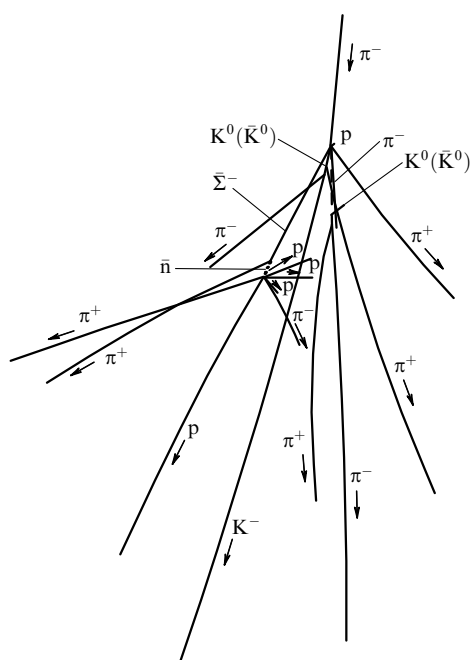
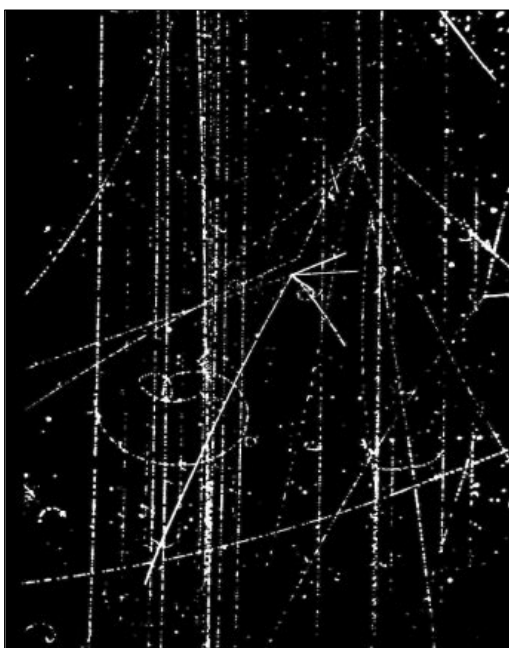


Рис. 2. Фотография события рождения антигиперона  $\bar{\Sigma}^-$  и ее расшифровка.

## 5. Исследование кумулятивных процессов

Анализ экспериментальных данных о взаимодействии лептонов, протонов и ядер с протонами и ядрами, полученных в начале 1970-х годов, привел к идее масштабной инвариантности неупругих процессов. Этот термин означает подобие спектров вторичных адронов для разных энергий первичных частиц. Еще это называют автомодельностью (самоподобием) или скейлингом. В квантовой теории поля под автомодельностью понимается независимость асимптотической формы амплитуд процессов при большой энергии и большом переданном импульсе от размерных параметров, включая массы частиц. Зависимость от безразмерных (масштабированных) импульсных переменных называется масштабной инвариантностью. По-видимому, впервые этот закон предложил Дж.Д. Бьеркен в 1968 г. применительно к глубоконеупругому рассеянию электронов на протонах [17]. Эксперимент подтвердил теоретическое предсказание: дифференциальное сечение ер-рассеяния  $e + p \rightarrow e' + X$  в области  $E_e \gg m$  и  $Q^2 \gg m^2$  не зависит ни от энергии первичного электрона  $E_e$ , ни от четырехимпульса  $Q^2 = -q^2$ , переданного электроном системе вторичных адронов  $X$ . Сечение зависит только от масштабной переменной  $x_B = Q^2/2mv$ . Здесь  $v = E_e - E'_e$  — энергия, переданная электроном протону,  $m$  — масса протона; знаменатель в этом выражении можно назвать масштабным параметром или параметром подобия. Позже оказалось, что скейлинг Бьеркена слабо, но нарушается, т.е. сечение логарифмически зависит от  $Q^2$ . Этот слабый, но существенный эффект в настоящее время понят в рамках квантовой хромодинамики, и далее мы его не обсуждаем. В глубоконеупругом рассеянии электрон предположительно взаимодействует с некой частью протона — партоном. Физический смысл переменной  $x_B$  — это доля импульса протона, который несет данный партон. Очевидно, для ер-столкновения  $x_B$  изменяется в пределах 0–1. В случае столкновения с ядром предполагается, что электрон может передавать импульс группе нуклонов (точнее — партону, принадлежащему компактной группе нуклонов). И тогда допустима область  $x_B \geq 1$ , о чем и пойдет речь ниже.

Анализ экспериментальных данных показал, что для представления сечения инклюзивного процесса  $A + B \rightarrow c + X$  (наблюдается только одна частица  $c$ ) удобно ввести масштабную безразмерную переменную  $x = p_c/p_{c,\max}$ , где в знаменателе в качестве масштабного параметра стоит максимально возможный по кинематике импульс частицы  $c$ . Тогда сечение  $d\sigma/dp_c(s, p_c) = f(x)$  оказывается универсальной функцией  $f(x)$ , не зависящей от энергии  $\sqrt{s}$ . В 1971 г. А.М. Балдин высказал гипотезу [18] о том, что сечения типа  $f(x)$  при взаимодействии релятивистских адронов определяются локальными свойствами адронной материи, а не геометрическими характеристиками объектов  $A, B$  (например, формфакторами). При этом критерием "релятивизма" считается условие  $E_{A,B,c} \gg \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  — характерная энергия связи частиц в объектах  $A, B$ . Таким образом, возникает задача релятивистского описания возбужденной адронной материи и протяженных составных объектов. Началась эра релятивистской ядерной физики. В настоящее время круг этих проблем широко обсуждается как задача поиска кварк-глюонной плазмы. Однако при поиске плазмы в эксперименте нельзя ограничиться

инклюзивным подходом. Плазма может проявить себя в коллективном поведении большого числа частиц. Поэтому в каждом событии необходимо регистрировать частицы в широком угловом интервале, близком к  $4\pi$ .

Одно из ярких явлений в круге этих проблем — кумулятивный эффект, когда при столкновении релятивистских ядер энергия инклюзивной частицы превышает энергию, приходящуюся на один нуклон, или точнее, когда в импульсном пространстве частица выходит за границу, разрешенную кинематикой столкновения пары нуклонов. Описать кумулятивные процессы можно, используя механизм возбуждения группы из  $N$  нуклонов  $N^* \rightarrow c + N$ . Число нуклонов  $N$  зависит от ядра ( $A$  или  $B$ ), а вероятность  $P_N(N)$  ассоциации  $N$  определяется модельным способом, например вычислять ее по биномиальному закону. Тогда сечение в общем виде есть

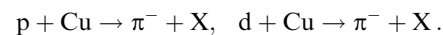
$$E \frac{d\sigma}{dp} = \sum_{N_{\min}}^A P_N(N) f_N(x_N). \quad (1)$$

Минимальное число нуклонов в ассоциации определяется кинематическим соотношением

$$N_{\min} \approx E_c - P_c \frac{\cos \theta_c}{m} \approx Q,$$

где  $\theta_c$  — угол между импульсами частицы  $c$  и фрагментирующего ядра. Величина  $N_{\min}$  также обозначается как  $Q$  и называется кумулятивным числом.

Первая экспериментальная проверка гипотезы кумулятивного эффекта выполнена группой В.С. Ставинского [15, 18] в 1971 г. на пучках протонов и дейтронов, ускоренных на СФ до импульса 10 ГэВ/с. При этом импульс одного нуклона в дейтроне составлял около 5 ГэВ/с. Изменялись сечения инклюзивных реакций



Оказалось, что импульсный спектр пионов во второй реакции простирается значительно выше границы, разрешенной кинематикой взаимодействия только пары нуклонов. Было измерено также отношение сечений приведенных реакций  $\sigma(d\text{Cu})/\sigma(p\text{Cu})$  для значений масштабной переменной  $x = p_\pi/p_{\pi,\max}$  в интервале  $0,5 \leq x \leq 1$  при  $p_\perp \approx 0$  и при разных энергиях дейтрона. Данные представлены на рис. 3. Сплошной кривой показана аналитическая аппроксимация данных по нуклон-нуклонному взаимодействию. Точки — выход пионов в реакции  $d\text{Cu}$ , увеличенный в 20 раз (для сравнения). Как видим, сечения реакций  $d\text{Cu}$  и  $p\text{Cu}$  подобны, что свидетельствует о справедливости масштабной инвариантности в кинематической области, где рождение пионов возможно только при совместном действии пары нуклонов в дейтроне. Рисунок 3б иллюстрирует поведение вероятности кумулятивного процесса — величины  $P_2$  из уравнения (1). Оценку величины  $P_2$  можно сделать как вероятность нахождения двух нуклонов в дейтроне в некотором объеме радиусом  $r \approx 0,7$  фм, характерным для мезонообразования:  $P_2 = (r/r_D)^3 \approx 5 \times 10^{-2}$ . Здесь  $r_D$  — радиус дейтрона, вычисляемый из его волновой функции. Кривые на этом рисунке соответствуют расчету  $P_2$  в импульсном приближении, результаты которого расходятся с экспериментальными данными на несколько порядков. Таким

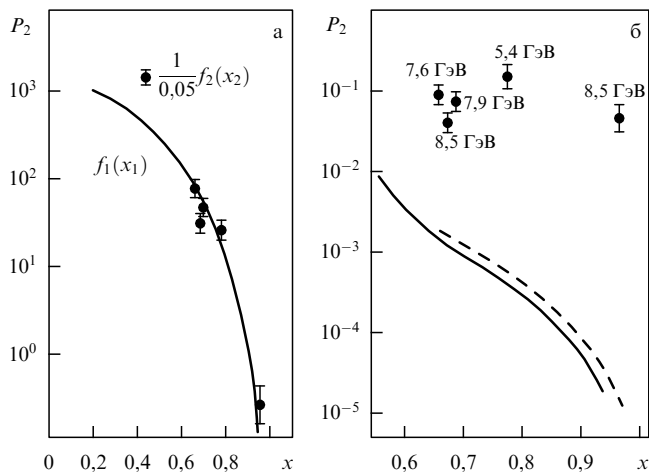


Рис. 3. (а) Сравнение выходов пионов в реакциях pCu (сплошная кривая) ( $f_1$ ) и dCu (●) ( $f_2$ ). (б) Вероятность кумулятивного процесса  $P_2$  в уравнении (1). Кривые показывают расчет  $P_2$  в импульсном приближении.

