



Российская Академия Наук

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

**РАЗВИТИЕ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИИ
УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ
ЧАСТИЦ**

Москва
2021

УДК 621.384.6
ББК 22.381.1
P17

Редакторы-составители Б.Ю. Шарков и И.Н. Мешков

Материал подготовлен при участии:

С. Л. Богомолов, Б. Н. Гикал, Л. В. Григоренко, Е. Е. Донец, И. Н. Мешков,
А. О. Сидорин, Г. В. Трубников, В. В. Фимушкин, Б. Ю. Шарков (ОИЯИ),
Н. В. Завьялов, В. Е. Костюков, А. В. Тельнов, О. Н. Шубин В. С. Гордеев,
Ю. П. Куропаткин, Г. А. Мысков, В. Д. Селемир (РФЯЦ ВНИИЭФ),
Т. В. Кулевой (НИЦ КИ-ИТЭФ), С. М. Полозов (НИЯУ МИФИ),
С. В. Иванов (НИЦ КИ-ИФВЭ), Л. В. Кравчук, А. В. Фещенко,
А. С. Белов (ИЯИ РАН), Е. Б. Левичев, Е. Б. Левичев, В. В. Пархомчук,
А. Е. Бондарь, И. Н. А. А. Брызгин, Д. И. Сквородин, С. Н. Фадеев,
К. В. Лотов, Н. А. Винокуров (ИЯФ СО РАН).

P17 **Развитие физики и технологии ускорителей заряженных частиц** /
Ред.-сост. Б. Ю. Шарков, И. Н. Мешков. — М.: РАН, 2021. — 140 с.

ISBN 978-5-907366-27-5

ISBN 978-5-907366-27-5

© Санкт-Петербургский Федеральный
исследовательский центр РАН, 2021
© Шарков Б.Ю., Мешков И.Н., составление, 2021

Содержание

Введение.....	6
Часть I. Ускорители в России и в мире сегодня.....	10
Глава 1. Ускорители протонов и тяжелых ионов.....	12
1.1. Коллайдеры на сверхвысокие энергии.....	12
1.2. Протонные синхротроны.....	12
1.3. Коллайдеры тяжелых ионов.....	15
1.4. Линейные ускорители протонов и ионов.....	16
1.5. Циклотроны.....	18
Глава 2. Ускорители и коллайдеры лептонов.....	22
2.1. Линейные ускорители электронов.....	22
2.2. Электрон-позитронные коллайдеры.....	25
2.3. Мюонный коллайдер.....	29
2.4. Индукционные ускорители электронов.....	29
Глава 3. Источники синхротронного излучения и лазеры на свободных электронах (ЛСЭ).....	36
3.1. Циклические источники синхротронного излучения.....	36
3.1.1. Источники СИ четвертого поколения.....	36
3.1.2. Проблемы современных источников СИ.....	37
3.1.3. Современные источники СИ в России.....	39
3.2. Компактные источники излучения для университетов и научных центров.....	41
3.3. ЛСЭ экстремального ультрафиолетового диапазона и широкодиапазонный источник рентгеновского излучения на основе электронного накопителя с энергией 1,5 ГэВ для крупных исследовательских университетов.....	42
3.4. Рентгеновский ЛСЭ с брэгговским резонатором.....	44
3.5. Установка для исследования субпикосекундных быстропротекающих процессов методом ультрабыстрой электронной дифракции.....	45
Глава 4. Развитие ускорительных технологий.....	46
4.1. Развитие методов охлаждения пучков тяжёлых заряженных частиц....	46
4.2. Ионные источники.....	49
4.2.1. Ионные источники непрерывного действия.....	49
4.2.2. Импульсные источники многозарядных ионов.....	50
4.2.3. Импульсные лазерные источники многозарядных ионов.....	52
4.2.4. Источники поляризованных ионов.....	52
4.2.5. Источники отрицательно заряженных ионов.....	53
4.2.6. Ионный источник для циклотронов.....	54
4.3. Технологии создания и эксплуатации электронных пушек с фотокатадами.....	55
4.4. Развитие технологий высокочастотной сверхпроводимости и производства сверхпроводящих ускоряющих резонаторов.....	55
4.5. Ускорительная масс-спектрометрия.....	56
4.6. Генераторы ВЧ напряжения для ускорителей заряженных частиц.....	57
Глава 5. Ускорители для прикладных целей.....	59
5.1. Промышленные ускорители и их применение.....	59
5.1.1. Промышленные ускорители электронов (ПУЭ).....	59

5.1.2. Промышленные ускорители ионов (ПУИ)	61
5.2. Задачи развития промышленных ускорителей	67
5.3. Перспективы развития радиационной терапии	68
5.4. Рынок промышленных ускорителей	72
Глава 6. Коллективные методы ускорения	75
6.1. Кильватерное ускорение электронов	75
6.2. Лазерное кильватерное ускорение	75
6.3. Кильватерное ускорение с электронными и позитронными драйверами	77
6.4. Кильватерное ускорение с протонными драйверами	77
6.5. Некильватерные плазменные методы ускорения	77
6.6. Повышение эффективности лазерно-плазменного ускорения	78
Глава 7. Разработка программного обеспечения для проектирования ускорителей заряженных частиц и управления ими	79
Глава 8. Центры компетенций	80
Глава 9. Заключение	81

Часть II. Проекты на основе ускорителей, которые предлагается развивать в РФ в 2020–2030 гг. 82

Глава 1. Ускорительный комплекс на встречных пучках NICA	82
1.1. Цели проекта	82
1.2. Схема комплекса и основные параметры	83
1.3. Эксперимент VM@N	85
1.4. Моды Коллайдера NICA	85
1.5. Прикладные исследования	86
1.6. Перспективы развития комплекса NICA	86
Глава 2. Электрон-позитронный коллайдер «Супер Чарм-Тау Фабрика»	89
2.1. Цели проекта	89
2.2. Описание СЧТФ	89
2.3. Параметры	91
2.4. Статус СЧТФ	92
2.5. Место на российском и международном ландшафтах	92
2.6. Ресурсы и сроки	92
2.7. Потенциальные соисполнители и международное сотрудничество	92
2.8. Ускорительные технологии, которые необходимо развивать для успешной реализации СЧТФ	92
Глава 3. Проект DERICA — электрон-ионный коллайдер для ядерной физики низких энергий	94
3.1. Цели проекта	94
3.2. Описание структуры проекта, проектные параметры	95
3.3. Параметры и стадийность проекта	96
3.4. Возможности прикладных и междисциплинарных исследований	97
3.5. Потенциал пользовательского центра	98
3.6. «Окно возможностей»	98
3.7. Головной исполнитель проекта DERICA, соисполнители	98
3.8. Долговременные перспективы для развития передовых ускорительных технологий	98
Глава 4. Ускорительный Нейтронный Комплекс ИЯИ РАН	100
4.1. Мотивация	100
4.2. Научные цели и параметры ускорителя	101

4.3. Перспективы развития научных исследований, прикладных работ и ускорительных технологий на нейтронном комплексе ИЯИ РАН.....	102
4.4. Головной исполнитель и соисполнители проекта	103
Глава 5. Развитие комплекса адронных ускорителей НИЦ КИ — ИФВЭ	104
5.1. Цели	104
5.2. Описание комплекса	104
5.3. Параметры ускорителей комплекса	106
5.4. Место на российском и международном ландшафтах	106
5.5. Головная организация — исполнитель	106
Глава 6. Центр коллективного пользования «Сибирский Кольцевой Источник Фотонов» (ЦКП СКИФ).....	107
6.1. Цели	107
6.2. Описание	107
6.3. Параметры	108
6.4. Место на российском и международном ландшафтах	111
6.5. Соисполнители.....	111
6.7. Международное сотрудничество.....	111
6.8. Необходимые технологии	111
Глава 7. Синхротронный комплекс РФЯЦ ВНИИЭФ	113
7.1. Цели	113
7.2. Описание	113
7.3. Параметры	114
7.4. Место проекта на российском и международном ландшафте.....	114
7.5. Головная организация и соисполнители.....	115
7.6. Ресурсы и сроки	115
7.7. Международное сотрудничество.....	115
7.8. Необходимые технологии	115
Часть III. Подготовка кадров в области ускорителей заряженных частиц ...	117
Часть IV. Заключение	125
Приложение. Список сокращений.....	131

Введение

Тенденции развития ускорительных технологий в мире

Ускорители заряженных частиц — один из основных инструментов современной ядерной физики и физики элементарных частиц. Непосредственным толчком к созданию первых ускорителей заряженных частиц послужили исследования строения атомного ядра, требовавшие потока заряженных частиц высокой энергии.

Ускорители являются источниками как первичных заряженных частиц, существующих в окружающей нас природе — электронов, протонов, ионов, так и вторичных частиц, рождающихся при взаимодействии первичных ускоренных частиц с веществом мишеней, — мезонов, нейтронов, фотонов, позитронов, антипротонов и др.

В настоящее время в мире действуют около 30 000 ускорителей. Из них около 2% имеют энергию около 1 ГэВ и выше и используются для фундаментальных исследований в ядерной физике и физике элементарных частиц.

Российские и советские ученые внесли огромный вклад в развитие физики ускорителей и в развитие ускорительных технологий. Достаточно назвать принцип автофазировки и первый синхротрон (В. И. Векслер, 1944 г.), первый коллайдер (Г. И. Будкер, А. Н. Скринский, 1965 г.), линейный ускоритель с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (В. В. Владимирский, И. М. Капчинский, В. А. Тепляков, 1969 г.), динамика поляризованных частиц в коллайдерах — теория и эксперимент (Я. С. Дербенёв, А. Н. Скринский, Ю. М. Шатунов, И. А. Кооп, 1971 г.), метод электронного охлаждения пучков тяжёлых заряженных частиц (Г. И. Будкер, А. Н. Скринский, Н. С. Диканский, И. Н. Мешков, В. В. Пархомчук, 1974 г.). В. И. Векслер, В. П. Саранцев, Я. Б. Файнберг инициировали проведение исследований по коллективным методам ускорения (1960 г.). В СССР были созданы крупные ускорители мирового класса — синхроциклотрон «Фазотрон» (ИЯП АН СССР, 1949 г.), протонные синхротроны «Синхрофазотрон» (10 ГэВ, ОИЯИ, 1958 г.), первый в СССР синхротрон с жёсткой фокусировкой У7 (7 ГэВ, ИТЭФ, 1961 г.), синхротрон У70 (ИФВЭ, 1967 г.), комплекс электрон-позитронных коллайдеров (ИЯФ СО РАН, 1967 г.), сверхточный линейный ускоритель протонов мезонной фабрики (ИЯИ РАН, 1991 г.). Эти ускорители послужили базовыми экспериментальными установками таких всемирно известных научных центров, как ОИЯИ, ИЯФ СО РАН, ИФВЭ, ИТЭФ, ИЯИ РАН, ПИЯФ. В настоящее время в этих научных центрах сохранились выдающиеся школы ускорительной физики и технологий, действуют крупные ускорительные комплексы, обеспечивающие высокий уровень фундаментальных и прикладных исследований в стране. Одновременно ученые и инженеры-ускорительщики РФ активно сотрудничают в передовых зарубежных ускорительных центрах — на ускорителях LHC (CERN), RHIC (BNL), SEBAF (JNL), Spiral1 (GANIL), в лабораториях

RIKEN, JPARC, KEK, FNAL, FAIR/GSI, XFEL и др., внося весомый вклад в развитие новейших ускорительных систем.

Главной мотивацией для продвижения ускорительных технологий в мире остаются ядерная физика и физика высоких энергий. Последняя, после открытия бозона Хиггса, определила новые границы исследований на ускоренных пучках по двум главным направлениям:

- изучение свойств известных и поиск новых частиц при существенно увеличенных значениях энергии взаимодействия и светимости эксперимента;
- прецизионные измерения известных процессов и параметров частиц и поиск возможных отклонений от предсказаний теории «Стандартной Модели».

Оба направления требуют генерации пучков высокой энергии и интенсивности.

Современные ускорители высоких энергий — огромные дорогостоящие комплексы, создаваемые в рамках международных проектов. Такие проекты ускорителей на предельно высокие энергии требуют финансирования, которое может и должно быть обеспечено в случае межгосударственного сотрудничества большого числа стран. Участие в таких проектах обеспечивает отечественным учёным постоянное информирование и получение доступа к самым передовым технологиям в области физики и техники ускорителей. Опираясь на опыт участия РФ в проектах LHC, FAIR и XFEL, необходимо сохранять российское участие в ведущих научных проектах, в частности, в проекте Future Circular Collider (FCC), разрабатываемом в ЦЕРН.

Однако, за прошедшие 30 лет наметилась тенденция на сокращение доли работ, выполняемых в исследовательских центрах Российской Федерации. В первую очередь это связано с отсутствием в стране современной экспериментальной базы, обусловленной старением и выводом из эксплуатации установок, построенных еще во времена Советского Союза. На фоне общего депрессивного состояния фундаментальной науки в стране создание крупных научных ускорительных установок затормозилось. Это привело к тому, что наметилось существенное отставание в развитии отечественных ускорительных технологий по целому ряду важнейших направлений, а также к ощутимым кадровым потерям в ускорительных центрах — многие молодые талантливые физики-ускорительщики уехали на работу в передовые зарубежные научные центры¹. Фактически сегодня в России осталось только три центра мирового уровня, ведущих фундаментальные исследования на ускорителях — ОИЯИ, ИЯФ СО РАН и ИФВЭ (НИЦ КИ). Как результат, сегодня многие жизненно важные для страны прикладные направления (такие, как ядерная медицина, материаловедение, полупроводниковая промышленность) зависят от иностранных поставщиков².

В связи с наметившимся поворотом страны к экономике высоких технологий и связанным с этим увеличением государственной поддержки

¹ Проекты высокоинтенсивных ускорителей промежуточных энергий успешно продвигаются и реализуются по всему миру (см. Ч. I).

² Ускорители, применяемые в медицине и в ряде технологий, производятся серийно большим числом коммерческих фирм в развитых и развивающихся странах мира.

фундаментальной и прикладной науки физики РАН, ОИЯИ, НИЦ КИ выступают с предложениями по ряду направлений научных исследований, которые используют ускорители в качестве основного инструмента для экспериментов, а также способны стать локомотивом высокотехнологического развития гражданской, оборонной промышленности, медицины, сельского хозяйства и др.

Предлагаемая программа (Дорожная Карта) призвана восстановить в РФ и поднять на современный уровень экспериментальную базу исследований по ядерной физике и физике частиц на основе ускорителей, создать условия для ее непрерывного технологического развития, позволяющего оперативно и адекватно отвечать на вызовы современного мира, а также сохранить активное международное сотрудничество.

Задачей настоящего документа является обзор имеющихся в РФ научно-технологического потенциала, достижений отечественной ускорительной науки и ускорительных технологий, а также формулируются конкретные предложения по созданию новых ускорительных проектов/центров/установок для фундаментальной ядерной физики, физики высоких энергий (физики частиц) и прикладных задач. Создание этих ускорительных центров и установок в РФ позволит вернуть отечественную науку на передовые позиции в мире, обеспечить консолидацию потенциала ведущих коллективов российского научного сообщества, поднять на новый уровень подготовку кадров и международное научно-техническое сотрудничество.

Предлагаемая программа развития передовых ускорительных технологий в Российской Федерации охватывает весь спектр современных технологий, включая

- Ускорители и коллайдеры протонов и тяжелых ионов,
- Ускорители и коллайдеры электронов и позитронов,
- Источники синхротронного излучения и лазеры на свободных электронах,
- Ускорители для промышленных применений,
- Коллективные методы ускорения,
- Технологии высокочастотной сверхпроводимости и производства сверхпроводящих ускорительных резонаторов,
- Источники высокочастотного и сверхвысокочастотного питания для ускорителей заряженных частиц,
- Разработку программного обеспечения для проектирования ускорителей заряженных частиц,
- Развитие и совершенствование системы подготовки кадров для проектирования и эксплуатации современных ускорителей заряженных частиц.

Санкционная политика в отношении высоких технологий для РФ заставляет по-новому взглянуть на необходимость развивать ускорители для социально значимых прикладных применений и, прежде всего, для ядерной медицины. В программу развития и организации производства необходимого стране количества таких ускорителей должны быть включены:

1) Ускорители для лучевой терапии онкологических заболеваний — линейные ускорители электронов на 6 и 18 МэВ, ускорители протонов на энергию 70–230 МэВ, ускорители ионов углерода, а также установки для нейтрон-захватной терапии.

2) Ускорители для наработки радиоизотопов для диагностики и терапии сердечно-сосудистых и онкологических заболеваний.

Продвижение прикладных ускорителей и радиационных технологий на внутреннем рынке должно сопровождаться ростом производства отечественных ускорителей и развитием связанных технологий (микроэлектроника, СВЧ и вакуумная техника, СП и т. п.), без которых невозможно построить современный ускоритель. Таким образом, развитие ускорительной техники для ряда важнейших прикладных применений даст весомый положительный эффект в индустрии высоких технологий в РФ.

Документ состоит из введения, где обсуждаются тенденции развития ускорительных технологий в мире, и трёх разделов, первый из которых (Часть I) представляет состояние и планы развития ускорительной техники в мире, во втором (Часть II) описываются ускорительные проекты ближайшего десятилетия, в третьем (Часть III) формулируются задачи подготовки кадров, необходимых для осуществления представленных проектов и использования создаваемых ускорительных исследовательских и технологических комплексов.

По каждому проекту раздела II представлены

- научные или научно-технические, прикладные цели проекта,
- описание сути проекта, проектные параметры,
- место проекта на Российском и международном ландшафте,
- головная организация-исполнитель,
- соисполнители и международное сотрудничество,
- требуемые материальные и кадровые ресурсы,
- ориентировочные сроки исполнения.

Предложенная здесь Дорожная Карта развития физики и технологии ускорителей в РФ соответствует Программе фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 гг.) — Раздел 1.3.3.5 фундаментальных и поисковых исследований (Физика ускорителей заряженных частиц, включая синхротроны, лазеры на свободных электронах, источники нейтронов и др.), являясь составной частью направления 1.3.3 «Ядерная физика и физика элементарных частиц».

Часть I. Ускорители в России и в мире сегодня

Главной мотивацией для продвижения ускорительных технологий в мире остается физика высоких энергий, которая после открытия бозона Хиггса ещё раз подтвердила два главных направления исследований на пучках ускоренных частиц:

— изучение свойств известных и поиск новых частиц при увеличении энергии взаимодействия частиц и светимости эксперимента;

— прецизионные измерения параметров известных процессов и поиск возможных отклонений от предсказаний «Стандартной Модели» (СМ), что также требует, в первую очередь, пучков частиц высокой энергии и их высокой интенсивности.

Эти направления требуют создания ускорителей с широчайшим спектром параметров:

- протонные коллайдеры сверхвысокой энергии (раздел 1.1),
- коллайдеры тяжелых ионов (раздел 1.3),
- электрон-позитронные (раздел 2.2) и мюонные (раздел 2.3) коллайдеры,
- ускорители — генераторы вторичного излучения (разделы 2.1, 2.4, раздел V).

Не меньший интерес и значение представляют исследования в области «ядерных» энергий, позволяющие существенно продвинуться в понимании физики нуклон-нуклонного взаимодействия и структуры ядра. Ускорители, используемые для этих задач, рассматриваются в разделах 1.2–1.4, 2.1.

Проекты ускорителей на предельно высокие энергии требуют весьма значительного финансирования, которое может быть обеспечено только в случае межгосударственного сотрудничества большого числа стран. Участие в таких проектах обеспечивает постоянный обмен информацией и получение доступа к самым передовым технологиям в области физики и техники ускорителей. Проекты высокоинтенсивных ускорителей промежуточных энергий успешно продвигаются и реализуются по всему миру. Опираясь на опыт участия РФ в проектах LHC¹, FAIR и XFEL, необходимо сохранять российское участие в ведущих научных проектах, в частности, в многоцелевом проекте Future Circular Collider Study (FCC), разрабатываемом в ЦЕРН. Однако за прошедшие 30 лет наметилась тенденция на сокращение доли работ, выполняемых в Российской Федерации. В первую очередь это связано с отсутствием современной экспериментальной базы, обусловленной старением и выводом из эксплуатации установок, построенных еще во времена Советского Союза.

Фактически сегодня в России осталось только три центра мирового уровня, ведущих фундаментальные исследования на ускорителях — ОИЯИ, ИЯФ СО РАН и ИФВЭ (ФНЦ КИ). Как следствие, наметилось существенное отставание России от развитых и даже развивающихся стран в применении ускорителей на многих жизненно важных для страны направлениях

¹ Список аббревиатуры приведён в Приложении.

использования ускорительной техники (таких, как медицина, материаловедение, полупроводниковая промышленность).

Очевидная истина — развитие техники невозможно в отсутствие культуры фундаментальных исследований — проявляется на примере техники ускорителей как нельзя более ярко.

Предлагаемая здесь программа призвана, сохраняя активное международное сотрудничество, во-первых, восстановить в РФ современную экспериментальную базу исследований по ядерной физике и физике частиц на основе ускорителей, а во-вторых, создать условия для её непрерывного технологического развития, позволяющего оперативно и адекватно отвечать на вызовы современного мира.

Глава 1. Ускорители протонов и тяжелых ионов

1.1. Коллайдеры на сверхвысокие энергии

В настоящее время существует международный консенсус по вопросу сохранения в ближайшем и недалеком будущем возможности эксплуатации коллайдера LHC и его модернизации с целью существенного повышения его светимости (проект HL-LHC)². Обсуждаются также два похожих проекта Super proton-proton Collider (SppC) в Китае и Future Circular Collider (FCC-hh)³ в ЦЕРН. Оба проекта предполагают длину орбиты коллайдеров до 100 км и поле в магнитах 14–16 Тл, что позволит получить энергию взаимодействия в центре масс 100 ТэВ.

России следует обязательно участвовать в международных проектах, обеспечивая таким образом доступ к самым передовым технологиям, применяемым для создания ускорителей. Наиболее целесообразно активное участие в проектах ЦЕРН, но без ущерба для проекта NICA в ОИЯИ (см. Часть II).

Ключевыми задачами, определяющими прогресс в создании кольцевых коллайдеров, являются:

- получение поля в магнитах 14–16 Тл с использованием сверхпроводника на основе Nb₃Sn,
- увеличение критической плотности тока в магнитах,
- формирование требуемого качества поля (в т. ч. оптимизация геометрии обмоток),
- минимизация стоимости магнитов.

Не менее важной проблемой является обеспечение высокого вакуума.

1.2. Протонные синхротроны

В физике высоких энергий протонные синхротроны⁴, ускоряющие протоны и ионы, используются в двух вариантах:

- инжекция в коллайдер с последующим проведением экспериментов на встречных пучках (что чаще всего сопровождается доускорением частиц в коллайдерах),
- вывод пучка ускоренных частиц на неподвижную мишень для изучения их взаимодействия с частицами мишени или генерации вторичных частиц («fixed target experiment»).

Первый вариант, коллайдерный, представлен в предыдущем разделе, второй имеет множество разновидностей. В физике высоких энергий («физика частиц») это:

- генерация направленных потоков нейтрино для экспериментального изучения его природы, прежде всего, нейтринных осцилляций, физики взаимодействия нейтрино с другими частицами СМ, измерения массы нейтрино;
- генерация каонов, мюонов, нейтронов для изучения редких распадов каонов, поиск конверсий мюона в электрон, поиск дипольного момента дейтрона, прецизионные эксперименты по физике нейтронов.

История синхротронов началась с открытия В.И. Векслером принципа автофазировки в 1944 г. и независимо от него Э. Макмилланом в 1945 г. Первый синхротрон на этом принципе был построен В.И. Векслером в ФИАН СССР и запущен 28 декабря 1947 г. Это был электронный синхротрон на энергию 30 МэВ. Годом ранее в Калифорнийском университете в Беркли (США) циклотрон с диаметром полюса 184 дюйма (4,67 м), который никогда не достигал максимальной энергии, был запущен Э.О. Лоуренсом в режиме автофазировки (модуляция частоты ускоряющего ВЧ) и ускорил дейтроны до энергии 195 МэВ. Это был триумф принципа автофазировки. Ускоритель вошёл в историю под названием синхроциклотрон.

Уже вскоре после успеха В.И. Векслера в Гидротехнической лаборатории (ГТЛ) АН СССР в Дубне под руководством М.Г. Мещерякова и В.П. Джеллепова было начато строительство Фазотрона — синхроциклотрона с полюсом 6 м, который начал ускорять протоны 14 декабря 1949 г. до энергии 680 МэВ. Многократно модернизированный, ускоритель успешно работает и сегодня.

Первые протонные синхротроны «Космотрон» (BNL, протоны 3,3 ГэВ) и «Бэватрон» (LBNL, протоны 6 ГэВ) вошли в строй в 1953 и 1954 гг. соответственно. Последний стал известен открытием антипротона. А в апреле 1957 г. в Дубне под руководством В.И. Векслера был построен и запущен Синхрофазотрон — протонный синхротрон на энергию 10 ГэВ, ставший на несколько лет рекордсменом по энергии ускоренных частиц. Он успешно проработал до 2002 г.

В 1952 г., после того как Э. Курант, М. Ливингстон и Х. Снайдер сформулировали принцип жёсткой фокусировки, в физике и технике ускорителей произошла революция — синхротроны значительно потеряли в весе и, заодно, в стоимости сооружения. Тем самым был открыт путь к существенно более высокой энергии ускоренных частиц. Уже в 1959 г. в ЦЕРН заработал первый синхротрон с жёсткой фокусировкой — на энергию протонов 28 ГэВ, названный незатейливо Proton Synchrotron. Следом в 1960 г. в BNL вступил в строй протонный синхротрон Alternating Gradient Synchrotron (AGS) с оригинальной фокусирующей системой, имеющей знакопеременный градиент магнитного поля. Оба синхротрона работают до сих пор как промежуточные ускорители в коллайдерах LHC (CERN) и RHIC (BNL) (см. ниже).

«Гонка синхротронов» продолжалась, и в 1967 г. «пальма первенства» перешла в СССР, где в ИФВЭ вошёл в строй протонный синхротрон У70 на энергию протонов 70 ГэВ. Ему предшествовало сооружение в ИТЭФ под руководством В.В. Владимирского синхротрона-прототипа У7 на энергию протонов 7 ГэВ, позже модернизированного до энергии 10 ГэВ и переименованного в У10. Синхротрон У70 оставался самым высокоэнергичным в мире до 1976 г., когда начали работать синхротроны на энергию протонов до 400 ГэВ (Super Proton Synchrotron (SPS), ЦЕРН) и до 500 ГэВ (Main Ring в Фермилаб).

В СССР и России развитие протонных синхротронов вынужденно ограничилось поиском их возможных применений в различных областях науки и техники. Так, в ИТЭФ в конце 1990-х появился проект ТетраВаттного Накопителя (ТВН) тяжелых ионов. Успешно был реализован проект

преобразования протонного ускорителя ИТЭФ в ускорительно-накопительный комплекс тяжелых ионов и протонов ИТЭФ-ТВН с использованием технологии перезарядной инжекции ускоренного в одном синхротронном кольце УК (13 Тл·м, 20 Гц) во второе, накопительное кольцо У-10 (34 Тл·м). Ускорительно-накопительный комплекс ИТЭФ-ТВН был способен с высокой эффективностью накапливать ядра тяжелых элементов, увеличивая плотность частиц в фазовом пространстве на два порядка, что позволило кардинально расширить проводимые на пучках физические исследования и открыть новые направления технологических исследований в области ускорительной техники.

Кроме режима накопления ионов с энергией до нескольких сотен МэВ/н, ускорительно-накопительный комплекс ИТЭФ-ТВН использовался в режимах ускорения протонов в широком диапазоне энергий (до 10 ГэВ), а также ускорения ионов до 4 ГэВ/н.

Другим направлением стало развитие технологии сверхпроводящих магнитов для синхротронов. В результате в ОИЯИ в 1993 г. был введен в строй первый сверхпроводящий протонный синхротрон «Нуклотрон», являющийся сегодня главным ускорителем ускорительного комплекса NICA (см. ч. II п. 1).

В настоящее время несколько протонных и ионных ускорителей разных типов работают с высокой интенсивностью при мощности пучка ~ 100 кВт и более: ISIS (Англия), Tevatron в FNAL, AGS в BNL (США), SPS (ЦЕРН). Некоторые из них работают (или работали) как часть инжекторных комплексов адронных коллайдеров.

Флагманский проект Европейской стратегии по ядерной физике и физике адронов FAIR находится в продвинутой фазе сооружения стартовой версии в г. Дармштадт, ФРГ. Ускорительный комплекс включает сильноточный линейный ускоритель UNILAC, синхротроны SIS18 и SIS100, систему накопительных колец. Планируется ускорение пучков высокой интенсивности большинства стабильных элементов от протонов (36 ГэВ) до урана (2–4 ГэВ/нулон). Отличительной особенностью создаваемого комплекса FAIR является наличие высокоинтенсивных первичных и вторичных пучков стабильных и радиоактивных ядер, а также пучков антипротонов, превышающих существующие в настоящее время в мире пучки по интенсивности в 100–10000 раз.

Высокое качество пучков будет обеспечено за счёт возможности их накопления, охлаждения и сжатия. Предложенная схема ускорительного комплекса имеет принципиальную возможность для оптимизации параллельной самосогласованной работы комплекса.

Тяжелоионный комплекс FAIR имеет богатую программу исследований в области физики частиц и ядерной физики. Планируется ускорение пучков высокой интенсивности большинства стабильных элементов от протонов (36 ГэВ) до урана (4 ГэВ/нулон), которые предполагается использовать для исследований по следующим научным направлениям:

- физика адронов и кварков в сжатой ядерной среде (СВМ эксперимент);
- атомная физика и физика плазмы; прикладные исследования в биологии, медицине и материаловедении (APPA);

— структура адрона и спектроскопия; физика чарма и странности; физика гиперядер с антипротонными пучками (эксперимент PANDA на коллайдере HESR) и структура ядер;

— физика ядерных реакций и ядерная астрофизика с пучками редких радиоактивных ядер (NuSTAR).

Проект FAIR представляет значительный научный и практический интерес для российского научного сообщества, придавая новый импульс развитию высоких технологий в различных отраслях экономики, подготовке кадров молодых ученых, инженеров, развитию IT-технологий, а также дальнейшей активной интеграции России в мировое научное и технологическое пространство. Многие российские институты принимают активное участие в сооружении ускорительного комплекса. Так, сверхпроводящие квадрупольные линзы ускорителя SIS100 разработаны и создаются в ОИЯИ, накопительное кольцо CR создается в ИЯФ СО РАН.

В ядерной физике и прикладных исследованиях протонные синхротроны применяются также для **генерации нейтронов**, которые образуются при взаимодействии протонов с мишенями из тяжелых элементов за счет так называемого эффекта испарения («скальвания» — spallation). Высокая интенсивность протонного пучка является здесь также одним из факторов, определяющих прогресс физических исследований. J-PARC (Япония), FNAL (США), SPS (ЦЕРН).

В НИЦ КИ-ИФВЭ развивается направление прикладного использования протонного пучка, выведенного из действующего синхротрона У-1.5, при реализации проекта «Создание прототипа импульсного источника нейтронов на основе реакции испарительно-скальвающего типа», которое реализуется в рамках ФНТП развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019–2027 годы.

1.3. Коллайдеры тяжелых ионов

Предельно высокая энергия тяжелых ионов достигается в адронных коллайдерах (LHC), в которых ионы используются в экспериментах небольшую часть времени в столкновениях вместо протонов. Единственным коллайдером, построенным специально для тяжелых ионов, является сегодня RHIC (США), успешно работающий более 10 лет и постоянно повышающий эксплуатационные параметры. Основная цель экспериментов на RHIC — исследование редких процессов, связанных с кварк-глюонной плазмой (КГП) и предельной плотностью ядерной материи. Последняя существенно зависит от температуры КГП. В 2006 г. появились теоретические указания на особенности поведения КГП: максимальные значения температуры и плотности КГП достигаются в столкновениях тяжелых ионов при полной энергии двух сталкивающихся нуклонов $\sqrt{s} \sim 10$ ГэВ/нуклон. В последующее десятилетие появилось множество теоретических работ, указывающих на образование при такой энергии нового состояния материи — так называемой *смешанной фазы*, смеси нуклонов и КГП.

Для исследования этого явления в ОИЯИ в 2006 г. начались работы по созданию тяжелоионного коллайдера, имеющего высокую светимость

в указанной области энергии. Ускорительный комплекс Nuclotron-based Ion Collider fAcility (NICA) должен быть введен в действие в конце 2022 г.

Аналогичные эксперименты были начаты на выведенных пучках тяжелых ионов синхротрона SPS в ЦЕРН и также планируются на строящемся ускорительном комплексе Facility for Antiproton and Ion Collider (FAIR) в Исследовательском центре тяжелых ионов (GSI, Дармштадт, Германия).

Не отстает и RHIC. Правда, построенный для экспериментов при более высокой энергии (до 100 ГэВ/нуклон ядер золота), этот коллайдер имеет большой периметр — 3834 м и, как следствие, низкую светимость в области энергии смешанной фазы. Планируется компенсировать этот недостаток, использовав оригинальную систему электронного охлаждения на базе сильноточного электронного ускорителя. Первые успешные испытания этой системы позволяют надеяться на получение ожидаемых физических результатов.

