

ПРОЕКТ DERICA И СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ

© 2021 г. Л. В. Григоренко^{1),2),3)*}, Г. Н. Кропачев^{4),1)},
Т. В. Кулевой⁴⁾, И. Н. Мешков^{5),6),7)}, С. М. Полозов²⁾,
А. С. Фомичев^{1),8)}, Б. Ю. Шарков^{9),2)}, П. Ю. Шатунов¹⁰⁾, М. И. Явор¹¹⁾

Поступила в редакцию 24.05.2020 г.; после доработки 24.05.2020 г.; принята к публикации 24.05.2020 г.

Рассматривается возможная стратегия развития ядерной физики низких энергий в РФ, основанная на развитии проекта DERICA. DERICA — это многопользовательский многофункциональный комплекс для производства и исследования радиоактивных изотопов. В научной программе DERICA основной упор делается на исследования РИ в накопительных кольцах, однако стадийная программа развития комплекса позволит решать широкий круг фундаментальных ядерно-физических задач на передовом мировом уровне. Для завершающего этапа развития комплекса DERICA предлагается амбициозная цель по созданию коллайдера электронов и радиоактивных ионов для изучения фундаментальных характеристик радиоактивных изотопов в электронном рассеянии.

DOI: 10.31857/S0044002721010098

1. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ

Ядерная физика низких энергий исторически имела огромное значение для развития ряда отраслей науки и техники в нашей стране. Атомная энергетика, реакторная физика, ядерная часть оборонного комплекса, нейтронная физика, ядерная астрофизика в различных аспектах опираются на данные и на экспертизу из фундаментальной ядерной физики низких энергий. Особенно это касается не “рутинных”, хорошо отработанных приложений ядерной физики, а возможности проведения пионерских и междисциплинарных исследований в

этих областях. К сожалению, на настоящий момент фундаментальная ядерная физика низких энергий в РФ практически прекратила существование: экспериментальные исследования мирового класса в области фундаментальной ядерной физики ведутся в нашей стране узким фронтом и в основном только в ОИЯИ.

Данное печальное положение имеет принципиальные причины. В конце 1980-х и начале 1990-х гг. в мире происходила смена парадигмы ядерной физики низких энергий. От исследований стабильных ядер произошел стремительный переход к исследованиям преимущественно на пучках радиоактивных изотопов (РИ): с одной стороны, была в значительной степени исчерпана повестка исследований со стабильными ядрами, а с другой стороны, были доведены до рабочего состояния технологии работ с пучками РИ. Основные методы получения пучков РИ — это in-flight (фрагментация быстрого пучка стабильных ядер и сепарация фрагментов “налету”) и ISOL (Isotope Separation On-Line — сбор осколков индуцированного деления урана). (i) Эффективная генерация пучков РИ в технологии in-flight требует тяжелоионных ускорителей относительно высоких энергий (50–1500 МэВ/нуклон, чаще всего чем выше, тем лучше, но есть оптимум под каждую задачу). Это должен быть не одиночный ускоритель, а каскад ускорителей с промежуточной обдиркой тяжелых ионов для повышения зарядового состояния. (ii) Эффективная генерация пучков РИ в технологии

¹⁾Лаборатория ядерных реакций им. Г. Н. Флерова, ОИЯИ, Дубна, Россия.

²⁾Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия.

³⁾НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия.

⁴⁾НИЦ “Курчатовский институт” — ИТЭФ, Москва, Россия.

⁵⁾Лаборатория физики высоких энергий им. А. М. Балдина и В. И. Векслера, ОИЯИ, Дубна, Россия.

⁶⁾Лаборатория ядерных проблем им. В. П. Джелепова, ОИЯИ, Дубна, Россия.

⁷⁾Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия.

⁸⁾Университет “Дубна”, Дубна, Россия.

⁹⁾ОИЯИ, Дубна, Россия.

¹⁰⁾Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия.

¹¹⁾Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, Россия.

*E-mail: lgrigorenko@yandex.ru

ISOL требует как высокоинтенсивного драйвера (электроны, протоны, нейтроны), так и постускорения полученных редких изотопов для проведения исследований более широкого класса задач. Таким образом, от одиночных ускорителей “зари ядерной эры” произошел переход к каскадам ускорителей, характерным для комплексов физики высоких энергий. В этот период развитие научных проектов у нас в стране было заморожено в принципе, и этот переход в РФ не состоялся.

Ситуация в мире сегодня характеризуется активным строительством фабрик радиоактивных изотопов нового поколения. К амбициозным программам апгрейда давно существующих лидеров в этой области — RIKEN → RIBF (Япония, работает с 2007 г.), GANIL → SPIRAL2 (Франция, запуск в 2020 г.), GSI → FAIR (Германия, идет капитальное строительство), NSCL → FRIB (США, начат монтаж оборудования) — добавились новые “игроки”. Это исключительно масштабные, создаваемые на “ровном месте” центры исследования радиоактивных изотопов — HIAF (Китай) и RAON (Республика Корея). HIAF и RAON приближаются к стадии монтажа оборудования. Базовые бюджеты всех этих проектов находятся в диапазоне от ~\$1 до ~\$3 млрд.

Приборная база ядерной физики низких энергий в РФ катастрофически устарела. Ее обновление ведется силами отдельных институтов и на отдельных направлениях. В ЛЯР ОИЯИ в последнее десятилетие все ресурсы были мобилизованы для обновления исследовательской инфраструктуры. В 2018 г. был запущен новый фрагмент-сепаратор ACCULINNA-2 [1], и в 2019 г. он дал первые результаты мирового класса [2]. В 2019 г. заработала “фабрика сверхтяжелых элементов”, базирующаяся на новом ускорителе DC-280 [3], где начата подготовка первых экспериментов. В НИЦ КИ—ПИЯФ дан старт созданию установки ISOL-типа ИРИНА для исследования РИ на реакторе ПИК. Суммарный бюджет этих проектов (~\$120 млн) весьма значителен по отечественным масштабам, но незначителен по мировым. Проекты эти “нишевые”, т.е. способны выдавать результаты мирового класса в узких специфических областях современной ядерной физики низких энергий. С массовым вступлением в строй фабрик радиоактивных изотопов нового поколения в 2023–2027 гг. научные возможности этих установок станут мало конкурентными на мировом уровне. Чтобы кардинально переломить ситуацию после трех десятилетий “голодного пайка” в отечественной науке, требуется перспективное видение, консолидация усилий и инвестиции гораздо большего уровня с целью создания ядерно-физического центра (центров) настоящего мирового класса.

2. ПРОЕКТ DERICA

В рамках стратегического плана развития ОИЯИ на период 2022–2030 гг. и далее был предложен проект DERICA (Dubna Electron — Rare Isotope Collider Facility), способный вдохнуть новую жизнь и вывести на мировой уровень исследования в области ядерной физики низких энергий у нас в стране [4, 5]. Проект базируется на линейном сверхпроводящем ускорителе тяжелых ионов квазинепрерывного действия с пучками рекордных характеристик. В проекте делается акцент на исследованиях короткоживущих РИ в накопительных кольцах. Уникальной особенностью проекта является возможность изучения взаимодействий электронов с РИ в коллайдерном эксперименте с целью определения фундаментальных свойств ядерной материи — электромагнитных формфакторов экзотических ядер. Отметим ключевые моменты проекта.

2.1. Амбициозная задача-максимум и широта охвата

Проект имеет принципиальную и амбициозную задачу-максимум — создание коллайдера электронов и радиоактивных изотопов. Ее реализация относится к последней стадии проекта. Однако ряд уникальных научных задач мирового класса предлагается выполнить по ходу проекта на его ранних стадиях. Так, например, вторичные радиоактивные пучки в диапазоне энергий 20–70 МэВ/нуклон будут иметь рекордные интенсивности в широком номинале доступных масс A и зарядов Z . Постускоренные пучки РИ исключительного качества (чистота, моноэнергетичность, эмиттанс) будут доступны с энергиями до ~500 МэВ/нуклон. Другой, очень интересной возможностью является использование мишени в виде потока свободных нейтронов (или холодных нейтронов в ловушке) для исследования реакций с ними в накопительных кольцах. Эти и другие уникальные технические возможности предлагаемого проекта позволяют эффективно исследовать самые сложные фундаментальные вопросы современной ядерной физики низких энергий: границы ядерной стабильности и границы существования ядерной структуры на карте нуклидов, истоки и механизмы сильного взаимодействия, в том числе в сильно несимметричной ядерной материи, существование и свойства экзотических видов радиоактивности ($2p$, $2n$, $4n$ и т.д.), модификация оболочечной структуры ядер вдали от ядерной “долины стабильности”, поведение высокозаряженных ионов в условиях, близких к астрофизическим и т.д.

