

ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ЦИКЛОТРОНЕ P-7 УРАЛЬСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА

В. Ю. Иванов, А. В. Кружалов, Ф. Г. Нешов, Г. И. Сметанин

*Уральский федеральный университет им. первого Президента России
Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия*

В 2022 г. в УрФУ в Физико-технологическом институте сдан в эксплуатацию Циклотронный центр ядерной медицины. Первый уральский циклотрон P-7, успешно отслуживший науке более 50 лет, был демонтирован, и его место занял новый современный ускоритель. В настоящей статье кратко изложена история первого уральского циклотрона – циклотрона УПИ, его роль в подготовке кадров высшей квалификации, проведении фундаментальных и прикладных научных исследований. Особое внимание уделено разработке физических основ экспериментального исследования состава и структуры материалов под воздействием ускоренных многозарядных ионов.

Ключевые слова: циклотрон, многозарядные ионы, эффект теней, ориентационные эффекты, дефектообразование, радиационное стимулирование, коррозия, полимеры.

1. Период становления

В 1950 г. для физико-технического факультета началось строительство специального учебно-лабораторного корпуса (5-й учебный корпус), который вошел в строй в 1953 г. Окончательно строительство корпуса завершилось пристройкой Т-образной части корпуса в 1959 г. с общей площадью 16 564 м², из которых для кафедры № 24 (ныне кафедра экспериментальной физики), вместе с научно-исследовательской электрофизической лабораторией (НИЭФЛ), предназначалось более 4 000 м². НИЭФЛ образована постановлением Совмина СССР в 1955 г. [1]. Предполагалось оснастить лабораторию самым современным комплексом ядерно-физических установок, призванным решать следующие задачи: обучение студентов на уникальном оборудовании, проведение научно-исследовательских работ и выпуск радиоизотопной продукции для Уральского региона. В комплекс входили: 120-сантиметровый циклотрон P-7, электростатический генератор ЭГ-2.5, два бетатрона – ускорители электронов – с энергиями 5 и 15 МэВ. Предполагалось оснащение лаборатории также исследовательским ядерным реактором ИРТ-1000. Однако санитарные власти города в лице главного санитарного врача А. Н. Ощепковой и главного радиолога С. И. Трейгера сделали всё, чтобы «адской машины» не было не только в черте города, но и в пределах 30-километровой зоны.

Ускорительная техника монтировалась в Т-образной части корпуса. К концу 1962 г. формально она была сдана в эксплуатацию. Состояние дел на ускорителях до середины 60-х гг. можно охарактеризовать следующим образом. В нормальном режиме работал только бетатрон. На электростатическом генераторе, способном ускорять как тяжелые заряженные частицы (протоны, дейтоны, ионы гелия), так и

электроны, был освоен режим ускорения протонов до энергии 800 кэВ, поскольку из-за ограниченной высоты помещения ускорителя были серьезные проблемы с установкой защитного котла для работы ускорителя в среде элегаза. Предельная величина ускоряющего напряжения определялась утечкой зарядов за счет ионизации воздуха, т. е. в прямом смысле процесс ускорения зависел от погоды.

В значительно более сложном положении находился циклотрон, предназначенный для ускорения протонов 6,7 МэВ, дейтонов 13,4 МэВ и альфа-частиц 27 МэВ. Ускоритель на порядок более сложный в конструкции и в эксплуатации, требующий специалистов-инженеров в области радиотехнических устройств большой мощности, электриков, вакуумщиков, инженеров-механиков, дозиметристов и др. Общая установленная электрическая мощность ускорителя составляла 900 кВт. Для обслуживания циклотрона было выделено 30 единиц учебно-вспомогательного персонала. Ставки персонала были в 1,5–2 раза ниже аналогичных ставок в научно-исследовательских институтах, в промышленности, поэтому привлечь специалистов требуемого профиля было проблематично. К сожалению, далеки от совершенства были некоторые узлы и агрегаты циклотрона, что приводило к нестабильной работе ускорителя и частым простоям. Немаловажным фактором являлось отсутствие научных перспектив вследствие ненадлежащего научного руководства. Действительно, ни в УПИ, ни в УрГУ, ни в УФАНе специалистов в области ядерной физики не было.

Здесь уместно провести сравнение с аналогичной ситуацией на циклотроне МС Курчатовского института. Он сооружался для получения оружейного плутония и вступил в строй в конце 1947 г. Но к этому времени существовал уже более мощный источник нейтронов – реактор Ф-1, и получение плутония было организовано на нем. Циклотрону нужно было искать новые области применения. Коллектив циклотрона в течение 1948–1951 гг. занимался совершенствованием самого ускорителя, повышалась надежность его работы, увеличивалась интенсивность пучка за счет совершенствования отдельных узлов и агрегатов, проводились работы по выводу пучка из ускорительной камеры и транспортировке в защищенное от фона ускорителя помещение. К концу 1951 г. руководству Курчатовского института стало ясно, что в тематике работ на циклотроне наступил кризис. Без научных перспектив совершенствование ускорителя не имело смысла. Приглашенный из Ленинграда Н. А. Власов предложил начать программу исследований прямых ядерных реакций на легких ядрах, а Г. Н. Флёров приступил к работам по синтезу сверхтяжелых элементов. Эти работы обеспечили длительную перспективу значимых научных исследований [2].

Однако вернемся к проблеме создания циклотронной лаборатории УПИ. С 1951 г. кафедрой № 24 возглавлял кандидат технических наук Валентин Георгиевич Степанов, направленный с энергофака на эту должность руководством УПИ. С присущей ему кипучей энергией он активно включился в процесс создания НИЭФЛ. Шесть лет заведования В. Г. Степановым кафедрой № 24 явились важным историческим этапом развития не только кафедры, но и всего физико-технического факультета (достраивается корпус электрофизических установок, пробивается специальное постановление Совета министров СССР о создании в УПИ им. С. М. Кирова научно-исследовательской электрофизической лаборатории, организуется поставка ускорительной техники и ее монтаж). Однако научные перспективы были далекими и расплывчатыми. В. Г. Степанов был полностью погружен в решения учебных и организационно-научных проблем. Кроме того, ректор УПИ А. С. Качко в мае 1951 г. поручил ему создание радиотехнического факультета [1]. Три года (1952–1955) доцент В. Г. Степанов совмещал должности заведующего кафедрой № 24 и первого декана радиофака УПИ.

Отсутствие научной школы на кафедре, неукомплектованность кадрами, слабое внимание со стороны заведующего кафедрой вопросам электроники и автоматики – вот неполный перечень претензий руководства факультета к В. Г. Степанову. В январе 1959 г. он переводится в Институт физики металлов УФАНа. В этом же году по рекомендации Свердловского обкома КПСС заведующим кафедрой № 24 был избран заместитель начальника ЦЗЛ одного из закрытых предприятий Урала (ныне г. Лесной) к. ф.-м. н. Филипп Филиппович Гаврилов. За 20 лет заведования кафедрой ему удалось сформировать крупный, работоспособный, творческий коллектив преподавателей, научных работников, инженеров и техников.

В апреле 1960 г. был подписан акт о сдаче в эксплуатацию циклофазотронной установки с энергией дейтронов 13,5 МэВ в циклотронном варианте и с энергией протонов 21 МэВ в фазотронном варианте [3]. Тем не менее с момента сдачи в эксплуатацию и вплоть до 1967 г. устойчивой работы циклотрона добиться не удавалось. Сотрудникам приходилось много учиться и перенимать опыт на других циклотронах страны. За эти годы был выполнен огромный объем работы по наладке и модернизации многих узлов и систем ускорителя. Вот неполный перечень важнейших научно-технических разработок:

- вместо неэффективного источника ионов открытого типа был разработан и изготовлен источник ионов с закрытой разрядной камерой, щелевой диафрагмой и катодом прямого накала;
- разработана новая система вывода пучка из ускорительной камеры – гиперболический дефлектор и перевод его с радиуса 52,5 на 53,5 см. Это позволило снизить напряжение вывода с 60 до 50 кВ, что в свою очередь значительно снизило время тренировки дефлектора до выхода на рабочий режим, частоту электрических пробоев, т. е. прерывание режима ускорения;
- исследована топография магнитного поля СП-44, внесены коррективы в его формирование, с помощью шиммирования было обеспечено центрирование конечной траектории и вертикальной фокусировки ускоряемых частиц;
- проведен капитальный ремонт ВЧ-генератора и перевод его на современные генераторные лампы;
- осуществлен монтаж ионопровода от выходного фланца ускорительной камеры до поворотного магнита с установкой магнитных линз, вакуумными системами откачки, камерами для наблюдения и измерения пучка, а также стыковка его после поворотного магнита с комплектной экспериментальной камерой «Д».

