

Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы РМК  
Ядролық физика институты ЕМК

ДГП Институт ядерной физики  
РГП Национальный ядерный центр Республики Казахстан

Препринт № 22

В.С.Школьник, М.Ж. Жолдасбеков, К.К. Кадыржанов, А.Н. Сисакян,  
М.Г. Иткис, С.Н. Дмитриев, А.Ю. Дидык, В.Ф. Реутов, Б.Н. Гикал, С.Л. Богомолов,  
А.Ж. Тулеушев, Ю.С. Пятилетов, А.Н. Борисенко, А.А. Арзуманов, С.Н. Лысухин,  
А.Д. Дуйсебаев, Н. Буртебаев, С.Б. Кислицын

**ОБОСНОВАНИЕ СОЗДАНИЯ В ЕВРАЗИЙСКОМ НАЦИОНАЛЬНОМ  
УНИВЕРСИТЕТЕ ИМ. Л.Н. ГУМИЛЕВА  
МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОГО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО  
КОМПЛЕКСА НА БАЗЕ УСКОРИТЕЛЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ**

Алматы, 2003 г.

УДК 621.384,6.5

*В.С.Школьник, М.Ж. Жолдасбеков, К.К. Кадыржанов, А.Н. Сисакян,  
М.Г. Иткис, С.Н. Дмитриев, А.Ю. Дидык, В.Ф. Реутов, Б.Н. Гикал, С.Л. Богомолов,  
А.Ж. Тулеушев, Ю.С. Пятилетов, А.Н. Борисенко, А.А. Арзуманов, С.Н. Лысухин,  
А.Д. Дуйсебаев, Н. Буртебаев, С.Б. Кислицын*

## ОБОСНОВАНИЕ СОЗДАНИЯ В ЕВРАЗИЙСКОМ НАЦИОНАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ ИМ. Л.Н. ГУМИЛЕВА МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОГО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО КОМПЛЕКСА НА БАЗЕ УСКОРИТЕЛЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

### Аннотация

Дано обоснование создания в Евразийском национальном университете им. Л.Н. Гумилева междисциплинарного научно-исследовательского комплекса на базе ускорителя тяжелых ионов. Подробно проанализированы вопросы: обоснования создания в г. Астане в Евразийском национальном университете им. Л.Н. Гумилева междисциплинарного научно-исследовательского комплекса; применения ядерных мембран как объединяющего фактора развития технологий, науки и наукоемкого бизнеса; создания промышленных технологий с использованием нано- и микроструктур на основе ядерных мембран; выбора циклотрона DC-60 в качестве базовой установки междисциплинарного научно-исследовательского комплекса, а также вопросы формирования научной среды и вопросы образования в междисциплинарном научно-исследовательском комплексе на базе ускорителя тяжелых ионов.

Обсуждено и одобрено Ученым советом Института ядерной физики НЯЦ РК, Ученым советом Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ, г. Дубна, РФ), на совместном заседании Научно-технического совета Национального ядерного центра РК и секции "Атомная энергетика и промышленность Министерства энергетике и минеральных ресурсов РК, на презентации Астанинского филиала ИЯФ НЯЦ РК при Евразийском национальном университете им. Л.Н.Гумилева, на совещании по сотрудничеству ОИЯИ с научными центрами Республики Казахстан, на 3-й международной конференции "Ядерная и радиационная физика" (Алматы, 2001 г.).

## Оглавление

	Стр.	
1	Обоснование создания в г. Астане в Евразийском национальном университете им. Л.Н. Гумилева междисциплинарного научно-исследовательского комплекса	5
2	Ядерные мембраны как объединяющий фактор развития технологий, науки и наукоемкого бизнеса	10
2.1	Производство трековых мембран с использованием ускорителей тяжелых ионов. Мировой опыт	10
2.2	Краткий обзор ускорителей, применяемых для производства трековых мембран и модификации полимеров	11
2.3	Особенности получения и свойства трековых мембран на основе различных полимеров	13
2.4	Модификация полимеров с использованием пучков тяжелых ионов: немембранные технологические применения	14
2.4.1	Микроэлектромеханические системы	14
2.4.2	Модификация поверхности	15
2.4.3	Анодные фольги для конденсаторов	15
2.4.4	Защитные знаки	15
3	Вопросы создания нано- и микроструктур на основе ядерных мембран	17
3.1	Ионно-имплантационная нанотехнология	17
3.2	Технологические и прикладные аспекты формирования и использования ядерных треков в твердых телах	19
3.3	Научные аспекты радиационного повреждения и формирования ионных треков в твердых телах	21
4	Выбор циклотрона DC-60 в качестве базовой установки междисциплинарного научно-исследовательского комплекса	27
4.1	Проект специализированного ускорителя DC-60 для междисциплинарного лабораторного комплекса при Евразийском национальном университете им. Л.Н.Гумилева	27
4.1.1	Общее описание	27
4.1.2	Источник ионов	28
4.1.3	Система аксиальной инжекции пучка	30
4.1.4	Вывод пучка	30
5	Вопросы развития науки	32
5.1	Направления исследований в области радиационной физики твердого тела	33
5.1.1	Фундаментальные проблемы физики радиационного повреждения твердых тел	35
5.1.2	Моделирование высокодозного облучения нейтронами деления и синтеза	38
5.1.3	Радиационные технологии – модификация свойств	45

	материалов методом ионного легирования	
5.1.4	Направления исследований с использованием ЭЦР-источника тяжелых ионов	49
5.2	Направления исследований по ядерной физике	51
5.2.1	Исследование механизма ядро-ядерного взаимодействия и структуры ядер	51
5.2.2	Исследование реакций передачи и радиационного захвата для астрофизических и термоядерных приложений	54
6	Вопросы подготовки кадров	60
	Литература	63
	Приложения	68

## **1. Обоснование создания в г. Астане в Евразийском национальном университете им. Л.Н. Гумилева междисциплинарного научно-исследовательского комплекса**

Приобретение независимости Казахстаном поставило перед молодой страной, в том числе, проблему образования и подготовки кадров. Указом Президента Республики Казахстан от 30 сентября 2000 года N 448 «О Государственной программе «Образование» утверждена Государственная программа «Образование», в которой сформулированы наиболее важные проблемы в этой области. В частности, указывается, что **«...в системе высшего профессионального образования увеличивается разрыв во взаимодействии вузов с академическим сектором науки, производством и экспериментальными базами, что ведет к снижению качества учебного процесса и практической подготовки будущих специалистов.**

**В подготовке кадров с высшим образованием происходит «вымывание затратных специальностей», в частности, естественно-научного и технического направлений, без чего невозможно научно-техническое развитие общества. Абсолютная часть специалистов заканчивает образование после первой ступени высшего многоуровневого образования, что существенно снижает общий уровень высшего образования в республике. В этой сфере требуется кардинально решить вопросы прохождения студентами производственной практики и организации лабораторных и практических занятий, учебной научно-исследовательской работы на базе предприятий с современными технологиями.**

В области послевузовского образования следует разработать новую концепцию послевузовского образования, так как в этой системе стали накапливаться серьезные проблемы, связанные с эффективностью организации, финансирования и управления. **Интеграция образования и науки наиболее эффективно может быть реализована в сфере послевузовского профессионального образования».**

Анализ мирового опыта интеграции высшего образования с наукой и передовыми технологиями показывает, что наиболее эффективным путем решения такой задачи является создание крупных научно-исследовательских и технологических комплексов в полнопрофильных университетах.

На сегодняшний день в Казахстане в соответствии с Указом Президента Республики Казахстан от 5 июля 2001 года N 648 «О предоставлении особого статуса отдельным государственным высшим учебным заведениям» особый статус придан восьми государственным высшим учебным заведениям, из которых два являются полнопрофильными университетами: Казахский национальный университет имени аль-Фараби

(КазНУ им. аль-Фараби) и Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева (ЕНУ им. Л.Н. Гумилева).

В соответствии с постановлением Правительства Республики Казахстан от 5 ноября 2001 года N 1398 «Об утверждении Типового положения о государственных высших учебных заведениях, имеющих особый статус», **государственное высшее учебное заведение, имеющее особый статус, обязано гарантировать стабильно высокий уровень высшего профессионального образования, соответствующий мировым стандартам, на основе эффективного использования научно-педагогического потенциала, учебно-материальной базы и инновационных образовательных технологий, а также систематически проводить мониторинг развития образования, науки, техники и технологий в мировом научно-образовательном пространстве и вносить предложения в центральный исполнительный орган в области образования для внедрения в систему высшего профессионального образования республики.**

Очевидно, что в настоящее время эти два университета находятся в неравном положении при реализации обязанностей, вытекающих из их особого статуса. За КазНУ им аль Фараби стоит более чем пятидесятилетняя история, высокий кадровый потенциал, огромная собственная материальная база, а также кадровый потенциал и базы академических институтов всех профилей г. Алматы, что дает ему возможность полноценно выполнять обязанности высшего учебного заведения с особым статусом. В то же время молодой ЕНУ им. Л.Н. Гумилева испытывает острый дефицит установок и оборудования для подготовки специалистов «затратных специальностей», а также самих специалистов естественно-научного и технического направлений.

Очевидно, что реализация ЕНУ им. Л.Н. Гумилева функций высшего учебного заведения с особым статусом невозможна без серьезного укрепления материально-технической базы и кадрового потенциала для подготовки специалистов естественно-научного и технического направлений.

Наряду с этим в соответствии с утвержденным Указом Президента Республики Казахстан от 4 декабря 2001 года N 735 «О дальнейших мерах по реализации Стратегии развития Казахстана до 2030 года» Стратегическим планом развития Республики Казахстан до 2010 года указано, что «Ключевым фактором создания и развития современной конкурентоспособной экономики является налаживание тесных связей между учебным и научно-исследовательскими направлениями в деятельности вузов. ...Дальнейшим шагом к интеграции науки и образования должно стать реальное, а не формальное слияние крупных вузов и научно-исследовательских институтов».

Также, в соответствии с Указом Президента Республики Казахстан «О Государственной программе социально-экономического развития города Астаны на период до 2005 года «Расцвет Астаны - Расцвет Казахстана» в сфере образования и науки «...предусматривается **развитие нового содержания образования как сферы, формирующей человеческие ресурсы, способные освоить технологии XXI века и обеспечить будущее процветание Казахстана.** ... Получит дальнейшее развитие укрепление связей между наукой и производством. В рамках этой политики **предполагается создание организационной структуры, представляющей собой учебный научно-производственный комплекс (университет - технопарк), сочетающий в себе традиционный образовательный процесс и предпринимательство, научные исследования, инновационную деятельность...** Новые научные центры будут способствовать притоку подготовленных высококвалифицированных научных и педагогических кадров... **Столица республики получит возможность распространения, в т. ч. на экспорт наукоемких и высоких технологий и продукции...** Реализация намечаемых мероприятий создаст **новый имидж столицы как центра распространения инноваций, высоких, наукоемких технологий и продукции...** Конкретные меры и механизмы реализации Программы найдут отражение в республиканских, региональных и отраслевых программах, предусматривающих развитие столицы Казахстана».

В постановлении Правительства Республики Казахстан от 20 апреля 2001 года N 534 «Об утверждении Плана мероприятий по реализации Государственной программы социально-экономического развития города Астаны на период до 2005 года «Расцвет Астаны - Расцвет Казахстана» указано на необходимость «...апробировать в г.Астане новые стандарты образования и науки, которые найдут применение не только в столице, но и в стране, а также подготовить предложение о создании университета-технопарка, сочетающего в себе образовательный процесс и научные исследования, инновационную деятельность и трансформацию новейших технологий в реальный сектор экономики».

Анализ мирового опыта показывает, что наиболее значительные результаты при решении проблем, подобных указанным выше, достигаются в тех случаях, когда интеграция образования и науки, продвижение передовых технологий в реальную экономику реализуются путем **создания крупных учебных и научно-исследовательских комплексов на базе крупных установок, способных сыграть роль объединяющего начала между образованием, наукой и бизнесом.**

Сказанное выше полностью подтверждается более чем сорокапятилетним опытом Института ядерной физики Национального ядерного центра Республики Казахстан (ИЯФ НЯЦ РК). Здесь сосредоточены важнейшие базовые ускорительные установки Казахстана:

изохронный циклотрон У-150М, электростатический ускоритель УСП-2-1, электронный ускоритель ЭЛВ-4, ставшие основой формирования школы высококвалифицированных научных кадров, развития высоких технологий и выпуска наукоемкой продукции, востребованной на отечественном и мировом рынках, осуществления цикла вузовского и послевузовского образовательного процесса, включая подготовку специалистов высшей квалификации.

Аналізу использования изохронного циклотрона У-150М и электростатического ускорителя УСП-2-1 для научных исследований в области ядерной физики низких и средних энергий, радиационной физики твердого тела, прикладной ядерной физики, развитию технологий производства и выпуску изотопов и радиофармпрепаратов посвящена книга «Ускорительная техника и развитие физики в Казахстане (1992-2002)» [1].

На этих установках выполнен большой объем научных и прикладных исследований, нашедший отражение в более чем 550 научных публикациях, в том числе, в самых престижных научных изданиях, подготовлено и защищено 14 докторских и 44 кандидатских диссертаций.

В ИЯФ НЯЦ РК на технологическом ускорителе электронов ЭЛВ-4 впервые в Казахстане освоено в промышленных объемах и на уровне мировых стандартов производство современного кровельного материала с использованием передовой технологии радиационной сшивки полимеров, технологии радиационной стерилизации продукции и материалов медицинского назначения. Разрабатывается перспективная технология производства радиационно-сшитых гидрогелей технического и медицинского назначения на основе местного сырья.

Практическая значимость технологических процессов с использованием источников излучений неоднократно подчеркивалась на международных конференциях и симпозиумах (см. например [2-4]). Например, радиационная обработка полиэтилена позволяет более чем вдвое уменьшить энергопотребление по сравнению с химической сшивкой. При радиационной вулканизации резины энергозатраты снижаются в десять раз, примерно такой же выигрыш достигается при радиационной обработке покрытий. Радиационная стерилизация электронным пучком дает примерно пятикратный выигрыш по затратам энергии по сравнению со стерилизацией окисью этилена [5].

Таким образом, и мировой опыт, и опыт ИЯФ НЯЦ РК подтверждают, что **ускорительная техника действительно является основой для подготовки школ высококвалифицированных научных кадров, развития передовых наукоемких технологий и выпуска наукоемкой продукции.**

Проведенный мониторинг развития науки, техники и технологий за последнее десятилетие показал, что наибольшие возможности для создания собственных национальных научных школ по физике, материаловедению,

химии, биологии и высоким технологиям в настоящее время, с нашей точки зрения, представляет освоение технологий с использованием ядерных мембран. **Получение ядерных мембран с помощью ускорителей тяжелых ионов является одним из важнейших направлений применения ядерных технологий за последнее время, способным объединить различные дисциплины и отрасли и стать основой ряда нанотехнологий и наукоемкого бизнеса.**

Так, по оценкам зарубежных специалистов, технология производства ядерных мембран является наиболее перспективной технологией последних десяти лет, имеющей самое широкое применение. Кроме того, известно, что производство ядерных фильтров является высокорентабельным производством. Например, в настоящее время в г. Дубне (РФ) коммерческой российской организацией НПЦ «Альфа» строится специализированный завод по производству ядерных мембран с использованием закупленного в ОИЯИ ускорителя тяжелых ионов производительностью 2 млн. кв. м лавсановой мембраны и 400 тыс. одноразовых плазмофильтров в год (см. [www.trackpore.ru](http://www.trackpore.ru)). Аналогичная ситуация по резкому увеличению выпуска продукции с использованием ядерных мембран имеет место практически во всех индустриально развитых странах.

Следует особо подчеркнуть, что такой технологический прорыв стал возможным в результате отказа от устаревшей и практически не используемой вследствие низкого качества продукции и большого количества жидких радиоактивных отходов реакторной технологии и перехода к более совершенным в технологическом и экологическом отношении технологиям производства ядерных мембран с использованием ускорителей тяжелых ионов.

Изложенное выше стало основой содержания письма Заместителя Премьер-Министра – Министра энергетики и минеральных ресурсов Республики Казахстан В.С. Школьника Президенту Республики Казахстан Н.А. Назарбаеву от 31 января 2001 года № И-89, в котором сделаны конкретные предложения по созданию в Астане в ЕНУ им. Л.Н. Гумилева междисциплинарного лабораторного комплекса для решения задач физики, химии и передовых технологий широкого профиля. В качестве основного элемента этого лабораторного комплекса предложен уникальный ускоритель тяжелых ионов, разработанный в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ, г. Дубна, РФ), имеющем высокий мировой авторитет в области создания электрофизической аппаратуры, а научное сопровождение создания этого уникального ускорителя будет проводиться силами специалистов по ускорительной технике ИЯФ НЯЦ РК. Все это позволит подготовить национальные кадры по ряду передовых наукоемких технологий и естественным наукам, лежащим в основании этих технологий.

Позиция ЕНУ им Л.Н. Гумилева по этому вопросу сформулирована ректором университета М.Ж. Жолдасбековым в его письме на имя Премьер-

Министра Республики Казахстан И.Н. Тасмагамбетова от 15 апреля 2002 года № 01-10-552. В письме отмечено, что с учетом мирового опыта наиболее эффективное решение проблемы подготовки высококлассных специалистов в области естественных и инженерных наук возможно путем создания собственных национальных научных школ на базе новейших экспериментальных установок, способных сконцентрировать вокруг себя представителей различных научных направлений и передовых промышленных технологий. Выражено мнение, что создание междисциплинарного научно-исследовательского комплекса чрезвычайно важно для решения задач, поставленных Главой государства перед университетом по подготовке специалистов мирового уровня.

Предложения Министра энергетики и минеральных ресурсов Республики Казахстан В.С. Школьника и ректора ЕНУ им. Л.Н. Гумилева поддержаны Президентом Республики Казахстан Н.А. Назарбаевым и Премьер-Министром Республики Казахстан И.Н. Тасмагамбетовым. Данные ими поручения по этому вопросу нашли свое воплощение в виде инвест-программы «Создание в Евразийском национальном университете им. Л.Н. Гумилева междисциплинарного научно-исследовательского комплекса на базе ускорителя тяжелых ионов». Администратором этой программы назначено Министерство энергетики и минеральных ресурсов Республики Казахстан.

## **2. Ядерные мембраны как объединяющий фактор развития технологий, науки и наукоемкого бизнеса**

Выше было отмечено, что получение ядерных (трековых) мембран с помощью ускорителей тяжелых ионов является одним из важнейших направлений применения ядерных технологий за последнее время, способным объединить различные дисциплины и отрасли и стать основой ряда нанотехнологий и наукоемкого бизнеса.

### **2.1. Производство трековых мембран с использованием ускорителей тяжелых ионов. Мировой опыт**

Ядерные мембраны («ядерные фильтры», «трековые мембраны») – это особый вид ультра- и микрофльтрационных мембран, получаемых из тонких полимерных пленок путем облучения высокоэнергетичными тяжелыми заряженными частицами и последующего химического травления. Изначально производство трековых мембран базировалось на облучении полимерных пленок осколками деления урана. Фирма Nuclegore выпускала мембраны на основе поликарбонатных пленок толщиной 6-12 мкм, которые подвергались обработке в канале ядерного реактора, где урановая мишень служила источником осколков. «Реакторный» метод

облучения имеет ряд недостатков, а именно:

1) часть осколков не пробивает пленку насквозь и останавливается в ее толще, что приводит к радиоактивному загрязнению. Поэтому дальнейшая химическая обработка не может проводиться непосредственно после облучения; необходима «выдержка» облученной пленки в течение нескольких месяцев, чтобы распались наиболее короткоживущие изотопы имплантированных в пленку радиоактивных атомов. Эта проблема особенно неприятна при высокой плотности треков ( $10^9 \text{ см}^{-2}$  и более). Наличие радиоактивности в отходах химического травления существенно усложняет всю технологическую цепочку.

2) пробег «тяжелой» группы осколков деления составляет в большинстве полимеров не более 10-12 мкм. В связи с этим метод не может быть применен к пленкам большей толщины.

3) осколки деления имеют изотропное угловое распределение, и поэтому их трудно применить в случаях, когда необходимо иное угловое распределение. Для создания массива параллельных треков требуется коллимирование, снижающее интенсивность исходного пучка на несколько порядков.

С течением времени «реакторный» метод облучения был практически полностью вытеснен «ускорительным» методом. Существующие на западе фирмы-производители трековых мембран в основном опираются на «ускорительную» технологию. Фирма Whatman использует для обработки полимерных пленок тандем в Брукхейвене и циклотрон в Бельгии [17]. Фирма Ouhphen [18] арендует специализированный канал на циклотроне в институте Hahn-Meitner, а также проводит часть облучений в ГАНИЛ (Франция). Фирма Costar и впоследствии Corning Costar в рамках соглашения с ОИЯИ получали материал, облученный тяжелыми ионами на ускорителе У-400 в Лаборатории ядерных реакций им.Г.Н.Флерова. Ассортимент трековых мембран на мировом рынке включает поликарбонатные и полиэтилентерефталатные мембраны с толщинами от 6 до 20 мкм [16]. Для ряда применений трековые мембраны толщиной 20 мкм признаны более перспективными. Возможность их производства появилась лишь при использовании пучков ускоренных ионов с энергиями не ниже 1,5 МэВ/н.

## 2.2. Краткий обзор ускорителей, применяемых для производства трековых мембран и модификации полимеров

США. Тандем в Брукхейвенской национальной лаборатории (The Tandem Van de Graaff accelerators) используется для промышленного облучения и тестирования материалов [6]. Ускоритель состоит из двух 15-мегавольтовых электростатических генераторов (MP-6 и MP-7), каждый 24 м в длину, расположенных в линию. Ускоритель поставляет пучки

ускоренных ионов более чем 40 элементов, начиная водородом и заканчивая ураном. Максимальные энергии ионов Со и I (часто используемых для облучения полимеров) составляют 270 и 370 МэВ, соответственно [7].

Франция. Циклотронный комплекс ГАНИЛ включает в себя источник ионов на основе электронного циклотронного резонанса (источник ЭЦР), компактный циклотрон C02, и два циклотрона с разделенными секторами SSC1 и SSC2. В зависимости от потребности, может использоваться пучок низких энергий (после C02), либо пучок средней и высокой энергии (после SSC1 и SSC2, соответственно). Отдельно потребителям предоставляется пучок «сверхнизких» энергий от другого ЭЦР-источника. Для облучения полимерных пленок и производства трековых мембран в основном используется линия средних энергий (5-20 МэВ/н). Энергия ионов достаточно высока, чтобы пучок мог выводиться из вакуумной камеры на воздух сквозь металлическую фольгу. Интенсивности пучков Ar, Kr и Xe составляют  $10^{11} - 10^{12} \text{ с}^{-1}$ . Имеется специальный канал для проведения промышленных облучений. Вакуумная камера снабжена лентопротяжным механизмом, позволяющим обрабатывать полимерные пленки шириной до 50 см [8].

Бельгия. CYClotron of LOuvain la NEuve (CYCLONE) – компактная многоцелевая машина, используемая для фундаментальных и прикладных исследований, в том числе в промышленном масштабе [9]. Интервал энергий ускоряемых тяжелых ионов составляет 0,6-27,5 МэВ/н. ЭЦР-источник обеспечивает получение пучков ионов высокой зарядности и интенсивности. Облучение полимеров, в частности поликарбонатных пленок для производства трековых мембран, производится ионами  $^{40}\text{Ar}^{10+}$  с энергией 5,5 МэВ/н.

Германия. В институте Hahn-Meitner в Берлине создана ускорительная лаборатория (два инжектора различных типов + циклотрон) для исследований в области физики твердого тела, а также тестирования и модификации материалов. Для прикладных целей используются, например, пучки Kr и Xe с энергиями от 1.5 до 6 МэВ/н [11]. Создан специальный канал и камера для обработки полимерных пленок в промышленном масштабе.