1.4. Линейные ускорители протонов и ионов

Линейные ускорители протонов и ионов начали развиваться как инжекторы частиц в протонные синхротроны, придя на смену ускорителям Ван де Граафа. В СССР были созданы сильноточные линейные ускорители протонов ЛУ20 (ОИЯИ), И2 (ИТЭФ) и И100 (ИФВЭ) на основе ВЧ резонаторов для инжекции в синхротроны У-7 и У-70 соответственно. Их параметры (Таблица 1.1) позволяли эффективно производить инжекцию пучков протонов и лёгких ионов в протонные синхротроны. Ускорители успешно работают до сих пор, претерпев несколько модификаций.

Таблица 1.1

Линейные ускорители — инжекторы протонных синхротронов Синхрофазотрон, У-7, Нуклотрон, У-70

Ускоритель Параметр	ЛУ-20	И-2	И-100
Тип структуры	Структура Альвареса с трубками дрейфа и квадрупольной фокусировкой		
Ускоряемые частицы	Протоны, лёгкие ионы		
Энергия инжекции протонов, кэВ	700	700	800
Энергия ускоренных протонов, МэВ	20,0	24,6	100,0
Пиковый ток, мА	40	150	100
Длительность импульса, мкс	600	10	12–40
Частота повторения импульсов, Гц	0,2	0,2–1,0	0,2–1,0

В настоящее время разработка RFQ и DTL резонаторов по идет двум направлениями. Во-первых, требуется разработка экономичных резонаторов, работающих в режиме большой скважности, для использования в качестве инжекторов ускорительных комплексов для ядерной медицины и исследования радиационной стойкости ЭКБ. Во-вторых, требуется разработка данных резонаторов, предназначенных для работы в режиме малой скважности,

вплоть до cw-режима с пучками высокой интенсивности. (Моделирование электродинамики различных структур, разработка конструкции, разработка технологии изготовления, разработка соответствующих систем управления, диагностики пучка). Поскольку опыт создания таких установок только нарабатывается мировой научной общественностью, то потребуются тестовые испытания, позволяющие определить/подтвердить правильность выбора ключевых параметров при разработке ускоряющих структур. Разработка конструкций RFQ и DTL резонаторов для работы с высокоинтенсивными пучками ионов в режиме малой скважности вплоть до cw-режима при предельно низких начальных скоростях ионов имеет определяющее значение для развития техники линейных ускорителей.

Мощное развитие линейных ускорителей получило в связи с созданием импульсных источников нейтронов (neutron spallation source). Так, за последнее десятилетие генерирующие нейтроны ускорительные комплексы, такие как SNS и LANSCE (США), — продвинули технологии получения интенсивности протонного пучка до уровня мощности пучка ~ 1 МВт и более. Стоящие в мире линейные ускорители протонов будут иметь уровень мощности пучка выше 1 МВт: ESS (Швеция, 5 МВт, 2 ГэВ), SPL (4 МВт, 5 ГэВ, ЦЕРН), Project-X (3 МВт, 3 ГэВ, FNAL, США), MYRRHA (Бельгия, 2,4 МВт, 0,6 ГэВ).

Нейтронный комплекс ИЯИ РАН на основе сильноточного ускорителя протонов будет является прототипом нейтронных источников нового поколения, где будет возможна реализация всего спектра нейтронных исследований, изучение структуры и динамики конденсированных сред, в том числе и при экстремальных условиях, проведение исследований нейтрон-ядерных взаимодействий в интересах развития ядерной энергетики. На данном комплексе необходимо организовать и реализовать работу по отработке ключевых вопросов по работе с нейтрон-генерирующей мишенью.

Кроме протонов эффективно используются дейтронные пучки для генерации нейтронов IFMIF (Япония), SARAF (Израиль), SPIRAL2 (Франция).

Линейные ускорители тяжелых ионов являются драйверами в установках по исследованию физики экзотических ядер далеких от линии стабильности изотопов. FRIB (MSU, США), SPIRAL2 (GANIL, Франция), SPES (LNL INFN Legnaro, Италия). Рекордные по интенсивности токи широкого спектра масс тяжелых ионов обеспечивает линейный ускоритель UNILAC для инжекции в синхротрон SIS18 в GSI, Darmstadt.

В РФ проект DERICA с тяжелоионным линейным ускорителем на 100 МэВ/н, разрабатываемый с учетом лучших достижений и опыта создания вышеперечисленных установок, позволит получать более высокую мощность первичного пучка ионов урана и, как следствие, более высокие интенсивности вторичных пучков (см. Часть II). Головной организацией в данном проекте является ОИЯИ с привлечением широкого круга специалистов из ведущих российских и зарубежных научных центров.

Альтернативой ускорительным источникам нейтронов являются ядерные реакторы. В России источниками нейтронов мирового уровня являются импульсный реактор ИБР-2 Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна) и вводимый в эксплуатацию высокопоточный реактор

непрерывного действия ПИК в ПИЯФ КИ (Гатчина). Реактор ИБР-2 ОИЯИ обладает наибольшим в мире импульсным потоком нейтронов, достижимым на исследовательских источниках нейтронов (10^{16} н/см²/с). Реактор ПИК спроектирован на мощность 100 МВт и поток нейтронов $4,5 \times 10^{15}$ н/см²/с.

Однако источники нейтронов на базе ускорителей протонов в настоящее время получили приоритетное развитие, поскольку в отличие от реакторов не содержат делящегося вещества, и, следовательно, не представляют большой опасности с точки зрения вероятности радиоактивного загрязнения. Импульсный режим работы ускорителей позволяет формировать требуемую временную структуру нейтронных потоков, что расширяет возможности исследований. Согласно рекомендациям Форума мегапроектов Организации экономического сотрудничества и развития, на каждом континенте необходимо иметь хотя бы один нейтронный генератор последнего поколения.

Ряд современных технологий для линейных ускорителей должны развиваться в России. К ним, в первую очередь, относятся:

- разработка фокусирующих элементов с предельными параметрами, создание фокусирующих устройств на постоянных магнитах, устойчивых к радиационным нагрузкам;

- освоение технологий ВЧ сверхпроводимости (СП) и разработка СП резонаторов;

- разработка систем ВЧ питания на основе твердотельных усилителей мощности и мощных клистронов.

1.5. Циклотроны

Начиная с 30-х годов циклотроны создавались как базовые установки для проведения исследований в области ядерной физики. На сегодняшний день можно выделить три основных направления использования циклотронов:

- ядерно-физические исследования,
- ускорители промышленного применения,
- медицинские исследования, лучевая терапия.

Многие научные центры — ОИЯИ (Дубна), GANIL (Франция), MSU (США), RIKEN (Япония), Yuwaskylo (Финляндия) др. — имеют современные циклотроны в качестве базовых установок для выполнения физических исследований. Однако сам циклотронный метод ускорения продолжает развиваться как в технологическом, так и научном плане для получения предельно возможных параметров по энергии и интенсивности ускоряемых частиц.

В последнее время очень большое значение получило применение циклотронов в медицинских целях: производство медицинских радиоизотопов и (протонная) терапия. Для этих целей широкое применение получили компактные специализированные циклотроны, ориентированные на ускорение одного типа частиц с различными максимальными энергиями пучка в диапазоне от нескольких МэВ до сотен МэВ и интенсивностями от десятков наноампер до сотен микроампер. Типичными представителями таких машин являются установки фирмы ИВА (Бельгия). Циклотроны медицинского и промышленного применения строятся на базе проверенных решений,

поскольку должны обладать высокой степенью надежности и простотой в управлении.

Тенденции развития циклотронов легких частиц

В настоящее время решена задача получения высокоинтенсивных пучков протонов с энергией несколько сот МэВ и средней мощностью пучка до 1 МВт. Ключевой задачей развития циклотронов в этом направлении является не только получение высоких параметров пучка, но и обеспечение низких потерь пучка на всех этапах ускорения и вывода пучка для защиты оборудования ускорителя и обеспечения безопасной работы персонала. Другой проблемой является разработка и создание мишенных устройств, способных принять пучок такой высокой мощности.

Тенденции развития компактных циклотронов тяжелых ионов

Поколение циклотронов тяжелых ионов, которое активно стало развиваться в конце 50-х годов, было ориентировано на использование внутренних источников ионов пеннинговского типа (PIG). Развитие ионных источников привело к созданию в конце 70-х годов источника ионов нового типа — электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР), разработанного для циклотрона. Интенсивности пучков многозарядных ионов ЭЦР-источника в десятки и сотни раз превосходят интенсивности PIG-источника. Использование ЭЦР-источника на циклотроне потребовало создания системы внешней инжекции пучка в центр циклотрона. Создание инжектора тяжелых ионов для циклотрона на базе ЭЦР-источника и системы внешней инжекции пучка серьезным образом повлияло на принципы построения циклотронов.

Во-первых, возможность ускорения ионов более высоким зарядом позволила снизить уровень среднего магнитного поля, создавать более экономичные магниты. Переход на ускорителе от источника типа PIG к ЭЦР-источнику при той же магнитной структуре дал возможность ускорения более тяжелых ионов.

Во-вторых, вынесение ионного источника за пределы вакуумной камеры ускорителя значительно снизило газовую нагрузку вакуумной системы циклотрона. Поток газа из пеннинговского источника составляет около $1 \text{ см}^3/\text{мин}$, в то время как газоотделение с поверхности камеры циклотрона минимум на порядок меньше.

В-третьих, новые технологии существенно изменили эксплуатационные свойства ускорителя. Снизилась вероятность пробоев с высоковольтных электродов и дуантов. Срок службы элементов центральной оптики стал практически не ограничен. В сумме ускоритель получил возможность работать целый год без профилактических работ внутри камеры циклотрона. Следует добавить, что ионный источник типа PIG при работе на тяжелых ионах требует ежедневной замены электродов, а ЭЦР-источник может работать на газах в течение года без профилактики.

Максимальным напряжением инжекции, при котором обеспечивается надежная работа источников типа ЭЦР, является 25 кВ. Повышение энергии инжекции пучка ионов в целом положительно сказывается на эффективности

транспортировки пучка по каналу инъекции, поскольку это ведет к улучшению эмиттанса пучка из ионного источника, снижению влияния эффекта пространственного заряда. Это требование особенно важно для сильноточных инжекторов, когда интенсивность инжектируемого пучка превышает 100 мкА. Увеличение интенсивности пучка требует повышения потенциала инъекции до 100 кВ, что может быть достигнуто с использованием высоковольтной платформы.

Ионный источник для циклотронов

Ионный источник во многом определяет параметры систем циклотрона. На циклотронах в основном в настоящее время используются ЭЦР-источники с частотой 14 или 18 ГГц, имеющие медные или сверхпроводящие обмотки катушек для создания магнитного поля. Для повышения интенсивности пучка и заряда тяжелых ионов требуется разработка ЭЦР-источников, работающих на частоте 28–50 ГГц, с обязательным использованием сверхпроводящей магнитной структуры. В России такие ионные источники пока не созданы, пилотную разработку ведет ЛЯР ОИЯИ.

Магнитная структура циклотронов

Магнитные системы циклотронов строятся на базе Ш-образных магнитов или магнитов бронированного типа, а также на базе структуры с разделенными секторами.

Компьютерное моделирование магнитной структуры циклотрона с использованием измеренных магнитных свойств стали и анализа деформации элементов магнитной структуры позволят практически без ошибок создавать магнитные структуры.

В настоящее время в магнитах циклотронов используются медные обмотки. Использование сверхпроводящих технологий является перспективным направлением для снижения потребляемой мощности. Прежде всего вызывает интерес применение технологии «теплой» сверхпроводимости. Повышение уровня магнитного поля в циклотронах свыше 2 Тл на сегодняшний день вызывает сложные технические решения, прежде всего в системе вывода пучка. Задача требует изучения.

Высокочастотная ускоряющая система

Высокочастотные системы циклотронов работают на частоте от 5 до 50 МГц. Технология изготовления объёмных резонаторов и дуантов хорошо разработана как с точки зрения расчетов, так и технологии изготовления. Однако производство в России надёжных ВЧ генераторов на указанную частоту и мощностью 20–50 кВт утрачено, так же как и производство высокочастотных ламп.

Вакуумная система циклотрона

Процесс оптимизации вакуумной системы циклотрона заключается в нахождении компромисса между требованием к снижению потерь пучка на остаточном газе и техническими возможностями и стоимостью создания вакуумной системы. Давление в камере циклотрона для легких

частиц — протонов — должно составлять $\sim 10\text{--}6$ Торр, для тяжелых ионов — лучше, чем $10\text{--}7$ Торр. Это достигается применение турбомолекулярных и криогенных насосов. Комплектация вакуумных систем производится в основном оборудованием импортного производства. Надежные средства откачки в России не производятся.

Система вывода пучка из циклотрона

Вывод пучка ионов из циклотрона производится двумя основными методами:

1. Метод перезарядки ионов на тонкой фольге,
2. Электростатический вывод.

Вывод пучка методом перезарядки эффективно работает для легких ионов и ионов высокой энергии. Вывода пучка с использованием перезарядных фольг для тяжелых ионов низкой энергии является неэффективным из-за разброса по зарядам и малого времени жизни фольги. В этом случае целесообразно использовать систему вывода пучка с помощью электростатического дефлектора. Она имеет более высокий коэффициент вывода по сравнению с системой вывода методом перезарядки. Эффективность электростатического вывода пучка, экспериментально полученная на циклотронах, составляет 60–90%.

Вывод пучков отрицательно заряженных ионов (H-) производится методом перезарядки на тонкой фольге и обеспечивает 100% эффективность вывода и возможность глубокой вариации энергии за счет изменения радиуса вывода. Этот эффект во многом определил интенсивное развитие циклотронов, ускоряющих отрицательно заряженные ионы.

В наши дни большое значение получило применение циклотронов в медицинских целях: производство медицинских радиоизотопов и (протонная) терапия. Для этих целей широкое применение получили компактные специализированные циклотроны, ориентированные на ускорение одного типа частиц с различными максимальными энергиями пучка в диапазоне от нескольких МэВ до сотен МэВ и интенсивностями от десятков наноампер до сотен микроампер. Типичными представителями таких машин являются установки фирмы IBA (Бельгия). Циклотроны медицинского и промышленного применения строятся на базе проверенных решений, поскольку должны обладать высокой степенью надежности и простотой в управлении.

Одна из основных областей использования циклотронов высокой интенсивности — проведение экспериментов с редкими изотопами с использованием метода фрагментации пучка (RIKEN, GANIL, FRIB). Наибольшую мощность тяжелоионного пучка, на два порядка превышающую достигнувшую в настоящее время, предполагается получить для ионов урана на ускорителе FRIB, сооружаемом в настоящее время в Мичиганском университете в США.

Глава 2. Ускорители и коллайдеры лептонов

2.1. Линейные ускорители электронов

Как правило, линейные ускорители электронов используются в качестве фор-инжекторов для комплексов ускорителей источников СИ или коллайдеров. Необходимый диапазон энергий может варьироваться от сотен МэВ до десятков ГэВ. При этом, как показывает опыт, требования на качество пучка и его интенсивность в будущем будут только ужесточаться, что определяет основные тенденции развития линейных ускорителей — усовершенствование источников электронов, увеличение темпа ускорения с уменьшением размеров ускорителей, улучшение качества пучка и т. д.

Для современных и будущих электрон-позитронных коллайдеров необходимы сгустки с малыми эмиттансом и энергетическим разбросом. Для их получения, как правило, необходимо уменьшать размер эмиттированного из источника пучка при сохранении (и даже увеличении) интенсивности (заряда), который должен быть на уровне нескольких нКл в одном сгустке.

Удобным источником электронов, удовлетворяющим таким требованиям, является СВЧ-фотопушка (раздел 4.3). Благодаря развитию лазерных технологий, в настоящее время становятся доступными лазеры с длительностью импульса порядка 0,1–1 пс и с энергией до 10 Дж, которые могут использоваться для получения электронных пучков с помощью фотокатодов. Для рентгеновских лазеров на свободных электронах используются фотопушки с зарядом до 1 нКл при частоте повторения сгустков до десятков кГц. Для компактных установок «университетского класса», наоборот, используют сверхкороткие сгустки с длительностью 30–100 фс, но при более скромных значениях заряда в сгустке (10–100 пКл). Тем не менее, даже с учетом доступности подобных лазерных систем, извлечение коротких электронных пучков с зарядом в несколько нКл по-прежнему является трудной задачей. СВЧ-фотопушка превращается из «классического» полутора-ячеечного резонатора в отдельную ускоряющую структуру и даже в небольшой линейный ускоритель, причем разработка таких структур идет по пути уменьшения длительности сгустка, его поперечного эмиттанса и энергетического разброса. Такая структура должна обеспечить решение сразу нескольких задач: высокий темп ускорения, удержание поперечного размера пучка, минимизация нелинейных aberrаций электромагнитного поля и т. д.

Так, например, в КЕК (Япония) было принято решение в будущем полностью отказаться от использования электронной пушки с классическим термокатодом для получения позитронов для проекта SKEKB Factory и использовать только СВЧ-фотопушку для всех режимов коллайдера. Предполагается, что будущая СВЧ-фотопушка должна обеспечивать электронные пучки интенсивностью до 5 нКл, длительностью 1,3 мм, энергетическим разбросом менее 0,1%, с вертикальным и горизонтальным эмиттансами 20 мм мрад и 50 мм мрад соответственно. Также фотоинжектор рассматривается в качестве основного варианта для лептонной версии «Будущего циклического коллайдера» (CERN Future Circular Collider).

Кроме создания адекватной ускоряющей структуры СВЧ-фотопушки, важной является технология создания фотокатода. С одной стороны, в настоящее время существует большой класс полупроводниковых фотокатодов, которые способны обеспечить высокоинтенсивные электронные пучки, но при этом обладают малым временем жизни из-за требования к вакууму системы. С другой — существуют металлические фотокатоды, которые значительно уступают полупроводниковым фотокатодом в плане квантового выхода, но обладают большим временем жизни. Исследованием и поиском фотокатода, который бы обладал достоинствами обоих типов, занимаются многие ускорительные лаборатории. Технологии такого типа по созданию фотокатодов с требуемыми параметрами необходимо развивать в России.

Наиболее часто используемыми ускоряющими структурами линейных ускорителей для научных целей в настоящее время являются структуры на основе диафрагмированного волновода с бегущим типом волны с частотой в районе 3 ГГц. Типичный темп ускорения таких структур порядка 20 МэВ/м. С увеличением конечной энергии ускорителя на таких структурах линейные размеры установки становятся чрезвычайно большими. В настоящее время ведется много исследований по увеличению темпа ускорения. Можно отметить две тенденции: увеличение рабочей частоты структуры и использование других видов ускоряющих структур, не являющимися резонансными. Также необходимо отметить постепенный отказ от использования структур на бегущей волне и переход к использованию структур на стоячей волне, в частности — бипериодических ускоряющих структур и структур с боковыми ячейками связи. В таких системах можно получить темп ускорения 20–25 МэВ/м в 3 ГГц диапазоне без использования компрессии мощности (проблема компрессии мощности по классической схеме с использованием запасающих резонаторов при работе на нагрузку на стоячей волне до настоящего времени не решена). Также в ЛУЭ на стоячей волне спектр ускоренного пучка значительно уже: 7–10% для бегущей волны и ~1% на стоячей при энергии пучка около 1 ГэВ, а сгустки — короче.

Ограничения, связанные с темпом ускорения существующих ускоряющих структур связаны, в первую очередь, с особенностями и свойствами электрического пробоя ускоряющей ячейки. Эти свойства зависят, в том числе, от рабочей частоты ускоряющего поля. При увеличении частоты можно существенно поднять темп ускорения. Так, в ИЯФ СО РАН еще в 90-х годах была разработана ускоряющая структура с частотой 14 ГГц, которая показала темп ускорения 100 МэВ/м. Структуры на бегущей волне на частоте 10, 17 и 23 ГГц разрабатывались в 1960-80-х годах в МИФИ, там же в настоящее время идут разработки структур на стоячей волне 1 см диапазона. При этом стоит отметить, что с увеличением частоты существенно уменьшаются размеры ускоряющих ячеек, но и ужесточаются требования на точность изготовления. Долгое время развитие таких структур было ограничено существующими технологиями, однако в последнее время здесь наблюдается значительный прогресс. Тем не менее, разработка структур с высоким темпом ускорения является важной технологической задачей для создания линейных ускорителей будущего.

Другой задачей, которую необходимо решить для ускоряющих структур с высокой частотой, является источник СВЧ мощности с характерной мощностью в импульсе в десятки мегаватт при длительности импульса несколько мкс.

В настоящее время наиболее широко представлены источники СВЧ мощности в районе 3 ГГц. Однако в последнее время появились промышленные источники на 5 ГГц и 12 ГГц. В ИЯФ СО РАН для ускоряющей структуры с частотой 14 ГГц был также создан клистрон на данную частоту, который, однако, дальнейшего развития не получил. Создание источника мощности для области более высоких, чем традиционные, частот, который удовлетворял бы задачам ускорительной техники — по-прежнему серьезный технологический вызов. Здесь в качестве примера имеющихся источников СВЧ мощности на частоты десятки гигагерц можно привести гиротроны, которые успешно развивает ИПФ РАН (Нижний Новгород). Однако эти генераторы не могут обеспечить необходимую частотную стабильность при их изготовлении, которая необходима для резонансных ускоряющих структур.

Одним из возможных решений генерации электромагнитной волны со сверхвысокой частотой является использование другого электронного пучка. Интенсивный электронный пучок-генератор может возбудить электромагнитную волну в резонаторе ускоряющей структуры, в которой возможно последующее ускорение рабочего пучка. Первый пучок должен обладать большой интенсивностью, но низким качеством. В этом случае возможно возбуждение резонаторов с частотой в сотни гигагерц. Так, например, в SLAC ведутся работы по созданию ускоряющих структур с частотой до 300 ГГц, которые можно будет возбуждать электронным пучком и обеспечивать темп ускорения порядка 300 МэВ/м. В ИЯФ СО РАН имеются работы, направленные на создание ускоряющей структуры с частотой в районе 100 ГГц, предназначенной для исследования в области больших градиентов ускоряющего поля. В качестве возбуждающего пучка можно использовать пучок от «классического» ускорителя с рабочей частотой около 3 ГГц.

Другой класс структур, способный обеспечить в настоящее время высокий темп ускорения — так называемые диэлектрические ускоряющие структуры (DWA). Они работают на основе возбуждения электронным пучком электромагнитной волны, но в данном случае она представляет собой излучение Вавилова-Черенкова. Сама структура является диэлектриком с центральным отверстием, помещенным внутрь проводника. Пучок пролетает в апертуре диэлектрика и возбуждает излучение Вавилова-Черенкова. В этой возбужденной электромагнитной волне возможно последующее ускорение рабочего пучка. Здесь также возможно использование в качестве драйвера пучок от «классического» линейного ускорителя. Основной решаемой задачей в настоящее время является качественный диэлектрик, способный выдержать большие напряженности электрического поля. Подобные работы интенсивно ведутся в Аргоннской национальной лаборатории.

В качестве итога можно сказать, что развитие линейных ускорителей обусловлено ужесточением требований на ускоренный пучок и увеличением

его энергии. В связи с этим нужны новые источники электронов, в первую очередь, основанные на СВЧ-фотопушках, необходимо увеличивать темп ускорения и уменьшать размеры ускорителей, а значит нужны все более высокие частоты или другие принципы ускорения. Естественно, должно быть развитие источников СВЧ мощности на более высокие частоты.

2.2. Электрон-позитронные коллайдеры

Особенности электрон-позитронных столкновений (точечные частицы, малый фон, хорошо известные начальные состояния, квантовые числа и энергия и т. д.) диктуют в качестве задач для лептонных коллайдеров проведение прецизионных экспериментов. Соответственно, с точки зрения «ускорительных» технологий, на первый план выходят не только получение больших энергии и светимости, но и формирование и сохранение пучков «высокого качества» — с малым эмиттансом и размером, высокой степенью поляризации, хорошо управляемых и контролируемых, стабильных во времени и т. д. Особенно это касается промежутка встречи и финального фокуса, формирующих пучки непосредственно перед столкновением.

Электрон-позитронные коллайдеры делятся на кольцевые и линейные (см. раздел 1.1). Энергия E *кольцевых электрон-позитронных коллайдеров* ограничена из-за сильной зависимости потерь энергии на синхротронное излучение: ультрарелятивистская частица теряет за оборот

$$\Delta E \propto (E/m)^4/R. \quad (*)$$

Для уменьшения этих потерь нужно либо увеличивать средний радиус кольца R , либо использовать лептоны с большей массой покоя m (мюоны). Самый большой работавший кольцевой электрон-позитронный коллайдер LEP (ЦЕРН) достиг энергии пучков $E = 105$ ГэВ при длине орбиты 26,7 км и пиковой светимости $1,6 \cdot 10^{31}$ см⁻²с⁻¹. Максимальная проектная светимость коллайдера следующего поколения FCC-ee, призванного заменить LHC в качестве флагманского проекта ЦЕРН, составляет $4,6 \cdot 10^{36}$ см⁻²с⁻¹ (два места встречи) при энергии столкновений 91,2 ГэВ (Z-бозон), для максимальной энергии столкновений FCC-ee 365 ГэВ (топ-антитоп кварки) светимость коллайдера несколько ниже — $3,0 \cdot 10^{34}$ см⁻²с⁻¹. Длина окружности кольца такого коллайдера — 100 км.

Линейные коллайдеры лишены синхротронного излучения; их энергия, размер и стоимость определяются темпом структуры линейного ускорителя и могут существенно превышать энергию, достижимую в кольцевых коллайдерах. Однако светимость таких установок значительно меньше, чем в циклических машинах из-за низкой частоты столкновений (единицы, десятки герц). Отмечается также малый мировой опыт проведения экспериментов на линейных электрон-позитронных коллайдерах — примером может быть только установка SLC (США).

Рассматриваются также два проекта линейных коллайдеров: International Linear Collider (ILC), для которого предоставляет территорию Япония, и Compact Linear Collider (CLIC), разрабатываемый в ЦЕРН. ILC использует сверхпроводящие ускоряющие структуры с частотой 1,3 ГГц и предельным градиентом 35 МВ/м. Максимальная энергия столкновений в ILC

$\sqrt{s} \sim 500$ ГэВ, длина коллайдера — 20 км, вертикальный размер пучка в точке встречи $\sigma_y \approx 5\text{--}8$ нм, проектная светимость — $1,8 \cdot 10^{34}$ см⁻²с⁻¹. Коллайдер CLIC основан на медной («теплой») ускоряющей структуре с частотой 12 ГГц, которая позволяет получить максимальную энергию пучка до $\sqrt{s} \sim 3$ ГэВ при длине 50 км (темп ускорения до 100 МВ/м) со светимостью $6 \cdot 10^{34}$ см⁻²с⁻¹. Требуемый для этого вертикальный размер пучков в точке встречи $\sigma_y \approx 1$ нм.

Для создания линейных электрон-позитронных коллайдеров необходимы следующие ключевые технологии:

- Получение высокого темпа ускорения пучков.
- Развитие технологий высокочастотной сверхпроводимости, необходимых для создания эффективных ускоряющих структур квазинепрерывного режима работы.
- Повышение эффективности генераторов высокочастотной мощности (включая клистроны, модуляторы и другие компоненты).
- Формирование пучков с малым эмиттансом. Для этого используются накопители-охладители с минимальным эмиттансом и коротким временем радиационного затухания. Технологии создания таких накопителей-охладителей (включая технику встроенных излучателей) во многом схожи с источниками синхротронного излучения.
- Создание прецизионных магнитных элементов, сверхпроводящих линз с большими градиентами, формирующих встречные пучки. В части разработки систем финального фокуса линейные и циклические коллайдеры схожи.
- Разработка систем контроля орбиты пучков. Активная выставка и стабилизация основных квадрупольей с точностью 1 нм и финальных 0,15 нм (>4 Гц).
- Разработка и создание различных высокоточных систем пучковой диагностики.

В настоящее время решение о строительстве обоих коллайдеров находится под вопросом, что связано, прежде всего, с тем, что на LHC не получено результатов, которые бы достоверно свидетельствовали об обнаружении «новой физики» при высоких энергиях столкновений, и, таким образом, ориентирование физической программы на сверхвысокую энергию представляется достаточно рискованным. Несмотря на многолетнее развитие проекта CLIC, 19 июня 2020 г. Совет ЦЕРН единогласно проголосовал за кольцевой коллайдер FCC-ee в качестве преемника LHC.

Между тем, независимо от перспективы экспериментальной программы линейных коллайдеров ILC и CLIC, во время работы над этими проектами были получены интересные результаты, развиты перспективные технологии, которые могут успешно использоваться в других разработках, относящихся к ускорителям заряженных частиц. Практически это относится ко всем вышеперечисленным технологическим направлениям: развитие сверхпроводящих и «теплых» ускоряющих структур с предельным темпом ускорения, разработка клистронов с высоким КПД, создание компактных, прецизионных, высокоградиентных квадрупольных линз финального фокуса, систем активного подавления сейсмических вибраций компонент

ускорителя и т. д. Сотрудничество с проектами линейных коллайдеров, доступ к результатам исследований и изучение развитых технологий были бы весьма интересны для развития ускорителей заряженных частиц в Российской Федерации.

Специализация кольцевых электрон-позитронных коллайдеров на проведение именно высокоточных экспериментов в надежде обнаружения «новой физики» не требует обязательного повышения энергии за пределы уже достигнутого, что сразу подразумевает циклопические установки, требующие объединения усилий всего мирового сообщества. Прецизионные исследования, поиск запрещенных или изучение редких мод распада, нуждаются в высокой светимости, в создании «фабрик» частиц и в реализации новых методик (поперечная поляризация частиц для точного измерения энергии, продольная поляризация для расширения исследовательской программы и т. п.). Поэтому в проектах циклических электрон-позитронных встречных пучков наблюдается большее разнообразие, чем в линейных.

Два предложения ориентированы и на высокую (но достигнутую ранее) энергию, и на высокую светимость. Это FCC-ee (ЦЕРН) и СЕРС (Китай), которые позиционируют себя, прежде всего, как «хиггс-фабрики», хотя и предполагают возможность работы в широком энергетическом диапазоне от Z-бозона до t-кварка. В Японии (КЕК) начала работу В-фабрика Super KEKB (два кольца периметром около 1,3 км, с энергиями 4 ГэВ и 7 ГэВ и максимальной проектной светимостью $8 \cdot 10^{35} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$). В ИЯФ СО РАН и Хефэйском университете технологий (Китай) разрабатываются проекты Супер Чарм-Тау Фабрик с энергией пучка в диапазоне от 1÷1,5 ГэВ до 3÷3,5 ГэВ, максимальной светимостью $1 \cdot 10^{35} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и длиной кольца 500÷800 м.

Характерной чертой всех этих машин является использование метода встречи Crab Waist, который был предложен в 2006 году для проекта итальянской SuperB-фабрики. Новый метод заключается в пересечении хорошо сформированных пучков под достаточно большим углом (десятки миллирадиан) так, чтобы длина области взаимодействия оказалась существенно меньше длины сгустка (доли миллиметра против пяти-десяти миллиметров). Тогда пучки можно сильно сжать (до значений вертикальной бета-функции встречи меньше миллиметра) и, поскольку плотность частиц в области взаимодействия резко возрастает, светимость можно поднять на 1–2 порядка по сравнению с лобовой встречей. Особенности столкновения пучков под большим углом изучали и ранее, и обнаружили, что при этом в месте встречи возникает сильная связь вертикальных и горизонтальных бетатронных колебаний, так что возникающие нелинейные резонансы связи не позволяют реализовать преимущества схемы. Взаимную модуляцию движения сталкивающихся сгустков можно убрать, если перед встречей пучки ориентировать правильным образом друг относительно друга. Для этого в методе Crab Waist было предложено использовать две секступольные линзы, размещенные в нужной бетатронной фазе по обе стороны от точки встречи. Их действие можно представить как локальную фокусировку частиц по вертикали в зависимости от их горизонтальной координаты. При этом после первого секступоля линия минимума вертикальной бета-функции (перетяжка, «талия», waist) разворачивалась, правильно

ориентированные пучки взаимодействовали, не создавая резонансов связи, а второй секступоль возвращал все в исходное состояние.

Сложность реализации схемы Crab Waist заключается в том, что суб-миллиметровая вертикальная бета-функция быстро растет вдоль орбиты, и, чтобы ее «перехватить», не допуская неприемлемых значений, необходимо разместить сильные квадрупольные линзы в непосредственной близости от точки встречи (на расстоянии $\sim 1 \div 2$ м). Мощные сверхпроводящие двух-апертурные компактные линзы финального фокуса оказываются внутри детектора, что порождает серьезные трудности в реализации интерфейса оборудования детектора и коллайдера.

Другие проблемы метода Crab Waist — ограничение динамической апертуры и энергетического акцептанса из-за «крабовых» секступольных линз, большие токи пучка (несколько ампер), необходимость получения хорошо сформированных пучков с малым эмиттансом, жесткие требования к точности и стабильности всех систем и компонентов коллайдера и т. п.

Основные технологические задачи, возникающие при создании кольцевых коллайдеров, использующих схему встречи Crab Waist:

— Разработка чрезвычайно компактных (чтобы не ограничивать телесный угол регистрации детектора) и сильных (с градиентом до 100 Т/м) квадрупольных линз финального фокуса, их криогенной системы и интеграция такого финального фокуса с детектором.

— Высокие точности изготовления и малые допустимые значения ошибок поля линз финального фокуса.

— Создание накопителя с малым эмиттансом (аналогично источникам синхротронного излучения и накопителям-охладителям линейных коллайдеров).

— Технологические проблемы, связанные с высокой интенсивностью пучков — коллективные неустойчивости, накопление электронных и ионных облаков, необходимость использования для подавления неустойчивостей сложных и дорогих систем обратной связи (как для поперечных, так и для продольных колебаний) и т. д.

