

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ имени Д.В.СКОБЕЛЬЦЫНА

Б.С. Ишханов, В.И. Шведун

**УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ И ФИЗИКА
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В НИИЯФ
МГУ**

Препринт НИИЯФ МГУ – 2008 – 5/841

УДК 621.039

Б.С. Ишханов, В.И. Шведун

**УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ И ФИЗИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В
НИИЯФ МГУ**

Препринт НИИЯФ МГУ – 2008 – 5/841

Аннотация

Описана история создания ускорителей электронов в НИИЯФ МГУ и исследования электромагнитных взаимодействий ядер начиная с 35 МэВ бетатрона, построенного в 1959 г. Представлены разработки электронных ускорителей, которые могут использоваться как для фундаментальных исследований, так и в медицине, промышленности и системах безопасности, описаны, полученные с их помощью результаты.

B.S. Ishkhanov, V.I. Shvedunov

E-mail: bsi@depni.sinp.msu.ru, shved@depni.sinp.msu.ru

**ELECTRON ACCELERATORS AND PHYSICS OF ELECTROMAGNETIC INTERACTIONS AT
SINP MSU**

Preprint MSU SINP – 2008 – 5/841

Abstract

The history of electron accelerators development and electromagnetic interactions of nuclei study at SINP MSU is described starting from 35 MeV betatron built in 1959. The latest development of electron accelerators which can be used in fundamental research, in medicine, industry and safety systems is shown; results obtained with these machines are described.

© Ишханов Б.С., 2008

© Шведун В.И., 2008

© НИИЯФ МГУ, 2008 <http://www.sinp.msu.ru>

Б.С.Ишханов, В.И.Шведунов

УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ И ФИЗИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В НИИЯФ МГУ

Этот обзор, в котором рассказывается об электронных ускорителях, построенных в Отделе электромагнитных процессов и взаимодействий атомных ядер, и результатах исследований в области физики электромагнитных взаимодействий, полученных на этих ускорителях, посвящен 100-летию со дня рождения профессора Сергея Сергеевича Васильева. С.С.Васильев сыграл решающую роль в развитии исследований в области ядерной физики в Московском государственном университете. Им была создана практически с нуля, начиная со строительства здания, лаборатория ядерных реакций, оснащенная самыми современными по тому времени ускорителями, что на многие годы предопределило направление исследований в этой области науки.

Первым ускорителем электронов НИИЯФ МГУ, предназначенным для ядерно-физических исследований, стал бетатрон на энергию 35 МэВ, введенный в строй в 1959 г. (Рис. 1). Бетатрон был спроектирован специальным КБ Московского трансформаторного завода ("Электрозавода") по техническому заданию, подготовленному под руководством С.С.Васильева. Безусловной заслугой С.С.Васильева стал выбор максимальной энергии ускоренных электронов 35 МэВ, в 1,5 – 2 раза превышающей энергию большинства работавших в те годы бетатронов. Это давало несомненные преимущества исследователям НИИЯФ МГУ, способствовало более глубокому изучению механизма фоторасщепления атомных ядер и обеспечило более чем 25-летний срок эффективной эксплуатации установки, на которой было выполнено свыше двухсот научных исследований.



Рисунок 1. У бетатрона НИИЯФ МГУ на энергию 35 МэВ В.Г.Шевченко, Б.А.Юрьев, В.В.Экивин.

Под руководством С.С.Васильева было подготовлено техническое задание на

проектирование и строительство помещений корпуса, предназначенных для размещения бетатрона и проведения исследований фоторасщепления ядер. Следует отметить, что функциональная продуманность помещений обеспечивает работу в них уже третьего поколения электронных ускорителей различных конструкций и принципов действия.

В процессе эксплуатации бетатрона В.В.Экивиным, О.Ф.Нестеренко и И.М.Пискаревым было проведено несколько модернизаций, существенно расширивших круг проводимых исследований. Была разработана откачная фарфоровая камера, позволившая сравнительно просто заменять перегоравшие инжекторы и регулировать их положение, обеспечивая оптимизацию интенсивности пучка.

К началу исследований фотоядерных реакций на 35-МэВном бетатроне уже сложилось представление о механизме взаимодействия γ -квантов с атомными ядрами. Было известно, что для всех атомных ядер в сечении поглощения γ -квантов наблюдается интенсивный максимум, расположенный в области энергий 15 ? 20 МэВ и имеющий ширину 4 ? 10 МэВ. Этот максимум, названный гигантским дипольным резонансом (ГДР), интерпретировался как коллективные колебания протонов относительно нейтронов. Было известно, что основными каналами распада ГДР были распады с испусканием протонов и нейтронов – реакции (γ, n) и (γ, p).

Уже в первых экспериментах, выполненных на бетатроне, были получены принципиально новые результаты. Была создана уникальная методика измерения спектров и угловых распределений фотонов с помощью метода фотопластинок и обнаружена асимметрия в угловом распределении фотопротонов, увеличивающаяся с увеличением атомного номера Z ядра мишени и с ростом энергии регистрируемых протонов. Наблюдаемая асимметрия свидетельствовала о сильной интерференции электрического дипольного (E1) и квадрупольного резонансов (E2) поглощения γ -квантов. Эти результаты легли в основу кандидатских диссертаций, выполненных Б.А.Юрьевым и А.Х.Шардановым.

Постоянно улучшались характеристики бетатрона. Ускоритель оснащался новыми экспериментальными методами. Был создан высокоэффективный детектор быстрых нейтронов на базе 80 пропорциональных счетчиков, обогащенных ^{10}B и размещенных в парафиновом замедлителе большого объема. Эффективность этого детектора к быстрым нейтронам составила величину 45% и превосходила эффективность всех аналогичных детекторов, использовавшихся в экспериментах с γ -квантами.

Большая заслуга в создании методики измерения сечений фотонейтронных выходов принадлежит И.М.Пискареву. Был создан "многоканальный" метод измерения выхода фотоядерной реакции $Y(E^m)$. В основе метода - быстрое (с частотой 50 Гц) циклическое изменение верхней

границы спектра тормозного γ -излучения. Метод позволял проводить одновременные измерения выхода реакции $Y(E^m)$ при 512 значениях верхней границы E^m и практически исключал временной дрейф регистрирующей аппаратуры. Статистическая точность выхода фотонейтронных реакций в этих экспериментах достигала рекордного значения 0,1%, что нельзя было получить традиционно используемыми способами. Определяющими в создании многоканального метода были работы, выполненные Н.Н.Баламатовым.

При создании экспериментальных методик большое внимание уделялось автоматизации измерений, связи экспериментальных установок с появившимися в то время малыми ЭВМ. Повышение точности результатов экспериментов привело к необходимости обработки больших массивов экспериментальной информации. Активное сотрудничество с П.Н.Заикиным, В.Я.Галкиным, В.П.Горьковым, М.В.Уфимцевым – сотрудниками НИВЦ МГУ – позволило проводить эту работу на качественно более высоком уровне. Расчеты и моделирование проводились на машинах Вычислительного центра – Стрела и БЭСМ-6. Большую роль в развитии экспериментальных методов сыграли работы, выполненные Ю.В.Кузнецовым, Ю.И.Горбатовым, В.М.Сорвиным, В.А.Хрущевым, В.А.Козлов, В.А.Ушкановым и другими. Л.Ф.Сопова сыграла важную роль в повышении компьютерной грамотности и внедрении вычислительной техники в отделе. Под ее руководством постоянно совершенствовалась материальная база отдела.

Кардинальный прогресс был достигнут и в методике анализа экспериментальных данных, полученных на пучке тормозного γ -излучения. В экспериментах с тормозным излучением нельзя непосредственно получать информацию об эффективном сечении реакции $\sigma(E)$, относящуюся к определенной энергии возбуждения ядра E . Реально измеряется не $\sigma(E)$, а, так называемый, "выход фотоядерной реакции $Y(E^m)$ при определенной верхней границе E^m тормозного спектра $W(E, E^m)$. Искомое сечение $\sigma(E)$ и измеренный выход $Y(E^m)$ связаны между собой интегральным уравнением Вольтерра 1-го рода

$$Y(E^m) = \int_0^{E^m} \sigma(E)W(E, E^m)dE .$$

В результате совместной работы с группой математиков Московского университета, возглавляемой академиком А.Н.Тихоновым, для анализа данных фотоядерных экспериментов – восстановления сечений фотоядерных реакций – был впервые использован метод регуляризации.

В результате выполнения обширной программы исследований был разработан устойчивый метод восстановления сечений фотоядерных реакций, который в дальнейшем активно использовался в различных лабораториях, занимающихся исследованиями в этой области.

С использованием этих усовершенствований экспериментального метода измерения и анализа данных был изучен ГДР большого числа (около 40) атомных ядер в широком диапазоне массовых чисел ($A = 9 - 208$) и обнаружена промежуточная структура ГДР на средних и тяжелых ядрах.

В результате выполненных на бетатроне исследований сечений фотонейтронных реакций стало ясно, что гигантский резонанс недостаточно интерпретировать как простейшее колебание протон-нейтронных компонент ядра или в рамках одночастичной модели оболочек. Было обнаружено несколько соизмеримых по интенсивности возбуждений, расположенных в области гигантского резонанса. Существенный вклад в изучение промежуточной структуры гигантского дипольного резонанса внесли И.М.Капитонов, В.В.Варламов, Б.И.Горячев, Ю.И.Сорокин, Е.В.Лазутин, В.Н.Орлин, В.И.Мокеев, Н.Г.Еремин, Д.С.Руденко, Г.С.Нефедов, защитившие кандидатские диссертации. Уже на этом этапе исследований на бетатроне была организована кооперация в исследовании с другими научными центрами СССР. По результатам научных исследований, выполненных на бетатроне, защитили кандидатские диссертации Ю.М.Прокопчук (Киевский государственный университет) и Е.Е.Омаров (Павлодарский государственный университет)

Следует подчеркнуть, что данные о промежуточной структуре ГДР впервые были надежно получены в экспериментах фотоядерной группы МГУ. Они имели большой международный отклик, поскольку потребовался существенный пересмотр теоретических подходов к описанию высокоэнергичных коллективных ядерных состояний. На несколько лет позже структура фотонейтронных сечений была получена в США и во Франции в экспериментах с квазиодноэнергетическими фотонами.

Промежуточная структура ГДР была впервые обнаружена и в фотопротонных сечениях. Систематические исследования сечений фотопротонного канала распада ГДР на большом числе ядер, выполненные в отделе, позволили детально изучить изоспиновое расщепление ГДР.

Один из важных результатов, который при этом был получен, состоял в обнаружении у средних и тяжелых ядер сдвига в энергиях максимумов фотопротонных (γ, p) и фотонейтронных (γ, n) сечений. На Рис. 2 показаны (γ, p) и (γ, n) сечения для ядра ^{90}Zr . Видно, что (γ, p) сечение сдвинуто к большим энергиям по сравнению с (γ, n) сечением на величину около 5 МэВ. По мере роста массового числа A этот сдвиг увеличивается, достигая 12 МэВ для тяжелого дважды магического ядра ^{208}Pb .

Суть явления изоспинового расщепления ГДР для тяжелых ядер легко понять из вставки к Рис. 2. Видно, что правила отбора по изоспину запрещают распад состояний $T > s$ с испусканием нейтронов на низкорасположенные состояния конечного ядра ($A - 1, Z$). В то же время из-за кулоновского барьера распад состояний $T < s$ по протонному каналу оказывается подавленным и испускание

протонов происходит преимущественно из состояния $T >$, расположенного выше по энергии.

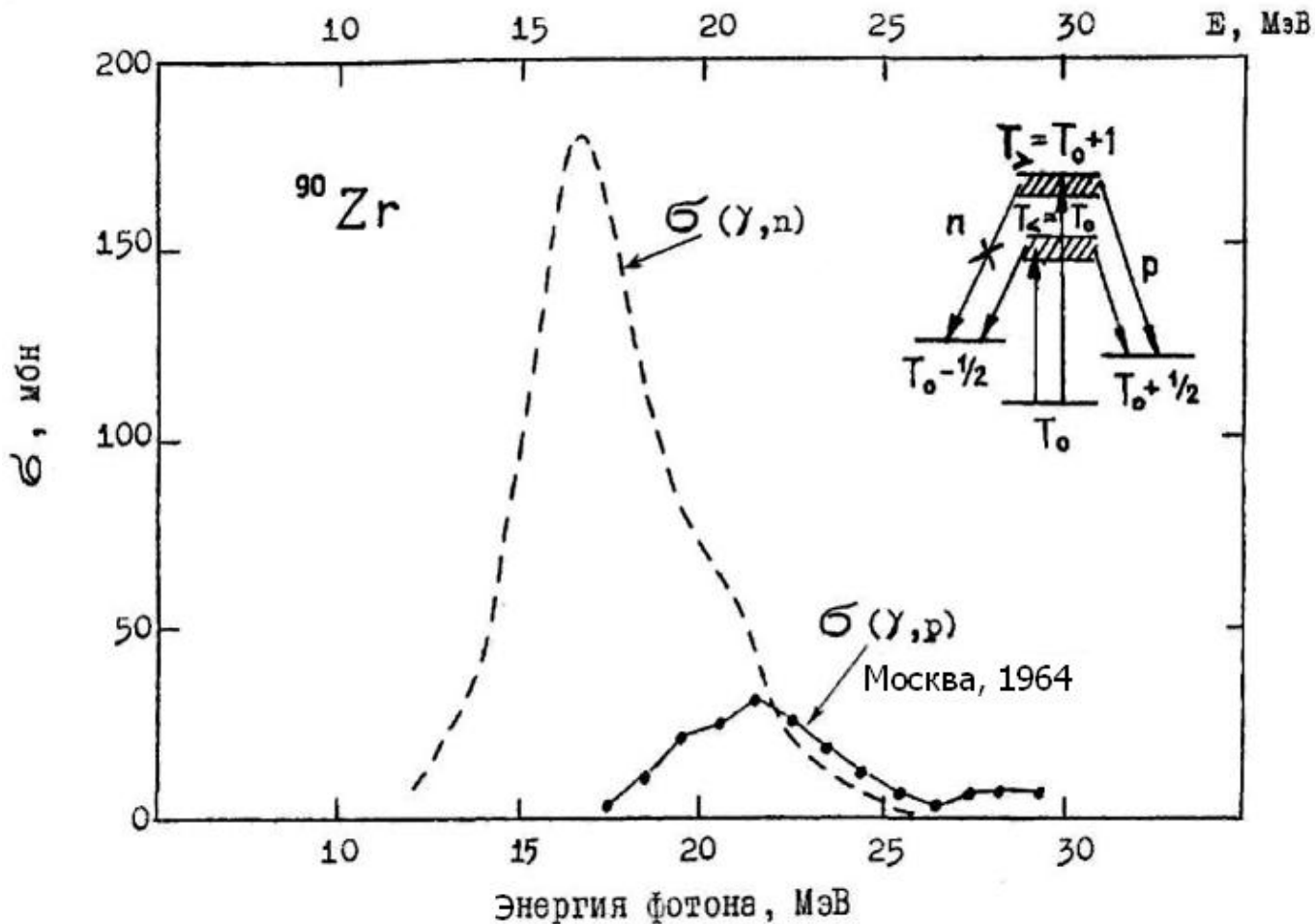


Рисунок 2. Сечения реакций (γ, p) и (γ, n) на ядре ^{90}Zr . На вставке показано влияние изоспинового расщепления и правил отбора по изоспину на распадные характеристики ГДР.