В ГСИ (Дармштадт) на линейном ускорителе UNILAC в течение последних 20 лет проводятся интенсивные исследования воздействия пучков ускоренных ионов на материалы, в том числе исследования по трековым мембранам. Используется широкий спектр ионов – Xe, Au, Pb, U – со стандартной для данного ускорителя энергией около 11 МэВ/н, хотя для подавляющего большинства прикладных задач достаточно существенно меньшей энергии [14]. Для промышленных целей ускоритель практически не используется ввиду экономической нецелесообразности.

Россия. В Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ специализированный канал для облучения полимерных пленок на ускорителе У-300 был создан в

середине 70-х годов. Для производства трековых мембран и для исследовательских задач использовались пучки ионов Хе с энергией 1 МэВ/н. В течение последующих десятилетий ускорительный и аппаратный комплекс регулярно совершенствовался [12]. В настоящее время облучение полимеров проводится на выведенном пучке циклотрона У-400. Используются ионы более высокой энергии (например Кг, 2,5–5 МэВ/н), что позволило расширить номенклатуру выпускаемых трековых мембран. Камера облучения обеспечивает возможность обработки полимерных пленок шириной до 60 см, чтобы удовлетворить требованиям существующего стандарта в мембранной технике (фильтрпатроны 20 дюймов) [13].

Япония. Изохронный циклотрон AVF в Такасаки (JAERI) также является многоцелевой машиной, используемой, в том числе и для исследований с полимерными материалами [15]. Типичные пучки, используемые для облучения полимеров – ионы Кг и Хе с энергиями в несколько МэВ/н. На промышленном уровне данный ускоритель не используется.

Общим для всех перечисленных ускорителей является то, что интенсивности пучков, применяемых для практических приложений, составляют  $10^{11} \text{ с}^{-1}$  и выше. При меньших интенсивностях использование сложных и дорогих в обслуживании ускорительных установок экономически нецелесообразно. Энергии ионов составляют несколько МэВ/н. Это дает возможность обрабатывать полимерные пленки толщиной в несколько десятков микрометров. Перечисленные ускорители эксплуатируются в больших национальных или международных научных центрах, деятельность которых в основном направлена на фундаментальные исследования. Прикладные работы и коммерческие облучения составляют небольшой процент от всей научной программы, выполняемой на ускорителях. При выполнении прикладных работ возможности ускорителей в плане интенсивности пучков, как правило, используются полностью. Что же касается энергии и ассортимента ионов, то для подавляющего большинства технологических применений бывает достаточно двух-трех типов ускоряемой частицы и энергии в пределах 2 МэВ/н.

### 2.3. Особенности получения и свойства трековых мембран на основе различных полимеров

Мембраны на основе поликарбоната (ПК) и полиэтилентерефталата (ПЭТФ) являются в настоящее время коммерческими продуктами. Технология их производства хорошо отработана. Для облучения ПЭТФ пленок применяют ускоренные ионы с удельными потерями энергии  $dE/dx$  на уровне 6-10 МэВ/мкм. В указанном диапазоне  $dE/dx$  скорость травления треков в ПЭТФ принимает максимальные значения [19]. Пучки ионов Кг с

энергиями около 1 МэВ/н и 1,5 МэВ/н могут считаться оптимальными для бомбардировки ПЭТФ пленок толщиной 10 и 20 мкм, соответственно. Поликарбонат более чувствителен к радиационным воздействиям, вследствие чего для производства трековых мембран из ПК пленок могут применяться более легкие ионы, например Ar [10]. Химическое травление облученных ионами ПЭТФ и ПК пленок проводят в растворах щелочи. Варьируя условия химической обработки, получают мембраны с диаметрами пор от ~ 0,01 мкм до 10-12 мкм. Данный тип мембран остается на мировом рынке **уникальным в плане точности геометрического размера пор и узкого распределения пор по размерам** (рис 1). Их области применения связаны в основном с аналитическими приложениями, а также биологическими и медицинскими задачами. Мембраны характеризуются умеренной химической стойкостью и неплохой термостойкостью (до 120-150°C).

Для фильтрации агрессивных технологических сред были разработаны трековые мембраны из полипропилена (ПП) и поливинилиденфторида (ПВДФ) [20-22]. Эти полимеры отличаются высокой химической стойкостью, что позволяет использовать мембраны для очистки растворов крепких минеральных кислот и щелочей. С другой стороны, это же свойство существенно усложняет технологию травления. Химическое проявление треков проводится в растворах сильных окислителей при высоких температурах. Технические сложности, высокая токсичность отходов и конкуренция с другими типами химстойких фильтрующих материалов не позволили к настоящему времени организовать промышленное производство ПП или ПВДФ трековых мембран. Аналогичная ситуация имеет место в случае полиимидных мембран. Полиимид является чрезвычайно перспективным материалом, производство и потребление которого быстро растет. На основе полиимида были разработаны трековые мембраны с уникальной термической и радиационной стойкостью [21, 23]. Удовлетворительное качество мембран достигается лишь при облучении достаточно тяжелыми ионами (не легче криптона) [23]. Массовое производство этих типов трековых мембран может быть налажено при появлении достаточно крупного потребителя.

## 2.4. Модификация полимеров с использованием пучков тяжелых ионов: немембранные технологические применения

### 2.4.1. Микроэлектромеханические системы

В настоящее время значительное внимание уделяется разработке микроэлектромеханических систем, которые находят применение в био- и медтехнике. Часто они представляют собой полимерные микрочипы с характерным размером составляющих элементов порядка десятков-сотен микрон. В ряде случаев элементы микрочипа должны иметь отверстия

заданного размера. Задача может быть решена путем использования готового пористого материала, встраиваемого в микроструктуру [24]. Более элегантным является метод, когда отверстия необходимой геометрии создаются в матрице микрочипа при помощи метода ионных треков [25].

#### 2.4.2. Модификация поверхности

Сочетание техники травления ионных треков с методами гальванической металлизации, плазменных покрытий, вакуумного напыления и ламинирования открывает широкие возможности для новых технологий обработки поверхности и создания новых материалов. Ярким примером является получение гибких печатных плат с улучшенными механическими характеристиками и высокой износостойкостью. Технология включает облучение полиимидных фольг пучками ускоренных ионов под заданными углами на заданную глубину. Далее химическим травлением создается специфический «поверхностно-глубинный» рельеф, отличительная черта которого – наличие пересекающихся на глубине 4-6 мкм полых каналов. Последующая металлизация полимерной фольги позволяет получить пленочный композит полимер/металл, который служит прекрасным материалом для изготовления печатных плат [26].

#### 2.4.3. Анодные фольги для конденсаторов

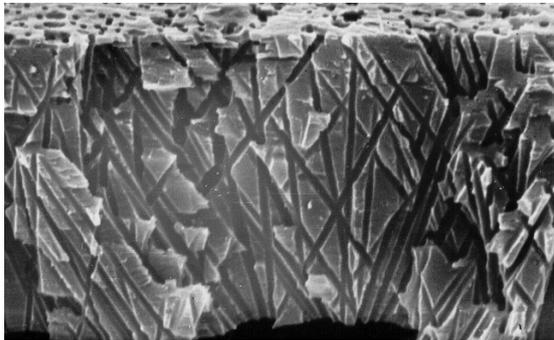
Сходная идея была успешно применена для создания анодных фольг, применяемых в электролитических конденсаторах. Анодная фольга представляет собой полимерную пленку с сильно развитой поверхностью, на которую нанесен слой пористого алюминия. Благодаря большой поверхности раздела между электролитом и металлом, конденсатор имеет существенно большую емкость при тех же габаритах [27]. Качество фольги существенно зависит от создаваемого методом ионных треков микрорельефа: от плотности пор, от их размера и формы, от глубины обработки. Подчеркнем, что такой «регулируемый» микрорельеф может быть достигнут только при использовании пучков ионов от ускорителя. Осколки деления, имеющие широкий спектр пробегов и широкий разброс по углам входа в полимер, не позволяют точно регулировать параметры микрорельефа.

Энергетический диапазон ионных пучков для данной технологии – примерно от 0,5 до 1 МэВ/н.

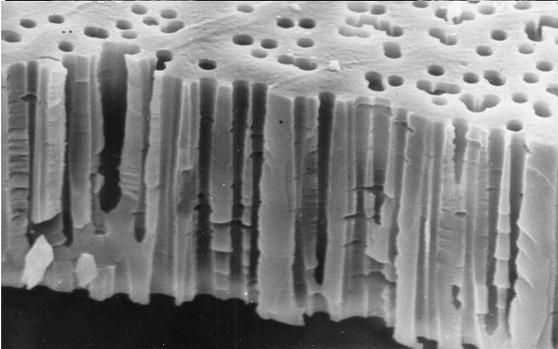
#### 2.4.4. Защитные знаки

Защита товаров и документов от подделки является сейчас весьма актуальной задачей. Интересное решение проблемы основано на уникальных оптических свойствах системы протравленных треков. Любой участок трековой мембраны представляет собой 3-мерную структуру, характеризующуюся числом пор, их диаметром и длиной, их координатами

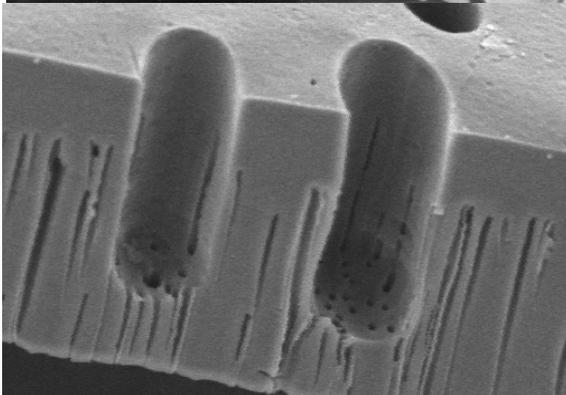
и углами наклона. Воспроизводство (копирование) такой микроструктуры существующими оптическими, механическими, литографическими или ксерографическими методами практически невозможно. Облучая ионами полимерные пленки через маски, можно также получать макроизображения, которые вкупе с микроизображением, состоящим из отдельных треков, служат в качестве идентификационных и защитных знаков [28, 29]. Характеристики макроизображения оцениваются визуально или с помощью оптических приборов (например, измерение индикатрисы рассеяния). Микроизображение считывается при помощи оптического микроскопа, запоминается и анализируется компьютером. Данный принцип может быть реализован множеством различных способов и применен для защиты юридических документов, банкнот, пластиковых карт и других объектов. Необходимым инструментом для получения защитных знаков является источник тяжелых ионов с энергией 1-1,5 МэВ/н.



Поликарбонатная трековая мембрана с непараллельными каналами пор. Толщина мембраны 10 мкм, диаметр пор 0,2 мкм



Полипропиленовая трековая мембрана с параллельными каналами пор. Толщина мембраны 20 мкм



«Микроколодцы» с пористым дном в поликарбонатной пленке толщиной 60 мкм

Рис.1. СЭМ фотографии некоторых микроструктур, полученных путем облучения полимерных пленок ускоренными тяжелыми ионами и последующим химическим травлением

### 3. Вопросы создания нано- и микроструктур на основе ядерных мембран

Нанокристаллические материалы представляют собой особое состояние конденсированного вещества - макроскопические ансамбли ультрамалых частиц с размерами до нескольких нанометров. Необычные свойства этих материалов обусловлены как особенностями отдельных наноструктур (нанокристаллитов), так и их коллективным поведением, зависящим от характера взаимодействия между наночастицами. Нанокристаллические материалы находят широкое применение в различных областях, включая биомедицину, химию, физику, электронику, и материаловедение.

Подавляющее большинство исследований нанокристаллических материалов так или иначе сосредоточено вокруг нескольких проблем. Приоритетная из них связана с получением наноматериалов и включает в себя как технологические аспекты, так и научные. Структура и дисперсность (распределение наночастиц по размерам), а следовательно, и свойства нанокристаллических материалов зависят от способа их получения.

Наиболее широкое применение наноматериалы найдут в качестве конструкционных материалов новых тонких технологий (благодаря специфическому сочетанию механических свойств), материалов микроэлектроники (в этом случае речь идет о влиянии нанокристаллического состояния на электронную структуру) и материалов для микроинженерии (формирование специфических металлических наноструктур для прямого применения).

В соответствии с этим приобретают важность работы с использованием ускорительной базы по следующим направлениям:

- ионно-имплантационный синтез нано-размерных кластерных структур (радиационных дефектов и фаз выделений) в объеме твердого тела;
- формирование металлических наноструктур (нанопроволочки и субмикронные трубочки, нанокластеры на поверхности твердых тел), с использованием «шаблонной» технологии на базе трековых мембран.

#### 3.1. Ионно-имплантационная нанотехнология

По этому направлению развиваются работы, связанные с поиском новых современных технологий для управления свойствами твердых тел (полупроводники, металлы, полимеры и т.д.), основанные на формировании и синтезе в их объеме наноразмерных многокомпонентных фаз выделений, кристаллитов, дефектных структур. Это направление в настоящее время составляет одну из главных проблем ведущих технологических центров мира, работающих в области нанотехнологий. Особое место в этих

исследованиях занимают эффекты самоорганизации наночастиц в условиях ионной имплантации, позволяющие обойти значительные технологические сложности квантовой инженерии.

Основное направление подобных работ - формирование и синтез в объеме различных твердых тел наноразмерных трехмерных структур с высокой объемной плотностью, в идеальном случае – это формирование в объеме твердого тела упорядоченной решетки из нановыделений. Подобное обстоятельство можно обеспечить либо целенаправленным использованием определенных специфических радиационно-индуцированных условий самоорганизации наночастиц в упорядоченную объемную решетку, либо обеспечить условия дифференциации этапов «зарождения» и «роста» подобных наночастиц.

В отличие от планарных технологий плотность активных элементов в таких наносистемах (нанокompозитах) может быть доведена до  $10^{19} \text{ см}^{-3}$  при регулярности, сравнимой с кристаллическими средами. Проведены эксперименты, показавшие возможность формирования, например, трехмерной решетки гелиевых пор в различных металлических средах и в аморфном кремнии.

В последнее время в связи с развитием нанотехнологий требуется решение задач формирования на поверхности и в объеме твердых тел монодисперсных наноразмерных выделений различных фаз с высокой поверхностной и объемной плотностью. Управляя микроструктурой нановыделений (средний размер, ориентация, кристаллическая структура), удается контролировать электронные и магнитные свойства системы и использовать эти материалы в новых сенсорных и информационных системах. Для этого решаются задачи разделения процессов зарождения и роста нановыделений и обеспечения условий их самоорганизации как на поверхности, так и в объеме твердого тела. Один из результатов в этом направлении – формирование в объеме твердого тела трехмерной сверхрешетки выделений атомов гелия в виде газовых пор, например, в аморфном слое кремния (Рис.2а) и в различных металлах (алюминии, никеле, молибдене и нержавеющей стали после облучения ионами гелия с энергией 17 кэВ в ионном источнике типа ЭЦР).

С одной стороны, изучение условий формирования этой упорядоченной системы гелиевых пор, например, в кремнии имеет самостоятельный технологический интерес, например, с позиции создания объектов, люминисцирующих в видимой области света. С другой, открываются перспективы по разработке технологий заполнения этих пустот другими материалами, например, оптически активными средами, с целью создания источников стимулированного оптического излучения в различных сенсорных микроструктурах.

Кроме того, эта система упорядоченных гелиевых пор может служить центром для ионно-имплантационного синтеза упорядоченных структур

нанокристаллитов других многокомпонентных фаз в объеме твердотельной матрицы как из полупроводников, так и из металлов.

На рис.2 дан пример формирования нанокристаллов кремния в аморфном слое кремния с использованием упорядоченной структуры из гелиевых нанопор.

Разработаны методики [30], дающие возможность создания трехмерных сверхрешеток нанокомпозитов различного назначения с плотностью активных элементов на несколько порядков превышающих физические пределы планарных технологий, и, следовательно, открывающая широкие возможности создания нанoeлектронных систем и приборов нового поколения.

Другой, не менее сложной, задачей ионной модификации материалов является задача синтеза новых фаз в материалах. Реализация условий синтеза сверхтвердых фаз типа карбида бора, карбонитрида бора и др. – это современная актуальная прикладная задача ионной модификации материалов. По нашему мнению, успешное развитие технологий этого типа возможно по пути развития нового направления ионной модификации – использования многокомпонентных пучков заряженных частиц [31]. Реализация таких условий возможна с использованием ЭЦР-источника, который позволяет в одном пучке иметь ионы разных элементов (С, N, В, О и др), сепарированные по величине  $M/Z$ . При этом, что является определяющим, обеспечиваются условия формирования от каждой частицы в многоэлементном пучке идентичных профилей ионного легирования в облучаемом объекте.

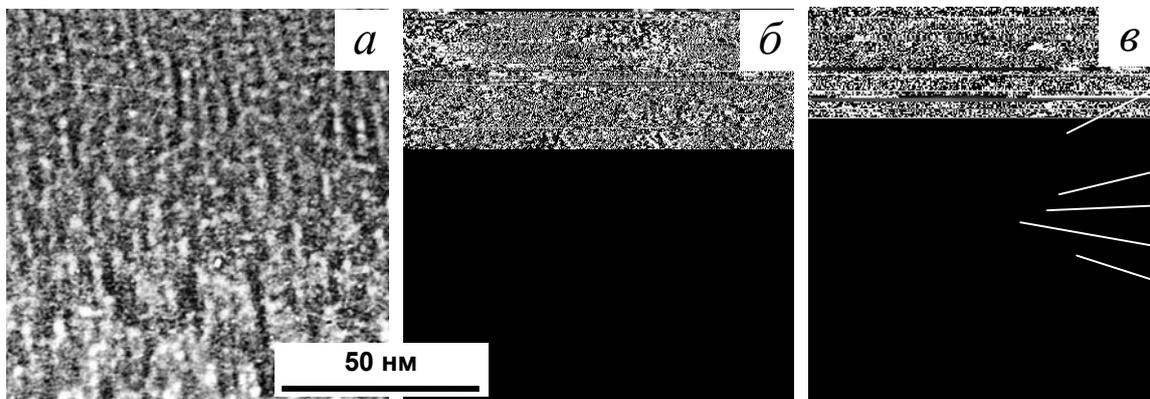


Рис.2. а – упорядоченные гелиевые нанопоры в аморфном слое кремния.  
 б – нанокристаллы в аморфном слое с гелиевыми порами после отжига при  $580^{\circ}\text{C}$ .  
 в – электроннограмма с участка образца с нанокристаллами.

### 3.2. Технологические и прикладные аспекты формирования и использования ядерных треков в твердых телах

В последнее время проявляется повышенный интерес к

использованию ядерных треков для формирования одномерных (с высоким базовым размерным отношением) наноструктур из различных материалов, в частности, из металлов и сплавов в виде нанопроволочек и микротрубочек, с помощью так называемой шаблонной технологии. С этой целью в качестве матрицы-шаблона рассматривается возможность использования травленных ядерных треков в полимерных материалах. Эту методику можно рассматривать как альтернативу литографическому методу.

Производство таких субмикронных объектов весьма перспективно, например, в области микромеханики, где высокие значения поперечного к продольному размеру являются определяющими. Получение реплик с травленных треков путем гальванического осаждения в них металлов является первым шагом для развития микротехнологий на базе трековых мембран.

Техника травленных треков - это уникальный инструмент для производства статистически распределенных отверстий в полимерных материалах на заданной площади и с заданной плотностью. Начальный диаметр получаемых пор около 10 нм увеличивается линейно со временем травления. Длина пор зависит только от толщины используемых полимерных пленок и составляет от единиц до 100 мкм. В качестве полимерных материалов наибольшее применение нашли полиэтилентерефталатовые (ПТФ) пленки толщиной 10-20 мкм.

Интерес к использованию «шаблонной» нанотехнологии на базе трековых мембран проявился лишь в конце 90-х годов, когда они стали реально рассматриваться как объекты для практического использования в нано- и субмикроструктурной технике, поэтому многие инструментальные и технологические аспекты этого направления находятся лишь в начальной стадии развития [32].

К настоящему времени разработана технология изготовления трековых мембран с диаметром пор от нескольких нанометров до десятков микрон, различных геометрических форм: цилиндрические, конические, типа «песочные часы» и т.п.

Нанопроволочные и микротрубочные структуры формируются заполнением пористой матрицы трековых мембран различными материалами. Процесс заполнения осуществляется электрохимическим или химическим осаждением, внедрением жидкого материала при высоком давлении.

Проведенные по специально разработанным технологиям экспериментальные работы по формированию металлических нанопроволочек различного диаметра и геометрического профиля и их выращивания на массивных подложках [33], а также по реализации условий металлизации внутренней поверхности травленного трека вплоть до получения системы металлических микротрубочек (Рис.3) [34], показали

возможность образования уникальных одномерных металлических наноструктур с высоким базовым отношением.

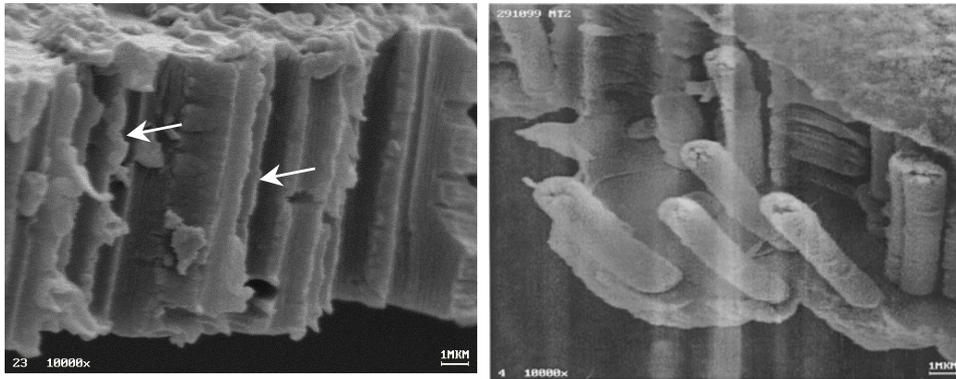


Рис.3. РЭМ – изображения медных субмикронных трубочек: а – после разрушения вместе с трековой мембраной, б – не разрушенные микротрубочки

Применение шаблонной технологии производства металлических нанопроволочек наиболее перспективно при разработках полевых электронных эмиттеров, биосенсоров, новых материалов для магнитных дисков, магнитных сенсоров с использованием эффекта гигантского магнитного сопротивления, анизотропных оптических фильтров, синтеза монокристаллических стержней для коллоидных растворов и т.д.

Микротрубочки могут найти применение в световодных микросистемах, в системах дифференциального пропускания анионных или катионных молекул, при разработке датчиков микровибраций, при производстве микроконтейнеров для медицинских препаратов, токсичных и радиоактивных веществ и т.д.

### 3.3. Научные аспекты радиационного повреждения и формирования ионных треков в твердых телах

Известно, что тяжелые ионы больших масс и большого электрического заряда, проходя через вещество, сильно изменяют свойства кристаллической решетки. Часть составляющих ее атомов оказывается смещенной или выбитой, а рядом с ними из растративших свою энергию и остановившихся ионов образуются новые атомы. Поскольку свойства вещества определяются его химическим составом и структурой кристаллической решетки, с помощью специально подобранных пучков ионов можно воздействовать на физико-химические и механические свойства облучаемого образца. Это эффективный, экономически и экологически выгодный способ получать заданные свойства не всего объема материала, а только необходимой его части.

Такие возможности являются основой многочисленных применений пучков тяжелых ионов. Основанная на применении пучков тяжелых ионов

"тонкая ядерная технология" вызвала подлинную революцию в методах, используемых в самых различных отраслях науки и техники.

Если говорить о возможностях сегодняшнего дня, то с помощью пучков тяжелых ионов сейчас удается изменять свойства поверхности материала и его слоев на глубину вплоть до нескольких десятков микрон. Уже сегодня пучки тяжелых ионов широко используются в электронной промышленности для легирования полупроводниковых материалов. Таким путем можно вводить атомы любого элемента в любой заданный материал и создавать аморфные и диэлектрические слои в полупроводниках.

Следует отметить, что и ранее, и сейчас используются, в основном, тяжелые ионы, ускоренные до энергий в 10-100 кэВ.