образом, показано существование кумулятивного эффекта и соответствие его величины гипотезе масштабной инвариантности и достаточно простой модели совместного действия двух нуклонов.

Авторы работы [15] измерили эмиссию протонов под углом  $137^\circ$  из фрагментирующего ядра углерода в реакции pC при энергии протонов в интервале 1–6 ГэВ. Спектр протонов показан на рис. 4. Стрелками показаны импульсы, которые в соответствии с кинематикой должен иметь протон, квазиупруго рассеянный на нуклонных кластерах типа d, t,  $\alpha$ . Наглядно видно присутствие в спектре кумулятивной области  $p_b \geq 400$  МэВ/с. Однако никаких особенностей типа пиков в спектре не обнаруживается. Это еще раз демонстрирует партонный характер изучаемых процессов: действуют не нуклоны, а партоны, несущие значительную часть импульса группы из нескольких нуклонов. Роль нуклонных кластеров также ярко проявляется в реакциях подпорогового рождения части. Например, порог образования антипротона на

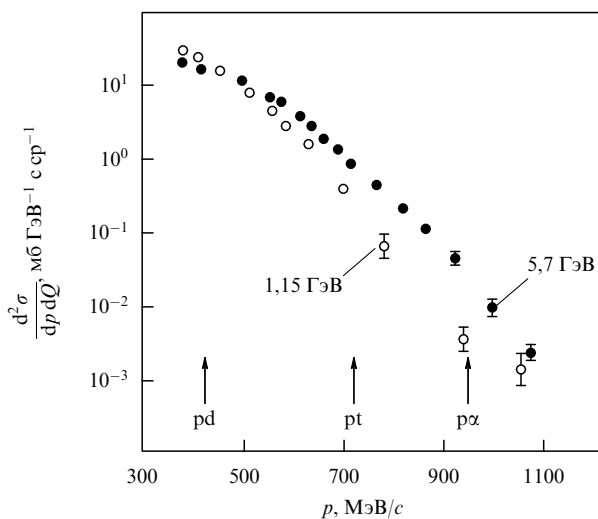


Рис. 4. Спектр протонов в реакции  $p + C \rightarrow p + X$ . Стрелки показывают положения ожидаемых квазиупругих максимумов.

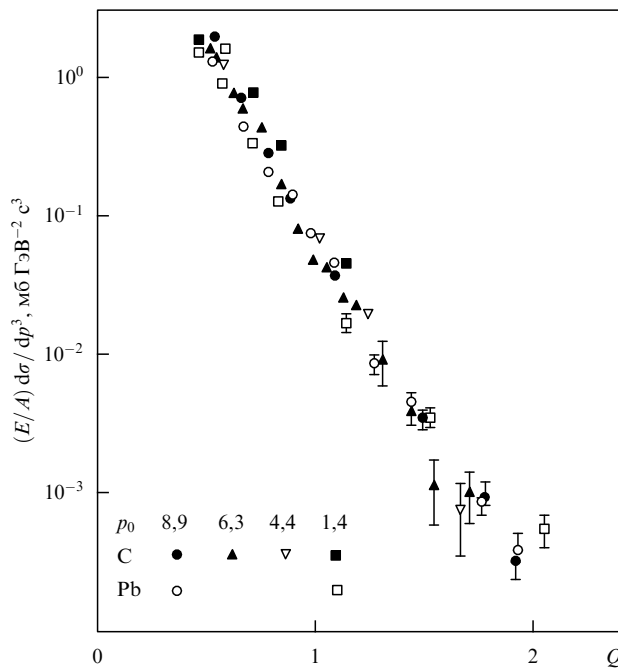


Рис. 5. Зависимость сечения образования пионов от кумулятивного числа  $Q$ . Фрагментируют ядра C и Pb.

нуклоне составляет 6,6 ГэВ. Однако эксперимент обнаруживает антипротоны существенно ниже порога при энергии 3,9 ГэВ.

Анализ обширного экспериментального материала позволил установить ряд важных закономерностей кумулятивных процессов. Зависимость сечения от атомных номеров фрагментирующего ядра  $A_f$ , ядра пучка  $A_b$  и кумулятивного числа  $Q$  дается формулой

$$E \frac{d\sigma}{dp} = CA_f^n A_b^{1/3} \exp\left(-\frac{Q}{Q_0}\right).$$

Зависимость сечения от  $Q$  показана на рис. 5.

В случае эмиссии пионов параметр  $n \approx 0,8$  в области энергии пионов  $T_\pi \leq 200$  МэВ. В области  $T_\pi \geq 300$  МэВ он стремится к постоянной величине  $\approx 1,08$ . Смена режима говорит о включении в процесс кумуляции ядра в целом. Совсем другой характер зависимости сечения от атомного номера ядра-мишени наблюдается при образовании фрагментов p, d, t. Показатель  $n$  принимает соответственно значения  $4/3, 5/3$  и  $2$  (!). Энергетический спектр кумулятивных частиц хорошо представляется экспонентой

$$E \frac{d\sigma}{dp} = C \exp\left(-\frac{T}{T_0}\right).$$

Характерные значения параметра  $T_0$  представлены на рис. 6 как функции импульса пучкового протона. Опять следует отметить выход процесса на скейлинговый режим при импульсе пучка  $p_b \geq 4$  ГэВ/с.

### 6. Исследование упругого рассеяния частиц на малые углы

В 1960-е годы волнующей и широко обсуждаемой проблемой была асимптотика адронных взаимодействий: как ведут себя полные сечения и амплитуды бинарных

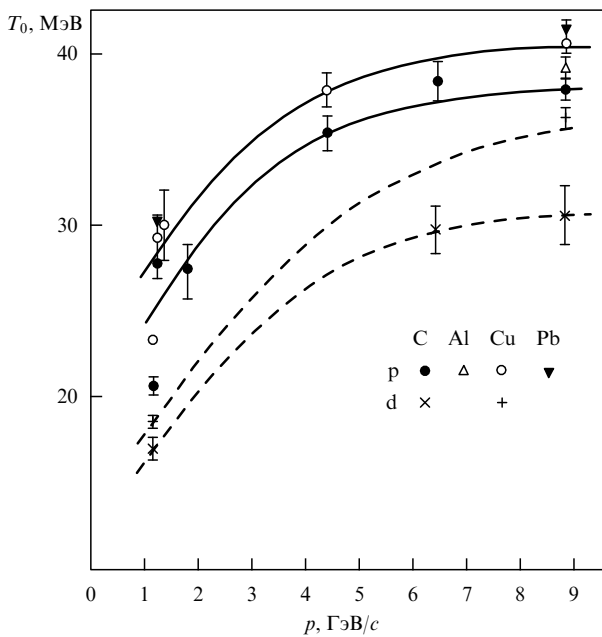


Рис. 6. Эффективная температура, характеризующая эмиссию кумулятивных протонов и дейтронов из разных фрагментирующих ядер в реакциях pA.

процессов при  $E \rightarrow \infty$ ? Простейшее и потому наиболее привлекательное предположение основывалось на оптической модели: полные сечения  $\sigma_{\text{tot}} \sim 2\pi r^2$  и наклон дифракционного конуса  $b = r^2/2$ ,  $d\sigma/dt \sim \exp(bt)$  стремятся к постоянному значению, поскольку адрон, как протяженный объект, представляет собой поглощающую (серую или черную) сферу с постоянным радиусом  $r$ , который много больше длины волны ( $r \gg \lambda$ ,  $\lambda = h/p$ ). Соответственно, действительная часть амплитуды упругого рассеяния, обусловленная в оптике не дифракцией, а коэффициентом преломления, стремится к нулю:  $\rho(E) = \text{Re } A/\text{Im } A \rightarrow 0$ . Знание параметра  $\rho$  позволяет проверить дисперсионные соотношения, которые связывают действительную и мнимую части амплитуды упругого рассеяния частиц. Они выведены на основе основных аксиом квантовой теории поля: причинности, унитарности, лоренц-инвариантности и спектральности. Исследование рассеяния протона на дейтроне дает информацию о формфакторе дейтрона и амплитуде протон-нейтронного рассеяния в частности, ее действительную часть. Данные о ней практически невозможно получить другими методами.