2.2. Общий замысел

Общий вид установок проекта DERICA представлен на рис. 1. Базовой установкой для проекта DERICA будет являться линейный сверхпроводящий ускоритель-драйвер пучка стабильных ионов LINAC-100, рассчитанный на экстремальные интенсивности (см. разд. 3.1). Он должен работать в квазинепрерывном режиме и обеспечивать на выходе для тяжелых ионов (Xe, Bi, U) энергию до 100 МэВ/нуклон (отсюда и название ускорителя) с интенсивностями ~ 20 рмА и для легких ионов (B, Ne, Ca) до 160 МэВ/нуклон при ~ 300 рмА. При этом предполагается поэтапное строительство LINAC-100 с возможностью использования пучка для экспериментов при более низких энергиях по мере готовности ускорителя. РИ, отобранные фрагмент-сепаратором DFS (DERICA Fragment Separator, см. разд. 3.4), останавливаются в газовой ячейке, аккумулируются в ионной ловушке и передаются ионному источнику, который формирует максимально высокое зарядовое состояние для дальнейшего эффективного ускорения. Постускорение пучка РИ в проекте DERICA осуществляется линейным импульсным нормальнопроводящим ускорителем LINAC-30 до энергии ~ 30 МэВ/нуклон, после чего он передается комплексу накопительных колец (см. разд. 3.5). Для ряда задач требуются более высокие энергии. Так, эффективное функционирование электрон-РИ коллайдера требует энергий ионов 300–500 МэВ/нуклон. Дальнейшее повышение энергии ускорения ионов от ~ 30 до ~ 500 МэВ/нуклон проходит в бустере-синхротроне с максимальным темпом изменения магнитного поля FRR (Fast Ramping Ring, рабочий цикл менее 0.1 с). В зависимости от схемы постускорения время до инжекции в экспериментальное кольцо CR будет составлять 0.1–0.5 с.

Таким образом, проект DERICA объединяет конструктивные особенности и возможности как комплексов РИ, основанных на технологии in-flight, так и основанных на технологии ISOL. По сравнению с ранее предложенными подходами концепция DERICA дает существенный выигрыш по времени, протекающему до начала измерений, что может быть критично для исследования короткоживущих РИ.

2.3. Стадийность проекта

Проект разбит на относительно короткие научно-мотивированные стадии. Первые очереди проекта дадут научные результаты уже через ~ 3 –5 лет после начала строительства. Каждые 3–5 лет будет вводиться очередная установка, открывающая новые научные возможности. Стадийность

в разворачивании проекта позволяет уменьшить многие технологические риски, связанные с проектом. В частности, это снимет остроту (но, конечно, не устранил полностью) проблемы обеспечения высококвалифицированными кадрами.

2.4. Возможности прикладных и междисциплинарных исследований

Ускорительный комплекс DERICA является источником пучков *любых* стабильных ионов с $Z = 5$ –92 исключительно высокой интенсивности (1–5 етА) вплоть до энергий ~ 160 МэВ/нуклон. Стабильные и радиоактивные пучки меньших интенсивностей будут доступны до энергий ~ 500 МэВ/нуклон. Это делает ускорительный комплекс DERICA пригодным для большого числа прикладных задач из различных областей: физика плазмы и физика высоких плотностей энергии, спектроскопия изомерных ядер, нейтронная физика, материаловедение и радиационная стойкость материалов, радиационное тестирование компонент микроэлектроники, радиационная биология, ядерная и радиационная медицина. При этом вследствие весьма высокой интенсивности первичных ионных пучков многие из этих задач могут решаться в “фоновом режиме” (используя незначительную часть полного тока), не пересекаясь с решением основных научных задач.

2.5. Парадигма пользовательского центра

DERICA планируется в современной парадигме пользовательского центра (так называемого user facility), когда пучковое время на любой установке предоставляется внешним пользователям в соответствии со стандартизированной процедурой. Комплекс, таким образом, должен стать базовым центром по фундаментальной и прикладной ядерной физике низких энергий у нас в стране и в странах-участницах ОИЯИ. При этом группы из различных исследовательских организаций получают (а) доступ к сложным и дорогим инструментам общего пользования и (б) возможность развивать и эксплуатировать свое оборудование без необходимости поддерживать всю инфраструктуру получения пучков редких изотопов высокой интенсивности.

2.6. “Окно возможностей”

DERICA — проект умеренной стоимости (оценка $\sim \$400$ млн). В современной физике ядра и элементарных частиц типичная стоимость проектов мирового класса сегодня начинается от величин в

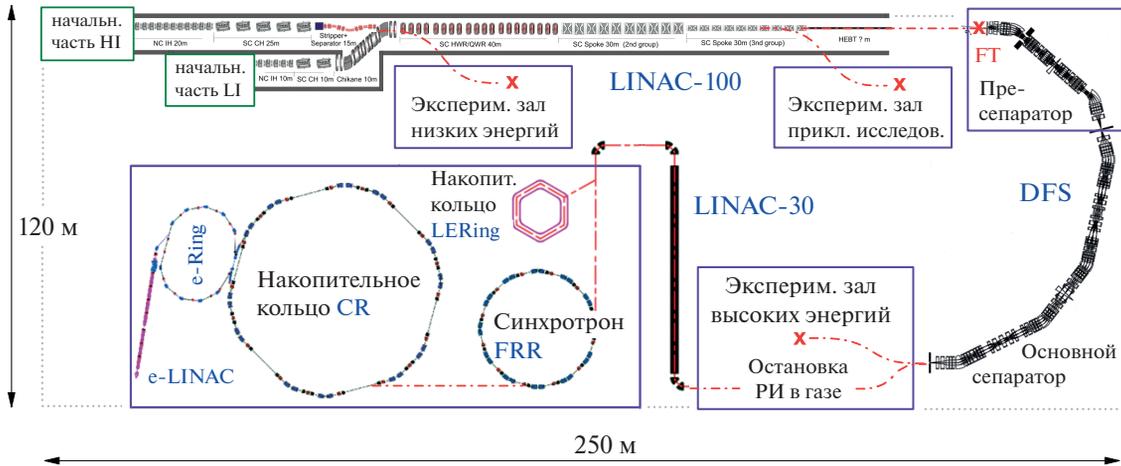


Рис. 1. Предварительный общий вид установок проекта DERICA. Сверхпроводящий сильноточный ускоритель-драйвер непрерывного действия LINAC-100 доводит энергию пучка стабильных ионов до 100–160 МэВ/нуклон (см. разд. 3.1). Радиоактивные изотопы рождаются на производящей мишени FT (fragmentation target); первичный пучок и ненужные фрагменты поглощаются в радиационно-нагруженной зоне пресепаратора DFS. Искомые РИ отбираются основным сепаратором DFS (см. разд. 3.4) и используются в экспериментальной зоне высоких энергий: либо для реакций при промежуточных энергиях (50–100 МэВ/нуклон), либо останавливаются в газе. Остановленные в газе РИ ионизируются, ускоряются импульсным нормально проводящим ускорителем LINAC-30 до ~30 МэВ/нуклон и передаются комплексу накопительных колец (см. разд. 3.5). В том числе для дальнейшего ускорения (синхротрон FRR, ~500 МэВ/нуклон) и исследования в коллайдере CR/e-Ring.

5–10 раз выше. Возможность создания ядерно-физического комплекса с актуальной и перспективной на мировом уровне программой, и с относительно скромным бюджетом определяется особенностью момента. Например, из-за сложностей в реализации проекта FAIR часть научной программы может быть реализована в рамках DERICA. Физика радиоактивных изотопов активно развивается во многих странах, и это “окно возможностей” не будет длительным.

3. СТАТУС ПРОЕКТА DERICA

В настоящий момент в ОИЯИ развернута программа по проведению НИОКР, созданию прототипов “критических” компонентов проекта и технико-экономическому обоснованию всего проекта DERICA. Эта программа выполняется в сотрудничестве с ведущими отечественными центрами, прежде всего НИЦ КИ–ИТЭФ, МИФИ, ИЯФ СО РАН, РФЯЦ–ВНИИТФ. К критическим компонентам проекта относятся узлы и установки, от которых зависит выполнимость научной программы DERICA в целом и/или для развития которых требуется длительное время. Научная программа проекта опубликована в работе [4]. Со статусом программы DERICA можно ознакомиться также на сайте [5]. Предполагаемый общий вид базовых установок проекта DERICA показан на рис. 1. Далее в этом разделе кратко представлены

результаты НИОКР 2019–2020 гг. по направлениям ускоритель-драйвер LINAC-100, фрагмент-сепаратор DFS, комплекс накопительных колец.