Практическое применение высокоэнергетичных тяжелых ионов (ВЭТИ) сдерживается прежде всего малочисленностью соответствующих высокопоточных ускорителей, а также недостаточной изученностью физики радиационного повреждения твердых тел тяжелыми ионами.

В этой связи планомерное освоение нового прикладного поля «тонкой ядерной технологии», использующей ВЭТИ, идет по четырем основным направлениям:

- теоретические и экспериментальные исследования физики радиационного повреждения,
- радиационные эффекты от единичных актов взаимодействия ВЭТИ с твердым телом,
- радиационно-ионная и ионно-трековая модификация материалов применительно к нанотехнологиям.

Более того, современное понимание основных механизмов взаимодействия между ионами и веществом и, следовательно, более широкое знание об индуцированных повреждениях модификациях в материалах, приводит к расширению и развитию применений таких модифицированных материалов в различных областях науки и техники.

Для того чтобы успешно управлять изменениями свойств облучаемых материалов и находить пути к оптимизации этих изменений прежде всего необходимо знать, как тяжелая частица отдает свою энергию, двигаясь в веществе.

Независимо от типа твердого тела (металл, полупроводник, диэлектрик, полимер) быстрая частица, попадая в него, вовлекается в непрерывный процесс взаимодействия с его атомами и электронами, передавая им свою энергию. При этом возможны три основных процесса взаимодействия:

- возбуждение электронов мишени и энергетическая релаксация в атомах мишени (т.н. неупругая часть потери энергии);
- прямой переход кинетической энергии к атомам вещества (упругая часть потери энергии);

- имплантация чужих атомов (стабильных или радиоактивных) внутрь материала (ионное легирование).

Изучение и понимание этих фундаментальных физических процессов взаимодействия частиц с твердым телом как в отдельном, так и в их синергетическом действии является определяющей основой их практического использования для радиационно-ионной модификации материалов.

Для быстрых ионов с кинетической энергией более 1 МэВ/нуклон интенсивность выделения энергии в электронную подсистему в  $10^3$ - $10^4$  раз превышает выделение энергии в ядерную подсистему. Эта величина может составлять несколько МэВ/мкм. Высокая скорость выделения энергии в электронную подсистему увеличивает вклад электронных возбуждений и инициирует ряд специфических «эффектов» радиационного повреждения таких, как, например, формирование ионных треков, в области которых могут инициироваться процессы: локального плавления, аморфизации, создания необычных фаз (фазы высокого давления), генерация ударных волн и разрушение материала.

Благодаря своим размерам (диаметр – единицы нанометров, длина – десятки-сотни микрометров) и возможным вышеописанным состояниям материала в области ионных треков последние эффективно влияют на физико-механические свойства облучаемого вещества.

Ионные треки экспериментально были обнаружены более 40 лет тому назад. Однако до сих пор нет общепринятого объяснения этого явления. Одни авторы считают, что ионные треки образуются в результате создания в них высоких температур (модель термопика). Другие – придерживаются механизма т.н. “кулоновского взрыва”. При этом предполагают т.н. пороговую величину потери энергии частиц на ионизацию, выше которой материал становится чувствительным к образованию ионных треков.

Экспериментально ионные треки зафиксированы в ограниченном классе материалов, в частности, в диэлектриках, полимерах, в некоторых металлических сплавах и полупроводниках. К сожалению, в ряде практически важных металлах и сплавах, а также в кремнии, пока не удалось сформировать трековую структуру. При этом предполагают т.н. пороговую величину потери энергии частиц на ионизацию, выше которой материал становится чувствительным к образованию ядерных треков. В этой связи предпринимаются попытки изменением геометрических размеров и/или фазовоструктурного состояния этих материалов получить экспериментальный факт образования в них ионных треков.

С помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) получены свидетельства формирования ионных треков в тонкой кристаллической пластинке кремния не только в результате облучения высокоэнергетичными (710 МэВ) тяжелыми ионами  $\text{Bi}^+$  (рис.4а), когда величина ионизационных потерь энергии составляет около 20 МэВ/мкм, но и

после облучения ионами  $Kr^+$  с  $E=245$  МэВ (около 10 МэВ/мкм) (рис.4б). В последнем случае траектория движения ионов криптона была параллельна поверхностям тонкой (0,2 мкм) пластины кремния.

Неожиданным явилось и образование видимых в ПЭМ одномерных наноразмерных структурных особенностей вдоль траектории движения низкоэнергетичных (17 кэВ) ионов гелия в аморфном слое кремния, насыщенного атомами гелия до концентрации около 10 ат.% (рис.1в) [35].

Эти результаты еще раз свидетельствуют о важной роли в образовании дефектной структуры вдоль траектории движения заряженных частиц не только величины ионизационных потерь, но и как геометрического размера, так и структурно-фазового состояния материала мишени, в частности, например, наличия высокой концентрации газа.

Наряду с потерей энергией на ионизацию, высокоэнергетичные ионы теряют свою энергию и на упругие столкновения с атомами твердого тела. Атомы среды поглощают энергию, превышающую их энергию связи в твердом теле, порождая вакансии и междоузельные атомы. Некоторая часть первично-выбитых атомов (ПВА) в результате взаимодействия с бомбардирующей частицей получает энергию, достаточную для приведения в движение других вторично-выбитых атомов. Возникает каскад движущихся атомов. В результате прохождения и остановки каскада, возникает определенное число вакансий и междоузельных атомов (радиационных дефектов). Изменение физико-механических свойств облученного материала обусловлено радиационными дефектами, составляющими первоначальное радиационное повреждение. Поэтому основной задачей является точное описание структуры первичного повреждения и экспериментальные исследования вопросов формирования каскадного повреждения в зависимости от энергии, массы и заряда бомбардирующих ионов и её термической стабильности.

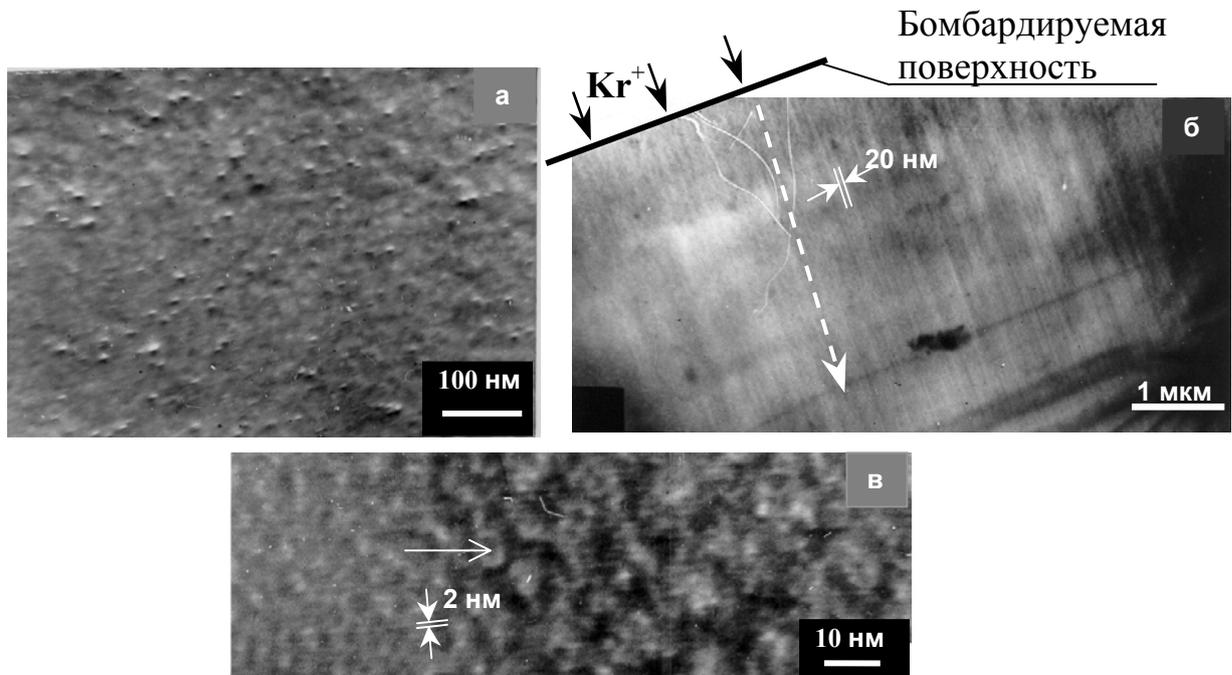


Рис. 4. ПЭМ-изображения ионных треков в кремнии: а - планарное облучение ионами Вi с энергией 710 МэВ ( $10^{12}$  см<sup>-2</sup>), б – облучение в геометрии “cross-section” ионами Кr с энергией 245 МэВ ( $10^{13}$  см<sup>-2</sup>), в - облучение в геометрии “cross-section” ионами He с энергией 17 кэВ ( $5 \times 10^{17}$  см<sup>-2</sup>)

Энергетический спектр ПВА имеет определяющее значение на этапе зарождения и развития каскадов смещений в облучаемом материале, поэтому от него зависит и дальнейшая судьба радиационных дефектов, их температурная устойчивость, склонность к кластеризации и т.д.,

Для расчета полного числа смещений необходимо прежде всего получить энергетические спектры ПВА от упругих и неупругих взаимодействий ВЭТИ с атомами мишени, а затем, на основе тех или иных модельных представлений, определить энергию повреждаемости и выбрать модель создания вторичных смещений. Поэтому для предсказания характера радиационного повреждения важно как можно более точно определять упругие и неупругие потери энергии.

Энергетический спектр ПВА от упругого рассеяния связан с дифференциальным сечением упругого рассеяния. Для получения неупругого спектра ПВА необходимо знание интегрального сечения всех неупругих процессов. Если расчеты спектров ПВА от упругого рассеяния достаточно просты для всех ионов, то корректный учет неупругого взаимодействия возможен только для высокоэнергетичных протонов и альфа-частиц [36].

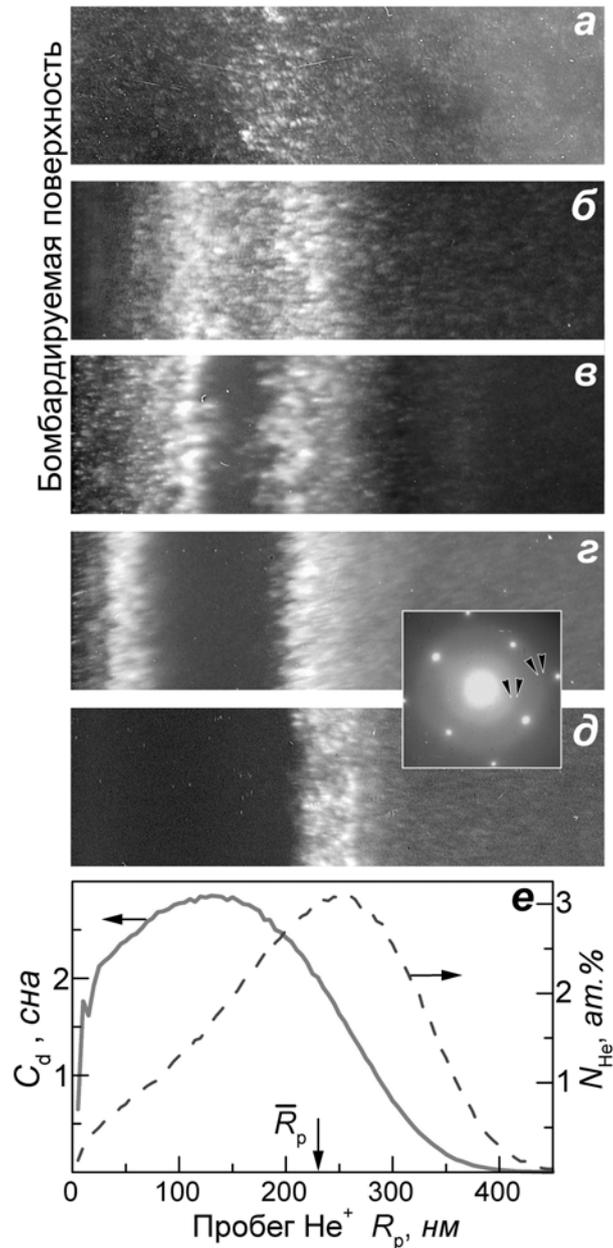


Рис.5. Формирование аморфного слоя кремния вдоль пробега ионов He с  $E=17$  кэВ (а –  $3 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ , б –  $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ , в –  $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ , г –  $1,5 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ , д –  $3,3 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ )

В основном в настоящее время изучаются процессы каскадного и субкаскадного дефектообразования с целью моделирования радиационных эффектов в ядерных и термоядерных реакторах. Однако актуальным является изучение формирования дефектной структуры и ее самоорганизации в неравновесных условиях дефектообразования в конце траектории движения частиц, в которых реализуются высокие градиенты скоростей смещений и упругих напряжений. Это может привести к разделению потоков радиационно-индуцированных вакансий и междоузельных атомов и связанных с ними примесных атомов, что может быть причиной перераспределения примесей и легирующих атомов и формированию из них пространственных периодических структур.

Изучение этого процесса важно для контролируемого формирования ионно-модифицированных слоев в полупроводниках.

Другой важной особенностью, требующей фундаментальных исследований, является возможность синергетического влияния накопления радиационных дефектов и легирующих примесей. При определенных отношениях количества радиационных дефектов и примесей возможны качественные изменения характера радиационного повреждения твердого тела. Примером этого может служить наши эксперименты по реализации возможности аморфизации кремния легкими заряженными частицами, например, ионами гелия с энергией 17 кэВ. При определенной величине «концентрация дефектов/концентрация гелия», например, 90 смещений на атом гелия, реализуются условия для аморфизации кристаллического кремния (Рис.5) [37].

#### **4. Выбор циклотрона DC-60 в качестве базовой установки междисциплинарного научно-исследовательского комплекса**

Материал, изложенный в предыдущем разделе, дает основания для следующего заключения. Наиболее оптимальным с точки зрения энергопотребления, габаритов, радиационной опасности, экономических показателей получаемых ядерных мембран и других ядерных технологий, является циклотрон с ЭЦР-источником тяжелых ионов с энергией ионов 1,5-1,7 МэВ/н.

Мониторинг рынка производителей циклотронной техники показывает, что из предлагаемых на рынке ускорителей наиболее подходящим для указанных целей следует признать циклотрон DC-60 разработки ОИЯИ (г. Дубна, РФ).

##### **4.1. Проект специализированного ускорителя DC-60 для междисциплинарного лабораторного комплекса при Евразийском национальном университете им. Л.Н.Гумилева**

Циклотронный комплекс DC-60 предназначен для прикладных исследований, которые могут проводиться как на пучках ионов ЭЦР источника с напряжением экстракции до 25 кВ, так и на ускоренных ионах от углерода до ксенона. Энергия выведенных частиц может варьироваться от 1.66 до 0.9 МэВ/нукл. при ускорении на 4 гармонике и от 0.8 до 0.4 МэВ/нукл. при ускорении на 6 гармонике. Циклотрон имеет четыре 50° сектора, с два 40° дуанта, расположенных в долинах магнита. Вывод пучка осуществляется электростатическим дефлектором.

##### **4.1.1. Общее описание**

Циклотрон разработан на базе компактного магнита весом приблизительно 74 тонны. Две катушки, установленные на верхнем и

нижнем полюсах обеспечивают возбуждение магнита. Формирование магнитного поля в ускорителе будет выполнено с помощью железных масс – шимм. Использование корректирующих катушек не предполагается.

Основные параметры магнита циклотрона представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Основные параметры магнита циклотрона DC-60

Магнит циклотрона	
Среднее магнитное поле	1.6 Т
Диаметр полюса	162 см
Зазор в холме	4.6 см
Зазор в долине	14 см
Число секторов	4
Угол сектора	50 °
Длина магнита	3.5 м
Ширина магнита	1.6 м
Высота магнита	1.9 м
Вес железа	74 тонн

Таблица 2. Параметры основной обмотки магнита

Основная обмотка	
Потребляемая мощность	33 кВт
Вес меди	5.5 тонн
Число ампервитков	167 000

#### 4.1.2. Источник ионов

Источник ионов электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) - один из основных узлов ускорителя. Он может работать как инжектор тяжелых ионов в циклотрон для получения пучков ионов высокой энергии, так и в автономном режиме, обеспечивая проведения экспериментов на пучках низкой энергии. Рабочая частота ЭЦР источник - 14 ГГц. Разрядная камера источника изолирована на напряжение до 25 кВ. Извлечение ионов из плазмы осуществляется двумя элементами - плазменным электродом и подвижным пуллером.

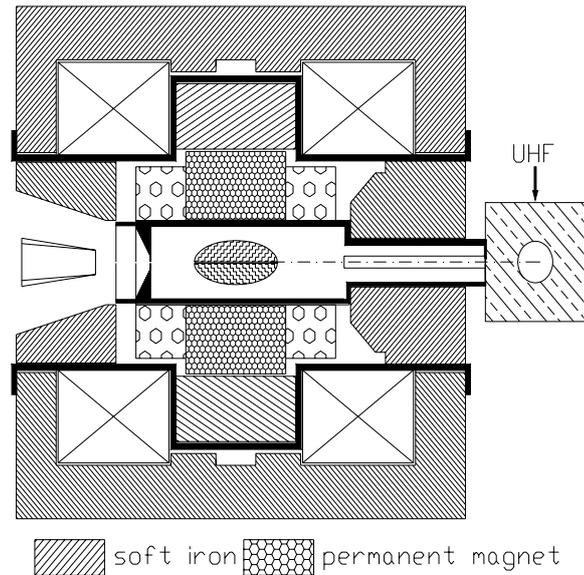


Рис. 6. Схема ионных источников электронно-циклотронного резонанса DECRIS-2 и DECRIS-3.

В ОИЯИ были изготовлены несколько источников ионов типа ЭЦР, которые являются прототипом для источника ионов циклотрона DC-60. Экспериментальные параметры пучков ЭЦР источника для циклотрона DC-60 в обычном режиме эксплуатации представлены в Таблице 3.

Таблица 3. Интенсивность пучков ионов (eμA) ЭЦР источника для циклотрона DC-60 в обычном режиме эксплуатации (Q - заряд иона).

Q	1+	2+	4+	5+	6+	7+	8+	9+	10+	11+	12+	13+	17+	19+	21+
<sup>4</sup> He	1000	100													
<sup>7</sup> Li	100	100													
<sup>11</sup> B		100	20												
<sup>14</sup> N			250	250	20										
<sup>16</sup> O			250	250	100	20									
<sup>20</sup> Ne			100	100	60	35	20								
<sup>40</sup> Ar							200	100	~50	30					
<sup>84</sup> Kr							70	50	40	30	20	20			
<sup>132</sup> Xe												30	15	15	5

#### 4.1.3. Система аксиальной инжекции пучка

Для транспортирования луча от ЭЦР источника ионов в центр циклотрона используется эффективная система аксиальной инжекции пучка состоящая из:

- фокусирующих элементов,
- анализирующего магнита,
- диагностических элементов,
- банчера,
- вакуумных насосов,
- электростатического инфлектора.

Система аксиальной инжекции пучка оборудована дополнительным каналом, для проведения исследований на пучках ионов с энергией инжекции. Напряжение инжекции может меняться в пределах от 12 до 25 кВ. Предварительная схема системы аксиальной инжекции пучка показана на рис. 7.

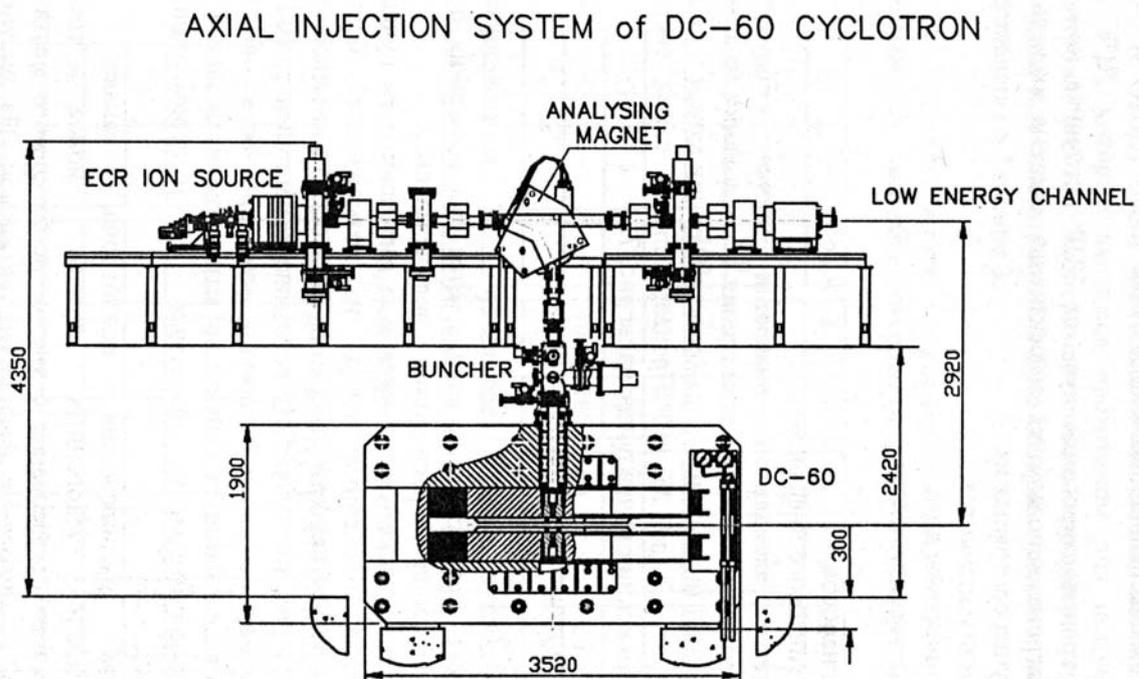


Рис. 7. Предварительная схема системы аксиальной инжекции пучка циклотрона DC-60

#### 4.1.4. Вывод пучка

Электростатический дефлектор с напряженностью электрического поля 75 кВ/см используется для выведения пучка ионов из циклотрона. Он расположен в долине магнита.

Таблица 4 показывает ожидаемые интенсивности пучков и энергии ионов, оцененные исходя из возможностей ионного источника и эффективности ускорения. При оценке интенсивности ускоренного пучка ток пучка ЭЦР источника ограничивался 100  $\mu\text{A}$ , так как экспериментально

известно, что при более высокой интенсивности сказывается влияние пространственного заряда, что требует дополнительных расчетных и экспериментальных исследований.

Таблица 4: Ускоренные и выведенные пучки DC-60

Ion	E, MeV/n	E, MeV	I <sub>extracted</sub> , pps
<sup>12</sup> C	0.42	5.0	1·10 <sup>14</sup>
	1.67	20	6·10 <sup>13</sup>
<sup>14</sup> N	1.22	17	6·10 <sup>13</sup>
	0.94	15	6·10 <sup>13</sup>
<sup>16</sup> O	0.66	12.6	6·10 <sup>13</sup>
	1.5	28	4·10 <sup>13</sup>
<sup>20</sup> Ne	0.6	12	6·10 <sup>13</sup>
	1.35	27	4·10 <sup>13</sup>
<sup>32</sup> S	0.53	16.9	4·10 <sup>13</sup>
	0.94	30	3·10 <sup>13</sup>
	1.46	47	2·10 <sup>13</sup>
	0.44	15.4	4·10 <sup>13</sup>
<sup>35</sup> Cl	0.78	27.4	3·10 <sup>13</sup>
	1.22	43	6·10 <sup>13</sup>
<sup>40</sup> Ar	0.6	24	3·10 <sup>13</sup>
	0.94	38	2·10 <sup>13</sup>
	1.35	54	2·10 <sup>13</sup>
	0.42	35	8·10 <sup>12</sup>
<sup>84</sup> Kr	0.54	45.7	7·10 <sup>12</sup>
	0.69	57.9	6·10 <sup>12</sup>
	1.03	86	3·10 <sup>12</sup>
	1.22	103	3·10 <sup>12</sup>
	1.44	121	2·10 <sup>12</sup>
	1.67	140	2·10 <sup>12</sup>
<sup>132</sup> Xe	0.42	55	3·10 <sup>12</sup>
	0.5	65.5	3·10 <sup>12</sup>
	0.58	76.8	3·10 <sup>12</sup>
	0.67	89.9	2·10 <sup>12</sup>
	0.77	102.3	2·10 <sup>12</sup>
	1.0	132	1·10 <sup>12</sup>
	1.12	147	1·10 <sup>12</sup>
	1.24	164	1·10 <sup>12</sup>
	1.38	182	1·10 <sup>12</sup>
	1.52	200	1·10 <sup>12</sup>
	1.67	220	1·10 <sup>12</sup>

Схема расположения циклотрона, каналов для транспортировки ускоренных пучков ионов требует дополнительного согласования с учетом необходимого места для размещения оборудования физических установок. На рисунке 8 показан вариант расположения ускорителя и каналов транспортировки, требующий минимальной рабочей площади.