Таблица 1.

Изоспиновое расщепление ГДР на изотопах $^{58,60}\text{Ni}$

Интегральные сечения Изотоп	$\int_0^{25\text{MeV}} \sigma(\gamma, n) dE$ МэВ·мб	$\int_0^{25\text{MeV}} \sigma(\gamma, p) dE$ МэВ·мб	$\int_0^{25\text{MeV}} (\sigma(\gamma, n) + \sigma(\gamma, p)) dE$ МэВ·мб
^{58}Ni	185 ± 3 (28%)	456 ± 3 (72%)	651 ± 6
^{60}Ni	482 ± 12 (74%)	168 ± 12 (26%)	651 ± 24

Одним из наиболее ярких экспериментальных проявлений изоспинового расщепления ГДР, впервые полученных в НИИЯФ, явилось резкое изменение величин интегральных сечений реакций

(γ , p) и (γ , n) на изотопах никеля ^{56}Ni и ^{60}Ni (Табл. 1). В реализации программы исследования изоспиновых эффектов в фотоядерных реакциях существенную роль сыграло создание в отделе уникальной методики прямой регистрации протонов в условиях высокого фона от электронов и γ -квантов. Проблема заключается в том, что соотношение между числом регистрируемых протонов и электронов фона – $1:10^7$. Для регистрации протонов была использована методика телескопа кремниевых полупроводниковых детекторов.

Существенное значение имели работы по растяжке длительности импульса γ -излучения бетатрона, выполненные Н.Н.Баламатовым, защитившем по методическим работам кандидатскую диссертацию.

В 1978 году интенсивность бетатрона была повышена на 2 порядка по сравнению с его стандартными заводскими параметрами. Это позволило впервые поставить новый тип экспериментов – исследование отдельных парциальных каналов в сечении фотоядерных реакций.

Высокая информативность фотоядерных экспериментов, в которых фиксируются отдельные состояния конечных ядер, обусловлена тем, что эти состояния расположены по энергии существенно ниже состояний ядра-мишени, формирующих ГДР. Знание природы низколежащих состояний конечного ядра позволяет получить новые сведения о ГДР.

Была выполнена обширная программа измерений сечений парциальных фотоядерных реакций (γ , p_i) и (γ , n_i), где i – номерует уровень конечного ядра. Была получена информация о 400 сечениях парциальных реакций. На Рис. 3 показаны спектры фотопротонов из ядер ^{24}Mg и ^{26}Mg , измеренные при различных верхних границах тормозного спектра γ -квантов. Аналогичные измерения были выполнены для большого числа ядер 1p и 1d2s оболочек. Эти данные позволили совершить качественный скачок в понимании механизма возбуждения и распада ГДР.

Полученные результаты легли в основу кандидатских диссертаций сотрудников отдела и кафедры общей ядерной физики В.В.Варламова, М.Е.Степанова, В.И.Шведунова, И.А.Тутынь, А.С.Габелко, А.С.Алимова. По результатам исследований, выполненных в этот период в отделе, защитили кандидатские диссертации, прикомандированные к отделу А.И.Гутий (Ужгородский государственный университет), Ж.Л.Кочарова (Ереванский государственный университет), стажеры из Ташкентского государственного университета М.Х.Жалимов, К.М.Иргашев, У.Р.Арзибеков.

Важным результатом исследований явилось экспериментальное обнаружение нового явления – конфигурационного расщепления ГДР легких ядер. Сущность явления иллюстрируется Рис. 4 и состоит в следующем.

У легких ядер с числом нуклонов до 40 в отличие от средних и тяжелых ядер не формируется единый узкий пик ГДР, имеющий ярко выраженный коллективный характер.

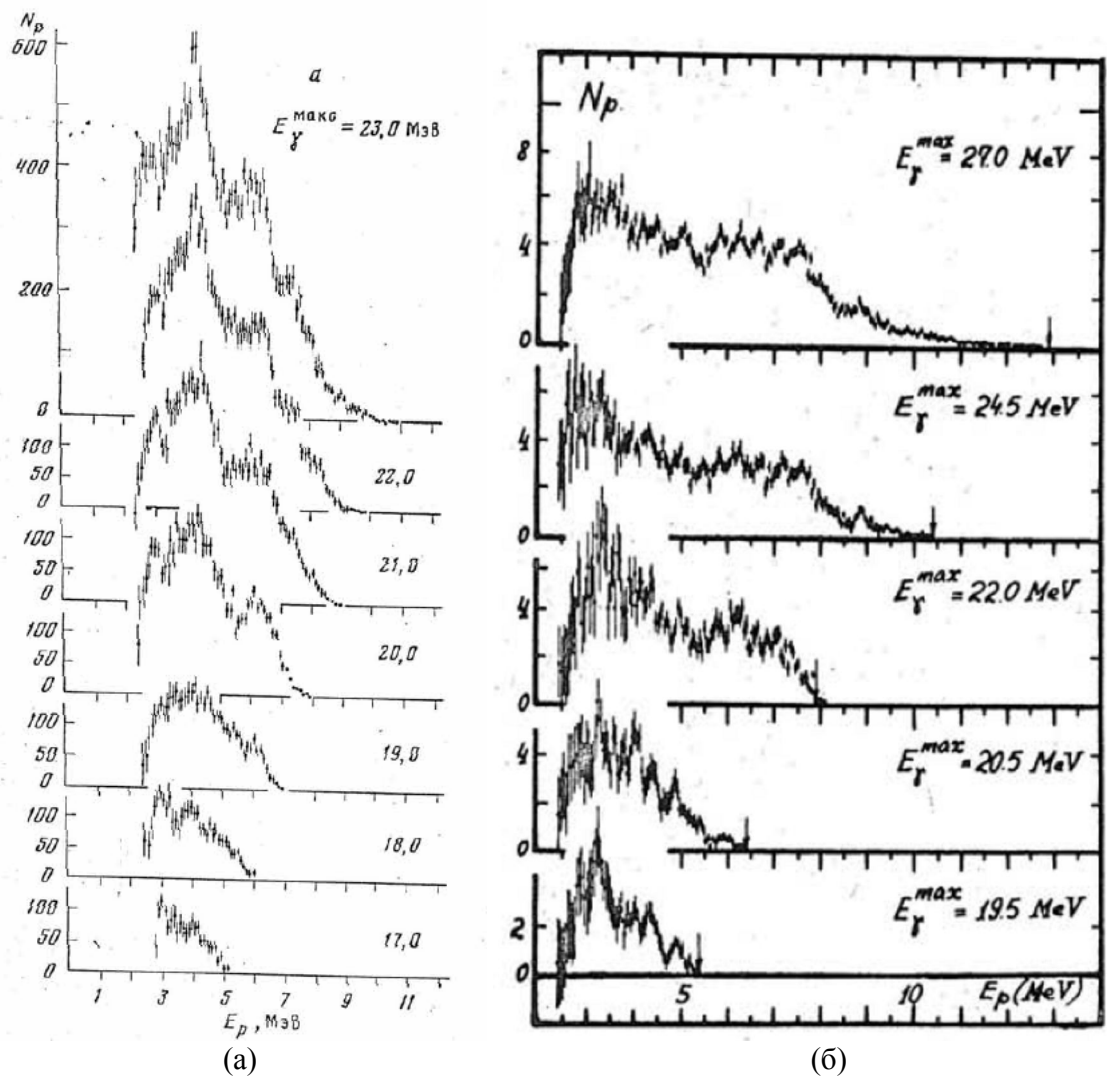


Рисунок 3. Спектры фотопротонов из ядер ^{24}Mg (а) и ^{26}Mg (б).

Дипольные колебания в легких атомных ядрах в значительной степени утрачивают коллективную природу. Единый максимум ГДР не формируется, а вместо этого возникает широкая полоса энергий (ее ширина 10 – 20 МэВ), где происходит интенсивное дипольное поглощение фотонов. Фотоны меньшей энергии формируют ветвь А гигантского резонанса, обусловленную $E1$ -переходами нуклонов из внешней частично заполненной оболочки в ближайшую свободную оболочку. Фотоны большей энергии формируют ветвь Б, обусловленную переходами нуклонов из внутренней заполненной оболочки во внешнюю, частично заполненную. Таким образом, ГДР легких ядер оказывается расщепленным на отдельные группы дипольных переходов, отвечающие разным оболочечным конфигурациям и сильно смещенные по энергии (Рис. 4).

Причина конфигурационного расщепления ГДР состоит в том, что в легких ядрах существенное значение имеет пространственно-обменная часть нуклон-нуклонного взаимодействия.

Благодаря действию пространственно-обменных сил и характерной для атомных ядер в целом существенной нелокальности нуклон- нуклонного взаимодействия возникает сильный сдвиг по энергии глубоких дырочных состояний, отвечающих заполненным внутренним оболочкам.

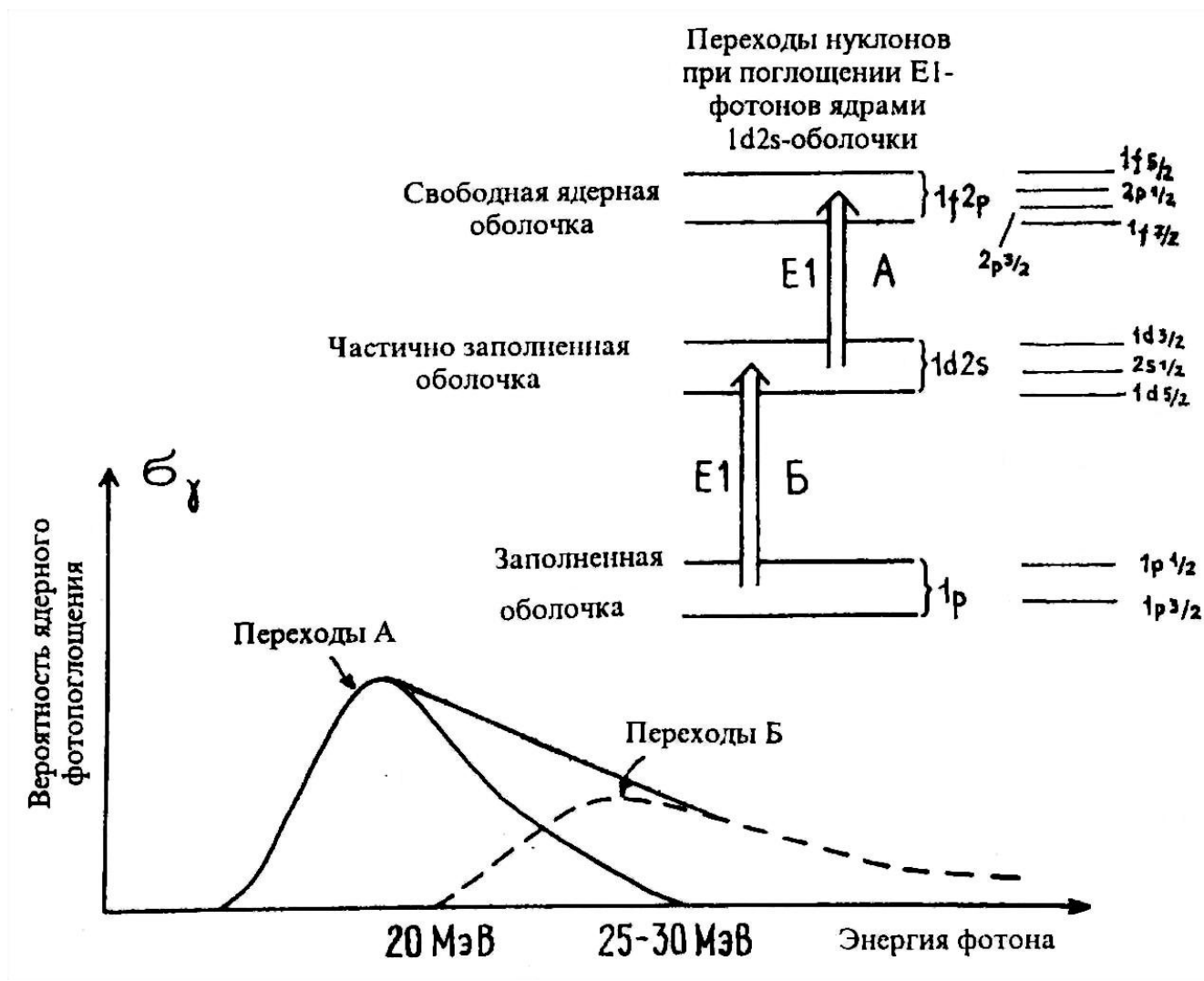


Рисунок 4. Конфигурационное расщепление ГДР на легких ядрах.

В результате выполненных экспериментов конфигурационное расщепление удалось наблюдать непосредственно. Величина конфигурационного расщепления (сдвиг центров тяжести дипольных переходов групп А и Б) оказалась весьма значительной – около 10 МэВ.

Результаты этих пионерских исследований были позже подтверждены в аналогичных экспериментах японских, австралийских и бельгийских физиков и получили международное признание. Более того, эксперименты, выполненные физиками США, Швейцарии, Японии и СССР, в которых ядра возбуждались самыми различными элементарными частицами, показали, что открытая

закономерность конфигурационного расщепления дипольного гигантского резонанса имеет универсальный характер – она не зависит от типа частиц, возбуждающих ядра, т.е. проявляется не только в электромагнитных, но также в сильных и слабых взаимодействиях (в мюон-ядерных и адрон-ядерных процессах и в состояниях гиперядерных систем).

В 1987 г. Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий внес в государственный реестр под №342 открытие "Закономерность конфигурационного расщепления гигантского дипольного резонанса у легких атомных ядер" (авторы открытия – Б.С.Ишханов, И.М.Капитонов, В.Г.Неудачин, В.Г.Шевченко, Н.П.Юдин). Регистрация этого открытия явилась итогом 20-летних исследований дипольного гигантского резонанса, проводившихся в НИИЯФ МГУ.

Методы анализа данных фотоядерных экспериментов были существенно усовершенствованы в работах, выполненных В.В.Варламовым, А.П.Черняевым, И.Н.Бобошиным, Н.Г.Ефимкиным, Н.Н.Песковым. На основании системного сравнительного анализа результатов различных экспериментов из созданных больших баз данных были выявлены определенные систематические расхождения, установлены их причины и разработаны методы их учета. Было получено большое количество точных и надежных оцененных сечений фотоядерных реакций, свободных от систематических погрешностей экспериментальных сечений. Это, в частности, позволило впервые на основе экспериментальных данных по фоторасщеплению изотопов лития подтвердить открытый эффект конфигурационного расщепления ГДР.

К началу восьмидесятых годов стало ясно, что дальнейший прогресс в исследовании механизма взаимодействия гамма-квантов с атомными ядрами возможен лишь при создании ускорителей электронов нового поколения, генерирующих в непрерывном режиме пучки электронов с малым энергетическим и пространственным разбросом (коэффициент заполнения рабочего цикла $D = 100\%$). Увеличение D позволяет снизить загрузки детекторов и благодаря этому выполнять совпадательные эксперименты, резко сокращать время экспериментов, в которых регистрация продуктов реакции осуществляется непосредственно во время импульса излучения ускорителя.