В начале 1960-х годов была сформулирована концепция полюсов Редже, которая претендовала стать главным элементом теории сильных взаимодействий. При достаточно высокой энергии согласно реджистике в бинарные процессы и в полные сечения главный вклад дает один полюс — померон:

$$\frac{d\sigma(s, t)}{dt} = f(t) \left( \frac{s}{s_0} \right)^{2\alpha(t)-2}, \quad \alpha(t) = \alpha(0) + \alpha' t, \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{tot}}(s) = \sigma_0 + \sigma_1 \left( \frac{s}{s_0} \right)^{\alpha(0)-1},$$

$$b(s) = b_0 + 2\alpha' \ln \left( \frac{s}{s_0} \right), \quad \rho \approx 0.$$

Предсказательная сила модели (2) невелика, так как она содержит произвольную функцию  $f(t)$  и два важных параметра  $\alpha(0)$  и  $\alpha'$ , которые определяют тип асимптотики. При  $\alpha(0) \leq 1$  имеем асимптотику с убывающими или постоянными полными сечениями, при  $\alpha > 1$  сечения полиномиально растут, и, чтобы избежать противоречия с теоремой Фруассара, необходимо значительно усложнить модель (1) путем учета перерасеяний померона (выполнить унитаризацию амплитуды померона). Если  $\alpha' = 0$ , то имеем аналог классической оптики с  $b = \text{const}$ . Если  $\alpha' > 0$ , то во всех дифракционных процессах присутствует универсальный логарифмический рост  $b$ -параметра (и радиуса области взаимодействия).

Таким образом, перед экспериментаторами встала задача проверить соотношения (2) и определить, по крайней мере, три важных параметра  $\alpha(0)$ ,  $\alpha'$  и  $\rho$ . Оценки показывают, что измерения необходимо проводить с высокой точностью (2–3% в дифференциальном сечении) и во всем доступном интервале энергии  $E > 1$  ГэВ.

Исследования упругого рассеяния пионов и протонов на протонах и легких ядрах начались в ОИЯИ буквально на первых оборотах пучка СФ. Вначале применялась ядерная эмульсия, которая дала лишь общие характеристики, что объясняется трудоемкостью набора статистики. В начале 1960-х годов группы под руководством В.А. Свиридова и Л.Н. Струнова предложили две новые методики, которые оказались весьма эффективными. Для наблюдения рассеяния пионов использовалась камера Вильсона, заполненная газообразным водородом. Новость состояла в разработке специального режима действия камеры с пониженной чувствительностью. Релятивистские частицы с минимальной ионизацией при этом не были видны, поэтому через камеру стало возможным пропускать до  $10^4$  частиц в одном цикле ускорителя. Это на три порядка выше общепринятого значения интенсивности для таких камер. При этом медленные и сильно ионизирующие протоны отдачи от упругого рассеяния регистрировались в газе с высокой эффективностью. Новый режим позволил фиксировать события упругого рассеяния с рекордно малым переданным импульсом и получать большую статистику. В результате был измерен параметр  $\rho$  для  $\pi p$ - и  $\pi \text{He}$ -рассеяния. Данные приведены на рис. 7 и 8 [19].

В 1961 г. на внутреннем пучке СФ была создана установка, в которой реализован метод многократного прохождения ускоряемого пучка через тонкую мишень. Применялась пленочная мишень толщиной  $\sim 0,5$  мкм [10]. В 1967 г. с учетом опыта, полученного на СФ, была создана установка на внутреннем пучке ускорителя У-70 ИФВЭ. Она включала принципиально важный и новый элемент — газовую сверхзвуковую струйную водородную мишень с плотностью  $\sim 10^{-7}$  г см $^{-3}$  [20]. Позже аналогичные мишени были применены на ускорителях ФНАЛа, ЦЕРНа и во многих других лабораториях. Исследование со струйной мишенью планируется на ЛНС в ЦЕРНе.

Отметим, по крайней мере, три отличительные особенности метода тонкой внутренней мишени.

1. Возможность прецизионного измерения энергии и угла эмиссии медленной частицы отдачи. В наших работах с помощью полупроводниковых детекторов регистрировались протоны и дейтроны с минимальной энергией 0,4 МэВ.



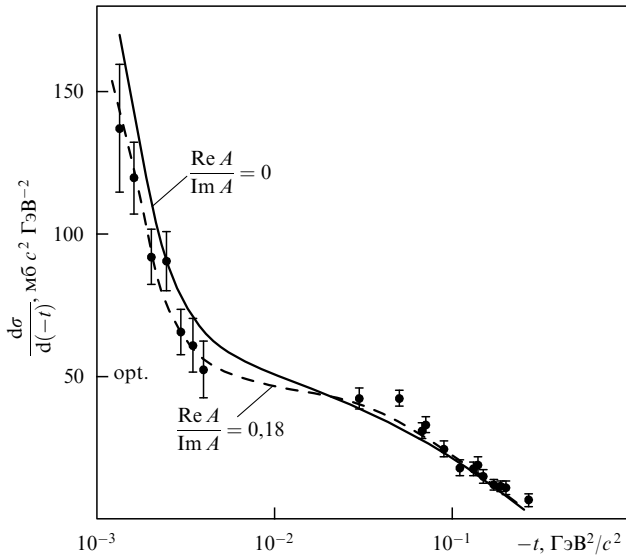


Рис. 7. Дифференциальное сечение упругого  $\pi p$ -рассеяния в области кулон-ядерной интерференции.

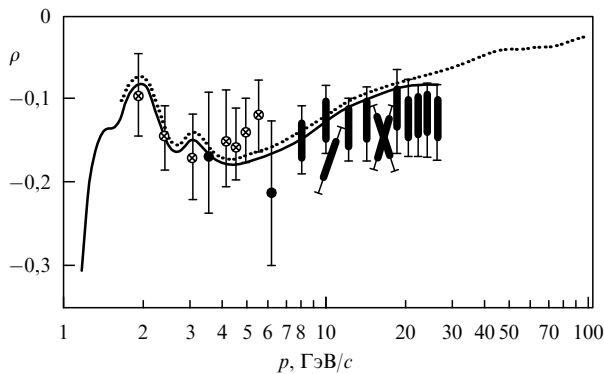


Рис. 8. Параметр  $\rho$  упругого  $\pi p$ -рассеяния как функция импульса пучка  $\pi^-$ . Точки  $\odot$  — данные, полученные на СФ.

2. Возможность сканирования всего диапазона энергии ускорителя и работы при этом параллельно с другими экспериментами.

3. Отсутствие выведенного пучка, что удешевляет установку и позволяет приступить к физическим измерениям сразу после запуска ускорителя.

С помощью методики тонкой внутренней мишени на СФ было изучено упругое рассеяние протонов на протонах и дейтронах [11, 21].

К середине 1969 г. в дискуссии о типе асимптотики адронных процессов ясность не была достигнута. Данные об упругом  $pp$ -рассеянии, полученные в ОИЯИ в интервале энергии 2–10 ГэВ, указывали на сужение дифракционного конуса. Но в области столь малой энергии применение формул типа (2) неправомерно. Данные БНЛА и ЦЕРНа в диапазоне энергии 15–24 ГэВ указывали на выполаживание функций  $\sigma_{\text{tot}}, b(E)$ . Но невысокая точность измерений и малый интервал энергии не позволяли сделать убедительный вывод.

Оригинальный метод исследования и широкий интервал энергии, достигнутый на самом крупном (в 1968–1972 гг.) ускорителе У-70, дали возможность ответить на поставленный вопрос. Объединенная группа ОИЯИ–ИФВЭ приступила к исследованию упругого рассеяния

протонов в 1968 г. фактически на первых оборотах пучка нового ускорителя ИФВЭ на энергию 70 ГэВ. Первое сообщение о результатах, полученных на У-70 по параметру  $b$ , было сделано летом 1969 г. на конференции в Лунде. Эксперимент однозначно свидетельствовал о логарифмическом росте функции  $b(E)$ . Параметр наклона траектории эффективного полюса Померанчука оказался отличным от нуля:  $\alpha' = 0,47 \pm 0,09$  [22]. Выражение "эффективный полюс" отражает приближенный характер формул (2). Попытки сформулировать более точную и полную концепцию полюсов Редже продолжают до сих пор.

На рисунке 9 дана компиляция наиболее точных данных (на 1973 г.) по параметру наклона  $b_{pp}(E)$ . На рисунке 10 показан пример дифференциального сечения упругого  $pp$ -рассеяния. Характерная точность измерения в каждой точке по  $t$  составляет 2%. Хорошо видна область кулоновского рассеяния (и кулон-ядерной интерференции) и область дифракционного конуса  $|t| \geq 0,01 \text{ ГэВ}^2/c^2$ . Измерение дифференциального сечения в области предельно малых значений  $|t| \geq 0,0007 \text{ ГэВ}^2/c^2$  (кинетическая энергия протона отдачи  $T_{\text{kin}} \approx 0,4 \text{ МэВ}$ ) выполнено с целью измерения  $\rho$ -параметра [23]:  $d\sigma/dt = |i \text{Im } A + \text{Re } A + A_c|^2$ ,  $\rho = \text{Re } A / \text{Im } A$ . Знание функции  $\rho(E)$  необходимо для проверки и развития ряда важных направлений теории сильных взаимодействий: дисперсионных соотношений, аксиоматической теории поля, теории комплексных моментов и др.

На рисунке 11 дана компиляция наиболее точных данных по  $\rho$ -параметру (на 1973 г.). Данные хорошо согласуются с расчетом по дисперсионному соотношению.

Кривые, показанные на рис. 11, вычислены по дисперсионному соотношению в следующих предположениях о поведении полных сечений:

- I.  $\sigma_{\text{tot}, pp}$  и  $\sigma_{\text{tot}, \bar{p}p} \sim 0,5 \ln^2(s/122)$ ;
- II.  $\sigma_{\text{tot}} = \text{const} = 38 \text{ мб}$  в области  $E > 120 \text{ ГэВ}$ ;
- III.  $\sigma_{\text{tot}} = \text{const} = 42,2 \text{ мб}$  в области  $E > 2000 \text{ ГэВ}$ .

