

Доказана общая теорема, связывающая параметр расщепления в спектре с нейтрино с майорановской массой нейтрино и матричным элементом безнейтринного двойного бета-распада. Предсказан эффект ядерного усиления вклада суперсимметрии и лептокварков в безнейтринный двойной бета-распад. Получены важные ограничения на фундаментальные параметры новой физики, исходя из данных экспериментов по поиску безнейтринного двойного бета-распада. Эти ограничения стали общепринятыми, на их основе планируются многие эксперименты по поиску суперсимметрии (С.Г.Коваленко). Показано, что наилучшие перспективы для исследования суперсимметрии путем поиска  $0\nu\beta\beta$ -распада имеют германиевый эксперимент «Гейдельберг–Москва» и эксперимент с молибденом NEMO-3 (В.А.Бедняков, С.Г.Коваленко).

В настоящее время в лаборатории успешно работает группа под руководством Д.Ю.Бардина, в задачу которой входит создание вычислительных программ обработки данных по коллайдерной физике сверхвысоких энергий.

## 2. Развитие ускорительной базы ЛЯП

В 1953 году – после увеличения диаметра полюсов магнита синхроциклотрона ЛЯП до 6 метров и существенной реконструкции его ВЧ-системы – был введен в действие протонный вариант ускорителя на энергию протонов 680 МэВ с интенсивностью пучка протонов  $0,25 \div 0,3$  мкА; на то время синхроциклотрон ЛЯП стал самым мощным ускорителем протонов в мире.

Одновременно с проведенной реконструкцией магнитной и ВЧ-систем В.П.Дмитриевским на синхроциклотроне был осуществлен новый, регенеративный метод вывода частиц из ускорителя, что позволило увеличить интенсивность выведенного пучка в десятки раз. В зале ускорителя был создан экспериментальный павильон, отделенный от ускорителя четырехметровой стеной из тяжелого бетона и закрытый толстым 1,5 м бетоно-потолочным перекрытием. В этот зал были выведены с помощью отклоняющего магнита и коллиматоров 14 пучков протонов, пионов и нейтронов различных энергий. Это открыло большой простор для исследований не только физиков ЛЯП, но и ученых из Москвы, Ленинграда, Харькова и других городов.

Годом раньше, в 1952 году, появилась публикация М.Ливингстона с сотрудниками с предложением использовать жесткую фокусировку в кольцевых протонных синхротронах с целью значительного снижения веса используемых в них магнитов. Это предложение по жесткой фокусировке в ускорителях создавало предпосылки для использования специальных структур магнитного поля и в других классах ускорителей с целью увеличения достижимых в них энергий и интенсивностей ускоренных пучков.

К обсуждению возможностей и перспектив жесткой фокусировки для ускорителей со сплошным магнитом (циклотрон, синхроциклотрон) директор ЛЯП М.Г.Мешеряков привлек академика И.В.Курчатова, который продолжал поддерживать связь с работами, проводимыми в ЛЯП по всем направлениям. Специальные мини-семинары по проблемам жесткой фокусировки в ускорительной технике, проходившие с участием И.В.Курчатова, завершились поручением дирекции ЛЯП создать специализированное подразделение с целью разработки и создания в нем циклотрона со спиральной структурой магнитного поля.

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

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

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

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

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

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

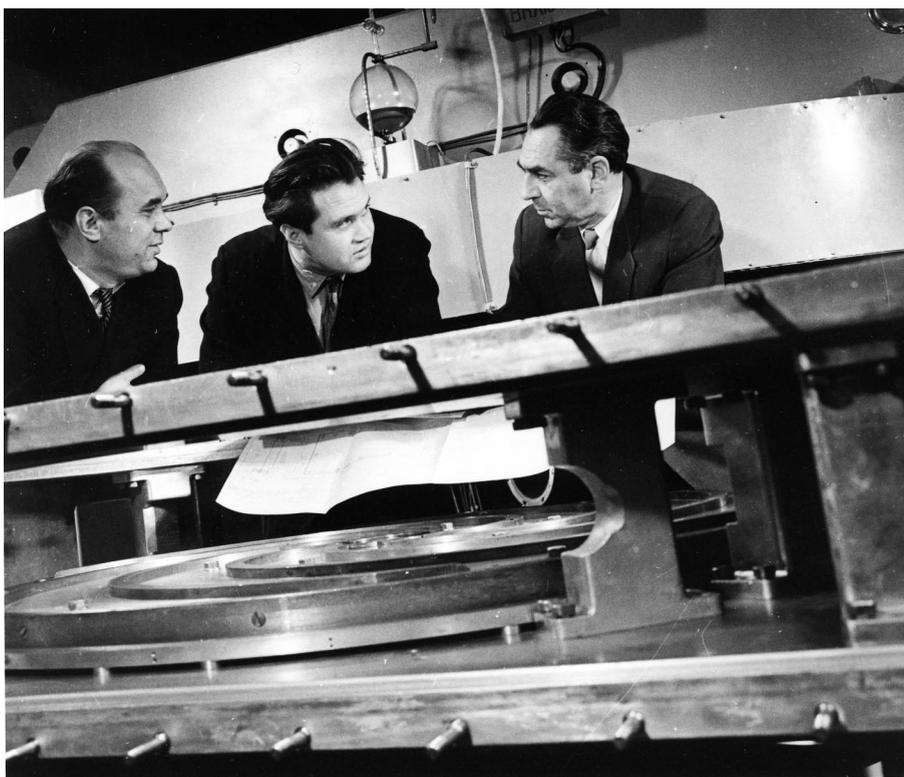


Актуальные задачи физики частиц в ЛЯП всегда решаются  
в тесном содружестве теории и эксперимента  
Слева направо: Б.И.Замолодчиков, Ю.Д.Прокошкин,  
В.П.Дмитриевский, А.И.Лапидус