3.1. Общие замечания по LINAC-100

Базовой установкой для проекта DERICA будет являться ускоритель-драйвер пучка стабильных ионов LINAC-100, возможность реализации проектных параметров которого является ключевым фактором для успеха всего проекта. Ускоритель должен работать в непрерывном (continuous wave, cw) режиме и обеспечивать на выходе для тяжелых ионов (Xe, Bi, U) энергию до 100 МэВ/нуклон (отсюда и название ускорителя) с интенсивностями ~20 рмА и для легких ионов (B, Ne, Ca) до 160 МэВ/нуклон при ~300 рмА. При этом предполагается поэтапное строительство LINAC-100 с возможностью использования пучка для экспериментов при более низких энергиях по мере готовности ускорителя, см. “экспериментальный зал низких энергий” на рис. 1. Для достижения заявленных амбициозных параметров пучка тяжелых ионов на выходе ускорителя-драйвера LINAC-100 требуется проведение НИР с использованием самых передовых технологий. Значительные успехи в развитии линейных тяжелоионных ускорителей были достигнуты в последнее десятилетие в IMP (Ланчжоу, Китай), GANIL (Кан, Франция) и FRIB (Ист-Лансинг, США) [6–12]. С учетом

этого опыта и прогрессирующих технологий ускорения частиц проектируемый ускоритель LINAC-100 может превзойти по интенсивности в 3–30 раз существующие мировые аналоги.

Для создания высокоинтенсивного ускорителя тяжелых ионов и достижения заявленных параметров пучка ионов в LINAC-100 необходимо решить ряд принципиальных задач, основными из которых являются:

1. Генерация и формирование ионных пучков с максимально высоким зарядовым состоянием и интенсивностью не менее $20 \mu\text{A}$ и минимально достижимым эмиттансом пучка (требование по эмиттансу является абсолютно критическим, так как при высоких проектных токах и энергиях ускорение должно происходить практически без потерь);

2. Разработка *начальной части* ускорительного комплекса, включающей структуру с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ, Radio Frequency Quadrupole focusing, RFQ), резонаторы с трубками дрейфа (DTL) и каналы шестимерного согласования ионного пучка между ними, а также ионного пучка, генерируемого ионным источником, с RFQ;

3. Разработка технологий изготовления, настройки и поддержания стабильности параметров нормальнопроводящих RFQ- и DTL-резонаторов при работе в *sw*-режиме;

4. Разработка систем для ускорения ионных пучков на основе СП-резонаторов и освоение технологий их производства;

5. Разработка ВЧ-генераторов, предпочтительно на твердотельных усилителях, работающих в *sw*-режиме;

6. Разработка систем диагностики высокоинтенсивного *sw*-пучка в широком диапазоне энергий.

В настоящее время проекты ускорителей-драйверов для производства радиоактивных изотопов, а также ускорителей для ядерной энергетики или генераторов нейтронов на основе реакции скалывания (Spallation Neutron Source, SNS) в мире разрабатываются и создаются по практически одинаковым схемам: линейный ускоритель RFQ и модульная часть ускорителя, большая часть которого построена на сверхпроводящих элементах. Однако следует понимать, что ряд вопросов не имеет общепринятых решений, и должны быть найдены решения, адаптированные непосредственно к проекту DERICA.

Тяжелые ионы (HI) с зарядностью $A/Z \sim 6-8$ при интенсивности в несколько десятков μA и легкие ионы (LI) с зарядностью $A/Z \sim 3-4$ при интенсивности в несколько сотен μA могут быть

получены в источниках на основе электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР-источниках). Начальная часть ускорителя включает ЭЦР ионный источник (или несколько источников), канал для шестимерного согласования пучка при низких энергиях, ускоряющую секцию с RFQ и несколько коротких И-резонаторов (нормально- и/или сверхпроводящих).

Базовая версия общей схемы LINAC-100 показана на рис. 2. Для задач проекта DERICA должны ускоряться ионы в широком диапазоне $A/Z \sim 3-8$. Создание RFQ под такой диапазон возможно, но его габариты будут очень велики. Поэтому возможны два подхода.

(i) Может быть использована универсальная начальная часть, оптимизированная на тяжелые ионы с $A/Z \sim 7$, а ускорение в ней легких ионов будет идти с невысокой зарядностью (например, ионов бора с зарядностью $2+$ и кальция с зарядностью $6+$). Для легких ионов в этом случае потребуется в составе начальной части отдельный ионный источник.

(ii) Альтернативой является включение в состав ускорителя двух начальных частей: для относительно легких ионов от бора до кальция (LI) и тяжелых ионов (HI) вплоть до урана (именно эта версия схемы LINAC-100 показана на рис. 2).

В большинстве проектов ускорителей-драйверов ионных пучков для уменьшения длины и стоимости ускорителя используются стрипперы, позволяющие повысить зарядность ускоряемых ионов и тем самым уменьшить величину полного ускоряющего напряжения. Энергия, при которой устанавливается стриппер, значительно различается для различных проектов: от 1.4 МэВ/нуклон на ускорителе UNILAC (GSI, Дармштадт, Германия) до 25 МэВ/нуклон на ускорителе FRIB (MSU, Ист-Лансинг, США). В LINAC-100 предполагается установить стриппер при энергии пучка ионов порядка 10 МэВ/нуклон.

Выбор энергии перехода к СП-резонаторам для ускорения пучка в диапазоне энергий от 0.3–0.5 (на выходе секции с RFQ) до 10 МэВ/нуклон является одним из сложных вопросов при проектировании LINAC-100. В настоящее время он активно прорабатывается с учетом зарубежного опыта. Необходимо отметить, что выбор энергии перехода на сверхпроводящие резонаторы должен зависеть не только от результатов моделирования динамики пучка и оптимизации электродинамических характеристик резонаторов, но и от сравнительной стоимости и энергопотребления нормально- и сверхпроводящего вариантов для этого участка ускорителя, а также от уровня развития технологии производства сверхпроводящих резонаторов в РФ и за рубежом.

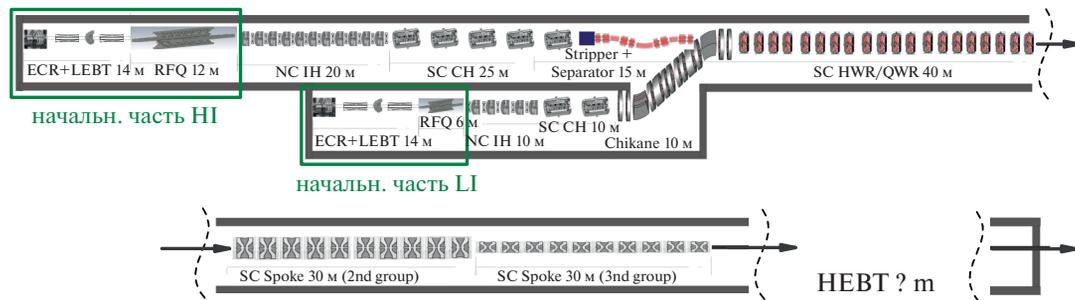


Рис. 2. Общая схема ускорителя-драйвера LINAC-100. ECR — ионный источник на электрон-циклотронном резонансе; LEVT — канал транспортировки пучка при низких энергиях, в котором происходит шестимерное согласование его параметров на вход в первую ускоряющую секцию; RFQ — ускоритель-группирователь с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой; NC IH — нормально проводящие ускоряющие резонаторы H-типа; SC CH — сверхпроводящие ускоряющие резонаторы H-типа, например CH-резонаторы; Stripper + Separator — стриппер для повышения зарядности пучка и магнитная система для сепарации ионов с заданной зарядностью; SC HWR/QWR — сверхпроводящие четверть- и полуволновые коаксиальные ускоряющие резонаторы; SC Spoke — сверхпроводящие Spoke-резонаторы (“спицевые”), две группы; HEVT — канал транспортировки пучка при высоких энергиях. Это резервное место, и его длина определяется закладываемой возможностью апгрейда LINAC-100 по энергии (предположительно до 200 МэВ/нуклон).

При энергиях выше 10 МэВ/нуклон в настоящее время используются только сверхпроводящие резонаторы. Так как при энергии от 10 до 100–160 МэВ/нуклон нет возможности использовать только один типоразмер СП-ускоряющих резонаторов, этот участок разбивается на несколько групп (конкретно — три), каждая из которых состоит из идентичных резонаторов.

3.2. Прототип начальной части LINAC-100

Интенсивность пучка, достижимая на линейном ускорителе, ограничивается прежде всего производительностью его начальной части. Для решения этой задачи в рамках проекта DERICA начато проектирование стенда — прототипа начальной части. Стенд включает в себя высоковольтную платформу (~200 кВ) с расположенным на ней ЭЦР-источником, канал шестимерного согласования пучка, генерируемого ЭЦР, с RFQ, а также начальные секции RFQ, см. рис. 3.

На сегодняшний день практически единственным решением в области генерации высокоинтенсивных непрерывных пучков ионов высокой зарядности являются ЭЦР-источники. На лучших ЭЦР-источниках с магнитной системой на сверхпроводниках и работающих на частоте 28 ГГц, созданных в IMP (Ланчжоу, Китай) и LBNL (Беркли, США) [13, 14], требуемые для проекта DERICA интенсивности достигнуты для ионов урана с зарядом 34+. В ЛЯР ОИЯИ имеется богатый опыт разработки ЭЦР-источников и совместно с НИЦ КИ–ИТЭФ начата работа по созданию источника данного поколения. В работу вовлечены НИИЭФА им. Ефремова (С.-Петербург) и ИПФ РАН (Нижний Новгород). Одновременно начата работа по

разработке системы формирования ионного пучка, призванной минимизировать эмиттанс пучка с требуемой для проекта DERICA интенсивностью. Работа ведется при поддержке экспертов из GSI, LNL–INFN (Леньяро, Италия), IMP (Ланчжоу, Китай). При создании высоковольтной платформы используется опыт создания платформ для циклотрона DC-280 [15], линейных ускорителей в LNL–INFN [16] и индийского проекта IPR [17].