Измерение спектров фотопротонов, показанных на Рис. 3, является ярким примером роли коэффициента заполнения рабочего цикла ускорителя. С одной стороны, в 70-е годы, когда проводились эти эксперименты, во многих крупных научных центрах бетатроны были заменены линейными ускорителями со значительно большими значениями энергии и тока пучка. Однако линейные ускорители обладали в те годы и существенным недостатком – величина D не превышала 0,01%, что делало практически невозможным регистрацию протонов из-за высокого фона вторичных частиц, перегружающего детектор. Бетатрон НИИЯФ МГУ благодаря системе медленного сброса

пучка на тормозную мишень имел величину D , близкую к 0,1%, что и обеспечило возможность измерения спектров протонов.

С другой стороны, бетатрон может работать только в импульсном режиме, причем с малым средним током пучка. Измерение спектров для одного ядра, таких как на Рис. 3, занимало около 3-х месяцев непрерывной работы ускорителя, при этом суммарное полезное время, т.е. время наличия пучка на выходе ускорителя, составляло лишь около 2-х часов – именно столько времени занял бы эксперимент на ускорителе с $D = 100\%$ с таким же средним током пучка.

Три основных подхода к получению пучка электронов с энергией десятки - сотни МэВ и $D = 100\%$ были сформулированы в 70-е годы. Во-первых, это использование сверхпроводящих ускоряющих структур с пренебрежимо малыми потерями СВЧ мощности в стенках, во-вторых, многократное ускорение пучка в одной нормально проводящей структуре за счет его рециркуляции с помощью системы магнитов, и, в-третьих, использование кольцевых накопителей-растяжителей с инжекцией от импульсных линейных ускорителей и последующим медленным выводом пучка.

К сожалению, надежды на быстрые успехи СВЧ сверхпроводимости не оправдались, достижимый темп набора энергии из-за развития высокочастотного резонансного (мультипакторного) разряда был ограничен в те годы величиной 2 МэВ/м. Поэтому в проекты сверхпроводящих ускорителей электронов были внесены изменения, и для получения энергии ~100 МэВ в них был использован принцип многократного ускорения пучка в одной ускоряющей структуре. Поскольку в сверхпроводящей структуре высока добротность не только рабочего колебания, но и паразитных мод, возбуждение паразитных дипольных колебаний из-за обратной связи по пучку, возникающей за счет рециркуляции, приводило к эффекту “обрыва” тока пучка и ограничивало достижимый средний ток величиной ~1 мкА.

Использование накопительно-растяжительных колец для получения пучка электронов с $D = 100\%$ наталкивалось на проблему эффективности вывода, поэтому реализация таких проектов имела определенный смысл лишь в тех центрах, которые уже обладали импульсными линейными ускорителями.

Именно в этих условиях в начале 80-х годов в НИИЯФ МГУ осуществлялся выбор принципиальной схемы ускорителя для получения пучка с $D = 100\%$, энергией 100 – 200 МэВ и средним током около 100 мкА. Первые обсуждения возможных вариантов состоялись в конце 1982 г. После предварительных оценок и расчетов была выбрана схема нормально проводящего ускорителя непрерывного действия, построенного по схеме разрезного микротрона. В 1985 г. Ученый совет НИИЯФ МГУ принял решение о начале работ по сооружению нового ускорителя, 35-МэВный бетатрон был демонтирован, и силами сотрудников ОЭПВАЯ была начата реализация проекта нового

ускорителя. Блок-схема разрезного микротрона и фотография макета приведены на Рис. 5.

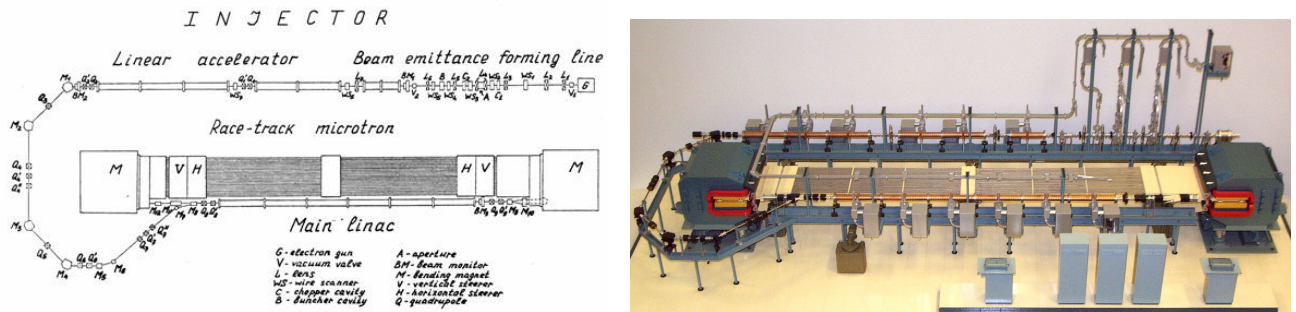
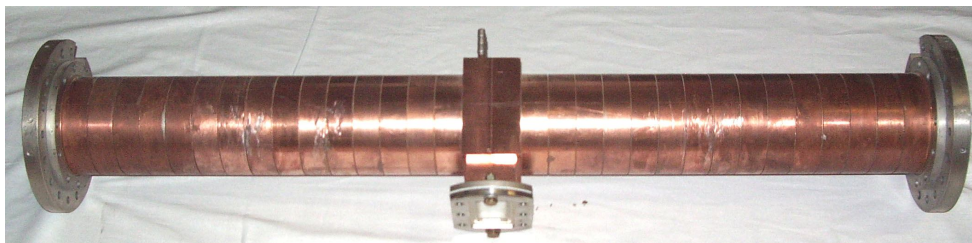
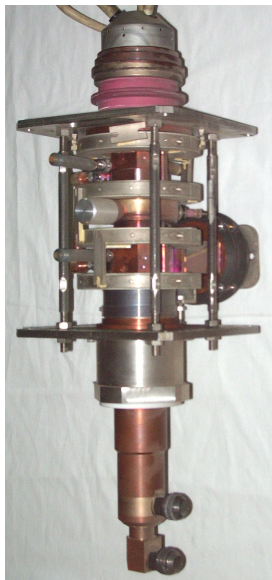


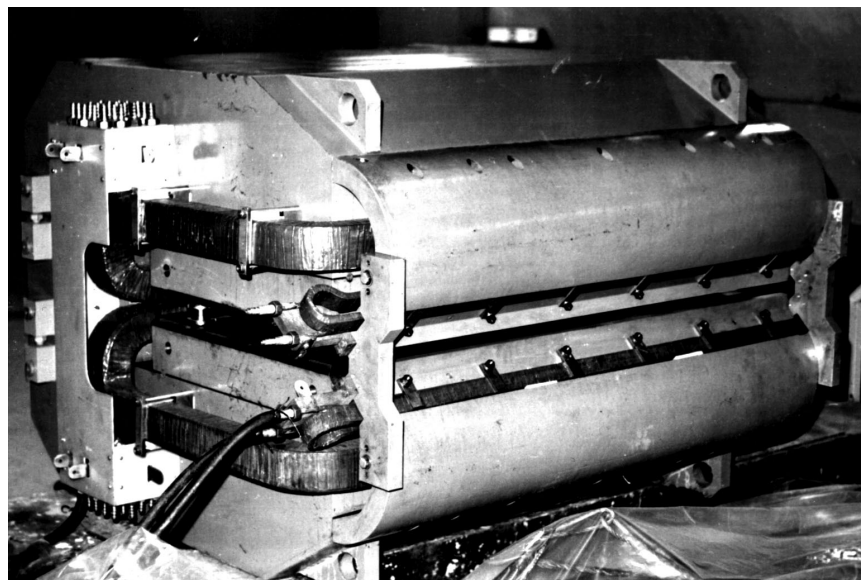
Рисунок 5. Блок-схема и фотография макета разрезного микротрона непрерывного действия.



(a)



(б)



(в)

Рисунок 6. (а) Секция ускоряющей структуры со стоячей волной, (б) многолучевой клистрон непрерывного действия и (в) поворотный магнит.

В течение 1985 – 1992гг были разработаны программные комплексы, выполнены расчеты, сконструированы, изготовлены, измерены и настроены все основные элементы разрезного микротрона. На Рис. 6 показаны разработанные в ходе реализации проекта: (а) секция ускоряющей

структуры со стоячей волной, рассчитанная на рабочую частоту 2450 МГц с эффективным шунтовым сопротивлением 76 МОм/м; (б) клистрон непрерывного действия с выходной мощностью 22 кВт; и (в) поворотный магнит с уровнем рабочего поля около 1 Т с однородностью лучше 0,1%. По результатам разработки разрезного микротрона были защищены кандидатские диссертации М.А.Сотниковым, А.В.Тиуновым, Е.А.Макулбековым, внесшим значительный вклад в реализацию проекта.

В 1992 г. был осуществлен пуск инжектора на энергию 6,7 МэВ со средним током до 1 мА, монохроматичностью пучка 0,1% и нормализованным эмиттансом около 5 мм мрад.

В течение 1992 – 1995 гг. на инжекторе РМ НИИЯФ МГУ были выполнены первые в России эксперименты по ядерной резонансной флуоресценции (ЯРФ). Эти эксперименты продемонстрировали высокое качество пучка инжектора и возможность получения уникальных физических результатов.

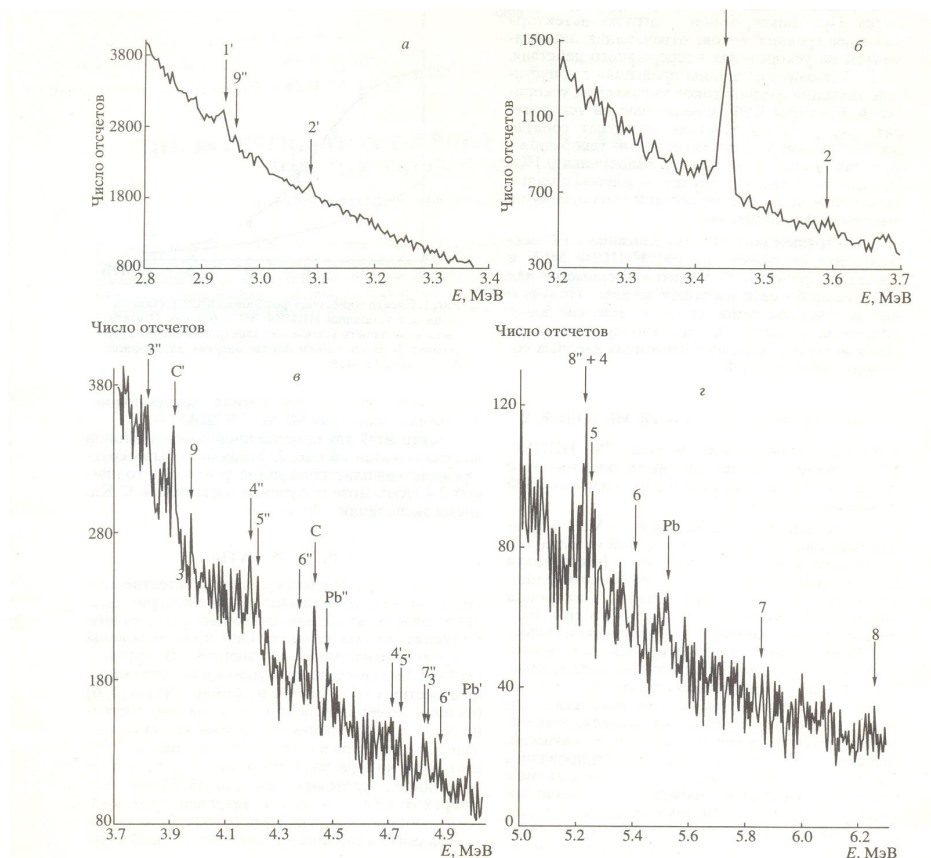


Рисунок 7. Фрагменты спектра ЯРФ для естественной смеси изотопов железа для разных диапазонов энергии.

На этой установке были измерены ЯРФ спектры для нескольких атомных ядер с $A = 50 - 70$. На Рисунке 7 показаны фрагменты спектра ЯРФ для естественной смеси изотопа железа для разных

диапазонов энергий γ -квантов. Получены новые, представляющие исключительно большой интерес сведения о коллективных магнитных дипольных $M1$ возбуждениях орбитального типа, присущих деформированным ядрам. Эти возбуждения относятся к новому классу ядерных коллективных состояний. Их называют либо "ножничными" (scissors) колебаниями, либо гигантскими угловыми дипольными вибрациями (Рис. 8).

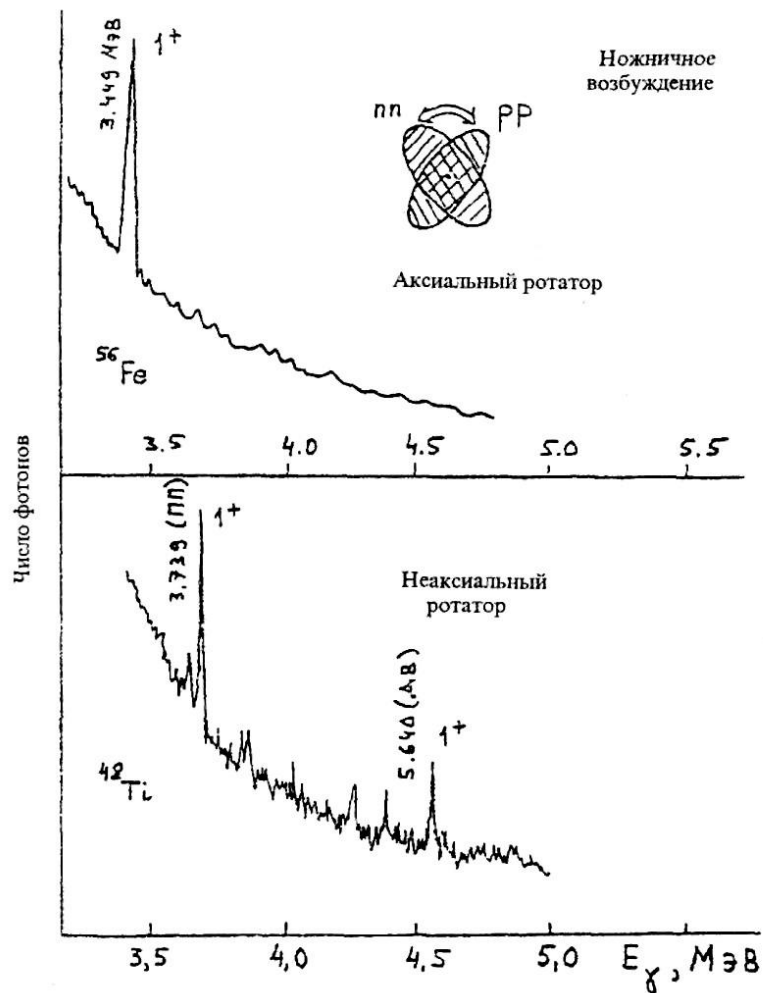


Рисунок 8. Возбуждение "ножничных" колебаний в ядрах ^{56}Fe (верхний рисунок) и ^{48}Ti (нижний рисунок).