Во всех случаях предполагается выполнение теоремы Померанчука, т.е.

$$\lim_{E \rightarrow \infty} (\sigma_{\text{tot}, pp} - \sigma_{\text{tot}, \bar{p}p}) = 0.$$

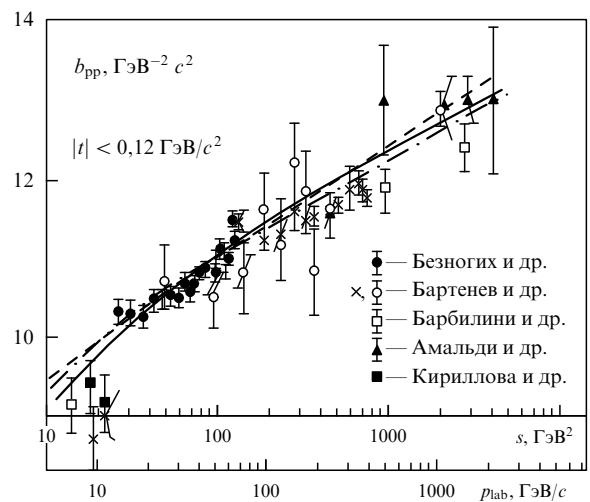


Рис. 9. Компиляция данных по параметру наклона дифракционного конуса  $pp$ -рассеяния. Данные ОИЯИ–ИФВЭ.

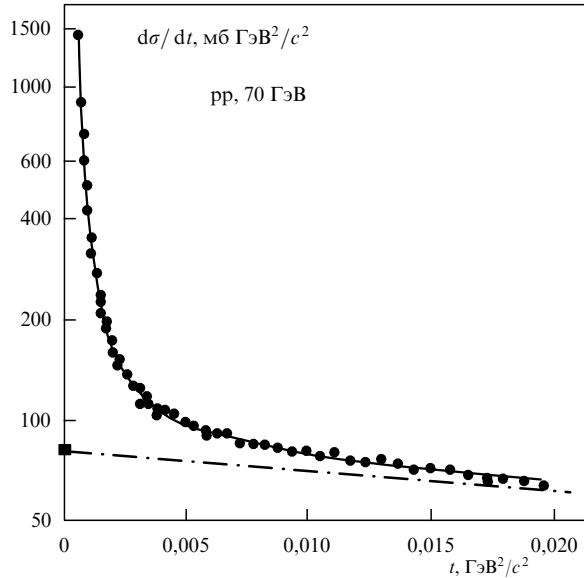


Рис. 10. Пример дифференциального сечения упругого pp-рассеяния в области кулон-ядерной интерференции.

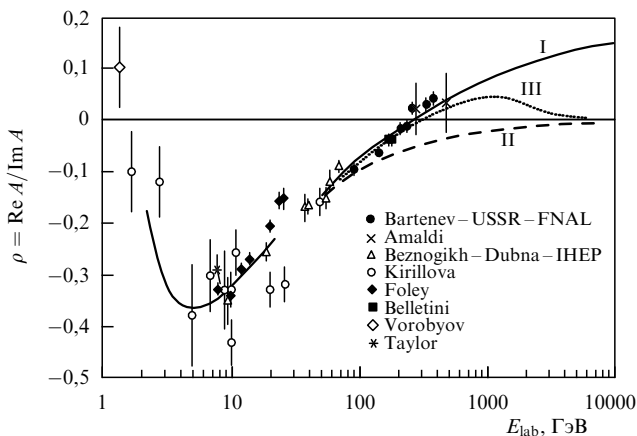


Рис. 11. Компильция данных по  $\rho$ -параметру упругого pp-рассеяния. Данные ОИЯИ – ИФВЭ. Кривые — различные варианты расчета по дисперсионному соотношению.

Модель (2) требует универсального поведения функций  $b_{ab}(E)$  при достаточно высокой энергии. Здесь  $a$  и  $b$  — любая пара адронов. Экспериментальные данные о рассеянии  $p, \pi, K, \bar{p}$  на протонах находятся в соответствии с этим ожиданием. Все процессы контролируются одним параметром  $\alpha'$  (значение которого зависит от конкретной реализации модели и от интервала энергии). Однако есть одно исключение из закономерности (2). Речь идет об упругом  $pd$ - и  $pHe^4$ -рассеянии. Эксперименты были выполнены на ускорителях ОИЯИ [24], ИФВЭ [25] и ФНАЛа [26, 27] с применением методики тонкой внутренней мишени [20, 21]. Ситуация иллюстрируется рис. 12, где приведена энергетическая зависимость параметров  $b_{pp}(E)$ ,  $b_{pd}(E)$  и  $b_{pHe}(E)$ . В интервале энергии 2–70 ГэВ функции  $b(E) = b_0 + b_1 \ln E$ ,  $b_1 = 2\alpha'$  для  $pp$ ,  $pd$ ,  $pHe$  имеют одинаковый наклон:  $b_{1,pp} = 0,96 \pm 0,18$ ,  $b_{1,pd} = 1,15 \pm 0,24$ ,  $b_{1,pHe} \approx b_{1,pd}$ . Но в области 50–400 ГэВ они расходятся, явно нарушая универсальность (2):  $b_{1,pp} = 0,56 \pm 0,05$ ,  $b_{1,pd} = 0,94 \pm 0,04$ ,  $b_{1,pHe} = 1,13 \pm 0,04$ . (Значения  $b$  приведены в единицах

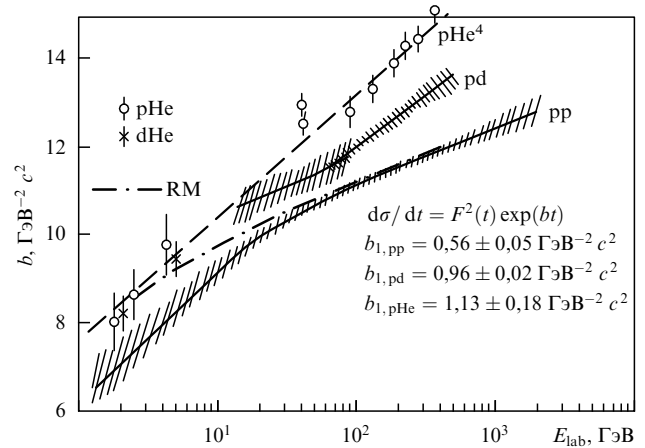


Рис. 12. Компильция данных по параметру  $b$  дифракционного конуса  $pp$ -,  $pd$ - и  $pHe$ -рассеяния. Демонстрируется неуниверсальное поведение функций  $b_{pA}(E)$  в области  $E > 50$  ГэВ.

ГэВ $^{-2}$  c $^2$ .) В работе [9] эта проблема рассматривается для  $pd$ -взаимодействия. Отмечено, что эффективный параметр  $\alpha'_{pA}$  в рассеянии на ядрах модифицируется за счет энергетической зависимости эффекта взаимной экранировки нуклонов (глауберовская поправка к полному и дифференциальному сечению). Но количественное согласие с экспериментом не достигнуто. В работе [29] выполнен наиболее полный анализ упругого  $pHe$ -рассеяния с учетом упругого и неупругого перерассеяния первичной частицы в ядре. Но наблюдаемая энергетическая зависимость  $b_{1,pHe}(E)$  не получается. Проблема остается открытой. Можно лишь высказать предположение, что померон, распространяясь в ядерной материи (в модифицированном КХД-вакууме), значительно меняет свои свойства.

Исследования, выполненные на У-70 в конце 1960-х годов сразу после запуска ускорителя, сыграли важную роль в формировании концепции померона и определении его свойств. В настоящее время время этот объект продолжает играть важную роль в описании динамики мягких и полужестких адронных процессов, включая неупругую дифракцию. Померон приобрел статус почти реального адрона. В экспериментах по глубоконеупругому рассеянию лептонов делаются попытки определить его структурную функцию в терминах кварков и глюонов.

Тематика упругого рассеяния адронов утратила былую актуальность. Однако anomalous поведение параметров наклона дифракционных конусов рассеяния протонов на легких ядрах остается загадкой. Поэтому представляется актуальным дальнейшее прецизионное исследование упругого  $pA$ -рассеяния в области энергии выше 50 ГэВ. Важно выполнить измерения на пучках протонов и антипротонов. Это, в частности, даст возможность выделить эффект оддерона — объекта, который построен из нечетного числа глюонов. С теоретической точки зрения оддерон столь же необходим, как и померон. Но о его существовании почти ничего неизвестно. Это связано с отсутствием точных данных о дифракционном взаимодействии антипротонов. На внутреннем пучке ускорителей ЦЕРНа и ФНАЛа можно выполнить названные исследования, используя методику, развитую на СФ и У-70.