— Создание вакуумных элементов с низким импедансом и специальными покрытиями (NEG для улучшения откачки, покрытий для подавления выхода вторичных электронов).

— Создание мощных высокочастотных систем с высокой степенью подавления нежелательных высокочастотных (высших) мод электромагнитного поля.

— Разработка высокопроизводительных конверсионных позитронных систем и эффективных инжекторных комплексов в целом.

— Производство электронов с высокой степенью поляризации и управление поляризацией в накопителе.

ИЯФ СО РАН, являясь одним из пионеров метода встречных пучков, глубоко погружен в проблематику современных электрон-позитронных фабрик частиц, активно разрабатывая собственную установку Супер Чарм-Тау Фабрика, а также участвуя практически во всех других проектах, включая FCC-ee, CEPC, SuperKEKB и SuperB. Все перечисленные технологии, необходимые для создания встречных циклических электрон-позитронных

пучков, в той или иной степени освоены здесь. Представляется целесообразной поддержка работ в области электрон-позитронных встречных пучков, ведущихся в ИЯФ с целью скорейшего финансирования и реализации запланированных проектов, прежде всего — Супер Чарм-Тау Фабрики, совместно с другими заинтересованными научными организациями России.

2.3. Мюонный коллайдер

По мере развития кольцевых электрон-позитронных коллайдеров очень скоро стало понятно, что их энергия ограничена потерями на синхротронное излучение, которые растут пропорционально энергии в четвёртой степени (см. раздел 2.2, формула (*) и обсуждение там же). Самый высокоэнергичный e^+e^- коллайдер LEP в ЦЕРН (1989–2000 гг.) имел максимальную энергию частиц 104,5 МэВ при периметре орбиты 26,659 км.

При переходе к более тяжелым частицам потери падают обратно пропорционально четвёртой степени их массы. Если нужен лептонный коллайдер сверхвысокой энергии, то нужно брать лептоны тяжелее электрона. Более долгоживущим из двух других лептонов — мюона и тау-лептона — является первый, имеющий массу 105,7 МэВ/ c^2 и время жизни в собственной системе 2,2 мксек. В лабораторной системе это время растёт пропорционально энергии (точнее — Лоренц-фактору γ), так что на все операции в $\mu^+\mu^-$ коллайдере при энергии частиц 1 ГэВ природа отводит примерно 22 мксек. А это не так уж и мало.

Первое предложение о мюонном коллайдере было высказано Г.И. Будкером и А.Н. Скринским (1970 г.) и позднее Д. Нейфером (1979 г.). Схема Будкера-Скринского для мюонного коллайдера практически не изменилась до сих пор. Она содержит цепочку устройств для генерации мюонов и формирования мюонного пучка: протонный синхротрон на энергию 100 ГэВ, две мишени для генерации протонами пионов π^+ и π^- с их последующей селекцией, каналы транспортировки пионов, в которых происходят распады $\pi^\pm \Rightarrow \dots \mu^\pm + \nu_\mu (\bar{\nu}_{\mu^\pm})$, мишени ионизационного («мюонного») охлаждения (раздел 4.1), линейный «многооборотный» ускоритель мюонов и коллайдер. Для формирования двух пучков μ^+ и μ^- мюонов применяется метод мюонного охлаждения.

Работы по созданию мюонного коллайдера ведутся коллаборацией MICE и находятся на стадии разработки эксперимента по исследованию мюонного охлаждения.

2.4. Индукционные ускорители электронов

Индукционные ускорители — интенсивные источники электронов в области энергии от единиц до десятков МэВ — находят применение в качестве источников жёсткого рентгеновского (тормозного) излучения в установках радиографии — неразрушающего контроля качества изделий и исследований структуры материалов. Принципиальное отличие таких ускорителей от других типов, где ускорение осуществляется статическим или ВЧ электрическим полем, — в индукционных ускорителях электроны ускоряются вихревым электрическим полем, которое сопровождает переменное

магнитное поле. Соответственно, последнее должно быть достаточно быстропеременным.

Существует два вида индукционных ускорителей — циклические и линейные. Каждый из этих видов разделяется на два подвида — «железные» и «безжелезные». В первых железные электромагниты используются для генерации и формирования импульсного магнитного поля, создающего вихревое электрическое поле, ускоряющее электроны и сопровождающее магнитное поле.

2.4.1. Циклические индукционные ускорители — бетатроны, известные с первой половины прошлого века (Д. Керст, 1940 г.), производятся в России главным образом в Томском политехническом университете с 1960-х гг. Это «железные» бетатроны, которые выпускаются серийно в пяти модификациях и отличаются небольшими размерами, высокой надёжностью и простой эксплуатации. Максимальная энергия электронов в разных типах варьируется от 4 до 10 МэВ.

Рекордная интенсивность — 3×10^{13} электронов при энергии 15 МэВ — была достигнута в 1967 г. в «железном» бетатроне со спиральным накоплением электронов, принцип действия и конструкция которого предложены Г. И. Будкером в середине 1950-х годов.

2.4.2. Безжелезные бетатроны позволяют достичь существенно более высокого уровня импульсных магнитных полей и, соответственно, энергии ускоренных электронов и фотонов их жёсткого тормозного излучения. Первые безжелезные бетатроны, отличающиеся предельно высоким уровнем импульсного магнитного поля, были созданы в СССР в конце 1940-х гг. в рамках советского атомного проекта (А. Д. Сахаров, А. И. Павловский с сотрудниками), в том числе с рекордным уровнем магнитного поля до 15 килоТесла, с использованием обжатия токнесущих проводников с помощью взрывчатого вещества. Такие бетатроны, хотя и с меньшим значением поля, используются и сегодня для радиографии во ВНИИЭФ. Достигнутые параметры позволяют эффективно «просвечивать» различные устройства.

Одна из последних разработок ВНИИЭФ — БИМ234.3000 — является базовым ускорителем в трехлучевом комплексе, позволяющем регистрировать с трех ракурсов до 9 кадров, разнесенных во времени, в одном взрывном опыте. Аналогичный двухлучевой комплекс создан во ВНИИТФ.

Основными параметрами, определяющими качество подобных источников излучения, являются:

- интенсивность излучения и размеры фокусного пятна, определяющие просвечивающую способность и пространственное разрешение;
- длительность импульса, определяющая временное и, следовательно, пространственное разрешение во взрывном опыте.

Компактный безжелезный электромагнит с большой областью устойчивости и инжектор электронов на энергию 2 МэВ обеспечивают ускорение в бетатроне пучка электронов с током 200 А до энергии 70 МэВ. Система быстрого сброса пучка на внутреннюю мишень позволяет формировать

до трех пиков тормозного излучения с длительностью пиков порядка 100 нс и интегральной интенсивностью до 60 Р/м. Размеры фокусного пятна определяются размерами мишени и могут быть оптимизированы под конкретный опыт. В отличие от ЛИУ здесь мишень не разрушается электронным пучком.

Продолжающиеся работы по совершенствованию этой базовой установки имеют целью увеличение дозы, сокращение размеров фокусного пятна и длительности импульсов излучения, увеличения количества (сейчас 3) импульсов, генерируемых в одном ускорительном цикле.

Создан компактный вариант безжелезного бетатрона для оснащения мобильных комплексов. Им же предполагается оснащать проектируемые комплексы, в том числе и многоакурсную (до 12) систему для формирования трехмерных изображений исследуемого объекта

2.4.3. Линейные индукционные ускорители работают в «однопролётном» режиме и, как и безжелезные циклические, имеют низкую частоту повторения.

Технология безжелезных линейных индукционных ускорителей (ЛИУ) электронов непрерывно развивается в течение более полувека во РФЯЦ ВНИИЭФ. В конструкции таких ускорителей, в отличие от их классических «железных» собратьев, отсутствуют массивные ферромагнитные сердечники. Формирование высоковольтных импульсов ускоряющего напряжения обеспечивается индукторами, в большинстве случаев выполненными на основе радиальных или коаксиальных линий с распределенными параметрами. В качестве изолирующей среды в линиях обычно используется деионизованная, дегазованная и очищенная от механических примесей вода с удельным электрическим сопротивлением не менее 5 Мом/см.

В исходном состоянии формирующие линии индукторов заряжаются от генераторов Аркадьева-Маркса импульсом напряжения амплитудой в несколько сот киловольт за время не более 1,0–1,5 микросекунд. При достижении максимального напряжения зарядки производится управляемая многоканальная коммутация линии группой искровых разрядников, азимутально-симметрично встроенных в ее конструкцию. В результате иницированного таким образом переходного волнового процесса на выходе формирующей линии индуктора, в его приосевой вакуумируемой области, генерируется цуг разнополярных импульсов напряжения амплитудой от нескольких сот киловольт до единиц мегавольт с длительностью, кратной времени пробега электромагнитной волны по линии. Для ускорения электронного пучка используется первый или второй сформированный индуктором импульс напряжения, как правило, с более высокой по отношению к другому амплитудой.

Ускоряющая система ЛИУ образуется несколькими десятками или сотнями однотипных последовательно соединенных индукторов, включаемых по строго определенной временной программе синхронно с пролетом электронного пучка вдоль ускорительного тракта. В инжекторах безжелезных ЛИУ обычно используется бесфольговый магнитоизолированный диод с взрывоэмиссионным катодом, что позволяет сформировать

и инжектировать в ускорительный тракт пучок электронов с амплитудой импульса тока в десятки и даже сотни килоампер. Формирование, ускорение и транспортировка пучка до мишени или выводного устройства происходит в продольном магнитном поле с индукцией 0,5–2 Тесла, компенсирующем поперечное расталкивание электронов пучка за счет собственных кулоновских сил.

В настоящее время в России функционируют четыре безжелезных линейных индукционных ускорителя (все — разработки ВНИИЭФ): ЛИУ-10, ЛИУ-30, ЛИУ-10М и ЛИУ-Р-Т. Первые три используются в качестве облучательных установок для исследований в области радиационной физики и испытаний различных объектов на стойкость к воздействию коротких (10–20 наносекунд) импульсов тормозного излучения. Последний предназначен для импульсной радиографии быстропротекающих (взрывных) процессов.

Ускоритель ЛИУ-10, созданный в 1977 году, является первым в мире сильноточным линейным индукционным ускорителем с индукторами на основе водоизолированных радиальных линий с распределенными параметрами. Он рассчитан на энергию ускорения 14 МэВ, ток пучка — 40 кА, длительность токового импульса — 20 нс. Его ускоряющая система состоит из 16 последовательно соединенных модулей (первые четыре — инжекторные), вклад каждого в энергию ускорения электронов ~ 1 МэВ. Каждый модуль включает в себя блок из трех индукторов (ускорительную секцию), генератор импульсных напряжений для их зарядки и генератор синхронизации, формирующий импульсы запуска коммутаторов ускорительных секций. Модули автономны как по конструкции, так и по электрической схеме. При последовательном соединении блоков образуется единый вакуумный ускорительный тракт с продольным магнитным полем 0,5 Тл. Габариты установки: длина — 8 м, ширина — 4 м, высота — 2,2 м. Ускоритель ЛИУ-10 эксплуатировался во ВНИИЭФ до 1992 года, когда он был заменен на более мощную установку ЛИУ-10М. Второй экземпляр ускорителя ЛИУ-10 функционирует в НИИП с 1980 года по настоящее время.

Ускоритель ЛИУ-30, введенный в эксплуатацию в 1988 году, позволяет получать рекордную для установок своего класса энергию ускоренных электронов до 40 МэВ при токе пучка ~ 100 кА в импульсе длительностью ~ 20 нс и является одним из наиболее мощных в мире источников коротких импульсов тормозного излучения (ТИ). Ускоряющая система ЛИУ-30 в настоящее время выполнена в виде 32-модульной структуры с автономным питанием и управлением каждого модуля. Помимо неё, в конструкцию ускорителя входят тракт транспортировки и выводное устройство с мишенью для генерации ТИ, либо с фольговым окном для вывода электронного пучка в атмосферу. Длина ускоряющей системы ~ 23 м, вместе с трактом транспортировки и выводным устройством ~ 30 м, ширина ~ 9,5 м, высота ~ 4 м. Каждый модуль ускорительного тракта содержит один блок диаметром около 2 м и длиной 0,6 м, состоящий из четырех индукторов на радиальных линиях с водяной изоляцией, имеющих общую ускорительную трубку. Зарядка индукторов ускоряющей системы осуществляется от 64 генераторов Аркадьева-Маркса с суммарным энергозпасом ~ 1,5 МДж. Для коммутации всех радиальных линий используется 2048 разрядников, включаемых

с наносекундной точностью по задаваемой временной программе. Пучок электронов транспортируется в продольном магнитном поле с индукцией $\sim 0,8$ Тл, источником энергии для создания которого служит конденсаторная батарея емкостью ~ 6 МДж. Наряду с типовым режимом генерации одиночных высокоинтенсивных импульсов ТИ, ускоритель ЛИУ-30 обеспечивает также режим генерирования двух последовательных импульсов тормозного излучения в одном цикле срабатывания с регулируемыми граничными энергиями (их сумма ~ 40 МэВ) и интервалом между импульсами $0,2\text{--}2$ нс. Путем изменения временной программы включения индукторов в ускоряющей системе варьируются формы и длительности импульсов тормозного излучения, в частности, возможно получение короткого (~ 7 нс) импульса ТИ с фронтом 3 нс.

Ускоритель ЛИУ-10М (энергия электронов ~ 25 МэВ, ток пучка — $20\text{--}50$ кА, длительность токового импульса — 25 нс) создан в 1992 году и, после опытной отработки, запущен в эксплуатацию в 1994 году. Он построен на основе новой в то время технологии формирования высоковольтных импульсов с использованием многокаскадных ступенчатых линий с распределенными параметрами, активно развивающейся во ВНИИЭФ с начала 80-х годов прошлого столетия. Применение таких линий в конструкции безжелезных ЛИУ позволило в несколько раз повысить выходное напряжение их индукторов по сравнению с использованием для этой цели модифицированной одиночной формирующей линии (ОФЛ), как это было реализовано в ускорителях ЛИУ-10 и ЛИУ-30. Ускоряющая система ЛИУ-10М состоит из инжектора, 16 типовых ускорительных модулей и тракта транспортировки электронного пучка длиной 4 м с выводным устройством и мишенным узлом для генерации импульса тормозного излучения. Размеры ускоряющей системы с инжектором (без тракта транспортировки) — $12 \times 3,5 \times 2,4$ м³. Ускорение и транспортировка пучка осуществляется в импульсном магнитном поле $0,5$ Тл. Инжектор мономодульный, выполненный на базе пятакаскадной двухступенчатой формирующей линии (ДСФЛ), обеспечивает формирование пучка электронов с энергией около 3 МэВ и током до 50 кА в импульсе с регулируемой длительностью $20\text{--}40$ нс. Каждый ускорительный модуль состоит из индуктора с формирующей системой на основе четырехкаскадной ДСФЛ и питающего его генератора Аркадьева-Маркса. Выходное напряжение индуктора в режиме холостого хода составляет примерно 2 МВ в импульсе длительностью порядка 25 нс. Запуск разрядников формирующих линий производится девятью генераторами синхронизации (по одному на каждую пару индукторов и один на инжектор).

Одной из недавних разработок ВНИИЭФ в области сильноточных безжелезных ЛИУ является линейный индукционный ускоритель ЛИУ-Р-Т, запущенный в работу в конце 2015 года. Ускоритель генерирует одиночные импульсы тормозного излучения высокой интенсивности с малым фокусным пятном на мишени и предназначен для применения в импульсной радиографии быстротекущих процессов. Он включает в свой состав инжектор ($V = 3$ МэВ, $I = 20$ кА, $t_{\text{имп}} = 60$ нс), шесть типовых ускорительных модулей ($V = 1,5$ МэВ, $t_{\text{имп}} = 70$ нс), тракт транспортировки электронного пучка ($B_z = 2$ Тл), фокусирующее устройство ($B_z = 32$ Тл) с мишенным

узлом, высоковольтную систему синхронизации, батарею магнитного поля ($W = 4$ МДж), систему высоковольтной зарядки, технологическое и вспомогательное оборудование. Габаритные размеры ускоряющей системы составляют $18 \times 2,2 \times 2,4$ м³. Как и в случае ЛИУ-10М, инжектор и индукторы ЛИУ-Р-Т созданы на основе ступенчатых формирующих линий с распределенными параметрами. Это позволило вдвое повысить темп ускорения и увеличить в 5–10 раз ток электронного пучка по сравнению с наиболее мощными зарубежными рентгенографическими установками (DARHT, AIRIX, Dragon), выполненными по схеме классических ЛИУ с индукторами на ферромагнитных сердечниках. Максимальная энергия электронов в ускорителе ЛИУ-Р-Т составляет 12 МэВ, ток пучка ~ от 5 до 20 кА (регулируется), длительность токового импульса ~ 60 нс, длительность импульса тормозного излучения ~ 50 нс, диаметр фокусного пятна источника ТИ на мишени ~ от 2,5 до 5 мм в зависимости от режимов инжекции и фокусировки. По дозовым параметрам ускоритель ЛИУ-Р-Т на порядок превосходит аналогичные отечественные установки для импульсной радиографии и сопоставим с лучшими зарубежными установками подобного класса. Благодаря характерной для ЛИУ модульной конструкции, дозовые и энергетические параметры ускорителя, в случае необходимости, могут быть значительно повышены путем добавления индукторов в состав его ускоряющей системы.

Комплекс малоракурсной томографии для импульсной радиографии плотных объектов на основе ЛИУ оригинальной конструкции разработан и введён в действие ИЯФ СО РАН совместно с РФЯЦ ВНИИТФ. Энергия электронов — 20 МэВ, ток — 2 кА при длительности импульса до 360 нс. Ускоритель состоит из инжектора и ускоряющих модулей. Пучок формируется в пушке со сферическим катодом и ускоряется в инжекторе до энергии 2 МэВ. Сформированный пучок инжектируется в ускоритель, состоящий из последовательности ускорительных модулей. В каждом модуле при помощи суммирования напряжений на индукторах из аморфного железа создается ускоряющее напряжение свыше 300 кэВ.

Для транспортировки пучка в ускорителе применяются соленоидальные магнитные линзы. Ускоренный пучок будет распределяться кикерами между девятью транспортными каналами. Каждый канал будет снабжен мишенью, конвертирующей пучок в поток гамма-излучения, направленного на исследуемый объект. Теневые изображения объектов будут регистрироваться детекторными станциями, расположенными напротив каждой мишени. В один из каналов системы разводки будут направляться три последовательных импульса с регулируемой задержкой, что позволит регистрировать последовательность изображений в этом ракурсе.

В настоящий момент созданы и смонтированы инжектор, ускоритель, прямой канал системы разводки и детекторная станция. Изготовлен и готов к монтажу опытный отклоняющий канал системы разводки пучка. Как известно, пучок в таких ускорителях подвержен поперечной кумулятивной неустойчивости (Beam Break-Up instability, ВВU) связанной с раскачкой дипольных мод в ускоряющих модулях, поэтому особое внимание уделялось устойчивости пучка. Для её обеспечения применяются несколько

технических решений: ускорительные трубки снабжены электродами специальной формы, снижающими коэффициент связи дипольных мод модуля с пучком. Кроме того, в конструкцию модулей внесены поглотители на основе резистивных и феррит-содержащих материалов, уменьшающие добротность колебаний. Для обеспечения проводки пучка в оптимальных режимах, позволяющих сохранить его эмиттанс, были разработаны специальные вычислительные модели. В ходе работ по настройке ускорителя эти программы были проверены и откалиброваны при помощи диагностических средств ускорителя. Это позволило продемонстрировать ускорение устойчивого пучка с током 2 кА до проектной энергии электронов 20 МэВ.

Глава 3. Источники синхротронного излучения и лазеры на свободных электронах (ЛСЭ)

3.1. Циклические источники синхротронного излучения

3.1.1. Источники СИ четвертого поколения

Циклический источник синхротронного излучения (СИ) — это накопитель интенсивных пучков релятивистских электронов, которые, двигаясь в поперечном магнитном поле, генерируют мощное электромагнитное излучение в широком диапазоне длин волн (от ультрафиолета до жесткого рентгена), используемое для исследований в самых разных дисциплинах: химии, биологии, материаловедении, геологии и т. п. В мире работает несколько десятков источников СИ; развитые страны (США, Япония, Европа) имеют по несколько таких установок.

Основной мерой эффективности источников СИ является яркость — плотность потока фотонов в фазовом пространстве источника в единицу времени. Поскольку в большинстве экспериментов используют узкую область длин волн $\Delta\lambda$, более удобным является понятие спектральной яркости

$$B \propto \frac{F(\lambda)}{\sum_x \sum_{x'} \sum_y \sum_{y'} (\Delta\lambda/\lambda)}$$

где F — поток фотонов в единицу времени, а $\sum_{x,y}$ и $\sum_{x',y'}$ — пространственный и угловой эффективные размеры источника, в которых, вообще говоря, необходимо учитывать вклад как электронного, так и фотонного пучков (предполагается нормальное распределение частиц по координатам)

$$\sum_{x,y}^2 = \sigma_{x,y}^2 + \sigma_r^2, \quad \sum_{x',y'}^2 = \sigma_{x',y'}^2 + \sigma_{r'}^2,$$

поскольку из-за волновой природы излучения фазовый объем точечного источника не равен нулю. Если в качестве излучателя использовать ондулятор длиной L_u , то радиационные размеры (пространственный и угловой) излучения одного электрона равны

$$\sigma_r = \frac{1}{4\pi} \sqrt{2\lambda L_u}, \quad \sigma_r' = \sqrt{\lambda L_u},$$

а «дифракционный» фотонный эмиттанс

$$\varepsilon_r = \sigma_r \sigma_{r'} = \frac{\lambda}{4\pi}.$$

Если фазовые эллипсы электронного и фотонного пучков согласованы, то

$$B \propto \frac{1}{(\varepsilon_x + \varepsilon_r) (\varepsilon_y + \varepsilon_r)}.$$

В зависимости от эмиттанса электронного пучка источники СИ принято делить на поколения:

— *Первое поколение* — накопители и синхротроны, «доставшиеся в наследство» от физики частиц с характерным эмиттансом $\sim 300 \div 500$ нм.

— *Второе поколение* — накопители, предназначенные для исследований на СИ, с эмиттансом $\sim 50 \div 100$ нм.

— *Третье поколение* — самое многочисленное — высокоспециализированные установки с эмиттансом $\sim 1 \div 10$ нм.

— *Четвертое поколение* — источники СИ с эмиттансом (значительно) меньше 1 нм.

У первых трех поколений $\varepsilon_x \gg \varepsilon_r$. Для четвертого поколения это не так. Для востребованной области энергии фотонов $\varepsilon_y = 1 \div 10$ кэВ ($\lambda = 12.4 \div 1.24$ Å) фотонный эмиттанс $\varepsilon_r \approx 100 \div 10$ пм сравним с электронным (вертикальный эмиттанс, определяемый связью бетатронных колебаний $\varepsilon_y \approx 0.01 \div 0.001 \varepsilon_x$ сравнивается с дифракционным уже у источников СИ третьего поколения).

Считается, что нет смысла уменьшать горизонтальный эмиттанс ниже ε_r : яркость растет медленно, а сложности и затраты существенно увеличиваются. Такие установки с $\varepsilon_{x,y} \approx \varepsilon_r$ называются «источники СИ с дифракционно-ограниченным эмиттансом», они вполне могут быть отнесены к поколению 4+ (подразумевается, что длина волны излучения, для которой определяется фотонный эмиттанс, активно используется для исследований).

Предельно малый эмиттанс позволяет получить излучение с высокой степенью пространственной когерентности, которая для пучка из ондулятора определяется как

$$\zeta = \frac{\varepsilon_x^2}{\sum_x \sum_{x'} \sum_y \sum_{y'}}.$$

Пучок СИ с высокой степенью пространственной когерентности позволяет расширить экспериментальные возможности источника.

Сейчас в мире работает один источник СИ четвертого поколения — MAX-IV (Швеция), еще два — ESRF-EBS (Франция) и Sirius (Бразилия) — запущены и находятся на стадии получения проектных параметров.

В России эксперименты с синхротронным излучением ведутся в НИЦ «Курчатовский институт» на источнике второго поколения КИСИ, основу которого составляет накопитель электронов «Сибирь-2» с энергией 2,5 ГэВ и эмиттансом $\varepsilon_x \approx 90$ нм, и в ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН на двух накопительных кольцах ВЭПП-3 и ВЭПП-4М, которые в основном используются для исследований по физике элементарных частиц (первое поколение). В Новосибирске идет создание нового источника СИ 4-го поколения СКИФ («Сибирский Кольцевой Источник Фотонов») с энергией пучка 3 ГэВ, периметром 476 м, натуральным эмиттансом $\varepsilon_x = 75$ пм, рассчитанным на работу с максимальным током до 400 мА в многосуступочном режиме.

3.1.2. Проблемы современных источников СИ

Очевидно, что создание крупных ускорительных комплексов с беспрецедентными параметрами сопряжено с большим числом проблем физического

и технического характеров. Кратко опишем основные, относящиеся к источникам СИ четвертого поколения.

Уменьшение эмиттанса пучка в накопителе (релятивистских) электронов неизбежно связано с увеличением жесткости фокусировки магнитной структуры, ростом градиента квадрупольных линз (до $B' \sim 100$ Т/м), натурального хроматизма и, соответственно, градиентов секступольных линз (до $B'' \sim 3000 \div 5000$ Т/м²), которые этот хроматизм компенсируют. Можно показать, что при фиксированном периметре кольца (что равносильно фиксированному бюджету проекта) интегральная сила квадрупольных и секступольных линз растёт как

$$(K1l) \propto \varepsilon_x^{-1/3}, (K2l) \propto \varepsilon_x^{-1}.$$

Для получения требуемых градиентов апертура магнитов в современных источниках СИ делается существенно меньше, чем для предыдущих поколений ($\varnothing \sim 20 \div 30$ мм), что стало возможным сравнительно недавно, когда широко распространились технологии получения высокого вакуума в узких вакуумных камерах с помощью нераспыляемых газопоглощающих покрытий (геттеры, NEG). Другая техническая проблема, связанная с малоапертурными магнитами — повышенная точность их изготовления и взаимного позиционирования ($\sim 10 \div 20$ мкм). Вообще, источник СИ четвертого поколения — «дитя высоких ускорительных технологий»: тщательного и детального моделирования движения частиц с учетом большого числа эффектов (неточностей изготовления и выставки магнитов, внутрисгусткового рассеяния, пространственного заряда пучка и т. д.), прецизионного изготовления всех компонентов, субмикронного измерения орбиты пучка, использования сложных современных алгоритмов коррекции замкнутой орбиты и оптики и т. п.

Сильные секступольные линзы создают основную «динамическую» проблему разработки источников СИ четвертого поколения: область устойчивого движения частиц — (шестимерная) динамическая апертура — резко сужается. Уменьшение энергетической (продольной) апертуры в условиях сильного внутрисгусткового кулоновского взаимодействия электронов (ультра релятивистский вариант внутripучкового рассеяния — *эффект Тушека*) приводит к уменьшению времени жизни пучка. Характерные требуемые величины $(\Delta E/E)_{max} \geq 3\%$. Уменьшение горизонтальной динамической апертуры ($A_x \leq 6 \div 8$ мм с учетом всех факторов, включая линейные и нелинейные погрешности магнитного поля) затрудняет инжекцию пучка. Получение адекватной динамической апертуры — одна из наиболее важных и трудных задач для создания современных источников СИ. Для ее решения используются как теоретические методы исследования нелинейных динамических систем, так и численная многофакторная оптимизация, когда один цикл расчетов может занимать дни и недели. Для управления динамической апертурой зачастую на кольце размещают дополнительные мультипольные магниты (секступоли, октуполи), которые купируют негативное воздействие сильных хроматических секступольных линз.

Эффект Тушека тем сильнее, чем меньше объем сгустка и энергетическая апертура. И даже если последняя достаточна для обеспечения приемлемого времени жизни частиц, рассеяние на малые углы (*многократный*

эффект Тушека) приводит к росту эмиттанса пучка так, что фазовый объем пучка при номинальном токе может существенно превышать тот естественный (натуральный) эмиттанс (при нулевой токе и связи поперечных колебаний), который приводится в качестве номинального параметра. Для борьбы с внутрисгустковым рассеянием (процессом, «греющим» пучок) можно применять дополнительное радиационное «охлаждение» путем постановки в прямолинейные промежутки периодических магнитных структур (вигглеров или змеек), как правило, сверхпроводящих. Платой за это является возмущение оптики и динамики пучка, вносимое магнитным полем вигглера.

Вставные устройства (*insertion devices*) — вигглеры и (особенно) ондуляторы — используются в качестве источников интенсивного и яркого излучения, а также как инструменты для дополнительного уменьшения эмиттанса (вигглеры-затухатели). Правильным подбором параметров вставного устройства и оптики кольца можно совместить в одном устройстве функции излучателя и затухателя, однако должны быть предусмотрены средства, которые позволяют компенсировать ухудшение характеристик накопителя из-за возмущения, вносимого полем вставных устройств.

3.1.3. Современные источники СИ в России

Современный источник синхротронного излучения — это мультидисциплинарный многопользовательский аналитический и технологический прибор, предоставляющий экспериментальные возможности десятков исследовательских станций сотням и тысячам ученым из многих областей науки, промышленности, медицины. Соответственно, индустриально развитые регионы мира (Европа, США, Китай, Япония) имеют по несколько источников СИ, которые работают в режиме «нон-стоп» круглосуточно и почти круглогодично.

В России создается Центр коллективного пользования (ЦКП) «СКИФ» — источник СИ поколения 4+ с длиной орбиты 476 м, энергией пучка 3 ГэВ и натуральным эмиттансом 75 пм. Моделирование показывает, что с учетом внутripучкового рассеяния, вигглеров-затухателей и правильно подобранного коэффициента бетатронной связи, можно получить эмиттансы $\epsilon_{x,y} \approx 40 — 60$ пм, что близко к дифракционному пределу для востребованного диапазона длин волн излучения $\lambda \approx 10$ Å. Выбор места строительства «СКИФа» — наукоград Кольцово — представляется весьма удачным. В 10 км от нового исследовательского центра находится СО РАН с его десятками институтов различного профиля. В 20 км — г. Новосибирск с развитой промышленностью и международным аэропортом. В непосредственной близости от ЦКП «СКИФ» размещаются Бизнес-инкубатор и Биотехнопарк Кольцово, а также ГНЦ Вирусологии и Биотехнологии «Вектор», который уже создает специализированную экспериментальную станцию на источнике СИ.

Для страны со столь большой территорией, как Россия, одного современного источника излучения, очевидно, недостаточно. Как минимум необходимы установки в центральном регионе (Москва) и дальневосточном регионе (Владивосток).

В европейской части России существует обширное научное сообщество, способное и готовое использовать современный источник синхротронного излучения. Соответственно, здесь планируется создание установки (под эгидой НИЦ «Курчатовский институт») с энергией 6 ГэВ, периметром 1200–1500 м и малым, близким к дифракционному, эмиттансом. Большая энергия позволяет эффективно использовать интенсивные и яркие потоки фотонов с энергией до 100–200 кэВ, а большой размер кольца позволяет организовать много прямолинейных промежутков для постановки вигглеров и ондуляторов. Выбор такого источника выглядит целесообразным. Единственное замечание может быть по выбору оптимального значения энергии.

Деление источников СИ на «низкоэнергичные» (1,5–3 ГэВ) и «высокоэнергичные» (6–8 ГэВ) произошло в 90-х годах прошлого столетия. Первые предназначались для работы с мягким рентгеновским излучением, а вторые, соответственно, с жестким. Такое деление было связано, прежде всего, с ограничениями по созданию ондуляторов — основных источников СИ третьего и четвертого поколений — с малым периодом и большим полем. За прошедшие десятилетия технологии производства таких ондуляторов (в т. ч., сверхпроводящих) существенно были развиты, и, соответственно, жесткая область спектра рентгеновского излучения стала доступной для накопителей с меньшей энергией. Поэтому в профессиональных кругах имеет место дискуссия об универсальном (где можно работать и в мягкой, и в жесткой областях) источнике СИ с энергией пучка около 4,5 ГэВ. Поскольку электронный эмиттанс квадратично растет с энергий, такая машина позволяет достичь меньшего эмиттанса при меньшем периметре, что делает весь проект более дешёвым и привлекательным.

Во Владивостоке предполагается создать уникальную научную установку на о. Русский (Русский Источник Фотонов, УНУ «РИФ»). Целью создания УНУ «РИФ» является получение принципиально новых результатов и развития технологий для большинства отраслей экономики Дальнего Востока. Создание УНУ «РИФ» позволит решить ряд приоритетных научно-технологических задачи, которые обусловлены актуальной повесткой развития Дальневосточного региона.

Для того чтобы УНУ «РИФ» стала содержательным инфраструктурным ядром, ориентированным на региональные университеты, научные институты и промышленные предприятия, необходимо, в первую очередь, ориентироваться на исследования, направленные на решение проблем глобальной повестки и находящиеся в русле стратегии развития России с четкой привязкой к программам развития Дальнего Востока.

В то же время, во Владивостоке нет большого и сильного сообщества пользователей СИ, но есть Дальневосточный федеральный университет, поэтому к функционалу источника СИ (проведение экспериментов) здесь добавляются задачи роста и формирования сообщества пользователей, включая обучение студентов в области физики и техники ускорителей, синхротронного и рентгеновского излучения, рентгеновской оптики и других специальностей, востребованных для исследований на СИ. Поэтому сам ускорительный комплекс должен быть современным, простым и надежным,

пусть не с рекордными параметрами, но не требующим сильной «ускорительной» школы, которая пока отсутствует.