В процессе этих колебаний протонный и нейтронный эллипсоиды поворачиваются в противофазе друг относительно друга вокруг общей оси, перпендикулярной оси симметрии ядра, совершая движения, напоминающие движения лезвий ножниц.

Впервые этот новый тип коллективных возбуждений ядер наблюдался у тяжелых деформированных ядер. Вопрос о существовании ножничных возбуждений у ядер меньшего веса оставался открытым. Проведенные эксперименты показали, что орбитальное $M1$ -возбуждение

отчетливо проявляется в более легких ядрах. Был установлен универсальный характер "ножничного" возбуждения для ядер различной массы.

Исследование орбитального М1-возбуждения позволяет осуществить эффективный поиск аксиально-несимметричных ядер, так как характеристики орбитальных М1-колебаний существенно зависят от формы атомного ядра. В аксиально-симметричном ядре возможна только одна частота (энергия) этих колебаний. В случае нарушенной аксиальной симметрии происходит расщепление орбитального М1-возбуждения по энергии в соответствии с различными частотами колебаний протонов относительно нейтронов вокруг различных осей неаксиального ядерного эллипсоида.

Полученные в НИИЯФ МГУ экспериментальные данные по ЯРФ для ядер ^{56}Fe и ^{48}Ti показывают (см. Рис. 8), что ядро ^{56}Fe ведет себя как симметричный ротатор с параметром квадрупольной деформации $\delta = 0,17 \text{ ? } 0,2$. В отличие от ядра ^{56}Fe ядро ^{48}Ti является неаксиальным ротатором с параметром неаксиальности $\gamma = 21^\circ$. Параметр квадрупольной деформации для этого ядра $\delta = 0,23$. Важно подчеркнуть, что этот метод определения параметров деформации ядер обладает исключительно высокой чувствительностью, ставящей его в ряд наиболее точных и надежных методов изучения формы атомных ядер. Используя высокое качество пучка, удалось поставить эксперименты по измерению времени жизни возбужденных состояний атомных ядер методом самопоглощения. Характерный интервал времен жизни, который может быть измерен таким методом составляет $10^{-10} \text{ ? } 10^{-17}$ с.

В 1994 г. за цикл работ "Новые представления о механизме взаимодействия γ -квантов с атомными ядрами" Б.С.Ишханову, И.М.Капитонову и В.И.Шведунову была присуждена премия им. М.В.Ломоносова.

На инжекторе разрезного микротрона были выполнены эксперименты по физике твердого тела и, в частности, исследования механизмов рентгеновского излучения релятивистских электронов в конденсированных средах, изучались поляризационное тормозное, параметрическое рентгеновское, каналированное, резонансное переходное излучения, наблюдаемые при прохождении быстрых электронов в конденсированных средах. Существенным преимуществом указанных механизмов излучения является возможность использования электронных пучков с относительно небольшой энергией частиц – до десяти МэВ.

В качестве первого этапа запланированных исследований в 1994 – 1995 гг. была выполнена серия экспериментальных работ по изучению характеристик поляризационного тормозного излучения релятивистских электронов в аморфной углеродной пленке. Теория предсказывает, что поляризационное излучение в плотной аморфной среде имеет характерный энергетический спектр с резкими спадами в высокочастотной и низкочастотных областях (последний обусловлен эффектом

плотности). Но экспериментальные наблюдения обнаружили качественно новые результаты. Оказалось, что в аморфных средах, состоящих из легких атомов, поляризационный спектр резко смещается в область малых частот. Анализ полученных данных показывает, что в легких атомах это происходит из-за сильного увеличения эффективного радиуса электронных оболочек, поскольку в плотной среде в результате эффективного межатомного взаимодействия значительная часть электронов становится общей. Экспериментальные данные позволили установить значения величины радиуса экранировки и ряд других характеристик для аморфного углерода.

Одним из значительных достижений в ходе реализации проекта, явилось развитие в отделе методов цифрового управления сложными ускорительными установками. С самого начала разработки разрезного микротрона было начато создание многоуровневой системы контроля и управления на базе современных компьютеров. Основные принципы построения систем контроля и управления, разработанные в отделе в 80-е годы, были использованы в дальнейшем при создании систем управления для новых ускорительных установок. Значительный вклад в развитие этого направления внесли А.В. Шумаков, И.В. Грибов, А.С. Чепурнов и ряд других сотрудников отдела.

Кризис в 90-х годах практически остановил завершение проекта разрезного микротрона на энергию 175 МэВ. В попытке его завершения НИИЯФ МГУ объединил усилия с Институтом ядерных исследований РАН, в ИЯИ РАН была передана часть оборудования для сборки ускорителя в помещении линейного ускорителя ИЯИ, однако отсутствие финансирования не позволило реализовать проект. В начале 2002 г. в связи с появлением новых задач в области физики и техники ускорителей инжектор электронов разрезного микротрона в НИИЯФ МГУ был демонтирован.

Изменившиеся в 90-х годах условия финансирования и поддержки научных исследований в России заставили изменить подходы к дальнейшему развитию ускорительной тематики в отделе. Во-первых, было расширено сотрудничество с отечественными и зарубежными научными центрами и организациями, занимающимися разработкой ускорителей электронов низких и средних энергий, или имеющими потребность в таких ускорителях. Во-вторых, значительное внимание было уделено разработке ускорителей, которые могли бы найти применение в промышленности, медицине и других прикладных видах деятельности. В-третьих, ускорители электронов, на энергию в десятки МэВ, которые могут использоваться в фундаментальных научных исследованиях, создавались с учетом их максимальной экономичности, компактности, простоты эксплуатации, так, чтобы они могли использоваться студентами и аспирантами при выполнении дипломных и диссертационных работ.

В течение 1993 – 2002 гг. сотрудники отдела принимали активное участие в совместных работах с Институтом ядерной физики университета г. Майнц (Германия), связанных с усовершенствованием каскада разрезных микротронов МАМИ-В и разработкой двухстороннего микротрона МАМИ-С на

энергию 1,5 ГэВ. Большой объем работ по расчету динамики пучка в разрезном микротроне непрерывного действия на энергию 300 МэВ был выполнен для Института ускоряющих систем и их применений университета г. Афины. Совместно с компанией “Технологии мировой физики” (США) был создан ряд новых ускорителей, описанных ниже. В настоящее время ведется активное сотрудничество с Политехническим университетом г. Барселона (Испания), направленное на разработку ускорителей для медицины.

Из отечественных институтов и организаций наиболее плодотворным является сотрудничество с ФГУП «НПП Торий» – крупнейшим в России разработчиком и производителем мощной СВЧ техники и ускорителей электронов для промышленности. Это сотрудничество было начато в 80-х гг. при разработке проекта разрезного микротрона непрерывного действия и продолжается до настоящего времени. Совместные работы в области физики и техники ускорителей проводятся со специалистами из МИФИ, ИЯИ РАН, ФИ РАН, ИФП РАН, МРТИ РАН, ИФВЭ, ОИЯИ, Саратовского государственного университета.

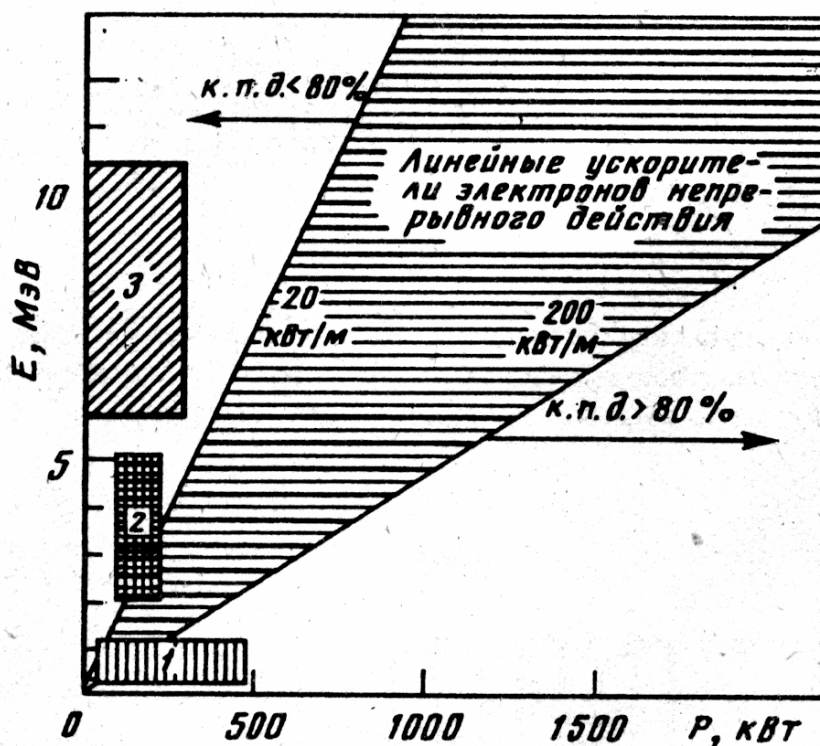


Рисунок 9. Области энергии и мощности пучка, обеспечиваемые ускорителями различного типа. (1,2) – ускорители прямого действия, (3) – импульсные линейные ускорители.

Первые работы, связанные с созданием ускорителей электронов для прикладных целей, начатые в 90-х гг., были основаны на опыте, полученном при реализации проекта разрезного микротрона непрерывного действия. Ускорители электронов непрерывного действия позволяют получать не только прецизионные пучки для научных исследований, но и пучки с большой средней мощностью для применения в промышленности. На Рис. 9 показаны области энергии и мощности пучка для ускорителей различного типа. Как видно, линейные ускорители электронов непрерывного действия могут обеспечивать пучки электронов с энергией в области от 1 до 10 МэВ с мощностью десятки и сотни киловатт.

За развитие данного направления работ молодым ученым отдела А.С.Алимову и А.В.Тиуну в 1995 году была присуждена премия И.И.Шувалова за цикл работ «Новые физические явления при взаимодействии высокоинтенсивных непрерывных пучков с электромагнитными полями». Сотрудник отдела О.В.Чубаров защитил кандидатскую диссертацию "Линейный ускоритель электронов непрерывного действия с высокой мощностью пучка".

В 1995 – 96 гг. с использованием элементов инжектора разрезного микротрона в отделе был создан ускоритель электронов непрерывного действия с магнитным зеркалом. На Рис. 10 показана его блок-схема, а на Рис. 11 фотографии отдельных частей. Ускоритель имел три выхода – прямой, с энергией пучка, регулируемой в диапазоне 0,6 ? 1,2 МэВ, выход под углом 15° к основному направлению пучка с энергией до 1,7 МэВ и выход под углом 336° с энергией пучка до 2,3 МэВ. Средний ток пучка за счет изменения накала электронной пушки мог варьироваться в пределах от единиц мкА до 8 мА (максимальная мощность пучка 10 кВт).

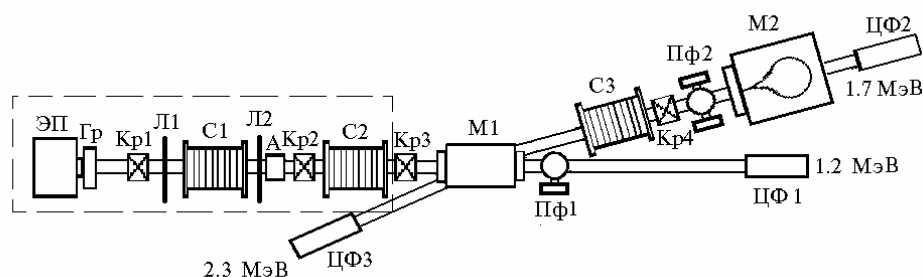
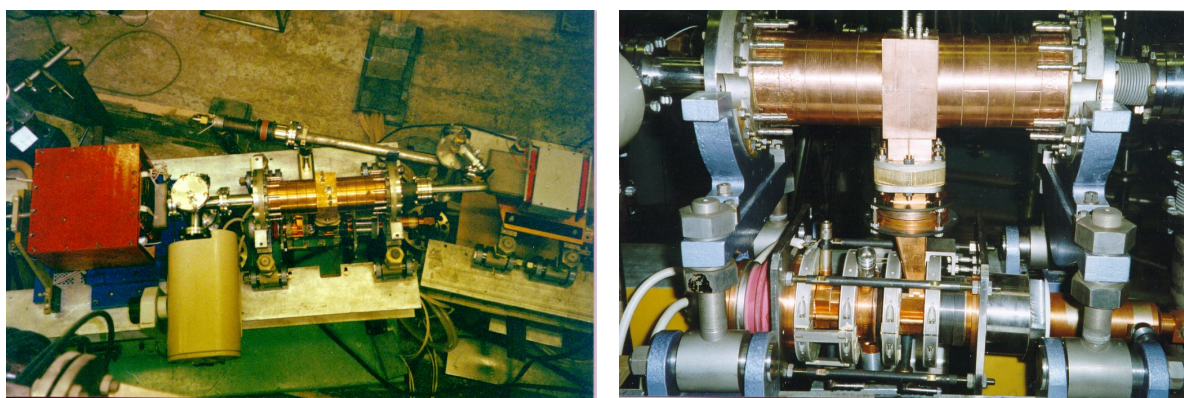


Рисунок 10. Блок-схема ускорителя электронов непрерывного действия с магнитным зеркалом.
 (ЭП) – электронная пушка на энергию пучка до 100 кэВ, (Гр) – предгруппирователь,
 (C1-C3) – ускоряющие секции со стоячей волной, (M1) – поворотный 15° магнит,
 (M2) – магнитное зеркало, (Л1-Л2) – фокусирующие линзы, (Кр) – корректоры,
 (Пф, ЦФ) – датчики пучка.



(a)

(б)

Рисунок 11. Фотографии отдельных частей ускорителя с магнитным зеркалом.

В течение 1996 – 1998 гг. ускоритель использовался для выполнения прикладных работ и в исследованиях взаимодействия электронов с кристаллическими и аморфными мишенями. С помощью данного ускорителя был решен ряд вопросов, имеющих принципиальное значение для разработки технологического ускорителя для промышленности. Одна из главных проблем ускорителей непрерывного действия состоит в том, что при вводе высокочастотной мощности резонансная частота структуры сдвигается вследствие ее нагрева и деформации на величину, превышающую ширину резонансной кривой, что в обычной системе СВЧ питания приводит к полному отражению электромагнитной волны от входного окна. Для решения этой проблемы был реализован автоколебательный принцип работы клистрона с ускоряющей структурой в цепи обратной связи, позволяющий автоматически отслеживать изменение резонансной частоты. Для фазирования независимых автоколебательных систем был использован принцип синхронизации, основанный на подмешивании в цепь обратной связи маломощного внешнего сигнала, формируемого в одной из систем. Наконец, было показано, что в режиме автоколебаний за счет выбора длины волноводного тракта возможна работа клистрона на высокодобротную нагрузку без использования ферритового развязывающего устройства, что позволяет создавать чрезвычайно компактную систему, состоящую из ускоряющей структуры и клистрона, как это видно на Рис. 11(б).