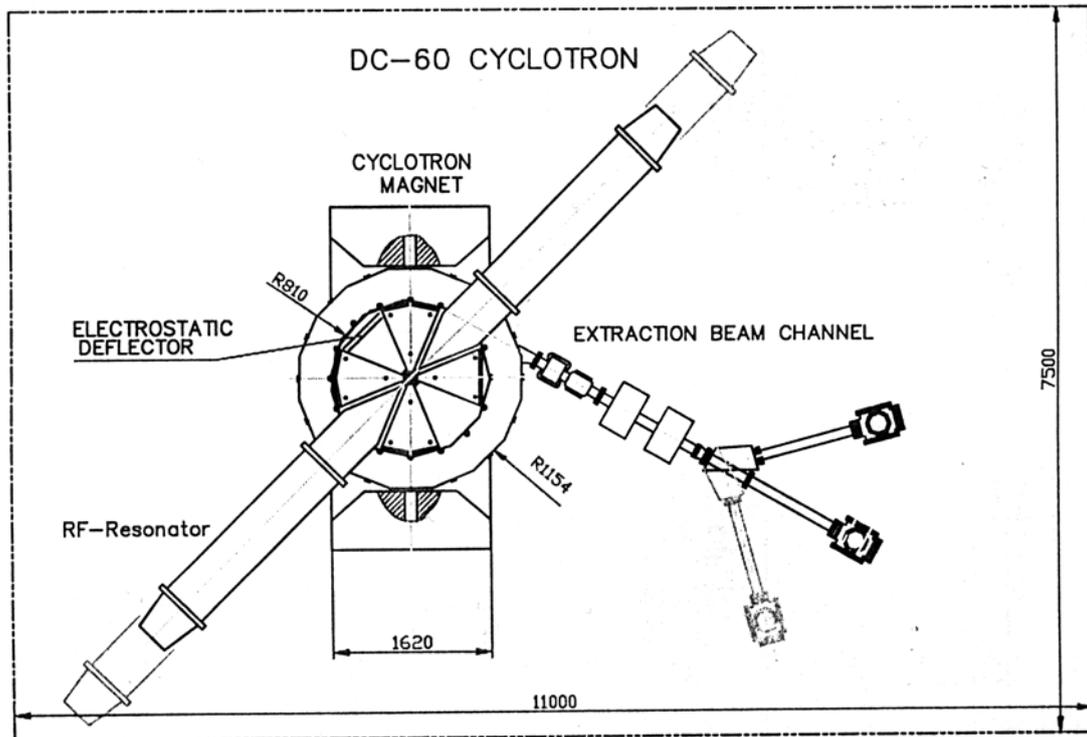


Рис . 8. Схема расположения циклотрона DC-60 и каналов транспортировки

## 5. Вопросы развития науки

Создание междисциплинарного научно-исследовательского комплекса на базе ускорителя тяжелых ионов и физический пуск базовой установки является необходимым, но не достаточным условием полноценного функционирования комплекса в целом.

Опыт показывает, что функционирование комплекса в целом требует создания полноценной научной среды вокруг него. Однако, одинаково неприемлемы как попытки развития совершенно новых, еще не апробированных научных направлений, так и замыкание только на технических и производственных проблемах.

Наиболее приемлемым для конкретных условий функционирования в ЕНУ им. Л.Н. Гумилева междисциплинарного научно-исследовательского комплекса на базе ускорителя тяжелых ионов является создание научной среды на основе многолетнего опыта ИЯФ НЯЦ РК по развитию научных направлений с использованием ускорительной техники (см. например [1]). На базе имеющихся в ИЯФ НЯЦ РК ускорителей успешно развивались и развиваются научные направления по радиационной физике твердого тела и ядерной физике. Поэтому развитие научных исследований и формирование связанной с междисциплинарным научно-исследовательским комплексом на базе ускорителя тяжелых ионов научной среды в ЕНУ им. Л.Н. Гумилева

будет происходить в русле хорошо апробированных научных направлений и в рамках выполняемых в ИЯФ НЯЦ РК утвержденных научных программ.

### 5.1. Направления исследований в области радиационной физики твердого тела

Радиационная физика твердого тела возникла как прикладной раздел физики твердого тела - радиационное материаловедение, основной задачей которого была разработка конструкционных материалов для атомных реакторов. Экономическая рентабельность обеспечивается длительностью и безопасностью эксплуатации ядерных установок и, в значительной степени, определяется свойствами конструкционных материалов, т.е. их способностью длительное время работать без разрушения в сильно неравновесных условиях – комплексного воздействия различных видов излучения, градиентов температур и механических напряжений. Однако, практически с самого начала исследований в области радиационной физики твердого тела стало ясно, что решить актуальные практические проблемы можно только на основе глубокого понимания процессов происходящих в материалах в сильно неравновесных условиях. Решение задачи создания радиационно-стойких материалов невозможно без знаний физики взаимодействия излучения с веществом, закономерностей формирования и релаксации радиационных дефектов в условиях генерации дефектов и действия градиентов температур и полей напряжений. Т.е. радиационное материаловедение стимулировало развитие физики в направлении изучения поведения материала в сильно неравновесном состоянии и одновременном воздействии различных факторов. Успешное развитие радиационной физики твердого тела, причем как фундаментального, так и прикладного характера было бы не возможным без ускорительной техники, т.к. только использование ускорителей позволяет достаточно легко создавать определенный тип и концентрацию дефектов, контролировать условия облучения. В свою очередь, успехи, достигнутые в понимании фундаментальных свойств радиационных дефектов, стимулировали развитие ускорительной техники и появление новых прикладных направлений радиационной физики – радиационных технологий.

Появление сильноточных ускорителей тяжелых ионов дало новый импульс исследованиям в области радиационной физики твердого тела и привело к появлению нового направления физики твердого тела: модификации свойств материалов посредством радиационной обработки, и в первую очередь ионной имплантации. Ограниченный диапазон свойств твердых материалов является основной причиной, сдерживающей успешное развитие технологий их обработки. Использование интенсивных корпускулярных пучков уже в настоящее время обеспечивает осуществление целенаправленной модификации свойств основных конструкционных

металлов и сплавов, а также позволяет создавать новые уникальные свойства. На широком классе металлов, сплавов и изделий из них продемонстрировано реальное улучшение таких эксплуатационных характеристик, как износостойкость, усталостная прочность при длительных циклических нагрузках, коррозионная и эрозионная стойкость. Улучшение этих характеристик значительно повышает надежность и ресурс работы изделий. Хорошие результаты дает комплексное сочетание химико-термических методов, ионной имплантации и интенсивного электронного облучения, например, исследования по так называемой дуплексной обработке сплавов с предварительной имплантацией их поверхности тяжелыми ионами и последующим облучением сильнофокусированным электронным пучком. Путем таких действий можно в несколько раз повысить микротвердость и износостойкость поверхностных слоев сплава. Хорошие перспективы имеет реализация некоторых ресурсосберегающих технологий, включающая предварительное легирование поверхностных слоев обрабатываемых металлов тугоплавкими и благородными металлами.

В настоящее время ИЯФ НЯЦ РК выполняет исследовательские и прикладные программы по государственным заказам - Республиканские целевые научно-технические программы и программы фундаментальных исследований в области радиационной физики твердого тела:

1. Изучение влияния высокодозного облучения на гелиевое распухание, коррозионную стойкость, ползучесть и пластичность конструкционных материалов»,
2. Исследование конструкционных материалов реакторов Казахстана,
3. Исследование влияния облучения на физико-механические свойства материалов,
4. Разработка научных основ модификации приповерхностных свойств металлических материалов с использованием технологий ионно-лучевой (плазменной) обработки,
5. Установление закономерностей изменений структуры и фазовых состояний металлических поликристаллов в результате облучения высокоэнергетическими частицами.

Основные усилия в выполнении этих программ направлены на решение трех основных задач радиационной физики твердого тела:

1. Фундаментальные проблемы взаимодействия излучения с веществом – образование радиационных дефектов, их эволюция в процессе облучения и последующей термомеханической обработки и влияние радиационных дефектов на физико-механические свойства твердых тел.
2. Радиационное материаловедение – изучение радиационного повреждения конструкционных материалов с целью создания экспериментально-теоретической базы для разработки новых конструкционных материалов для ядерной энергетики, разработка критериев ответственных за радиационную стойкость материалов

активной зоны реакторов, с целью обеспечения их безопасной эксплуатации, продления срока службы и безопасного длительного хранения отработанных элементов.

3. Радиационные технологии – модификация свойств материалов с целью придания им новых качеств посредством радиационной обработки: ионного легирования, упрочнения поверхности облучением поверхности мощными пучками заряженных частиц и электронов, ионно-трековые технологии.

Следует заметить, что нет строгого разделения задач на фундаментальные и прикладные. Например, исследования пробегов заряженных частиц, энергетических потерь при движении иона в кристалле, количества и пространственного распределения создаваемых бомбардирующим ионом радиационных дефектов – задача как фундаментального, так и прикладного характера, т.к. без детального представления о взаимодействии излучения с веществом невозможно целенаправленно изменять свойства материала методом имплантации ионов. Другая интересная особенность выполняемых исследований состоит в том, что ускорительная техника на этом этапе выступает как инструмент, с помощью которого можно контролируемым образом создавать радиационные дефекты и изучать их свойства, так и технологическое оборудование для модификации материалов и придания им новых свойств. Возможность постановки экспериментальных исследований на ускорителе DC-60 в Евразийском университете позволит выйти на новый качественный уровень в выполнении программ по Государственным заказам в области физики твердого тела.

#### 5.1.1. Фундаментальные проблемы физики радиационного повреждения твердых тел

Изучение образования радиационных дефектов при взаимодействии с налетающими частицами, их диффузионной подвижности, взаимодействия между собой и со структурными несовершенствами кристаллической решетки, а также исследование влияния радиационных дефектов на изменение физико-механических свойств материалов - фундаментальных задача физики радиационного повреждения. В настоящее время сравнительно полно изучены процессы радиационного дефектообразования и отжига при электронном облучении. При взаимодействии ускоренных электронов с атомами кристаллической решетки энергии электронов достаточно для образования только элементарных изолированных радиационных дефектов, пар Френкеля. С помощью облучения на ускорителях электронов экспериментально изучались энергии образования и миграции единичных точечных дефектов, измерен ряд свойств, характеризующих их поглощение структурными несовершенствами кристалла – дислокациями, границами зерен и т.д.

В изучении фундаментальных свойств радиационных дефектов циклотрон DC-60 интересен, прежде всего, тем, что облучение тяжелыми ионами позволяет создавать в материале каскады атом-атомных соударений. Энергия падающих частиц в отличие от ускорителей электронов достаточна для образования каскада столкновений от одного иона, т.е. облучение формирует не единичные радиационные дефекты типа пар Френкеля, а агломераты дефектов, содержащих вакансии, междоузельные атомы и их простейшие комплексы. Соответственно, и эволюцию таких агломератов будет протекать совершенно иначе по сравнению с единичными вакансиями и междоузельными атомами. Более интенсивно идет формирование вторичных радиационных дефектов, таких как вакансионные поры и петли, междоузельные дислокационные петли, предвыделения вторичных фаз. Это крайне важно для понимания радиационного повреждения при облучении быстрыми нейтронами и нейтронами синтеза, т.к. доля каскадного повреждения при таком облучении может быть значительной. К наиболее важным задачам фундаментального характера, имеющим к тому же и важное прикладное значение и составляющим предмет исследований в рамках существующих программ исследований на ускорителе DC-60 целесообразно постановка исследований по следующим тематикам.

*Радиационное упрочнение.* Облучение металлических материалов высокоэнергетичным ядерным излучением, приводит к увеличению предела текучести и твердости. В результате материал теряет пластичность и становится хрупким, что может привести к нежелательным последствиям при его эксплуатации.

Радиационное упрочнение металлов это первое явление, которое было обнаружено на первом ядерном реакторе. Тем не менее, несмотря на многочисленные эксперименты до сих пор механизм радиационного упрочнения однозначно не установлен. Одни исследователи утверждают, что торможение дислокаций, существующих в необлученном материале, (т.е. упрочнение материала ) происходит за счет закрепления дислокаций сегрегирующими на них скоплениями радиационных дефектов. Другие - за счет торможения движущихся дислокации скоплениями радиационных дефектов в матрице кристаллической решетке материала .

Нужны прямые эксперименты, которые бы наглядно показали, какой из механизмов является определяющим. Такие эксперименты возможны только при использовании высокоэнергетичных частиц.

*Высокотемпературное радиационное охрупчивание.* Высокотемпературным радиационным охрупчиванием (ВТРО) принято называть снижение пластичности облученных нейтронами металлов и сплавов при высоких температурах испытания с характерной особенностью - данное снижение пластичности не восстанавливается даже после высокотемпературной обработки. До настоящего времени не существует единого мнения относительно природы ВТРО. Одни авторы полагают, что

причиной ВТРО является образование в теле зерна и на границах зерен различных радиационно-стимулированных выделений. Однако эти представления не объясняют термическую стабильность ВТРО. Объяснить ВТРО, по-видимому, можно присутствием в облученном материале нерастворимых примесей, образующих сегрегации стабильные до температур плавления и вызывающие хрупкое разрушение. Анализ проведенных исследований ВТРО и условий облучения, позволил предположить, что в качестве нерастворимой примеси могут быть атомы гелия, образующиеся по соответствующим каналам  $(n,\alpha)$  реакций в процессе облучения, а не существующие изначально в материале примеси.

Эксперименты по ионному легированию материалов атомами гелия подтвердили это предположение и показали, что даже при  $10^{-7} - 10^{-9}$  ат.% He заметно уменьшается пластичность металлов.

В реакторах на быстрых нейтронах скорость накопления атомов гелия меняется для разных материалов в пределах  $0,1-1,5 \times 10^{-11}$  ат.%He/с, в термоядерном реакторе скорость накопления много больше -  $8-60 \times 10^{-11}$  ат.% He/с.

Однако, несмотря на многочисленные эксперименты, механизм ВТРО до сих пор не установлен. Сторонники механизма влияния гелиевых пор на развитие интеркристаллитных трещин, а, следовательно, хрупкого разрушения не могут объяснить проявление ВТРО при столь низких концентрациях гелия, когда гелиевая пористость отсутствует.

Эксперименты по изучению влияния имплантированного инертного газа на перераспределение сегрегацию на границах зерен можно эффективно проводить на образцах, облученных тяжелыми ионами инертных газов на циклотроне DC-60.

*Радиационное распухание.* Одним из наиболее интересных и тоже время практически важных и в значительной мере ограничивающих работоспособность конструкционных материалов явлений, является радиационное распухание - изменение геометрических размеров облучаемого материала. Например, за время кампании реактора радиационное распухание, обусловленное образованием скоплений радиационных вакансий в виде пор в нержавеющей конструкционных сталях, может достигать десятки процентов.

Радиационное распухание материалов во многих случаях сопровождается изменением их ползучести, в результате материалы разрыхляются, теряют прочность, становятся хрупкими и весьма чувствительными к различным деформациям.

К самым нежелательным практически важным последствиям распухания, сдерживающим развитие ядерной энергетики, следует отнести деформацию, изгибы и увеличение диаметра тепловыделяющих элементов (ТВЭлов). В результате роста диаметра ТВЭлов возможно значительное увеличение температуры оболочки из-за уменьшения потока теплоносителя.

На сегодняшний день имеется лишь качественное понимание основных физических процессов, управляющих кинетикой развития пористости. Поэтому весьма важными представляются экспериментальные исследования вакансионного набухания конкретных материалов в строго контролируемых условиях облучения. В этой связи, именно, использование возможностей облучения материалов ВЭТИ представляется актуальным. Высокие скорости смещений атомов и имитация параметра  $\text{appm/dpa}$  при облучении ионами металлов и тяжелых инертных газов на циклотроне DC-60 позволят имитировать большую дозу облучения нейтронами за относительно короткое время.

### 5.1.2. Моделирование высокодозного облучения нейтронами деления и синтеза

Специфические условия работы изделий в активной зоне ядерных реакторов предъявляют жесткие требования к конструкционным материалам.

К основным требованиям, предъявляемым к материалам корпусов и элементов активной зоны (ТВЭЛ, ТВС, стержни автоматического и аварийного регулирования, отражатель), относится их способность сохранять под облучением в течение длительного времени высокие механические характеристики. Поэтому, существующими стандартами предусматривается, в качестве обязательных, проведение испытаний конструкционных материалов на набухание, низко- и высокотемпературное охрупчивание, коррозионную стойкость и износостойкость, прочность и пластичность, т.е. явлениями, определяющими радиационную стойкость конструкционных материалов. Естественно, что испытания должны быть проведены на материале, подвергнутом облучению до повреждающих доз, соответствующих тем, которые имеют место в атомных реакторах, см. таб.5 [38].

Для современных атомных реакторов типичные скорости набора дозы составляют величину порядка  $10^{-8}$ - $10^{-6}$  сна/с, поэтому для адекватной оценки механических характеристик облученного материала требуется от 2 до 5 лет для набора нужной дозы, как следует из таблицы 1. Одним из эффективных выходов для ускорения процесса набора нужного уровня дозы являются моделирующие эксперименты с использованием облучения на ускорителях, т.к. типичные скорости смещений, достигаемые на ускорителях, составляют  $\sim 10^{-2}$  -  $10^{-3}$  сна/с, соответственно длительность облучения до набора соответствующей дозы значительно сокращается. Следует отметить, что идея использования ускорителей, в особенности ускорителей тяжелых ионов для имитации нейтронного облучения возникла давно, работы в этом направлении активно ведутся, и более того, имеющиеся в настоящее время данные по радиационному повреждению конструкционных и модельных материалов при очень высоких, рекордных

повреждающих дозах получены как раз в имитационных экспериментах, см, например, обзоры и материалы международных конференций [39-43].

Таблица 5.

Условия работы материалов ТВЭЛ и ТВС в активных зонах энергетических реакторов деления различного типа и первой стенки blankets ТЯР

Изделие	Кипящие корпусные и каналы РБМК, CANDU	Корпусные под давлением ВВЭР, PWR	С охлаждением жидкими металлами		1-я стенка ТЯР	
			БН	Брест	Охлаждение He	Охлаждение Li
Энергия нейтронов Деления/Синтеза	Медленные	Медленные	Быстрые E=0.1-3 МэВ		Быстрые E=14 МэВ	
Температура оболочки ТВЭЛ (макс.) °С	280-295	335-350	710	650	650	800
Число термоциклов	50-250	50-1500	50	50	5.10 <sup>4</sup>	
Повреждающая доза нейтронов, сна	3-5	10-25	80 - 100	До 140	До 200	
Длительность топливного цикла	3-5	3-5	2 - 2.5	4-5	5	
Топливо	UO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub> , UO <sub>2</sub> + PUO <sub>2</sub>	UN + PuN	D + T	

Пример применения экспрессного метода радиационного испытания на ускорителях тяжелых ионов при исследовании процессов зарождения и роста пор и предварительной оценке склонности материалов к радиационному набуханию показан на рис. 9, на котором приведена микроструктура стали X18H10T, облученной в быстром реакторе и на ускорителе тяжелых ионов. Уровень повреждения, достигнутый в реакторе за два года, при облучении на ускорителе превзойден за два часа.

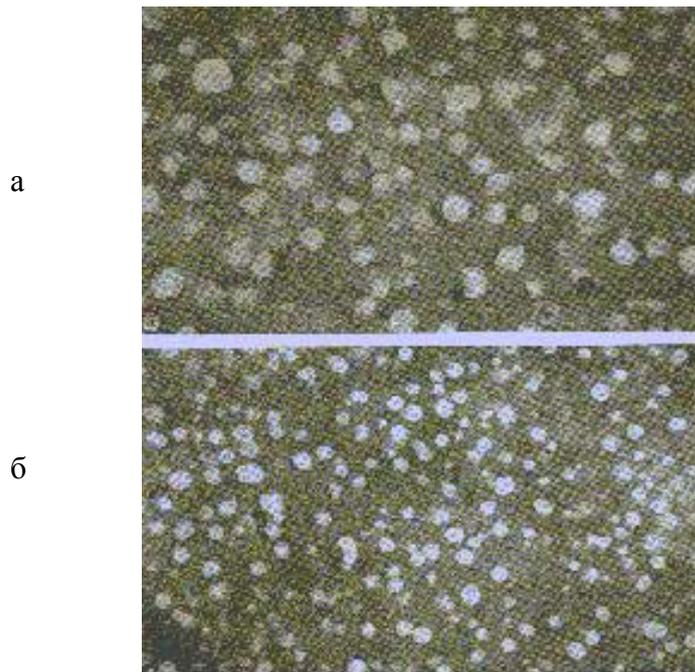
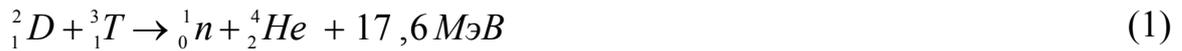


Рис.9. Микроструктура стали X18Ni10Ti, облученной в реакторе на быстрых нейтронах при 743 К до флюенса  $10^{27}$  н/м<sup>2</sup>, ( $E > 0,1$  МэВ), доза = 53 сна, (а) и ионами Cr<sup>3+</sup> (3 МэВ) при 908 К, доза = 70 сна (б).

Однако, использование заряженных частиц для моделирования нейтронного радиационного повреждения ставит вопрос о соответствии спектра радиационных дефектов и их пространственного расположения, создаваемого облучением ионами спектру дефектов и их пространственному распределению при нейтронном облучении. Начальное распределение радиационных дефектов и их последующая эволюция за счет действия температуры, полей напряжений определяют изменение механических свойств материала. Следует отметить, что температура и механические напряжения все-таки являются вторичными факторами, сопутствующими облучению, в то время как определяющим является энергия первично выбитого атома. Поэтому выбор энергии, типа частиц и условий облучения приобретают большое значение для имитационных экспериментов.

Энергия и тип бомбардирующих частиц проявляют себя в основном на стадии образования первично - выбитых атомов (ПВА). Конструкционные материалы в реакторах деления облучаются не моноэнергетическими частицами, а потоком нейтронов, обладающим сложным энергетическим спектром. Удельный вес нейтронов различных энергий в спектре меняется не только в зависимости от типа реактора, но и от места расположения каналов в том же реакторе. Особенно это заметно в реакторах на быстрых нейтронах. Но как в тех, так и в других реакторах рождающиеся при делении урана нейтроны имеют статистическое

распределение по энергии, простирающееся до нескольких мегаэлектрон - вольт при средней энергии около 2 МэВ. Несколько иные условия облучения материалов имеют место в реакторах термоядерного синтеза. Здесь за радиационное повреждение материала первой стенки термоядерного реактора будут ответственны высокоэнергетические частицы, такие как нейтроны, протоны и  $\alpha$ -частицы. Возможны реакторы с использованием термоядерной реакции:



или



В случае реакции (1) высокоэнергетические нейтроны имеют энергию 14,1 МэВ, а в случае реакции (2) высокоэнергетические протоны - энергию 14,8 МэВ.