Благодаря этому на пучке циклотрона были начаты научные исследования:

- отработана методика получения изотопов натрия-22, ванадия-48, марганца-52, кобальта-57. Аспирантка А. С. Жуковская разработала технологию их выделения из циклотронных мишеней. Ею показано, что сечение генерации указанных изотопов при энергиях дейтронов циклотрона Р-7 так мало, что производство их не вполне рентабельно. В 1968 г. А. С. Жуковская успешно защитила кандидатскую диссертацию, первую выполненную на циклотроне УПИ;
- совместно с МВТУ им. Баумана был освоен метод поверхностной активации для контроля износа режущего инструмента. Он оказался наиболее эффективен для контроля износа твердосплавного режущего инструмента марок Т15К6 и ВК-8. Было установлено, что при облучении Т15К6 образуется практически чистый ванадий-48 (период полураспада $T_{1/2}$ –16 суток, E_{γ} = 985 кэВ), а у ВК-8 генерируется марганец-54 ($T_{1/2}$ –291 суток, E_{γ} = 1435 кэВ);

- для радиозавода (г. Каменск-Уральский) выполнено исследование стойкости изоляторов радиочастотных элементов при облучении протонами с энергией 6,7 МэВ. Определена их значимая деградация при флюенсах $> 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

Первым начальником циклотрона был назначен старший инженер Георгий Викторович Хрустальков, выпускник физтеха, участник ВОВ, стрелок-радист дальнего бомбардировщика В-25 американского производства. Штаты комплектовались выпускниками физтеха, энергофака, радиофака, студентами-вечерниками, заочниками, учащимися подготовительных курсов. Этому способствовало предоставление мест в общежитиях УПИ. Сложнее было с кадрами высшей квалификации. Поступившие в аспирантуру по циклотронной тематике Г. Ф. Гриднев и Е. Н. Панков окончили ее без представления диссертаций и без перспективы успешной защиты в будущем, что вынудило их сменить место работы. Попытка подготовки научных работников в области ядерной физики в ведущих научных центрах страны также потерпела неудачу. Направленные в целевую аспирантуру в Москву и Дубну К. В. Шитикова, Э. В. Бугаев и Е. Л. Ядровский по окончании учебы не вернулись.

Иначе сложилась судьба целевого аспиранта А. А. Пузанова. В 1963 г. он был направлен для выполнения диссертационной работы в научно-исследовательский институт ядерной физики Московского государственного университета (НИИ ЯФ МГУ). Именно в этом году коллективом, к которому был прикомандирован уральский аспирант, было открыто новое уникальное физическое явление – эффект теней. Эффект был ранее предсказан А. Ф. Тулиновым [4]. Если заряженная частица вылетает из атома, находящегося в узле кристаллической решетки, то она не может двигаться в направлении этой цепочки – в этом направлении должна наблюдаться тень. Эксперимент, специально и целенаправленно поставленный на циклотроне, подтвердил это предсказанное явление. В угловом распределении упруго рассеянных протонов на монокристалле вольфрама вблизи оси $\langle 111 \rangle$ было обнаружено трехкратное уменьшение выхода протонов. После обнаружения этого эффекта на всех ускорителях НИИ ЯФ МГУ были созданы экспериментальные установки для исследования эффекта теней и использования его для решения прикладных задач.

Два иногородних аспиранта Арий Пузанов с Урала и Бэла Ахметова из Казахстана пытались зарегистрировать эффект теней в широком угловом диапазоне с помощью фотопластинок. Эксперимент проводился на каскадном генераторе при энергии протонов 400 кэВ на монокристалле вольфрама. Они получили первую протонограмму, немало удивив А. Ф. Тулинова тем, что тени наблюдаются не только в направлении кристаллографических осей, но и плоскостей. Это было принципиально важно! В итоге они полноправно были включены в состав коллектива, удостоенного Государственной премии СССР в области науки и техники 1972 г. «За открытие и исследование эффекта теней в ядерных реакциях на монокристаллах».

По возвращении на кафедру А. А. Пузанов был назначен начальником электрофизической лаборатории. Для консультаций был приглашен его научный руководитель профессор МГУ Анатолий Филиппович Тулинов. Ознакомившись с состоянием дел на электростатическом генераторе и циклотроне, он рекомендовал руководству кафедры заняться изучением эффектов каналирования и теней, обещая при этом не только научное руководство работами, но и материальную поддержку. В качестве начального этапа он предложил исследовать влияние температуры кристалла (т. е. амплитуды колебания атомов) на параметры эффекта теней, а в качестве объекта предложил монокристалл висмута. В отличие от монокристалла вольфрама, самого тугоплавкого из металлов ($T_{пл} = 3422 \text{ }^\circ\text{C}$), на котором был

открыт эффект теней, висмут имеет довольно низкую температуру плавления ($271,4^{\circ}\text{C}$), т. е. в нормальных условиях имеет достаточно высокую амплитуду колебаний атомов в решетке. Поскольку угловые размеры теней пропорциональны заряду ядра (порядковый номер висмута 83), тени должны быть довольно значительны, соизмеримы с вольфрамовыми.

По нашему заказу экспериментальная камера для ЭГ-2,5 была изготовлена в Москве. Для материальной поддержки экспериментаторов по инициативе Анатолия Филипповича был заключен хозяйственный договор между НИИ ЯФ МГУ и НИЭФЛ УПИ. Исследования эффекта теней на висмуте, выполненные В. Н. Багаевым при температурах от 300 до 150 К, оказались настолько значимыми, что статья В. Н. Багаева, Ф. Г. Нешова, А. А. Пузанова и А. Ф. Тулинова «Аномальные угловые характеристики теней на протонограммах висмута» была принята к публикации в самом престижном физическом журнале страны – «Журнале экспериментальной и теоретической физики» [5].

2. Исследования ориентационных эффектов

Большим стимулом последующей успешной работы НИЭФЛ явилось Постановление Госкомитета СССР по науке и технике № 182 от 14 мая 1969 г. о проведении НИР «Исследование радиационных дефектов в кристаллах с помощью эффекта теней», лоббистом которого был А. Ф. Тулинов. Под эту работу было выделено 35 штатных единиц с соответствующим фондом заработной платы, что увеличило объем финансирования и штаты лаборатории примерно в 2 раза. Важным этапом развития НИЭФЛ также явился Приказ по Министерству высшего и среднего специального образования РСФСР от 18 октября 1971 г. о присвоении НИЭФЛ категории по оплате труда, что позволило ввести в ее штат старших и младших научных сотрудников.

В этот период Анатолий Филиппович предложил исследовать на циклотроне ориентационные эффекты на многозарядных ионах – область пока малоизученная. После годичной стажировки на циклотроне НИИ ЯФ МГУ в 1969 г. тематика изучения ориентационных эффектов на многозарядных ионах была поручена аспиранту Ф. Г. Нешову. Для исследования ориентационных эффектов на многозарядных ионах на одном из каналов нашего циклотрона была создана специальная экспериментальная установка, ионопровод которой был укомплектован элементами для формирования, наблюдения и измерения тока пучка ионов с угловой расходимостью не хуже $0,05^{\circ}$. Ионопровод проектировался Г. И. Сметаниным и Ф. Г. Нешовым, изготавливался в мастерской кафедры экспериментальной физики. Мониторная камера и камера рассеяния были спроектированы аспирантом Ф. Г. Нешовым и изготовлены в Свердловском НИИХиммаш. Монокристаллические мишени крепились на гониометре, который позволял вращать их вокруг трех взаимоперпендикулярных осей. По двум осям вращение осуществлялось дистанционно с шагом $0,01^{\circ}$. Значительные радиационные повреждения, создаваемые ионами, требовали частой смены облучаемого участка без нарушения его ориентации. Для этой цели на гониометре было предусмотрено устройство для трансляционного перемещения мишени под пучком.

В экспериментах по ориентационным эффектам получил широкое распространение способ мониторинга пучка частиц, рассеянных мишенью, периодически перекрывающей пучок частиц. На ускорителях непрерывного действия прерывание осуществляется диском с лопастями, вращающимися синхронным двигателем с большой угловой скоростью. Подобная система не могла быть применена на ускорителе с переменной частотой и скважностью ускорения, каковым является циклотрон. Г. Д. Ведьмановым был разработан прерыватель на основе

магнитной системы электродинамического громкоговорителя, приспособленного для работы в условиях высокого вакуума.