Большая заслуга в строительстве ускорителя с магнитным зеркалом принадлежит Д.И.Ермакову, защитившему в последующем кандидатскую диссертацию ”Электронный ускоритель с магнитным зеркалом”.

Опыт работы с ускорителем с магнитным зеркалом показал, что для создания компактного ускорителя напряжение питания электронной пушки должно быть снижено с 80 ? 100 кВ до 10 ? 15 кВ (напряжение питания клистрона). Это не только уменьшает габариты пушки и ускорителя в целом,

но и снижает мощность паразитных потерь пучка и обусловленный этим радиационный фон, позволяет реализовать принцип клистронного группирования в пределах ускоряющей структуры без отдельно вынесенного резонатора, дает возможность использовать источник питания клистрона для питания пушки.

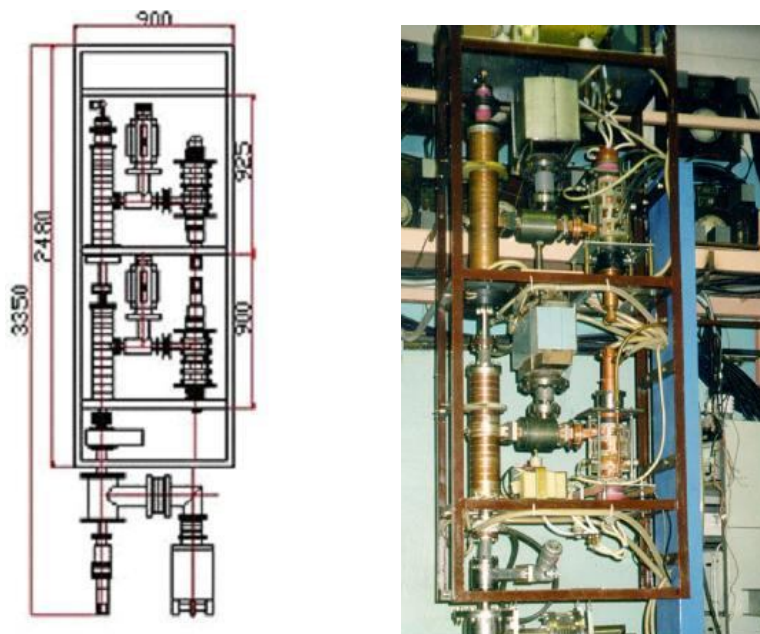


Рисунок 12. Прототип промышленного ускорителя электронов на энергию 1,2МэВ и среднюю мощность пучка 60кВт.

С учетом полученного опыта в 1999 – 2000 гг. в отделе был создан прототип промышленного ускорителя электронов, показанный на Рис. 12, с параметрами, приведенными в Таблице 2. Решающий вклад в реализацию данного проекта внес А.С.Алимов. На данном ускорителе было достигнуто рекордное для линейных СВЧ ускорителей значение среднего тока пучка 50 мА. Принципы, положенные в основу ускорителя, защищены двумя международными патентами. В настоящее время ускоритель используется для выполнения прикладных работ.

На основании прототипа был разработан образец односекционного серийного ускорителя для промышленности с локальной радиационной защитой на энергию 1 МэВ, внешний вид которого показан на Рис. 13, а характеристики приведены в Таблице 3. Ускоритель может использоваться как во вновь создаваемых технологических линиях, так и встраиваться в существующие линии. Отметим, что в области энергий 1 ? 2 МэВ в настоящее время в промышленности используются, главным образом, ускорители прямого действия. Имея высокий КПД они, в то же время, имеют существенно большие размеры и вес, требуют строительства специальных помещений, в них используется дорогостоящий изолирующего газа под высоким давлением.

Таблица 2.

Основные параметры ускорителя

Энергия пучка	1,2 МэВ
Ток пучка	0 – 50 мА
Максимальная мощность	60 kW
Напряжение питания клистрона и пушки	15 kV
Рабочая частота	2450 МГц
Мощность клистрона	50 кВт
Потребляемая мощность	~150 kW
КПД	~40%

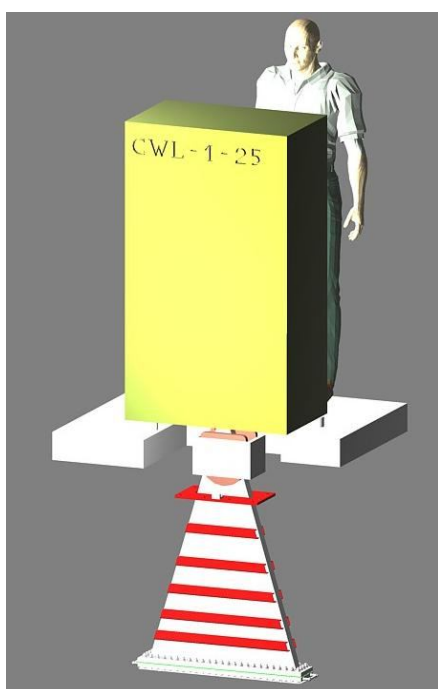


Рисунок 13. Серийный ускоритель для промышленности на энергию 1 МэВ

Таблица 3. Параметры серийного промышленного ускорителя электронов

Энергия пучка	1.0 МэВ
Ток пучка	0 – 25 мА
Максимальная мощность	25 kW
Напряжение питания клистрона и пушки	15 kV
Рабочая частота	2450 МГц
Мощность клистрона	50 кВт
Потребляемая мощность	~75 kW
КПД	~33%
Габариты	500x900x1400 мм

Опыт, полученный при разработке разрезного микротрона непрерывного действия, был использован при создании двух импульсных разрезных микротронов на энергию 70 и 35 МэВ. Разрезной микротрон на энергию 70 МэВ первоначально создавался для изучения возможности детектирования взрывчатых веществ ядерно-физическими методами. Помимо данной задачи, он используется в настоящее время для исследований в области ядерной физики, физики излучений, медицины, элементного анализа, для разработки акустических методов регистрации заряженных частиц, для исследований в области радиационной химии, радиационной биологии и т.д. Блок-схема

разрезного и фотография микротрона показаны на Рис. 14(а), (б), основные параметры приведены в Таблице 4.

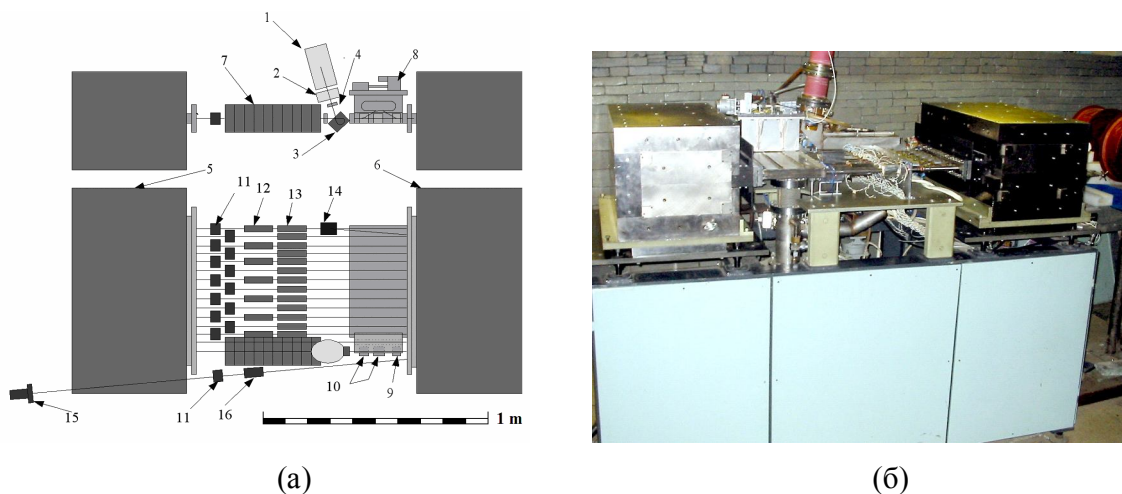


Рисунок 14. Схема (а) и фотография (б) разрезного микротрона на энергию 70 МэВ.

Таблица 4.

Основные параметры разрезного микротрона на энергию 70 МэВ.

Энергия пучка	15 – 70 МэВ с шагом 5 МэВ
Ток пучка	2 – 10 мА
Ширина спектра	0,2 МэВ
Длина импульса	15 мкс
Частота повторения	до 250 Hz
Макс. D	0,95%
Клистрон	КИУ-147А 6 МВт/25кВт
Рабочая частота	2856 МГц
Энергия инжекции	50 кэВ
Размеры	0,8x1,4x2.2 м

Функционирование ускорителя обеспечивается системой контроля и управления. Ускоритель работает следующим образом. Пучок электронов с энергией 50 кэВ от электронной пушки (1), пройдя группирователь (2), фокусирующие линзы (4) и магнит инжекции (3), попадает в линейный ускоритель (7), обеспечивающий прирост энергии 5 МэВ за проход. Многократная рециркуляция пучка через линейный ускоритель осуществляется с помощью поворотных магнитов (5), (6), подстройка фазы пучка на первой орбиты проводится с помощью фазовращателя пучка (8). Вертикальная фокусировка пучка достигается с помощью квадрупольных триплетов (12), установленных на четных орбитах, а горизонтальная – с помощью квадрупольной составляющей высокочастотного поля ускоряющей структуры. Квадрупольная линза (9), установленная на оси

разрезного микротрона, позволяет подстраивать баланс вертикальной и горизонтальной фокусировок. Дипольные магниты (10) компенсируют действия магнита инжекции (3) на пучок в процессе его движения по орбитам. Положение пучка на орбитах подстраивается горизонтальными и вертикальными корректорами (13). Ток пучка на орбитах контролируется индукционными датчиками (10). Ускоренный пучок может быть выведен из разрезного микротрона, начиная с 3-й орбиты, с помощью магнита (14) и направлен на мишень (15).

Особенностью данного ускорителя является то, что основные магнитные элементы – поворотные магниты (5,6), магнит инжекции (3), фокусирующие соленоидальные линзы (4), компенсирующие магниты (10), магниты, входящие в состав фазовращателя пучка (8), магнит вывода (14), квадрупольные триплеты (12) изготовлены с использованием редкоземельного магнитного материала, что существенно сокращает размеры ускорителя, значительно уменьшает количество контролируемых параметров, увеличивает стабильность пучка, упрощает эксплуатацию ускорителя. Другой особенностью ускорителя является, то, что его система СВЧ питания построена по автоколебательному принципу с ускоряющей структурой в цепи обратной связи клистрона, что исключает необходимость иметь высокостабильный задающий СВЧ генератор и с высокой точностью контролировать резонансную частоту ускоряющей структуры.

Разрезной микротрон является резонансным ускорителем – ускорение пучка возможно только в том случае, если ускоряемый сгусток приходит на вход линейного ускорителя с малыми отклонениями от так называемой равновесной фазы, асимптотическое (т.е. при высоких энергиях пучка) значение которой составляет в нашем случае 22° . Резонансные условия обеспечиваются правильным выбором амплитуды ускоряющего поля для фиксированного уровня поля поворотных магнитов и, начиная со второй орбиты, выбором расстояния между магнитами. С целью оптимизации резонансных условий поворотные магниты разрезного микротрона установлены на подвижные платформы, перемещаемые с помощью электродвигателей, текущее положение магнитов контролируется с точностью лучше 0,1 мм с помощью прецизионных ползунковых сопротивлений.

Для подстройки фазы пучка с энергией 5 МэВ на первой орбите используется фазовращатель пучка, показанный на Рис. 15. Фазовращатель представляет собой ахроматическую систему из 5-ти дипольных магнитов, двух 180° , (2), (9), и трех 30° , (1), (10), (11), в которой пучок описывает петлеобразную траекторию. Перемещением 180° магнита (2) с помощью шагового двигателя (3), расположенного вне вакуумного объема, изменяется длина траектории и, тем самым, фаза пучка на входе в ускоряющую структуру.

Блок-схема автоколебательной системы СВЧ питания показана на Рис. 16, где приняты следующие обозначения: К – клистрон, RCBS – ускоряющая структура, Pre-buncher –

группирователь, $A1$ и $A3$ – механические аттенюаторы с шаговыми двигателями, $A2$ – р-и-п аттенюатор, $\varphi1$, $\varphi2$ – механические аттенюаторы с шаговыми двигателями, $D1$, $D2$ – детекторные головки для контроля уровня поля в ускоряющей структуре и группирователе, $\alpha1$ и $\alpha2$ – ферритовые вентили.

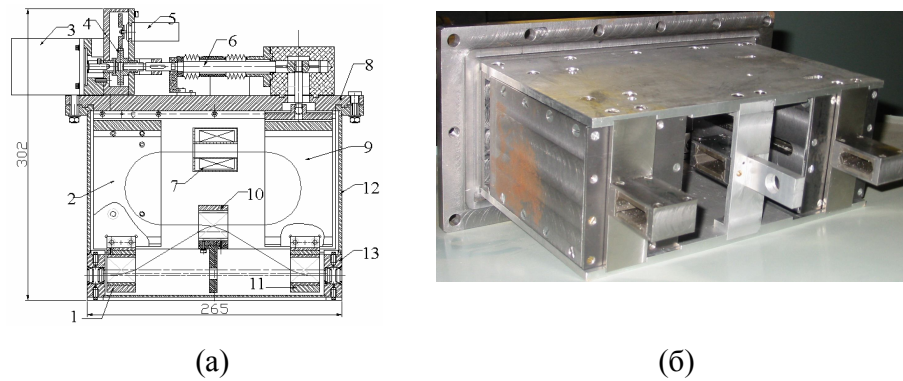


Рисунок 15. Фазовращатель пучка: (а) – чертеж, (б) – фотография.

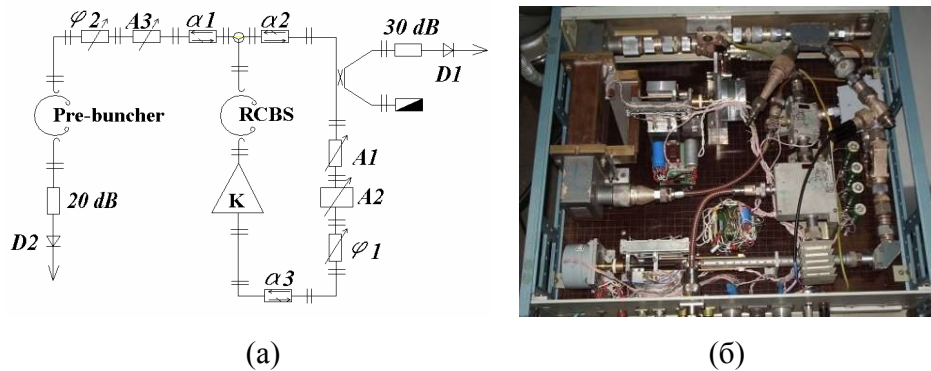


Рисунок 16. (а) – Блок-схема системы СВЧ питания, (б) – фотография блока обратной связи.

На Рис. 17(а) для одной из настроек ускорителя приведены импульсы тока с индукционных датчиков, установленных на орбитах, а на Рис. 17(б) показано спадание тока пучка по орбитам.