Разработка св-RFQ ведется совместными усилиями ИТЭФ и ВНИИТФ им. Е. И. Забабахина с использованием их успешного опыта по разработке линейного ускорителя в рамках проекта NICA [13]. На сегодняшний день технология создания св-RFQ находится в стадии освоения ведущими ускорительными лабораториями мира. Уже есть примеры действующих св-RFQ, однако работающих на пучках малой интенсивности [14]. Специалистами ИТЭФ были рассмотрены несколько вариантов формирования ускорительного канала для пучка ионов U^{34+} интенсивностью 1 емА и эмиттансом 1π мм мрад. Возможность получения пучка с такими рекордными характеристиками еще не имеет экспериментального подтверждения. Поэтому при разработке начальной части HI для LINAC-100 закладывалось отношение акцептанса канала к эмиттансу пучка, равное шести. По результатам моделирования было показано, что при использовании гармонического банчера на входе в RFQ для шестимерного согласования можно добиться 100% захвата ионов в режим ускорения, см. рис. 3. При этом обеспечивается минимальный рост поперечного и, самое главное, продольного эмиттансов пучка. Разработан вариант нормальнопроводящего канала, обеспечивающий 100% ускорение ионов пучка от выхода RFQ (работающего на частоте

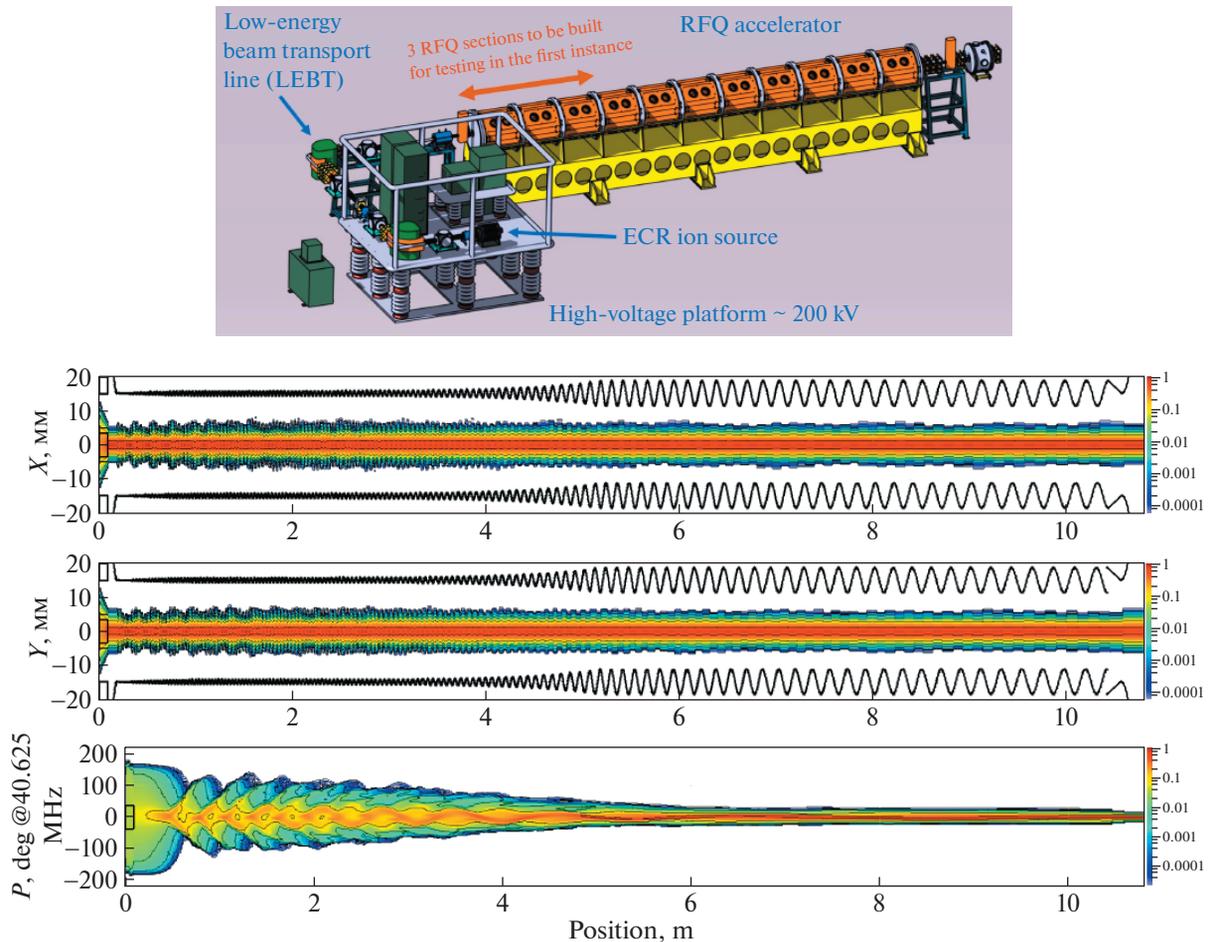


Рис. 3. Предполагаемая конфигурация стенда начальной части ускорителя LINAC-100 и результат моделирования динамики пучка в RFQ (40.625 МГц) при шестимерном согласовании пучка.

40.625 МГц) до энергии 10 МэВ/нуклон и включающий два типа DTL (работающих на частотах 81.25 и 162.5 МГц) на основе малозазорных резонаторов. Целесообразность создания нормальнопроводящего канала обусловлена минимизацией рисков, а также тем фактом, что выход на эту энергию позволит начать осуществление экспериментальной научной программы по ряду направлений: барьеры деления сложных ядер, реакции много-нуклонных передач, прикладные исследования и др. [4].

На начальном этапе запланированы работы с пучком по настройке канала шестимерного согласования и тестированию нескольких (2–4) секций RFQ с использованием 14 ГГц ЭЦР на постоянных магнитах (низкая зарядность, но высокий ток — например, ~3 еА $^{14}\text{N}^{2+}$). Предполагается, что ВЧ-мощность для резонаторов будет получена от твердотельных усилителей мощности. В РФ выпуском таких усилителей занимаются два центра: ТРИАДА-ТВ и НИИТФА. Для оснащения стенда современными системами диагностики парамет-

ров пучка ведутся разработки специализированных датчиков силами ОИЯИ, ИТЭФ и ИЯИ РАН. В дальнейшем, по мере создания узлов установки, будет создана начальная часть на основе источника 28 ГГц ЭЦР и RFQ, доведенного до полной энергии (~12 секций RFQ), а данный стенд будет использоваться как стенд новых ускорительных технологий.

3.3. Сверхпроводящая часть LINAC-100

Сравнительная эффективность нормально- и сверхпроводящих (СП) ускоряющих структур определяется различием физических эффектов, ограничивающих предельную напряженность поля в резонаторах. Для нормальнопроводящих ускоряющих структур она ограничена высококачественным пробоем, для сверхпроводящих — квенч-эффектом, который возникает при повышении предельного магнитного поля на поверхности резонатора. В отдельных случаях предельно возможное поле в СП-резонаторах оказывается в 2.0–3.5 раза выше по сравнению с нормальнопроводящими. Также в последнее десятилетие наблюдается отказ

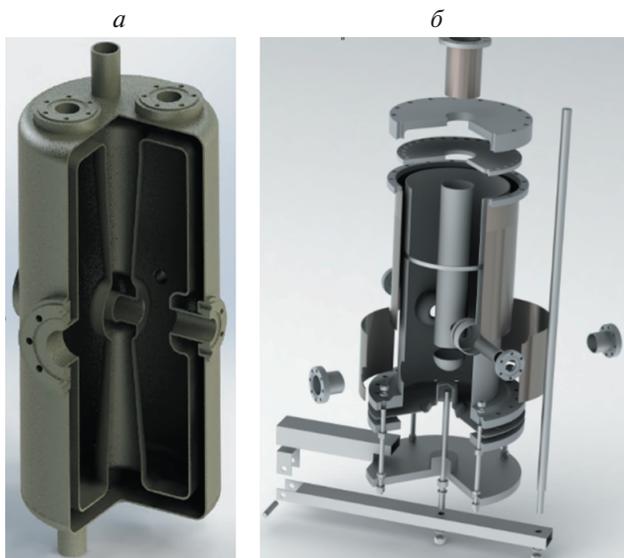


Рис. 4. Разработанные коллаборацией ОИЯИ, МИФИ, ФТИ НАНБ и ИЯП БГУ сверхпроводящие полуволновые (а) и четвертьволновые (б) ускоряющие резонаторы.