Подвижный элемент системы с двухкомпонентной мишенью перекрывает траекторию пучка в течение 3 мс в момент отсутствия цикла ускорения. Двухкомпонентная мишень представляла собой тонкий слой золота (300 мкг/см^2), напыленного на подложку из алюминиевой фольги, закрепленной на заслонку прерывателя. Частицы, рассеянные мишенью на угол 135° , регистрировались поверхностно-барьерным детектором фирмы «Изотоп». Импульсы детектора после усиления поступали на дифференциальный дискриминатор, который из всего спектра вырезал участок, соответствующий импульсам от ионов, рассеянных на золоте. Градуировка монитора осуществлялась путем измерения тока пучка ионов, прошедших систему мониторинга, цилиндром Фарадея, размещенным в камере рассеяния. Разработанная система мониторинга докладывалась на V Всесоюзном совещании по физике взаимодействия заряженных частиц с монокристаллами (Москва, 1974 г.) Энергетический спектр обратнорассеянных ионов измерялся с помощью поверхностно-барьерного детектора, изготовленного в НИИ ЯФ МГУ, зарядочувствительного усилителя и амплитудного анализатора импульсов производства Венгрии NTA-1024. Изучение ориентационных эффектов проводилось на наиболее совершенных монокристаллах кремния, германия и вольфрама. Исследования проводились аспирантом Ф. Г. Нешовым, инженером Г. Д. Ведьмановым, дипломником В. П. Шубиным. В результате удалось проверить один из фундаментальных постулатов ориентационных эффектов – правило обратимости.

Сформулированное Линдхардом правило утверждает, что если вне кристалла найдено угловое распределение частиц, эмитированных цепочками атомных ядер в кристалле, то тем самым получена вероятность попадания в эти ядра внешнего пучка частиц. Экспериментально правило обратимости проверялось с использованием упругого рассеяния протонов на монокристаллах вольфрама, кремния и германия. Было показано, что для тонкого поверхностного слоя параметры, характеризующие прямую и обратные тени, совпадают. Экспериментальной проверки обратимости при рассеянии многозарядных ионов не проводилось. Однако именно в этом случае имеется ряд моментов, которые могут повлиять на выполнение правила обратимости. Прежде всего, это очевидный кинематический фактор – прямая тень формируется на меньшей энергии: при рассеянии ионов азота на угол 135° на вольфраме – это потеря 24 % энергии. Более сложный фактор – это наличие у движущегося иона некоторого количества электронов. Эффективный заряд иона при каналировании и формировании прямой тени может оказаться разным. Наши измерения показали, что различия прямой и обратной тени определяются только кинематическим фактором.

В результате большого цикла исследований эффекта каналирования ионов азота с энергией 7,4 МэВ на основных осях и плоскостях монокристаллов кремния, германия и вольфрама был получен нетривиальный результат. Согласно В. С. Николаеву [6], ион азота с энергией порядка 0,5 МэВ/нуклон при движении в бесструктурном твердом теле имеет равновесный заряд, равный +5. Из наших измерений следовало, что критический угол каналирования и минимальный выход рассеяния при совмещении направления падения пучка ионов и кристаллографических осей и плоскостей кристалла формируется при заряде ионов азота, равном +7. Скорость деканалирования ионов, движущихся по каналу, определяется зарядом +5. В последующем экспериментальные исследования эффекта каналирования были значительно расширены. Изучены основные параметры каналирования ионов азота и углерода с энергией 0,5–0,8 МэВ/нуклон как на одноатомных, так и на двух- и трехатомных кристаллах, их зависимость от

глубины проникновения. По результатам этих исследований защищены кандидатские диссертации Ф. Г. Нешовым (1975 г.), В. Я. Смирновым (1975 г.) и Г. Д. Ведьмановым (1978 г.).

Параллельно с экспериментальными работами велись и серьезные теоретические исследования группой НИЭФЛ во главе с А. Р. Урмановым. На основе метода микроскопической фазовой плотности получено обобщенное кинетическое уравнение, описывающее процесс деканализирования быстрых заряженных частиц как в одноатомных, так и в многоатомных кристаллах. Исследовано влияние корреляции тепловых колебаний атомов мишени на деканализирование ионов в рамках разработанной модели торможения ионов в твердом теле, изучены потери энергии каналированных ионов. Полученные результаты опровергают общепринятое правило равномерного распределения Бора, предполагающее равенство вкладов в сечение торможения далеких и близких столкновений. Теоретически и экспериментально исследованы особенности деканализирования различных ионов в многоатомных кристаллах. Показана возможность исследования методом каналирования различных подрешеток сложных монокристаллов, в т. ч. и высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). Результатом теоретических исследований стала защита А. Р. Урмановым кандидатской диссертации (1979 г.), а затем и докторской (1994 г.), и В. Г. Григорьевым кандидатской диссертации (1988 г.).

3. Разработка физических основ экспериментального исследования состава и структуры твердого тела при воздействии ускоренных ионов

Приступая к изучению ориентационных эффектов на многозарядных ионах, мы обнаружили, что по такой важнейшей характеристике взаимодействия ионов с твердым телом, как удельные потери энергии, сведения носят отрывочный, разрозненный характер, а в диапазоне порядка 0,5 МэВ/нуклон они большей частью отсутствуют. В это время существенные успехи были достигнуты в области спектрометрии тяжелых заряженных частиц. Энергетическое разрешение для α -частиц составило единицы кэВ, для ионов азота – не более 50 кэВ. Во многих лабораториях активно разрабатывался метод исследования твердотельных образцов, основанный на регистрации энергетических спектров обратного рассеяния (ЭСОР) ионов. В этом плане пионерской работой необходимо назвать работу московской группы [7]. Они впервые описали форму спектра обратного рассеяния протонов от тяжелых элементов и сделали вывод о том, что из спектров обратного рассеяния могут быть получены данные об удельных потерях энергии как непрерывной функции энергии. Позже [8] нами совместно с московской группой эта методика была применена для определения энергетических потерь ионов азота в никеле, серебре и золоте в диапазоне 1÷7 МэВ, для которых частично имелись экспериментальные данные, а также в титане, германии и вольфраме, для которых данные полностью отсутствовали. Эксперименты проводились на циклотроне УПИ, расчеты были выполнены К. С. Шишкиным. Было показано, что полуэмпирические табличные данные Нортклиффа и Шиллинга [9] о потерях энергии многозарядными ионами в некоторых случаях имеют расхождения с экспериментальными данными до 40 %.

В дальнейшем теоргруппой НИЭФЛ была проведена систематическая работа по учету различных факторов, влияющих как на форму энергетического спектра рассеянных ионов, так и на его амплитуду. Было учтено влияние многократного рассеяния, изменение эффективного заряда иона по мере его замедления и энергетического страглинга. Далее метод был обобщен на случай многокомпонентной мишени. Учет факторов, влияющих на форму ЭСОП, позволил

описывать их с точностью не хуже 2 %. Достаточно высокая точность измерения ЭСОР от «толстых» мишеней позволила извлекать информацию о тормозной способности вещества. Термин «толстая» означает, что толщина мишени превышает полупробег иона в веществе. Этим способом были определены потери энергии ионов азота и углерода в диапазоне 1–8 МэВ в титане, германии, вольфраме, арсениде галлия, экспериментальные данные для которых полностью отсутствовали.

Для подтверждения так называемых Z_2 колебаний тормозной способности элементов были проведены измерения в ряду химических элементов с номерами 22÷32 (от титана до германия). Было показано, что в энергетическом диапазоне 0,2÷0,8 МэВ/нуклон атомное сечение торможения не увеличивается, а падает и начинает возрастать после меди. Этот эффект связан с тем, что движущийся ион в основном теряет энергию на возбуждение электронной подсистемы твердого тела. Для иона с указанной энергией большая часть электронов не является свободной. В этом случае передача энергии от иона связанному электрону значительно ниже, нежели свободному. По этой причине, несмотря на увеличение числа электронов с увеличением номера элемента, возрастает и энергия связи, которая в этом случае обуславливает конкурирующий эффект в итоговом сечении торможения. Был предложен эксперимент, в котором вклад энергии связи электронов в сечение торможения мог быть выделен в чистом виде. В 1984 г. совместно с московской группой был проведен эксперимент на каскадном генераторе КГ-500 НИИ ЯФ МГУ при энергии протонов 200 кэВ по определению тормозной способности пиролитического графита и алмаза. Электросопротивления этих материалов отличаются на 18 порядков, т. е. свободных электронов в алмазе практически нет. Показано, что тормозная способность алмаза на 30 % ниже, нежели графита [10]. В 2006 г. испанская группа качественно подтвердила наш результат на алмазоподобных тонких пленках в сравнении с графитом, стеклоуглеродом и фуллереном [11].