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

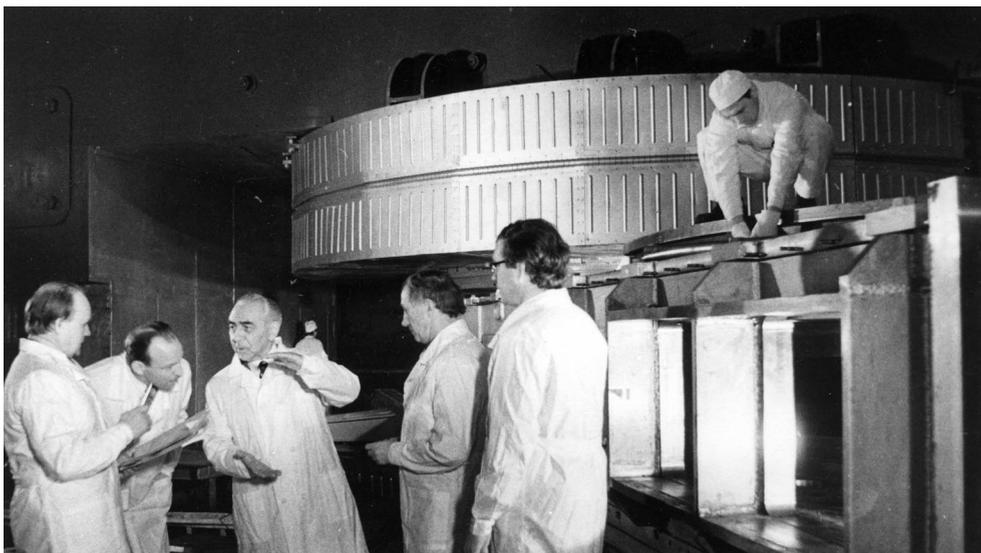


Главный зал фазотрона ОИЯИ

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

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

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



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

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

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

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

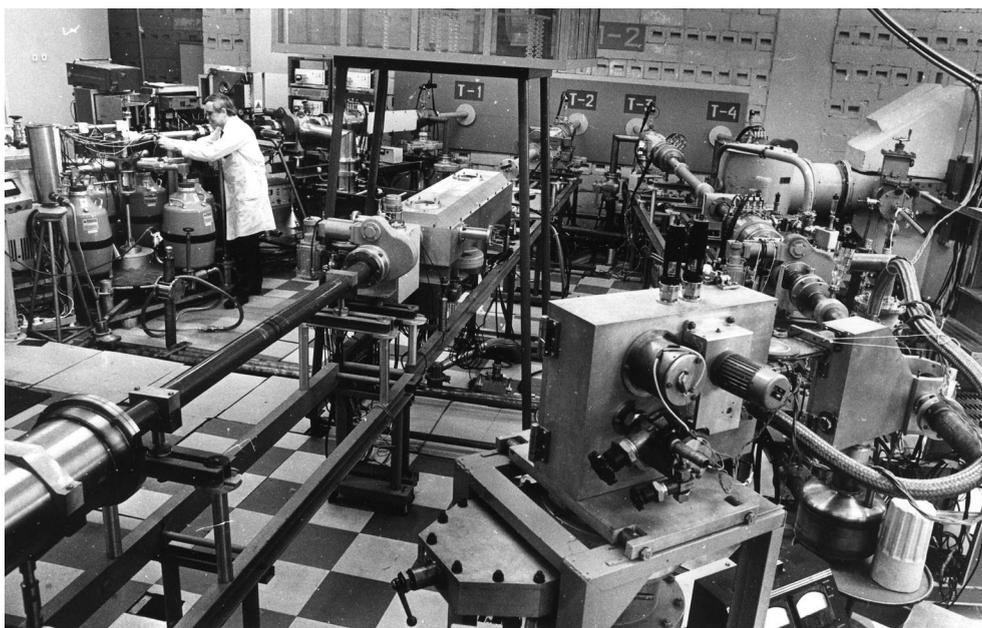
Естественно, эти работы выполнялись общими усилиями всего коллектива сотрудников Лаборатории ядерных проблем и имели четкую координацию.

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

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

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

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



Установка ЯСНАПП

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

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

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

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

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

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

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

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

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

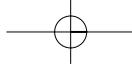
В 1989–1993 годах по заказу Республики Куба, страны-участницы ОИЯИ, в НЭОНУ разрабатывался проект целевого циклотрона У-120К, проект был тщательно разработан, доведен до технического выполнения и согласован со страной – заказчицей проекта.

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

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

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

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



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

### 3. Пучки синхроциклотрона и фазотрона ЛЯП ОИЯИ

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

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

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

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

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

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

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