В разработке и создании данного ускорителя принимали участие как сотрудники отдела, в частности, А.Н.Ермаков, Г.А.Новиков, защитившие кандидатские диссертации, Н.И.Пахомов, так и представители различных Российских и зарубежных организаций – Н.П.Собенин (МИФИ), В.Н.Мелехин (ИФП РАН), А.И.Карев (ФИАН), В.А.Павлов (МРТИ РАН), В.С.Скачков (ИГЭФ), В.П.Горбачев (СГУ), И.А.Фрейдович («НПП Торий»), А.Д.Рябов (ИФВЭ), К.Хальбах (Беркли, США). Реализация проекта стала возможной благодаря поддержке У.П.Трауэра и Э.А.Нэппа («Технологии мировой физики», США).

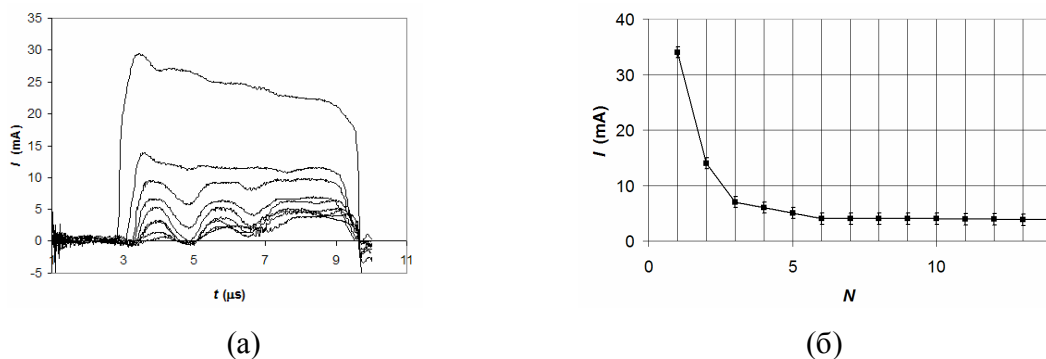


Рисунок 17. (а) Сигналы с индукционных датчиков тока пучка; (б) спадание тока по орбитам разрезного микротрона.

Создание в отделе ускорителя электронов на энергию 70 МэВ позволило начать исследование возбуждения и распада атомных ядер в области энергий между гигантским дипольным резонансом и областью возбуждений нуклонных резонансов. В этой области энергии возбужденные состояния распадаются, как правило, с испусканием нескольких нуклонов. Традиционные методы исследования, используемые в области энергий гигантского дипольного резонанса трудно использовать в области более высоких энергий из-за низкой эффективности одновременной регистрации нескольких частиц в конечном состоянии. В то же время в этой области энергии изменяется механизм взаимодействия фотонов с ядрами. Если в области энергий гигантского резонанса фотоны взаимодействуют с ядром как с единым объектом, то в области за гигантским резонансом фотон взаимодействует с отдельными ядерными кластерами и, в первую очередь, с квазидейтронами. Проблема диссипации энергии, поглощенной отдельными фрагментами ядра, передача энергии другим степеням свободы является не до конца изученной. Важную роль в этой энергетической области играет возбуждение нуклонов глубоких внутренних оболочек ядра.

Фотоядерные реакции с вылетом нескольких нейтронов (γ, xn) позволяют исследовать атомные ядра удаленные от полосы β -стабильности. Использование тормозных пучков фотонов с энергией до 70 МэВ позволяет исследовать ядра, образующиеся в реакциях вплоть до ($\gamma, 7n$). Многочастичные фотоядерные реакции представляют собой практически не исследованную область, не известны сечения этих реакций для большинства ядер. На Рис. 18 показан спектр γ -квантов в диапазоне энергий 300 ? 1000 кэВ из мишени ^{197}Au , облученной тормозным излучением с верхней границей 67,7 МэВ.

Всего было обнаружено 207 максимумов в спектрах γ -квантов. 162 максимума в спектрах были идентифицированы как γ -переходы в продуктах распада, образующихся в результате фотоядерных реакций $^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196}\text{Au}$, $^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196\text{m}}\text{Au}$, $^{197}\text{Au}(\gamma, 2n)^{195}\text{Au}$, $^{197}\text{Au}(\gamma, 3n)^{194}\text{Au}$, $^{197}\text{Au}(\gamma,$

$4n$) ^{193}Au , $^{197}\text{Au}(\gamma, 5n)^{192}\text{Au}$, $^{197}\text{Au}(\gamma, 6n)^{191}\text{Au}$, $^{197}\text{Au}(\gamma, 7n)^{190}\text{Au}$. Идентификация пиков проводилась на основе сравнения с табличными значениями положения максимума, интенсивности γ -перехода в конечном ядре, периоду полураспада.

На основе полученных данных были рассчитаны относительные величины выходов реакций $(\gamma, n), \dots, (\gamma, 6n)$, нормированные на выход реакции (γ, n) (Таблица 5).

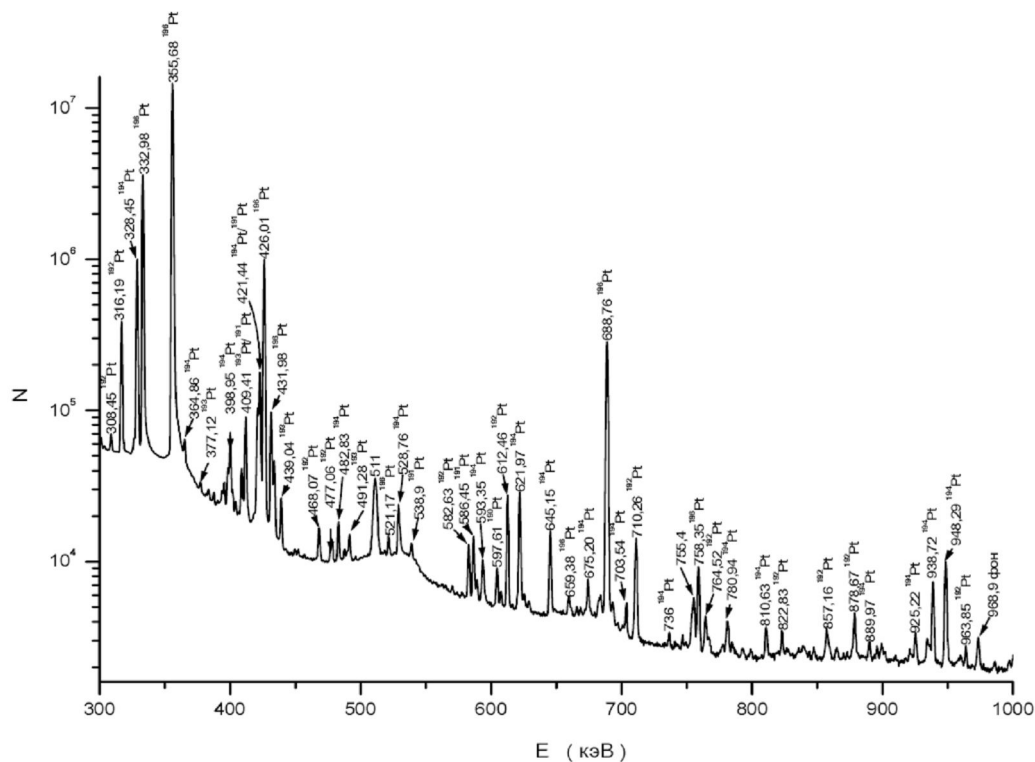


Рисунок 18. Спектр гамма-квантов в диапазоне энергий 300 ? 1000кэВ из мишени ^{197}Au , облученной тормозным излучением с верхней границей 67,7 МэВ.

Таблица 5

Относительные значения выходов фотонейтронных реакций

Реакция	Эксперимент	Теория [10]
$^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196}\text{Au}$	1,0000	1,0000
$^{197}\text{Au}(\gamma, 2n)^{195}\text{Au}$	$0,16 \pm 0,01$	0,2039
$^{197}\text{Au}(\gamma, 3n)^{194}\text{Au}$	$0,023 \pm 0,002$	0,0214
$^{197}\text{Au}(\gamma, 4n)^{193}\text{Au}$	$0,0074 \pm 0,0013$	0,0097
$^{197}\text{Au}(\gamma, 5n)^{192}\text{Au}$	$0,0025 \pm 0,0002$	0,0027
$^{197}\text{Au}(\gamma, 6n)^{191}\text{Au}$	$0,00050 \pm 0,00007$	0,0006

С использованием этих данных, а также результатов анализа экспериментальных данных работ по сечениям реакции $^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196}\text{Au}$ были оценены абсолютные значения интегральных сечений реакций от порога до $E = 67,7$ МэВ. Эти результаты приведены в Таблице 6.

Таблица 6

Интегральные сечения фотонейтронных реакций

Реакция	Порог реакции, МэВ	Положение максимума, МэВ	Интегральное сечение, МэВ·мб
$^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196}\text{Au}$	8,07	13,5	2278 ± 200
$^{197}\text{Au}(\gamma, 2n)^{195}\text{Au}$	14,71	16,5	733 ± 100
$^{197}\text{Au}(\gamma, 3n)^{194}\text{Au}$	23,09	28	236 ± 30
$^{197}\text{Au}(\gamma, 4n)^{193}\text{Au}$	30,03	40	$160,3 \pm 20$
$^{197}\text{Au}(\gamma, 5n)^{192}\text{Au}$	38,73	50	$122,7 \pm 10$
$^{197}\text{Au}(\gamma, 6n)^{191}\text{Au}$	54,77	60	$62,7 \pm 15$

Для описания фотонейтронных сечений на ядре ^{197}Au с вылетом большего числа нейтронов – $(\gamma, 4n)$, $(\gamma, 5n)$ и $(\gamma, 6n)$ – необходимо учитывать квазидейтронный механизм фоторасщепления. В Таблице 7 сравниваются экспериментальные выходы реакций (γ, n) , $(\gamma, 2n)$, $(\gamma, 3n)$, $(\gamma, 4n)$, $(\gamma, 5n)$ и $(\gamma, 6n)$ для ядра ^{197}Au с результатами расчета.

Таблица 7

Сравнение экспериментальных и теоретических выходов фотонейтронных реакций (γ, n) , ..., $(\gamma, 6n)$ для ядра ^{197}Au

$Y(\gamma, kn)$	Эксперимент	Теория [10] ГДР + КД	Теория [10] ГДР
$Y(\gamma, n)$	1,0000	1,0000	1,0000
$Y(\gamma, 2n)$	$0,16 \pm 0,01$	0,2039	0,1940
$Y(\gamma, 3n)$	$0,023 \pm 0,002$	0,0214	0,0141
$Y(\gamma, 4n)$	$0,0074 \pm 0,0013$	0,0097	0,0043
$Y(\gamma, 5n)$	$0,0025 \pm 0,0002$	0,0027	0,0010
$Y(\gamma, 6n)$	$0,00050 \pm 0,00007$	0,0006	0,0002

Данные Табл. 7 показывают, что описание многонуклонного фоторасщепления с учетом ГДР и квазидейтронного механизма даёт результаты хорошо согласующиеся с экспериментом для фотонейтронных реакций всех множественностей. В то же время без учета КД-фоторасщепления выходы фотонейтронных реакций с вылетом более чем 3-х нейтронов – $(\gamma, 4n)$, $(\gamma, 5n)$ и $(\gamma, 6n)$ – оказываются заниженными в 2 раза по сравнению с результатами эксперимента.

Поскольку фотонейтронные реакции высокой множественности формируют участок сечения фотопоглощения при $E_\gamma > 30$ МэВ, то роль квазидейтронного фоторасщепления в этой энергетической области очевидна.

Исследования многочастичных реакций на ядре ^{197}Au легли в основу кандидатской диссертации аспиранта республики Мьянма Чжо-Чжо Туна.

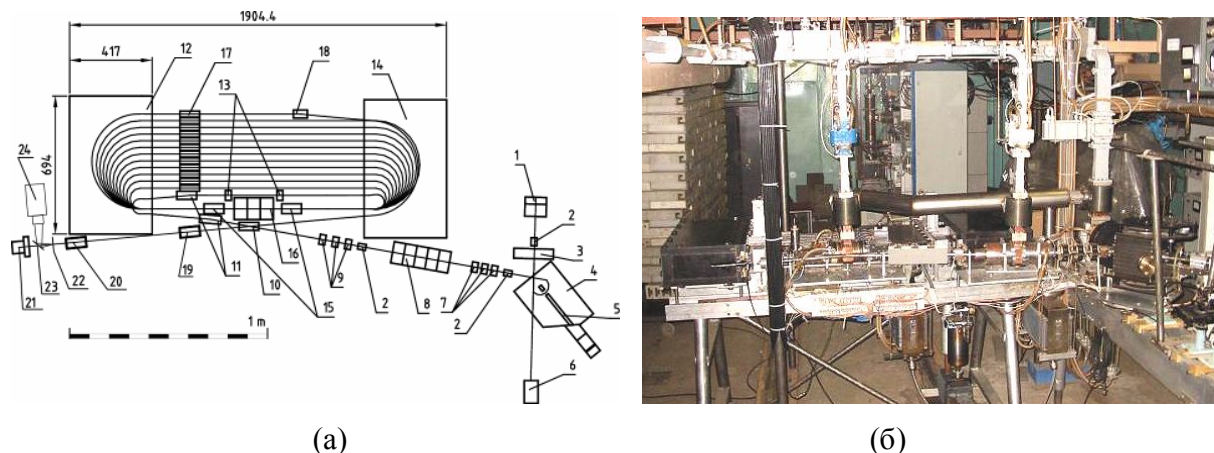


Рисунок 19. Схема (а) и фотография (б) разрезного микротрона на энергию 35 МэВ. (1) – СВЧ пушка, (2) – корректоры пучка системы инжекции, (3) – соленоидальная линза, (4) – альфа-магнит, (5) – коллиматор, (6) – лазерная система, (7), (9) – квадрупольные триплеты, (8) – ускоряющая структура инжектора, (10) – дипольный магнит вывода инжектируемого пучка, (11) – дипольные магниты системы инжекции, (12), (14) – поворотные магниты, (13) – квадрупольный дублет, (15) – квадрупольные синглеты разрезного микротрона, (16) – ускоряющая структура разрезного микротрона, (17) – корректоры пучка разрезного микротрона, (18) – магнит вывода пучка, (19), (20) – квадрупольные синглеты тракта вывода пучка, (21) – цилиндр Фарадея, (22) – люминесцентный экран, (23) – зеркало, (24) – телевизионная камера.

Разрезной микротрон на энергию 35 МэВ, блок-схема и фотография которого показаны на Рис. 19(а) и (б), предназначен для ускорения сгустков электронов с большим зарядом, малой длительностью и малым поперечным эмиттансом. Основные параметры разрезного микротрона приведены в Таблице 8. Пучок ускорителя используется для генерации когерентного излучения в миллиметровой и субмиллиметровой области длин волн, разработки новых методов диагностики пучков заряженных частиц, исследования новых методов ускорения частиц. Отличительной

особенностью данного ускорителя является наличие инжектора с СВЧ пушкой с фотокатодом и лазерной системы, формирующих сгустки электронов с энергией 4,85 МэВ с большим зарядом, малой длительностью и малым поперечным эмиттансом. Инжектированные в разрезной микротрон сгустки ускоряются практически без потерь и могут выводиться из ускорителя с любой орбиты.