На основе фундаментальных исследований по физике взаимодействия многозарядных ионов с поли- и монокристаллическими мишенями был разработан и поставлен на циклотроне комплекс ядерно-физических методов, позволяющих получать принципиально новую информацию о структуре твердого тела, модификации его свойств. Важным прикладным аспектом эффекта каналирования является практически безальтернативный метод прямого определения местоположения примесных атомов в кристаллической решетке. Так, для НИИ «Салют» с помощью ионов азота было определено местоположение имплантированного кадмия в арсенид галлия. С нашей помощью отработана технология отжига дефектов и перевод атомов кадмия из междоузельного положения в положение замещения, при котором существенно изменяются электроактивные свойства примеси. С использованием ионов углерода с энергией 8 МэВ было определено количество ионов хрома, входящих в монокристалл искусственного изумруда ($\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$), при его выращивании раствор-расплавным способом. Найдено, что концентрация хрома в пределах исследуемой глубины 0,6 мкм постоянна и равна среднему значению содержания хрома в образце, что указывает на равномерное распределение примесных атомов по всему образцу. Спектры ЭСОР, измеренные при каналировании в оси [0001], указывают на пятикратное уменьшение выхода, аналогичное уменьшению выхода рассеяния от матрицы. Это позволило сделать вывод о том, что атомы хрома входят в регулярные узлы гексагональной решетки берилла. Однако недостаточное энергетическое разрешение спектрометра не позволило различить ионы, рассеянные на алюминии и кремнии. Это обстоятельство, к сожалению, не дало однозначного ответа на важнейший вопрос: какой из этих двух ионов замещает ион хрома Cr^{3+} в

изумруде [12].

Таким образом, созданная специальная экспериментальная установка по изучению ориентационных эффектов на многозарядных ионах, выполненный огромный цикл экспериментальных и теоретических исследований, полученные уникальные фундаментальные и прикладные научные результаты свидетельствуют о создании на циклотроне УПИ нового научного направления и высокопрофессионального творческого коллектива.

В последующие годы, особенно после коренной модернизации циклотрона, идеология и опыт этого коллектива успешно были применены для решения других научных задач. По результатам выполненных исследований Т. А. Белых защитила кандидатскую диссертацию (1994 г.).

4. Рассеяние быстрых ионов в газовых мишенях

Интерес к ускорению многозарядных ионов на нашем циклотроне проявил и профессор МГУ Валентин Сергеевич Николаев. Он изучал процессы перезарядки ионов при прохождении через различные газовые среды на 72-сантиметровом циклотроне НИИ ЯФ МГУ и был очень заинтересован в ионах более высоких энергий, которые могли быть получены на 120-сантиметровом циклотроне Р-7. В 1968 г. на эту тематику был сориентирован аспирант Ю. С. Володягин. Возглавляемой Ю. С. Володягиным группой была спроектирована и изготовлена масс-спектрометрическая установка с комплексом радиоэлектронной аппаратуры, позволяющая производить измерения зарядового состава ионных пучков, прошедших через газообразные мишени различной толщины, и определять сечения потери и захвата одного и двух электронов ионами азота и неона с различными зарядами.

Был выполнен большой объем исследований при скорости ионов $1 \cdot 10^7$ м/с (0,5 МэВ/нуклон) в гелии, азоте, неоне и аргоне. Обнаружена немонотонная зависимость сечений потери и захвата электронов, среднего заряда и полуширины равновесного зарядового распределения от атомного номера среды, обусловленная особенностями структуры внешней электронной оболочки атомов. Показано, что при данной энергии ионов решающее влияние на величину сечений потери электрона имеет энергия связи электрона в ионе. Результаты этих исследований докладывались на V Всесоюзной (Ужгород, 1972) и VIII Международной (Белград, 1973) конференциях по физике электронных и атомных столкновений. В 1974 г. Ю. С. Володягиным была успешно защищена диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Позже, когда в середине 70-х гг. возникла стратегическая задача исследовать нейтрализацию отрицательных ионов водорода с энергиями более единиц МэВ в газовых средах, НИЭФЛ оказалась наиболее подготовленной в СССР для решения этих задач.

В конце 1976 г. Минвузом РСФСР, во исполнение постановления ЦК КПСС и СМ СССР, было приказано выполнить НИР по изучению процессов перезарядки быстрых отрицательных ионов водорода на циклотроне УПИ. Необходимость ускорения отрицательных ионов водорода в диапазоне 5-15 МэВ потребовало существенной модернизации всего комплекса ускорителя. Работы по реконструкции проводились в течение 1978–1980 гг.

Существенной переделке подверглись: система формирования спада магнитного поля по радиусу от центра к периферии (с помощью пяти дополнительных обмоток) в диапазоне 0,2–1,5 Тл; система перестройки высокочастотной системы (расширена до 16 МГц); за счет установки дополнительно четырех вакуумных агрегатов улучшен вакуум в циклотроне от $1 \cdot 10^{-5}$ до

$5 \cdot 10^{-7}$ мм.рт.ст.; реконструированы фидерные линии, ионный источник, дефлектор и другие узлы оборудования циклотрона.

Реконструкция циклотрона позволила ускорять положительные и отрицательные ионы водорода (^1H) в диапазоне от 0,6–1,6 и 5–15 МэВ и ионы гелия-3 ($^3\text{He}^{2+}$) от 14 до 36 МэВ, что ранее было невозможно. Кроме того, удалось значительно расширить ассортимент ускоряемых тяжелых ионов и осуществлять варьирование их энергии.

Как следовало из теоретических исследований, расходимость пучка ионов водорода с энергией 1–15 МэВ при нейтрализации в тонких мишенях характеризуется углами порядка 10^{-5} – 10^{-6} радиан. Поэтому измерительная установка должна была иметь параметры: расстояние 10 м от входного коллиматора ионопровода до мишени и 10 м от перезарядной мишени до регистратора. Поперечный размер ионного пучка составляет доли миллиметра, поэтому измерение его структуры требует регистратора с разрешением в несколько микрометров. Для исключения рассеяния ионного пучка на остаточном газе в ионопроводе вакуум в нем должен быть не хуже чем 10^{-6} мм.рт.ст. Это потребовало весь ионопровод изготавливать из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, собирать секции с использованием медных прокладок и обезгаживать путем прогрева до температуры 400 °С. Реконструкция циклотрона потребовала изготовления многих узлов и деталей в мастерских экспериментального производственного комбината УПИ и в механической мастерской кафедры экспериментальной физики. Были изготовлены все детали участков ионопровода, и проведена его сборка от камеры магнита СП-45 до камеры столкновений и далее до камеры измерения. Это позволило начать исследование на год раньше, не дожидаясь изготовления участков ионопровода на заводе Свердловский химического машиностроения. Позднее там были изготовлены участки с электрополировкой внутренней поверхности деталей ионопровода, которыми в дальнейшем были заменены участки высоковакуумного ионопровода. На других свердловских заводах были созданы элементы системы прогрева ионопровода, щиты электропитания и другое оборудование для ионопровода. Откачка ионопровода осуществлялась магнитоэлектрическими насосами НМДО-0,25, а газовых мишеней – диффузионными насосами по схеме дифференциальной откачки. Все участки ионопровода обеспечивались магнитной экранировкой. Первые измерения перезарядки пучков отрицательных ионов водорода в нейтральные атомы были выполнены с использованием самой простой методики – регистрации разделенных фракций пучка с помощью фотопластинок и визуального подсчета количества треков под микроскопом. В дальнейшем исследовательский ионопровод был оснащен новой электронной системой управления пучком и измерения его профиля, что позволило автоматизировать измерения и повысить их точность.

В результате модернизации появилась возможность плавного изменения энергии ускоряемых частиц в широких пределах, значительно увеличен ассортимент ускоряемых ионов. Для проведения экспериментальных исследований по изучению рассеяния быстрых ионов в газовых мишенях была создана установка с уникальными параметрами. На установке проведены исследования нейтрализации ионов H^- в газовой мишени, в которую через микронатекатель подавался необходимый газ с нужными параметрами (He, Ar, Kr, Xe, N_2 , O_2 , CO_2). После взаимодействия с мишенью в пучке присутствуют быстрые частицы H^- , H^0 , H^+ . Пространственное распределение пучка на отдельные зарядовые компоненты проводилось в поле электрического дефлектора. Частицы регистрировались кремниевым поверхностно-барьерным детектором. Исследования проводились в течение 1981–1986 гг. Правительственное задание было выполнено: создан экспериментальный комплекс и получены уникальные данные о параметрах рассеяния пучков отрицательных ионов водорода и нейтральных атомов в

энергетическом диапазоне 1–15 МэВ. После снятия с тематики грифа секретности результаты исследований были опубликованы в большом цикле статей [13–16], в том числе и в иностранных научных журналах [17]. По результатам исследований В. И. Радченко защитил в 1984 г. кандидатскую диссертацию, в 1996 г. докторскую, а К. О. Хохлов защитил в 1998 г. кандидатскую диссертацию.