Наиболее важной характеристикой атомов, смещенных со своих мест в результате того или иного взаимодействия с бомбардирующей частицей, является переданная им энергия  $T$ . Даже в случае облучения монохроматическим пучком, эти первично - выбитые атомы обладают энергетическим спектром. Их энергия может меняться от нуля до определенного максимального значения  $T_{\max}$ . В приближении упругого соударения энергия ПВА определяется:

$$T = E \frac{4M_1M_2}{(M_1 + M_2)^2} \sin^2(\theta/2) \quad (3)$$

где  $E$ —энергия бомбардирующей частицы;  $M_1$  и  $M_2$ —массы бомбардирующей частицы и атома кристалла соответственно;  $\theta$  - угол рассеяния бомбардирующей частицы в системе центра масс. Нетрудно видеть, что максимально возможная энергия  $T_{\max}$  получается при лобовом столкновении ( $\theta = 180^\circ$ ).

Примеры расчетных энергетических спектров ПВА (в золоте) приведены на рис.10, [44]. Расчет проводился с учетом конкретных сечений взаимодействия бомбардирующих частиц с атомами металла. Здесь сравниваются три вида бомбардирующих частиц: протоны с энергиями 0,7 и 2,5 МэВ,  $\alpha$ -частицы с энергией 4 МэВ и быстрые нейтроны со спектром нейтронов деления. Особенно заметно расходятся спектры ПВА от протонов и нейтронов. Расхождение в энергетических спектрах ПВА повлечет за собой расхождение и в последующих процессах радиационного повреждения, и, как следствие, в изменениях структуры облученных

металлов и эволюции их механических свойств.

На рис.11 [8] представлен спектр ПВА (упругое и неупругое рассеяние) рассчитанный для облученного 14 МэВ нейтронами никеля. Видно, что по расчетным оценкам энергии ПВА составляют от 10 кэВ до максимально передаваемой энергии порядка 1 МэВ (например, 971,5 кэВ для железа).

Второй важной характеристикой ПВА является их пространственное распределение в теле бомбардируемого кристалла, так как в зависимости от этого будут по-разному развиваться дальнейшие динамические процессы радиационного повреждения. Так, малые расстояния между ПВА, например, в случае бомбардировки осколками деления ведут к перекрытию каскадов атом -атомных соударений. Из табл. 6 [46], в которой приведены некоторые характеристики ПВА для ряда видов облучений, видно насколько существенно могут различаться пространственные расположения ПВА при различных видах облучения. Эти различия сохраняются и в случае, когда энергетические спектры ПВА и их средние энергии близки. Так, при близкой средней энергии средние расстояния между ПВА от реакторных нейтронов в  $10^7$  раз превышают расстояния между ПВА, образованными тяжелыми ионами.

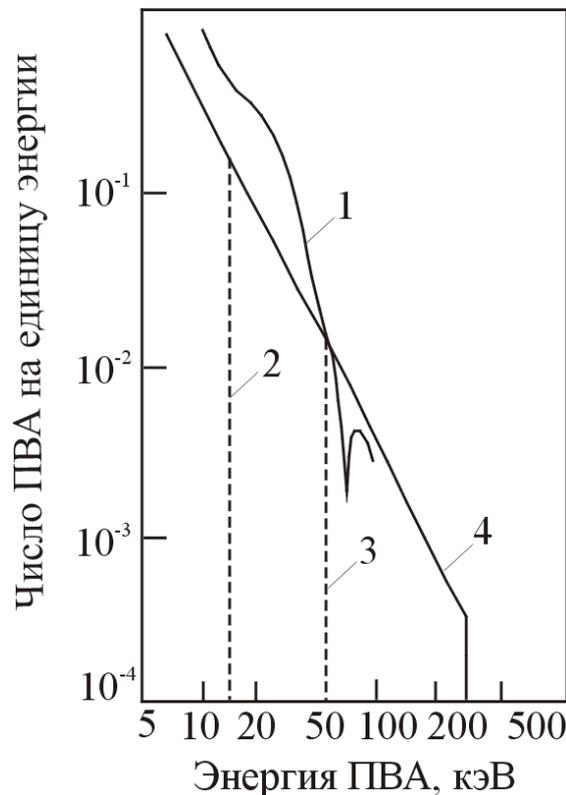


Рис. 10. Спектры ПВА в кристалле золота при облучении: 1— быстрыми нейтронами спектра деления; 2, 3 — протонами с энергией 0,7 и 2,5 МэВ соответственно; 4  $\alpha$ -частицами с энергией 4 МэВ

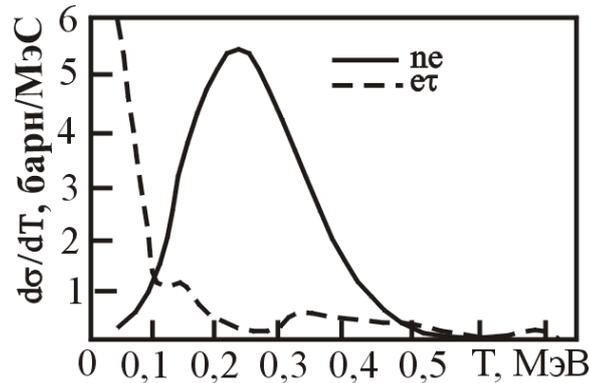


Рис. 11. Энергетические спектры ПВА (упругие соударения) и атомов отдачи (неупругие взаимодействия), образующихся при бомбардировке никеля нейтронами с энергией 14 МэВ.

Таблица 6

Некоторые характеристики ПВА, образующихся при различных видах облучения (масса атома кристалла  $M_2=50$  а.е.м.)[46]

Бомбардирующая частица, ее энергия	Среднее расстояние между ПВА, м	Средняя длина траектории бомбардирующей частицы, м	Средняя энергия ПВА, эВ
Протон, 1МэВ	$10^{-5}$	$10^{-5}$	200
Осколок деления, 100 МэВ	$10^{-9}$	$10^{-6}$	$10^3$
Тяжелый ион, 50 кэВ	$10^{-8}$	$10^{-7}$	$7 \cdot 10^3$
Электрон, 1 МэВ	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$5 \cdot 10^4$
Нейтрон, 2 МэВ	$5 \cdot 10^{-2}$	1	$1,6 \cdot 10^5$
Нейтрон ( спектр реактора на тепловых нейтронах)	$5 \cdot 10^{-2}$	1	$10^4$

Из выше изложенного становится очевидным, что выбор облучающих заряженных частиц для моделирующих экспериментов достаточно сложная и неоднозначная задача. Сложность условий облучения в реакторах затрудняет проведение исследований влияния отдельных факторов на изменение тех или иных свойств облучаемых материалов. Для проведения экспериментов в контролируемых условиях в настоящее время успешно используются ускорители заряженных частиц, что обусловлено возможностью вариации типа и энергии бомбардирующих частиц, температуры облучения.

Применение ядерных реакторов различного типа и ускорителей для изучения радиационного повреждения материалов вызвало к жизни сложные проблемы, например сопоставления различных видов излучения по их «повреждающей способности». Впервые эти проблемы возникли в связи с необходимостью распространить результаты, полученные на материалах, облученных в действующих реакторах, на вновь

проектируемые реакторы с другим энергетическим спектром нейтронов и реакторы термоядерного синтеза. Та же задача возникает при имитации нейтронного облучения больших флюенсов с помощью тяжелых ионов. Для успешного решения этих задач (аналогового моделирования излучения одной установки излучением другой) требуется выработка строгих критериев подобия действия различных видов излучения на материалы.

При разработке критериев подобия и условий проведения имитационных экспериментов главное внимание должно быть уделено следующим вопросам [41]:

- интенсивность пучка ионов должна обеспечить в течение нескольких часов облучение материала до дозы  $10^{22}$  ион/м<sup>2</sup>, что по уровню повреждений в смещениях на атом эквивалентно облучению нейтронами  $10^{27}$  нейтрон/м<sup>2</sup>;
- конструкция ускорителя должна предусматривать по возможности облучение мишеней ионами газа и металла для сравнения эффектов облучения;
- энергия ускоренных частиц должна составлять 2,5 - 10 МэВ, что позволяет исключить влияние поверхности и ионного внедрения на развитие пористости в исследуемом слое;
- предпочтительнее использование ускорителя тяжелых ионов, работающего в стационарном режиме, что исключает необходимость учета влияния импульсности пучков на процессы зарождения и эволюции дефектов;
- в ускорителях необходимо создание вакуума  $10^{-5}$  -  $10^{-6}$  Па, причем парциальное давление химически активных газов (O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, C) не должно превышать  $10^{-8}$  -  $10^{-9}$  Па, так как различные физико-химические процессы (окисление, диффузия), протекающие на поверхности облучаемых образцов, могут отразиться на качестве получаемой информации;
- ускорители тяжелых ионов должны быть снабжены рядом специальных устройств и приспособлений для измерения и контроля параметров облучения, диагностики пучка и т.д.

Как видно из приведенных в разделе 4 характеристик ускорителя DC-60, набор и спектр энергий ионов достаточно широк, и позволяет выбрать тип облучающих частиц и энергию таким образом, чтобы она наилучшим образом соответствовала тому спектру ПВА от облучения нейтронами, который имитируется облучением на циклотроне. Немаловажным фактором является то, что в качестве облучающих частиц выступают ионы инертных газов Ar, Xe, Kr, Ne. Имплантация ионов инертных газов не приводит к формированию новых химических соединений в материале и не изменяет стехиометрического состава компонентов материала. Естественно накопление инертных газов может исказить картину радиационного повреждения, т.к. не создавая соединений с другими элементами инертные

газы, как правило, выпадают в отдельную фазу в виде газонаполненных пор, но поскольку энергия ионов ускорителя варьируется в широких пределах то можно выбрать для исследования область кристалла, соответствующую нейтронному повреждению. Т.е область, отстоящую на достаточном расстоянии от поверхности для исключения эфетов поверхности, так и от зоны торможения ионов, чтобы влияние внедренных ионов было минимальным. Отметим, что эффекты радиационного повреждения от тяжелых ионов инертных газов успешно Ar, Xe, Kr успешно исследуются на близких по параметрам облучательных установках ОИЯИ [47,48].

### 5.1.3. Радиационные технологии – модификация свойств материалов методом ионного легирования

Радиационные технологии, и в особенности методы модификации свойств материалов методом ионного легирования - еще одно направление радиационной физики успешно развиваемое в ИЯФ. С появлением ускорителей тяжелых ионов УКП 2-1 (энергия ускоряемых ионов до 1.5 МэВ), «Везувий» (до 500 МэВ), ИЛУ-4 (до 50 МэВ) активно ведутся работы по модификации свойств материалов методами ионной имплантации и радиационной обработки. С помощью этих различных по своим возможностям ускорителей (энергиям и типу ускоряемых ионов, интенсивности облучения) выполняются работы по модификации приповерхностных областей формированием в них заданного структурно фазового состава за счет ионного легирования; упрочнения поверхности материала интенсивным облучением тяжелыми ионами. Ускоритель тяжелых ионов DC-60, обладая более широкими, чем названные выше ускорители возможностями (более высокой энергией ионов, а следовательно и большей толщиной модифицированного слоя) позволит эффективно решать актуальные фундаментальные и прикладные задачи ионной модификации материалов. Например, таких как проблема синтеза в материалах новых сверхтвердых фаз типа карбида бора, карбонитрида бора и др., успешное решение которой возможно с применением многокомпонентных пучков заряженных частиц.

Применение же высокоинтенсивных ионных пучков, что также реализуется с помощью ускорителя DC-60, позволяет осуществлять самоотжиговые режимы ионной имплантации, стимулировать диффузионные процессы, химические реакции и реакции фазообразования.

Интерес к высокоэнергетической ионной имплантации в металлы и сплавы резко возрос в последние годы в связи с созданием ускорителей тяжелых ионов в диапазоне энергий десятков и сотен МэВ, а также обнаружением ряда эффектов, характерных для сильных электронных возбуждений. Такие возбуждения сопутствуют прохождению быстрых тяжелых ионов в материалах. Скорости передачи энергии от движущейся частицы в электронную и ядерную подсистемы твердого тела по глубине

его будут определять тип формируемых дефектов структуры и скорость их генерации на определенной глубине.

Ионная имплантация при высоких энергиях позволяет создавать скрытые легированные слои, соединения или сплавы, расположенные на глубине до нескольких или десятков микрометров, а при  $E \geq 1$  МэВ/а.е.м. - сотен микрометров. В полупроводниках и изоляторах таким способом создаются скрытые проводящие, изолирующие слои, либо гетеропереходы [49, 50].

При увеличении дозы облучения легко аморфизуемых ионным облучением сплавов [51, 52] (например, интерметаллидов: NiTi, TiFe, MoNi, Zr<sub>3</sub>Al, Pt<sub>3</sub>Al, PdAl<sub>3</sub>, Fe<sub>95</sub>B<sub>15</sub>) их аморфизация при высокоэнергетической ионной имплантации начинается на глубине, соответствующей максимуму энерговыделения. При продолжении процесса облучения аморфный слой может расширяться к поверхности. Облучение материалов быстрыми ионами позволяет создавать скрытые в глубине материала слои с отличающимися свойствами: слои высоко пластичных материалов в твердых и хрупких материалах, твердые и сверхтвердые слои в мягкой матрице с низким коэффициентом трения и т. д., а также периодические структуры двух различных материалов либо чередующиеся аморфные и кристаллические слои. Могут быть сформированы также захороненные демпферные слои против распространяющихся вглубь напряжений и подавляющие коррозию внутренние слои, которые целесообразно использовать для создания профилированной поверхности металла или сплава при имплантации через окна в маске [51].

Наряду с возможностью создания скрытых слоев методом высокоэнергетической ионной имплантации можно эффективно создавать толстые однородно-легированные (модифицированные) слои. Для этого необходимо проводить полиэнергетическую ионную имплантацию [51], т. е. облучать образец ионами с набором энергий и соответствующих доз. Как следует из результатов расчетов [53], максимальные концентрации примеси и максимальный уровень поврежденности при заданной дозе практически не зависят от энергии при высоких энергиях облучающих частиц. Это связано с тем, что с ростом энергии, с одной стороны, возрастает среднеквадратичный разброс пробега, а с другой — растет асимметрия профиля. Поэтому для создания однородно-легированного слоя достаточно проводить имплантацию с одинаковыми дозами и примерно одинаковым приращением по энергии.

Большой интерес представляет также наблюдавшееся в ряде работ [54-57] увеличение адгезии металлических слоев на различных подложках при облучении бислоевых структур высокоэнергетическими ионами. Критическая доза, а также оптимальная энергия зависят от электронных свойств пленки и подложки, наличия примесей в них. Здесь реализуется не обычное ионно-лучевое перемешивание за счет упругих столкновений, а

химические реакции атомов на межфазной границе или физико-химические превращения в этой области за счет электронных возбуждений, формирование или разложение соединений и сплавов, стимулированная диффузия, формирование новых межатомных связей.

Имплантация таких ионов, как ионы азота, углерода, которые наиболее эффективно используются в промышленности для улучшения трибологических, коррозионных, каталитических и магнитных свойств приповерхностных слоев изделий, позволяет модифицировать толстые слои с большим эксплуатационным ресурсом. Этот же подход дает возможность надежного использования общепризнанных металлургических методов для тестирования свойств модифицированных ионами материалов на твердость, трение, износ и коррозию. При имплантации ионов средних энергий часто получают противоречивые результаты по этим свойствам, поскольку для малых толщин металлургические методы оказываются малочувствительными к изменениям свойств.

Новым направлением является высокоэнергетическая ионная имплантация в высокотемпературные сверхпроводники [58-59]. Это уже привело к созданию тонкопленочных сверхпроводящих приборов. Кроме того, за счет ионного облучения можно ожидать [58] снижения температуры формирования соответствующих сложных по составу фаз после осаждения таких слоев, а также эффективного управления содержанием кислорода в процессе осаждения и после него. В любом случае для практических целей необходима имплантация именно ионов с энергией несколько МэВ на нуклон в ВТСП-керамики для того, чтобы управлять свойствами в слое толщиной, по крайней мере, в 1 микрон. Известно [60-62], что большое число аморфных сплавов может быть синтезировано путем термической реакции (процесс интердиффузии) многослойной структуры, состоящей из поликристаллических пленок компонентов (например, лантана и золота [60] или никеля и циркония [61]). Авторы [61] до отжига облучали многослойную поликристаллическую структуру Ni-Zr ионами серы с энергией 30 МэВ и дозами от  $1 \cdot 10^{15}$  до  $2 \cdot 10^{16}$   $S^+/\text{см}^2$  при низких температурах. Результаты исследований показали, что такое облучение вызывает существенное подавление скорости реакции аморфизации при отжиге по сравнению с процессом аморфизации в необлученной структуре. Рентгенодифракционный анализ облученных и необлученных структур выявил значительное уменьшение тангенциальных напряжений в структуре после облучения ионами серы. Этот эксперимент показал, что снятие интерфейсных тангенциальных напряжений за счет облучения уменьшает скорость диффузии одного компонента во второй и образования аморфной фазы. Таким образом удалось выяснить механизм процесса аморфизации — тангенциальные напряжения на границе раздела осажденных пленок стимулируют интердиффузию и сами релаксируют в процессе аморфизации. Следовательно, именно тангенциальные напряжения обуславливают

реакцию твердофазной аморфизации. Эксперименты по ионному облучению показали влияние слабых микроструктурных изменений на скорость реакции и пути управления процессом аморфизации многослойной структуры.

При имплантации стехиометрических доз ионов с целью модификации практических свойств (например, ионов азота в железо [63]) напряжения на границе раздела модифицированный слой-матрица оказываются весьма низкими в отличие от случая формирования таких слоев ионами средних энергий. Это обеспечивает высокую временную и термическую стабильность такой системы.

Интересной является информация по диффузии примесей в аморфных сплавах, стимулированной ионным облучением. Например, диффузия серебра и меди в аморфном сплаве Ni-Zr дает величину энергии активации термической диффузии 1,7 и 1,6 эВ, соответственно [64-65]. Облучение ионами  $Kr^+$  энергией, равной одному или нескольким МэВ, вызывает радиационно-ускоренную диффузию этих примесей с энергией активации 0,45 эВ [64-65]. Как уже отмечалось в аморфном кремнии энергия активации процесса радиационно-стимулированной диффузии (РСД) серебра и меди составляет 0,37 и 0,27 эВ, соответственно [66]. Строго определенная энергия активации свидетельствует о том, что диффузия происходит в обоих типах аморфных материалов с участием вполне определенных дефектов. Особенно интригует близость значений энергии активации РСД в системах с очень различающимися типами связей (металлические сплавы и ковалентный аморфный кремний).

Эксперименты обнаруживают неоднородное распределение радиационных дефектов, генерируемых высокоэнергетическими ионами в твердых телах вдоль траектории ионов. В мишени может наблюдаться до пяти специфических слоев с различными свойствами (рис.12):

I) Слабо нарушенный слой, располагающийся в приповерхностной области. Содержит, в основном, гомогенно распределенные точечные радиационные дефекты.

II) Слой с повышенной концентрацией точечных дефектов или комплексов, которые распределены негомогенно, формируется, когда  $v \approx v_r$ . Если удельные потери энергии иона на электронное торможение достаточно велики (т.е.  $(dE/dx) > E_r$ ), то этот слой содержит специфические в структурном отношении области или треки. Для тяжелых ионов он может начинаться с поверхности образца.

III) Разупорядоченный слой, лежащий на глубине, которой соответствует максимальное значение упругих потерь энергии,  $(dE/dx)$ .

IV) Слой имплантированных атомов.

V) Слой дефектов, созданных продуктами ядерных реакций ионов с атомами мишени. За формирование такого нарушенного слоя может быть ответственно также обычное каналирование [67] или трековое

каналирование [68] ионов. В этом слое радиационные дефекты и имплантированные атомы располагаются на гораздо больших глубинах, чем ионно-имплантированный слой, предсказываемый в стандартных вычислениях.

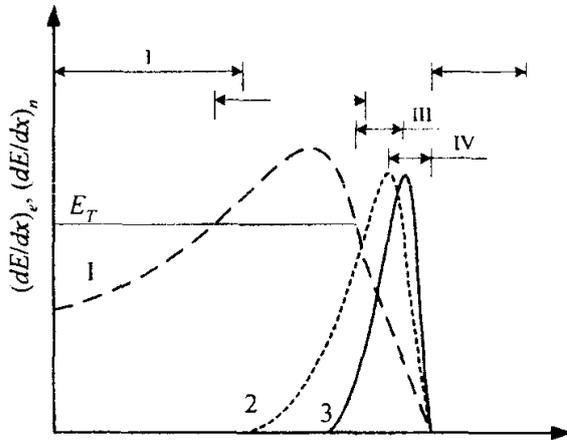


Рис.12. Распределение интенсивности электронных (кривая 1) и ядерных (2) потерь энергии, а также концентрации внедренных атомов (3) для высокоэнергетических ионов.  $E_T$  обозначает пороговые значения  $(dE/dx)_e$ , при которых могут формироваться специфические макродефекты структуры (треки). Знаки I, II, III, IV, V обозначают области, обсуждаемые в тексте.

При энергиях ионов  $E$ , когда  $(dE/dx)_e < E_T$  общее количество дефектов и их тип зависят от спектрального распределения первично выбитых атомов (ПВА) по энергиям [51] за счет упругих столкновений и температуры мишени (при облучении и исследованиях).

#### 5.1.4. Направления исследований с использованием ЭЦР-источника тяжелых ионов

Особо следует остановиться на возможности расширения исследований по программам «Исследование влияние облучения на физико-механические свойства материалов» и «Разработка научных основ модификации приповерхностных свойств металлических материалов с использованием технологий ионно-лучевой (плазменной) обработки» с использованием ЭЦР-источника циклотрона DC-60 в качестве самостоятельного источника облучения низкоэнергетичными тяжелыми ионами. Основные направления исследований на ЭЦР-источнике тяжелых ионов следующие.

*Процессы распыления материалов при воздействии ионов высоких зарядностей.* В зависимости от зарядности бомбардирующих ионов изменяются процессы распыления материалов. В частности, при изменении зарядности ионов Хе (энергия ионов 1 МэВ) от  $15^+$  до  $44^+$  для Al, Si, Ni, Cu и Ag коэффициент вторичного распыления изменяется на несколько порядков. Такие эксперименты невозможно поставить на имплантаторах ионов из-за низкой зарядности ускоряемых ионов. Поэтому использование данной установки даст возможность измерить коэффициенты распыления под действием высокозарядных ионов различных металлических, полупроводниковых и диэлектрических материалов. По-прежнему не утратили актуальность работы по изучению изменений коэффициентов

распыления материалов от угла падения, состояния поверхности и от энергии, в том числе и новых (вновь созданных) под действием ионов, как традиционных газовых (C, O, N, Ne), так и ионов твердых материалов таких, как: P, He, Li, Be, B, C, Se, V, Ti, Fe, Ni, Co, As, In, Pb и других.

*Ионная модификация поверхности кластерами газовых ионов малой энергии.* При облучении материалов газовыми ионами достаточно высокими флюенсами, с относительно малыми энергиями в приповерхностном слое образуются комплексы вакансий, заполненных газовыми ионами. Этот процесс происходит при повышенных температурах облучения (явление радиационного распухания при  $T_{\text{обл}} > 0.3 T_{\text{пл}}$ ) и при послерадиационном отжиге. Газовые ионы стабилизируют рост пор. При достаточно высокой концентрации пор может образовываться их упорядочение - решетка пор. Применение низкоэнергетичных ионов может позволить создавать на поверхности и вблизи нее упорядоченные структуры, которые можно использовать как наноразмерные. Этот метод модификации поверхности различных материалов приобрел значительный интерес в последнее время. Кроме того, использование потока ионов низкой энергии даст возможность создавать на поверхности достаточно гладкий рельеф за счет распыления поверхности при относительно небольших флюенсах. Это важно, чтобы не началось образование характерных структур при распылении, таких как “усов”, выступов, и пирамидальных структур.