от применения классических резонаторов Е-типа с трубками дрейфа (ускорителей Альвареца) в пользу более компактных и энергоэффективных ускорителей на основе резонаторов Н-типа. Например, для промежуточных энергий (от 1.4 МэВ/нуклон) в GSI была показана работоспособность многозазорных сверхпроводящих СН-резонаторов [18], однако более эффективными они становятся при энергии выше 3–3.5 МэВ/нуклон.

Для LINAC-100 была промоделирована динамика пучка в СН-резонаторах для диапазона энергий 3–10 МэВ/нуклон. В ходе исследования динамики пучка в LINAC-100 было показано, что необходимо будет использовать или 15 СП шести-зазорных СН-резонаторов (90 ускоряющих зазоров), или 44 аналогичных нормальнопроводящих резонатора (264 зазора). Вместе с тем необходимо отметить большую сложность изготовления и высокую стоимость СП СН-резонаторов.

При энергии пучка до 10 МэВ/нуклон предполагается установить стриппер, который позволит сильно повысить зарядность ионов урана с U^{34+} до U^{60+} , что сократит необходимое количество резонаторов и существенно уменьшит стоимость ускорителя. Тип стриппера (газовый или на жидком литии) в настоящее время обсуждается, так как в различных тяжелоионных ускорителях используются разные подходы. В ускорителе UNILAC (GSI) много лет успешно эксплуатируется газовый стриппер, в проекте FRIB планируется использование жидкого лития. Необходимо отметить, что для ионов урана эффективность обдирки для одной

итоговой зарядности будет составлять 20–25%. Для повышения интенсивности пучка после обдирки можно рассмотреть возможность совместного ускорения в сверхпроводящей части трех соседних зарядностей, что теоретически позволит сохранить более 60% интенсивности исходного пучка, однако до настоящего времени этот способ экспериментально для непрерывных пучков не проверен (в ускорителе-драйвере комплекса FRIB планируется ускорить после стриппера две соседние зарядности).

После стриппера следует основная сверхпроводящая часть ускорителя, предназначенная для ускорения пучка в диапазоне энергий 10–100 МэВ/нуклон. По результатам моделирования динамики пучка [19] эту часть ускорителя предложено разделить на три участка с резонаторами различных типов. Первая группа должна состоять из коаксиальных двухзазорных полуволновых резонаторов (до энергии около 35 МэВ/нуклон), при более высоких энергиях предполагается использовать два типа Spoke-резонаторов. Численное моделирование динамики показало, что общее число резонаторов, которые необходимо использовать в диапазоне энергий 10–100 МэВ/нуклон, составляет 92, а общая длина сверхпроводящей части составит около 100 м (без учета технологических промежутков, необходимых для размещения блоков диагностики параметров пучка и поворотных магнитов, предназначенных для отвода пучка в экспериментальные каналы).

Ключевой проблемой в создании СП-части LINAC-100 является отсутствие у нас в стране технологий, необходимых для их серийного производства. За последние годы коллаборацией ОИЯИ, МИФИ и ряда белорусских организаций, в основном ФТИ НАНБ и ИЯП БГУ, начаты работы по освоению таких технологий [20, 21]. Завершена разработка сверхпроводящего полуволнового коаксиального резонатора, изготовлен его медный прототип, который показал полное соответствие параметров расчетным значениям. Изготовление первого СП-резонатора из ниобия ожидается в конце 2020 г. На рис. 4 показаны разработанные модели полуволновых и четвертьволновых резонаторов, изготовление и тестирование которых ведется в настоящее время.

3.4. Фрагмент-сепаратор DFS

При интенсивностях $\sim 20\text{--}300 \mu\text{A}$ ($\sim 10^{14}\text{--}10^{15}$ ионов в секунду) на выходе DFS мы должны получать $\sim 10^3\text{--}10^9$ вторичных ионов в секунду (в зависимости от задачи). На производящей мишени и в зоне остановки первичного пучка в сумме может выделяться до мегаватта тепловой энергии. При

этом может генерироваться до 5×10^{14} нейтронов в секунду (это даже позволяет планировать проведение прикладных исследований с нейтронами). Технические требования, предъявляемые к перспективному фрагмент-сепаратору проекта DERICA, являются по-настоящему экстремальными.

Сепаратор фрагментов выполнен по двухкаскадной схеме, включающей пресепаратор и основной сепаратор со сложением дисперсий каскадов, см. рис. 5. Такая двухкаскадная схема реализована на фрагмент-сепараторе BigRIPS (RIKEN, Япония) [22] и является стандартной для перспективных фабрик РИ: конструкция пресепаратора в значительной мере определяется необходимостью организовать поглощение первичного пучка высокой интенсивности (см., например, SuperFRS@FAIR [23] или ARIS@FRIB [24]). Для упрощения эксплуатации DFS в экстремальных радиационных условиях была поставлена задача создания высокоэффективной установки, используя только нормальнорасположенные магнитные элементы. Список элементов включает 6 дипольных магнитов, 48 квадрупольных, 26 секступольных и 12 октупольных линз. Учитывая мировой опыт фабрик РИ, была предложена С-образная схема магнитных элементов с общим углом поворота 174° , предполагающим наличие перед мишенью дополнительного 6° отклоняющего магнита для того, чтобы исключить обратный поток “баллистических” частиц от производящей мишени в ускоритель. Все мультипольные магниты, кроме двух первых квадрупольных, имеют диаметр апертуры 35 см. Высота межполюсного зазора дипольных магнитов 10 см.

Сепаратор рассчитан на магнитную жесткость исследуемых фрагментов до 7 Тм. Угловой аксептанс сепаратора составляет ± 50 мрад в плоскости дисперсии и ± 30 мрад в перпендикулярном направлении. Аксептанс по импульсам составляет $\Delta P/P = \pm 3\%$ (FWHM). Ионно-оптическая схема сепаратора выполнена с полной компенсацией пространственных aberrаций изображения второго порядка и компенсацией наиболее существенных aberrаций третьего порядка.

В пресепараторе использованы дипольные магниты с 35° углом поворота и наклонной выходной границей для создания промежуточной пространственной фокусировки пучка фрагментов в месте расположения гасителя первичного пучка (см. рис. 5). Пресепаратор обладает разрешающей способностью первого порядка $P/\Delta P = 1500$ при диаметре первичного пучка на мишени 1 мм. Дисперсия по импульсу в плоскости дегрейдера (средней плоскости пресепаратора) составляет 2 м.

Основной сепаратор использует четыре дипольных магнита с углами поворота 26° и может работать в двух режимах, показанных на врезке рис. 5.

В режиме (I) первые два дипольных магнита включены по схеме сложения дисперсий, ахроматичный дегрейдер расположен в середине основного сепаратора, а последние два дипольных магнита компенсируют дисперсию первых, обеспечивая ахроматичную транспортировку пучка. Разрешающая способность первого порядка основного сепаратора в этом режиме составляет $P/\Delta P = 3000$, а дисперсия по импульсу в плоскости дегрейдера равна 5 м. В режиме (II) ахроматичный дегрейдер расположен в плоскости изображения между первым и вторым дипольными магнитами, которые включены по схеме компенсации дисперсии первого магнита вторым. При этом ахроматичное изображение образуется в средней плоскости основного сепаратора, в которой производится пространственная сепарация фрагментов. Разрешающая способность основного сепаратора в таком режиме равна $P/\Delta P = 1500$, а дисперсия по импульсу в плоскости дегрейдера составляет 5.4 м. Оставшаяся вторая половина основного сепаратора используется при этом как транспортирующая система для времяпролетной идентификации фрагментов. В режиме (II) аксептанс основного сепаратора по импульсу несколько уменьшается и составляет $\Delta P/P = \pm 2.5\%$ (FWHM).

3.5. Комплекс накопительных колец

В настоящий момент в рамках проекта DERICA предлагается создание комплекса из трех накопительных колец, см. рис. 1. Бустер-ускоритель Fast Ramping Ring (FRR) предназначен для захвата и последующего ускорения пучка редких ионов, поступающего из линейного ускорителя LINAC-30. Накопительное кольцо Collector Ring (CR) оптимизировано для проведения различных экспериментов с накопленным пучком РИ. Одним из важнейших экспериментов всего проекта является изучение внутренней структуры экзотических ядер с помощью рассеяния на них встречного пучка электронов высокого качества. Для создания таких пучков используется кольцо Electron Ring, имеющее с CR одно место встречи. Дополнительно рассматривается вопрос о необходимости четвертого кольца, специализированного для экспериментов с ионами в области низких энергий (Low-Energy Ring — LERing).