80-е гг. – это годы признания достижений коллектива циклотрона. По рекомендации Научного Совета АН СССР по приложению методов ядерной физики в смежных областях в 1982 г. в Уральском политехническом институте был проведен Всесоюзный семинар «Реконструкция и модернизация 120-см циклотронов». Об опыте реконструкции 120-см циклотронов совместно с сотрудниками НИИЯФ МГУ был сделан доклад в 1985 г. на международном совещании в Чехословакии.

С 1982 г. на циклотроне проводятся исследования рассеяния протонов и ионов H^+ в тонких аморфных пленках, а также в мишени из паров калия; явлений перезарядки многозарядных ионов при прохождении различных газообразных сред; угловые распределения протонов после сквозного прохождения тонких монокристаллических пленок Si в режимах осевого и плоскостного каналирования (Г. Д. Ведьманов, В. И. Радченко, Ю. Г. Лазарев, К. О. Хохлов). Проводятся исследования деканалирования и торможения различных ионов в монокристаллических мишенях с использованием регистрации обратного резерфордского рассеяния и характеристического рентгеновского излучения, структуры и состава многокомпонентных монокристаллов и пленок, радиационных повреждений, создаваемых в них различными ионами, и формирования глубоко залегающих слоев Si_xN_y с помощью пучка ионов азота. Исследования проводятся под руководством к. ф-м. н. Л. А. Казак.

С 1988 г. в соответствии с «Государственной программой фундаментальных исследований в области высокотемпературной сверхпроводимости» выполняются исследования кристаллической и электронной структуры высокотемпературных сверхпроводников под руководством к. ф-м. н. Т. М. Пятковой.

В 1991 г. С. И. Бажуков защитил кандидатскую диссертацию по теме «Влияние электронной структуры твердого тела на торможение быстрых заряженных частиц».

Радионуклидные методы диагностики стали широко применяться в СССР для выявления на ранних стадиях онкологических, сердечно-сосудистых, эндокринных и других заболеваний. Для этих целей использовались различные радионуклиды, важнейшими из которых являются такие циклотронные изотопы, как таллий-201, йод-123, галлий-67 и индий-111. В частности, учеными из Томского политехнического университета (ТПУ) был предложен и реализован способ получения аналога таллия-201 ($T_{1/2} = 73$ час) – таллия-199 ($T_{1/2} = 7,4$ час) с периодом полураспада практически в 10 раз меньше, что приводит к существенному снижению дозовой нагрузки на организм человека. С этой целью в научно-исследовательском институте ядерной физики (НИИЯФ) ТПУ были разработаны оригинальные мишени и облучательное устройство, обеспечивающее вращение мишени в процессе облучения и интенсивное охлаждение дистиллированной водой. Разработанная технология выделения таллия-199 из мишени и приготовление радиофармпрепарата (РФП) занимает сравнительно малое время (30 мин.), является простой, безотходной и экологически чистой.

Осенью 1991 г. С. И. Бажуков, Г. И. Донцов и Г. И. Сметанин для ознакомления с технологией производства медицинских изотопов прошли стажировку на циклотроне Томского университета. По договору с НИИЯФ ТПУ нам на циклотрон была передана техническая документация как на технологию выделения таллия-199 из мишени, так и на технологию приготовления радиофармпрепаратов: «Таллия

хлорид, ^{199}Tl) и «Диэтилдитикарбонат таллия, ^{199}Tl ». На циклотроне нашего университета началась подготовка к реализации проекта получения изотопа таллий-199. В 1992–1993 гг. под руководством заведующего лабораторией, к. ф.-м. н., С. И. Бажукова была разработана техническая документация облучательного устройства, схемы управления, сигнализации и блокировки узла вращения мишени. Были изготовлены: облучательное устройство, сами мишени, приборы управления и контроля параметров облучения с пульта управления циклотрона. Всё оборудование технологической линии было смонтировано, испытано и успешно работало. К сожалению, предложенный нами проект по производству радионуклида таллия-199 и радиофармпрепаратов на его основе оказался преждевременными и не был востребован из-за отсутствия в Екатеринбурге соответствующего диагностического оборудования. Тем не менее это стимулировало идею проведения в нашем университете Всероссийского научного семинара «Малые» циклотроны и их практическое использование».

В сложные 90-е гг. объем исследований в традиционных для коллектива НИЭФЛ сократился из-за отсутствия финансирования. Но коллектив циклотрона продолжает жить и работать. По инициативе и под руководством д. ф.-м. н. профессора А. В. Кружалова создан оптический канал для исследования радиационно-оптических свойств твердых тел под воздействием пучка тяжелых многозарядных частиц (О. В. Рябухин, В. Ю. Иванов, Ф. Г. Нешов, Е. Г. Голиков, Ю. Г. Лазарев).

В 1993 г. в Уральском государственном техническом университете проводится Всероссийский семинар «“Малые” циклотроны и их практическое использование». В работе семинара приняли участие 40 специалистов из Екатеринбурга, Томска, Санкт-Петербурга, Киева и Ташкента, а также группа врачей-радиологов во главе с главным радиологом Свердловской области. Рекомендации семинара: наибольший социальный эффект может быть достигнут при использовании малых циклотронов для медицинских целей.

В 1995 г. циклотрон был включен в «Перечень уникальных экспериментальных установок национальной значимости, требующих дополнительной государственной поддержки» (приказ № 452 от 24.02.95 Министерства науки и технической политики Российской Федерации). Широкий ассортимент и энергетический диапазон ионов по-прежнему позволяет рассматривать циклотрон как мощный инструмент при проведении фундаментальных научных исследований на современном мировом уровне и при решении важнейших народно-хозяйственных задач.

В этом же году в УГТУ прошло техническое совещание «Циклотроны и их применение». Совещание позволило наиболее полно ознакомиться с работами, выполняемыми на ускорителях Томска, Челябинска, Санкт-Петербурга, Обнинска, Екатеринбурга в прикладных технических и медицинских целях, и обсудило перспективы их дальнейшего развития. Методы пучковой диагностики для анализа состава и структуры твердого тела в ряде случаев являются единственными, позволяющими получать необходимую информацию о твердом теле (например, прямой способ определения местоположения примесных атомов в кристаллической решетке или интердиффузии атомов на границе в системе «пленки – подложка»). На циклотроне возможна разработка качественно новых технологий для создания твердотельных электронных микроструктур на основе высокоэнергетичной ионной имплантации.

5. Исследование ориентационных оптических эффектов

Следует отметить, что к 90-м гг. прошлого века результаты исследования оптических свойств диэлектриков под действием пучков многозарядных ионов в литературе отсутствовали. В связи с этим на канале циклотрона для исследования ориентационных оптических эффектов твердых тел был создан автоматизированный оптический комплекс. Его возможности позволяли исследовать температурные (70–300 К) зависимости ионolumинесценции, наведенного оптического поглощения, спектрально-кинетических характеристик и др. Был исследован широкий круг оптических материалов: монокристаллов оксидов бериллия и алюминия, типичных представителей широкозонных оксидов; кристаллы ортосиликатов гадолиния, иттрия, и лютеция, активированных редкоземельными элементами, известные своей высокой радиационной стойкостью; сложные многокомпонентные кристаллы: хризоберилл, фенакит, берилл; щелочно-галогидные кристаллы CsCl и BaF₂; нелинейные кристаллы боратов лития [18–21].

Была обнаружена и изучена ориентационная зависимость дефектообразования от взаимного расположения оптической оси **C** кристалла BeO и направления падающего пучка частиц. При облучении ионами гелия в такой геометрии проявление характерного свечения F-центров (3,4 эВ) более выражено в случае совмещения направления падающего пучка и оптической оси **C**. Оценка концентрации кислородных вакансий по спектрам поглощения подтвердила, что процесс дефектообразования действительно идет эффективнее в случае совпадения оптической оси **C** и направления падающего пучка. Наиболее ярко это проявляется при облучении флюенсом 10^{14} см⁻².