В этой связи рассматриваемый в настоящее время план переноса во Владивосток на о. Русский оборудования систем и узлов источника СИ второго поколения КИСИ из НИЦ «Курчатовский институт» не выглядит целесообразным по следующим основным причинам:

1. Источник СИ второго поколения КИСИ разрабатывался в конце 80-х годов прошлого века и работает в НИЦ «Курчатовский институт» более 20 лет. Соответственно, его параметры далеки от современных источников СИ, уже активно используемых в Азиатско-Тихоокеанском регионе.

2. Планируемая экономия средств минимальна (если вообще существует). Стоимость ускорительного комплекса источника СИ составляет около трети от полной (остальные две трети приходятся на строительную и научную инфраструктуры), однако потребуются поменять на современное все электрическое оборудование, включая источники питания, высокочастотные генераторы, электронику управления и контроля, диагностическое оборудование и т. п. Оставшееся оборудование — магниты, вакуумные камеры и пр. — составят приблизительно 10% от общей цены проекта.

3. Даже это оборудование, более 20 лет отработавшее в НИЦ КИ, не является надежным ввиду возможных процессов коррозии, растрескивания эпоксидной смолы изоляции магнитов, деградации конструкций из пластмассы и т. п. дефектов, возникающих в ходе длительной эксплуатации.

Таким образом, риск того, что перевезенное на о. Русский оборудование будет трудно запустить, а работать оно будет ненадежно, весьма велик.

В качестве альтернативы целесообразно рассмотреть разработку и создание современного, небольшого источника СИ с применением наиболее продвинутых достижений ускорительных технологий. При этом необходимо использовать опыт ИЯФ СО РАН, накопленный при реализации проекта «СКИФ».

3.2. Компактные источники излучения для университетов и научных центров

В последние годы появился новый класс установок — компактные ускорители электронов на относительно низкие энергии, т. н. ускорители университетского класса («University class facilities»). Обычно это достаточно компактные установки, не требующие крупномасштабных строительных работ, инженерной инфраструктуры и массивной физической защиты. Установки позволяют в широких пределах регулировать параметры, в первую очередь, энергию и ток ускоренных частиц, и имеют несколько каналов вывода пучка с размещенными на них исследовательскими стендами. University class ускорители электронов используются как источники монохроматического излучения (Compact-XFEL, Комптоновские/Томсоновские источники, ТГц источники и т. д.). На таких источниках можно проводить большой объём самостоятельных исследований (биология, биомедицинские технологии, материаловедение и т. д.), не требующих больших средних потоков фотонов, но требующих прецизионных параметров пучка. На таких

источниках можно (и нужно!) подготавливать и калибровать эксперименты, которые затем будут проводиться на источниках СИ и ОИ, и готовить кадры для работы на «больших» источниках.

3.3. ЛСЭ экстремального ультрафиолетового диапазона и широкодиапазонный источник рентгеновского излучения на основе электронного накопителя с энергией 1,5 ГэВ для крупных исследовательских университетов

Источники рентгеновского излучения используются во многих областях науки и медицины. Для большинства пользователей требуется достаточная для их задач интенсивность излучения в заданном диапазоне длин волн на образце или входном окне экспериментальной станции. Кроме того, обычно требуется малая угловая расходимость излучения в каждой точке образца (равная поперечному размеру источника излучения, делённому на расстояние от источника до образца). Поэтому хороший источник излучения не только должен быть достаточно мощным, но и иметь малые поперечные размеры. В этом случае говорят, что источник имеет высокую *яркость*, которая определяется как мощность излучения, делённая на площадь (источника или коллимирующего отверстия) и на телесный угол, в котором идут лучи. Сейчас наиболее яркими лабораторными источниками рентгеновского излучения являются пучки электронов высокой энергии, проходящие через сильное поперечное магнитное поле и испускающие т. н. синхротронное излучение (СИ), а также лазеры на свободных электронах. Для создания таких источников может быть использован электронный пучок с малыми (порядка 0,1 мм) поперечными размерами, циркулирующий на электронном синхротроне-накопителе. Ниже описан возможный вариант такого накопителя.

С учётом того, что планируемые сейчас источники СИ будут работать через 10–20 лет, желательно существенно изменить (улучшить) их по сравнению с существующими. Это возможно, если применять новые технические решения и технологии. Кроме того, для источника излучения, ориентированного на работу с исследовательским университетом, т. е. на эксперименты в очень разных областях науки и медицины, необходимо обеспечить возможность получения фотонов с различными энергиями — от вакуумного ультрафиолета (5 эВ) до жёсткого рентгена (50 кэВ) и одновременной работы многих пользователей на соответствующих экспериментальных станциях. Сейчас в мире работает много (в России — всего 3) источников рентгеновского излучения, использующих электронные накопители. Предлагаемый проект имеет пять существенных отличий, которые позволят сделать установку с уникальными параметрами и возможностями для проведения экспериментов с использованием излучения и тем самым вернуть России лидерство в этой области техники.

1. Наиболее яркими источниками рентгеновского излучения являются лазеры на свободных электронах. Лазер на свободных электронах (ЛСЭ) на предлагаемом накопителе позволит получать когерентное с длиной волны порядка 10 нм и средней мощностью порядка 100 Вт. По-видимому,

возможно получение излучения с относительной спектральной шириной порядка 10–4 и меньше. Сейчас рентгеновских ЛСЭ с такими параметрами и аналогичных проектов нет. ЛСЭ будет единственным в мире ЛСЭ в экстремальном ультрафиолетовом диапазоне на электронном накопителе.

2. Современные сверхпроводящие магниты позволяют получать магнитные поля 20 Т и более. Однако для того, чтобы излучение в таком магните не приводило к росту поперечного размера электронного пучка, следует создавать такое высокое поле на минимально возможной длине. Для этого в проекте используются магниты с полем 10 Т и эффективной длиной менее 0,1 м. При энергии электронов 1,5 ГэВ критическая энергия фотонов СИ в поле 10 Т составляет 15 кэВ. Это значит, что на таком источнике можно получать значительные потоки фотонов с энергиями вплоть до 50 кэВ, что достаточно для большинства из современных методик использования СИ. Конструкция магнитной системы накопителя обеспечивает малые (менее 0,1 мм) размеры электронного пучка в магнитах-излучателях.

3. Для достижения стабильности положения источника (т. е. электронного пучка) в магнитной системе накопителя не используются стандартные нормально проводящие электромагниты с железными сердечниками. Вместо них применяются постоянные магниты и несколько сверхпроводящих магнитов с источником стабилизированного питания. Это исключает зависимость положения пучка от нестабильности электрической сети и вибраций, вызванных течением воды в обмотках электромагнитов. Кроме того, использование постоянных магнитов позволяет увеличить апертуру вакуумной камеры, что значительно упрощает вакуумную систему накопителя (не надо заботиться о гладкости, простые приёмники СИ и откачка вблизи них, простые стыки отдельных кусков) и систему инжекции (можно установить инфлектор в квадрупольной линзе, увеличив поперечный акцептанс, что облегчает многократную инжекцию), а также повышает пороговые токи неустойчивостей.

4. Для получения большого пикового и среднего токов электронного пучка предполагается применить низкочастотную ускоряющую систему с первой и третьей гармониками (например, 30 МГц и 90 МГц). Это увеличит длину электронных сгустков, что позволит сузить спектральную ширину линии излучения ЛСЭ, подавить внутривидовое рассеяние (эффект Тушека) и повысить пороговые токи неустойчивостей (продольных, ТМС и др.).

5. В качестве ондулятора ЛСЭ и ондуляторов, расположенных в малых прямолинейных промежутках, будут использованы недавно разработанные и испытанные в ИЯФ СО РАН ондуляторы с переменным периодом. По сравнению со стандартными ондуляторами с переменной амплитудой поля они обеспечивают больший диапазон перестройки длины волны излучения.

Накопитель и пользовательские станции могут быть размещены в одном стандартном четырёхпролётном промышленном здании с размерами 100 м × 200 м. В одном из длинных прямолинейных промежутков располагается ондулятор ЛСЭ длиной около 20 м. Два коротких (около 3 м) ондулятора (2) дают излучение в диапазоне длин волн 2–40 нм (30–600 эВ).

Сверхпроводящие магниты (3) с полем 10 Т и 5 Т дают излучение с критическими энергиями 15 и 7,5 кэВ соответственно. Критические энергии излучения из поворотных магнитов с радиусами поворота 3,5 м и 12,5 м — 2,1 кэВ и 0,6 кэВ. Кроме того, в одном из длинных промежутков накопителя устанавливается многополюсный вигглер с горизонтальным полем 5 Т, который служит для увеличения мощности ЛСЭ, уменьшения горизонтального эмиттанса и увеличения вертикального эмиттанса. Каждый пользователь может выбрать канал вывода излучения с оптимальным для его экспериментов спектром. В короткие промежутки могут быть установлены ондуляторы с изменяемой поляризацией излучения и вигглеры. Инжектор-синхротрон размещается внутри накопителя.

Широкий диапазон доступных для пользователей параметров излучения, малая потребляемая мощность (из-за использования постоянных магнитов) и относительно низкая стоимость (из-за использования стандартного промышленного здания, постоянных магнитов и низкой энергии электронов) делают перспективным строительство подобных установок в федеральных университетах РФ (Дальневосточном, Балтийском и др.).

3.4. Рентгеновский ЛСЭ с брэгговским резонатором

К сожалению, длительность импульсов излучения электронных накопителей вряд ли может быть менее 10 пс. С другой стороны, для многих экспериментов с временным разрешением требуются импульсы с длительностью менее 0,1 пс. Применяемый на электронных накопителях метод локального увеличения энергетического разброса при помощи мощного фемтосекундного лазера (т. н. фемтослайсинг) даёт слишком мало полезных фотонов. Рентгеновские лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) дают мощные субпикосекундные импульсы, но их частота повторения пока меньше требований большинства пользователей. Этот недостаток частично устранён в European XFEL, и будет устранён полностью в построенной в США установке LCLS — II (частота повторения — 1 МГц) и китайской установке SHINE (будет запущена в 2025 г.). Во всех трёх установках используются сверхпроводящие линейные ускорители электронов.

Весьма перспективным, но пока слабо технически проработанным, представляется разрабатываемый в США (Argonne National Laboratory) проект рентгеновского ЛСЭ с оптическим резонатором, образованным хорошо отражающими кристаллами. При использовании мёссбауровской монохроматизации такой ЛСЭ может обеспечить рекордно малую относительную ширину линии, что может быть использовано, например, для детектирования гравитационных волн, поиска отклонений от стандартной модели и других экспериментов по фундаментальной физике. Наиболее подходящим источником электронов для такого ЛСЭ является сверхпроводящий линейный ускоритель с энергией электронов 6–8 ГэВ. Сейчас в США и Китае обсуждается возможность создания рентгеновских ЛСЭ с оптическим резонатором на установках LCLS — II и SHINE. Так как средняя мощность электронного пучка в этих установках превышает 1 МВт, то целесообразно замедлять использованные электроны

в высокочастотных ускоряющих структурах, т.е. использовать какой-то вариант ускорителя-рекуператора (УР). Это нужно, в первую очередь, для снижения радиационной опасности установки.

Строительство в России УР с энергией около 6 ГэВ позволило бы создать на его основе центр коллективного пользования с фемтосекундными рентгеновскими импульсами и резонаторным рентгеновским ЛСЭ. Реализация такого проекта позволит России занять лидирующее положение в рентгеновских исследованиях с временным разрешением и рентгеновской интерферометрии. Следует отметить, что для создания УР необходима разработка в России технологии ускоряющих сверхпроводящих резонаторов (лучшие образцы таких резонаторов разработаны в США, в Thomas Jefferson National Accelerator Facility, но вряд ли их продадут в Россию). Несмотря на это, судя по состоянию работ по таким УР за рубежом, возможно создание первой такой установки в России.

3.5. Установка для исследования субпикосекундных быстропротекающих процессов методом ультрабыстрой электронной дифракции

К сожалению, технология производства сверхпроводящих ускоряющих резонаторов в России сейчас отсутствует. Не производятся и высокочастотные генераторные лампы (клистроны), которые необходимы для питания нормально проводящих и сверхпроводящих ускоряющих структур. Следует отметить, что обсуждаемая установка довольно велика (она размещается в здании длиной более 200 м с толстыми бетонными стенами) и имеет сравнительно высокую стоимость. Следует также отметить, что количество видов экспериментов, которые можно проводить на рентгеновском ЛСЭ, на порядки меньше количества видов экспериментов, которые можно проводить на источнике синхротронного излучения. Поэтому возможный выход научных результатов для источника СИ сравнимой стоимости гораздо выше.

В качестве более дешёвой альтернативы рентгеновским ЛСЭ можно рассмотреть установку для ультрабыстрой электронной дифракции (УЭД). Она использует для исследования быстропротекающих процессов субпикосекундные электронные пучки. Установка состоит из электронной пушки с энергией несколько МэВ, субпикосекундного лазера, который используется для генерации импульса (ТГц, ИК или оптического) накачки образца и для освещения фотокатода пушки, и экспериментальной станции с образцом и детекторами для регистрации рассеянных электронов. Некоторые пользователи излучения рентгеновских ЛСЭ исследуют свои образцы и на установках УЭД. Одной из главных проблем исследования быстрых процессов на рентгеновских ЛСЭ и установках УЭД является синхронизация импульсов накачки и зондирования с точностью лучше 100 фс. Эта проблема требует применения оптических устройств (включая лазеры) и комплектующих, которые не производятся в России. Поэтому для создания таких установок необходимо участие вышеназванных оптических институтов.

Глава 4. Развитие ускорительных технологий

4.1. Развитие методов охлаждения пучков тяжёлых заряженных частиц

Метод электронного охлаждения был предложен Г.И. Будкером в 1966 г. для использования в экспериментах на встречных пучках протонов. Практическое осуществление этого предложения было выполнено группой А.Н. Скринского в ИЯФ СО АН СССР в 1974 г., что позволило в дальнейшем использовать метод электронного охлаждения для накопления и изучения ионов редких изотопов и антипротонов. Метод обеспечивает высокое качество охлаждённого пучка — высокую фазовую плотность и малый энергетический разброс. Результаты российских исследований в области электронного охлаждения инициировали развитие двух других методов охлаждения (разделы 4.2, 4.3). Эти методы стали основой для создания уникальных установок во многих мировых центрах. Так, со времени открытия метода электронного охлаждения в мире было создано 20 таких установок и проектируются новые. В частности, для успешной работы российского проекта NICA во всём доступном диапазоне энергии ионов требуется развитие как высоковольтного электронного, так и стохастического охлаждений.

Первые обнадёживающие эксперименты по электронному охлаждению ионных пучков $^{197}\text{Au}^{79+}$ на энергии 4,55 ГэВ/нуклон выполнены в 2019 г. в BNL на коллайдере RHIC с использованием электронного пучка линейного ускорителя (энергия электронов — 2,47 МэВ).

В России нужно приложить усилия, чтобы накопленный потенциал в этой области развивался и помогал дальнейшему развитию ускорительной физики. Использование электронного охлаждения при работе с ионными пучками позволяет существенно расширить возможности эксперимента за счет компенсации факторов, приводящих к деградации качества пучка. Особенно это важно в области средней и низкой энергии, где стохастическое охлаждение теряет эффективность или неприменимо. XIX Международная конференция по методам охлаждения COOL-19 в ИЯФ (Новосибирск, 2019) в очередной раз ярко продемонстрировала большую важность развития методов охлаждения.

Сегодня эксперименты с охлаждёнными пучками проводятся во многих мировых центрах, таких как GSI (Германия), CERN, BNL — RHIC (США), FZ-Julich (Германия), IMP (Китай) и др. Проведение прецизионных экспериментов в области ион-ионных столкновений и экспериментов со сверхтонкими внутренними мишенями внесло весомый вклад в развитие ядерной физики. Открытие распадов стабильных атомов при их очистке от атомных электронов продемонстрировало возможность достигать в лабораториях условий близких к состояниям, реализующимся внутри сверхновых звёзд и понимать пути синтеза тяжёлых элементов. Проведенные широкие исследования ядер в изомерных состояниях с помощью прецизионного измерения Шоттки сигналов пучка позволили обнаружить новые переходы в ядрах в реальном времени. В настоящий момент в России строится амбициозный

ионный коллайдер NICA для изучения физики релятивистских ядер. В стадии обсуждения находится проект изучения экзотических ядер DERICA на базе ОИЯИ. Исследовательские накопители на низкую энергию имеют стоимость существенно ниже больших ускорительных комплексов, но могут значительно расширить возможности многих ядерных центров. Развитие нового направления ион-электронных коллайдеров позволит получить более точные и достоверные данные о структуре ядра и процессах в них для широкого спектра различных изотопов, для которых обычные физические методы слабо применимы в силу малого количества и малого времени жизни. Такие проекты могут служить базой для развития самых передовых технологий и для обучения нового поколения физиков-ядерщиков: сверх-высокий вакуум, прецизионные системы обратных связей, высокие требования на точность изготовления спектрометрических ускорителей позволят освоить эти технологии на практике. Это послужит базой для технологических применений таких ускорителей в медицине, ядерной физике и других промышленных целях.

Метод стохастического охлаждения

Вскоре после выступлений Г. И. Будкера на семинарах нескольких западных лабораторий С. Ван дер Меер (CERN, Швейцария) в 1972 г. предложил использовать широкополосные радиотехнические системы обратных связей для подавления некогерентных колебаний частиц в циклических ускорителях-накопителях. В такой системе измерительные электроды («pick-up electrodes») определяют отклонение частицы по какому-либо направлению и сигнал, пропорциональный этому отклонению, после усиления подаётся в момент прихода частицы на вход импульсного элемента («kicker») который воздействует на частицу, вызывая затухание колебаний по данному направлению. Каждой частице соответствует сигнал длительностью $\tau \sim 0,2-0,5$ нс. Чтобы сигналы, соответствующие разным частицам пучка, циркулирующего в синхротроне-накопителе, перекрывались как можно меньше, применяются широкополосные усилители с полосой $\Delta f \sim 1/\tau \sim 2-5$ ГГц.

Декремент затухания колебаний неравновесной частицы, вносимый системой, пропорционален ширине полосы Δf и обратно пропорционален числу частиц пучка. Минимально достижимый фазовый объём пучка ограничен тепловыми шумами системы. Тем самым метод стохастического охлаждения особенно эффективен при малом числе частиц и больших разбросах их скоростей. Он не приводит к дополнительным потерям частиц (в отличие от электронного охлаждения, при котором потери происходят из-за рекомбинации с охлаждающими электронами), поэтому в некоторых случаях он эффективен при поддержании светимости в установках на встречных пучках тяжелых ионов.

Впервые метод был реализован для охлаждения протонов в коллайдере ISR (CERN) в 1975 году. Впоследствии он успешно применялся в накопителях антипротонов FNAL (США) и CERN. В последнем он используется также в экспериментах по замедлению антипротонов и генерации антиводорода. На коллайдере RHIC (BNL, США) стохастическое охлаждение

применяется для пучков тяжелых ионов. В исследовательском центре GSI (Дармштадт, Германия) стохастическое охлаждение применяется совместно с электронным для экспериментов с ядрами редких изотопов.

В СССР первые эксперименты по стохастическому охлаждению пучков протонов были проведены в начале 80-х в ИЯФ СО АН СССР (Новосибирск). В период 2011–2013 гг. канал стохастического охлаждения был создан на синхротроне Нуклотрон (ОИЯИ, Дубна), где было получено охлаждение распущенных и сгруппированных пучков ядер дейтерия и углерода.

В настоящее время в мире активно разрабатываются системы стохастического охлаждения для международных ускорительных комплексов NICA (ОИЯИ, Дубна), FAIR (Дармштадт, Германия) и HIAF (IMP, Ланчжоу, Китай), предназначенных для экспериментов с тяжелыми ионами, антипротонами и пучками радиоактивных ионов.

Возможность использования стохастического охлаждения в коллайдерах высокой энергии (ЛHC, будущие циклические адронные коллайдеры) связана с разработкой мощных (до 10 кВт в непрерывном режиме) усилителей с полосой до нескольких десятков ГГц, с прецизионными амплитудно-частотными и фазово-частотными характеристиками. В связи с развитием микроэлектроники в последнее время активно обсуждаются возможности применения в стохастическом охлаждении цифровой обработки сигналов.

Перспективы использования метода стохастического охлаждения в РФ связаны с развитием комплекса NICA, и проекта DERICA (ОИЯИ, Дубна).

Мюонное охлаждение

Третий метод охлаждения тяжёлых заряженных частиц был предложен А. А. Коломенским (1965 г.) и назван им «Ионизационное трение», т. к. по мысли автора протоны и ионы при пересечении мишени будут терять свою энергию в столкновениях с атомами мишени, т.е. претерпевать т. н. ионизационные потери энергии. Ионизационные потери с ростом энергии частицы уменьшаются, пока не достигают минимума — в районе энергии порядка mc^2 , где m — масса частицы, и затем логарифмически возрастают. Поэтому значения энергии частицы выше энергии минимума устойчивы по отношению к случайным изменениям. Это правило «работает» для всех методов охлаждения.

Однако первое предложение, сделанное для протонов, оказалось неудачным, т. к. протоны испытывают сильное взаимодействие с ядрами мишени, что ведёт их к гибели за время, меньшее времени «охлаждения» пучка — сжатия его фазового объёма под действием ионизационного трения. Казалось, красивая идея не имеет практического применения. Однако вскоре появилось предложение Г.И. Будкера и А.Н. Скринского использовать ионизационное трение для охлаждения пучка в мюонном коллайдере — для мюонов (лептонов!) сильное взаимодействие отсутствует. Так и возникло название «мюонное охлаждение».

50 лет с момента первого предложения схемы мюонного коллайдера пока не увенчались заметным успехом. Значительный прогресс в развитии метода мюонного охлаждения достигнут только недавно: на XIX Международной

конференции по методам охлаждения COOL'19 в ноябре 2019 г. Новосибирске группа коллаборации MICE представила доклад о начале экспериментов с мюонным пучком и первых результатах регистрации мюонов, пропущенных через жидководородную охлаждающую мишень.

4.2. Ионные источники

4.2.1. Ионные источники непрерывного действия на основе электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР)

Среди источников, генерирующих ионные пучки непрерывного действия, ЭЦР-источники являются несомненным лидером. Неоспоримым преимуществом данных источников является практически неограниченный ресурс работы. Для генерации высокоинтенсивных пучков протонов и дейтронов используются ЭЦР-источники, работающие на частоте 2,45 ГГц. Лучший на сегодняшний день источник Silhi (Франция) обеспечивает для проекта IFMIF генерацию пучка дейтронов с интенсивностью >100 мА. Технология изготовления данного источника передается коммерческой дочерней фирме. Для генерации менее интенсивных пучков используются ЭЦР-источники полностью на постоянных магнитах.

Для генерации непрерывных высокозарядных ионных пучков используются ЭЦР-источники, работающие на более высоких частотах — 14, 18, 28 ГГц и магнитной системе на сверхпроводниках. На флагманских источниках третьего поколения (LBL и MSU в США, IMP в Китае, RIKEN в Японии), работающих на частоте 28 ГГц, получены пучки многозарядных ионов урана с интенсивностью более 10 рмА (например, U^{33+} 400 ерА). Основным трендом развития данных источников является увеличение частоты и величины магнитного поля. Несомненным лидером в этом направлении является Институт современной физики (IMP, Lanzhou, China), где созданы сверхпроводящие ЭЦР-источники третьего поколения с частотой накачки 24 и 28 ГГц, и ведутся работы по созданию источника четвертого поколения с частотой накачки 45 ГГц. Планируемые интенсивности пучков урана — $U^{35+} \sim 30$ рмА, $U^{41+} \sim 5$ рмА. Развитие ЭЦР-источников по этому пути требует развития технологии сверхпроводников и источников мощного СВЧ излучения. Для источников третьего поколения (частота накачки до 30 ГГц) используется сверхпроводник NbTi, технология производства которого достаточно хорошо освоена. Для ЭЦР-источников четвертого поколения (частота накачки от 28 до 56 ГГц) необходимо создание магнитных систем на основе сверхпроводника Nb₃Sn, что в настоящее время является сложной научно-технической и технологической задачей (единственный проект на сегодня — источник FECR, разрабатываемый в IMP). Дальнейшее повышение частоты накачки (≥ 56 ГГц) требует разработки и создания сверхпроводящих магнитных систем на основе ВТСП, что по мнению экспертов является задачей на ближайшие 10–20 лет.

В Российской Федерации необходимыми технологиями в данной области обладают ОИЯИ и ИПФ РАН. К настоящему времени в ЛЯР ОИЯИ разработано и изготовлено более десяти ЭЦР-источников с частотами накачки

2,45, 14 и 18 ГГц с магнитными системами различных типов (постоянные магниты, «теплые» токовые обмотки и постоянные магниты, сверхпроводящие токовые обмотки и постоянные магниты). Создание ионных источников такого типа, обеспечивающих получение пучков многозарядных ионов средних масс с интенсивностью $10 \mu\text{A}$ и более, позволило провести успешные эксперименты по синтезу новых сверхтяжелых элементов, эксперименты по изучению свойств радиоактивных ядер, расширить возможности проведения прикладных исследований на пучках тяжелых ионов. Большинство работающих, а также разрабатываемых ЭЦР-источников на частоты выше 18 ГГц базируются на ВЧ генераторах, поставляемых ИПФ РАН. В ИПФ РАН (Н. Новгород) ведутся разработки нового типа сильноточного ЭЦР-источника ионов — ЭЦР-источника ионов с квазигазодинамическим удержанием плазмы в открытой магнитной ловушке с частотой накачки 37 ГГц и выше. На базе этих двух организаций необходимо создать Центр компетенций в области ЭЦР-источников с постановкой задачи разработки отечественного ЭЦР-источника третьего поколения с магнитной системой на сверхпроводниках, работающего на частоте 28 ГГц, с последующим развитием на большие частоты и магнитные поля. По опыту создания подобных источников в зарубежных ускорительных центрах срок от старта проекта до получения проектных параметров составлял от 5 до 10 лет при стоимости проекта $\sim 5\text{--}10$ млн долларов США.

В этом же центре необходимо развивать направление создания ЭЦР-источников для генерации пучков протонов как в непрерывном, так и импульсном режиме. Хороший задел в направлении импульсных протонных пучков есть в ИПФ РАН, где создан источник, способный генерировать пучок протонов с импульсным током до 100 мА, при длительности импульса 100 мкс и частоте посылов до 100 имп/с.

4.2.2. Импульсные источники многозарядных ионов

Для задач, где требуется максимально возможная зарядность ионов, перспективными являются источники с использованием электронного пучка. Среди источников этого типа различают:

— *электронно-лучевые ионные источники* (Electron Beam Ion Source — EBIS): длина ионной ловушки от 50 до 200 см; электронный пучок однопролётный, с рекуперацией энергии;

— *электрон-ионный источник с накоплением электронов* в ловушке (Electron Beam In Trap — EBIT): длина ловушки 2–15 см);

— *электронно-струнный ионный источник* (Electron String Ion Source — ESIS); это EBIS в режиме многократного отражения электронов;

— *ионный источник с трубчатым электронным пучком* (Tubular EBIS or ESIS — TEBIS\TESIS, Е. Д. Донец, ОИЯИ).

Такие источники используются в настоящее время в качестве инжекторов первичных высокозарядных тяжелых ионов в синхротроны в двух лабораториях: BNL (Upton, США) и ЛФВЭ ОИЯИ (Нуклотрон — NICA\MPD). На источники EBIS в BNL получены пучки ионов $^{197}\text{Au}^{32+}$ с интенсивностью вплоть до 2×10^9 частиц за импульс длительностью 20 микросекунд.

На источнике KRION-6T в ОИЯИ интенсивность ионов $^{209}\text{Bi}^{35+}$ достигает 5×10^8 частиц за импульс длительностью 8 мкс.

Во многих других научных центрах (CERN, MPI Heidelberg, MSU Cyclotron laboratory, TRIUMF (Vancouver), Tokio University of Electrocommunications; Fudan University, Shanha et cetera) схема EBIT широко используется в качестве charge breeders — ионизаторов ионов редких и короткоживущих радиоактивных изотопов. Это активная область фундаментальных исследований в ядерной физике для задач астрофизики. Ключевым параметром EBIT в данном случае является плотность электронного пучка J , которая определяет время ионизации. Задача иметь $J > 1 \text{ кА/см}^2$ для генерации многозарядных ионов короткоживущих изотопов.

Развитие источников данного типа идет по пути увеличения вида, зарядности $q+$ и числа накопленных ионов в сгустке, а также увеличения плотности тока электронного пучка J .

Для применений в ускорителях достижимым представляется получение пучков «голых» ядер (полностью лишенных электронов) для элементов вплоть до середины таблицы Менделеева и гелиеподобных ионов (зарядности $q+=Z-2$)⁵ для тяжелых элементов вплоть до урана $^{238}\text{U}^{90+}$. Достижимы также значения зарядности ионов тяжелых элементов $q+=Z/(4\div 6)$ для EBIS и ESIS с линейной электронной «струной» и интенсивностью $\sim 2 \cdot 10^9$ за импульс и на 2–3 порядка выше для TESIS. В отношении плотности электронного пучка/струны J представляются достижимыми значения в несколько кА/см² при емкости ионной ловушки не менее 10^{11} положительных элементарных зарядов (или 16 нКл). Такая плотность при соответствующей емкости ионной ловушки требуется для квазинепрерывной (400 Гц) инжекции ядер углерода C^{6+} в медицинские циклотроны.

Для достижения указанных целей необходимы:

а) дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования методов получения электронных пучков высокой плотности (близкой к бриллюэновской) и феномена электронной струны в линейном и трубчатом вариантах в сильных магнитных полях;

б) разработка и создание экранированных сверхпроводящих соленоидов с полем до $B_{\text{max}} = 10$ Тесла и с высокой азимутальной однородностью в диапазоне линейного роста поля от $10^{-2} \cdot B_{\text{max}}$ до B_{max} ;

в) разработка и изготовление высокоэмиссионных термоэлектронных эмиттеров с плотностью тока на катоде $J_{\text{cathode}} > 10 \text{ А/см}^2$ (плотность электронной «струны» $J > 1 \text{ кА/см}^2$ достигается адиабатическим сжатием пучка на входе соленоида).

Головной организацией по данному направлению является ОИЯИ. Соисполнители — ФГУП ЭЗАН (Черноголовка), Всероссийский институт авиационных материалов ВИАМ (Москва), ФГУП НПП «Исток» им. А. И. Шокина (Фрязино). Примерный срок изготовления источника нового поколения — 3–4 года. Стоимость НИР и изготовления одного источника нового поколения оценивается в 2 млн долларов США.

⁵ Здесь и далее Z — номер элемента (Z е-ядра), A — его атомный вес.

4.2.3. Импульсные лазерные источники многозарядных ионов

В связи с интенсивным развитием лазерной техники в последние десятилетия получили широкое распространение исследовательские работы с использованием *ионных источников, основанных на генерации высокозарядных ионов в плазме, создаваемой импульсами лазерного излучения.* Такие источники востребованы при решении задач, требующих импульсных высокоинтенсивных пучков ионов с максимально возможным зарядом. Их развитие и применение на действующих ускорителях осуществлялась в Германии (GSI, Дармштадт), Японии (RIKEN, Вако-Ши), Польше (Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion, Варшава), Китае (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Ланжоу), Италии (INFN, Laboratori Nazionali del Sud, Катания), Чехии (Institute of Physics, Academy of Sciences of the Czech Republic, Прага), США (Brookhaven National Laboratory, Уpton), Швейцарии (ЦЕРН) и России (Дубна, ИТЭФ).

Самый мощный лазерный источник, разработанный ИТЭФ для ЦЕРН, позволял генерировать пучки ионов висмута Bi^{27+} с интенсивностью не менее 10^{10} частиц/имп. В настоящее время интерес к лазерным источникам возрос в связи с идеей прямой инжекции ионного пучка в ускоряющую структуру без использования согласующего канала, что в ряде применений, может дать существенный экономический выигрыш.

Использование соленоидального магнитного поля в канале разлета плазмы позволяет заметно повысить интенсивность пучка на выходе источника без потери его ионами высокого заряда.

Легкость перехода при генерации ионного пучка от одного вещества к другому дает им преимущество при работах по исследованию радиационной стойкости электронной компонентной базы аппаратов космического базирования, возрастающая востребованность которых обусловлена развитием технологий передачи информации. Проведение экспериментальных и теоретических работ по исследованию генерации мощных импульсов лазерного излучения CO_2 лазера и формирования пучков интенсивных высокозарядных ионов позволит повысить количество генерируемых ионов Bi^{27+} до 10^{11} частиц/импульс и зарядность генерируемых ионов, например, урана U^{35+} .

Оценочная стоимость программы научных исследований по развитию и совершенствованию лазерных ионных источников для генерации тяжёлых высокозарядных ионов составляет 40–50 млн рублей в год в течение 4–5 лет.

4.2.4. Источники поляризованных ионов

Проведение экспериментальных работ на пучках поляризованных ионов диктует необходимость развития источников поляризованных ионов как положительной зарядности, так и отрицательной. Последняя позволяет увеличивать интенсивность пучка, ускоряемого в синхротроне при использовании перезарядного метода инжекции. Так, источник в Исследовательском центре г. Юлих (FZJ, Германия) на ускорителе-накопителе COSY работает по методу атомарного пучка и имеет интенсивность поляризованных ионов

H⁻ и D⁻ в импульсе до 50 мкА длительностью 20 мс ($5 \cdot 10^{12}$ ионов за импульс) при степени поляризации до 90% от теоретически достижимой.