Инжекция в бустер-ускоритель FRR происходит в многооборотном режиме на энергии 30 МэВ/нуклон. Апертуры магнитных элементов кольца могут быть относительно небольшими, так как поступающий пучок уже заранее охлажден согласно схеме всего проекта. Максимальная энергия, до которой ускоряются РИ, составляет 500 МэВ/нуклон. Таким образом, энергия пучка изменяется в 17 раз, но жесткость магнитного поля

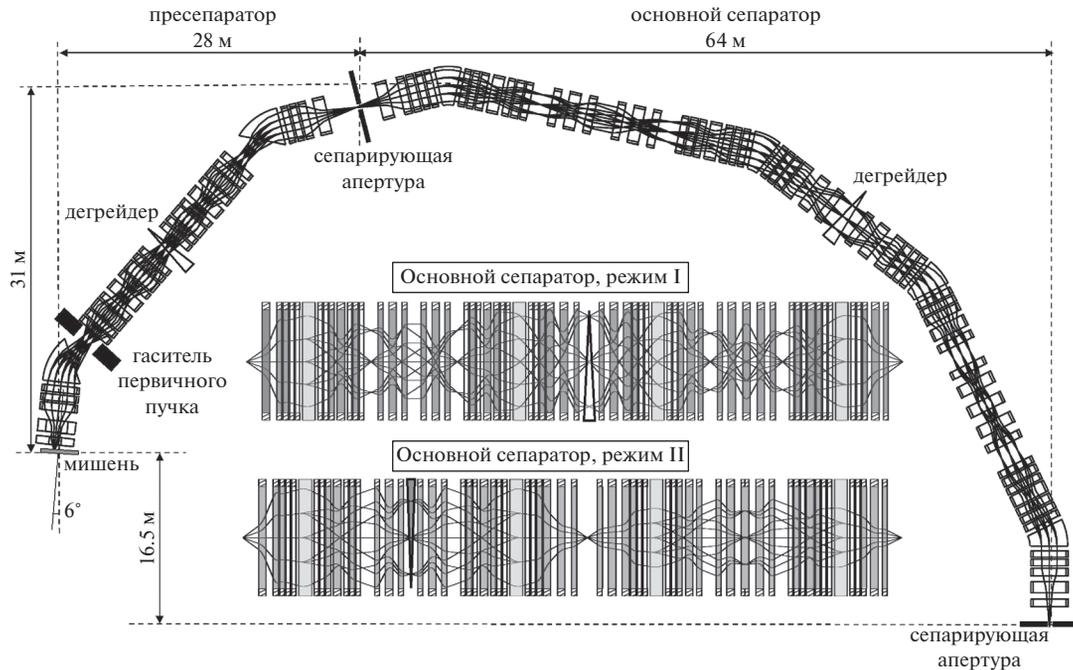


Рис. 5. Общий план фрагмент-сепаратора DFS и траектории ионов в линейном приближении в основном сепараторе в двух режимах: (I) максимальной разрешающей способности и (II) половинной разрешающей способности с использованием второй половины основного сепаратора для времяпролетных измерений.

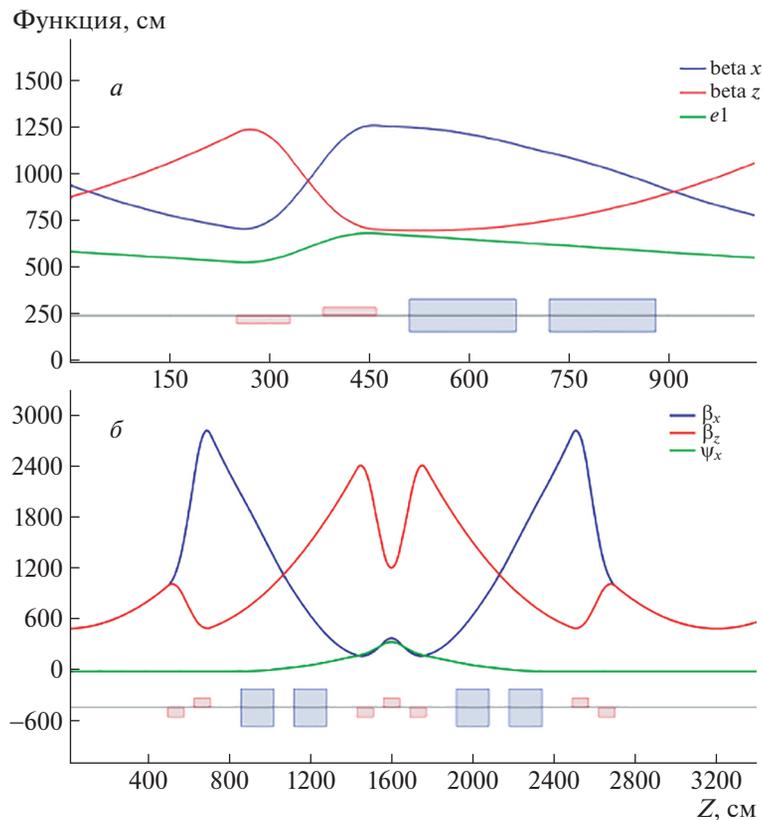


Рис. 6. Оптические функции одного периода структуры для бустер-накопителя FRR (а) и накопительного кольца CR (б).

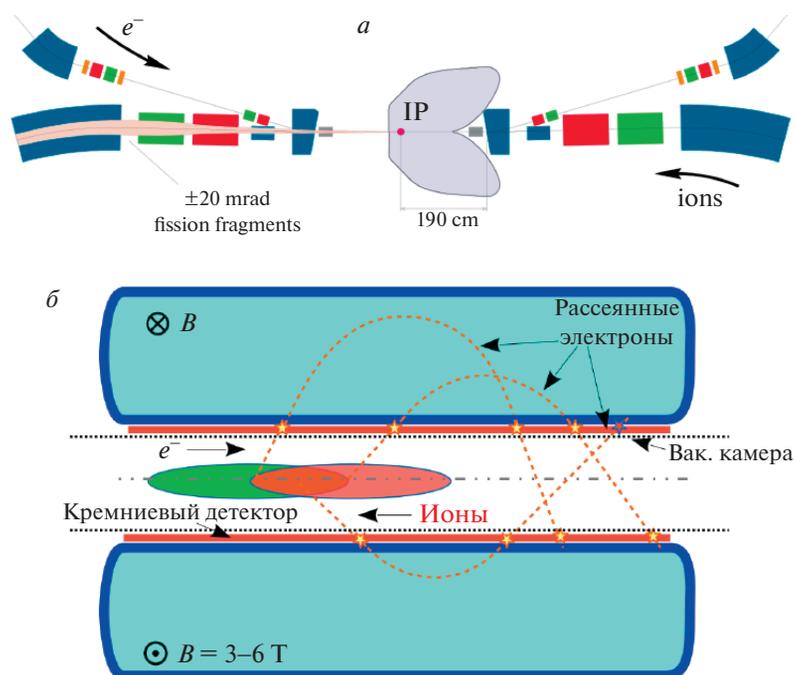


Рис. 7. а — Схема организации промежутка встречи со стандартным электронным спектрометром (“бабочка”). б — Схема продольного сечения альтернативного электронного спектрометра с тороидальными сверхпроводящими катушками.

изменяется менее чем в 5 раз, от 2.1 до 9.8 Т, что упрощает достаточно амбициозную задачу по созданию бустер-накопителя с рабочим циклом в 0.1 с. Предлагаемая на данном этапе разработки длина кольца составляет 105 м, что при радиусе поворота в 6.1 м дает изменение поля в поворотных магнитах от 0.35 до 1.6 Т. Такие параметры могут быть обеспечены без использования сверхпроводящих элементов для создания магнитной структуры кольца. Секторные поворотные магниты сгруппированы по два и имеют угол поворота в 15°. Оптика кольца использует дублетную схему квадрупольных линз, что дает большую гибкость по выбору бетатронной рабочей точки и большой акцептанс, что необходимо для многооборотной инжекции [25]. Двенадцатикратная симметрия позволяет подавить большую часть бетатронных резонансов. Оптические функции для одного периода кольца представлены на рис. 6а. При этом градиенты магнитного поля в квадрупольных линзах умеренные, до 5 Т/м. После инжекции пучок группируется с помощью ВЧ-системы, ускоряется до энергии эксперимента и перепускается в СР по однооборотной схеме. Возможно использование дополнительных структур ВЧ для объединения сгустков перед выпуском.