## 7. Формирование пучков заряженных частиц с помощью изогнутого кристалла

Возможность поворота пучка заряженных частиц за счет каналирования в изогнутом кристалле была теоретически показана Э.Н. Цыгановым в 1976 г. [30] и вскоре этот удивительный эффект наблюдали на выведенном пучке протонов СФ [31]. Явление каналирования частиц в кристалле было известно ранее. Оно состоит в локализации движения положительно заряженной частицы между кристаллическими плоскостями за счет электростатического поля, создаваемого ионами вблизи плоскостей. Если угол между траекторией и плоскостью достаточно мал, то частица отражается от плоскостей и движется между ними. Предельный угол каналирования составляет  $\theta = \sqrt{2U/pv}$ , где  $U$  — глубина межплоскостной потенциальной ямы,  $p$  — импульс и  $v$  — скорость частицы. Траектория отрицательно заряженной частицы локализуется около одной плоскости или оси кристалла. Э.Н. Цыганов обратил внимание на совсем не очевидную возможность реализовать каналирование в механически изогнутом кристалле. Это приводит к повороту пучка частиц, захваченных в процесс каналирования. В первом же эксперименте на СФ пучок протонов с импульсом 8,5 ГэВ был отклонен на угол 26 мрад кристаллом кремния с длиной около 5 мм. Оказалось, что отклоняющая способность кристалла эквивалентна магниту с напряженностью поля 60 Тл! Пионерская работа, выполненная на СФ, открыла новое направление в технике эксперимента: вывод пучка из ускорителя, формирование пучков вторичных частиц, создание принципиально новых фокусирующих элементов, измерение эмитанса пучков, измерение магнитного момента короткоживущих частиц [32]. Впервые вывод пучка из ускорителя был осуществлен на СФ. Схема вывода дана на рис. 13. Эта техника также апробирована на SPS в ЦЕРНе и на Теватроне во ФНАЛе. На ускорителе У-70 в ИФВЭ с помощью изогнутых кристаллов сформировано не-

сколько выведенных пучков протонов с энергией до 70 ГэВ.

## 8. Заключение

В заключение отметим, что наиболее значимые методические и физические исследования на СФ были высоко оценены и удостоены премий государственного уровня. Приведем фамилии лауреатов этих премий и названия работ, за которые они их получили.

1959 г. В.И. Векслер (ОИЯИ), Ф.А. Водопьянов, Д.В. Ефремов, Л.П. Зиновьев (ОИЯИ), А.А. Коломенский, Е.Г. Комар, А.Л. Минц, Н.А. Монозон, В.А. Пектухов (ОИЯИ), М.С. Рабинович, С.М. Рубчинский, А.М. Столов — создание Синхрофазотрона на 10 ГэВ.

1983 г. Ю.К. Акимов, В.А. Никитин, Б.А. Морозов, Ю.К. Пилипенко, Л.С. Золин, С.В. Мухин, М.Г. Шафранова, В.А. Копылов-Свиридов, А.А. Кузнецов (ОИЯИ), А.А. Воробьев (ЛИЯФ), Е.Л. Фейнберг (ФИАН), В.А. Царев (ФИАН) — дифракционное рассеяние протонов при высокой энергии.

1985 г. Г.П. Жуков, И.Ф. Колшаков, А.Н. Синаев и др. — разработка и массовое производство на основе международного стандарта КАМАК системы автоматизации научных и научно-технических исследований.

1986 г. Ю.В. Заневский и др. — разработка и применение ядерно-физических методов и аппаратуры для исследований в молекулярной биологии.

1986 г. Н.Н. Говорун, В.П. Шириков и др. — разработка и внедрение программных средств в инженерные расчеты и проектирование сложных технических систем на ЭВМ.

1988 г. А.М. Балдин, П.Н. Боголюбов, В.А. Матвеев, Р.М. Мурадян, А.Н. Тавхелидзе — открытие нового квантового числа — цвета и установление динамических закономерностей в кварковой структуре элементарных частиц.

1992 г. В.С. Алфеев, З.В. Борисовская и др. — разработка и создание экономических сверхпроводящих магнитов для ускорителей высоких энергий.

1996 г. М.Д. Бавижев, В.И. Котов (ИФВЭ), А.И. Смирнов (ПИЯФ), А.М. Таратин, Э.Н. Цыганов (ОИЯИ) и др. — разработка новых методов управления пучками частиц с помощью изогнутых кристаллов.

## Список литературы

1. Владимир Иосифович Векслер (Ред.-сост. М Г Шафранова) (Дубна: ОИЯИ, 2003)
2. Вагин В А, Векслер В И и др., в сб. *Международная конф. по ускорителям, Дубна, 1963* (М.: Атомиздат, 1964) с. 788; Volodin V D et al., in *Proc. of the Intern. Conf. on High-Energy Accelerators, Cambridge, Mass., 1967* (ORNL-AIC-1, No. 49, Ed. F T Howard) (Oak Ridge, Tenn.: Oak Ridge National Laboratory, 1967) p. A160
3. Золин Л С и др. *УФН* **117** 119 (1975)
4. Вовенко А С и др. *УФН* **81** 453 (1963); Денисов С П, в сб. *Труды Международной конф. по аппаратуре в физике высоких энергий, Дубна, 8–12 сент. 1970* (ОИЯИ, Издания, Д-5805) Т. 2 (Дубна: ОИЯИ, 1971) Гл. 8, с. 453
5. Оконов Э, Подгорещкий М, Хрусталева О *ЖЭТФ* **42** 770 (1962); Нягу Д и др., Препринт Р-2325 (Дубна: ОИЯИ, 1965)
6. Савин И А *ЭЧАЯ* **8** 28 (1977)
7. Александров Ю А и др. *Пузырьковые камеры* (Под ред. Н Б Делоне) (М.: Госатомиздат, 1963); Balandin M P et al. *Nucl. Instrum. Meth.* **20** 110 (1963); Никитин С Я и др., в сб. *Труды*

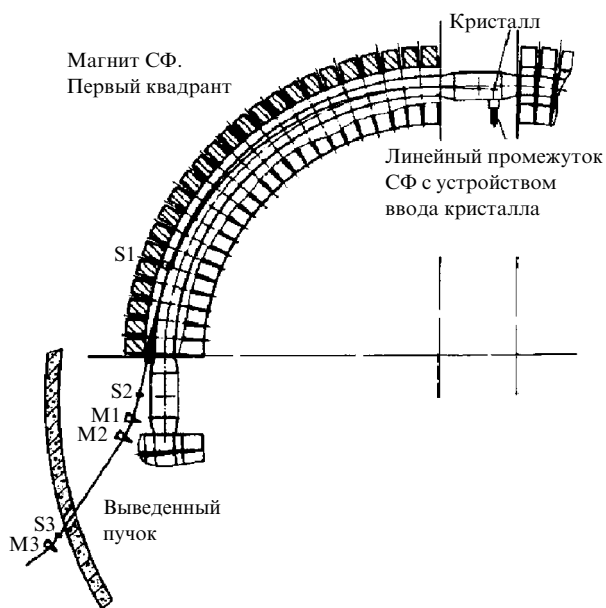


Рис. 13. Схема вывода пучка протонов из СФ с помощью изогнутого кристалла кремния.  $M_{1,2,3}$  — магниты;  $S_{1,2,3}$  — сцинтилляционные счетчики.

- Международной конф. по аппаратуре в физике высоких энергий, Дубна, 8–12 сент. 1970* (ОИЯИ, Издания Д-5805) Т. 2 (Дубна: ОИЯИ, 1971) Гл. 13, с. 615
8. Глаголев В В, Толстов К Д *ЭЧАЯ* 3 (1) 65 (1972)
  9. Пантуев В С, Хачатурян М Н, Чувило И В *ПТЭ* (1) 19 (1960); Азимов М А и др. *ЯФ* 3 515 (1967)
  10. Никитин В А и др. *ПТЭ* (6) 18 (1963)
  11. Золин Л С, Никитин В А, Пилипенко Ю К, Препринт Р-13-3425 (Дубна: ОИЯИ, 1967); Zolin L S, Nikitin V A, Pilipenko Y K *Cryogenics* 8 143 (1968); Ekström C *Nucl. Instrum. Meth. A* 362 1 (1995); Bartenev V et al. *Adv. Cryog. Eng.* 18 460 (1973)
  12. Векслер В И, в сб. *Материалы 9-й Международной конф. по физике высоких энергий, Киев, 15–25 июля 1959* (М.: Изд-во АН СССР, 1961)
  13. Гришин В Г *ЭЧАЯ* 7 595 (1976); 10 608 (1979)
  14. "Сотрудничество пропановой камеры ОИЯИ" *ЯФ* 22 5 (1975)
  15. Баюков Ю Д и др. *Изв. АН СССР. Сер. физ.* 30 521 (1966); Ставинский В С *ЭЧАЯ* 10 949 (1979)
  16. Ван Ган-чан и др. *ЖЭТФ* 38 1356 (1960)
  17. Бьеркен Дж Д, Дрелл С.Д. *Релятивистская квантовая теория* (М.: Наука, 1978)
  18. Балдин А М, Балдин А А *ЭЧАЯ* 29 576 (1998)
  19. Никитин В А и др. *ЯФ* 1 183 (1965); Nomofilov A A et al. *Phys. Lett.* 22 350 (1966)
  20. Бартенев В Д и др., в сб. *Труды Международной конф. по аппаратуре в физике высоких энергий, Дубна, 8–12 сент. 1970* (ОИЯИ, Издания, Д-5805) (Дубна: ОИЯИ, 1971) с. 16
  21. Никитин В А *ЭЧАЯ* 1 (1) 6 (1970); 10 581 (1979); Шафранова М Г *ЭЧАЯ* 5 645 (1974)
  22. Безногих Г Г и др. *ЯФ* 10 1212 (1969)
  23. Бартенев В Д и др. *ЯФ* 16 96 (1972)
  24. Далхажав Н и др. *ЯФ* 8 342 (1968)
  25. Бартенев В Д и др. *ЯФ* 15 1174 (1972)
  26. Akimov Y et al. *Phys. Rev. D* 12 3399 (1975)
  27. Vujak A et al. *Phys. Rev. D* 23 1895 (1981)
  28. Азимов Я И и др. *Письма в ЖЭТФ* 23 131 (1976)
  29. Dakhno L G, Nikolaev N N *Nucl. Phys. A* 436 653 (1985)
  30. Tsyganov E N, Fermilab TM-682, TM-684 (Batavia, 1976)
  31. Elishev A F et al. *Phys. Lett. B* 88 387 (1979)
  32. Moller S P, CERN-94-05 (1994) p. 1