Возможности модернизированного циклотрона Р-7м по изменению энергии ускоряемых частиц в широких пределах позволили обнаружить и провести исследования остовно-валентной люминесценции (кросс-люминесценции), возбуждаемой тяжелыми заряженными частицами. Было показано, что в некоторых широкощелевых кристаллах кросс-люминесценция эффективно возбуждается рентгеновскими лучами и практически отсутствует в случае возбуждения ионными пучками [22]. Предположено, что различная эффективность кросс-люминесценции связана с различной плотностью электронных возбуждений при фотонном и ионном возбуждении. Кристаллы CsCl и BaF₂ входят в группу соединений, в которых достаточно ярко проявляется кросс-люминесценция. Люминесценция этих кристаллов исследована на циклотроне Р-7м при воздействии протонами с энергиями 0,7; 1,0; 6,7; 10 МэВ, ионами гелия с энергией 3 и 28 МэВ и ионами азота (16 МэВ). Было обнаружено, что кросс-люминесценция возбуждается при воздействии протонами с энергиями 6,7 и 10 МэВ и ионами гелия (28 МэВ). В остальных случаях ее выход отсутствует либо чрезвычайно низок. Известно, что при увеличении энергии заряженных частиц их ионизационные потери уменьшаются, следовательно, уменьшается и плотность электронных возбуждений. В случае облучения кристаллов CsCl и BaF₂ ионами низких энергий (протоны 0,7 и 1 МэВ, гелий – 3 МэВ) ионизационные потери увеличиваются примерно в 4 раза в сравнении с высокоэнергетичными частицами. В связи с этим уменьшением энергии одного и того же сорта ионов происходит рост плотности электронных возбуждений (в частности, для CsCl от величины $3 \cdot 10^{19}$ до 10^{20} эВ/см³ при изменении энергии протонов с 10 до 1 МэВ). Таким образом, было убедительно продемонстрировано, что плотность электронных возбуждений непосредственным образом влияет на интенсивность остовно-валентной люминесценции [23]. Результаты исследования на циклотроне оптических эффектов под действием многозарядных ионов легли в основу кандидатских диссертаций О. В. Рябухина (2001 г.), А. В. Коротаева (2003 г.), Е. С. Шлыгина (2006 г.).

6. Исследования радиационно-стимулированной коррозии

Неотъемлемой частью использования пучков заряженных частиц является радиационная модификация материалов, которая осуществляется как за счет создания радиационных дефектов (физическая стадия), так и за счет создания промежуточных активных частиц (свободных радикалов, ионов, ион-радикалов и т. п.) вызывающих радиационно-химические превращения в облученной среде (физико-химическая стадия). Последнее наиболее актуально и характерно для гетерогенных систем и материалов (коррозия в различных средах), а также материалов с низкой радиационной стойкостью (например, полимерные материалы). Поэтому изучение процессов, существенно изменяющих свое поведение под действием заряженных частиц, наиболее эффективно методами резерфордовского обратного рассеяния (РОР), ядерного обратного рассеяния (ЯОР) и ядер отдачи (ЯО) в условиях *in situ* с постоянно заданным шагом по флюенсу. Для этого необходимы оригинальные экспериментальные методики и способы интерпретации экспериментальных спектров обратно рассеянных частиц, когда состав поверхности материала и окружающей среды меняются в процессе облучения.

Для моделирования радиационно-стимулированной коррозии на первом канале циклотрона была создана экспериментальная установка, обеспечивающая одновременное контролируемое воздействие ионизирующего излучения, температуры, влажности, газовой среды различного состава. Ионизирующее излучение моделировалось общепризнанным способом – протонным облучением [24]. В нашем случае пучок протонов в камеру облучения вводился из вакуумного объема ионопровода через титановую фольгу толщиной 50 мкм, что снижало энергию протонов до 5,7 МэВ.

Для исследования радиационно-стимулированной атмосферной коррозии была выбрана сталь Ст3 состава: С 0,15 %; Si 0,1 %; Mn 0,5 %; Fe ~ 99 %. Данный выбор обусловлен ее широким применением в качестве конструкционного материала при изготовлении контейнеров для хранения радиоактивных отходов. Имитация воздействия гамма-излучения осуществлялась протонами с энергией 5,7 МэВ плотностью тока 10 нА/см². Зависимость коррозии от уровня влажности исследовалась при относительной влажности 20, 60, 99 %. Степень коррозионных повреждений оценивалась по содержанию кислорода и водорода, измеренных методами РОР и ЯОР с использованием ионов гелия с энергией 3 МэВ. Проведена оценка толщины образованного корродированного слоя – он составляет 2 мкм при влажности 60 % за 4 ч облучения. Для сравнения: при обычной атмосферной коррозии в течение года образуется слой толщиной 104 мкм.

Таким образом, было обнаружено увеличение скорости процессов коррозии на три порядка по сравнению с коррозией без воздействия ионизирующего излучения. Более того, ионизирующее излучение не только ускоряет процесс коррозии, но и меняет характер зависимости от влажности воздуха. В обычных условиях атмосферная коррозия практически линейно возрастает с некоторого критического значения (60 % для стали), ниже которого коррозии практически нет. Радиационно-стимулированная коррозия имеет существенно нелинейный характер с максимумом при 60 % влажности, несколько подавленном при 99 % и даже имеет место при 20 %.

Дополнительные исследования методом мессбауэровской спектроскопии показали, что если для атмосферной коррозии характерно образование гидрата оксида железа Fe(OH)₃, то при радиационно-стимулированной коррозии образуется оксигидрат железа FeOOH.

Несомненный интерес для ядерной техники представляет воздействие в полях излучения такого агрессивного элемента, как йод. Он появляется как продукт деления ядер в реакторе.

В камере специальной установки создавалась воздушная атмосфера с плотностью паров йода $\sim 5 \cdot 10^{-6}$ г/см³. Облучению подвергались образцы нержавеющей стали 1X18H10T. Исследования образцов методом РОР ионами гелия показали, что атомы йода и кислорода, ответственные за коррозию, сосредоточены в поверхностном слое толщиной меньше линейного разрешения метода. В дальнейшем исследования проводились методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии в Институте химии твердого тела УрО РАН. Установлено, что кислород и йод локализованы на поверхности, при этом химические элементы стали не обнаруживаются. Это возможно, если кислород и йод находятся в связанном состоянии, образуя нелетучие оксиды йода, препятствуя как проникновению йода, так и продуктов радиолиза. В дальнейшем исследования методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии позволили установить химические соединения, создающиеся на облучаемой поверхности. Выдвинуто предположение о радиационно-химическом характере возникновения аниона JO_3^- при протекании коррозии. Послойное стравливание показало, что толщина слоя около 3 мкм. На глубине свыше 10 мкм следов йода не обнаружено. Образованный окисный слой играет роль защитного фактора, препятствуя проникновению йода и продуктов радиолиза. Установлено, что ускоренные заряженные частицы приводят к активизации йодной коррозии за счет включения в цепочки реакций продуктов радиолиза среды.

В дальнейшем отработанные методики сочетанного воздействия на материалы были применены для нестандартных ситуаций, а именно для исследования материалов, изменяющих в процессе облучения свой состав. Совместно с Институтом реакторных материалов была изучена деградация защитных свойств оксидных пленок цирконий-ниобиевых сплавов при нейтронном и ионном облучении. В последние годы работы циклотрона был проведен большой цикл работ по модификации, окислению и деструкции полимерных материалов [25, 26]. Результаты этих исследований легли в основу кандидатской диссертации С. С. Зырянова (2014 г.), которая подвела своеобразный итог подготовки кадров высшей квалификации на циклотроне Р-7М.

В 2009 г. в программу развития создаваемого Уральского федерального университета кафедрой экспериментальной физики было предложено включить проект формирования кластера биомедицинской инженерии в составе двух инновационных центров – Центра радиационной стерилизации и Циклотронного центра ядерной медицины (ЦЦЯМ). Идея создания Центров для практического использования ускорительных технологий в радиационной биологии и ядерной медицине, наряду с развитием соответствующих научных и образовательных направлений, нашла поддержку у директора физтеха В. Н. Рычкова, проректоров университета А. А. Попова, С. В. Кортова и ректора В. А. Кокшарова. В 2010 г. на рассмотрение инвестиционной комиссии университета был вынесен первый проект по созданию Центра радиационной стерилизации. Годом позже, в 2011 г., был дан старт и проекту по созданию Циклотронного центра ядерной медицины. Руководителем проекта по созданию ЦЦЯМ был назначен С. В. Кортов, заместителем руководителя Е. А. Копелян, зампроректора по инновационной деятельности. Центр сразу позиционировался как межрегиональный, учебно-методический, научно-исследовательский и производственный комплекс.