В BNL (США) используется источник поляризованных ионов H⁻ с оптической накачкой, в котором обеспечивается получение пучка поляризованных ионов с импульсным током около 1 мА и поляризацией 85% при длительности импульса пучка в линаке 300 мкс ($2 \cdot 10^{12}$ ионов за импульс). Использование перезарядной инжекции в бустер позволяет достичь интенсивности $\sim 1,8 \cdot 10^{11}$ поляризованных протонов в одном сгустке в кольце коллайдера RHIC, что близко к значению, ограниченному эффектом встречи двух пучков в данном ускорителе.

В ОИЯИ по программе поляризационных исследований в рамках проекта NICA в сотрудничестве с IUCF (США) и ИЯИ РАН разработан универсальный высоко интенсивный источник поляризованных дейтронов и протонов. В настоящее время интенсивность пучка поляризованных дейтронов на выходе линейного ускорителя ЛУ-20 составляет 6 мА при длительности тока 6–8 мкс ($2,5 \cdot 10^{11}$ частиц за импульс). Три блока ВЧ переходов в ионном источнике обеспечивают получение режимов со значениями теоретической поляризации (близкой к 100%) для протонов ± 1 , и для дейтронов векторной поляризации ± 1 и тензорной поляризации $+1, -2$.

Развитие источников данного типа, в частности, источника в ОИЯИ, в нашей стране должно быть направлено на развитие методов получения пучков поляризованных ионов отрицательной зарядности, что позволит существенно повысить интенсивность пучков в кольцевых ускорителях. Для получения отрицательных поляризованных ионов требуется обогащение плазмы в ионизаторе отрицательными неполяризованными ионами. Такое устройство — конвертор плазмы с *цезированием поверхности* — было разработано в ИЯИ РАН и использовано в источнике поляризованных ионов в IUCF, в котором были получены пучки отрицательных ионов H⁻ и D⁻ с током до 2 мА и длительностью до 300 мкс. Развитие этого метода позволит получать число частиц в импульсе из источника равным $\sim 3 \cdot 10^{12}$ ч/имп. Принимая во внимания высокую значимость пучков поляризованных ионов для проекта NICA и достигнутый прогресс в создании источников данного типа, работы по его развитию необходимо сосредоточить в ОИЯИ. Соисполнителями по данной работе могут выступать ИЯИ РАН в части генератора ионов и НИЦ «Курчатовский институт» — ИТЭФ в части системы формирования ионного пучка.

Оценочная стоимость программы научных исследований по развитию и совершенствованию ионных источников поляризованных ионов составляет 600–800 тыс. долларов США в течение 2–3 лет.

4.2.5 Источники отрицательно заряженных ионов

История источников отрицательно заряженных ионов (ИОЗИ) начинается с идеи Альвареца использовать эти ионы для электростатических ускорителей типа тандем. До середины 1960-х годов это применение источников данного типа оставалось единственным, до тех пор пока работы Г.И. Димова с учениками по перезарядной инжекции ионных пучков в ускорители

заметно не повысили интерес к источникам отрицательных ионов, в особенности ионов водорода, т. к. открыли путь к существенному увеличению интенсивности ускоренных пучков.

Принципиально ИОЗИ делятся на два типа — поверхностные и объемные. Источники поверхностного типа предложены и развивались в группе Г.И. Димова в ИЯФ СО АН ССР. Они успешно развиваются и сегодня его учениками в ИЯФ им. Будкера. Источники объемного типа ведут свою историю с 1970-х гг., с пионерских работ группы Марты Бакал (MARTHE BASAL, Laboratoire de Physique et Technologies des Plasma, Ecole Polytechnique, Palaiseau, Франция).

Сегодня источники отрицательных ионов водорода являются основным инструментом для генерации пучков для мощных источников нейтронных пучков на основе реакции испарительно-скальвающего типа (разделы 1.2 и 1.4). На установках J-PARC (Япония) и SNS (США) используются ВЧ источники объемного типа с добавкой цезия. На установке FETS (Великобритания) и CSNS (Китай) используется источник с разрядом Пеннинга с добавкой цезия. В CSNS ведутся также работы по созданию ВЧ источника объемного типа.

В ИЯФ СО РАН им. Будкера на источнике для медицинского ускорителя тандемного типа достигнут непрерывный пучок с амплитудой тока вплоть до 15 мА. На импульсных источниках достигнуты интенсивности в 50–60 мА ионного тока при длительности импульса порядка одной миллсекунды ($3.5 \cdot 10^{14}$ частиц за импульс) при частоте повторения импульсов вплоть до 60 имп/с. Развитие источников идет, прежде всего, по пути увеличения срока наработки на отказ, что успешно решается на ВЧ источниках с внешней антенной. Вторая задача — разработка системы формирования ионного пучка, позволяющей эффективно предотвращать вытягивание из плазмы электронов и формировать пучки ионов с малым эмиттансом (вместе с ионной компонентой из плазмы разряда вытягиваются и электроны).

В свете провозглашенной программы синхротронно-нейтронных исследований, предполагающей создание в РФ источника нейтронных пучков на основе реакции испарительно-скальвающего типа, представляется целесообразным развивать источники отрицательных ионов водорода, без которых эта программа невозможна. Источники поверхностного типа следует развивать на базе ИЯФ СО РАН им. Будкера, источники объемного типа — в ИТЭФ, используя опыт сотрудничества институтов в разработке данных источников в рамках международного сотрудничества.

4.2.6. Ионный источник для циклотронов

Ионный источник во многом определяет параметры систем циклотрона. На циклотронах в основном в настоящее время используются ЭЦР-источники с частотой 14 или 18 ГГц, имеющие медные или сверхпроводящие обмотки катушек для создания магнитного поля. Для повышения интенсивности пучка и заряда тяжелых ионов требуется разработка ЭЦР-источников, работающих на частоте 28–50 ГГц, с обязательным использованием

сверхпроводящей магнитной структуры. В России такие ионные источники пока не созданы, пилотную разработку ведет ЛЯР ОИЯИ.

4.3. Технологии создания и эксплуатации электронных пушек с фотокатодами

Одним из ключевых узлов современных ускорителей электронов, прежде всего коллайдеров, источников СИ и рентгеновских лазеров на свободных электронах (ЛСЭ), являются источники электронов на основе «фотопушек». Параметры таких фотопушек должны удовлетворять следующим требованиям:

- для нормально проводящих ЛСЭ — заряд сгустка около 1 нКл при частоте повторения импульсов несколько сотен Гц;
- для сверхпроводящих ЛСЭ — заряд сгустка около 1 нКл с возможностью генерации последовательности сгустков в одном СВЧ импульсе при общем количестве сгустков до нескольких тысяч в секунду;
- заряд сгустка около 0,1 нКл с частотой следования сгустков до МГц;
- последовательности сверхкоротких (десятки фс) сгустков с зарядом до 100 пКл/сгусток для Comrap-XFEL;
- единичные сверхинтенсивные сгустки с зарядом 5–10 нКл/сгусток.

Для создания фотопушек в России ключевыми являются три проблемы:

- производство и эксплуатация полупроводниковых фотокатодов,
- системы синхронизации,
- системы прецизионной диагностики пучка.

4.4. Развитие технологий высокочастотной сверхпроводимости и производства сверхпроводящих ускоряющих резонаторов

Современные ускорители, в том числе прикладного назначения, требуют при создании использования широкого спектра высоких технологий, включающих специальную металлургию, высокочастотную сверхпроводимость, современные высокочастотные генераторы, в том числе твердотельные, быстродействующую электронику для систем управления и диагностики и т. д.

Сверхпроводящие ускоряющие резонаторы к настоящему времени являются одним из ключевых компонентов, необходимых для создания современных ускорителей-драйверов для нейтронных источников на основе реакций скалывания (SNS), фабрик для производства редких и радиоактивных изотопов (RIB), лазеров на свободных электронах (XFEL) и других научных установок. В ближайшее десятилетие можно ожидать создания прикладных ускорителей со сверхпроводящими резонаторами.

Сверхпроводящие линейные ускорители на среднюю и высокую энергию в настоящее время строятся по общему принципу: они состоят из последовательности независимо фазируемых резонаторов, используемых для ускорения пучков, и сверхпроводящих соленоидов или квадрупольей, размещенных между резонаторами, для их фокусировки. Линейный ускоритель, построенный на основе последовательности независимо фазируемых

резонаторов, лишен нескольких недостатков: нет поворотных магнитов и, соответственно, не требуется расходовать энергию на их питание; может быть обеспечена регулировка энергии. Важной особенностью сверхпроводящих ускорителей, построенных по модульному принципу, является система ВЧ питания, независимая для каждого резонатора и позволяющая обеспечить подстройку и изменение параметров ускорителя при снижении требования к мощности питания отдельного резонатора.

В отличие от нормально проводящих ускоряющих структур, технологии производства которых в последние годы восстановлены, в России более 20 лет фактически не проводились работы по высокочастотной сверхпроводимости. Это вызвано как отсутствием в России в течение 25 лет собственных проектов крупных научных установок, так и отсутствием соответствующего раздела в федеральных и отраслевых программах развития сверхпроводящих технологий. В последние 5–7 лет в этой области ведутся работы коллабораций ОИЯИ, МИФИ и ряда белорусских научных центров и университетов, прежде всего ФТИ НАНБ и ИЯП БГУ. *(В настоящее время подготовлена и находится в стадии финальных согласований НТП Союзного государства, направленная на освоение технологий и штучное производство коаксиальных сверхпроводящих резонаторов).*

В рамках ФНТП необходимо предусмотреть раздел по отработке технологий серийного производства сверхпроводящих ускоряющих резонаторов различных типов (коаксиальных, Spoke, эллиптических и т. д.). Необходимо напомнить, что в настоящее время высокочастотные ускоряющие резонаторы в мире производятся только по двум технологиям:

- полностью ниобиевые («bulk»);
- напыление ниобия на корпус из меди или алюминия (Nb/Cu; Nb/Al).

Оборудование и технологии, необходимые для таких резонаторов, во многом являются общими, однако имеются некоторые отличия. В мире эти две технологии являются конкурирующими, так как полностью ниобиевые резонаторы обеспечивают большие градиенты поля, но в несколько раз дороже. Безусловно важны также исследования резонаторов из сплава NbSn и перспективных покрытий соединением NbV.

Кроме собственно резонаторов необходимо разрабатывать и инженерные системы, сверхпроводящие соленоиды и квадрупольные линзы, твердотельные системы ВЧ питания, криостаты. Новой технологией, которая в настоящее время в России вообще не рассматривается, являются тепловые насосы, лучшие образцы которых уже позволяют получать температуры до 30–40 К, пока в относительно небольших рабочих объемах. Это уже позволяет отказаться от использования жидкого гелия, например, в томографах на ВТСП. Снижение предельной температуры до 16–18 К позволит широко использовать резонаторы с покрытием NbSn в прикладных ускорителях.

4.5. Ускорительная масс-спектрометрия

При энергии ионов 4–10 Мэв сильно подавлено их взаимодействие с остаточным газом. Появляется возможность регистрация и анализ одиночных ионов. Это открыло возможность применения ускорительных масс-

спектрометров, позволяющих определять наличие уникальных меток в веществе на уровне $\Delta m/m \sim 1E-16$. Методика нашла применение в археологии (датировка находок), биологии и медицине (микродозирование прототипов лекарств, диагностика *Helicobacter Pylori* и др.), климатических и экологических исследованиях. В мире работает около 100 ускорительных масс-спектрометров (УМС), тогда как в России, в Новосибирске, действует один прибор с напряжением 1 МВ производства ИЯФ СО РАН и один швейцарский MICADAS с напряжением 0,2 МВ. Наблюдается увеличение спроса различных стран на установки УМС. Например, компания IonPlus, производящая коммерческие ускорители, продает за рубеж ежегодно по четыре мини-датировочных УМС и два ускорителя на более тяжелые элементы (Al, Be и др.). В США работает известная компания Nationsl Electrostatics Corporation (Madison), производящая до 10 УМС в год. Россия обладает достаточным потенциалом, чтобы составить конкуренцию на мировом высокотехнологичном рынке.

4.6. Генераторы ВЧ и СВЧ напряжения для ускорителей заряженных частиц

Только в последние 3–4 года состояние разработки и производства современных ВЧ и СВЧ генераторов в России, особенно генераторов непрерывного режима работы, начало медленно выправляться. До этого возможности производства непрерывно сокращались, новые модели мощных приборов не разрабатывались, твердотельным генераторам внимания практически не уделялось. Некоторые традиционные производители вообще ушли с рынка, другие занимались производством старых моделей или восстановлением старых приборов. В последние годы ситуация стала (очень медленно) улучшаться: твердотельные усилительные модули разработаны и запущены в производство в НИИТФА ГК «Росатом» и компании «Триада-ТВ», в НПП «Исток» восстанавливают производство 20 МВт клистронов диапазона 3 ГГц, в ИЯФ СО РАН изготовлены первые образцы клистронов 45 МВт мощности, в НПП «Фаза» разработана серия новых магнетронов диапазона 3 ГГц мощностью 2–3 МВт. Данные работы необходимо расширять как по номенклатуре, так и по частотным диапазонам.

Востребованы уже сегодня следующие генераторы и генерирующие устройства:

— Твердотельные усилители на частоту 300–700 МГц с импульсной мощностью до нескольких сотен кВт, в ближайшей перспективе — на основе отечественной компонентной базы.

— Твердотельные усилители на частоту 40–350 МГц, предназначенные для работы в непрерывном режиме, мощностью до нескольких сотен кВт.

— Твердотельные усилители относительно малой мощности (10–50 кВт) на частоту 80–1300 МГц со стабильностью на уровне 10^{-6} – 10^{-5} для питания сверхпроводящих ускоряющих резонаторов.

— Отечественные усилительные транзисторы на частоту 40–700 МГц с конкурентоспособными характеристиками и стоимостью, не превышающей стоимость импортных аналогов.

— Клистроны (желательно многолучевые) 3 ГГц диапазона с мощностью 5, 6, 7,5, 10 МВт для прикладных ускорителей электронов; длительность импульса должна быть увеличена до 15–18 мкс, средняя мощность — до 40–50 кВт.

— Клистроны (желательно многолучевые) 3 ГГц диапазона с мощностью 20–25 МВт для питания нормально проводящих ускорителей-инжекторов в источники СИ и другие научные установки.

— Сверхмощные клистроны 3 ГГц диапазона с мощностью свыше 50 МВт.

— Мощные клистроны 5 и 10 ГГц диапазонов, импульсная мощность более 5 МВт, средняя — 5–10 кВт.

— Мощные клистроны 1,5 ГГц диапазона, импульсная мощность до нескольких МВт.

— Системы компрессии мощности 3, 5 и 10 ГГц диапазонов, являющиеся развитием SLED и позволяющие получать коэффициент усиления по мощности 5–6 и плоскую вершину импульса.

— Твердотельные модуляторы для сверхмощных клистронов.

— Вакуумные СВЧ окна для работы в режиме длинных импульсов.

Острота ситуации возникла в связи с известными проблемами санкций, запрещающих импорт в Россию изделий ВЧ и СВЧ техники, имеющих пресловутое «двойное» применение. Для российских потребителей таких устройств единственным решением проблемы остаётся возрождение производства, существовавшего в Советском Союзе, и развитие на его основе современных генераторных устройств.

Глава 5. Ускорители для прикладных целей

5.1. Промышленные ускорители и их применение

По статистике, в настоящее время в мире насчитывается около 30 000 действующих ускорителей, и только несколько десятков из них используются для научных исследований. Коммерческое использование ускорителей является сопутствующим продуктом физики высоких энергий. Можно утверждать, что сейчас наблюдается всё нарастающее внедрение технологий, использующих ускорители заряженных частиц, для практического применения.

Практически все известные методы ускорения частиц применяются для прикладных целей.

5.1.1. Промышленные ускорители электронов (ПУЭ) являются одним из наиболее востребованных видов промышленных ускорителей. Они являются, прежде всего, источниками интенсивных электронных пучков. Разработанные специально для них конверторы преобразуют энергию электронного пучка в тормозное рентгеновское излучение, обладающее на порядок большей глубиной проникновения в вещество, чем электронный пучок. Интенсивные потоки ионизирующего излучения (электронные пучки и тормозное излучение) используются для инициирования химических и физических реакций в облучаемых материалах, веществах и изделиях.

В качестве источников ионизирующего излучения в промышленности используются также *изотопные источники*. Однако в последние десятилетия их использование сокращается, что обусловлено безопасностью ускорителей и дефицитом используемого в них радиоактивного изотопа кобальта. Количество используемых в промышленности ускорителей электронов неуклонно нарастает. В настоящее время в Китае работают около 1 000 ПУЭ, тогда как в России их насчитывается только около 30 и около 15 используются для обработки медицинской продукции.

Развитие промышленных ускорителей определяется технологическими нуждами и потребностями разработок новых процессов и технологий. Это развитие требует комплексного междисциплинарного подхода и исследований в нескольких смежных областях. Разработка ПУЭ тесно связана с радиационной физикой — физикой взаимодействия интенсивных потоков ионизирующих излучений с веществом и радиационной безопасностью. Для любого промышленного процесса важна эффективность использования ресурсов, и радиационные технологии не являются исключением. Поэтому для их разработки требуется проводить большой объём экспериментальных исследований по моделированию взаимодействия ионизирующего излучения с обрабатываемой продукцией, картированию дозных полей и экспериментальной проверки распределения поглощённой дозы в обрабатываемых объектах. Сопутствующая задача относится к радиационной физике и радиационной химии — необходимо определять допустимые диапазоны поглощённой дозы для обрабатываемых объектов. Проектирование и строительство радиационной защиты установок и линий для создания радиационных

технологий также требует проведения специфических расчётов и оценок, хорошего уровня понимания радиационной физики для учёта всех факторов.

В настоящее время ПУЭ используются во многих производственных процессах:

- Радиационная модификация (сшивки) полимерной изоляции проводов и кабелей;

- Радиационная модификация (сшивки) полимерных термоусаживаемых изделий;

- Производство пенополиэтилена и других вспененных полимерных материалов (используются для упаковки, термо- и звукоизоляции в строительстве и автомобилестроении, для производства туристических ковриков, детских игрушек и обуви);

- Стерилизация одноразовых медицинских изделий (медицинское бельё, инструменты, шприцы, системы переливания крови и т. д.);

- Стерилизация имплантатов в хирургии;

- Модификация и синтез лекарственных препаратов;

- Деконтаминация растительного сырья и фиточаёв в пищевой промышленности;

- Стерилизация и дезинсекция пищевой продукции.

Отдельно следует отметить досмотровые комплексы таможенных постов, в которых также используются ускорители электронов.

- Для использования в радиационных технологиях в России разработаны и выпускаются различные типы ускорителей:

- Ускорители электронов прямого действия с энергией пучка до 2,5 МэВ и мощностью до 500 кВт;

- электронные линейные (ВЧ) ускорители на основе резонаторов с рабочей частотой сотни МГц с энергией электронов 3–10 МэВ и мощностью пучка 50–100 кВт;

- электронные (СВЧ) ускорители на основе резонаторов с рабочей частотой 1 ГГц и выше с энергией электронов 8–10 МэВ и мощностью пучка 15–30 кВт.

- Сейчас в ряде стран начали внедряться новые процессы, требующие создания новых ускорителей или модернизации существующих разработок:

- Обработка пищевых и сельскохозяйственных продуктов. Требуется разработка ускорителей с энергией электронов 5 и 7,5 МэВ и мощностью от 100 кВт, снабжённых конвертором для генерации тормозного рентгеновского излучения; также требуется разработка подпучкового оборудования.

- Предпосевная обработка семян, поверхностная обработка. Требуются ускорители с энергией электронов 100–200 кэВ и специальным подпучковым оборудованием.

- Радиационная модификация (сшивки) кабельных и других электротехнических изделий (муфты, перчатки, и т. д.) с большой толщиной изоляции. Требуются ускорители с энергией электронов до 3–5 МэВ и мощностью пучка 100 кВт с КПД от 80%.

- Очистка отходов различных производств. Для каждой задачи требуется разработка ПУЭ со специфическими параметрами и специфическим подпучковым оборудованием.

— Полимеризация мономеров с регулируемой длиной молекул полимеров. Требуются ускорители с энергией электронов 5–10 МэВ и специальное подпучковое оборудование (проточные реакторы).

• В стадии исследований находятся процессы, которые в перспективе могут быть внедрены в промышленность и принести существенные выгоды:

- Радиационно-термический синтез ферритов.
- Радиационно-термический синтез элементов топливных элементов.
- Радиационно-термический крекинг углеводородных соединений.
- Радиационная и радиационно-термическая обработка обогащённого минерального сырья. Это повышает выход ценных компонентов и уменьшает энергозатраты на обогащение.

5.1.2. Промышленные ускорители ионов (ПУИ)

Технологии на основе ионных пучков используются в основном в двух областях промышленности⁶ — в машиностроении и микроэлектронике. Для генерации ионных пучков в этих технологиях применяются ускорители разных типов, представленные далее.

Ускорители прямого действия: ускорение постоянным напряжением (т. наз. электростатические ускорители):

- динамитрон или генератор Кокрофта-Уолтона, напряжение до 5 МэВ, ток до 100 мА,
- генератор Ван де Граафа, напряжение от 1 до 15 МэВ, ток до нескольких мА,
- ускоряющая трубка с импульсным трансформатором (ИСТ), напряжение до 3 МэВ, ток до 50 мА.

Ионные линейные ускорители: частота ВЧ от 10 до 600 МГц, энергия (протоны) от 1 до 70 МэВ, средний ток пучка > 1 мА.

Кольцевые ускорители: циклотроны на энергию ионов от 10 до 70 МэВ/н, ток пучка до нескольких мА, синхротроны на энергию ионов до нескольких ГэВ/н).

К хорошо освоенным направлениям коммерческого использования ускорителей относятся:

- ионная имплантация полупроводников и материалов;
- радиационная модификация свойств полупроводников;
- радиационные методы обработки материалов и изделий, модификация свойств поверхностей материалов;
- испытания радиационной стойкости материалов;
- производство радиоизотопов;
- нейтронно-активационный анализ;
- анализ на заряженных частицах (протонах, дейтронах, альфа-частицах и тяжелых ионах);
- неразрушающий контроль;
- производство трековых мембран (фильтров);
- протонная радиография (протонный микроскоп).

⁶ Технологии радиационной терапии представлены в разделе 5.3.

Необходимость восстановления собственной технологической базы для производства полупроводниковых элементов ставит задачу разработки и создания отечественных ионно-имплантационных установок и развития ионных источников непрерывного действия для этих установок. Тенденция создания полупроводников со все более малыми технологическими нормами (менее 7 нм) требует создания ионных источников многоатомных молекулярных ионов, а также плазменно-иммерсионных установок.

Компактные источники нейтронов на базе высокоинтенсивных линейных ускорителей на относительно невысокие энергии (2,5–7 МэВ) — активно развивающееся направление, призванное дополнить уникальные установки класса «мега-сайенс». В настоящее время в мире уже действует ряд компактных источников нейтронов на основе протонных или электронных ускорителей: LENS в Университете Индианы (США), CPNS в Университете Циньхуа (Китай), RANS в институте RIKEN (Япония) и другие.

Разработка компактных нейтронных источников решает не только задачу отработки технологий, требуемых для создания установки класса «мега-сайенс». С их помощью можно получать значимые результаты, например, в области материаловедения с использованием таких методов как дифракция, малоугловое рассеяние нейтронов и нейтронная радиография, а также в области медицины. Наибольший задел в этом направлении в РФ есть у коллектива разработчиков проекта DARIA (СПГУ, ОИЯИ, ИТЭФ, ИПФ РАН). Этот проект направлен на создание установки для серийного выпуска с целью оснащения компактными источниками нейтронов российских научных и образовательных центров и промышленных предприятий, использующих технологии на базе нейтронных пучков. Основная задача сегодня заключается в возрождении в стране исследований, связанных с развитием экспериментальной базы ионных источников и имплантеров для легирования полупроводников и достижения в этих устройствах параметров ионных пучков на уровне мировых аналогов и превышения в дальнейшем этих параметров. Работы в данной области следует сосредоточить в научных лабораториях, обладающих необходимым оборудованием и специалистами, которые не прерывали научно-исследовательскую деятельность в данной области в «кризисные» времена (ИСЭ СО РАН, ИТЭФ и др.).

Особое место в *радиационных технологиях* занимают:

— материаловедение и прикладные задачи ядерной энергетики (проекты энергетических систем будущего, включая следующее поколение реакторов с расщепляющимися материалами, системы переработки ядерных отходов и будущих энергетических систем с ториевым топливным циклом и др.);

— исследования стойкости электронно-компонентной базы (ЭКБ) к радиационному воздействию тяжёлых заряженных частиц, что является важной задачей в космической технике.

Разрабатываемый во ВНИИЭФ при участии ИЯФ СО РАН, ИТЭФ и МИФИ проект имеет целью создание ускорительного комплекса, который позволит обеспечить потребности РФ в данных исследованиях (см. Часть II).

Применение ионных источников и ускорителей ионов в электронной промышленности занимало особое место в советской науке и технике.

Со временем важность этой задачи существенно возросла. Основные тренды современного развития процессов *ионного легирования (имплантации) полупроводников* следуют за тенденцией постоянного повышения плотности размещения активных полупроводниковых элементов. Это обуславливает необходимость снижения характерных размеров ионного легирования с «проектными нормами», измеряемыми на сегодняшний день в нанометрах. Решение данной проблемы обуславливает необходимость генерации низкоэнергетических пучков однозарядных ионов тяжелых молекул с высоким содержанием легируемого элемента, а также развитие процессов иммерсионной ионной имплантации, когда обрабатываемое изделие помещается в плазму, а ионы ускоряются приэлектродном слое при подаче импульсного отрицательного смещения. Работы в данном направлении активно ведутся в научных лабораториях промышленных компаний (главным образом в США, Японии и ряде других стран). Именно поэтому доступ к открытой информации об этих разработках крайне ограничен. В России работы в направлении развития ионных источников для легирования полупроводников практически не ведутся. Исключения составляют научные группы, принимавшие участие в международных проектах, так или иначе связанных с взаимодействием с ведущими мировыми компаниями-производителями технологического оборудования для ионного легирования полупроводников. Одним из примеров деятельности в данной области является участие научных групп ГНЦ КИ-ИТЭФ и Института сильноточной электроники СО РАН в совместных проектах с Брукхейвенской национальной лабораторией США в проектах развития ионных источников для полупроводниковых имплантеров. В качестве промышленных партнеров в этих проектах выступали компании Axcelis Technologies, Inc и Varian-Applied Materials, Inc., обе США.

Основная задача сегодня заключается в возрождении в стране исследований, связанных с развитием экспериментальной базы ионных источников и имплантеров для легирования полупроводников и достижения в этих устройствах параметров ионных пучков на уровне мировых аналогов и превышения в дальнейшем этих параметров.

Работы в данной области следует сосредоточить в научных лабораториях, обладающих необходимым оборудованием и специалистами, которые не прерывали научно-исследовательскую деятельность в данной области в «кризисные» времена. Работы в данной области следует проводить в тесном сотрудничестве с зарубежными научно-исследовательскими организациями.

Главным исполнителем может быть Институт сильноточной электроники СО РАН, соисполнителями — ГНЦ КИ-ИТЭФ и другие организации.

Оценочная стоимость программы научных исследований по развитию и совершенствованию ионных источников для полупроводниковых имплантеров составляет 50–70 млн рублей в год в течение 5 лет.

Электростатические ускорители и ускорительная масспектрометрия

Среди факторов, определяющих интерес к электростатическим ускорителям (ЭСУ) как инструменту прикладных исследований и пучковых технологий можно назвать следующие:

- высокая энергетическая однородность ускоренного пучка (до несколько сотен эВ) позволяет получать на физической мишени ионные пучки высокой интенсивности микронных и субмикронных размеров;
- широкий спектр ускоряемых ионов;
- возможность оперативного изменения сорта ускоряемых частиц;
- ускорители данного типа, обеспечивают ионные токи в пределах от $10E^{-11}$ до $10E^{-2}$ А;
- плавная регулировка ускоряемого напряжения в диапазоне от нескольких сотен кВ до нескольких МВ;
- компактность, простота обслуживания, надежность, малое энергопотребление, потребляемая мощность — несколько десятков кВт.

Несомненным лидером в мире по числу ЭСУ являются США (405 ед.) и страны западной Европы: Германия (80 ед.), Англия (61 ед.) и Япония (49 ед.). По данным на 2008 г., в РФ было 6 ЭСУ. Западные фирмы ежегодно производят от 5 до 8 различных типов ЭСУ.

Значение ЭСУ в современных наукоемких технологиях весьма велико. В промышленно развитых странах сложился научно-производственный комплекс, включающий в себя производство ЭСУ (фирмы NEC, High Voltage и др), прикладные исследования и потребителей научной продукции в различных сферах человеческой деятельности: от промышленности до медицины.

В настоящее время получили развитие новые методы исследования с использованием ЭСУ, в частности, ядерный микроанализ (ЯМ) и ускорительная масс-спектрометрия (УМС), характеризующиеся предельно высокой чувствительностью среди существующих аналогов. Возможность исследования одиночных ионов и их регистрации открывает перспективы применения УМС для определения наличия уникальных меток и веществ на уровне $1E-16$ [1]. Методика УМС нашла применение в археологии (датировка находок), биологии и медицине (микродозирование прототипов лекарств, диагностика *Helicobacter Pylori* и др.), климатических и экологических исследованиях [2-3]. Новые методы (ЯМ и УМС) получили широкое применение в биологии, медицине (микротомографии), фармакологии, геологии, экологии, материаловедении, микроэлектронике, космическом и реакторном материаловедении и др.

В настоящий момент в мире насчитывается около 100 лабораторий, использующих методы микроанализа в сочетании с техникой ядерного микрозонда. В России действует один 1 МВ-прибор производства ИЯФ в Новосибирске и один швейцарский 0,2 МВ MICADAS. В настоящий момент в мире наблюдается увеличение спроса различных стран на установки УМС, что обусловлено интенсивным развитием современных наукоемких технологий. Россия обладает достаточным научным потенциалом, чтобы составить конкуренцию на мировом высокотехнологичном рынке.

Предложение ЛНФ ОИЯИ

Спектр научно-технологических задач ЛНФ ОИЯИ и накопленный многолетний опыт предполагает развитие на основе ЭСУ таких уникальных научных направлений, как «Ядерные реакции с участием быстрых нейтронов» и «Микропучковая ионно-лучевая спектрометрия и масс-спектрометрия».

Для сохранения в дальнейшем лидирующих позиций в этих областях ядерно-физических исследований необходимо создание в ОИЯИ Центра нейтронных и ионно-лучевых исследований на основе ЭСУ.

Формирование такого центра позволит частично восполнить существующий недостаток перечисленных методов в РФ, откроет перспективы проведения новых уникальных экспериментов из списка наиболее востребованных реакций (Nuclear Data High Priority Request List [<http://w3.atomki.hu/atomki/IonBeam/icnmta/microprobefac.html>]) в интервале энергий нейтронов до ~20МэВ, позволит получить новую ценную информацию о механизмах протекания ядерных реакций с быстрыми нейтронами, структуре атомного ядра, процессах звездного нуклеосинтеза. Методы ядерного микроанализа и ускорительной масс-спектрометрии совместно с ионно-лучевыми методами исследования элементного состава дополняют стратегический технологический потенциал РФ и будут использованы для развития отечественной нанoeлектроники, бионанотехнологий, радиационной медицины, радиационного материаловедения и др. Комплексные исследования с использованием ЭСУ в рамках перечисленных научных направлений будут использованы, в частности, при разработке новых типов ядерных реакторов, перспективных космических, ракетных и радиоэлектронных технологий; для проведения уникальных высокоточных археологических, океанографических исследований и др.

ЛНФ ОИЯИ располагает необходимым ресурсным научным и кадровым потенциалом для круглосуточной эксплуатации нового ускорителя в ближайшие 20–30 лет. Планируемые к проведению международные конференции и совещания по ЭСУ-технике с учетом значимости и объема текущих научных задач позволят рассматривать ОИЯИ как центр компетенции в области техники ЭСУ и связанных с ней экспериментальных методов исследования.

Перечень требуемого оборудования:

— Ускоритель «HVE Singletron 6.0» с энергией до 6МэВ при токе пучка до 200 мкА при энергетическом разбросе 0,01%.

Предполагаемая стоимость ускорителя, укомплектованного модулем ионно-лучевых спектрометров (Coaxial and in-line positive ion accelerators) и масс-спектрометром типа (ME AMS System), включая затраты на строительство специализированного помещения, будет составлять порядка 10 млн долларов США.

Предложение АО ГНЦ РФ ФЭИ

Для более эффективного применения ионно-пучковых технологий в радиационном материаловедении необходимо создание в АО ГНЦ РФ ФЭИ центра имитационных исследований конструкционных материалов (ЦИ-МИС). Целью создания Центра является превращение ускорительного комплекса в материаловедческий комплекс мирового уровня, в котором будут проводиться работы по полному циклу имитационных испытаний радиационной стойкости новых конструкционных материалов для ядерных установок следующего поколения.