Накопительное кольцо СР имеет шестигранную форму, что позволяет лучше вписаться в рабочий зал проекта DERICA и дает дополнительные возможности для одновременного проведения нескольких исследований за счет достаточного

количества экспериментальных промежутков. Общая длина кольца — 193 м, а длина каждого из шести прямых участков — около 10 м. Один промежуток занят под однооборотную инжекцию — накопитель может работать как в режиме с распущенным пучком, для чего требуется выключить ВЧ-систему после впуска, так и в многосгустковом режиме с общим количеством банчей до 120. В другом техническом промежутке расположена установка электронного охлаждения, что необходимо для поддержания высокого качества пучка во время экспериментов (например, эмиттанс пучка ионов порядка 50 мм мрад в режиме коллайдера при токах до 1.5×10^{10} частиц $^{11}\text{Be}^{4+}$). На данном этапе разработки использование стохастического охлаждения не предполагается. Остальные четыре промежутка СР используются для размещения экспериментов, в частности экспериментов с газовой мишенью, с нейтронной мишенью и с встречными электрон-ионными пучками. Оптика кольца оптимизирована таким образом, чтобы с помощью ахроматических арок дисперсия пучка занулялась во всех прямых промежутках. Каждая арка состоит из четырех секторных поворотных магнитов с углом 15° и полем до 1.6 Т (не исключается использование однотипных магнитов с бустер-накопителем для удешевления проекта) и семи квадрупольных линз длиной 1 м и силой до 5 Т/м. Оптические функции одного периода кольца представлены на рис. 6б.

Самым сложным экспериментом с точки зрения

ускорительной инфраструктуры является, безусловно, эксперимент со встречными пучками электронов и редких ионов. Так как проведение эксперимента требует значительного изменения магнитной структуры экспериментального кольца и оба типа пучков невозможно накапливать в одном кольце ввиду значительно различных релятивистских параметров β , то рассматривается следующая схема эксперимента — пучки электронов накапливаются в отдельном пучке Electron Ring, имеющем существенно меньший периметр по сравнению с CR, а место встречи вынесено относительно стандартной орбиты ионного кольца с помощью специальной (так называемой “bypass”) структуры. Таким образом, можно отдельно сгруппировать все дополнительные элементы, необходимые только для работы в режиме коллайдера и минимизировать накладываемые ими ограничения на остальные режимы работы. Таковыми элементами являются квадруполь финального фокуса обоих колец, необходимые для создания малых размеров пучков в месте встречи, поворотные магниты и дипольные корректоры для сведения и разведения пучков, датчики положения пучков, детекторы рассеянных ионов, детектор-спектрометр для регистрации электронов, рассеянных на ядрах редких ионов. Общая длина bypass-структуры около 30 м, а место встречи смещено относительно стандартной орбиты CR примерно на 1.5 м. Все магнитные элементы вокруг промежутка встречи имеют противоречивые параметры — с одной стороны, они должны иметь большую апертуру, так как поперечный размер пучка быстро растет с удалением от места встречи, с другой — высокие значения градиентов магнитного поля, при сохранении его качества. Чтобы выполнить все эти требования, предлагается использовать для элементов bypass сверхпроводящие магниты. Общая схема промежутка встречи показана на рис. 7а.

Электронное кольцо Electron Ring имеет периметр 56 м. Его длина подобрана таким образом, чтобы один сгусток электронов сталкивался с пятью сгустками редких ионов. При этом учтены разницы в скоростях для электронов, движущихся практически со скоростью света, и ионов, имеющих $\beta \approx 0.75$ для максимальной энергии 500 МэВ/нуклон. Такая схема может вести к усилению когерентных эффектов встречи, но позволяет минимизировать стоимость создания установки. Энергия электронного кольца может варьироваться в пределах 200–500 МэВ. Все магнитные элементы электронного кольца, кроме элементов промежутка встречи, предполагаются нормальнопроводящими.

Светимость в эксперименте со встречными пучками электронов и редких ионов зависит от производительности источника ионов, от мощности

электронного охлаждения, от параметров встречи и многих других. Предварительные оценки показывают, что предельная достижимая светимость для пучка ионов $^{11}\text{Be}^{4+}$ составляет $5 \times 10^{29} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, а для $^{238}\text{U}^{92+}$ — $2 \times 10^{27} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Оценки делались для энергии ионов 300 МэВ/нуклон. В данный момент в разработке находятся два варианта электронного спектрометра для промежутка встречи. Один, нормальнопроводящий, наследует принципы, предложенные при разработке аналогичного проекта ELISE@FAIR [26]. Отворачивающее поле для рассеянных электронов в этом варианте создается с помощью специально профилированного дипольного магнита, а последующая фокусировка с помощью серии дополнительных квадрупольных линз и магнитов. Положительными сторонами этого варианта являются относительная простота конструкции, отрицательными — малый захватываемый телесный угол: ± 30 мрад по вертикали и $10\text{--}45^\circ$ относительно орбиты установки по горизонтали. Альтернативным вариантом, сильно смягчающим требования по светимости, является спектрометр, где для создания отклоняющего поперечного магнитного поля используются тороидальные катушки, а детектирование происходит прямо на стенках вакуумной камеры, см. рис. 7б. В этом варианте детектируемый телесный угол рассеянных электронов составляет практически 4π , однако создание магнитного поля надлежащего качества в таком случае является задачей высочайшей сложности. Проектная относительная разрешающая способность спектрометра будет составлять $\sim 10^{-4}$.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Значимость проекта DERICA велика не только для решения фундаментальных задач ядерной физики, но и для развития технологической базы физических исследований. Высокочастотная сверхпроводимость, ВЧ-электроника и силовая электроника, технологии линейных нормальнопроводящих и сверхпроводящих ускорителей, работающих в квазинепрерывном режиме, технологии высокого вакуума, мишенный комплекс на мощность пучка порядка 1 МВт и другие “экстремальные” технические аспекты проекта DERICA потребуют привлечения возможностей значительного числа отечественных научных и инженерных организаций. В частности, экспертиза организаций государственной корпорации “Росатом” будет необходима при создании роботизированного мишенного комплекса, работающего в условиях экстремальных радиационных нагрузок.

Выполнение проекта DERICA можно начинать в рамках бюджета ОИЯИ в ограниченном виде (ускоритель на половинную энергию плюс

фрагмент-сепаратор). Даже в таком виде предлагаемый комплекс станет основой перспективной научной программы ОИЯИ мирового класса в области физики радиоактивных изотопов. В полном виде проект DERICA относится к классу “мегасайенс” и в действительности представляет собой не рядовой проект создания изолированной установки, а стратегию развития фундаментальной физики низких энергий в РФ на десятилетия вперед.