20 октября 2011 г. вопрос о приобретении нового циклотрона был вынесен на заседание Наблюдательного совета УрФУ и получил одобрение. Для разработки проектно-сметной документации ЦЦЯМ с циклотроном TR-24 на базе реконструируемого ускорительного комплекса физтеха была поведена работа по созданию технического задания, в котором были сформулированы основные задачи,

стоящие перед создаваемым комплексом, а также пути их решения. Самое непосредственное участие в подготовке задания приняли А. В. Хмелев, д. ф.-м. н., сотрудник компании «Интер-Медико ГмБХ», Е. И. Денисов, к. х. н., доцент кафедры радиохимии физтеха, к. ф.-м. н., ведущий инженер кафедры экспериментальной физики С. И. Бажуков и к. ф.-м. н., доцент кафедры экспериментальной физики И. Н. Седунова.

После старта проекта, выбора нового циклотрона и заключения договора на его поставку в сентябре 2012 г. было принято решение о демонтаже циклотрона Р-7. Команда сотрудников кафедры экспериментальной физики провела демонтаж всего оборудования циклотрона за 9 месяцев. Последний блок основного магнита циклотрона был вывезен 14 июня 2013 г.

Символично, что именно С. С. Зырянов, последним защитивший диссертацию по материалам исследований на циклотроне Р-7М, возглавил сегодня Циклотронный центр ядерной медицины Уральского федерального университета, базирующийся на новом циклотроне TR-24, пришедшем на смену заслуженному «ветерану». Связь времен и поколений продолжается.

7. Выводы

Кратко изложена история первого уральского циклотрона и формирование на его базе уникальной научной школы. Созданный на циклотроне экспериментальный комплекс позволил исследовать физические основы эффектов каналирования заряженных частиц и эффекта теней, установить роль радиационных дефектов в кристаллах с помощью эффекта теней, выполнить пионерские работы по изучению оптических свойств диэлектриков под действием многозарядных частиц, разработать методику *in situ* исследования коррозии и деструкции материалов (сочетанное воздействие температуры, газовой среды, пучка ускоренных ионов).

Важнейшим и успешно завершённым этапом экспериментально-теоретического исследования явилось изучение на циклотроне Р-7М ориентационных эффектов на многозарядных ионах, включая процессы перезарядки при их прохождении через газовые среды. В 70-е гг. коллектив циклотрона оказался наиболее подготовленным в СССР для решения стратегической оборонной задачи – изучения нейтрализации отрицательных ионов водорода в газовых средах. Предпринятая для этого реконструкция циклотрона была осуществлена в 1978–80 гг., а сама важнейшая научно-техническая задача была решена к 1984 г. После снятия с тематики грифа секретности уникальные, фундаментальные результаты были опубликованы. Благодаря коренной модернизации ускорителя и выполнения важнейших НИР, ускорительный комплекс был признан в России «Уникальной экспериментальной установкой государственной важности» (1995 г.).

Исторический финал первого уральского циклотрона – естественный процесс рождения и создания нового экспериментального комплекса будущего – Циклотронного центра ядерной медицины.

8. Благодарности

Авторы благодарны многочисленному коллективу техников, инженеров и научных работников кафедры экспериментальной физики и электрофизической лаборатории, обеспечивших создание уникальной установки и проведение экспериментальных исследований. Авторы также выражают благодарность руководству университета за поддержку коллектива, выполнявшего и продолжающего выполнять работы с использованием сложной ускорительной

техники, на всех этапах, начиная с момента создания электрофизической лаборатории.

9. Список литературы

1. Уральский политехнический институт им. С. М. Кирова, 1920–1970 : исторический очерк / М-во высш. и сред. спец. образования РСФСР ; [отв. ред. А. В. Бакунин]. – Екатеринбург : Изд-во. УПИ, 1970. – 403, [1] с. : ил. – Библиогр. в примеч.: с. 383–392.
2. *Оглоблин, А. А.* Курчатовский институт. История атомного проекта / А. А. Оглоблин : – Науч. сб. – Москва, 1997. – Вып. 12. – С. 168.
3. Первый Уральский циклотрон: Науч.–истор. очерк, 2021 / Г. И. Сметанин, В. Ю. Иванов [и др.]. – Екатеринбург : Изд-во. УрФУ. – С. 192.
4. *Тулинов, А. Ф.* Влияние кристаллической решетки на некоторые атомные и ядерные процессы / А. Ф. Тулинов // Успехи физических наук. – 1965. – Т. 87, вып. 4. – С. 585–598.
5. Аномальные угловые характеристики теней на протоннограммах висмута / В. Н. Багаев, Ф. Г. Нешов [и др.] // ЖЭТФ. – 1971. – Т. 60, вып. 1. – С. 191–194.
6. *Николаев, В. С.* Захват и потеря электронов быстрыми ионами в атомных столкновениях / В. С. Николаев // Успехи физических наук. – 1965. Т. 85. – С. 679–720.
7. Форма спектра частиц, рассеянных на толстой мишени и определение с его помощью энергетических потерь / Е. И. Сиротинин [и др.] // Вестник МГУ. Сер. Физическая астрономия. – 1971. – № 5. – С. 541–546.
8. The determination of energy losses of nitrogen ions from the backscattering / F. G. Neshov [et al.] // Radiation Effects. – 1975. Vol. 25. – P. 271–273.
9. *Northcliffe, L. C.* Nuclear Data / L. C. Northcliffe, R. F. Schilling. – 1970. – A7. – P. 233.
10. Различия в сечениях торможения протонов, движущихся в неориентированном направлении в алмазе и графите / В. С. Куликаускас, Ф. Г. Нешов [и др.]. // Письма в ЖТФ. – 1984. – Т. 10, вып. 2. – С. 111–114.
11. Allotropic effects on the energy loss of swift H⁺ and He⁺ ion beams through thin foils / Garcia-Molina [et al.] // Nucl. Inst. and Meth. Phys. Res. B. – 2006. – Vol. 249. – P. 6–12.
12. Распределение примеси хрома в поверхностных слоях монокристаллов искусственного изумруда / М. И. Василенко [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 1979. – Т. XXX, вып. 3. – С. 527–530.
13. Измерение угловых распределений ионов с энергией в несколько мегаэлектронвольт, рассеянных на малые углы / Г. Д. Ведьманов [и др.] // ПТЭ. – 1989. – №2. – С. 47–50.
14. *Радченко, В. И.* Рассеяние ионов и атомов водорода с энергией ~ 1 МэВ в газах без изменения заряда / В. И. Радченко // ЖЭТФ. – 1993. – Т. 103, вып.1. – С. 40–49.
15. *Радченко, В. И.* Рассеяние ионов и атомов водорода в газах / В. И. Радченко, Г. Д. Ведьманов // ЖЭТФ. – 1995. – Т.107, вып.1. – С. 3–19.
16. *Радченко, В. И.* Образование атомов водорода в 2s- и 2p- состояниях при нейтрализации ионов H⁻ в газах / В. И. Радченко, Г. Д. Ведьманов // ЖЭТФ. – 1995. – Т.107, вып. 4. – С. 1204–1220.
17. Equipment and method for ion beam control in implantation and science experiments / К. О. Khokhlov [et al.] // Nucl. Inst. and Meth. Phys. Res. B. – 1998. – Vol. –139. – P. 405–410.

18. Электронные возбуждения в кристаллах BeAl_2O_4 , Be_2SiO_4 и $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ / В. Ю. Иванов [и др.] // Физика твердого тела. – 2005. – Т. 47, Вып. 3. – С.452–459.
19. Собственная люминесценция редкоземельных оксиортосиликатов / В. Ю. Иванов [и др.] // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50, Вып. 9. – С. 1628–1634.
20. Перенос энергии в кристаллах $\text{Gd}_2\text{SiO}_5\text{-Ce}$, $\text{Y}_2\text{SiO}_5\text{-Ce}$ и $\text{Be}_2\text{La}_2\text{O}_5\text{-Ce}$ при селективном ВУФ- и основном возбуждении / В. Ю. Иванов [и др.] // Физика твердого тела. – 2005. – Т. 47, В. 8. – С. 1435–1439.
21. *Огородников, И. Н.* Радиационно-стимулированные процессы и электронные возбуждения в нелинейных оптических материалах / И. Н. Огородников, А. В. Кружалов // Изв. вузов. Физика. – 2000. – Т.43, №3, – С. 66–84.
22. *Родный, П. А.* Остовно-валентные переходы в широкозонных ионных кристаллах / П. А. Родный // Физика твердого тела. – 1992. – Т. 34, вып. 7. – с. 1975.
23. Рекомбинационное создание катионных экситонов и тушение кросс- люминесценции в кристаллах CsCl при больших плотностях возбуждения / А. В. Кружалов, Ч. Б. Луцник [и др.] // Физика твердого тела. – 2000. – Т. 42, вып. 6. –С.1020–1025.
24. *Lapuerta, S. I.* Role of proton irradiation and relative air humidity on iron corrosion / S. I. Lapuerta // Nucl. Mater. – 2006. – Vol. 352. – P. – 174–181.
25. Исследование деградации полиэтилентерефталата in situ при облучении ионами гелия с энергией 3 МэВ / С. С. Зырянов [и др.] // Известия вузов: Физика. – 2014. – Т. 57, №12/3. – С. 127–131.
26. Исследование поверхности стали, облученной протонами в иодной среде / С. С. Зырянов [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2013. – № 4. – С. 29–35.