В задачи Центра входят: экспериментальное моделирование нейтронного реакторного облучения с помощью трех-пучкового высокодозного

облучения в ионных ускорителях (1); создание цифровых двойников конструкционных материалов, на основе разрабатываемых теоретических и математических моделей (2); исследование микроструктуры облученных образцов с помощью технологии, использующей фокусированные ионные пучки и электронную микроскопию (технология «ФИП-ЭМ») (3); установление механизмов и верификация моделей основных радиационных явлений; получение данных о диффузионных характеристиках элементов и точечных дефектов в новых конструкционных материалах (4).

Имитационные эксперименты по ионному облучению, проводимые на ЭСУ, имеют ряд преимуществ по сравнению с реакторными экспериментами, среди них:

- возможность получения экспрессной оценки радиационной стойкости конструкционных материалов и, прежде всего, их устойчивости к вакансионному и газовому набуханию, а также их структурной и фазовой стабильности под облучением;
- широкий диапазон температур и возможность быстрого набора высоких повреждающих доз более чем на два порядка быстрее, чем в активных зонах современных быстрых реакторов, высокие повреждающие дозы можно набирать за часы, а не за годы, как при нейтронном облучении;
- строго контролируемые условия облучения (температура, скорость набора дозы), что практически недостижимо при облучении в активной зоне реактора;
- облученные образцы нерадиоактивны;
- возможность облучения различными ионами поочередно или одновременно (включая облучение ионами гелия и протонами).

Создаваемый материаловедческий комплекс обеспечит жесткие требования к параметрам ионных пучков в процессе создания силовых полупроводников (СПП, энергия протонов в пределах 0,7–12 МэВ с интенсивностью ионного пучка от $1,10^{10}$ до $1,10^{13}$ на кв. см. с обеспечением требуемой равномерности потока частиц в рабочей зоне обработки). Освоение этой технологии позволит обеспечить выход СПП всех «традиционных» типов на мировой уровень по комплексу основных частотных характеристик и адаптацию отечественной электронной технологии к созданию высокотехнологичных полупроводниковых приборов новых поколений. Следует отметить, что технологических комплексов радиационной обработки, удовлетворяющих перечисленным требованиям в России в настоящее время нет.

Перечень требуемого оборудования:

1. Ускоритель SINGLETRON 6 MV для облучения образцов ионами водорода с энергиями до 6 МэВ.
2. Ускоритель SINGLETRON 2 MV для облучения образцов ионами гелия с энергиями до 2 МэВ.
3. Трех-пучковая мишенная камера для одновременного облучения образцов ионами трех типов.
4. Двухлучевой электронно-ионный микроскоп Helios NanoLab 660 FEI, США Приготовление «кросс-сечений» из облученных образцов конструкционных материалов.

Дополнительным основанием для закупки новых ускорителей в ГНЦ РФ ФЭИ и другого оборудования является укомплектованность квалифицированными кадрами коллектива по эксплуатации электростатических ускорителей и многолетний опыт проведения исследований на этом оборудовании.

[1] Н. И. Алиновский, А. Д. Гончаров, В. Ф. и др. Ускорительный масс-спектрометр СО РАН // Журнал технической физики. 2009. том 79. вып. 9.

[2] Е. А. Прокопьева, Е. В. Пархомчук, И. А. Соболев, А. М. Шестопалов. Разработка нового метода диагностики вирус-клеточного взаимодействия с помощью ускорительной масс-спектрометрии // Современные проблемы науки и образования. 2019. № 1.

[3] A. V. Selivanova, T. A. Trubitsyna, I. V. Voronova and all. Ultrasensitive detection of inhaled organic aerosol particles by accelerator mass spectrometry // Chemosphere. 2016. 159, 80–88.

5.2. Задачи развития промышленных ускорителей

Первой из задач, конечно, является разработка специализированных ускорителей для различных прикладных задач. К таким задачам прежде всего можно отнести разработку:

- ускорителей и ускорительных комплексов минимально допустимых габаритов (что приводит к уменьшению габаритов, массы и стоимости радиационной защиты и, соответственно, к снижению стоимости проекта);
- конверторов для генерации тормозного излучения; включая системы поворота, позиционирования и развёртки электронного пучка;
- систем выпуска частиц в мишенную камеру, в т. ч. в атмосферу;
- систем питания и управления ускорителей;
- систем позиционирования пучка;
- «подпучкового» оборудования;
- дозиметрических систем и систем радиационного контроля.

Из задач на перспективу следует указать изучение возможности использования новых сантиметровых частотных диапазонов для линейных ускорителей, что необходимо для минимизации ускорительных установок для медицинских ускорителей (прежде всего), инспекционных комплексов и систем неразрушающего контроля.

Не последняя по важности задача использования сверхпроводящих (СП) ускоряющих ВЧ систем для ПУЭ и ПУИ, в том числе на высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП). Новыми направлениями в развитии прикладных ЛУЭ является применение высокотемпературной («азотной») криогеники для нормально проводящих ускоряющих структур. Например, захлаживание медного ускоряющего резонатора 3 ГГц диапазона до температуры жидкого азота позволяет за счет увеличения проводимости снизить омические потери мощности в стенках примерно втрое. Также очень перспективным направлением является применение тепловых насосов для СП ускоряющих структур прикладных ЛУЭ.

Важнейшим направлением является развитие нормативной база (ГОСТов, методик и СНиПов) по использованию ускорителей в прикладных

целях, например, для стерилизации различных видов пищевой продукции и обеззараживания медицинских и бытовых отходов.

Практически важно массовое *развитие известных радиационных технологий* с использованием ускорителей электронов: стерилизация пищевой продукции, обеззараживание промышленных отходов и их иммобилизация, обеззараживание медицинских отходов и борьбы с внутрибольничной инфекцией, что особенно важно в настоящее время, стерилизация упаковки. Сюда же относится разработка томографических систем неразрушающего контроля.

Разработка промышленных ускорителей должна быть согласована с созданием радиационных технологий и поэтому вестись совместно с материаловедческими, химическими, биологическими, медицинскими и другими организациями. Эта работа также включает создание подпучкового оборудования, например, специальных камер («реакторов») для проведения модификации жидких и газообразных субстанций.

5.3. Перспективы развития радиационной терапии

Онкологические заболевания являются одной из главных причин смертности человека. Согласно прогнозу Всемирной организации здравоохранения, к 2030 году смертность от онкологических заболеваний может выйти на первое место в мире. В Российской Федерации смертность от онкологических заболеваний составляет более чем 300 тыс. человек в год, а на учете состоят более 3,2 млн онкологических больных. По оценкам медиков, число пациентов в России, для которых лучевая терапия с использованием пучков протонов может дать существенные преимущества, оставляет более 50 тысяч больных в год. Поэтому развитие современных и эффективных решений для лечения онкологических заболеваний является крайне актуальной задачей на многие годы вперед.

Использование пучков протонов и ядер легких элементов (адронов) в клинике лучевой терапии рака по ряду причин является более предпочтительным по сравнению с фотонным облучением (гамма- и рентгеновским излучением) и пучками ускоренных электронов. Главным образом это связано с более выгодным распределением поглощённой дозы от глубины проникновения заряженных частиц в облучаемую область, в отличие от традиционных методов лучевой терапии. Поэтому в нередких случаях применение протонной терапии является единственным способом лечения, на который может рассчитывать пациент. Особенно данный метод играет решающую роль для детской онкологии, а также когда опухоль располагается вблизи критических органов или имеет сложную форму. Поэтому использование пучков протонов и адронов является признанным во всем мире наиболее эффективными и щадящими способом по сравнению с другими методами лечения онкологии.

На сегодняшний день уже более 200 000 пациентов получили лечение на протонных пучках в более чем в 100 центрах по всему миру. Одновременно с этим еще несколько десятков специализированных центров протонной и ионной терапии находятся на различной стадии ввода в действие.

Таким образом, развитие технологий в области протонной лучевой терапии является очень важной и актуальной задачей на много лет вперед.

Опыт ОИЯИ

Первые сеансы клинического применения пучка протонов, генерируемых Фазотроном ОИЯИ, были начаты в 1967 г. За все время курс протонной лучевой терапии на пучке Фазотрона прошли около 1 300 пациентов (в том числе и нероссийских граждан из стран-участниц ОИЯИ) с различными новообразованиями. В Дубне впервые в России была реализована методика трехмерной конформной протонной лучевой терапии.

ОИЯИ, обладая многолетним опытом создания ускорителей и физических установок для фундаментальных и прикладных исследований, разрабатывает медицинскую ускорительную технику, сотрудничая с фирмой ИВА, мировым лидером в области создания установок для протонной терапии, и осуществляет разработку, сборку, настройку и запуск специализированных медицинских циклотронов для этих целей. Более 10 лет назад ОИЯИ и ИВА совместно разработали проект первого в мире сверхпроводящего углеродного циклотрона С400. В настоящее время этот ускоритель сооружается в г. Каен, Франция.

Примерно в то же время были проведены расчеты и модернизация серийного протонного циклотрона С230. Первый экземпляр такого ускорителя С235-V3 был собран, настроен и запущен в ОИЯИ в 2012 г. В настоящее время С235-V3 вошел в состав одного из первых в России медицинского центра с протонной терапией — Федерального высокотехнологического центра медицинской радиологии (ФВЦМР) ФМБА России в г. Димитровград.

ОИЯИ обладает большим опытом и в области медико-биологических исследований аспектов протонной терапии. Лаборатория радиационной биологии (ЛРБ ОИЯИ) проводит исследования действия протонных пучков на различные биологические объекты с целью изучения закономерностей и механизмов формирования молекулярных нарушений в генетическом аппарате клеток человека и животных, образования различного рода мутаций, проводит изучение нейрорадиобиологических эффектов облучения.

Применение предложенного подхода, обеспечивающего существенное повышение биологической эффективности пучков протонов и гамма-терапевтических установок, значительно сближает области использования протонных и углеродных ускорителей для терапевтических целей.

Многолетний практический опыт лечения онкологических больных протонными пучками, команда подготовленных специалистов в области радиационной медицины, наличие радиологического отделения в МСЧ-9 ФМБА России создают условия для продолжения и развития адронной терапии на базе ОИЯИ в ближайшие годы. Лечение больных с участием специалистов ОИЯИ должно естественным образом сочетаться с медико-биологическими исследованиями в Институте.

Медицинский центр

Последние результаты исследования действия протонных пучков на различные биологические объекты с целью изучения закономерностей и механизмов формирования молекулярных нарушений в генетическом аппарате клеток человека и животных обещают прорыв в эффективности

использования протонных пучков для лечения онкологических заболеваний. Для их продолжения необходим *медицинский центр* с современным и надежным протонным ускорителем, который должен быть сертифицирован для проведения облучения онкологических больных. Мировой опыт создания подобных медицинских центров показывает, что лечение больных и проведение научных исследований на протонных пучках могут успешно сочетаться на одном и том же ускорителе, используя дополнительные выходы пучка и разнося по времени облучение больных и научные исследования.

Наиболее быстрым и дешёвым вариантом создания компактного медико-биологического протонного центра мог бы стать, например, компактный модуль «под ключ» IBA Proteus ONE, прошедший всю необходимую сертификацию в России. Создание научно-исследовательского медико-биологического радиационного центра в ближайшие 2–3 года явилось бы важным шагом в обеспечении необходимой медицинской помощи онкологическим больным северо-западной части Московской области, а также стран-участниц ОИЯИ, и могло бы стать пилотным проектом для создания серии компактных и относительно недорогих центров протонной терапии для ведущих онкологических клиник России и стран участниц ОИЯИ.

Для быстрого и недорогого решения при создании протонных онкологических центров требуются проверенные, надежные и, что очень важно, полностью сертифицированные в России ускорители. Таким условиям сегодня удовлетворяют протонные центры IBA. В тоже время, в России в перспективе необходима разработка собственной линейки ускорителей как для протонной терапии, так и для производства изотопов для ядерной медицины.

Протонная терапия требует генерировать пучок протонов, ускоренных до энергии в диапазоне 60–230 МэВ в зависимости от типа и глубины залегания злокачественного образования. Энергия протонов в 60 МэВ используется для облучения пациентов с меланомой глаза. Энергия 230 МэВ покрывает весь возможный спектр применения протонов для лечения. Существуют различные способы ускорить протоны до этой энергии. Так, на настоящее время используются три типа ускорителей: циклотрон, синхроциклотрон и синхротрон. Также ведутся разработки линейных ускорителей для протонной терапии. Каждый из типов ускорителей имеют свои преимущества и недостатки.

Так, к преимуществам циклотрона относятся простота ускорителя, использующего постоянное магнитное поле и ускоряющую систему с постоянной частотой, а также высокий ток пучка. Недостатком является возможность вывода единственной фиксированной энергии, поэтому для получения меньших энергий приходится использовать деградер, ухудшающий параметры пучка. Синхротрон обладает высоким качеством пучка, при этом меньшим средним током пучка, однако является сверхкомпактным решением, чем заслужил популярность в настоящее время.

Текущее состояние дел таково, что технологические и инженерные решения, применяемые при проектировании и создании ускорителей, которые устанавливаются сегодня в адронных центрах, как правило, сильно устарели. Это связано с тем, что проектирование этих машины осуществлялось более 10–20 лет назад, и с тех пор не было внесено существенных изменений.

Сегодня ОИЯИ обладает всеми современными технологиями, квалифицированными кадрами и серьезным международным авторитетом в области создания ускорительной техники. Все это дает возможность произвести расчеты и моделирование ускорителя на гораздо более высоком качественном уровне. Это позволит в течение 2–3 лет сконструировать более эффективную, надежную, а главное, дешевую машину, которая впоследствии станет базовой для протонной терапии в России.

В настоящее время в ЛЯП ОИЯИ ведутся разработки циклотрона для протонной терапии. Существующие циклотроны Varian и IBA C235 являются разработками 90-х годов, и в настоящее время прогресс в области сверхпроводимости и техники генераторов ВЧ позволяет создать значительно более дешевую, надежную и компактную установку.

Существующие современные проекты циклотронов для протонной терапии нацелены на то, чтобы сделать циклотрон максимально компактным, снизив его размер и вес за счет увеличения магнитного поля до 3 Тесла в центре. Однако, такой подход ведет к тому, что значительно растет необходимый ток в основных обмотках, а это требует увеличения количества сверхпроводника, циклотрон становится гораздо сложнее в настройке и требует существенно больших точностей при изготовлении, что удорожает проект.

Проект SC200, совместно разработанный с институтом ASIPP (Hefei, China), показал, что циклотрон с высоким центральным полем лишается всех преимуществ данного типа ускорителей и при этом по компактности все равно уступает синхроциклотронам. Поэтому было принято решение сохранить преимущества, которыми обладает циклотрон перед другими типами ускорителей, а также использовать современные методы расчетов, позволяющие добиться оптимального взаимодействия всех систем ускорителя.

Основные параметры ускорителя SC230sqf

Тип магнита — компактный, СП обмотка, тёплое ярмо

Конечная энергия — 230 МэВ

Радиус полюса — 1 050 мм

Среднее магнитное поле (центр) — 1,8 Тл

Габариты (высота × диаметр) — 1,7 × 3,7 м

Вес — 90 тонн

Частота ВЧ системы — 115 МГц

Номер гармоники — 4

Количество ускоряющих зазоров — 4

Напряжение, центр/зона вывода — 35/90 кВ

Мощность ВЧ системы — 40 кВт

Количество оборотов — 600

Ток пучка — 1,0 мкА

Тип системы вывода — ESD

Ускоритель с такими параметрами может стать самым дешевым и энергоэффективным ускорителем для протонной терапии за счет низкого энергопотребления ускоряющей системы и сверхпроводящей обмотки. В проекте заложены консервативные и отработанные решения, а также инновационные решения, как например, некруглая форма обмотки. Данная концепция

циклотрона была опубликована и представлена на ускорительных конференциях.

В декабре 2019 г. между Госкорпорацией «Росатом» и ОИЯИ было подписано Соглашение о научно-техническом сотрудничестве. В рамках этого сотрудничества, в частности, предусматривается разработка универсального циклотрона на основе ВТСП для протонной терапии на базе проекта SC230sqg. Эта задача может быть реализована в ближайшие несколько лет совместными усилиями ОИЯИ и НИИЭФА. ВТСП циклотрон SC230sqg впоследствии может стать базовым ускорителем для протонной терапии в России.

В медицинских приложениях следует также начать освоение «новых» и забытых областей применения ускорителей: — лучевая терапия (в том числе — системы типа «кибер-нож» и установки для интраоперационной терапии), новые области медицинских технологий (коронарография, неврология и т. д.); инспекционные комплексы, в особенности — двухэнергетические; системы неразрушающего контроля, в том числе томографические и двух-трех энергетические с «продвинутыми» системами визуализации.

5.4. Рынок промышленных ускорителей

Наиболее востребованной ускорительной технологией является сегодня облучение полимерной изоляции проводов и кабелей для улучшения их потребительских свойств (увеличение механической прочности, термо- и химической стойкости, улучшение электроизоляционных свойств, особенно при повышенных температурах и т. п.). Следующее по объёму выпускаемой продукции — быстро растущее производство кабелей для нефтепогружных насосов в связи с тем, что возрастают требования к кабелям, в первую очередь, к их максимальной рабочей температуре, возрастающей из-за увеличения глубин скважин. Общие потребности российского рынка — около 10 ускорителей с максимальной энергией 2,5–3 МэВ и мощностью в пучке до 100 кВт.

Еще одна перспективная область применения ускорителей в промышленном производстве — радиационная вулканизация каучуков в шинном производстве. Наиболее эффективно сочетание радиационной и термической вулканизации на разных стадиях производства: предварительное облучение заготовок отдельных элементов шин — протекторов, каркасов и т. п. — перед конечной сборкой, формованием шин и их термовулканизацией. Такая обработка в результате появления после облучения пространственной сетки углеводорода позволяет существенно увеличить когезионную прочность сырых смесей, сократить общую длительность изготовления покрышек, экономить дорогостоящее сырье. Одновременно с увеличением рентабельности производства имеет место улучшение физико-химических и механических свойств облученной резины благодаря структурным изменениям углеводородов каучука. Износостойкость шин, полученных радиационным способом, выше эталонных. При затратах на установку ускорителя в линию производства шин порядка 1 млн долларов США прибыль за счет экономии сырья, уменьшения веса и улучшения

качества шин может составлять до 250 тыс. долларов США в квартал (по данным китайских шинных заводов). Общие потребности рынка — до 4 ускорителей с максимальной энергией электронов 0,5–0,7 МэВ при мощности пучка до 50–60 кВт.

Радиационная сшивка полимеров применяется также в производстве листового поропласта (особенно на основе вспененного полиэтилена). Этот очень легкий материал (его плотность составляет всего 20–100 кг/м³) имеет высокие механические, амортизационные, звуко- и теплоизоляционные свойства, обладает повышенной химической стойкостью, низким водопоглощением, не токсичен. Перечисленные свойства позволяют широко использовать радиационно-сшитые поропласты в промышленном и гражданском строительстве для тепло- и звукоизоляции стен, потолков и кровли, теплоизоляции трубопроводов холодного и горячего водоснабжения, в производстве мягкой мебели. Общие потребности рынка — 2–4 ускорителя с максимальной энергией электронов до 2,5 МэВ и мощностью пучка до 100 кВт.

Другим широко используемым процессом в радиационно-химических технологиях, где используются промышленные ускорители электронов, является производство термоусаживаемых изделий. При этом реализуется так называемый эффект памяти в прошедших облучение полимерных пленках, трубках, лентах, мешках и манжетах. Общемировой рынок такого рода продукции составляет на сегодняшний день около 2 млрд долларов США. Производство термоусаживаемых изделий в России на сегодняшний день развито слабо. Общие потребности рынка — 2–4 ускорителя с энергией электронов от 1 до 2,5 МэВ (в зависимости от типа продукции) и мощностью пучка до 100 кВт.

Растёт в России интерес к использованию ускорителей электронов для радиационной дезинсекции зерна, что объясняется ростом его экспорта. Одной из важнейших причин потери зерна при хранении является повреждение его насекомыми-вредителями. Несмотря на ведущуюся борьбу с насекомыми, ими уничтожается от 5 до 10% хранящегося зерна. Борьба с вредителями зерна в хранилищах ведётся в основном химическим способом — обработкой зерна и хранилищ ядохимикатами. Этот метод имеет ряд существенных недостатков: загрязнение окружающей среды, наличие в зерне некоторого остаточного уровня ядохимикатов, неэффективность действия метода на скрытую форму зараженности и другие. Самым перспективным методом дезинсекции зерна является радиационный. При радиационной дезинсекции зараженное зерно облучается ионизирующим излучением до стерилизующих доз, при которых прекращается размножение насекомых и значительно сокращается продолжительность их жизни. При этом в зерно не вводятся никакие вредные вещества, оно не теряет свои пищевые качества и готово к употреблению непосредственно после обработки.

Для обеспечения потребностей припортовых элеваторов, работающих на экспорт зерна, может потребоваться до 4 ускорителей с максимальной энергией электронов от 2 до 5 МэВ и мощностью пучка 100–150 кВт.

Продвижение прикладных ускорителей и радиационных технологий, по крайней мере, на внутреннем рынке должно, казалось бы, сопровождаться

ростом производства отечественных ускорителей. К сожалению, наблюдается обратное. Например, недавно «Росатом» и его дочерние структуры при строительстве центров радиационной стерилизации переориентировались на канадские ускорители. Росграница и МВД долгое время закупали мобильные досмотровые комплексы Smiths и Smiths-Heimann, которые теперь не обслуживаются из-за введённых санкций. Излишне говорить о предпочтениях Минздрава и ФМБА при закупках ускорителей для лучевой терапии. В этой связи необходима поддержка и защита российских разработок. И это при том, что российские предприятия в состоянии удовлетворить запросы внутреннего рынка и обеспечить профилактическое обслуживание поставленных установок.

Ещё одна серьёзная проблема, сдерживающая развитие отечественных радиационных технологий, — разработка и внедрение ГОСТов и методических рекомендаций по применению радиационных технологий, особенно в пищевой промышленности, медицине и при борьбе с бытовыми и промышленными отходами. Введение в России стандартов контроля качества и параметров пучка (аналог, например, ISO/ASTM 51649:2005(E) Standard) крайне необходимо.

Глава 6. Коллективные методы ускорения

6.1. Кильватерное ускорение электронов

Ускорение и фокусировка частиц в плазме привлекательны из-за больших электрических и магнитных полей, которые плазма может выдерживать без разрушения. Типичные поля в экспериментах составляют 1–100 ГВ/м. Это поле, имеющее правильную фазовую скорость, нужно с высокой эффективностью и с высокой частотой повторения создать на большой длине. Для высокого качества ускоренного сгустка необходима высокая точность контроля его формы и параметров ускоряющей плазменной структуры. Характерные размеры ускоряемого сгустка — микроны и сотни микрон, поэтому для его создания, наряду с традиционными фотопушками, используются новые методы, при которых сгусток формируется непосредственно в плазме. Все это и является предметом исследований в настоящее время в мире.

В последнее время под плазменными методами ускорения понимают, в первую очередь, кильватерное ускорение, при котором поле в плазме создается движущимся сквозь неё сгустком частиц или лазерным импульсом. Этот метод пока применяют только к ускорению легких частиц (лептонов), так как преимуществ при ускорении нуклонов у него пока нет. Есть и некильватерные плазменные методы, как правило, связанные с воздействием мощного лазерного импульса на твердую мишень. Здесь, наоборот, в первую очередь исследуется ускорение ионов.

Заряд сгустков в кильватерном ускорителе обратно пропорционален ускоряющему полю и не превышает единиц нанокулонов, а частота следования невелика (десятки килогерц максимум). Этим определяются их потенциальные применения. Компактный коллайдер сверхвысокой энергии на основе плазменных методов по-прежнему остается в неопределённо далеком будущем. Зато в близкой перспективе есть компактные источники рентгеновского и гамма-излучения на основе сверхкоротких электронных сгустков с энергией до 10 ГэВ. Кроме того, плазма в перспективе может предложить отдельные элементы ускорителей: инжекторы, устройства для фокусировки или группировки, генерации и(или) ускорения короткоживущих частиц, торможения пучка (beam dump) и другие.

Россия в развитии плазменных методов ускорения «задержалась на старте» (который произошел в эпоху распада СССР) и сейчас сильно отстает от ведущих мировых держав. В этой ситуации, чтобы получить максимально возможную выгоду от научных находок в этой области, необходима специфическая тактика, разная по различным направлениям.

6.2. Лазерное кильватерное ускорение

Это направление развивается в десятках лабораторий по всему миру, в том числе есть несколько крупных проектов. После достижения рекордных 8 ГэВ на 20 см в LBNL, основной целью стали энерго-разброс (сейчас достигнут менее 1%), частота повторения (килогерцы),

воспроизводимость и надежность (24/7). Ключи к успеху — хорошая лазерная система, понимание и контроль происходящих в плазме явлений. Уже просматриваются перспективы создания уникальных рентгеновских и гамма-источников на основе лазерного кильватерного ускорителя, и новые крупные проекты затеваются с обещанием в итоге создать центры коллективного пользования.

В этой области особенно хорошо видно, что значительные усилия и средства научного сообщества тратятся на анализ разных вариантов решения проблем, из которых потом выбирается наилучший и становится общепринятым. Отставание на шаг позволит сэкономить на переборе вариантов и сосредоточиться на освоении уже признанных технологий. Отсюда рекомендация по развитию: нужно стимулировать и финансировать освоение методов и технологий, позволяющих дойти до приложений (в перспективе — коммерческих) кратчайшим путем. Современная система финансирования науки не способствует движению по этому пути. Всем финансирующим организациям требуется новый результат мирового уровня и публикация в Q1, что стимулирует отклоняться от главного направления и заниматься экзотикой, уникальной в силу её непопулярности. Нужна политическая воля, чтобы профинансировать проект, результатом которого будет повторение уже опубликованных результатов, но в отечественной лаборатории и по возможности на отечественном оборудовании. Целью такого проекта могла бы быть демонстрация ускорения 10 пКл электронных сгустков до 1 ГэВ с энергоразбросом менее 1%, нормализованным эмиттансом менее 1 мм мрад и частотой повторения десятки Гц. Каждый из перечисленных параметров по отдельности уже где-то продемонстрирован и превзойден, но их достижение в комплексе даст необходимый опыт для следующего шага к созданию центра коллективного пользования (ЦКП).

В России есть одна научная лаборатория, обладающая достаточными научными компетенциями, чтобы начать такой проект прямо сейчас, в ИПФ РАН (Нижний Новгород). В мире также широко известны работы сотрудников ФИАН, посвящённые повышению эффективности ускорения в лазерно-плазменных каналах. Нарботки сотрудников ФИАН по методам уменьшения энергетического разброса в настоящее время повсеместно используются в лабораториях Японии, США, европейских стран. В последние 5–7 лет существенные экспериментальные результаты получены сотрудниками РФЯЦ ВНИИТФ. Эти работы сложно назвать пионерскими, однако к настоящему времени в ВНИИТФ создана хорошая экспериментальная база, и работает молодая амбициозная команда исследователей. Для гармоничного развития этого научного направления нужно, чтобы эта тематика также развивалась в нескольких лабораториях меньшего масштаба, ведущих теоретические или вспомогательные экспериментальные исследования на небольших установках в рамках проектов масштаба инициативных грантов РФФИ. Такие лаборатории (с наработками и научными школами) есть в ИЛФ СО РАН, ИЯФ СО РАН, ОИВТ РАН, ФИАН, МГУ, МИФИ.

6.3. Кильватерное ускорение с электронными и позитронными драйверами

Это направление исторически развивалось и развивается ради единственной цели — линейного коллайдера нового поколения. Эксперименты требуют высококачественного электронного (позитронного) пучка-драйвера и поэтому привязаны к крупным ускорительным лабораториям. Лидер направления — эксперимент FACET в SLAC. Эксперименты с электронными и позитронными драйверами дают ценную информацию о свойствах кильватерной волны в различных режимах и о взаимодействии с ней пучков (в том числе ускоряемых), поэтому их география расширяется, несмотря на отсутствие близких промежуточных целей.

В России экспериментов с такими драйверами нет, и начинать их нет смысла ввиду больших начальных затрат при неясных конечных целях. Участвовать в этом направлении достаточно на уровне теоретической поддержки, которая позволит при незначительных затратах быть в курсе новых находок и тенденций. Теоретическая группа требуемой квалификации есть (в ИЯФ СО РАН), она активно сотрудничает с зарубежными группами, ведущими такие эксперименты.

6.4. Кильватерное ускорение с протонными драйверами

Единственный в мире эксперимент AWAKE в ЦЕРН имеет целью вывести лептонные пучки на уровень энергии, достижимый в протонных синхротронах. Перспективы создания электрон-позитронного коллайдера здесь не просматриваются, однако плазменный ускоритель может открыть новые возможности для лептон-адронных коллайдеров и для экспериментов с неподвижными мишенями. Все дело в его цене и сложности. Плазменный ускоритель будет представлять интерес, если он будет относительно недорогой добавкой к существующему протонному синхротрону.

Протонных пучков, способных выполнять роль драйвера, в мире немного (требуется энергия масштаба ТэВ), поэтому, по-видимому, эксперимент AWAKE до появления физических приложений этого метода останется единственным в мире. Эксперимент проводит одноименная коллаборация, в которую входит и Россия теоретической группой ИЯФ СО РАН. Эта группа предложила ключевые идеи, сделавшие возможным успех первой очереди экспериментов (демонстрацию контролируемой самомодуляции протонного пучка и пригодности его кильватерной волны для ускорения электронов), и продолжает играть определяющую роль в планировании будущих и осмыслении проведенных экспериментов. Коллаборация открыта для новых участников, и участие в ней российских экспериментальных групп будет только приветствоваться.

6.5. Некильватерные плазменные методы ускорения

По своей географии, статусу и перспективам развития это направление близко к лазерному кильватерному ускорению, так как тоже привязано к хорошим лазерным системам. Его перспективные применения — протонная

терапия рака, ядерная фармакология, протонная радиография и другие. Более подробный обзор этого направления (если необходимо) могли бы сделать специалисты из ИПФ РАН или ФИАН.

6.6. Повышение эффективности лазерно-плазменного ускорения

Одной из ключевых проблем, из-за которых ускорение в плазме (предложенное еще Я.Б. Файнбергом в конце 1950-х годов) не смогло до сих пор перейти из разряда «новых методов ускорения» к категории действующих установок, является низкое качество ускоренного пучка по сравнению с традиционными высокочастотными ускорителями. Спектр пучка на выходе плазменного канала LPWA в несколько раз шире, чем в ВЧ ускорителе на ту же энергию. Коэффициент захвата в режим ускорения при внешней инжекции и коэффициент токопрохождения составляют несколько процентов. Скважность работы таких систем пока составляет, в лучшем случае, единицы Гц. В мире предложено около десяти схем инжекции и пре-модуляции пучка, позволяющих снизить энергетический спектр пучка до 3–4% при энергии около 1 ГэВ. Такие спектры неприемлемы для пучков, которые предполагаются для инжекции в современные коллайдеры или источники синхротронного излучения. Одними из мировых лидеров в области улучшения качества пучка при LPWA являются «выпускники» ФИАН, работающие в Японии и США. Некоторые полезные результаты были получены в МИФИ. Однако экспериментальные работы до LPWA электронов только несколько лет назад начались в РФЯЦ ВНИИЭФ. Работы по пучковому варианту PWA для электронов в стране вообще не проводятся.

Необходимо:

- развитие экспериментов по LPWA;
- начало экспериментов по пучковому PWA;
- развитие метрологической и диагностической аппаратуры для PWA;
- развитие и экспериментальная проверка новых идей по уменьшению спектра пучка и повышению коэффициента захвата в режим ускорения;
- начало рассмотрения перспективных областей применения LPWA, в том числе — компактных установок («настольного ускорителя»);
- развитие технологии лазеров с большей частотой повторения, чем у доступных сейчас для экспериментов по LPWA;
- развитие работы по кильватерному ускорению.

Глава 7. Разработка программного обеспечения для проектирования ускорителей заряженных частиц и управления ими

В связи с чрезвычайно большой стоимостью коммерческих пакетов, предназначенных для электродинамических, тепловых и механических расчетов (CST Studio — 50–80 кЕ, Comsol — 30–50 кЕ, ANSYS — 10–100 кЕ на одну машину) необходима разработка отечественных аналогов. Пакет программ должен включать в себя модули для:

- электродинамического моделирования (поиск собственных значений, моделирование во временной области, моделирование в частотной области, четырехполюсники, импедансы и т. д.);
- механического моделирования;
- термодинамического моделирования.

Ситуация с программами для моделирования динамики частиц в стране значительно лучше, особенно для линейных ускорителей. Однако необходимо разработать относительно универсальный пакет для циклических ускорителей, включающий, в том числе, возможность расчета динамики поляризованных частиц (спиновой динамики) и их взаимодействия с камерой.

Необходимо также разработать универсальную (по возможности) библиотеку программ для основных интерфейсов систем управления настройкой пучка в ускорителе, контроля и коррекции режимов работы ускорителя и его элементов (фокусирующая и ускоряющая системы, системы вакуумной откачки и охлаждения, системы контроля радиационной обстановки и автоматической блокировки и т. д.).

Глава 8. Центры компетенций

Для концентрации усилий по развитию ускорительной техники целесообразно создать в РФ несколько центров компетенций по ключевым направлениям физики и техники ускорителей заряженных частиц с развитием в них базовых технологий.