*Создание сверхтвердых материалов ускоренными тяжелыми ионами.* В последнее время широко применяется плазменный синтез сверхтвердых материалов при использовании плазмы металлических атомов, ионной имплантации и осаждения. С помощью этих методов можно получить допированный (с примесями) и недопированный (без примесей) алмазоподобный углерод, карбиды (TiC) и нитриды металлов, оксиды и нитриды керамик ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{MgO}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ). Как известно, вышеперечисленные материалы обладают высокими коррозионными и прочностными свойствами, а также длительными временами эксплуатации. В связи с изложенным, получение и изучение тонких покрытий на основе представленных выше материалов представляет важную задачу.

*Имплантация электрически активных примесей.* Существующая планарная технология производства полупроводниковых приборов, таких как: больших (БИС) и сверхбольших интегральных микросхем (СБИС) основана, в основном, на применении монокристаллического кремния, легированного электрически активными примесями (бор, фосфор и более тяжелых, например, олова). Процесс производства включает в себя следующие стадии: подготовка монокристаллических пластин кремния к облучению (максимальный диаметр пластин в настоящее время достигает 200 мм, именно поэтому следует сохранить возможность облучения столь больших пластин), ионная имплантация, то есть облучение пластин на имплантаторах с энергиями до от 100 кэВ до 2 МэВ, последующий

термический отжиг для ликвидации радиационных дефектов и перераспределения электрически активных примесей, а затем химическое травление. Изучение особенностей образования дефектов, их типов при процессах послерадиационных обработок является основной задачей физики полупроводников. Помимо хорошо изученных эффектов в кремнии имеется значительное количество работ и на других полупроводниковых материалах, таких как арсенид галлия и других.

*Упрочнение металлов и режущих кромок металло-обрабатывающих резцов и инструментов.* Как показано, при облучении ионами низких энергий, но при значительных интенсивностях ионных пучков в несколько ампер и с энергиями до десятков кэВ было показано, что наблюдается, так называемый, эффект "дальнодействия", когда зона измененных свойств материала (упрочнения и фазово-структурных изменений) достигает значительных глубин вплоть до десятков и сотен микрометров при пробегах бомбардирующих ионов, не превышающих несколько тысяч ангстрем. Кроме того, было установлено, что облученные режущие кромки инструментов, становятся значительно более твердыми, а их износостойкость резко возрастает.

Этот эффект дальнодействия еще не до конца понят, несмотря на наличие целого комплекса моделей, но, несомненно, имеет большое значение для металлообрабатывающей промышленности.

Вопросы, изложенные в данном разделе, подробно рассмотрены в [69-74].

## 5.2 Направления исследований по ядерной физике

### 5.2.1. Исследование механизма ядро-ядерного взаимодействия и структуры ядер

Основная цель исследований в области ядерной физики состоит в изучении природы взаимодействия системы конечного числа нуклонов, и понимании того, как соотносятся силы взаимодействия между нуклонами с более фундаментальными взаимодействиями, как отличаются свойства и взаимодействия свободных нуклонов и нуклонов в ядерной среде.

Единая теория атомного ядра отсутствует, нет определенности в информации о природе ядерных сил и решение этой ключевой проблемы видится в накоплении новых, не традиционных экспериментальных данных о структуре и механизмах ядерных процессов протекающих при взаимодействии частиц и ядер с ядрами.

К концу XX- века было открыто до 3000 атомных ядер и по существующим оценкам их может быть около 7000. Изучение свойств изотопов ядер удаленных от долины стабильности позволяет получить новые сведения о ядерной материи, поскольку они имеют другое среднее поле, обусловленное интерференцией кулоновского и ядерного

взаимодействий. Для таких ядер не совпадают зарядовое и массовое пространственные распределения. Обнаружены гало-ядра, для которых распределение ядерной материи существенно превышает обычные размеры ядер  $R = 1.3A^{1/2}$ . Определение свойств нейтронных, а возможно и протонных гало ядер становится крайне важным для решения актуальной проблемы физики ядра - роли ядерных сил, зависящих от плотности, а также изучения процессов взаимодействия в среде, свободной от нейтронов или протонов. Не менее важными и интересными являются вопросы о существовании нейтронного гало (эффекта, обусловленного наличием связанных состояний нейтронов, расположенных вблизи континуума) в возбужденных состояниях ядер, эффекта кластеризации ядерных состояний в области малой нейтронной плотности и т.п.

В ИЯФ НЯЦ РК выполняется программа фундаментальных исследований «Исследование механизма ядро-ядерного взаимодействия и структуры ядер» предусматривающая изучение механизмов формирования дифференциальных и полных сечений ядро-ядерных взаимодействий и их зависимости от структуры сталкивающихся систем, в соответствии с которой планируется разработка и внедрение методики измерения полных сечений реакций с использованием полупроводниковых детекторов заряженных частиц, измерение сечений процессов рассеяния в широком угловом интервале вплоть до предельно больших углов и полных сечений реакций в максимально доступном энергетическом диапазоне, а также провести комплексный анализ полученных при этом экспериментальных результатов в рамках современных теоретических подходов.

Данная программа является логическим продолжением программы фундаментальных исследований 2000-2003г.г. «Исследование кластерных аспектов структуры ядер и механизма взаимодействия нуклидов водорода и гелия с ядрами при низких и средних энергиях». В ее рамках была получена обширная информация о величине потенциалов взаимодействия нуклидов  ${}^3\text{He}$ ,  ${}^4\text{He}$  на ряде изотопов ядер от лития до серы [75-78] роли потенциального механизма и обменных процессов в формировании дифференциальных сечений, экспериментально определены кластерные спектроскопические факторы для основных и возбужденных состояний изотопов ядер  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^9\text{Be}$  [79-81]. В частности, было установлено, что экспериментальные значения d и t-спектрофакторов S ядер  ${}^6\text{Li}$  и  ${}^7\text{Li}$  для возбужденных состояний в 3 раза меньше чем для основных, что противоречит теоретически ожидаемым, согласно которым они должны совпадать. В то же время кластерные спектрофакторы  ${}^3\text{He} - t$  возбужденного состояния в реакциях с  ${}^3\text{He} + {}^6\text{Li}$  в 2 раза больше чем для основного.

Новая информация о кластерных свойствах ядер, зависимость сечений от структуры ядра-снаряда во входном канале, ведет к необходимости постановки комплексных экспериментов. Предусматривается измерение не

только дифференциальных сечений рассеяния, но и полных сечений реакций при одних и тех же энергиях и ядрах-мишенях с последующим определением потенциала взаимодействия, его параметров, среднеквадратичных радиусов распределения нейтронов и протонов в ядрах.

Разработка циклотронов, ускоряющих положительно заряженные ионизованные атомы элементов тяжелее гелия, привела к возникновению нового направления ядерной физики – физики тяжелых ионов. Появилась возможность решения задач, связанных с масштабными процессами в ядрах, характеризующихся сильной перестройкой ядерных систем при взаимодействии двух сложных ядер с образованием нового ядра или ядерной системы, изучение коллективных ядерных процессов с предельно большими изменениями формы ядра, перераспределением энергии между различными степенями свободы системы.

Запуск циклотрона DC-60 позволит получить информацию о ядерном потенциале на периферии ядра и тем самым дополнить общую картину ядро-ядерного взаимодействия. Поэтому перспективным направлением в этом аспекте является исследование упругих и квазиупругих процессов при энергиях, меньших высоты кулоновского барьера, где заряженная частица не может подойти к ядру на расстояние, когда становятся существенными ядерные силы. При своем движении около ядра она создает лишь сравнительно медленно меняющееся электрическое поле с характерным временем действия  $\approx 3 \cdot 10^{-21}$  с. Ядро поглощает электромагнитную энергию и переходит в возбужденное состояние (кулоновское возбуждение). При этом оно или начинает вращаться, или испытывать колебания низкой частоты. Высокочастотные колебания не могут интенсивно возбуждаться из-за медленной вариации электрического поля. С приближением энергии налетающей частицы к энергии кулоновского барьера в игру начинают вступать ядерные силы. Ядра соприкасаются друг с другом, их поверхностное взаимодействие значительно искажает резерфордскую траекторию относительного движения. Становятся возможными не только поверхностные колебания, но и передачи частиц от одного ядра другому. Поверхностное взаимодействие может изучаться как в упругих, так и неупругих процессах. Из-за действия на частицу потенциалов разных знаков (притягивающего ядерного и отталкивающего кулоновского) в угловых распределениях упругого рассеяния около так называемого угла радужного рассеяния, непосредственно перед экспоненциальным спадом сечения, проявляется максимум, связанный с конструктивной интерференцией кулоновской траектории и ядерной, отвечающей меньшим прицельным параметрам соударения. Аналогичные эффекты должны проявляться и в неупругих каналах. Наблюдение кулон-ядерной интерференции, в принципе, дает возможность получить информацию о ядерном потенциале на больших расстояниях в области так называемой ядерной «стратосферы».

Межъядерное взаимодействие традиционно рассматривается в рамках оптического потенциала, где действительная часть содержит ядерный, кулоновский, центробежный члены [82]. Наравне с ним при решении проблемы потенциалов используется микроскопический метод, основанный на интегрировании эффективного нуклон-нуклонного взаимодействия по распределениям нуклонных плотностей сталкивающихся ядер [83-84]. К настоящему времени достаточно хорошо установлено, что для нахождения «истинных» межъядерных потенциалов на близких расстояниях неизменным условием в экспериментах по рассеянию является «присутствие» двух эффектов – аномального рассеяния назад и ядерной радуги [85-87]. Эти процессы, а также вопросы связанные с определением межъядерного потенциала на малых расстояниях вплоть до 2-3 Фм достаточно полно исследованы с ионами гелия [75-78, 88]. Что же касается полутяжелых ионов, то эти методы реализованы пока только для  ${}^6\text{Li}$  [89]; расхождения между вудс-саксоновским и потенциалом свертки для  ${}^6\text{Li}$ - ${}^{40}\text{Ca}$  имеет место не только на малых расстояниях до 4 Фм, но и на больших (9-15 Фм). Очевидно, что в области ядерной стратосферы кулоновские и ядерные силы близки по величине и изучение кулоновско-ядерной интерференции проявляющейся в неупругом рассеянии ионов может оказаться довольно надежным методом определения межъядерного взаимодействия на периферии ядер. Положение и величина интерференционного минимума чувствительно к деталям ядерного потенциала на поверхности ядра и одновременное измерение упругого и неупругого рассеяния при энергиях иона близкой к энергии кулоновского барьера можно рассматривать как дополнительный способ локализации или снятия неоднозначностей параметров ядерного потенциала.

Итак, исследования упругого и неупругого рассеяния ядер на ядрах ( ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{14}\text{N}$ ,  ${}^{16}\text{O}$  и т.д.) при энергиях вблизи кулоновского барьера позволяет получить данные о интерференции кулоновских и ядерных амплитуд, а также является эффективным методом изучения межъядерного взаимодействия на периферии ядра.

### 5.2.2. Исследование реакций передачи и радиационного захвата для астрофизических и термоядерных приложений

Экспериментальные данные по ядерным реакциям и их анализ в рамках различных теоретических моделей являются основным источником информации о структуре ядра, свойствах и механизмах ядро-ядерного взаимодействия. Наиболее удобным средством получения такого рода информации о свойствах различных состояний ядер является изучение реакций прямого перехода от начального к конечному состоянию. К таким ядерным процессам можно отнести упругое и неупругое рассеяние, реакции передачи, реакции радиационного захвата и т.д.

Именно этим объясняется стремительное развитие техники получения пучков ускоренных частиц, способных вызывать ядерные реакции. Каждая новая ускоренная частица и новая доступная область энергии открывает новые возможности исследования. Прогресс в этом направлении очевиден: построены современные ускорительные комплексы, работающие не только на пучках электронов и протонов (ЛИИЯФ, CERN, NIKHEF, GANIL) но и пучках мезонов (LAMPF, PSI, BNLAGS), антипротонов (LEAR) и нестабильных радиоактивных ядер (BEVALAC, KEK, GSI, ИКАР, RIKEN).

В этой связи, создание банков экспериментальных и оцененных данных по сечениям ядерных реакций открывает новый уровень информационного обеспечения фундаментальных и прикладных исследований и выдвигает новые требования к эксперименту и теории во всех областях ядерной физики. Для фундаментальных ядерных исследований (экспериментальная и теоретическая ядерная физика, новые источники энергии, основанные на управляемом термоядерном синтезе, ядерная астрофизика) и их приложений (утилизация радиоактивных отходов, радиационная безопасность, медицинское применение искусственных радиоактивных изотопов), важность надежных ядерных данных очевидна.

Однако ситуация усложняется тем, что во многих астрофизических сценариях только теоретические предсказания могут восполнить недостающую информацию о характеристиках реакций. Сложность проблемы заключается, прежде всего, в том, что энергия взаимодействия вещества в звездах сравнительно невелика (от долей кэВ до сотен кэВ) и это значительно усложняет возможности прямого экспериментального определения требуемых для астрофизических расчетов сечений ядерных реакций. Естественным подходом является измерение сечений при более высоких энергиях, а затем их экстраполяция, с использованием теоретических методов, в энергетическую область, представляющую интерес для астрофизики и термоядерного синтеза.

Надежность такой процедуры определяется как качеством теоретических моделей, так и уровнем точности измерения экстраполируемых характеристик. Повышение точности измерений, безусловно, должно привести к сужению неоднозначностей процедуры экстраполяции. Кроме того, общей проблемой теоретической интерпретации экспериментальных данных об астрофизических реакциях является неоднозначность используемых феноменологических моделей, в частности, параметров оптических потенциалов [82, 90-91], спектроскопических характеристик ядер, которые могут быть связаны с недостаточным пониманием механизма исследуемых реакций. В этой ситуации расширение класса измеряемых реакций, протекающих на одних и тех же ядрах при заданной энергии, может уменьшить теоретические неопределенности моделей.

Наличие в ИЯФ НЯЦ РК ускорительного комплекса УКП-2-1, дающего

скрещенные пучки с энергетическим разбросом 150 эВ в диапазоне 0.2-1.5 МэВ по протонам, а также изохронного циклотрона У-150М позволяет осуществлять прецизионные эксперименты по измерению ядерных констант в широкой области энергий. Это, в свою очередь, может обеспечить успех при теоретической экстраполяции полученных экспериментальных данных в область малых и сверхмалых энергий.

При получении надежных ядерных констант особое место занимает данные по реакциям передач ( $^3\text{He}, d$ ) и  $(d, t)$  на легких ядрах, измеренных в области предельно малых углов (то есть в угловом распределении должен полностью обрисовываться первый максимум).

Эти реакции с передачей нуклона весьма удобны для получения спектроскопической информации о ядрах в силу относительной простоты механизма процесса. Метод искаженных волн (МИВ), предложенный 30 лет назад, стимулировал выполнение множества экспериментальных работ по измерению дифференциальных сечений ядерных реакций. Считалось, что приближения, принятые в МИВ, работают хорошо для реакций с легкими частицами с энергией порядка десятков МэВ на нуклон. Позднее, с помощью введения в МИВ дисперсионных соотношений (так называемый комбинированный метод анализа (КМ)), было показано, что не все прямые реакции можно анализировать в рамках МИВ. Известно, что наиболее критична зависимость извлекаемых в МИВ спектроскопических факторов (СФ) от геометрических параметров потенциала связанного состояния передаваемого нуклона. В рамках КМ этому найдено естественное объяснение. Было показано, что в случае чисто периферийных прямых процессов из экспериментальных сечений могут извлекаться не СФ, а ядерные вершинные константы (ЯВК) отделения передаваемого нуклона.

С точки зрения фундаментальной ядерной физики вышеперечисленные исследования важны, т.к. они предоставляют надежную спектроскопическую информацию для теоретических моделей структуры ядер и информацию о механизме для теории прямых ядерных реакций. Сопоставление значений ЯВК с микроскопическими расчетами позволяет сделать физически обоснованный выбор среди используемых нуклон-нуклонных потенциалов.

Особенно важным является то обстоятельство, что с использованием получаемых ЯВК могут быть рассчитаны, в частности, сечения радиационного захвата при очень низких, практически недоступных для измерений энергиях в ядерно-астрофизических реакциях, термоядерных процессах. Например, базовой реакцией CNO - цикла горения водорода в звездах является радиационный захват протона углеродом  $^{12}\text{C} + p \rightarrow ^{13}\text{N} + \gamma$ , а реакция  $^{16}\text{O} + p \rightarrow ^{17}\text{F} + \gamma$  является необходимым звеном "холодной" ветви этого цикла. Из исследования реакций  $^{12}\text{C}(^3\text{He}, d)^{13}\text{N}$   $^{16}\text{O}(^3\text{He}, d)^{17}\text{F}$  в области, где процесс передачи протона "полюсный" и периферийный, могут быть получены соответствующие значения ЯВК  $^{13}\text{N} \rightarrow ^{12}\text{C} + p$  и  $^{17}\text{F} \rightarrow ^{16}\text{O} + p$ , через

которые калибруются сечения захвата протона. Именно с этой точки зрения большой интерес представляет исследования реакций ( $^3\text{He},d$ ) и ( $d,t$ ) на большинстве ядер  $p$  и  $sd$  оболочек.

У современной ядерной астрофизики имеется свой круг задач, связанных с получением уточненных данных по сечениям радиационного захвата в  $\text{HN-}$ ,  $\text{CNO}$ , и других циклах горения звездного вещества, которые может быть решены только с точным анализом ядерных реакций при сверхнизких энергиях. К этим задачам, прежде всего, относятся: предсказание распространенности элементов в природе, объяснение процессов происходящих при вспышках в звездах и в частности на Солнце. Очень близка к этому кругу задач проблема управляемого термоядерного синтеза.

Очевидно, что для предсказания распространенности элементов в природе необходимо изучение цепочек реакций, заканчивающихся образованием определенных химических элементов. В связи с этим первостепенное значение имеют расчеты скоростей ядерных реакций. Скорости ядерных реакций во всех названных процессах вычисляются на основе экспериментальных сечений. Поскольку в большинстве случаев экспериментальные данные по сечениям исследуемых реакций получены при энергиях, намного превышающих характерные астрофизические необходима экстраполяция их в область низких энергий, точность которой прямо определяется точностью измеренных сечений и тем, от какой наименьшей энергии ведется процедура. Кроме того, измерения отдельных реакций проводились с использованием толстых мишеней, в результате чего значения сечений в области резонансов значительно искажены. Поэтому повышение точности измерения сечений астрофизических реакций и привлечения теоретических подходов для их оценки сечений даже в доступной экспериментальной области энергии приобретают особую важность.

Интересно использовать для этих целей ряд новых методов, успешно использованных для решения задач ядерной физики низких и средних энергий. К ним относятся спектроскопический подход с использованием кластерных моделей легких ядер и метод ЯВК, упомянутый выше.

Спектроскопический метод, заключается в использовании таких волновых функций ядер-мишеней, которые воспроизводят как можно более разнообразную спектроскопическую информацию о ядрах. С этими волновыми функциями, полученными в мультикластерных динамических моделях, планируется проводить расчеты характеристик ядерных реакций при сверхнизких энергиях. В частности будут вычислены кластерные фолдинг-потенциалы для взаимодействия ядер водорода и гелия с ядрами  $^6\text{Li}$  и  $^7\text{Be}$ . Данный метод определения потенциала взаимодействия наиболее предпочтителен для сильнокластеризованных ядер, к которым относятся  $^6\text{Li}$ ,  $^7\text{Be}$  и  $^{10}\text{B}$ . Кроме того, с использованием такого подхода могут быть

вычислены некоторые спектроскопические факторы, которые также будут использованы для расчета реакций радиационного захвата.

В частности метод ЯВК, который может быть использован для расчета сечений и астрофизических  $S$ -факторов радиационного захвата заряженной частицы при сверхнизких энергиях, базирующийся на использовании эмпирических данных, получаемых из реакций передачи при более высоких энергиях.

Таким образом, совершенно очевидно, что новые прецизионные экспериментальные данные по реакциям передач ( ${}^3\text{He}, d$ ),  $(d, t)$  и радиационного захвата представляя самостоятельный интерес при совместном исследовании позволяет существенно расширить наше понимание ядерных реакций при низких и сверхнизких энергиях. Это в свою очередь дает хорошую возможность пополнения базы данных по ядерным константам необходимых для астрофизических и термоядерных приложений.

В настоящее время реализация этих задач в ИЯФ НЯЦ РК осуществляется в рамках нескольких программ. Это тема РЦНТП "Экспериментальное и теоретическое определение сечений ядерных реакций на легких ядрах под действием заряженных частиц при низких энергиях", и принятый с 2003 года к реализации программа фундаментальных исследований "Исследование реакций передачи и радиационного захвата для астрофизических и термоядерных приложений".

В результате выполнения этих программ будет получена новая экспериментальная информация по сечениям и функциям возбуждения реакций передачи и радиационного захвата, инициируемых заряженными частицами на легких ядрах при низких энергиях, а также теоретическое описание и интерпретация исследуемых процессов на основе существующих модельных представлений о механизмах реакций и структуре ядер с целью корректного определения сечений радиационного захвата при сверхнизких энергиях, протекающих в  $\text{H-H}$ -,  $\text{CNO}$ -, и других циклах горения звездного вещества, взрывах сверхновых, термоядерном синтезе.

Для проведения экспериментальных работ на циклотроне У-150М по данному направлению создается автоматизированная камера реакций, оснащенная телескопами полупроводниковых  $\Delta E-E$  – детекторов, позволяющая выполнять измерения в широком диапазоне углов, включая малые углы вылета (от  $3^\circ$ ) с соответствующей электронной аппаратурой и программным обеспечением на базе РС.

Во всех экспериментах подобного класса точность сечений определяется в основном точностью определения толщины мишеней и наиболее оптимальным в этом аспекте является использование газоструйных мишеней. Использование таких мишеней дает принципиальную возможность проводить экспериментальное исследование

сечений радиационного захвата легких ионов на УКП-2-1 в области низких и сверхнизких энергий. В частности, бомбардируя тяжелыми ионами газовую водородную мишень можно проводить измерения сечений ядерных реакций при значительно низких энергиях, достижимых на пучке протонов тандема.

В последние годы, в связи с развитием экспериментальной ядерной астрофизики, обнаружено сильное изменение в спектре гамма-излучения от Солнца во время вспышек в диапазоне энергий квантов порядка 0.5-1 МэВ.

Этот экспериментальный результат был предсказан теоретически [92] и является следствием того, что в период солнечных вспышек в атмосфере Солнца имеется большая концентрация ядер He, C, N, O, Ne и т.д. с энергией порядка 1-3 МэВ/нуклон. При этих энергиях протекают ядерные реакции синтеза. Образовавшиеся ядра оказываются, как правило, в возбужденном состоянии. Излучение от них приходится на диапазон 0.3-3 МэВ. При этом число отдельных гамма линий столь велико, что разделить их в космическом эксперименте до сих пор не удается. То есть можно утверждать, что наблюдавшиеся гамма-спектры есть квазинепрерывный спектр излучения образованных ядер.

В плазме атмосферы Солнца и других звезд Галактики ядра с энергией 1 МэВ/нуклон должны возникать при широком интервале звездной активности.

Поэтому дальнейшие эксперименты на ускорителях различного типа по реакциям синтеза легких элементов при энергиях ускоренных ионов в несколько МэВ/нуклон с излучением гамма-квантов являются чрезвычайно актуальной задачей.

Для решения этих фундаментальных задач ядерной астрофизики крайне важно проведение исследований по ядерной физике низких энергий (в области энергий  $\sim 0.5 \div 1.5$  МэВ/нуклон), в которой, роль наиболее существенной проблемы описания ядерных процессов, связанной с неоднозначностью выбора формы ядерного взаимодействия, сводится к минимуму.

В этой связи экспериментальные и теоретические исследования подбарьерных ядерных реакций с передачей заряженных частиц могут служить надежным источником практически модельно-независимой информации о структуре легких ядер, которая позволяет производить надежные расчеты величин сечений и астрофизических  $S$ -факторов для ядерных процессов, происходящих в недрах Солнца и в массивных звездах.