Сведения об авторах:

Иванов Владимир Юрьевич, к. ф-м. н., доцент, почетный работник сферы образования РФ, директор физико-технологического института Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия. Эл. почта: v.ivanov@urfu.ru.

Кружалов Александр Васильевич, д. ф-м. н., профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор-исследователь УрФУ, Екатеринбург.

Нешов Федор Григорьевич, к. ф-м. н., старший научный сотрудник, почетный работник науки и техники РФ, заведующий лабораторией кафедры экспериментальной физики УрФУ, Екатеринбург, Россия.

Сметанин Геннадий Иванович, почетный работник высшего профессионального образования РФ, заведующий лабораторией циклотрона УрФУ, Екатеринбург, Россия.

NUCLEAR PHYSICS RESEARCH AT R-7 CYCLOTRON OF URAL FEDERAL UNIVERSITY

V. Yu. Ivanov, A. V. Kruzhalov, F. G. Neshov, G. I. Smetanin

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

In 2022, the Cyclotron Center for Nuclear Medicine was commissioned at the Ural Federal University at the Institute of Physics and Technology. The first Ural cyclotron R-7, which had successfully served science for more than 50 years, was dismantled and replaced by a new modern accelerator. This article briefly outlines the history of the first Ural cyclotron - the UPI cyclotron, its role in training highly qualified personnel, conducting fundamental and applied scientific research. Particular attention is paid to the development of the physical foundations for the experimental study of the composition and structure of materials under the influence of accelerated multiply charged ions.

Key words: cyclotron, multiply charged ions, shadow effect, orientation effects, defect formation, radiation stimulation, corrosion, polymers.

References

1. Ural Polytechnic Institute named after S. M. Kirov, 1920–1970. Historical essay. 1970. UPI, Sverdlovsk, 178 p.
2. *Ogloblin, A. A.* Kurchatov Institute. History of the atomic project. Scientific collection. – Moscow, 1997. – Issue. 12. 168 p.
3. First Ural Cyclotron: Scientific and historical essay, 2021. / G. I. Smetanin, V. Yu. Ivanov [et al.]. – Ekaterinburg, edited by UrFU. – P. 192.
4. *Tulinov, A. F.* Influence of the crystal lattice on some atomic and nuclear processes / A. F. Tulinov // *Uspekhi fizicheskikh nauk.* – 1965. – V.87, No. 4. – P. 585–598.
5. Anomalous angular characteristics of shadows in bismuth protonograms. V. N. Bagaev, F. G. Neshov [et al.] // *Zhurnal eksperimentalnoy i teoreticheskoy fiziki.* 1971, v. 60, issue 1, p. 191–194.
6. *Nikolaev, V. S.* Capture and loss of electrons by fast ions in atomic collisions / V. S. Nikolaev // *Uspehi fizicheskikh nauk.* – 1965. – V. 85. p. 679–720.
7. Form of the spectrum of particles scattered on a thick target and determination of energy losses with its help. / E. I. Sirotinin [et al.] // *Bulletin of Moscow State University, ser. Fiziki i Astronomii.* – 1971. – No. 5. – P. 541–546.
8. The determination of energy losses of nitrogen ions from the backscattering. / F. G. Neshov [et al.] // *Radiation Effects.* – 1975. Vol. 25. – P. 271–273.
9. *Northcliffe, L. C.* Nuclear Data / L. C. Northcliffe, R. F. Schilling. – 1970. – A7. – P. 233.
10. Differences in the deceleration cross sections for protons moving in an unoriented direction in diamond and graphite / V. S. Kulikauskas, F. G. Neshov [et al.] // *Pisma v Zhurnal Technicheskoy Fiziki.* – 1984. – Vol. 10. – No. 2. – P. 111–114.

11. Allotropic effects on the energy loss of swift H⁺ and He⁺ ion beams through thin foils / Garcia-Molina [et al.] // Nucl. Inst. and Meth. Phys. Res. B. – 2006. – Vol. 249. – P. 6–12.
12. Distribution of chromium impurities in the surface layers of single crystals of artificial emerald / M. I. Vasilenko [et al.] // Zhurnal Prikladnoy Spektroskopii. – 1979. – T.XXX. No. 3. – P. 527–530
13. Measurement of the angular distributions of ions with an energy of several megaelectronvolts scattered through small angles / G. D. Ved'manov [et al.] // Pribory I Technika Eksperimenta. – 1989. – No. 2. – P. 47–50.
14. *Radchenko. V. I.* Scattering of hydrogen ions and atoms with energy ~ 1 MeV in gases without charge change / V. I. Radchenko // Zhurnal eksperimentalnoy i teoreticheskoy fiziki. – 1993. – Vol. 103, issue 1, p. 40–49.
15. *Radchenko. V. I.* Scattering of ions and hydrogen atoms in gases / V. I. Radchenko, G. D. Vedmanov // Zhurnal eksperimentalnoy i teoreticheskoy fiziki. – 1995. – V.107, issue 1, P. 3–19.
16. *Radchenko. V. I.* Formation of hydrogen atoms in 2s- and 2p-states upon neutralization of H⁻ ions in gases / V. I. Radchenko, G. D. Vedmanov // Zhurnal eksperimentalnoy i teoreticheskoy fiziki. – 1995. V. 107, issue. 4, P. 1204–1220.
17. Equipment and method for ion beam control in implantation and science experiments / K. O. Khokhlov [et al.] // Nucl. Inst. and Meth. Phys. Res. B. – 1998. – Vol. –139. – P. 405–410.
18. Electronic excitations in BeAl₂O₄, Be₂SiO₄, and Be₃Al₂Si₆O₁₈ crystals. / V. Yu. Ivanov [et al] // Fizika tverdogo tela. – 2005. Vol. 47, No. 3, pp. 452–459
19. Intrinsic luminescence of rare-earth oxyorthosilicates / V. Yu. Ivanov [et al.] // Fizika tverdogo tela. – 2008. – Vol. 50, No. 9, p. 1628–1634
20. Energy transfer in Gd₂SiO₅-Ce, Y₂SiO₅-Ce, and Be₂La₂O₅-Ce crystals under selective VUV and core excitation / V. Yu. Ivanov [et al.] // Fizika tverdogo tela. – 2005. Vol. 47, No. 8, p. 1435–1439.
21. *Ogorodnikov, I. N.* Radiation-stimulated processes and electronic excitations in nonlinear optical materials / I. N. Ogorodnikov, A. V. Kruzhalov // Izvestiya Vuzov. Fizika. – 2000. – Vol.43, No. 3, p. 66–84
22. *Rodnyi, P. A.* Core-valence transitions in wide-gap ionic crystals / P. A. Rodnyi // Fizika tverdogo tela. – 1992 – Vol. 34, No. 7. – P. 1975.
23. Recombination production of cationic excitons and quenching of crossluminescence in CsCl crystals at high excitation densities / A. V. Kruzhalov [et al] // Fizika tverdogo tela. – 2000. – Vol. 42, No. 6. – P. 1020–1025.
24. *Lapuerta, S. I.* Role of proton irradiation and relative air humidity on iron corrosion / S. I. Lapuerta // Nucl. Mater. – 2006. – Vol. 352. – P. – 174–181.
25. In situ study of polyethylene terephthalate degradation upon irradiation with 3 MeV helium ions / S. S. Zyryanov [et al.] // Izvestiya Vuzov: Fizika. – 2014. – V. 57, No. 12/3, p. 127–131.
26. Investigation of the surface of steel irradiated by protons in an iodine medium / S. S. Zyryanov [et al.] // Poverchnost: Rentgenovskie, Synchrotronnye I Neytronnye Issledovaniya. – 2013. – No. 4. – P. 29–35.