В области ионных ускорителей такими центрами могли бы быть:

1) по ионным источникам — головной институт ОИЯИ в сотрудничестве с ИПФ РАН (СВЧ системы для ЭЦР), ИЯИ РАН (источник поляризованных ионов, источник отрицательных ионов) и ИТЭФ (лазерные источники);

2) по ионным линейным ускорителям — ИТЭФ в сотрудничестве с ОИЯИ, ИЯИ РАН, МИФИ;

3) по кольцевым ионным ускорителям — ОИЯИ в сотрудничестве с ИФВЭ, ИТЭФ, ИЯФ СО РАН (системы электронного охлаждения);

4) по ионной имплантации — ИСЭ СО РАН в сотрудничестве с ИТЭФ;

5) по технологиям ВЧ сверхпроводимости — ОИЯИ в сотрудничестве с МИФИ, ИТЭФ, ИЯФ им. Будкера, и др.; поскольку за этой технологией будущее ускорительной техники, необходимо в срочном порядке, не дожидаясь официального утверждения какого-либо проекта с использованием данной технологии, создавать в МИФИ учебный центр, дающий соответствующую подготовку специалистам-ускорительщикам.

6) по ускорителям электронов — ИЯФ СО РАН.

Данные центры должны получать целевое финансирование в рамках *Федеральной программы развития перспективных направлений ускорительной техники*, направленной на отработку технологий, необходимых для осуществления различных проектов на базе ускорителей заряженных частиц.

Глава 9. Заключение

Предлагаемая программа развития передовых ускорительных технологий в Российской Федерации охватывает весь спектр современных технологий, включая:

- Ускорители и коллайдеры протонов и тяжелых ионов,
- Ускорители и коллайдеры электронов и позитронов,
- Источники синхротронного излучения и лазеры на свободных электронах,
- Ускорители для промышленных применений,
- Коллективные методы ускорения,
- Технологии высокочастотной сверхпроводимости и производства сверхпроводящих ускорительных резонаторов,
- Источники высокочастотного и сверхвысокочастотного питания для ускорителей заряженных частиц,
- Разработку программного обеспечения для проектирования ускорителей заряженных частиц.

Развитие представленных в программе технологий ускорения пучков заряженных частиц призвано восстановить в РФ и поднять на современный уровень экспериментальную базу исследований по ядерной физике и физике частиц на основе ускорителей, создать условия для её непрерывного развития, оперативно и адекватно отвечать на технологические вызовы современного мира, сохранить активное международное сотрудничество.

Часть II. Проекты на основе ускорителей, которые предлагается развивать в РФ в 2020–2030 гг.

Глава 1. Ускорительный комплекс на встречных пучках NICA

1.1. Цели проекта

Роль коллайдеров или ускорителей на встречных пучках, как их назвали создатели первых таких физических установок, сегодня в физике высоких энергий неоспорима. С момента рождения первых коллайдеров (1965, электрон-электронные коллайдеры, Институт ядерной физики СО ФН СССР и Стенфорд-Принстонская группа в национальной лаборатории SLAC, США) доля новых физических открытий, сделанных в коллайдерных экспериментах, становится все более весомой. Достаточно сказать, что из 16 конститuentов Стандартной модели (СМ) 7 открыты в коллайдерных экспериментах: Charm (1974), Bottom (1977) и Top (1995) кварки, Tau-lepton (1975), gluon (1979) и, наконец, Higgs boson (2012), завершивший построение СМ. Его открытие было главным результатом создания Большого адронного коллайдера (Large Hadron Collider — LHC) в ЦЕРН. И, естественно, давно возник вопрос — а что дальше? Что «beyond Standard Model»?

Наиболее очевидное решение — сооружение коллайдеров с ещё более высокой энергией (проект Future Circular Collider — FCC) и светимостью (проект High Luminosity — HL-LHC). Оба проекта в ЦЕРН. Линейные электрон-позитронные коллайдеры, предложенные еще в 1970 году в ИЯФ СО АН СССР и разрабатываемые сегодня в ЦЕРН и КЕК (Япония) в качестве фабрик Хиггс-бозонов. Но есть и другая прорывная задача — генерация сверхплотной барионной материи при столкновениях тяжелых ионов. Такие эксперименты ведутся с конца 1990-х в ЦЕРН на пучке синхротрона SPS («fixed target experiment») и Брукхейвенской лаборатории (США) на ионном коллайдере RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider).

Практически одновременно предложены и разрабатываются два новых проекта: Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR) в Германии и Nuclotron-based Ion Collider Facility (NICA) в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) в Дубне. Первый проект предназначен для исследований взаимодействия пучка тяжелых ионов сверхпроводящего синхротрона SIS-100 (Superconducting Ion Synchrotron) с ядрами атомов неподвижной мишени — эксперимент «Compressed Baryonic Matter» (CBM) с максимальной энергией до 4,8 ГэВ/нуклон.

Проект NICA имеет целью сооружение комплекса ускорителя с коллайдером тяжелых ионов, имеющих кинетическую энергию 1–4,5 ГэВ/нуклон (полная энергия сталкивающихся нуклонов в системе их центра масс (с.ц.м.) составляет $\sqrt{s} = 4\text{--}11$ ГэВ/нуклон).

1.2. Схема комплекса и основные параметры

Основным мотивом для создания комплекса NICA являлись исследования фазовых переходов в сильновзаимодействующей материи. И тем не менее, комплекс с самого начала разрабатывался как многофункциональная исследовательская лаборатория, призванная обеспечить выполнение широкой программы исследований фундаментального и прикладного характера, а также стать базой для подготовки высококвалифицированных специалистов для стран-участниц ОИЯИ.

В состав комплекса (рис. 1.1) входят два линейных ускорителя (один для легких ионов, второй для тяжелых), Бустер-синхротрон, который ускоряет ионы до промежуточной энергии, достаточной для их полной обдирки с эффективностью около 90%, основной синхротрон Нуклотрон, обеспечивающий ускорение частиц до энергии эксперимента, и два кольца Коллайдера с двумя точками встречи пучков, а также каналы транспортировки пучков и зоны для проведения экспериментов на фиксированной мишени. Оба синхротрона и Коллайдер (табл. 1.1) имеют сверхпроводящие фокусирующие системы, магниты которых изготовлены на основе оригинальной технологии, разработанной в ОИЯИ. Отдельные залы в пристройках к зданию 1, где расположены оба синхротрона, отведены для прикладных исследований.



Рис. 1.1. Схема комплекса NICA: два линейных ускорителя (Injection Complex), Бустер (Booster) и Нуклотрон (Nuclotron), расположенные в существующем здании Синхрофазотрона (1), каналы транспортировки пучка к детекторам для экспериментов на фиксированной мишени (BM@N) в существующем экспериментальном корпусе (2), новое здание для размещения колец коллайдера (3) с павильонами для двух детекторов — MPD (4) и SPD (5) и здание системы электронного охлаждения (6)

Таблица 1.1

Основные параметры синхротронов и Коллайдера NICA

Ускоритель	Бустер	Нуклотрон	Коллайдер
Параметр	Значение		
Ускоряемые частицы	ионы, p [†] , d [†]		
Максимальная энергия ионов ¹⁹⁷ Au ³¹⁺ , ГэВ/н	0,578 (¹⁹⁷ Au ³¹⁺)	3,81 (¹⁹⁷ Au ⁷⁹⁺)	4,5 (¹⁹⁷ Au ⁷⁹⁺)
Интенсивность пучка ¹⁹⁷ Au, ионов/цикл	2,5·10 ⁹	1,5·10 ⁹	22 × 2,0·10 ⁹
Периметр, м	210,96	251,52	503,04
Энергия инъекции, МэВ/н	3,24	5,0 (p [†] , d [†]), 578 (ядра золота)	1 000–3 800
Магнитная жесткость, Тл·м	25,2	38,5	44,5
Вывод пучка	однооборотный	однооборотный или медленный, до 10 с	однооборотный сброс
Длительность цикла при работе на Коллайдер, с	4,02	4,02	-
Вакуум в пучковой камере, Торр	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁹	10 ⁻¹¹



Рис. 1.2. Кольцо Бустера NICA в ярме магнита Синхрофазотрона

Несмотря на свои скромные размеры, Коллайдер и комплекс NICA в целом во многом являются новым шагом в ускорительной технике. Из-за своей рекордно низкой энергии комплекс потребовал применения большого количества современных ускорительных технологий. Некоторые из них впервые реализуются в России, а некоторые не имеют аналогов в мире. В нем предусмотрена оригинальная трехступенчатая схема накопления и формирования пучков с обдиркой на выходе из Бустера (как отмечено выше). В проект заложены три системы охлаждения пучков — «низковольтная» система

электронного охлаждения в Бустере, высоковольтная система электронного охлаждения (рис. 1.1, п. 6) и система стохастического охлаждения в Коллайдере. Хотя электронное охлаждение было создано в ИЯФ СО АН СССР и изготовленные там «электронные кулеры» экспортированы в несколько исследовательских центров мира, подобные системы формирования стабильных и интенсивных пучков тяжёлых заряженных частиц в российских ускорителях до сих пор не находили применения.

Комплекс NICA вступил в стадию монтажа и запуска основных его элементов. Ещё в 2016 году был запущен линейный ускоритель тяжёлых ионов (Heavy Ion Linear Accelerator — HILAc). В декабре 2019 года введён в действие канал транспортировки частиц из HILAc'a в Бустер. Ведётся монтаж Бустера, который размещён в яме магнита Синхрофазотрона, выведенного из эксплуатации в 2002 году и частично разобранный. Ярма (рис. 1.2) служит в качестве стабильного фундамента Бустера и биологической защиты от его излучения.

1.3. Эксперимент $BM@N$

Детектор эксперимента Baryonic Matter at Nuclotron ($BM@N$) расположен в корпусе 2 (рис. 1.1), куда пучок, ускоренный в Нуклотроне, доставляется по каналу транспортировки, состоящему из нормально проводящих («тёплых») магнитов. Пучок выводится из Нуклотрона системой медленного вывода, обеспечивающей его «растяжку» до 10 сек. При максимальной энергии тяжёлых ионов, достижимой в Нуклотроне (табл. 1.1), в режиме нуклон-нуклонных соударений с ядрами атомов неподвижной мишени («fixed target experiment») полная энергия сталкивающихся нуклонов в системе их центра масс (с.ц.м.) составляет $\sqrt{s}_{BM@N} = 3,26$ ГэВ/нуклон. Это заметно увеличивает диапазон энергии, достижимой на комплексе NICA. Первый успешный сеанс на эксперименте $BM@N$, принёсший интересные физические результаты, был проведён в марте-апреле 2018 года на ионах $^{12}\text{C}^{6+}$, $^{40}\text{Ar}^{16+}$ и $^{84}\text{Kr}^{26+}$.

1.4. Моды Коллайдера NICA

Коллайдер NICA предназначен для проведения исследований плотной барионной материи — смеси нуклонов, кварков и глюонов, образующейся при столкновении тяжёлых ионов от золота до урана (т. н. смешанная фаза) и физики спина протона и нейтрона в протон-протонных и дейтрон-дейтронных столкновениях этих поляризованных частиц. Это две основные моды работы Коллайдера (табл. 1.2), в которых для регистрации событий сооружаются два детектора — MultiPurpose Detector (MPD, рис. 1.1, п. 4) и Spin Physics Detector (SPD, рис. 1.1, п. 5), соответственно. Первый из них находится в стадии изготовления и монтажа, второй — в стадии разработки физического проекта.

Одним из главных параметров (если не главнейших) является светимость (табл. 2). Для достижения её проектного уровня предложена и разработана трёхступенчатая схема накопления частиц в Коллайдере и группирования сгруппированного пучка:

- инжекция в Бустер частиц, ускоренных в NICA, их ускорение и перевод в Нуклотрон;
- ускорение в Нуклотроне;
- накопление распущенного пучка в Коллайдере, ускорение/замедление частиц (если требуется) до энергии эксперимента и формирование сгруппированного пучка, настройка столкновений для получения проектной светимости.

Таблица 1.2

Параметры Коллайдера NICA, характеризующие его светимость

Параметр	Значение	
	I. Ионы	II. Протоны и дейтроны
Мода		
Ускоряемые и соударяющиеся частицы	$^{197}\text{Au}^{79+}, ^{207}\text{Pb}^{82+}, ^{209}\text{Bi}^{83+}$	p↑ d↑
Максимальная энергия инжекции, ГэВ/н	3,8 ($^{197}\text{Au}^{79+}$)	10,65 4,9
Максимальная кинетическая энергия частиц, ГэВ/нуклон	4,5 ($^{197}\text{Au}^{79+}$)	12,6 5,9
$\sqrt{s}_{\text{Collider}}$, ГэВ/н	11,0	27,1 13,9
Интенсивность накопленного пучка ^{197}Au , ионов/цикл	$44 \cdot 10^{10}$	$6,6 \cdot 10^{12}$
Число сгустков сгруппированного пучка	22	
Значение бета функций в точке встречи, м	0,6	
Максимальное число частиц в сгустке	2Ч	$3 \cdot 10^{11}$
Светимость на точку встречи, см ⁻² Ч	1Ч	0,8Ч

1.5. Прикладные исследования

В экспериментальных залах, предназначенных для размещения установок и приборов для прикладных исследований, на пучках ускорителей комплекса будут проводиться эксперименты по радиационной биологии (как на биоматериалах, так и на животных), испытания электронных устройств на радиационную прочность и другие. Линейный ускоритель легких ионов, кроме его основного назначения, планируется использовать также и для испытания сверхпроводящих ускоряющих структур линейных ускорителей. Бустер будет использоваться для генерации пучков протонов и ядер углерода с параметрами, необходимыми для адронной терапии раковых заболеваний. На этих пучках будут отрабатываться на моделях методики формирования и диагностирования дозовых полей. На Нуклотроне планируются исследования возможностей переработки отходов атомных электростанций и производства электроэнергии с помощью пучков ускоренных частиц. Программа исследований будет, как обычно, развиваться по мере их проведения.

1.6. Перспективы развития комплекса NICA

На ближайшие примерно 15 лет программа исследований на комплексе NICA практически сформирована. Однако, как показывает опыт эксплуатации ускорителей такого масштаба, срок их жизни достигает 40–60 лет

(Синхрофазотрон ОИЯИ и У70 ИФВЭ, PS и SPS ЦЕРН, AGS Брукхэйвенской лаборатории и другие).

В отличие от коллайдеров высокой энергии, оба основных детектора коллайдера NICA могут перемещаться перпендикулярно направлению движения пучков и на время сборки или модернизации целиком находиться за разборной биологической защитой. На время, когда детектор выведен с участка встречи вглубь павильона, на орбите ускорителя освобождается прямолинейная секция длиной около 8 метров. Это место может быть использовано для проведения экспериментов на внутренней мишени, техника которых была придумана и впервые применялась именно в ОИЯИ.

Наличие устройств по управлению спином поляризованных пучков и поляриметрии позволяет проводить целый ряд прецизионных экспериментов. Так, уже сейчас обсуждается возможность реализации на NICA измерений электрического дипольного момента дейтрона — эксперимента, который может помочь раскрыть природу асимметрии вещества и антивещества.

Технологии производства СП магнитов, созданные в ЛФВЭ ОИЯИ (рис. 1.3), могут быть развиты в дальнейшем с целью значительного увеличения уровня их поля. Это позволит поднять энергию частиц Коллайдера и существенно расширить диапазон исследований на комплексе NICA.



Рис. 1.3. Производство сверхпроводящих магнитов: участок сборки и испытания магнитов (а); двухапертурные магниты Коллайдера NICA: дипольный (б) и квадрупольный (в)

Магниты обоих колец коллайдера расположены в общем криостате, но они запитаны независимыми источниками тока. Это позволяет осуществить схему асимметричного коллайдера — столкновение ядер разных элементов, например, ядер золота с протонами. Рассматривается также вариант электрон-ионного коллайдера, где одно из колец заполнено электронами. Это открывает возможность исследований на Коллайдере NICA внутренней структуры ядра (см. п. 3 «Проект DERICA — электрон-ионный коллайдер для ядерной физики низких энергий»).

Конструкция сверхпроводящих (СП) магнитов Нуклотрона и Бустера позволяет также существенно повысить темп подъёма их магнитного поля и, соответственно, ускорения, а значит, увеличить среднюю мощность пучка

ускоренных частиц. Такие мощные пучки ионов находят все больше применений в различных областях исследований.

При незначительных изменениях оптической структуры колец Коллайдера можно организовать не встречные, а попутные столкновения тяжелых ядер — эксперимент, нацеленный на исследования свойств физического вакуума.

Заключение

Головной организацией, создающей ускорительный комплекс NICA и три его детектора, является Объединённый институт ядерных исследований.

Сооружение ускорительного комплекса ведётся в тесном сотрудничестве с ускорительными центрами России и мира — ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, ИТЭФ им. А.И. Алиханова, FAIR/GSI (ФРГ), ЦЕРН, Fermilab (США) и другими. Все три эксперимента — BM@N, MPD и SPD — создаются и проводятся международными коллаборациями, организованными при ОИЯИ.

Базовую версию ускорительного комплекса планируется ввести в строй в конце 2022 года. Это потребует значительных усилий коллектива ОИЯИ и его партнёров. Дальнейшее развитие комплекса и выполнение программы исследований на ускорительном комплексе NICA будет проводиться в соответствии с семилетними планами ОИЯИ и планами развития ядерной физики в Российской Федерации.

Создание ускорительного комплекса NICA и осуществление его программы исследований является флагманским проектом ядерной физики России и стран-участниц ОИЯИ. Комплекс NICA обеспечит выполнение богатой и многосторонней программы фундаментальных и прикладных исследований в ближайшие несколько десятилетий.

Глава 2. Электрон-позитронный коллайдер «Супер Чарм-Тау Фабрика»

2.1. Цели проекта

Супер Чарм-Тау Фабрика (СЧТФ, рис. 2.1) — электрон-позитронный коллайдер, оптимизированный для работы с энергией в системе центра масс сталкивающихся частиц $\sim 3\div 7$ ГэВ и со светимостью, существенно превышающую достигнутую на установках, работавших или работающих в этом диапазоне энергий. В этом диапазоне рождаются практически все состояния чармониев, очарованных мезонов и барионов, содержащих один с-кварк или один с-антикварк. При энергии больше $2m_\tau \approx 3,6$ ГэВ начинают рождаться пары τ -лептонов, так что при наличии высокой светимости такой коллайдер становится чрезвычайно интенсивным источником очарованных частиц и τ -лептонами в конечном состоянии со статистикой, на 3–4 порядка превышающей сегодняшнюю, накопленную в экспериментах на CLEOс (США) и BES III (Китай).

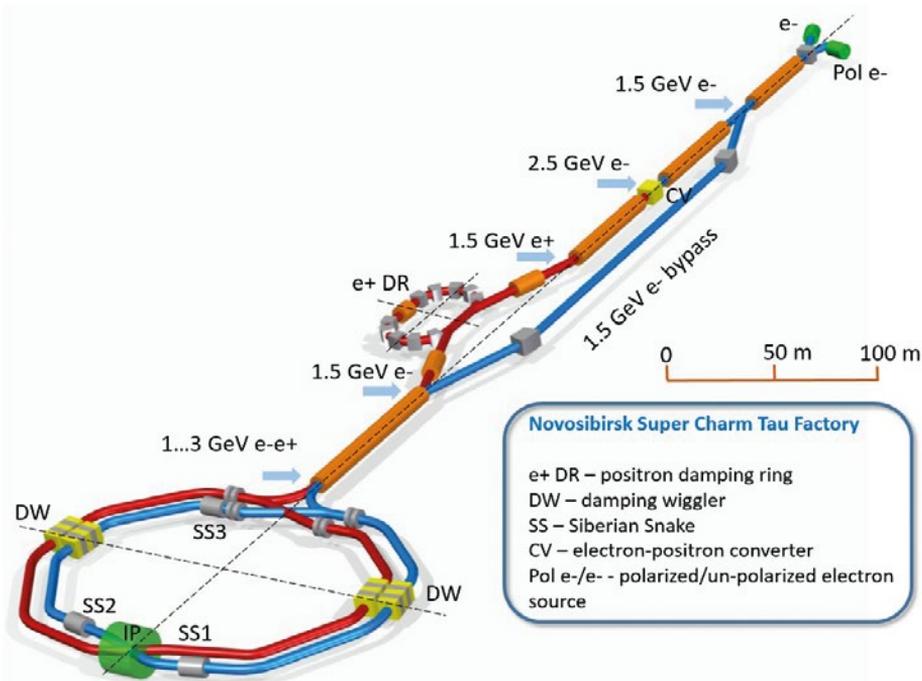


Рис. 2.1. Схематическое изображение Супер Чарм-Тау Фабрики

2.2. Описание СЧТФ

Ускорительный комплекс СЧТФ включает в себя два интенсивных источника электронов («обычный» и поляризованный), конвертер электронов в позитроны, набор линейных ускорителей, повышающих энергию

инжектируемых пучков до энергии эксперимента, накопитель-охладитель для позитронов, двухкольцевой коллайдер и универсальный детектор, расположенный в одном месте встречи.

Главными чертами нового электрон-позитронного коллайдера в Новосибирске, которые делают его уникальной исследовательской установкой мирового класса, являются широкий диапазон доступных энергий, рекордная светимость и возможность проведения экспериментов с продольно поляризованным электронным пучком. В таблице 2.1 приведены эксперименты, энергии и оценка интегральной светимости СЧТФ за сезон.

Таблица 2.1

Параметры и задачи экспериментов на СЧТФ

Е, ГэВ	L, фб ⁻¹	Структурные разделы научной программы	
3,097	300	J/ψ	Спектроскопия состояний из легких кварков, редкие распады
3,554	50	Порог $e^+ e^- \rightarrow \tau^+ \tau^-$	Прецизионное измерение распадов τ-лептонов
3,686	150	ψ	Спектроскопия состояний из легких кварков, спектроскопия чармония
3,770	300	ψ	Исследование свойств D-мезонов
4,170	100	ψ	Исследование свойств D _s -мезонов
4,650	100	Max σ (e ⁺ e ⁻ → Λ _c ⁺ Λ _c ⁻)	Исследование свойств Λ _c -барионов

Исходя из экспериментальной программы, к проекту СЧТФ были сформулированы следующие основные требования:

- Комплекс должен обеспечить эффективную работу в диапазоне энергий пучка 1 ÷ 3,5 ГэВ с пиковой светимостью $\geq 10^{34}$ см⁻²с⁻¹ на низкой энергии и $\geq 10^{35}$ см⁻²с⁻¹ на высокой энергии.
- Для получения высокой светимости используется метод встречи «Crab Waist».
- Возможна работа как с неполяризованными пучками, так и с продольной поляризацией электронного пучка в точке встречи. Продольная поляризация не должна существенно уменьшать светимость или ухудшать эффективность работы коллайдера.
- Асимметрия энергии пучков не требуется.
- Монохроматизация пересечения пучков в точке встречи, которая неизбежно уменьшает светимость, не требуется. Высокая светимость позволяет эффективно исследовать узкие резонансы без сложных монохроматизационных схем.
- Поперечная поляризация пучков для прецизионного измерения энергии не требуется. Калибровка энергии будет производиться с помощью обратного комптоновского рассеяния лазерных фотонов на частицах циркулирующего пучка. Такая методика была реализована на ВЭПП-4М (впервые на коллайдерах) и показала относительную точность лучше 10⁻⁴, что представляется достаточным для СЧТФ.

Схема и размеры двух накопительных колец коллайдера СЧТФ показаны на рис. 2.2.

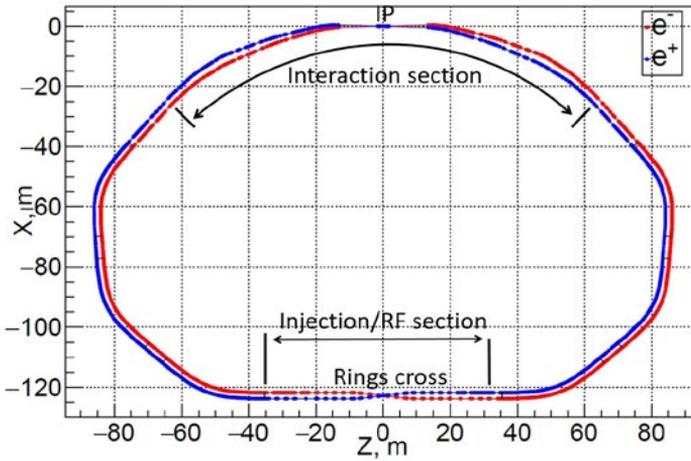


Рис. 2.2. Схема и размеры двухкольцевого коллайдера СЧТФ

2.3. Параметры

Основные параметры Супер Чарм-Тау Фабрики приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Основные параметры СЧТФ

Периметр, м	478,092			
2θ , мрад	60			
q	558			
β_x^+ , мм	50			
β_y^+ , мм	0,5			
$a \times 10^4$	9,77			
E , ГэВ	1	1,5	2	3
$N_b \times 10^{10}$	4,5	4,5	5,2	7
I_b , мА	4,5	4,5	5,2	7,2
n_b	490	490	420	290
I , А	2,2	2,2	2,2	2,1
σ_z , мм	8,9	11	8,9	10
τ_x , мс	91	81	34	10
τ_e , мс	45	40	17	5
ε_x , мнрад	14,5	8,8	7,0	11
ε_y , мнрад	72	44	35	55
$L \times 10^{35}$, см ² с ⁻¹	0,97	1,0	1,6	2,7
$L_{HG} \times 10^{35}$, см ² с ⁻¹	0,71	0,79	1,3	2,1
$\xi_x \times 10^{-3}$	7,1	3,1	4,2	5,4
$\xi_y \times 10^{-2}$	10,0	6,9	8,4	9,9

2.4. Статус СЧТФ

Проект СЧТФ стартовал в 2006 году и в 2011 году был отобран Правительством РФ как один из шести проектов класса «мега-сайенс», рекомендованных к реализации. Проект официально поддержан Европейским комитетом по ускорителям будущего (ЕСФА) и Группой экспертов Европейской Комиссии по российским мега-проектам физической инфраструктуры. Готовы Физический и Концептуальный проекты, предварительный Строительный проект. Подписаны Меморандумы о взаимопонимании с ЦЕРН, KEK, INFN, LAL, ОИЯИ, John Adams Institute.

2.5. Место на российском и международном ландшафтах

Проект уникален, поддержан как российским, так и зарубежным научным сообществом. Несколько лет назад появился «конкурентный» проект — НИЕРА (Хефэй, Китай), который проработан существенно слабее и во многом является калькой проекта СЧТФ.

ГОЛОВНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ-РАЗРАБОТЧИК — Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН.

2.6. Ресурсы и сроки

При условии реализации на площадке ИЯФ СО РАН проект СЧТФ в ценах 2019 года оценен в 37 000 млн рублей, срок реализации — 7 лет, включая 2 года проектирования и 5 лет на изготовление оборудования. Планируется, что кадровые потребности будут обеспечены возможностями Физического факультета НГУ и Физико-технического факультета НГТУ, которые во многом базируются на ИЯФ.

2.7. Потенциальные соисполнители и международное сотрудничество

ВНИИЭФ (Саров), ОИЯИ (Дубна), ИТЭФ, НГУ, CERN, LAL, INFN и многие другие научные организации в России и за рубежом высказали желание присоединиться к проекту СЧТФ, однако официальное оформление сотрудничества тормозится неопределенностью с финансированием проекта.

2.8. Ускорительные технологии, которые необходимо развивать для успешной реализации СЧТФ

- Расчеты и моделирование динамики пучков заряженных частиц. Прежде всего, оптимизация нелинейной динамики, динамических апертуры и энергетического акцептанса, коллективных неустойчивостей, накопления электронных облаков в позитронном пучке и т. п.
- Технологии работы с интенсивными (амперными) пучками электронов и позитронов, включая разработку и изготовление одномодовых ускоряющих резонаторов, вакуумных компонент с низким импедансом, покрытия вакуумной камеры (NEG, покрытия, подавляющие выход вторичных электронов) и т. п.

- Технологии создания компактных сильных (градиент 100 Т/м) сверхпроводящих квадрупольных линз и других магнитов финального фокуса.
- Технологии развития компактных крио-систем, размещаемых внутри детектора в непосредственной близости к точке встречи.
- Технологии магнитов («теплых» и сверхпроводящих) с предельно высоким качеством поля.
- Технологии диагностических высокоточных устройств (например, датчиков положения пучка с субмикронным разрешением).
- Технологии мощных клистронов с модуляторами для питания линейных ускорителей.
- Технологии мощных высокочастотных транзисторных систем для генераторов, питающих ускоряющие резонаторы накопителя.
- Технологии методов прецизионного позиционирования и мониторинга размещения на кольце различных элементов ускорителей (магнитов, линз, датчиков положения пучка и т. п.).

Многие из перечисленных технологий будут востребованы российскими научными и научно-производственными центрами, в том числе оборонной и космической промышленности.

Глава 3. Проект DERICA — электрон-ионный коллайдер для ядерной физики низких энергий

Ситуация в лабораториях мира, ведущих исследования в области ядерной физики, характеризуется сегодня активным строительством т. н. фабрик радиоактивных изотопов нового поколения. К амбициозным программам модернизации давно существующих лидеров в этой области — RIBF (Япония), SPIRAL2 (Франция), FAIR (Германия), FRIB (США) — добавились новые «игроки». Это исключительно масштабные, создаваемые «на ровном месте» центры исследования радиоактивных изотопов — HIAF (Китай) и RAON (Республика Корея). Базовые бюджеты всех этих проектов находятся в диапазоне от ~ 1 до ~ 3 млрд долларов США.

В последнее десятилетие в ряде лабораторий предпринимались значительные усилия для обновления исследовательской инфраструктуры. В ЛЯР ОИЯИ в 2018 году был запущен новый фрагмент-сепаратор ACCULINNA-2. В ЛЯР ОИЯИ в 2019 году заработала «фабрика сверхтяжелых элементов», базирующаяся на новом ускорителе DC-280. В НИЦ КИ — ПИЯФ получил «зелёный свет» проект ИРИНА (Исследование Радиоактивных Изотопов на НейтронАх). Однако, суммарный бюджет этих проектов (~ 100 млн долларов США) весьма значителен по отечественным масштабам, но не значителен по мировым. Проекты эти «нишевые» («niche project»), то есть способные 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 экспериментальных установок станут мало конкурентными на мировом уровне.

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. Проект базируется на линейном сверхпроводящем ускорителе тяжелых ионов квазинепрерывного действия с пучками рекордных характеристик. В проекте делается акцент на исследованиях короткоживущих радиоактивных изотопов (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.

3.1. Цели проекта

Проект имеет принципиальную и амбициозную задачу-максимум — создание коллайдера электронов и радиоактивных изотопов. Её 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, монохроматичность, эмиттанс) будут доступны при энергии 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 позволят 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 многозарядных ионов в условиях, близких к астрофизическим, и т. д.

3.2. Описание структуры проекта, проектные параметры

Базовой установкой для проекта DERICA будет линейный сверхпроводящий ускоритель-драйвер пучка стабильных ионов LINAC-100, рассчитанный на экстремальные интенсивности. Он должен работать в квазинепрерывном режиме и обеспечивать на выходе для тяжелых ионов (Xe, Bi, U) энергию до 100 МэВ/нуклон с интенсивностями ~ 20 рнА и для легких ионов (B, Ne, Ca) до 160 МэВ/нуклон при ~ 300 рнА. 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. рис. 3.1, 3.2), останавливаются в газовой ячейке, аккумулируются в ионной ловушке и передаются ионному источнику, который формирует максимально высокое зарядовое состояние для дальнейшего эффективного ускорения. Последующее ускорение пучка РИ в проекте DERICA осуществляется линейным импульсным нормально проводящим («тёплым») ускорителем LINAC-30 до энергии ~ 30 МэВ/нуклон.

Для ряда задач требуются более высокие энергии. Так, эффективная работа электрон-РИ коллайдера требует энергии ионов в диапазоне 300–500 МэВ/нуклон. Дальнейшее повышение энергии ускорения ионов от ~ 30 до ~ 500 МэВ/нуклон происходит в быстроциклирующем бустере-синхротроне с темпом изменения магнитного поля, обеспечивающим рабочий цикл менее 0,1 с. В зависимости от схемы постускорения время до инжекции в экспериментальное кольцо «Cooler Ring» (CR) может составлять 0,1–0,5 с.

Проект DERICA объединяет, таким образом, конструктивные особенности и возможности как комплексов РИ, основанных на технологиях *in-flight*

и *ISOL* и, по сравнению с ранее предложенными подходами концепция *DERICA*, даёт существенный выигрыш во времени, протекающем до начала измерений, что является критичным для исследования короткоживущих РИ.

3.3. Параметры и стадийность проекта

Проект разбит на относительно короткие научно-мотивированные стадии (рис. 3.1). Первые очереди проекта дадут научные результаты уже через $\sim 3\text{--}5$ лет после начала строительства. Каждые $3\text{--}5$ лет будет вводиться очередная установка, открывающая новые научные возможности. Стадийность в развитии проекта позволяет уменьшить многие технологические риски, связанные с его осуществлением. В частности, это снимет остроту (но не устранит полностью) проблемы обеспечения высококвалифицированными кадрами.