Подобные исследования ранее практически не проводились из-за отсутствия достаточно разработанного теоретического базиса для анализа получаемых данных, а также из-за отсутствия соответствующих высокоинтенсивных ускорителей тяжелых ионов с достаточной монохроматичностью пучка. В частности, согласно Ч.Барнсу [93] при звездных температурах  $T \approx (1.3-3.5)T_9$  (где  $T_9=10^9\text{K}$ ) могут эффективно

происходить реакции взаимодействия ядер углерода и кислорода друг с другом. Это приводит к появлению быстрых  $\alpha$ -частиц и протонов, а также ядер  $^{20}\text{Ne}$ ,  $^{23}\text{Na}$ ,  $^{23}\text{Mg}$ ,  $^{30,31}\text{P}$ ,  $^{30,31}\text{S}$ ,  $^{28}\text{Si}$ .

Образующиеся в этих реакциях  $\alpha$ -частицы, протоны и нейтроны могут взаимодействовать с ядрами, наработанными к тому времени в звездах за счет водородного, гелиевого и CNO-циклов. В результате идет наработка таких ядер, как  $^{20,21,22}\text{Ne}$ ,  $^{23}\text{Na}$ ,  $^{24,25,26}\text{Mg}$ ,  $^{26,27}\text{Al}$ ,  $^{30,31}\text{P}$ ,  $^{28,29,30}\text{Si}$ , но главными продуктами являются  $^{20}\text{Ne}$  и  $^{24}\text{Mg}$ . Последний образуется, в первую очередь, за счет  $\alpha$ -захвата на  $^{20}\text{Ne}$  или реакции  $^{23}\text{Na}(p,\gamma)^{24}\text{Mg}$ .

Например, для системы  $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  нижняя граница измеренных сечений выполнена при  $E_{\text{см}} \sim 2,5$  МэВ [94-96]. Если при энергиях более 4 МэВ различные измерения хорошо согласуются между собой, то в низкоэнергетической области существующие данные весьма противоречивы, что приводит к большим ошибкам в экстраполяции к энергиям, соответствующим температуре горения углерода в звездах.

В связи с этим проведение подобных экспериментальных исследований на ускорителе тяжелых ионов ДС-60 позволит дополнить базу ядерных констант по взаимодействию изотопов тяжелее углерода между собой. При этом в рамках программы фундаментальных исследований "Исследование реакций передачи и радиационного захвата для астрофизических и термоядерных приложений" будут проведены работы по следующим направлениям:

- Разработка и создание экспериментальных методик, позволяющих проводить прецизионные измерения дифференциальных сечений подбарьерных реакций синтеза легких элементов и передачи заряженной частицы (протона,  $\alpha$ -частицы) типа  $A(^{14}\text{N}, ^{13}\text{C})\text{B}$ ,  $A(^{12}\text{C}, ^{16}\text{O})\text{B}$  в широком диапазоне углов рассеяния, включая предельно малые на ускорителе тяжелых ионов ДС-60.
- Модификация метода искаженных волн в рамках трехчастичного подхода с корректным учетом Кулоновской динамики в процессе передачи заряженной частицы и ее применение для анализа получаемых экспериментальных данных с целью получения необходимой и надежной информации о структуре ядер.
- Использование полученных данных о структуре ядер в расчетах соответствующих ядерно-астрофизических процессов радиационного захвата, таких как  $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$  и других при сверхнизких энергиях.

## 6. Вопросы подготовки кадров

Как было отмечено в разделе 1, государственной задачей в сфере образования и науки является развитие нового содержания образования как сферы, формирующей человеческие ресурсы, способные освоить

технологии XXI века и обеспечить будущее процветание Казахстана. Ключевым фактором создания и развития современной конкурентоспособной экономики является налаживание тесных связей между учебным и научно-исследовательскими направлениями в деятельности вузов и реальное, а не формальное слияние крупных вузов и научно-исследовательских институтов.

Мировой опыт показывает, что подготовка специалистов мирового уровня по естественным наукам требует вовлечения студентов, магистрантов и аспирантов в активную научно-исследовательскую, технологическую и коммерческую деятельность под руководством признанных ученых в своих областях. Создаваемый в ЕНУ им. Л.Н. Гумилева междисциплинарный научно-исследовательский комплекс на базе ускорителя тяжелых ионов в значительной мере решает поставленную задачу в области подготовки кадров естественно-научного и технического направлений. Как было показано в разделах 2-5, циклотрон DC-60 в качестве базовой установки этого комплекса предоставляет широкое поле деятельности для подготовки научных и инженерно-технических специалистов технологического и фундаментального профилей. Постановка и организация работы нового научно-исследовательского комплекса в самостоятельном режиме может быть реализована на практике при научном сопровождении ИЯФ НЯЦ РК по совместной разработке действующих на сегодня фундаментальных и прикладных научно-исследовательских программ.

Имеется положительный опыт НЯЦ РК по подготовке высококвалифицированных специалистов по атомной науке и энергетике. Например, для решения этой проблемы ИЯФ НЯЦ РК заключены договоры о научном сотрудничестве с такими ведущими вузами Казахстана, как КазНУ им. аль Фараби, АГУ им. Абая, Западно-Казахстанским государственным университетом, Алматинским институтом энергетике и связи и Восточно-Казахстанским государственным университетом по подготовке высококвалифицированных кадров по ядерной физике и физике твердого тела.

В частности, начиная с 1997 года, ежегодно в ИЯФ НЯЦ РК проходят обучение до 50 студентов вышеперечисленных вузов. И в общей сложности за эти годы в Институте прошли обучение по спецкурсам, производственную практику, выполнили курсовые, дипломные и магистерские работы свыше 200 студентов.

Создание и запуск в ЕНУ им. Л.Н. Гумилева ускорителя тяжелых ионов DC-60 дает возможность создать опытно-экспериментальную и лабораторную базы исследований для ее совместного использования научными работниками, преподавателями, студентами, аспирантами.

Большая техническая сложность эксплуатации циклотронов по сравнению с линейными ускорителями переходит в преимущества при его использовании в процессе обучения студентов. Обеспечение эксплуатации

циклотрона необходимым образом потребует организации подготовки высококлассных специалистов по ускорительной технике, СВЧ-технике, магнитно-оптическим системам, источникам тяжелых ионов, электрофизической аппаратуре, высоковакуумной технике и т.д.

Студенты, магистранты и аспиранты в процессе освоения указанных специальностей, наряду с участием в научных исследованиях, проводимых на этом ускорителе в области ядерной физики, физики твердого тела, по существу имеют возможность приобрести высокую квалификацию инженеров-физиков и ученых в области высоких технологий, необходимых в промышленности Казахстана, прежде всего в урановой промышленности и атомной энергетике и науке, других областях.

Наличие такой уникальной и сложной базовой установки в ЕНУ им. Л.Н. Гумилева позволит существенно расширить его вовлеченность в межгосударственную интеграцию научных организаций и учебных заведений стран СНГ и дальнего зарубежья с целью подготовки научных кадров, владеющих на мировом уровне современными методами исследований.

И, наконец, создание в ЕНУ им. Л.Н. Гумилева междисциплинарного научно-исследовательского комплекса на базе ускорителя тяжелых ионов позволит осуществить переход от подготовки «компетентных специалистов» к подготовке «специалистов-исследователей», способных управлять сложнейшими технологическими процессами, находить и принимать конкретные решения при дефиците времени в условиях реальной экономики. Такие специалисты будут способны творчески воспринимать новые научные идеи, обеспечивающие максимально быстрое промышленное освоение технологических новшеств.

\* \* \*

Приведенный в препринте материал обсужден и одобрен Ученым советом Института ядерной физики НЯЦ РК (Приложение 1), Ученым советом Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ, г. Дубна, РФ) (Приложение 2), на совместном заседании Научно-технического совета Национального ядерного центра РК и секции "Атомная энергетика и промышленность Министерства энергетики и минеральных ресурсов РК (Приложение 3), на презентации Астанинского филиала ИЯФ НЯЦ РК при Евразийском национальном университете им. Л.Н.Гумилева (Приложение 4), на совещании по сотрудничеству ОИЯИ с научными центрами Республики Казахстан (Приложение 5), на 3-й международной конференции "Ядерная и радиационная физика" (Алматы, 2001 г.) [97].

## Литература

1. В.С. Школьник, А.А. Арзуманов, А.Н. Борисенко, И.Д. Горлачев, К.К. Кадыржанов, К.А. Кутербеков, С.Н. Лысухин, А.Ж. Тулеушев. «Ускорительная техника и развитие физики в Казахстане (1992-2002)». - Алматы, 2003 – 184 С.
2. Transactions of the Third International Meeting on Radiation Processing// Radiat. Phys. and Chem., 1981. Vol. 1-2. № 1,2; Vol. 18. № 3-6
3. 7-th International Meeting on Radiation Processing// Invited papers. April 23-28. Center, The Netherlands, 1989.
4. Доклады международной конференции «Ядерная энергетика в СССР: проблемы и перспективы (экология, экономика, право)». Обнинск, 23-27 июня 1990 г. Ядерное общество СССР. 1990.
5. М.П.Свиньин, Ускорители для народного хозяйства. В кн. «Доклады Четвертого Всесоюзного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве» (28-30 сентября 1982 г., Ленинград), С. 5-15.
6. <http://www.bnl.gov/bnlweb/facilities/TVdG.html>
7. C.Bieth and the S.A.I.F. group, Nucl. Tracks Radiat. Meas. 19 (1991) 875
8. <http://www.ganil.fr/>
9. <http://www.cyc.ucl.ac.be/CYC/>;
10. E.Ferain, R.Legras, Nucl. Instrum. Meth. B131 (1997) 97
11. H.Homeyer, in: Proc. XIV Intern. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, Cape Town, South Africa, 8-13 Oct. 1995 (Ed. J.C.Cornell), World Scientific, Singapore. 1996. P.70
12. Г.Н.Флеров, П.Ю.Апель, А.Ю.Дидык, В.И.Кузнецов, Р.Ц.Оганесян. Атомная Энергия 67 (1989) 274.
13. Yu.Ts.Oganessian, S.N.Dmitriev, A.Yu.Didyk, G.G.Gulbekian, V.B.Kutner, JINR preprint E13-2000-40, Dubna, 2000, pp.1-16
14. R.Spohr, Nucl. Tracks 4 (1980) 101
15. M.Hagiwara, Nucl. Tracks Radiat. Meas. 19 (1991) 8
16. <http://www.osmonics.com/products/page330.htm>; Microfiltration and Laboratory. Poretics Products Catalog, 1996 Edition, Livermore CA, pp.1-171
17. <http://www.whatman.plc.uk/products/nuclepore/index.htm>
18. <http://www.oxyphen.com/>
19. P.Apel, A.Schulz, R.Spohr, C.Trautmann, V.Vutsadakis, Nucl. Instrum. Meth. B131 (1997) 55
20. Л.И.Кравец, С.Н.Дмитриев, П.Ю.Апель. Химия высоких энергий 31 (1997) 25
21. P.Vater, Nucl. Tracks Radiat. Meas. 15 (1988) 743
22. V.V.Shirkova, S.P.Tretyakova, Radiat. Meas. 28 (1997) 791
23. C.Trautmann, W.Brüchle, R.Spohr, J.Vetter, N.Angert, Nucl. Instrum. Meth. B111 (1996) 70

24. S.Bohm, W.Oltuis, P.Bergveld, Sensors and Actuators B: Chemical 63 (2000) 201
25. S.Metz, C.Trautmann, A.Bertsch, P.Renaud, in: Proc.15<sup>th</sup> IEEE Intern. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems, Las Vegas, USA, 2002, p81
26. M.Danziger, W.Votius, in: Proc. 2<sup>nd</sup> Intern. Symp. on Polyimides and other High Temperature Polymers, Newark, December 2001 (in press).
27. <http://fractal-ag.de/english/fracflex.htm>
28. US Patent 6,328,342, 2001
29. European Patent application 00982732.0-2210, 2002
30. С.Н.Дмитриев, В.Ф. Реутов, Способ ионного легирования твердых тел Патент РФ № 2193080, 20.8.2002г
31. С.Н.Дмитриев, В.Ф.Реутов, А.А.Ефремов, Способ многоэлементной ионной имплантации. Заявка на Патент № 2001127136/20, 2001г
32. С.Н.Дмитриев, В.Ф.Реутов, Ионно-трековая нанотехнология – Препринт ОИЯИ Р18-2002-230, Дубна, 2002.
33. В.Ф.Реутов, С.Н.Дмитриев, А.Н.Сохацкий, Способ получения металлической реплики для анализа нанометрических каналов в трековых мембранах. Патент РФ № 2115915, 23.07.96.
34. В.Ф.Реутов, С.Н.Дмитриев, Способ изготовления субмикронных трубчатых металлических реплик с трековых мембран. Патент РФ, № 2156328, 25.12.98.
35. В.Ф.Реутов, А.С.Сохацкий, ЖТФ, 73(2003), вып.1
36. I.Y.Abdrashitov, K.V.Botvin, V.F.Reutov, et.al., Report 4-80, Institute of Nuclear Physics of Acad. Of Sciences KazSSR, Alma-Ata, 1980.
37. В.Ф.Реутов, А.С.Сохацкий, Письма в ЖТФ, вып.14 (2002) 83
38. М.И. Солонин, Ф.Г. Решетников, А.Г. Иолтуховский А.В., ФХОМ, №4 (2001) 17.
39. Ш.Ш.Ибрагимов, Радиационные нарушения в металлах и сплавах. В сб. Радиационные дефекты в металлических материалах. Алма-Ата.- «Наука» КазССР 1978 С. 3
40. Ш.Ш.Ибрагимов, В.В.Кирсанов, Ю.С.Пятилетов., Радиационные повреждения металлов и сплавов. М.- Энергоатомиздат. 1985 240 с.
41. В.Ф. Зеленский, И.М. Неклюдов, Т.П. Черняева., Радиационные дефекты и набухание металлов. Киев: Наук думка, 1988 296 с.
42. F.A. Garner, Materials Science and Technology. Nuclear Materials, Part 1. Ed by R.V.T.Frost, (1994) 420.
43. Effects of Radiation on Materials: 20<sup>th</sup> International Symposium, ASTM STP 1405, S.T.Rosinski, M.L.Grossbeck, T.R.Allen, and A.S.Kummar, Eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2001, 880 p.
44. K.L. Merkle. Phys. Stat. Sol. 18 (1966) 173.
45. Ш.Ш. Ибрагимов, А.И. Козин, Г.П.Чурсин, В кн.: Труды VII Международной конференции по атомным столкновениям в твердых телах (19 – 23 сентября 1977, Москва). – М.: МГУ Т2 1981, 274.

46. Томпсон М. Дефекты и радиационные повреждения в металлах: Пер. с англ.- М.: Мир. 1971 367с.
47. А.Ю. Дидык, А.Л. Суворов, В.К. Семина, А.Э. Степанов, Ю.Н. Чеблуков, А. Халил. Изменение структуры поверхности Ni, W и хромоникелевой стали X18H10, облученных высокими флюенсами ионов криптона высоких энергий. Препринт ОИЯИ Р14-99-264. Дубна. 1999, 10с.
48. А. Хофман, А.Ю. Дидык, В.К. Семина. Фазовые превращения в аустенитной стали 0X18H10T, облученной высокоэнергетическими тяжелыми ионами. Препринт- ОИЯИ, Р14-2000-125. Дубна. 2000, 6с.
49. Ф.Ф. Комаров. Ионная и фотонная обработка материалов. Минск, «ВУЗ-ЮНИТИ» 1998, 209с.
50. S.Marti, Nucl. Instr. Meth. 80/81 B (1993) 895.
51. Ф.Ф. Комаров. Ионная имплантация в металлы. Москва, Металлургия, 1990, 216с.
52. J.L. Bnmhall, H.E. Kissinger, A.R. Pelton. Radiat. Effects, 90 (1985) 241.
53. А.Ф. Буренков, Ф.Ф. Комаров. ЖТФ 58 (1988) 55.
54. R.P. Livi. Nucl. Instr. Meth. B10/11 (1985) 545.
55. R.G. Stokstad, P.J. Jacobs, et. al., Nucl. Instr. Meth. 16B (1986) 465.
56. R.E. Beneson, B. Daudin, P. Martin, M. Bubus. Nucl. Instr. Meth 19/20B (1987) 114.
57. C.P. Zhengynan, L. Jiarui. Nucl. Instr. Meth 36B (1989) 173.
58. F.W. Saris. Vacuum 39 (1989) 173.
59. A. Marwick. Appl. Phys. Lett. 51 (1987) 139.
60. R.B. Schwarz, W.L. Johnson. Phys. Rev. Lett. 51 (1983) 415.
61. A. Thoma, H. Adrian. Jour. Less-Common Metals 145 (1989) 115.
62. K. Samwer. Phys. Rep. 161 (1988) 1.
63. A.M. Perez-Martin, A.M. Vredenberg, L. deWitt, J.S. Custer. Mater. Sci, and Engineering, B19 (1993) 281.
64. P.H. Hahn, R.S. Averbach, S.J. Rothman. Phys. Rev. B33 (1986) 8825.
65. A. Hahn, R.S. Averbach, F.-R. Ding, et al. Mater. Sci. Forum 15-18 (1987) 551.
66. J.M. Poate. Mater. Sci. and Eng. B2 (1989) 41.
67. A.F. Burenkov, F.F. Komarov, S.A. Fedotov, et al. Rad. Eft and Def. in Solids, 25 (1993) 169.
68. F. Paschoud, M. Alurralde, G. Szenes, et al. Rad. Eft and Def. in Solids, 25 (1993) 177.
69. T. Sekioka, M. Tezasawa, T. Mitamura et al. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B146 (1998) 172.
70. Yu. Ts. Oganessian et al. Scientific Report 1995-1996 Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR E7-97-206, Dubna, 1997, p.270-276.
71. V.B. Kutner, S.L. Bogomolov, G.G. Gulbekian et al. Book of the XV Intern. Conf. on Cyclotrons and their Applications, Caen, France, 14-19 June, 1998.

72. S.L. Bogomolov. Development of the ECR ion sources for the FLNR (JINR) cyclotron complex. Proceedings of the Cairo 3<sup>rd</sup> Conference and Workshop on Cyclotron and Applications, 1999, p.52-63.
73. Yu. Ts. Oganessian, S.N. Dmitriev, A. Yu. Didyk, G.G. Gulbekian, V.B. Kutner. New possibilities of the FLNR accelerator complex for the production of track membranes. JINR Preprint E13-2000-40, Dubna, 2000, 16 p.
74. V.A. Skuratov, A. Illes, Z. Illes, et al. Beam diagnostics and data acquisition system for beam transport line used in applied research. JINR Commun. E13-99-161, Dubna, 1999, 8 p.
75. В.В. Адодин, Н. Буртебаев, А. Дуйсебаев, ЯФ 55 (1992) 577.
76. N. Burtebaev, A.S. Demyanova, Ogloblin A.A. et al. Nucl. Phys. A482 (1988) 383.
77. Н. Буртебаев, А. Дуйсебаев, С.Б. Сакута, ЯФ 63(2000) 625.
78. К.Б. Басыбеков, Н. Буртебаев, А. Дуйсебаев, Изв. АН-МН РК, сер. физ.-мат. 6(1998)28.
79. Н. Буртебаев, А.Д. Дуйсебаев, Г.Н. Иванов, С.Б. Сакута. ЯФ 58 (1995) 596.
80. Н. Буртебаев, А.Д. Дуйсебаев, Б.А. Дуйсебаев, Г.Н. Иванов, С.Б. Сакута. ЯФ 59 (1996) 33.
81. A.T. Rudchik, E.I. Koshchy, A. Budzanowski, R. Siudak, A. Szczurek, I.I. Skiwirczynska, Yu.G. Mashkarov, L. Glowacka, J. Turkiewicz, I.I. Zalyubovsky, V.A. Ziman, N.T. Burtebayev, A.D. Duysabayev, V.V. Adodin. Nuc. Phys. A609 (1996) 147.
82. П.Е. Ходгсон. Оптическая модель упругого рассеяния. М.: Атомиздат, 1966.
83. G.R. Satchler, W.G. Love. Phys. Rep. 55 (1979) 183.
84. О.М. Князьков, А.А. Некрасов. ЯФ 38 (1983) 36.
85. К.А. Гриднев, А.А. Оглоблин. ЭЧАЯ 6 (1975) 393.
86. Н.С. Зеленская, И.Б. Теплов. Обменные процессы в ядерных реакциях. - М.: МГУ, 1985.
87. Ю.А. Бережной, А.В. Кузниченко, Г.М. Онищенко, В.В. Пилипенко. ЭЧАЯ 18 (1987) 289.
88. А.С. Демьянова, А.А. Оглоблин. Изв. РАН, Сер. физ. 60 (1996) 6.
89. А.А. Оглоблин, С.Б. Сакута. Современные методы ядерной спектроскопии. Л.: Наука, 1988, С. 63-107.
90. К.Б. Бактыбаев, А.Д. Дуйсебаев, А.Б. Кабулов. Изв. АН КазССР, сер. физ.-мат. 6 (1974) 156.
91. К.Б. Бактыбаев, А.Б. Кабулов. Изв. АН КазССР, сер. физ.-мат., 4 (1975) 156.
92. Б.М. Кужевский. «Ядерные процессы в атмосфере Солнца и солнечное космическое излучение», Москва, Энергаториздат, 1985 г.
93. С.А. Барнс. Ядерные реакции в сильно проэволюционированных звездах В сб. Ядерная астрофизика, М., "Мир", 1986, с.191-227.
94. M.D. Hign and V. Sujec. Nucl. Phys. A282 (1977) 181.

95. K.U.Kettner, H. Lorenz-Wirzba and C.Rolfs. *Z.Phys. A -Atoms and Nuclei* 298 (1980) 65.
96. H.W.Becker, K.U.Kettner, C.Rolfs and H.P.Trautvetter. *Z.Phys. A -Atoms and Nuclei* 300 (1981) 305.
97. B.N.Gikal, M.G.Itkis, S.N.Dmitriev, G.G.Gulbekian, J.Franko, K.K.Kadyrzhanov, A.A.Arzumanov, A.N.Borisenko, S.N.Lissukhin. Материалы 3-й международной конференции "Ядерная и радиационная физика", Алматы, ИЯФ НЯЦ РК, 2001, с. 9-28.

## Протокол № 1

заседания Ученого Совета ИЯФ НЯЦ РК

от 28 февраля 2001 г.

## 1. Об Астанинском филиале ИЯФ НЯЦ РК.

Председатель Ученого совета (УС) Кадыржанов К.К. представил членам УС ректора Евразийского Государственного университета им. Л.Н. Гумилева, профессора Мырзатая Жолдасбековича Жолдасбекова. Счастливая возможность членам УС познакомиться с известным человеком в нашей Республике: был ректором Талды-Курганского университета, Министром образования, вице-премьером Правительства, Послом Казахстана в Ираке, имеет ранг Чрезвычайного и Полномочного посла.

Слушали: Председатель УС рассказал о Проекте Постановления Правительства РК по созданию в Евразийском Государственном университете им. Л.Н. Гумилева междисциплинарного учебно-исследовательского комплекса на базе ускорителя тяжелых ионов. Такой ускоритель тяжелых ионов, разрабатываемый ОИЯИ (г. Дубна), может применяться как в учебно-научных, так и в технологических работах. Нужно готовить научные кадры: по ускорительной технике, радиационной физике твердого тела и т.д.

Затем председатель УС предоставил слово д.т.н. профессору Арзуманову А.А., который рассказал о научно-технических вопросах создаваемого ускорительного комплекса.

Далее председатель предоставил слово ректору ЕГУ им. Гумилева профессору Жолдасбекову М.Ж.