PACS number: 29.20 Lq

## От синхрофазотрона к Нуклотрону

А.Д. Коваленко

### 1. Введение.

#### Принцип автофазировки — "гордиев узел разрублен!"

Мне выпала честь представлять ученых-ускорительщиков, инженерно-технический состав и всех сотрудников Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, созданной выдающимся ученым, внесшим огромный вклад в мировую науку, в международное сотрудничество ученых, В.И. Векслером, на торжественной сессии, посвященной 100-летию со дня его рождения. Для людей моего поколения, т.е. родившихся на полвека позже Владимира Иосифовича и вовлеченных судьбой в процесс создания ускорителей, получения и использования пучков заряженных частиц высоких энергий, его имя, конечно, в первую очередь ассоциируется с открытием принципа автофазировки. Мне кажется, что наиболее точно атмосфера, предшествовавшая этому, отражена в воспоминаниях

Е.Л. Фейнберга в статье "Вавилов и вавиловский ФИАН", выдержку из которой не могу не процитировать:

"...В конце 30-х годов не меньше, чем теперь, было ясно, что ядерная физика нуждается в ускорителях частиц на большие энергии. ...Сергей Иванович (Вавилов — Авт.) понимал, что серьезная ядерная физика невозможна без крупного ускорителя. .... И вот в 1940 г. принимается смелое решение: создается "циклотронная бригада" с заданием изучить вопрос о сооружении циклотрона с диаметром полюсов в несколько метров и приступить к его проектированию. ... В циклотронную бригаду вошла все та же "зеленая" молодежь — Векслер, Вернов, Грошев, Черенков и я (т.е. Е.Л.Фейнберг — Авт.). Изучение вопроса шло интенсивно, споры по поводу возможных вариантов были горячими, но все лишь для того, чтобы снова и снова убеждаться в невероятной трудности задачи. Однако все было круто изменено, когда в феврале 1944 г. В.И. Векслер, все годы, чем бы он одновременно ни занимался, неустанно размышлявший над проблемой ускорения, буквально разрубил гордиев узел: он обнаружил, что можно переключиться через релятивистский барьер. Открытая им возможность создания ускорителей совершенно нового класса повернула всю мировую технику ускорителей на другой путь"<sup>1</sup>.

В анналах же мировой истории науки открытие возможности преодоления релятивистского барьера при резонансном ускорении заряженных частиц, т.е. открытие принципа автофазировки вошло как: "The discovery of phase stability principle" by V.I. Veksler and E.McMillan.

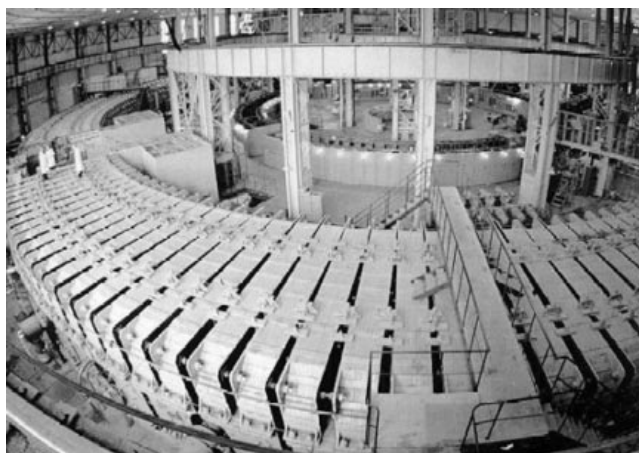
Открытие принципа автофазировки сняло принципиальное ограничение на получение в лабораторных условиях пучков заряженных частиц *сколь угодно высоких энергий*. Действительно, сравнивая энергию протонов ( $\approx 100$  МэВ), достигнутую на циклотронах — циклических резонансных ускорителях "довекслеровского периода", с ожидаемой в ЦЕРНе после запуска Большого Адронного Коллайдера ЛНС (7 000 000 МэВ), можно сказать, что с позиций ускорительщиков того времени это были уже практически "*недостижимо высокие энергии*", а если учесть, что в коллайдерном режиме энергия сталкивающихся протонов в системе их центра масс достигнет  $E_{ц.м} = 14$  ТэВ, т.е. эквивалентная энергия налетающего на неподвижную мишень протона соответствует примерно  $5 \times 10^7$  МэВ, — то тем более. В последние годы неоднократно высказывается мнение, что ЛНС — это последний адронный коллайдер, построенный на Земле. Я не думаю, что это так. Наиболее широко и интенсивно обсуждаемый сейчас проект следующего за ЛНС ускорительного комплекса — это международный электрон-позитронный коллайдер ILC (International Linear Collider) на энергию  $2 \times 500$  ГэВ, создание которого поддерживается мировым сообществом, работающим в области физики частиц. Активную позицию занимают в этом вопросе ученые России и ОИЯИ, предложившие использовать район Дубны для размещения такого комплекса. Но вполне уместно в связи с юбилеем Векслера поставить вопрос: "А есть ли разумный, реализуемый в принципе, верхний предел энергии "рукотворного" ускорителя протонов?" Фантазия автора

<sup>1</sup> Фейнберг Е.Л. *Эпоха и личность. Физики. Очерки и воспоминания*. 2-е изд. (М.: Физматлит, 2003) с. 233.

этих строк ограничилась в свое время предложением и концептуальным рассмотрением Пэватрона<sup>2</sup> — протонного синхротрона/коллайдера на энергию 1 ПэВ, т.е.  $10^{15}$  эВ, основанного на экономичной сверхпроводящей магнитной системе нового типа. В коллайдерном режиме Пэватрон обеспечил бы эквивалентную энергию взаимодействия  $\sim 2 \times 10^{21}$  эВ в системе с неподвижной мишенью, что превышает максимальную энергию частиц  $\sim 3,0 \times 10^{20}$  эВ), зарегистрированную в приходящих к нашей планете космических лучах, с исследованиями которых было связано начало деятельности Владимира Иосифовича в области физики высоких энергий.

## 2. Объект КМ — Синхрофазотрон и его модернизация

Создание синхрофазотрона — установки под кодовым названием КМ, т.е. кольцевой магнит, и успешный его запуск в Дубне в апреле 1957 г. явились событием мирового значения. Наличие ускорителя на энергию протонов 10 ГэВ фактически дало старт ускорительной физике высоких энергий, обеспечив на определенном отрезке истории лидирующую роль ОИЯИ в этих исследованиях. Об этом рассказал В.А. Никитин в предыдущем докладе. Наиболее впечатляющим элементом крупнейшего в мире ускорителя, конечно же, был кольцевой электромагнит весом 36 тыс. т и периметром 208 м с системой импульсного электропитания. Внушительный вид этого магнита производит сильное впечатление на входящих в корпус № 1 Лаборатории и по сей день. Многие другие системы синхрофазотрона, в частности, ВЧ, вакуумная камера и ее откачка, были также разработаны на уровне самых современных технологий своего времени. Будучи "прочно сработанным" синхрофазотрон оставался "в строю" с 1957 г. до 2003 г. В результате последовательной модернизации, проведенной в 1970-х годах по инициативе А.М. Балдина, ставшего директором ЛВЭ в 1968 году, этот протонный ускоритель в 1970-е годы прошлого столетия был преобразован в



Кольцевой магнит синхрофазотрона на энергию протонов 10 ГэВ.

первый ускоритель релятивистских ядер. В Лаборатории были предложены и реализованы новые методы получения высокозарядных ионов в источниках частиц, создан новый инжектор — линейный ускоритель ЛУ-20, созданы системы вывода ускоренных пучков протонов и ядер из Синхрофазотрона в двух направлениях, включая новый экспериментальный корпус (здание 205), введены многие другие усовершенствования. На Синхрофазотроне были получены уникальные пучки поляризованных дейтронов с импульсом до 4,5 А ГэВ, сформированы вторичные пучки поляризованных нейтронов. В период 1970–1990 гг. средний годовой уровень работы ускорительного комплекса ЛВЭ превышал 4000 ч<sup>3</sup>.

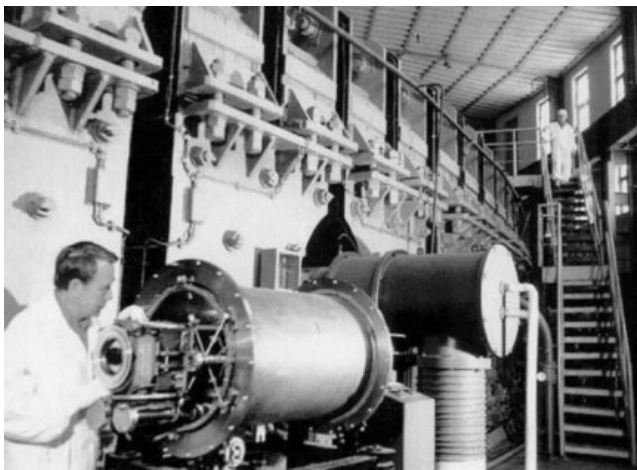
Модернизация синхрофазотрона в значительной степени решила на многие годы проблему наличия в России базы для постановки и проведения физических экспериментов в области релятивистской ядерной физики с использованием пучков легких (вплоть до серы,  $A = 32$ ) ядер. Один из важнейших результатов этих исследований — установление границы области предельной фрагментации ( $\sim 3,5$  А ГэВ), определяющей начало асимптотического режима в релятивистских ядерных столкновениях. Однако перспективное развитие этого нового научного направления требовало расширения диапазона масс ускоряемых частиц, вплоть до урана, повышения максимальной энергии пучков, улучшения ряда других параметров ускорителя, что было реально недостижимо на синхрофазотроне, и ясное осознание этого уже в начале 70-х годов привело к идее создания специализированного ускорителя релятивистских ядер, получившего название Нуклотрон.