Авторы благодарны дирекции ОИЯИ и прежде всего директору ОИЯИ академику В.А. Матвееву за постоянный интерес и финансовую поддержку проекта. Авторы выражают глубокую признательность коллегам из перечисленных в статье научных центров, внесших и вносящих свой вклад в продвижение проекта. Нельзя не упомянуть вклад всех соавторов базовой работы по проекту DERICA в журнале УФН [4]. Особая благодарность за активное участие в работах по проекту С.Л. Богомолу, А.А. Ефремову (ОИЯИ), М.А. Гусаровой, В.С. Дюбкову, М.В. Лалаяну, Ю.Ю. Лозееву, Т.А. Лозеевой, С.В. Мацневскому, А.В. Самошину (МИФИ), А.Л. Ситникову, А.И. Семенникову, В.Г. Кузьмичеву, Д.Н. Селезневу, А.В. Зиятдиновой, Е.Р. Хабибулиной (ИТЭФ), В.И. Залескому (ФТИ НАНБ), П.Н. Остроумову (FRIB), В.А. Барту, Х. Гайсселю, Х. Симону, П. Шпэдтке, С.Г. Ярамышеву (GSI), В. Бикману (SIGMA-PHI), Г. Бизоффи, А. Факко, А. Пальмери (LNL-INFN). Частичная поддержка работы была оказана грантом РНФ № 17-12-01367-П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. S. Fomichev, L. V. Grigorenko, S. A. Крупко, S. V. Stepanov, and G. M. Ter-Akopian, *Eur. Phys. J. A* **54**, 97 (2018).
2. A. A. Bezbakh, V. Chudoba, S. A. Крупко, S. G. Belogurov, D. Biare, A. S. Fomichev, E. M. Gazeeva, A. V. Gorshkov, L. V. Grigorenko, G. Kaminski, O. A. Kiselev, D. A. Kostyleva, M. Yu. Kozlov, B. Mauey, I. Mukha, I. A. Muzailevskii, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **124**, 022502 (2020) [arXiv: 1906.07818].
3. Г. Г. Гульбекян, С. Н. Дмитриев, М. Г. Иткис, Ю. Ц. Оганесян, Б. Н. Гикал, И. В. Калагин, В. А. Семин, С. Л. Богомол, В. А. Бузмаков, И. А. Иваненко, Н. Ю. Казаринов, Н. Ф. Осипов, С. В. Пашенко, В. А. Соколов, Н. Н. Пчелкин, С. В. Прохоров и др., *Письма в ЭЧАЯ* **16**, 653 (2019) [*Phys. Part. Nucl. Lett.* **16**, 866 (2019)].
4. Л. В. Григоренко, Б. Ю. Шарков, А. С. Фомичев, А. Л. Барбанов, В. Барт, А. А. Безбах, С. Л. Богомол, М. С. Головков, А. В. Горшков, С. Н. Дмитриев, В. К. Ерёмин, С. Н. Ершов, М. В. Жуков, И. В. Калагин, А. В. Карпов, Т. Катаяма и др., *УФН* **189**, 721 (2019) [*Phys. Usp.* **62**, 675 (2019)].
5. DERICA project site, <http://derica.jinr.ru>
6. K. Zhu, Y. R. Lu, X. J. Yin, Y. Q. Yang, S. L. Gao, Z. Wang, Y. He, G. Liu, X. H. Zhang, Y. J. Yuan, H. W. Zhao, J. W. Xia, and C. E. Chen, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **794**, 113 (2015).
7. R. Ferdinand, M. Di Giacomo, H. Franberg, J.-M. Lagniel, G. Normand, A. Savalle, and D. Uriot, in *Proceedings of the 10th International Particle Accelerator Conference (IPAC2019)*, Melbourne, Australia, JACoW Publishing, p. 848, doi:10.18429/JACoW-IPAC2019-MOPTS006
8. M. Di Giacomo, R. Ferdinand, H. Franberg, J.-M. Lagniel, G. Normand, M. Desmons, Ph. Galdemard, Y. Lussignol, O. Piquet, and S. Sube, in *Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference (IPAC2018)*, Vancouver, BC, Canada, p. 2804.
9. E. Pozdeyev, J. Brandon, N. Bultman, K. Davidson, P. Gibson, L. Hodges, K. Holland, M. Konrad, S. Lidia, G. Machicoane, H. Maniar, T. Maruta, D. Morris, P. Morrison, C. Morton, P. Ostroumov, *et al.*, in *Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference (IPAC2018)*, Vancouver, BC, Canada, p. 58.
10. Y. Yang, Y. H. Zhai, Y. J. Zhai, L. T. Sun, L. P. Sun, X. B. Xu, L. B. Shi, L. Lu, Y. H. Guo, B. S. Gao, and H. W. Zhao, in *Proceedings of the 10th International Particle Accelerator Conference (IPAC2019)*, Melbourne, Australia, p. 2043.
11. P. N. Ostroumov, T. Maruta, S. Cogan, K. Fukushima, S. H. Kim, S. Lidia, F. Marti, A. S. Plastun, J. Wei, T. Yoshimoto, T. Zhang, and Q. Zhao, *Phys. Rev. Accel. Beams* **22**, 080101 (2019).
12. P. N. Ostroumov, S. Cogan, K. Fukushima, S. Lidia, T. Maruta, A. S. Plastun, J. Wei, J. Wong, T. Yoshimoto, and Q. Zhao, *Phys. Rev. Accel. Beams* **22**, 040101 (2019).
13. М. А. Гусарова, В. С. Дюбков, С. М. Полозов, А. В. Самошин, Т. В. Кулевой, А. А. Мартынов, А. С. Пластун, В. А. Андреев, С. В. Барабин, А. В. Козлов, В. А. Кошелев, Г. Н. Кропачев, Р. П. Куйбида, В. Г. Кузьмичев, Д. А. Лякин, А. Ю. Орлов и др., *Письма в ЭЧАЯ* **13**, 1425 (2016) [*Phys. Part. Nucl. Lett.* **13**, 915 (2016)].
14. P. N. Ostroumov, in *Proceedings of the 29th Linear Accelerator Conference*, http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/linac2018/talks/tu2a02_talk.pdf
15. I. V. Kalagin, G. G. Gulbekian, S. N. Dmitriev, Yu. Ts. Oganessian, B. N. Gikal, S. L. Bogomolov, I. A. Ivanenko, N. Yu. Kazarinov, V. A. Semina, G. N. Ivanov, and N. F. Osipov, in *Proceedings of the RuPAC2018, Protvino, Russia*, p. 60.
16. M. Cavenago, T. Kulevov, V. Stolbunov, and A. Vassiliev, in *Proceedings of the Fifth European Particle Accelerator Conference, EPAC'96, Barcelona, Spain, June 10–14, 1996*, p. 1487.
17. SigmaPhi Company, <https://www.sigmaphi.fr>

18. W. Barth, K. Aulenbacher, M. Basten, M. Busch, F. Dziuba, V. Gettmann, M. Heilmann, T. Kürzeder, M. Miski-Oglu, H. Podlech, A. Rubin, A. Schnase, M. Schwarz, and S. Yaramyshev, *Phys. Rev. Accel. Beams* **21**, 020102 (2018); <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.21.020102>
19. T. A. Lozeeva, Yu. Yu. Lozhev, S. M. Polozov, A. V. Samoshin, L. V. Grigorenko, A. S. Fomichev, W. Barth, and S. Yaramyshev, *Phys. At. Nucl.* **82**, 1519 (2019).
20. К. А. Алиев, С. М. Полозов, А. В. Самошин, С. Е. Топорков, Т. В. Кулевой, Г. Н. Кропачев, А. В. Бутенко, В. А. Мончинский, А. О. Сидорин, Г. В. Трубников, *Письма в ЭЧАЯ* **13**, 1418 (2016) [*Phys. Part. Nucl. Lett.* **13**, 911 (2016)].
21. А. А. Бакиновская, М. А. Батурицкий, Т. А. Бахарева, А. В. Бутенко, М. А. Гусарова, С. Е. Демьянов, Н. Э. Емельянов, В. Г. Залесский, В. Л. Звягинцев, В. А. Карпович, Т. В. Кулевой, А. А. Кураев, М. В. Лалаян, Ю. Ю. Лозев, С. А. Максименко, В. В. Матвеев, *Письма в ЭЧАЯ* **15**, 780 (2018) [*Phys. Part. Nucl. Lett.* **15**, 831 (2016)].
22. T. Kubo, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **204**, 97 (2003).
23. H. Geissel, H. Weick, M. Winkler, G. Münzenberg, V. Chichkine, M. Yavor, T. Aumann, K. H. Behr, M. Böhmer, A. Brünle, K. Burkard, J. Benlliure, D. Cortina-Gil, L. Chulkov, A. Dael, J.-E. Ducret, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **204**, 71 (2003).
24. M. Hausmann, A. M. Aaron, A. M. Amthor, M. Avilov, L. Bandura, R. Bennett, G. Bollen, T. Borden, T. W. Burgess, S. S. Chouhan, V. B. Graves, W. Mittig, D. J. Morrissey, F. Pelle-moine, M. Portillo, R. M. Ronningen, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **317**, 349 (2013).
25. В. В. Анашин, И. Б. Вассерман, В. Г. Вещеревич и др., Препринт ИЯФ 83-98 (Новосибирск, 1983).
26. A. N. Antonov, M. K. Gaidarov, M. V. Ivanov, D. N. Kadrev, M. Aïche, G. Barreau, S. Czajkowski, B. Jurado, G. Belier, A. Chatillon, T. Granier, J. Taieb, D. Doré, A. Letourneau, D. Ridikas, E. Dupont, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **637**, 60 (2011).

THE DERICA PROJECT AND THE DEVELOPMENT STRATEGY OF LOW-ENERGY NUCLEAR PHYSICS

L. V. Grigorenko^{1),2),3)}, G. N. Kropachev^{4),1)}, T. V. Kulevoy⁴⁾, I. N. Meshkov^{5),6),7)}, S. M. Polozov²⁾, A. S. Fomichev^{1),8)}, B. Yu. Sharkov^{9),2)}, P. Yu. Shatunov¹⁰⁾, M. I. Yavor¹¹⁾

¹⁾*Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR, 141980 Dubna, Russia*

²⁾*National Research Nuclear University "MEPhI", 115409 Moscow, Russia*

³⁾*National Research Centre "Kurchatov Institute", Kurchatov sq. 1, 123182 Moscow, Russia*

⁴⁾*National Research Centre "Kurchatov Institute" – ITEP, Bol'shaya Cheremushkinskaya 25, 117218 Moscow, Russia*

⁵⁾*Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics, JINR, 141980 Dubna, Russia*

⁶⁾*Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR, 141980 Dubna, Russia*

⁷⁾*St. Petersburg University, Universitetskaya Emb. 13B, St. Petersburg 199034, Russia*

⁸⁾*State University Dubna, Universitetskaya 19, 141982 Dubna, Russia*

⁹⁾*Joint Institute for Nuclear Research, Joliot-Curie 6, 141980 Dubna, Russia*

¹⁰⁾*Budker Institute of Nuclear Physics, Acad. Lavrentieva Pr. 11, Novosibirsk, 630090 Russia*

¹¹⁾*Institute for Analytical Instrumentation RAS, Ivana Chernykh 31-33, lit. A, St. Petersburg, 198095, Russia*

The strategy of the low-energy nuclear physics development in Russian Federation is discussed, which is based on the construction of DERICA research center. DERICA is multipurpose multiuser facility for production and studies of radioactive isotopes (RI). The emphasis of the DERICA scientific program are studies of RI in storage rings. However, the program is divided into several stages, and at each stage a wide range of fundamental problems of nuclear physics becomes available. The ambitious goal of these developments is the creation of an electron-ion collider aimed at studying the fundamental properties of RI in electron-ion scattering.