Жолдасбеков М.Ж.: Для меня большая честь посетить Институт ядерной физики НЯЦ РК. Это не простое посещение – это решение наших совместных задач. Президентом РК поставлена задача: сделать ЕГУ им. Гумилева лучшим не только в регионе, но и в стране. На 2001 год будет выделено ЕГУ им. Гумилева от 2,5 млрд. тенге до 3,325 млрд. тенге. Строительство учебно-лабораторного корпуса будет начато в 2001 году. Президент страны лично курирует ЕГУ им. Гумилева, его посетили Президенты России, Белоруссии и других стран. При ЕГУ им. Гумилева создан филиал математического факультета МГУ им. Ломоносова. Условия приема в филиал МГУ при ЕГУ им. Л.Н. Гумилева будут опубликованы через месяц. Хочу отметить, что в настоящее время более 50 % выпускников, закончивших школу с медалью «Алтын» - уходят в другие страны. Десятого октября 2000 г. Президент России В.В. Путин посетил ЕГУ им. Гумилева. «Такого «хорошего» университета – не видел» - слова Путина после посещения ЕГУ им. Гумилева. Филиал ИЯФ при ЕГУ им. Гумилева очень нужен и своевременен. Евразийский университет - реализация идеи Евразийства нашего Президента страны. Происходит создание Евразийского союза, уже организован экономический союз. Быть проводником «Евразийской» идеи – основная функция ЕГУ им. Гумилева. Созданный ранее Форум народов Казахстана (идея, продвигавшаяся М.Ж. Жолдасбековым) переросла в Ассамблею народов Казахстана. Хорошие взаимоотношения сложились у ЕГУ им. Гумилева с Томским университетом. Ректор Томского государственного университета профессор Майер организует выставку в ЕГУ им. Гумилева по фонду Потанина. Ректор Белорусского государственного университета посетил ЕГУ им. Гумилева.

С МГУ, который создает филиал в ЕГУ, будет налажена дистанционная связь, чтобы профессора МГУ могли читать лекции студентам ЕГУ им. Гумилева, находясь в МГУ. В мае 200 г. приглашены 35 докторов и 42 кандидата наук в Евразийский университет (среди них математик, член-корр. НАН РК, профессор Отельбаев Мухтар). Спасибо за

приглашение профессору Кадыржанову К.К. посетить Институт и присутствовать на заседании Ученого совета. Ректор ЕГУ им. Л.Н. Гумилева профессор Жолдасбеков М.Ж. предложил профессорам ИЯФ НЯЦ РК прочитать несколько лекций для студентов старших курсов.

Руководство ЕГУ им. Л.Н. Гумилева полностью поддерживает создание филиала ИЯФ НЯЦ РК при Евразийском Государственном университете им. Л.Н. Гумилева.

В ходе обсуждения было принято решение:

1. Ученый совет ИЯФ НЯЦ РК одобряет решение о создании Астанинского филиала при Евразийском Государственном университете им. Л.Н. Гумилева.
2. Ученый совет ИЯФ НЯЦ РК одобряет Проект создания междисциплинарного учебно-исследовательского комплекса на базе ускорителя тяжелых ионов в Евразийском Государственном университете им. Л.Н. Гумилева.
3. Дирекция ИЯФ НЯЦ РК направить в 2001 – 2002 годах в Евразийский университет им. Л.Н. Гумилева профессоров и ведущих специалистов-физиков для чтения лекций студентам старших курсов (по согласованию сроков командирования с ректором ЕГУ им. Л.Н. Гумилева).

Председатель  
Ученого Совета ИЯФ НЯЦ  
РК, профессор

 КАДЫРЖАНОВ К.К.

Секретарь Ученого Совета

 КУТЕРБЕКОВ К.А.

### **I. General considerations**

1. The Scientific Council takes note of the comprehensive report presented by JINR Director V. Kadyshvsky on the implementation of the recommendations taken at the 91st and 92nd sessions of the Scientific Council.

The Scientific Council is pleased to note that its recommendations to the JINR Directorate concerning the Scientific Programme of JINR, the operation and upgrade of the basic facilities, and the construction of new facilities are being successfully implemented.

2. The Scientific Council notes with interest the "Brief Review of the Scientific Results Obtained at JINR in 2002" prepared for this sessions in response to its previous recommendation. This material, based on publications in books, refereed journals, international conference proceedings, and on PhD thesis presentations, should be regularly presented at future sessions. The Scientific Council appreciates this work, which provides an essential tool for evaluation.

3. The Scientific Council congratulations Professors I. Meshkov, A. Skrinisky and their colleagues on the State Prize of the Russian Federation for their contributions to work on the "Method of electron cooling of heavy charged particle beams".

4. The Scientific Council thanks Professor I. Meshkov for his highly successful work as Chief Engineer of JINR over the last five years and appreciates his outstanding contribution to the operation and development of JINR basic facilities and to the scientific research in the field of accelerator physics and engineering.

The Scientific Council notes that on 1 January 2003 Dr G. Shirkov was appointed as Chief Engineer of JINR for a term of one year.

5. At its next meeting in March 2003, the JINR Committee of Plenipotentiaries is to appoint the new membership of the Scientific Council wish to express their appreciation of the constructive atmosphere at the Council meetings.

The Scientific Council wishes the present JINR Directorate further successful leadership of this international centre.

### **II. Considerations concerning the JINR Scientific Programme**

1. The Scientific Council takes note of the reports presented by the Director of JINR and the Chairpersons of the PACs and endorses "The JINR Topical Plan for Research and International Cooperation in 2003".

2. Taking into account the proposals of the JINR Directorate and the recommendations of the PACs, the Scientific Council endorses the following priority activities in 2003 on which financial and manpower resources should be focused:

#### in-house facilities

- improvement of the Nuclotron beam extraction system and of external beam lines, further efficiency of the complex, achievement of a wider range of accelerated particles and nuclei for the users, operation and development of the Nuclotron, and outphasing of the Synchrophasotron;

- modernization of the IBR-2 reaction according to the schedule of activities approved by the Agreement between JINR and Russian Ministry for Atomic Energy: construction of the new movable reflector, replacement of the reactor core. Manufacturing of the reactor's new fuel loading, and replacement of the cryogenic facility;

- start of physics experiments with radioactive ion beams, completion of Phase I of the Dubna Radioactive Ion Beams (DRIBs) project, implementation of work on the realization of Phase II of the project;

#### facilities under construction

- decommissioning of the IBR-30 reactor and construction of the IREN facility according to the revised schedule of November 2002 and dedicated funding with a view to completion of its first stage in 2005;

-further development of JINR's telecommunication links, networking, computing and information infrastructure;

ongoing research programmes and projects. The Scientific Council recommends that the allocation of resources should take into account the scientific impact and visibility of Dubna physicists in international collaborations.

- studies in modern mathematical physics; theoretical studies in particle physics, nuclear physics, and condensed matter physics, also with a view to supporting experimental work in these fields;

- continued participation in frontier experiments aimed at studying the fundamental properties of elementary particles and their interactions, among others at accelerator facilities at IHEP (Protvino), CERN, DESY, BNL and FNAL;

- study of rare weak processes (projects PIBETA, ANCOR, NEMO-3, FAMILON, E391A, etc) aimed at verification of the Standard Model of Particle Physics and search for new physics phenomena beyond the standard Model, measurement of direct *CP*-violation, as well as investigations of neutrino properties and nature;

- experiments on the synthesis of superheavy nuclei with  $Z=116$  and  $118$  using the upgraded Gas-Filled Recoil and VASSILISSA separators, experiments on the chemical isolation and identification of superheavy elements with  $Z=112$  and  $114$ , study of the fusion-fission reactions with  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{58}\text{Fe}$ ,  $^{64}\text{Ni}$  ions using the CORSET+DEMON facility, study of the structure of light exotic nuclei and of the mechanism of nuclear reactions with radioactive and stable ion beams using the ACCULINNA, COMBAS, MSP-144 and ISTR A set-ups, construction of the MASHA separator;

- continuation of relativistic nuclear interaction studies focused on the search for manifestations of quark and gluon degrees of freedom in nuclei and on properties of nuclear matter at high energies (e.g. experiment FASA), as well as studies of the spin structure of the lightest nuclei; in-house experiments mainly at the Nuclotron, as well as experiments at accelerators of other centres: CERN (SPS, PS), BNL (RHIC) GSI (SIS), Uppsala University (CELSIUS), RIKEN, and DESY (HERA);

- development of instrumentation and data acquisition equipment for spectrometers at the IBR-2 reactor to make possible a cold neutron programme, improvement of detectors for research with IREN

#### other items that deserve attention

- development of the JINR Educational Programme, including special-purpose training of specialists for the Member States; in particular, start of the new project "Dubna International Advanced School of Theoretical Physics";

- further R&D of accelerator subsystems for the LHC and linear colliders TESLA and CLIC as well as development of promising accelerator technologies;

- investigation of stochastic and deterministic effects induced in biological objects by ionizing radiation with different linear energy transfers, continuation of the development of new radiopharmaceuticals for cancer diagnostics and treatment.

The Scientific Council considers that:

- the large number of activities feature in the 7-year Programme should be clearly prioritized;

- the future JINR facilities should be identified together with corresponding resources.

The 7-year Programme offers the JINR Directorate a good opportunity to express its vision of the main scientific goals for the 2003-2009 period. The Scientific Council recommends that the JINR Directorate take into account these considerations and present its decision at the 94th session.

### **III. Recommendations concerning JINR's long-term scientific programme**

The Scientific Council takes note of the comprehensive draft of the "Programme of the Scientific Research and development of JINR for 2003-2009" presented by Vice-Director A. Sissakian. The Scientific Council appreciates the efforts of the JINR Directorate to develop a competitive long-term scientific programme of JINR.

The Scientific Council endorses the general lines of the proposed Draft Programme and asks the JINR Directorate to prepare for the next session the final text of the Programme, taking into account the comments and input of the Scientific Council and the PACs.

The Draft Programme reflects the participation of JINR scientists in major international projects and the commitment of the Institute to provide world-class user facilities for basic research, namely DRIBs, IBR-2, IREN, and the Nuclotron. The Scientific Council recommends that the the Committee of Plenipotentiaries consider this Draft Programme as a basis for initiating financial planning for JINR in 2003-2009 and that financial support as outlined in this document be requested for the Member States.

The Scientific Council takes note of the information presented by K. Kadyrzhanov Plenipotentiary of Kazakhstan to JINR, about a plan to construct the DC-60 cyclotron in Astana (Kazakhstan) and to develop a dedicated research programme together with the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions. The Scientific Council favourably considers this joint scientific and technical activity.

The Scientific Council takes note of the information presented by L. Masperi, Director of CLAF, concerning Schools of Physics and Biology and scientific plans at the MT-25 microtron in Havana (Cuba), to which JINR can contribute with lecturers and personnel training. The Scientific Council welcomes the inclusion of these activities in the 7-year scientific programme.

## **VI. Recommendations in connection with PACs**

The Scientific Council takes note of and concurs with the recommendations made by the PACs at their November 2002 meetings and presented by their Chairpersons.

### Particle Physics Issues

The Scientific Council endorses the general lines of the particle physics programme outlined in the draft long-range plan. It also agrees with the PAC for Particle Physics, however, that the final 7-year plan document should be strengthened significantly along the lines indicated in the report of the PAC and in further comments provided by the PAC to the JINR Directorate. In particular, the plan for developing a sound vision for the future of the Nuclotron programme should be clearly indicated in the final 7-year plan.

### Nuclear Physics Issues

The Scientific Council endorses the general lines of the Draft Programme of Scientific Research in Nuclear Physics for 2003-2009.

In heavy-ion physics, these include modernization of the basic facilities, completion of the experimental set-ups and proposed infrastructure developments. Modernization of the U400 cyclotron and the preparation of experimental equipment are essential for the future programmes on superheavy elements and with radioactive-ion beams.

Highest priority in nuclear physics with neutrons is given to experiments on fundamental symmetries, on the electromagnetic properties of the neutron and on basic interactions with neutrons. The timely completion of the IREN project, including modernization of experimental equipment and electronics, are urgent issues for a successful realization of the local part of this programme.

The DLNP programme encompasses a wide range of physics objectives pursued both locally at the Phasotron and abroad at leading facilities on the world stage. Participation in projects on weak-interaction physics and properties of the neutrino are especially appreciated.

### Condensed Matter Physics Issues

The Scientific Council concurs with the wish of the PAC for Condensed Matter Physics for continued progress of the refurbishment programme of the IBR-2 reactor and for further fulfillment of the agreement with the Russian Ministry for Atomic Energy.

The programme to optimize the Broad-Band complex at IBR-2 with respect to the spectrometers and vice versa should be started. This complex is an important part of the IBR-2 refurbishment programme.

The recommendations of the PAC concerning modifications of the text of the 7-year plan of JINR, mainly contained in the minutes of the PAC meeting, should be incorporated in the final version of this plan.

### Common Issues

The Scientific Council recommends approval of the Programme of Research at BLTP for 2003-2009 and stresses the strong need for continuous theoretical support of the JINR experimental groups, with special emphasis on experiments at JINR.

The LIT Programme for 2003-2009 is well prepared and the Scientific Council recommends approval of its general lines. In the near future, special attention should be paid to the development of 1Gb/s internal and external networks. A further important task is network security.

The Scientific Council expresses its continuing appreciation of the activities of the JINR Educational Programme in promoting science amongst young people and in fostering links between JINR Member States.

### **V. Memberships of the PACs**

Upon proposal by the JINR Directorate, the Scientific Council appoints F. Macášek (Comenius University, Bratislava, Slovakia) as a new member of the PAC for Condensed Matter Physics.

The Scientific Council thanks Professor V. Korsunsky for his most successful work as a member of the PAC for Condensed Matter Physics.

### **VI. Nominations**

1. The Scientific Council elected by ballot:

V. Ivanov as Director of Laboratory of Information Technologies for a term of five years, Yu. Potrebennikov as Deputy Director of the Laboratory of Particles Physics until the completion of the term of office of the LPP Director.

2. The Scientific Council thanks Professors A. Filippov and I. Puzynin for their highly successful work as Director of the Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics and as Director of the Laboratory of Information Technologies, respectively.

3. According to the JINR Regulations, the Scientific Council announces the vacancies of Director of DLNP and of Deputy Directors of LIT.

The election for these positions will be held at the 94th sessions of the Scientific Council.

### **VII. JINR's prizes**

1. The Scientific Council congratulates Professor S. Bilenky on being awarded the 2002 B. Pontekorvo Prize, in recognition of his outstanding contribution to theoretical research in the field of neutrino oscillations.

2. The Scientific Council approves the Jury's recommendations on the JINR prizes for 2002 (Appendix)/

### **VIII. Awarding of the title "Honorary Doctor of JINR"**

The Scientific Council congratulates Professors V. Meshcheryakov, T. Muminov, V. Okolovich, and H. Rollnik on being awarded the title "Honorary Doctor of JINR", in recognition of their outstanding contributions to the advancement of science and the education of young scientific.

### **IX. Scientific reports**

The Scientific Council notes with interest the scientific reports presented at this session:

"Synchrotron radiation: prospects of application in science and technologies",

"Development of the Hadron Therapy Complex at the Phasatron in the Dzhelapov Laboratory of Nuclear Problems",

"The outlook for investigations of photochemical and photobiological processes of vision at JINR basic facilities",

"Project of the Dubna International Advanced School of Theoretical Physics".

The Council thanks the speakers M. Kovalchuk, G. Mitsin, M. Ostrovsky, and A. Filippov for their informative presentations.

**X. Next session of the Scientific Council**

The 94<sup>th</sup> session of the Scientific Council will be held on 5-6 June 2003.

JINR Director

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'V. Kadyshevsky', written in a cursive style.

V. Kadyshevsky

## Приложение 3

**ПРОТОКОЛ № 2**  
 Совместного заседания  
 секции НТС «Атомная энергетика и промышленность» МЭМР РК и НТС НЯЦ РК

г. Алматы, 12 декабря 2002 г.

Присутствовали: (явочный лист)

Повестка дня (прилагается).

По первому вопросу выступил с докладом заместитель генерального директора РГП НЯЦ РК Жотабаев Ж.Р. Были приведены цель, основные задачи и ожидаемые результаты, которые будут получены в результате выполнения программы. Проект программы одобрен и предложен на рассмотрение на НТС МЭМР РК. (Проект программы прилагается).

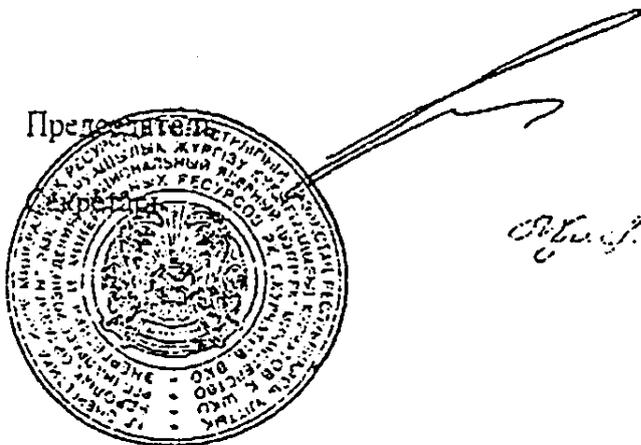
По второму вопросу выступил генеральный директор РГП НЯЦ РК Тухватулин Ш.Т. В докладе были приведены краткий перечень работ, выполненных в рамках РЦНТП «Развитие атомной энергетики в Казахстане» и других международных контрактов. Приведены обоснования в формировании отдельной программы. Цель, задачи программы в целом, одобрены, и проект программы предложен на рассмотрение на НТС МЭМР РК. (Проект программы прилагается).

По третьему вопросу выступил директор ИЯФ НЯЦ РК Кадыржанов К.К., содокладчик – Арзуманов А.А., зав. лаборатории ИЯФ. В докладах были приведен перечень основных научно-исследовательских и прикладных работ, которые будут выполняться на проектируемом ускорителе, приведены основные задачи по программе на 2003 г. В целом, проект программы одобрен. (Проект программы прилагается).

По четвертому вопросу выступила заместитель генерального директора РГП НЯЦ РК Тажибаева И.Л. В докладе были проведены основные исторические вехи развития токамака, типы установок токамаков в мире, перечень работ, планируемых для выполнения на Казахстанском термоядерном материаловедческом реакторе Токамак. Проект программы одобрен. (Проект программы прилагается).

В ходе обсуждения было принято решение:

1. Одобрить проекты программ и представить на рассмотрение на НТС МЭМР РК.



Тухватулин Ш.Т.

Мукушева М.К.

## ПРОГРАММА

мероприятий в рамках презентации Астанинского филиала  
ИЯФ НЯЦ РК при Евразийском Национальном университете им. Л.Н. Гумилева

г. Астана  
конференц-зал главного корпуса  
Евразийского Национального университета  
им. Л.Н. Гумилева

22 ноября 2001 г.

**16.00 – 16.15** Открытие презентация Астанинского филиала ИЯФ НЯЦ РК при Евразийском Национальном университете им. Л.Н. Гумилева.

Заместитель Премьер-Министра, Министр энергетики и минеральных ресурсов **Школьник В.С.**,  
ректор Евразийского Национального университета им. Л.Н. Гумилева,  
**профессор Жолдасбеков М.Ж.**

**16.15 – 16.45** Доклад «Ядерная наука для Казахстана и его новой столицы».

Директор ИЯФ НЯЦ РК, **профессор Кадыржанов К.К.**

**16.45 – 17.05** Доклад «Междисциплинарный лабораторный комплекс при Евразийском Национальном университете им. Л.Н. Гумилева».

Зав. лаб. Ускорительных процессов ИЯФ НЯЦ РК,  
**профессор Арзуманов А.А.**

**17.05 – 18.00** Ознакомление с Астанинским филиалом ИЯФ НЯЦ РК при Евразийском Национальном университете им. Л.Н. Гумилева и выставкой экспонатов.

Директор ИЯФ НЯЦ РК,  
профессор



КАДЫРЖАНОВ К.К.

Ученый Секретарь



КУТЕРБЕКОВ К.А.

В Программе мероприятий в рамках презентации Астанинского филиала ИЯФ НЯЦ РК при Евразийском Национальном университете им. Л.Н. Гумилева приняли участие представители Министерства образования и науки РК, Министерства энергетики и минеральных ресурсов РК, профессора и ведущие специалисты Евразийского Национального университета им. Л.Н. Гумилева и других организаций г. Астаны.

## ПРОТОКОЛ

рабочего совещания по сотрудничеству  
Объединенного института ядерных исследований  
с научными центрами Республики Казахстан

16 января 2003 г.

г. Дубна

В совещании приняли участие

со стороны ОИЯИ

Директор академик Кадышевский В.Г.  
Вице-директор Сисакян А.Н.  
Директор ЛЯР Иткис М.Г.  
Зам. директора ЛЯР профессор Дмитриев С.Н.

со стороны Республики Казахстан

Полномочный представитель Правительства  
РК в ОИЯИ профессор Кадыржанов К.К.  
Первый зам. директора ИЯФ НЯЦ РК  
к.т.н. Тулеушев А.Ж.

Стороны обсудили следующие вопросы:

1. Открытие филиала ОИЯИ в Казахстане в рамках проекта создания технопарка в пос. Алатау (Алматы);
2. О совместных работах ОИЯИ и ИЯФНЯЦ РК по созданию в Евразийском национальном университете им. Л.Н. Гумилева междисциплинарного научно-исследовательского комплекса на базе ускорителя тяжелых ионов;
3. О погашении задолженности по членским взносам Республики Казахстан перед ОИЯИ.

Стороны приняли следующие решения:

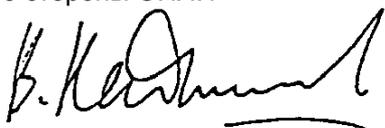
1. По первому вопросу:
  - 1.1. Стороны сочли целесообразным участие ОИЯИ в создании технопарка в пос. Алатау (Алматы).
  - 1.2. Стороны проработают правовую основу и подготовят совместные предложения о создании в рамках технопарка филиала ОИЯИ с учетом статуса института как Международной Межправительственной научной организации.
2. По второму вопросу:
  - 2.1. Генеральным проектировщиком междисциплинарного научно-исследовательского комплекса на базе ускорителя тяжелых ионов является ИЯФ НЯЦ РК.
  - 2.2. ОИЯИ принимает на себя обязательства по участию в проектных работах, а также созданию, монтажу и запуску в эксплуатацию ускорителя тяжелых ионов.
  - 2.3. В рамках совместного проекта ОИЯИ и ИЯФ НЯЦ РК разработают и в течение 2004-2005 годов реализуют программу подготовки научных и инженерных кадров для междисциплинарного научно-исследовательского комплекса на базе ускорителя тяжелых ионов.
  - 2.4. Для координации работ по созданию комплекса и подготовки научных и технических кадров создать Координационный комитет в составе: В.Г. Кадышевский, К.К. Кадыржанов и А.Н. Сисакян.
  - 2.5. Проведение работ по созданию ускорителя тяжелых ионов и лабораторий атомной физики и новых материалов поручить Центру прикладной физики ЛЯР ОИЯИ.
  - 2.6. Возложить ответственность за решение вопросов, связанных с реализацией проекта создания междисциплинарного научно-исследовательского комплекса на базе ускорителя тяжелых ионов со стороны ОИЯИ на директора ЛЯР ОИЯИ проф. Иткиса М.Г. и зам. директора ЛЯР ОИЯИ – руководителя Центра прикладной физики

ЛЯР ОИЯИ проф. Дмитриева С.Н., со стороны ИЯФ НЯЦ РК – на 1-го зам. директора ИЯФ НЯЦ РК д-ра Тулеушева А.Ж. и главного инженера ИЯФ НЯЦ РК Борисенко А.Н.

3. По третьему вопросу:

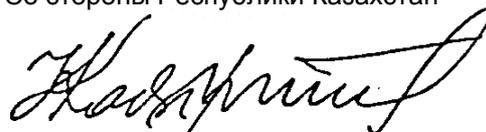
В соответствии с предварительной договоренностью стороны предпримут все необходимые меры по погашению задолженности Казахстана перед ОИЯИ путем поставок нестандартного специализированного научно-технического оборудования.

Со стороны ОИЯИ



Директор ОИЯИ  
академик Кадышевский В.Г.

Со стороны Республики Казахстан



Полномочный Представитель Правительства  
РК в ОИЯИ профессор Кадыржанов К.К.