## 3. Нуклотрон — новая технология сверхпроводящих синхротронов

С начала 1970-х годов в передовых исследовательских центрах мира приступили к практическому освоению технологии и техники сверхпроводимости и ее внедрению в базовые приборы — ускорители заряженных частиц. В ЛВЭ ОИЯИ также начинается разработка проблемы создания сверхпроводящего жесткофокусирующего ускорителя релятивистских ядер — Нуклотрона. В период 1973–1983 гг. велись поиски реализуемой концепции Нуклотрона и освоение технологии производства сверхпроводящих магнитов в лабораторных условиях. В результате возникло оригинальное направление создания достаточно простых и надежных сверхпроводящих магнитных систем для синхротронов с уровнями полей 1,8–2 Тл, способных работать с частотой повторения циклов до 1 Гц, что и по сей день не достигнуто в других лабораториях. Магниты имеют ферромагнитное ярмо с полюсами, формирующими необходимую конфигурацию поля, и обмотку возбуждения из трубчатого сверхпроводящего композитного кабеля, охлаждаемого циркулирующим потоком двухфазного гелия при температуре 4,5 К. Достигнутый прогресс в технологии создания магнитных систем ускорителей высоких энергий наглядно иллюстрирует фотография. Две реализованные идеи, а именно: прин-

<sup>2</sup> Kovalenko A D "VLHC based on cooled iron intermediate field superconducting magnets", in *Intern. Conf. on High Energy Accelerators, HEACC'03, Tsukuba, Japan, March 2003*.

<sup>3</sup> Более детально о развитии синхрофазотрона сообщалось в ряде обзорных статей, например: Семенов И Н "Дубненский синхрофазотрон. От протонов к релятивистским ядрам и поляризованным дейтронам" *Письма в ЭЧАЯ* 1 (6(123)) 80 (2004).



Сверхпроводящий дипольный магнит Нуклотрона в зале синхрофазотрона.

цип жесткой фокусировки и применение сверхпроводимости в магнитах с целью получения высокой плотности тока в их обмотках возбуждения, позволили кардинальным образом миниатюризировать габариты магнитов, уменьшить погонный вес кольца ускорителя более чем в 500 раз! Наиболее оригинальным элементом в конструкции Нуклотрона является трубчатый сверхпроводящий кабель с малыми динамическими тепловыделениями и минимальной деградацией критического тока в быстропеременном магнитном поле. При этом использовались стандартные, выпускаемые уже в то время советской промышленностью компоненты, в частности ниобий-титановый композитный провод с диаметром сверхпроводящей нити 10 мкм. В начале 80-х годов было завершено создание рабочих прототипов магнитов нового ускорителя, после чего стало возможно реально проектировать все его системы.

Проект "Реконструкция магнитной системы синхрофазотрона на сверхпроводящую — Нуклотрон" был утвержден в декабре 1986 года. В период с 1987 г. по 1992 г. были запущены в серию, изготовлены и прошли комплексные испытания 100 дипольных и 66 квадрупольных криогенно-магнитных модулей его магнитной системы. Монтаж Нуклотрона был завершён в январе 1993 г. и в марте этого же года проведен первый наладочный сеанс. В эти юбилейные дни идет 36-й по счету сеанс его работы. Магнитно-криостатная система нового ускорителя периметром 251,5 м расположена в



Нуклотрон: фрагмент кольца ускорителя в районе инжекции пучка.

тоннеле, окружающем фундамент синхрофазотрона. Для охлаждения магнитов до рабочей температуры (4,5 К) в ЛВЭ создана адекватная инфраструктура, включающая необходимые технические и технологические средства для хранения газообразного гелия, его охлаждения, ожигения и транспортировки. Нуклотрон — 6 А ГэВ синхротрон основан на уникальной и по сей день, высочайшего уровня технологии<sup>4</sup>.

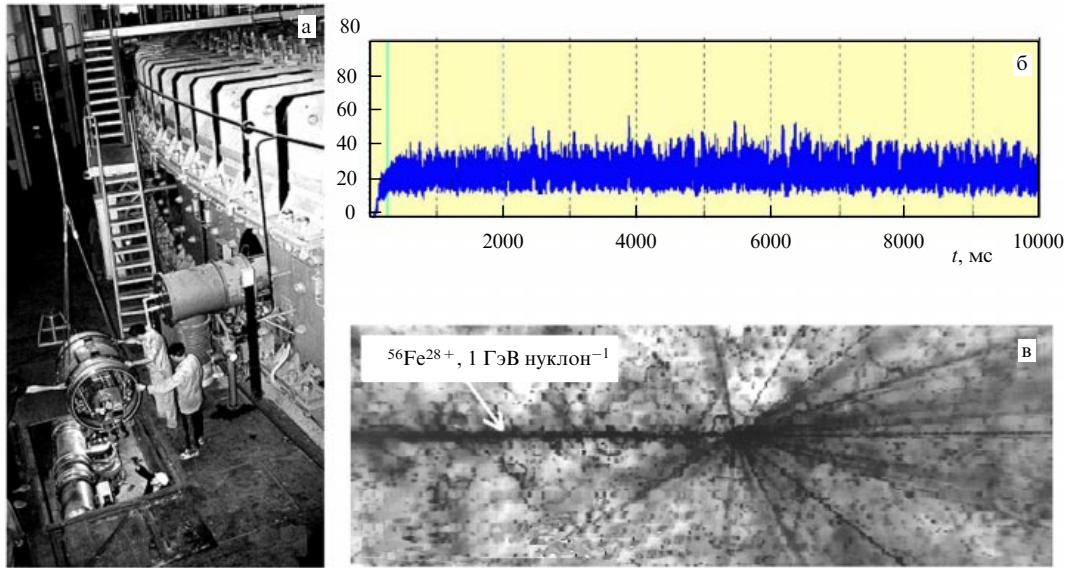
Время ввода Нуклотрона в действие совпало с началом перехода России к рыночной экономике — достаточно сложному периоду в жизни ОИЯИ и науки в России вообще. Время работы ускорительного комплекса ЛВЭ сократилось почти в 4 раза (с 4000 до 1000 ч в год) из-за ограниченности бюджетного финансирования, кроме того, отсутствие вывода пучка из нового ускорителя ограничивало возможности использования Нуклотрона физиками и приводило к необходимости одновременной эксплуатации и синхрофазотрона и Нуклотрона, что, в свою очередь, не позволяло сконцентрировать имеющиеся и без того недостаточные финансовые ресурсы только на завершении необходимых работ по Нуклотрону. Это продолжалось достаточно долго: с 1993 по 2003 гг., но и в этот период, благодаря, без преувеличения можно сказать, самоотверженному труду специалистов ускорительных отделов и всего коллектива Лаборатории, удалось реализовать ряд научно-технических достижений, превышающих мировой уровень. Так, открытие группой Е.Д. Донца явления "электронной струны" и осуществление на этой основе нового режима работы электронно-лучевого источника высокозарядных ионов КРИОН привело к практическому получению пучков ионов  $Ag^{16+}$  и  $Fe^{24+}$ .

Был проведен комплекс работ по завершению создания системы медленного резонансного вывода пучка из Нуклотрона, в результате чего впервые в мировой практике осуществлен вывод пучка из сверхпроводящего синхротрона. При этом получен ряд рекордных параметров, в частности, достигнута длительность растяжки до 10 с, в то время как на синхрофазотроне этот параметр ограничен величиной 0,5 с. Успешные результаты по ускорению и выводу пучков релятивистских ионов аргона и, особенно, железа убедительно продемонстрировали преимущества сверхпроводящего синхротрона перед традиционным. На рисунке 1 показаны (а) — один из моментов монтажа элементов системы вывода пучка в тоннель Нуклотрона, (б) — временная структура (растяжка) выведенного пучка и (в) — фотография через объектив микроскопа события взаимодействия ядра железа с энергией 1 ГэВ на нуклон с ядром фотоэмульсии, полученная сотрудничеством по проекту "Беккерель", включающим в себя группы физиков из ОИЯИ, ФИ РАН и других организаций, на Нуклотроне.

Широкий ассортимент ускоренных пучков и возможность оперативной перестройки режимов, в частности энергии и интенсивности выведенных пучков в ходе сеансов, определили высокий рейтинг "пучкового" времени Нуклотрона. В 2002–2006 гг. годовая эксплуатация Нуклотрона достигла уровня 2000 ч, что при реальном финансировании затрат, определяемых бюджетом

<sup>4</sup> Более детально сверхпроводящая система Нуклотрона описана в работе: Смирнов А.А., Коваленко А.Д. "Нуклотрон — сверхпроводящий ускоритель ядер в ЛВЭ ОИЯИ (создание, работа, развитие)" *Письма в ЭЧАЯ* 1 (6(123)) 11 (2004).