Таблица 8.

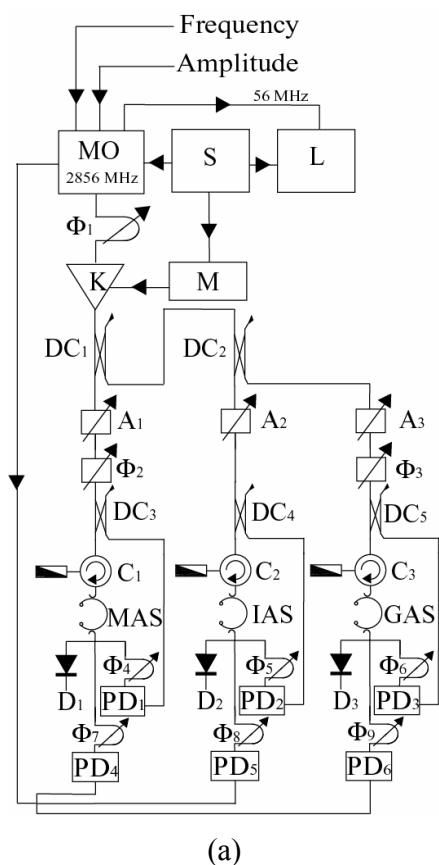
Основные параметры разрезного микротрона на энергию 35 МэВ.

Энергия инжекции	4,85 МэВ
Прирост энергии за оборот	2,43 МэВ
Энергия выведенного пучка	4,85 – 34,20 МэВ
Нормализованный эмиттанс	10 мм · мрад
Продольный эмиттанс	200 кэВ · градус
Длительность сгустка	5 пс
Частота повторения сгустков	1 – 150 Гц
Заряд сгустка	150 пК
Рабочая частота	2,856 ГГц
Импульсная СВЧ мощность	< 3 МВт
Индукция поля магнитов	0,486 Т

В отличие от ситуации для разрезного микротрона на энергию 70 МэВ, автоколебательный принцип работы клистрона не мог быть использован в данном ускорителе ввиду наличия трех ускоряющих структур (СВЧ пушка, инжектор, основная структура), питающихся от одного клистрона, и жестких требований к стабильности амплитуд и разности фаз ускоряющего поля в указанных структурах. Блок-схема системы СВЧ питания показана на Рис. 20. Работа клистрона в режиме внешнего возбуждения потребовала использования высокостабильного задающего генератора и системы стабилизации резонансной частоты ускоряющих структур посредством контроля температуры охлаждающей жидкости.

Работа ускорителя обеспечивается системой контроля и управления, выполняющей следующие основные функции: (1) поддержание и регулирование амплитуд и разности фаз поля ускоряющих структур СВЧ пушки, инжектора и разрезного микротрона; (2) регулирование накала катода СВЧ пушки; (3) регулирование работы системы сжатия сгустков на основе альфа-магнита (Рис. 19); (4) регулирование положения лазерного импульса относительно фазы ускоряющего поля СВЧ пушки; (5) настройку тракта инжекции пучка; (6) настройку электронно-оптической системы

разрезного микротрона; (7) – управление системой подавления когерентного синхротронного излучения; (8) вывод пучка из разрезного микротрона; (9) проведение измерений эмиттанса инжектируемого и выведенного пучка электронов.



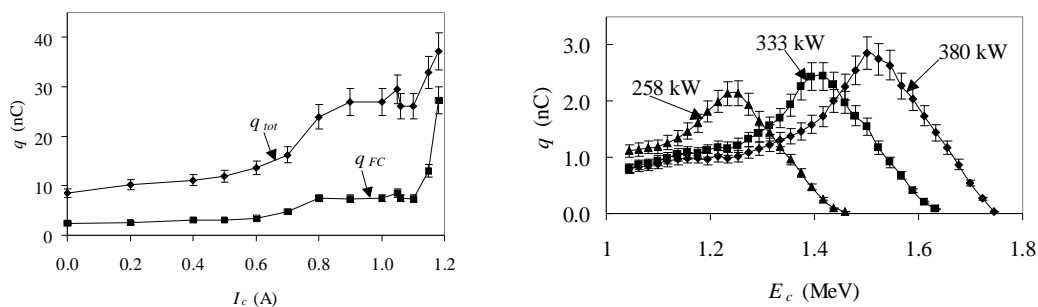
(б)



(в)

Рисунок 20. Блок-схема системы СВЧ питания (а), фотографии СВЧ системы высокого уровня мощности – вид сверху (б) и блока контроля СВЧ параметров (в). S – система синхронизации, MO – система формирование входного сигнала клистрона, L – лазерная система, K – клистрон, M – модулятор клистрона, Φ_1 – коаксиально-полосковый фазовращатель входного сигнала клистрона, DC₁, DC₂ – трехдицебельные направленные ответвители, A₁, A₂, A₃ – волноводные аттенюаторы с шаговыми двигателями, Φ_2 , Φ_3 – волноводные фазовращатели с шаговыми двигателями, DC₃, DC₄, DC₅ – волноводно-коаксиальные направленные ответвители с переходным ослаблением 50 дБ, C₁, C₂, C₃ – циркуляторы с согласованными нагрузками, GAS – ускоряющая структура СВЧ пушки, IAS- ускоряющая структура инжектора, MAS- ускоряющая структура разрезного микротрона, D₁, D₂, D₃ – детекторные головки для контроля уровня СВЧ поля в ускоряющих структурах, PD₁, PD₂, PD₃ – фазовые детекторы контроля резонансной частоты, Φ_4 , Φ_5 , Φ_6 , – коаксиально-полосковые фазовращатели для выбора рабочих точек фазовых детекторов резонансной частоты с шаговыми двигателями, PD₄, PD₅, PD₆ – фазовые детекторы контроля фазы поля, Φ_7 , Φ_8 , Φ_9 , – коаксиально-полосковые фазовращатели для выбора рабочих точек фазовых детекторов фазы поля с шаговыми двигателями.

На Рис. 21(а) показана измеренная зависимость полного заряда выбиваемого из катода импульсом лазерного излучения и заряда на выходе из альфа-магнита от тока накала катода. Видно, что для тока накала выше 1,1 А начинается лавинообразный рост заряда, означающий начало термоэмиссии., на Рис. 21(б) показаны спектры частиц на выходе СВЧ пушки для различных уровней ускоряющего поля, измеренные при перемещении коллимационной щели (5), Рис. 19.



(а)

(б)

Рисунок 21. (а) Зависимость полного заряда выбиваемого из катода импульсом лазерного излучения и заряда на выходе из альфа-магнита от тока накала катода. (б) Спектры пучка СВЧ пушки при различных уровнях ускоряющего поля.

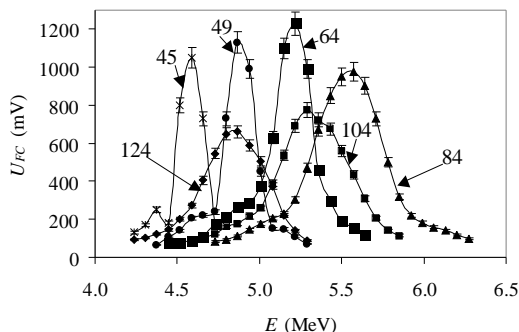


Рисунок 22. Спектры пучка на выходе инжектора, измеренные при различной разности фаз поля ускоряющих структур пушки и инжектора.

Спектры пучка на выходе инжектора для различных значений разности фаз поля СВЧ пушки и инжектора показаны на Рис. 22. На Рис. 23 показаны изображения пучка на возвратных орбитах, полученные с помощью перемещаемого экрана, установленного внутри вакуумной камеры. Горизонтальные размеры пучка, наблюдаемого на участке траектории с дисперсией, определяются главным образом, шириной энергетического спектра.

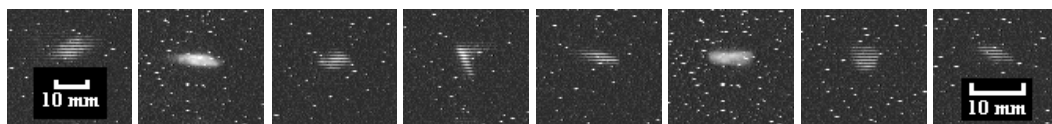


Рисунок 23. Фотографии пучка на орбитах.

Важной особенностью разрезного микротрона на энергию 35 МэВ является большое влияние когерентного синхротронного излучения на поперечную и продольную динамику пучка в силу малой длины и большого зарядов сгустков. Для подавления когерентного излучения внутри каждой из двух вакуумных камер установлены проводящие пластины, перемещаемые шаговыми двигателями, расположенными вне вакуумных камер – Рис. 24.

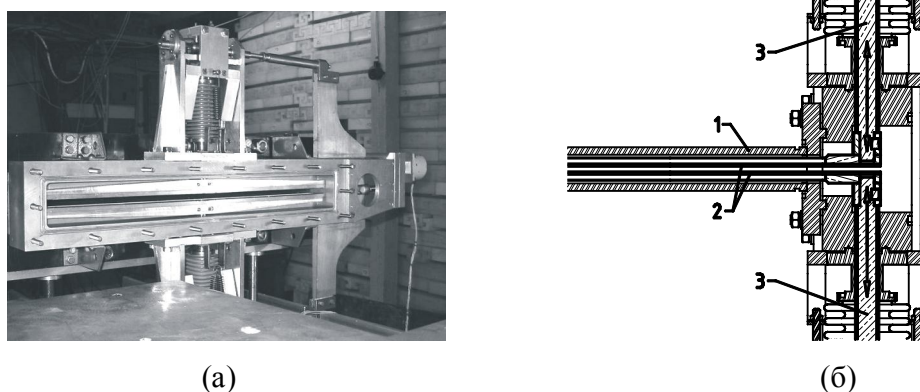


Рисунок 24. Система подавления когерентного синхротронного излучения. (а) – Вакуумная камера с пластинами, (б) – принцип действия механизма перемещения.

На разрезном микротроне на энергию 35 МэВ были проведены эксперименты по регистрации излучения Вавилова-Черенкова с целью диагностики пучка электронов, по измерению характеристик когерентного излучения Смита-Парселла и когерентного переходного излучения.

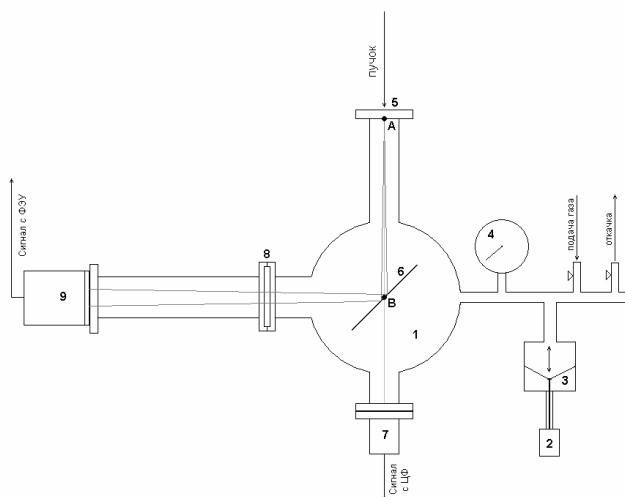


Рисунок 25. Схема экспериментальной установки для определения спектра пучка.

Излучение Вавилова-Черенкова (ИВЧ), вследствие его порогового характера и зависимости интенсивности от скорости частиц и показателя преломления среды, может быть использовано для определения энергетического спектра пучков заряженных частиц. На Рис. 25 показана схема

экспериментальной установки, располагаемой на выходе разрезного микротрона, для определения спектра пучка на различных орбитах. Камера (1), из которой предварительно откачивается воздух, заполняется рабочим газом, тип которого зависит от энергии пучка, до давления, близкого к рабочему. Плавное изменение давления в камере в пределах 20-25% обеспечивается шаговым двигателем (2), перемещающим мембрану (3). Давление контролируется посредством манометра (4). Пучок от ускорителя, попадает в камеру через входное окно (5), закрытое тонкой фольгой и проходит через зеркало (6) в цилиндр Фарадея (7). ИВЧ, порожденное на участке камеры АВ, выходит из камеры через прозрачное окно (8) и регистрируется фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) (9). Таким образом, может быть измерена зависимость интенсивности ИВЧ от давления газа в камере, и, следовательно, от показателя преломления. Посредством решения обратной задачи может быть восстановлен энергетический спектр пучка. На Рис. 26(а) показана зависимость амплитуды сигнала ФЭУ от давления газа (фреон-12) для пучка, выведенного со 2-й и 3-й орбит разрезного микротрона, а на Рис. 26(б) показаны восстановленные энергетические спектры. Описанные исследования были проведены В.В.Полиэктовым (кандидатская диссертация “Измерение энергетического спектра пучка электронов с помощью излучения Вавилова-Черенкова”) в соответствии с предложением К.А.Труханова (ИМБП РАН).

На длинах волн, превосходящих длину сгустка, излучение отдельных частиц, возникающее в силу тех или иных причин (переходное излучение, синхротронное излучение, ИВЧ и т.д.), складывается когерентно, что приводит к зависимости интенсивности излучения от числа частиц в сгустке близкой к квадратичной. Ускорители с большой яркостью пучка позволяют получать релятивистские сгустки протяженностью $1 \text{ ? } 0,1 \text{ мм}$, состоящие из $10^9 \text{ ? } 10^{10}$ частиц, и поэтому являются источниками мощного излучения в миллиметровой и субмиллиметровой областях. С другой стороны, измерение зависимости интенсивности излучения от длины волны позволяет оценить длину сгустка.

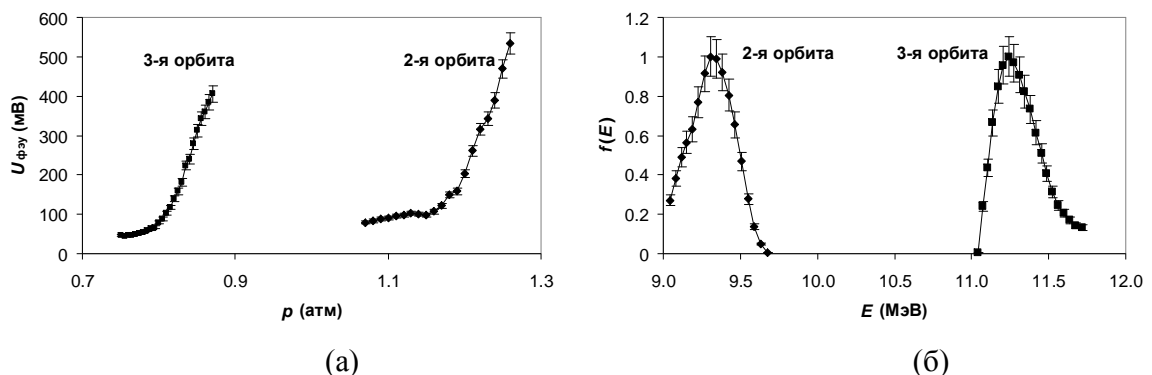


Рисунок 26. (а) – Зависимость амплитуды сигнала ФЭУ от давления газа, (б) – восстановленные спектры пучка.