**Рис. 1.** Нуклотрон: (а) процесс монтажа элементов системы вывода пучка, (б) сигнал тока выводимого пучка на мониторе, (в) взаимодействие релятивистского ядра железа с ядром фотоэмульсии.

ОИЯИ для ускорительного комплекса ЛВЭ и растущими ценами на основные энергоресурсы, практически было пределом. Запросы же физиков более чем в 2 раза превышали плановое время сеансов. Несмотря на весьма тщательный отбор наиболее приоритетных и важных из заявляемых работ, число экспериментов, включаемых в расписание, достигало двух десятков.

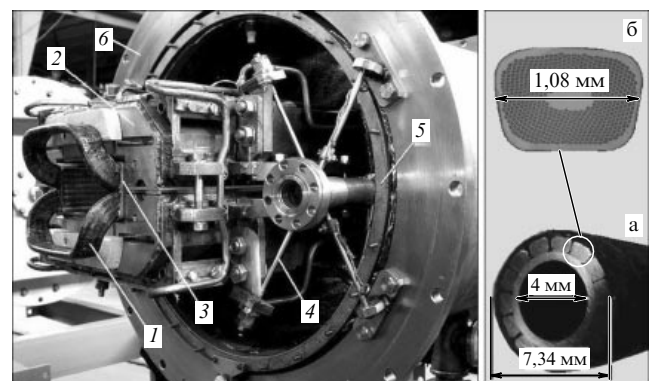
Хочу также отметить и существенный прогресс в направлении дальнейшего развития в ЛВЭ технологии быстроциклирующих сверхпроводящих магнитов для новых протонных и ионных синхротронов высоких энергий, достигнутый уже после запуска Нуклотрона. Одним из важных результатов в этом направлении является уменьшение более чем в 2 раза динамических тепловыделений в дипольном и квадрупольном магнитах нуклотронного типа. Этот цикл работ выполняется в сотрудничестве с Научным центром по исследованию тяжелых ионов ГСИ в Дармштадте (Германия) и имеет финансовую поддержку Евросоюза в рамках программы FP6. Конечной целью проводимых в ЛВЭ исследований является создание базовых элементов сверхпроводящей магнитной системы (дипольных и квадрупольных магнитов) нового синхротрона СИС100 — одного из принципиальных составляющих проектируемого в Дармштадте ускорительного комплекса для исследований с антипротонами и тяжелыми ионами высоких энергий. В создании этого комплекса, получившего название FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research), участвуют многие страны, включая Россию.

Ряд других новых разработок сверхпроводящих кабелей и вариантов магнитов с параметрами, превосходящими магниты Нуклотрона как по частоте повторения циклов, так и по максимальному полю и другим важным параметрам, был выполнен в контексте дальнейшего развития комплекса Нуклотрон в ОИЯИ. В частности, предложен, изготовлен и испытан дипольный магнит с однослойной обмоткой, выполненной из трубчатого сверхпроводящего кабеля с критическим током, в 2 раза превышающим критический ток оригинального нуклотронного СП-кабеля при тех же размерах поперечного

сечения. При этом впервые использован сверхпроводящий композитный провод трапециевидного поперечного сечения, специально изготовленный во ВНИИНМ им. А.А. Бочвара по нашей спецификации. Кроме того, конструктивно обмотка магнита, находящаяся при температуре 4,5 К, имеет точечный тепловой контакт с ярмом магнита, температура которого может достигать 50–80 К. Параметры такого магнита уникальны, например может быть реализован режим работы с частотой циклов до 10 Гц, при этом тепловыделения на уровне 4,5 К минимальны.

#### 4. НИКА — флагманский проект ОИЯИ на базе Нуклотрона

В современных условиях сильной конкуренции всех мировых научных центров за предоставление уникаль-

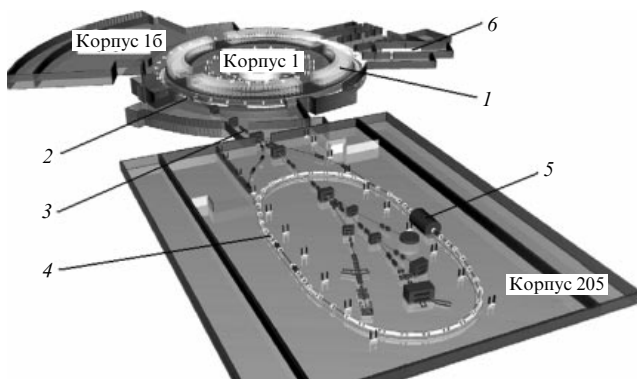


Прототип сверхпроводящего дипольного магнита для работы с частотой повторения циклов до 10 Гц: 1 — однослойная СП-обмотка из уникального сильноточного трубчатого кабеля (поперечное сечение кабеля и композитного провода показаны на фото справа (а) и (б) соответственно), 2 — ярмо магнита, 3 — зазор между обмоткой, охлаждаемой до 4,5 К, и ярмом магнита, имеющим температуру 80 К, 4 — подвеска магнита в криостате, 5 — промежуточный тепловой экран, 6 — внешний вакуумный сосуд криостата.



ных возможностей международным коллаборациям физиков, перспективы дальнейшего развития ЛВЭ и ускорительного комплекса напрямую связаны с наличием достаточно амбициозной физической проблемы, обладающей высокой конкурентоспособностью на мировом уровне, исследование и решение которой может быть осуществлено на Нуклотроне с учетом реализуемой технической модернизации существующего ускорительного комплекса и, естественно, с учетом представления о реальных финансовых возможностях. В 2006 г. в ОИЯИ предложен новый проект, названный НИКА, главная цель которого — поиск смешанной фазы и критической точки сильновзаимодействующей материи. Это имеет важное значение для понимания физики взаимодействия адронов и тяжелых ионов, процессов развития Вселенной после Большого взрыва, образования нейтронных звезд. Новая базовая установка, которая позволяет в принципе оптимальным образом проводить такие исследования — это коллайдер релятивистских тяжелых ионов с энергией в системе центра масс  $\sqrt{s_{NN}} \sim 7-9$  ГэВ и достаточной светимостью. Данный энергетический диапазон полностью перекрывается потенциальными возможностями ускорительного комплекса ЛВЭ с учетом развития. Основными задачами проекта НИКА являются: 1) развитие существующего нуклотрона как базовой установки для генерации интенсивных пучков ионов в диапазоне масс от  $p$  до  $U$  и легких поляризованных ядер; 2) разработка и создание коллай-

дера тяжелых ионов с максимальной энергией  $\sqrt{s_{NN}} = 9$  ГэВ и средней светимостью  $10^{27} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  и 3) подготовка эксперимента по поиску смешанной фазы и создание многоцелевой установки для регистрации процессов столкновения ионов. Концептуальная схема нового комплекса показана на рис. 2. В рабочую группу проекта НИКА, возглавляемую А.Н. Сисакианом, входят С.В. Афанасьев, В.Д. Кекелидзе, А.Д. Коваленко, А.И. Малахов, И.Н. Мешков, В.А. Никитин, А.С. Сорин, В.Д. Тонеев. Реализацию проекта предполагается осуществить поэтапно. Первый этап (2007–2009 гг.) включает развитие Нуклотрона, подготовку технических проектов элементов комплекса НИКА, начало испытаний прототипов элементов ускорителя и многоцелевого детектора взаимодействий, названного МПД. На втором этапе (2008–2012 гг.) будет разработан и построен бустер Нуклотрона и завершены основные работы по созданию коллайдера НИКА и установки МПД. Параллельно в период 2010–2013 гг. будут осуществляться монтажные работы по коллайдеру и физической установке. Пуск планируется на 2013 год. Создание коллайдера НИКА на базе Нуклотрона будет уже третьим рождением ускорительного комплекса, построенного изначально в Дубне под руководством В.И. Векслера. Но, как и в те времена, это будет принципиальным шагом в обеспечении уникальных условий для изучения еще далеко нерешенных проблем физики высоких энергий.



**Рис. 2.** Концептуальная схема коллайдера тяжелых ионов на базе Нуклотрона (проект НИКА): 1 — синхрофазотрон, 2 — Нуклотрон, 3 — существующий канал вывода пучков из Нуклотрона в главный экспериментальный зал, 4 — накопительные кольца коллайдера, 5 — детектор МПД для регистрации встречных взаимодействий, 6 — помещения для источников частиц и предускорительной части комплекса.

## 5. Заключение

Лучшая оценка человека — это добрая память людей о нем, о его деятельности, его наследии. И это имеет место в данном случае. Имя В.И. Векслера вошло в историю мировой науки, в историю страны, в историю Дубны. О нем часто вспоминают те, кому пришлось работать вместе с ним (хотя таких остается все меньше и меньше). Продолжает жить созданный под его руководством ускорительный комплекс. Этот комплекс развивается и несмотря на все трудности развивается и сейчас благодаря усилиям его последователей.

Мне не довелось видеть Владимира Иосифовича, но вся моя работа и жизнь в Дубне, начиная с приезда на дипломную практику в феврале 1967 года, оказалась связанной с его наследием: до 1974 года — с реализацией коллективного метода ускорения, а затем с Синхрофазотроном и Нуклотроном. Но еще гораздо раньше, за 10 лет до приезда в Дубну, на меня произвело, по-видимому, неизгладимое впечатление сообщение о запуске Синхрофазотрона и это во многом определило все дальнейшее в моей работе и жизни.