На пучке инжектора разрезного микротрона было проведено измерение углового распределения когерентного переходного излучения в диапазоне длин волн $3 \div 8$ мм. На Рис. 27(а) показана схема эксперимента – (1) пучок электронов, (2) - мишень для генерации излучения, (3) – генерируемое излучение, (4) – детектор излучения, (5) рупорная антенна, (6) – траектория перемещения детектора с помощью поворотного механизма. Расстояние от мишени до детектора могло меняться от 0,5 до 1 м. Поворотом рупорной антенны на 90° можно было изменять регистрируемый угол поляризации излучения. В экспериментах были использованы детекторы диапазона длин волн 3, 5 и 8 мм. Сигнал с детектора через быстрый усилитель подавался на быстрый цифровой осциллограф, с помощью которого измерялась амплитуда импульса излучения. В качестве мишени для генерации когерентного переходного излучения использовалось выходное окно ускорителя, сделанное из титановой фольги толщиной 20 мкм.

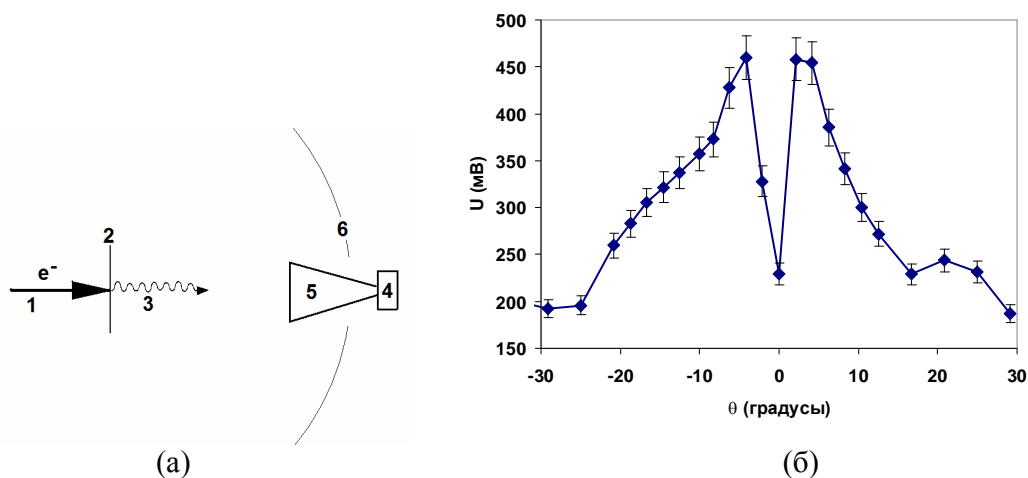


Рисунок 27. (а) Схема экспериментальной установки, (б) угловое распределение когерентного переходного излучения при энергии 5 МэВ.

На Рис. 27(б) показано угловое распределения когерентного переходного излучения. Угол раствора конуса переходного излучения определяется энергией пучка $\alpha \approx m_0 c^2 / (E + m_0 c^2)$ и для энергии 5 МэВ $\alpha \approx 5,3^\circ$, что совпадает с измеренным значением.

Опыт создания линейного ускорителя непрерывного действия и импульсных линейных ускорителей для разрезных микротронов был использован в совместной с ФГУП «НПП «Торий» разработке импульсного ускорителя для радиационных технологий на энергию 10 МэВ и мощность пучка, лежащую, в зависимости от типа клистрона, в диапазоне от 3 кВт до 50 кВт. В НИИЯФ МГУ были выполнены расчеты ускоряющей структуры (А.А.Ветров, кандидатская диссертация “ Расчет электродинамических характеристик и оптических свойств ускоряющих структур в широком

диапазоне длин волн”) и динамики частиц (А.В.Посеряев, кандидатская диссертация “Расчет динамики и оптимизация параметров ускорительных комплексов различного назначения”) и создан стенд для испытаний ускорителя. Система СВЧ питания ускорителя основана на автоколебательном принципе аналогично системе питания разрезного микротрона. Фотография стенда для испытаний ускорителя показана на Рис. 28.



Рисунок 28. Стенд для испытаний импульсного линейного ускорителя на энергию 10 МэВ.

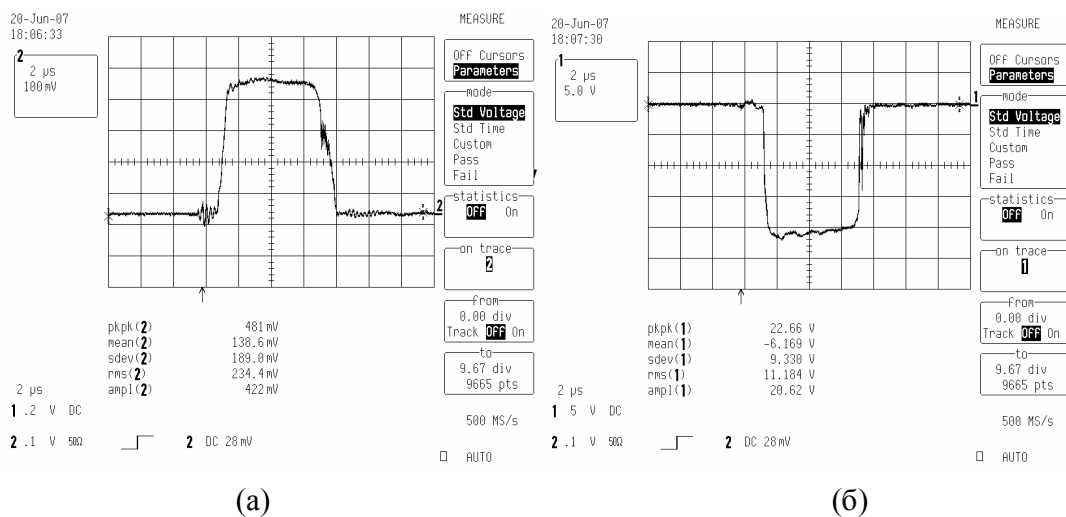


Рисунок 29. (а) Огибающая СВЧ поля в структуре. (б) Импульс тока коллектора на нагрузку 50 Ом.

На Рис. 29(а) показана огибающая СВЧ поля в структуре. Амплитуда сигнала соответствует проектному уровню мощности СВЧ потерь в стенках 1,5 МВт, обеспечивающему энергию пучка на выходе 10 МэВ. Импульс тока коллектора на нагрузку 50 Ом показан на Рис. 29(б), амплитуда импульса соответствует импульсному току пучка около 400 мА. Отметим, что при проектном

импульсном токе пучка 430 мА, в процессе испытаний были получены значения тока, превосходящие 500 мА.

На Рис. 30(а) показан спектр ускоренного пучка, измеренный с помощью магнитного спектрометра. Энергия максимума спектра превосходит 11 МэВ, проектное значение 10 МэВ достигается регулировкой параметров СВЧ цепи обратной связи. Изображение пучка, полученное при регистрации переходного излучения CCD камерой, синхронизированной с импульсами запуска модулятора клистрона, показано на Рис. 30(б). Там же показаны профили пучка в вертикальной и горизонтальной плоскостях, видно, что диаметр пучка на половине высоты не превышает 2 – 3 мм.

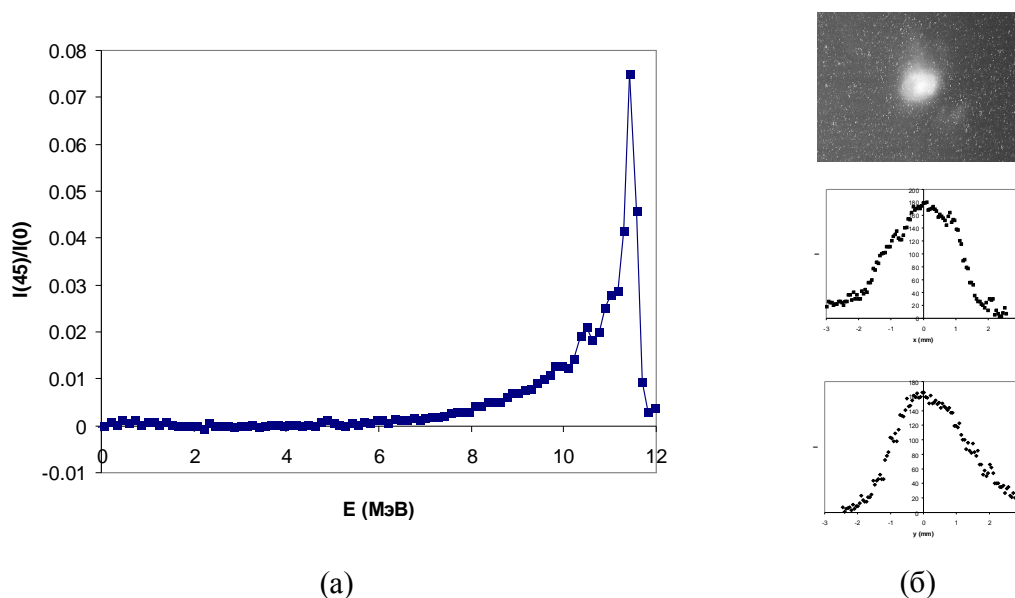


Рисунок 30. Спектр пучка электронов (а), фотография и профили пучка (б).

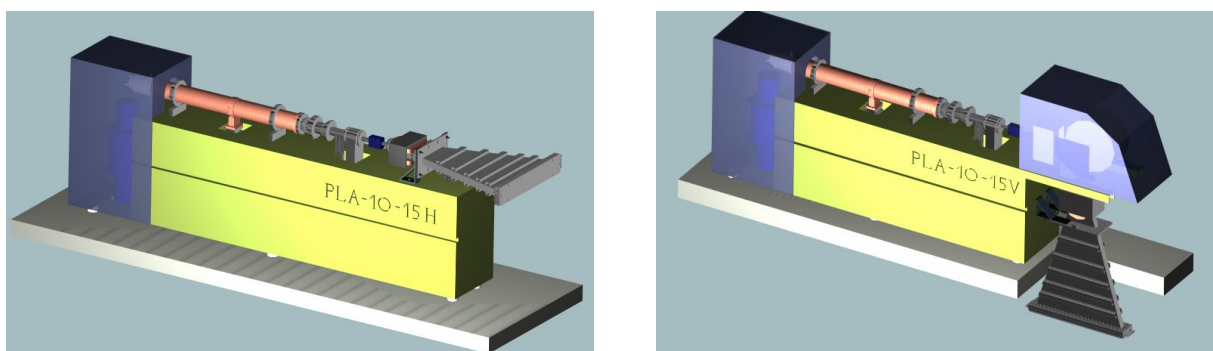


Рисунок 31. Ускоритель электронов на энергию 10 МэВ с различным положением системы вывода пучка

Хорошее соответствие проектных и измеренных характеристик пучка позволило разработать серийный ускорителя для радиационных технологий на энергию 10 МэВ. Внешний вид двух

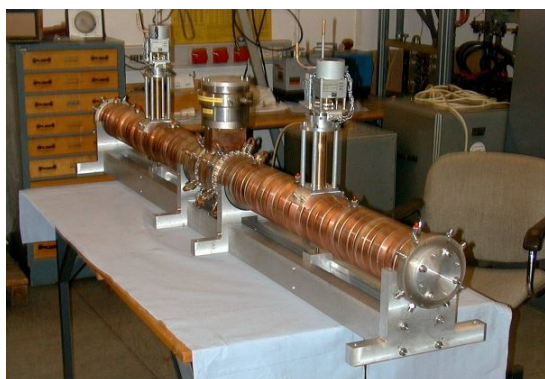
вариантов ускорителя с различным положением системы вывода пучка показан на Рис. 31, основные параметры ускорителя с системой питания, основанной на серийном клистроне КИУ-147А, приведены в Таблице 9.

Таблица 9.

Параметры технологического ускорителя на энергию 10 МэВ.

Энергия пучка	10 МэВ
Импульсный ток	430 мА
Средняя мощность пучка	15 кВт
Рабочая частота	2856 МГц
Импульсная мощность клистрона	6 МВт
Средняя мощность клистрона	25 кВт
Полный КПД	20%
Ширина развертки	5 x 80 см
Размеры ускорителя	510 x 1100 x 2600 мм

Отличительными особенностями ускорителя является высокий КПД, компактность, простота эксплуатации, обусловленная выбором схемы СВЧ питания. Ускоритель может использоваться для стерилизации медицинского оборудования и препаратов, модификации свойств материалов, создания новых материалов.



(а)



(б)

Рисунок 32. Ускоряющая структура двухстороннего микротрона МАМІ-С (а), стенд для испытаний на высоком уровне мощности (б).

Помимо разработки и сооружения ускорителей, одним из направлений деятельности отдела по ускорительной тематике является создание отдельных систем ускорителей. Так, в рамках контракта с

Институтом ядерной физики университета г. Майнц в НИИЯФ МГУ была произведена разработка и изготовление ускоряющих структур для проекта двухстороннего микротрона МАМИ-С. Для тренировки и испытаний ускоряющих структур на высоком уровне мощности был создан специальный стенд. Фотографии ускоряющей структуры и стенда показаны на Рис. 32(а) и (б).

На Рис. 33 показана зависимость резонансной частоты одной из секций ускоряющей структуры от уровня СВЧ потерь в стенках.

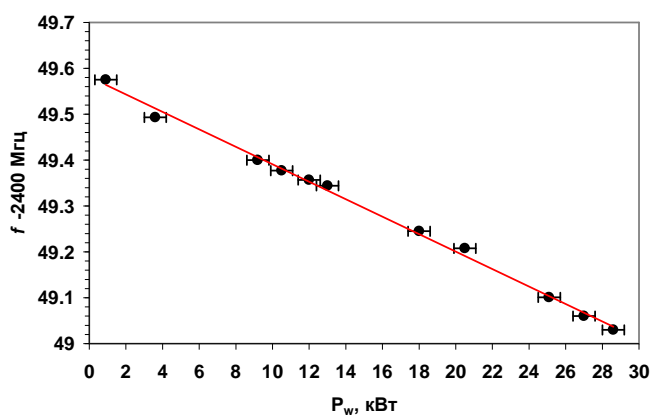


Рисунок 33. Зависимость резонансной частоты от уровня СВЧ потерь в стенках ускоряющей структуры.

Подводя итоги, следует отметить, что появление первого ускорителя электронов в НИИЯФ МГУ около 50 лет назад привело к развитию нового для института направления работ, связанного с созданием ускорителей электронов для фундаментальных исследований и прикладных целей.

По результатам научных исследований на электронных ускорителях НИИЯФ МГУ было защищено 8 докторских диссертаций – В.Г.Шевченко, Б.С.Ишханов, И.М.Капитонов, В.К.Гришин, В.И.Шведунов, Н.Г.Гончарова, А.П.Черняев, В.В.Варламов, и свыше 40 кандидатских диссертаций. Студентами выполнено свыше 200 дипломных работ.

Борис Саркисович Ишханов¹
Василий Иванович Шведунов²

¹Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 119992, Москва, Ленинские горы
²Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, 119992, Москва, Ленинские горы

УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ И ФИЗИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В НИИЯФ МГУ

Препринт НИИЯФ МГУ – 2008 – 5/841

Работа поступила в ОНТИ 28 апреля 2008 г.