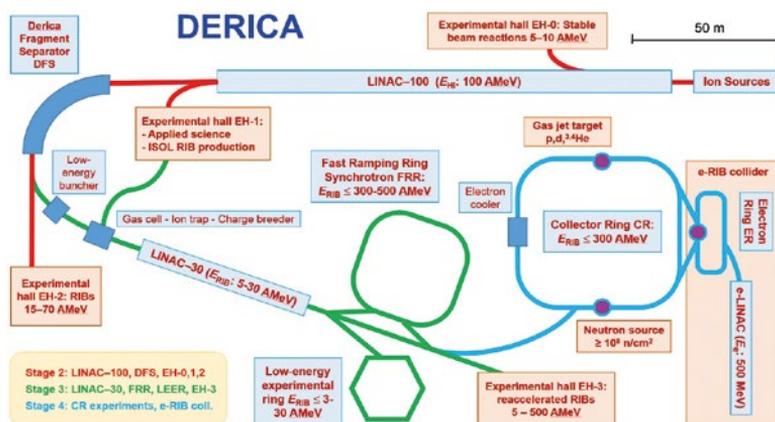


Рис. 3.1. Стадийность проекта *DERICA* (цвета пучковых линий соответствуют стадиям проекта):

Стадия 1. Формирование физического проекта (Концептуальный дизайн-проект CDR), создание технико-экономического обоснования (Technical Design Project TDR), прототипирование критических подсистем.

Стадия 2. (а) Строительство LINAC-100 в «стартовой конфигурации» (6 МэВ/нуклон, только нормально проводящие резонаторы), экспериментальный зал EH-1; (б) LINAC-100 (50) и сепаратор DFS работают на промежуточной энергии на низкой интенсивности (50 МэВ/нуклон, экспериментальный зал EH-2); (в) LINAC-100 и DFS работают в полной конфигурации: 100 МэВ/нуклон, полная интенсивность.

Стадия 3. Создание системы постускорения РИ в составе линейного ускорителя LINAC-30 и синхротрона FRS; доступны высококачественные ускоренные пучки РИ $\sim 5\text{--}300$ МэВ/нуклон в экспериментальном зале EH-3.

Стадия 4. Создание комплекса накопительных колец. Эксперименты на накопительных кольцах и электрон-РИ коллайдере.

Научная программа проекта *DERICA* опубликована в работе Л. В. Григоренко и др., *Научные задачи перспективного ускорительно-накопительного комплекса для исследования радиоактивных изотопов DERICA*, УФН 189, 721–738 (2019) [L. V. Grigorenko et al., *Phys.-Usp.* 62, 675–690 (2019)].

Со статусом программы *DERICA* можно ознакомиться также на сайте проекта <http://derica.jinr.ru/>.

Место проекта *DERICA* в стратегии развития ОИЯИ представлено в документе https://indico.jinr.ru/event/1121/attachments/6760/9449/03._DERICA.Fin.pdf.

Рис. 3.2 иллюстрирует результаты НИОКР 2019–2020 гг. по направлениям:
 — ускоритель-драйвер LINAC-100,
 — фрагмент-сепаратор DFS (Dubna Fragment Separator),
 — комплекс накопительных колец.

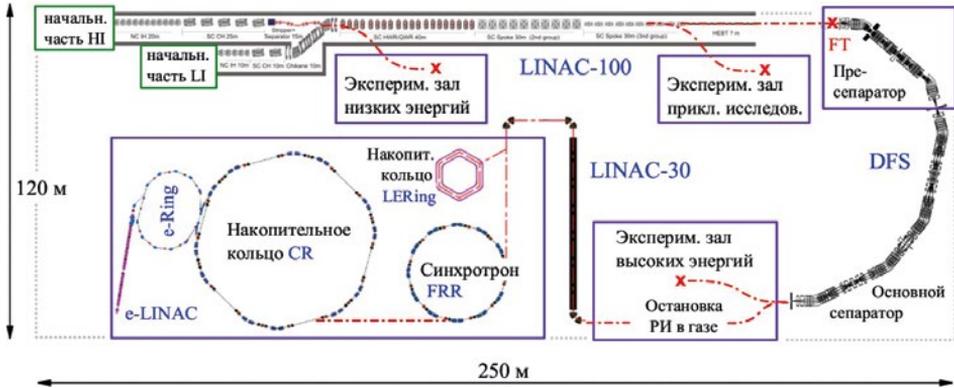


Рис. 3.2. Общий вид площадки DERICA по результатам эскизного проектирования. Сверхпроводящий сильноточный ускоритель-драйвер непрерывного действия LINAC-100 доводит энергию пучка стабильных ионов до 100–160 МэВ/нуклон. Радиоактивные изотопы рождаются на производящей мишени FT (Fixed Target); первичный пучок и ненужные фрагменты поглощаются в радиационно-нагруженной зоне пре-сепаратора DFS. Искомые РИ отбираются основным сепаратором DFS и используются в экспериментальной зоне высоких энергий 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 переводятся в комплекс накопительных колец, где возможно ускорение в синхротроне FRR до ~ 500 МэВ/нуклон, затем инжектируются в коллайдер CR/e-Ring.

3.4. Возможности прикладных и междисциплинарных исследований

Ускорительный комплекс DERICA является источником пучков любых стабильных ионов с $Z = 5–92$ исключительно высокой интенсивности (1–5 μA) вплоть до энергий ~ 160 МэВ/нуклон. Стабильные и радиоактивные пучки меньшей интенсивности 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,
- тестирование компонент микроэлектроники на радиационную стойкость,
- 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.

3.5. Потенциал пользовательского центра

DERICA планируется использовать в режиме пользовательского центра (т. н. users 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 дорогостоящим инструментам общего пользования и (б) возможность развивать и эксплуатировать свое оборудование без необходимости поддерживать всю инфраструктуру получения пучков редких изотопов высокой интенсивности.

3.6. «Окно возможностей»

DERICA — проект умеренной стоимости (оценка ~ 400 млн долларов США). В современной физике ядра и элементарных частиц типичная стоимость проектов мирового класса сегодня начинается от величин в 5–10 раз выше. Возможность создания ядерно-физического комплекса с актуальной и перспективной программой мирового уровня при относительно скромном бюджете определяется особенностью момента. Например, из-за сложностей в реализации проекта FAIR, где планировались аналогичные исследования, часть программы может быть выполнена в рамках проекта DERICA. Физика радиоактивных изотопов активно развивается во многих странах, и это «окно возможностей» не будет открыто длительное время.

3.7. Головной исполнитель проекта DERICA, соисполнители

В настоящий момент в ОИЯИ развернута программа по проведению НИОКР, созданию прототипов «критических» компонентов проекта и подготовке его технико-экономического обоснования. К критическим компонентам проекта относятся узлы и установки, от которых зависит выполнимость научной программы DERICA в целом и/или для создания которых требуется длительное время.

Программа выполняется в сотрудничестве с ведущими отечественными центрами, прежде всего ИТЭФ, МИФИ, ИЯФ СО РАН, РФЯЦ-ВНИИТФ.

Потенциальные международные участники проекта: Chalmers University of Technology (Gothenburg, Sweden), Helmholtz Institut Mainz (Mainz, Germany), INP (Lanzhou, China), University of Warsaw (Warsaw, Poland), University of Warsaw Heavy Ion Laboratory (Warsaw, Poland), Max-Planck-Institute fuer Kernphysik (Heidelberg, Germany), GSI (Darmstadt, Germany).

3.8. Долговременные перспективы для развития передовых ускорительных технологий

Значимость проекта DERICA велика не только для решения фундаментальных задач ядерной физики, но и для развития технологической базы физических исследований в РФ. Высокочастотная сверхпроводимость, ВЧ электроника и силовая электроника, технологии линейных нормально

проводящих и сверхпроводящих ускорителей, работающих в квазинепрерывном режиме, технологии высокого вакуума, создание мишенного комплекса на мощность пучка порядка 1 мегаватта и другие «экстремальные» технические аспекты проекта DERICA потребуют привлечения возможностей значительного числа отечественных научных и инженерных организаций, одновременно послужив их развитию. В частности, экспертиза организаций государственной корпорации «Росатом» будет необходима при создании роботизированного мишенного комплекса, работающего в условиях экстремальных радиационных нагрузок.

Заключение

Выполнение проекта DERICA может быть начато 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 «мега-сайенс» и в действительности представляет собой не рядовой проект создания изолированной установки, а стратегически значимый шаг в развитии фундаментальной ядерной физики низких энергий в РФ на десятилетия вперед. Проект может быть реализован за 10–15 лет, ориентировочная стоимость — около 400 млн долларов США.

Глава 4. Ускорительный Нейтронный Комплекс ИЯИ РАН

4.1. Мотивация

В городском округе Троицк города Москва расположен сильноточный линейный ускоритель протонов Института ядерных исследований РАН с проектной энергией 600 МэВ и током 0,5 мА. Несмотря на то, что ускоритель проектировался в 70-е и 80-е годы, а сооружался в 80-е и 90-е годы прошлого столетия, а также на то, что до настоящего времени, в основном, в силу экономических причин, так и не достиг проектных параметров, он и сейчас является крупнейшим сильноточным линейным ускорителем протонов в России.

В мире ускорители данного класса применяются, главным образом, в качестве основы источников нейтронов, которые, в свою очередь, используются как для фундаментальных, так и для прикладных исследований. В таких источниках нейтроны образуются при взаимодействии ускоренного пучка протонов с мишенями из тяжёлых элементов за счёт эффекта испарения («скальвания», spallation). Альтернативой таким источникам нейтронов являются ядерные реакторы. Однако источники нейтронов на базе ускорителей протонов в настоящее время получили приоритетное развитие, поскольку в отличие от реакторов не содержат делящегося вещества, и, следовательно, не представляют большой опасности с точки зрения радиоактивного загрязнения. Также в отличие от стационарных реакторов, где увеличение размеров активной зоны не приводит к увеличению плотности потока нейтронов, а только увеличивает аварийную опасность, такие источники не имеют ограничений на увеличение плотности потока нейтронов. Импульсный режим работы ускорителей позволяет формировать требуемую временную структуру нейтронных потоков.

В мире существует несколько импульсных источников нейтронов на основе протонных ускорителей. В качестве примера действующих источников можно привести LANSCE (США), SNS (США), ISIS (Великобритания), JPARC (Япония). Недавно запущен новый импульсный источник CSNS в Китае. Идёт сооружение Европейского нейтронного источника ESS в Швеции с рекордной мощностью протонного пучка до 5 МВт. Ведётся проектирование источников в Индии и Южной Корее.

В Троицке в ИЯИ РАН в целом решена задача создания источников нейтронов на базе сильноточного линейного ускорителя и накоплен богатый опыт по их эксплуатации. Помимо основного импульсного источника тепловых нейтронов испарительного типа ИН-06 имеется источник эпитепловых нейтронов РАДЭКС, а также 100-тонный свинцовый куб — спектрометр по времени замедления нейтронов в свинце СВЗ-100. Указанные три источника нейтронов, в силу специфики мишеневых узлов, имеют различные по «жесткости» спектры нейтронов, что позволяет решать широкий спектр задач. Данный нейтронный комплекс не имеет аналогов в мире.

Функционирование комплекса нейтронных источников и нейтронографических установок обеспечивается совместной работой ускорителя и его

систем, технологического оборудования экспериментального комплекса и групп исследователей на установках.

В настоящее время ускоритель обеспечивает следующие параметры ускоренного пучка:

- Энергия электронов — до 350 МэВ;
- Импульсный ток — до 16 мА;
- Частота повторения импульсов — до 50 Гц;
- Длительность импульса — до 200 мкс;
- Средняя интенсивность ускоренного пучка — до 150 мкА при энергии 160 МэВ и до 50 мкА при энергии 209 МэВ.

Средняя интенсивность обеспечивается работой всех импульсных систем ускорителя, включая инжектор и систему ВЧ питания, при частоте повторения 50 Гц. Величина среднего тока, которая реально получается при максимально возможном импульсном токе, частоте повторения и длительности импульса, составляет 150 мкА. Увеличение частоты повторения импульсов тока пучка до проектной величины 100 Гц позволит удвоить интенсивность ускоряемого пучка. Увеличение энергии пучка возможно при замене клистронов, отслуживших свой срок, на что требуется значительное финансирование.

Вместе с тем, в настоящее время по ряду причин нет возможности обеспечить ни надежную и длительную работу комплекса, ни требуемые плотности потоков нейтронов на уровне 10^{16} нейтронов/(см²·с). В качестве причин можно указать недостаточность не только достигнутой, но и проектной мощности пучка, невозможность заметного повышения параметров и низкую надежность работы ускорителя, каналов транспортировки протонов, да и самих источников в силу изношенности и морального старения оборудования. Все эти причины можно устранить при кардинальной реконструкции всего комплекса.

4.2. Научные цели и параметры ускорителя

Прежде всего, необходимо сооружение нового ускорителя. Проведённый анализ показал, что в существующем тоннеле ускорителя длиной около 450 метров при использовании современных сверхпроводящих ускоряющих структур, уже опробованных и доказавших свою эффективность в ряде зарубежных ускорительных центров, может быть размещён ускоритель на энергию до 2÷2,5 ГэВ. Импульсный ток пучка, достигнутый в ряде лабораторий в сильноточном режиме, составляет десятки миллиампер. При импульсном токе, например 40 мА, длительности импульсов тока пучка 1 миллисекунда, типичной для сверхпроводящих линейных ускорителей, и частоте повторения импульсов 50 Гц, мощность в пучке составит 4÷5 МВт. С целью обеспечения надежности работы сверхпроводящего линейного ускорителя протонов разумно ограничить проектную энергию до 1,5 ГэВ и средний ток до 1,5 мА, то есть мощность в пучке 1,5–2 МВт.

Необходимо проведение и целого ряда работ на нейтронных источниках. Например, необходимо увеличение длины нейтронных источников ИН-06 и РАДЭК-Са, для чего следует расширить здание экспериментального комплекса.

Необходимо завершить создание второй мишени нейтронного источника ИН-06 с размещением источников холодных и ультрахолодных нейтронов. Создать новые мишени, что требуется при увеличении мощности пучка и энергии электронов. Модернизировать биологическую защиту источников и каналов. Увеличить число нейтронных каналов как на ИН-06, так и на РАДЭКСе.

После реконструкции на нейтронных источниках можно будет проводить исследования по ряду направлений физики конденсированных сред, включая наносистемы, по материаловедению для водородной энергетики, по биологическим системам и др., например, следующие исследования: различий двумерных (поверхностей раздела) и объемных систем, взаимного влияния магнетизма и сверхпроводимости в слоистых системах, изменений магнитных свойств в слоистых системах в зависимости от состава и толщины слоёв, механизмов преобразования поверхностей и межфазных границ, механизмов образования наноструктур в магнитных полимерах, различных типов катализаторов, взаимосвязи структура-функция в биологических системах, механизмов эволюции кластеров в коллоидных растворах, эволюции наноструктур и устойчивости магнитных жидкостей, гетероструктурированных систем типа «матрица-малые частицы металлов, полупроводников» и т. д.

4.3. Перспективы развития научных исследований, прикладных работ и ускорительных технологий на нейтронном комплексе ИЯИ РАН

На базе описанного нейтронного источника возможными объектами исследований могут быть: полимерные материалы, слоистые наноструктуры и нанокompозитные пленки, нанофазные керамические и композитные материалы, магнитомягкие и магнитотвердые наноструктурные материалы, наноструктурные твердые сплавы, тонкие пленки магнитных полупроводников, слоистые системы ферромагнетик-сверхпроводник, дисперсии с регулируемыми динамическими характеристиками (магнитные жидкости на водной основе), коллоидные растворы углеродных наноматериалов в полярных и неполярных растворителях, дисперсии и взвеси гидрофобных материалов, биологические молекулы и системы, биологически совместимые внутриенты, цеолитные материалы, катализаторы, нанопористые материалы для водородной энергетики и т. д.

Реконструкция ускорителя открывает и новые возможности для фундаментальных исследований по физике атомного ядра и элементарных частиц. Например, при наличии сильноточного пучка протонов с энергией около 1 ГэВ возможно проведение эксперимента по поиску стерильных нейтрино. Для этого дополнительно потребуется создание детектора массой около 1 кт. Оптимальное расстояние от детектора до мишени — 25–30 метров. Большим проектом может стать эксперимент по поиску редких распадов мюонов. Крайне важно было бы включить в проект реконструкции создание вторичных пучков пионов и мюонов. Эксперименты с пионами становятся актуальными в последнее время в связи с тем, что для повышения точности

нейтринных осцилляционных экспериментов необходима информация о вторичных взаимодействиях рожденных мюонными нейтрино (анти-нейтрино) частиц в ядре, в частности, пионов, т. е. необходимы измерения различных сечений взаимодействия (рассеяния, поглощения, перезарядки) пионов низких энергий с ядрами. Вторичные каналы пионов и мюонов, особенно низкой энергии (импульс до 500 МэВ/с), с хорошим импульсным разрешением также будут востребованы для калибровки и тестов различных детекторов. Интересным проектом является также поиск нейтрон-антинейтронных осцилляций, но для такого эксперимента потребуется база в несколько сот метров.

Реализация проекта потребует развития и внедрения в России новых технологий сверхпроводящих ускоряющих структур, твердотельных ВЧ генераторов высокой мощности, вакуумной техники, систем контроля, детекторов излучений и пр. Исследования по материаловедению, безусловно, будут способствовать появлению и внедрению новых материалов.

Учитывая географическое расположение, можно с уверенностью утверждать, что модернизированный нейтронный комплекс будет передовым научно-исследовательским, а также образовательным центром для университетов Москвы и других регионов России.

4.4. Головной исполнитель и соисполнители проекта

Реализация проекта в ИЯИ РАН будет возможна при участии широкого круга Российских научно-исследовательских, образовательных и проектных организаций, таких как НИЦ «Курчатовский Институт», Московский Радиотехнический Институт РАН, Национальный ядерный университет «МИФИ», Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, НИКИ-ЭТ им. Н.А. Доллежала, Государственный специализированный проектный институт, Институт физики твердого тела РАН, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Институт кристаллографии РАН, Институт физики высоких давлений РАН, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Объединенный институт ядерных исследований, Физический институт РАН, Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН и др.

При наличии существенного финансового вклада России в проект также неизбежно войдут зарубежные участники, и будет создана международная коллаборация.

Ориентировочная стоимость проекта — 18 млрд руб., дополнительно требуется ориентировочно 150–200 сотрудников.

Срок реализации — 2027 г.: проектирование — 2020–2023 гг., изготовление оборудования — 2023–2026 гг., монтаж и запуск — 2026–2027 гг. Реализация проекта должна идти параллельно с эксплуатацией и модернизацией существующего комплекса в 2020–2026 гг.

Глава 5. Развитие комплекса адронных ускорителей НИЦ КИ — ИФВЭ

5.1. Цели

Устойчивая эксплуатация и улучшение характеристик крупнейшего в России действующего ускорителя протонов и ядер углерода — Ускорительного комплекса У-70 НИЦ КИ — ИФВЭ обеспечивает проведение исследований по физике частиц высоких энергий и релятивистской ядерной физике в «fixed target» на отечественной экспериментальной базе. При этом сохраняются компетенции и возможности верификации в условиях действующих ускорительных установок разработок в области физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники и смежных разделов исследований и разработок. Это неизбежно требует развития научно-технической базы для актуальных прикладных исследований, которые проводятся на выведенных пучках ускоренных протонов и ядер — протонной радиографии быстропротекающих процессов в плотных средах, углеродной радиобиологии и лучевой терапии, техники и технологии получения и использования импульсных потоков нейтронов.

5.2. Описание комплекса

В состав Ускорительного комплекса У-70 (рис. 5.1) входят четыре резонансных ускорителя заряженных частиц: два линейных (И-100 и ЛУ-30) и два кольцевых (быстрый бустер-синхротрон У-1.5 (рис. 5.2) и большой синхротрон У-70), сеть каналов транспортировки и формирования пучков и экспериментальных физических установок. Комплекс является уникальным научным объектом класса «мега-сайенс», действующим в стране. Предусматривается его поступательное (эволюционное) развитие.

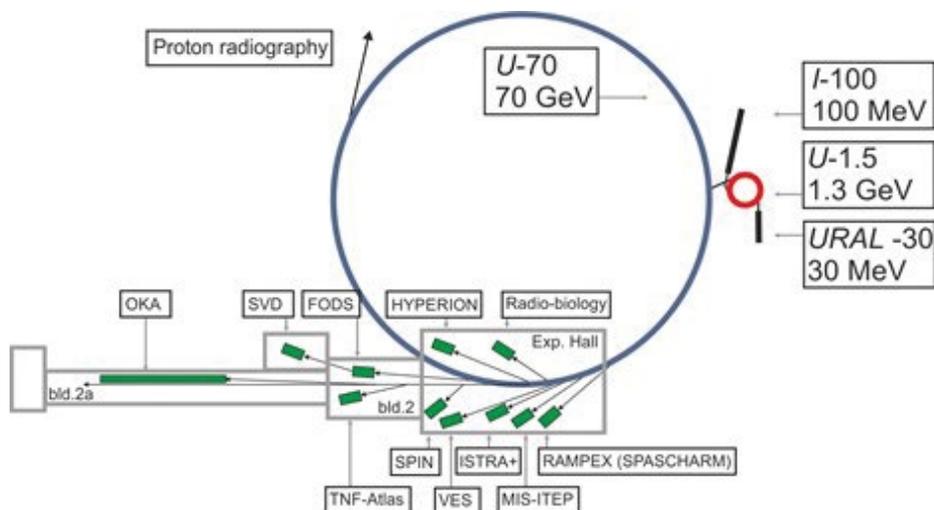


Рис. 5.1. Ускорительный комплекс У-70 НИЦ КИ — ИФВЭ



Рис. 5.2. Быстрый бустер-синхротрон У-1.5

Проект опирается на достигнутый и надежно освоенный научно-инженерный уровень установок и состоит из четырех крупных блоков мероприятий:

1. Модернизация и техническое перевооружение технологических систем Ускорительного комплекса У-70. Перевод ключевых технологических систем ускорителей и специальной инженерной инфраструктуры на новые аппаратные и программные решения, улучшающие функциональные параметры установок (интенсивность пучка, доступность пучка на время физического эксперимента). В этих целях задействованы, в том числе, инвестиционные средства ФЦП «Ядерные энерго-технологии нового поколения» (до 2019 года) и Государственной программы «Развитие атомного энергопромышленного комплекса» (ГП РАЭПК, с 2019 года, постановление Правительства РФ от 03.06.2019 № 704). Проведение регулярных сеансов работы Ускорительного комплекса У-70 для экспериментальных исследований по физике частиц и фундаментальных взаимодействий.

2. Улучшение технических характеристик и проведение прикладных исследований на установке ПРГК-100 для протонной радиографии быстропротекающих процессов в плотных средах с использованием протонного пучка, выведенного из синхротрона У-70 (совместно с РФЯЦ ВНИИЭФ (Саров)). Целевая адаптация систем быстрого вывода пучка и иных задействованных технологических систем У-70.

3. Продолжение прикладных радиобиологических и пред-клинических (углеродная лучевая терапия) исследований в ЦКП «Радиобиологический стенд на углеродном пучке У-70». На этой основе — реализация мероприятий «Комплекс ионной лучевой терапии на действующем ускорительном комплексе У-70» и «Разработка и изготовление прототипа отечественного синхротрона для ионной лучевой терапии с целью создания типового отечественного клинического центра ионной углеродной терапии» Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019–2027 годы (постановление Правительства РФ от 16.03.2020 № 287).

4. Продолжение прикладных исследований по радиационной физике на ЦКП «Облучательный центр на протонном пучке У-1.5». Развитие направления прикладного использования протонного пучка, выведенного

из действующего синхротрона У-1.5, при реализации мероприятия «Создание прототипа импульсного источника нейтронов на основе реакции испарительно-скалывающего типа (г. Протвино, Московская область)» Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019–2027 годы.

5. Подготовка физического обоснования, разработка, практическое освоение и консолидация технологий, необходимых для создания крупномасштабного отечественного импульсного источника нейтронов на основе реакции испарительно-скалывающего типа (spallation) с протонным драйвером мощностью более 1 МВт — проектного предложения «Ускорительный комплекс интенсивных адронных пучков (проект ОМЕГА)», предложенного НИЦ КИ — ИФВЭ в 2010 году (<http://exwww.ihep.su/ihep/journal/IHEP-2-2010.pdf>).

5.3. Параметры ускорителей комплекса

Большой синхротрон У-70

Протоны: энергия — 50–60 ГэВ, интенсивность — $1 \cdot 10^{13}$ протонов в цикле (8–10 с); перспективы: увеличение интенсивности до $3 \cdot 10^9$ ядер в цикле.

Ядра углерода промежуточной энергии: энергия — 100–450 МэВ/нуклон, интенсивность — $6 \cdot 10^9$ ядер в цикле (8 с), медленный вывод — 0,6–1 с.

Быстрый бустер-синхротрон У-1.5

Драйверный протонный пучок для прототипа импульсного нейтронного генератора (spallation): энергия — 1,3–1,5 ГэВ, интенсивность — $1 \cdot 10^{13}$ протонов в цикле (6 с), пакетно-импульсный режим, 29 ступок длительностью 80 нс в течение 2 с.

5.4. Место на российском и международном ландшафтах

Ускорительный комплекс У-70 является крупнейшим в России действующим ускорителем заряженных частиц и входит в десятку крупнейших ускорителей мира. Протонный радиографический комплекс ПРГК-100 на пучке У-70 обладает лучшими в мире параметрами в своем классе и востребован для работ в интересах государственной корпорации «Росатом». На углеродном пучке У-70 накоплен уникальный в национальном масштабе опыт получения и использования пучка ядер углерода в радиобиологических и пред-клинических исследованиях, открывающих перспективу практического освоения и внедрения технологии углеродной лучевой терапии в стране. Использование сгруппированного протонного пучка действующего синхротрона У-1.5 позволит в кратчайшие сроки и при минимальных затратах освоить в стране технологию получения и использования импульсных нейтронных потоков в целях исследований, в том числе «двойного» назначения.

5.5. Головная организация — исполнитель

ФГБУ «НИЦ “Курчатовский институт”» (ГРБС), ФГБУ «Институт физики высоких энергий имени А. А. Логунова НИЦ “Курчатовский институт”».

Соисполнители определяются на основе конкурсных процедур. Вовлечение в международное сотрудничество по проекту не предусматривается.

Глава 6. Центр коллективного пользования «Сибирский Кольцевой Источник Фотонов» (ЦКП СКИФ)

6.1. Цели

СКИФ (рис. 6.1) — источник синхротронного излучения поколения 4+ с энергией пучка 3 ГэВ — предназначен для проведения исследований с яркими, интенсивными и когерентными пучками излучения в широком диапазоне длин волн от вакуумного ультрафиолета до жесткого рентгена, включая такие современные методики, как белковая on-line микроскопия, рентгенофлуоресценция с нанопучками, малоугловое рассеяние в режиме фотон-корреляционной спектроскопии, рентгеновские микроскопия, микроспектроскопия и томография, мессбауэровская спектроскопия и т. д. Схема ускорительного комплекса СКИФ с инжектором и экспериментальными станциями первой очереди показана на рисунке 6.1.

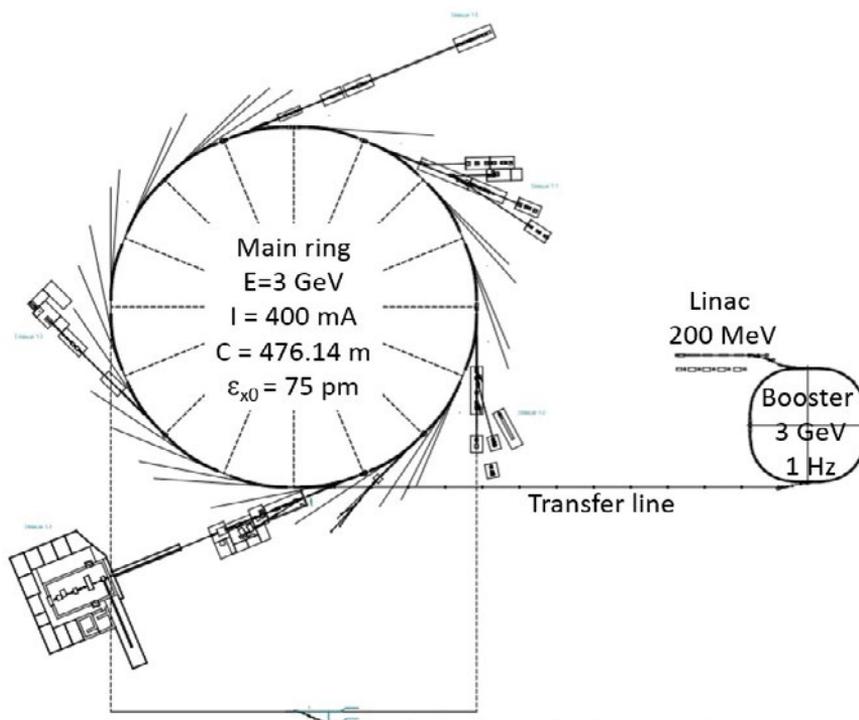


Рис. 6.1. Схема ускорительного комплекса источника СИ СКИФ с инжектором и экспериментальными станциями первой очереди

6.2. Описание

Внешние ограничения (жесткие сроки реализации, ресурсы и т. д.) и задачи экспериментальной программы определили основные характеристики ускорительного комплекса СКИФ:

- Энергия пучка — 3 ГэВ;
- Натуральный (без учета бетатронной связи, токовых эффектов, влияния змеек и ондуляторов и т. д.) горизонтальный эмиттанс $\varepsilon_{x0} \leq 100$ пм;
- Периметр накопителя $\Pi \leq 500$ м;
- Достаточное число бездисперсионных длинных промежутков для размещения источников излучения — (сверхпроводящих) ондуляторов и вигглеров.

Одним из основных требований к источнику СИ СКИФ является короткий срок изготовления. При заданном малом эмиттансе энергия 3 ГэВ позволяет, по сравнению с более высокой, сделать кольцо короче и использовать готовые решения по инжекционному комплексу ИЯФ СО РАН, состоящему из линейного ускорителя с энергией 150÷200 МэВ и бустерного синхротрона на полную энергию. Все эти факторы способствуют ускорению реализации проекта.

Ускорительный комплекс СКИФ состоит из линейного ускорителя — фор-инжектора (аналогичного линаку инжекционного комплекса ИЯФ ВЭПП-5), бустерного синхротрона с длиной орбиты 158,7 м и частотой повторения инжекционного цикла 1 Гц (аналогичного синхротрону, спроектированному и изготовленному в ИЯФ для источника СИ NSLS II) и основного кольца с периметром 476,14 м и 16-ю прямолинейными промежутками длиной 6 м. В двух промежутках планируется разместить ускоряющие резонаторы и оборудование инжекции, а оставшиеся 14 использовать для поставок «вставных устройств» — вигглеров и ондуляторов. Полное возможное количество каналов вывода СИ — около 30.

6.3. Параметры

Источником электронов служит СВЧ пушка (частота — 178,5 МГц) на основе термо-катодного сеточного узла. *Линейный ускоритель* (рис. 6.2 и табл. 6.1) использует структуру на основе диафрагмированного волновода, работающего в режиме бегущей волны на частоте 2 856 МГц, питаемую тремя клистродами мощностью 50 МВт каждый.

Таблица 6.1

Основные параметры линака

Энергия номинальная, МэВ	200
Энергия максимальная, МэВ	210
Частота выстрелов, Гц	1
Длина последовательности сгустков, нс	до 310
Время между сгустками, нс	5,6
Количество сгустков в поезде	до 55
Максимальный заряд в поезде, нКл	15
Заряд в одном сгустке, нКл	0,27
Геометрический эмиттанс при 200 МэВ, нм	150
Разброс энергии при 200 МэВ (rms)	J

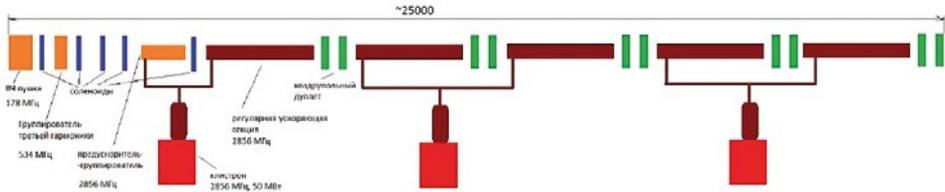


Рис. 6.2. Схема линейного ускорителя

Бустерный синхротрон (рис. 6.3 и табл. 6.2) ускоряет электроны, выпущенные из линейного ускорителя с энергией 200 МэВ, до максимальной энергии накопительного кольца 3 ГэВ. Магнитная структура бустера состоит из четырех квадрантов, разделенных прямолинейными промежутками. Каждый квадрант включает пять идентичных ячеек периодичности с двумя модифицированными ячейками на концах квадранта для подавления дисперсии. Квадрант содержит по 8 комбинированных, фокусирующих и дефокусирующих, поворотных магнита, квадрупольные и секступольные линзы.



Рис. 6.3. Бустерный синхротрон

Таблица 6.2

Параметры бустерного синхротрона

Энергия пучка, ГэВ	0,2-3
Симметрия	4
Периметр, м	158,7
Частота повторения, Гц	1
Горизонтальный эмиттанс (3 ГэВ), нм	37,4
Энергетический разброс (3 ГэВ)	$0,83 \cdot 10^{-3}$
Потери на оборот (3 ГэВ), кэВ	686
Коэффициент уплотнения орбит	$8,8 \cdot 10^{-3}$
Натуральный хроматизм, (x/y)	-10/-14
Время затухания (3 ГэВ), (x/e) , мс	4,6/2,3

Накопитель (табл. 6.3) имеет магнитную структуру МВА (Multi-Bend Achromat), идентичную у всех 16-ти суперпериодов. Ячейка периодичности типа ТМЕ базируется на одном магните со слабым поперечным отрицательным градиентом. В каждом из суперпериодов один из магнитов (в центральной ячейке) выполнен с большим полем 2 Тл, что позволяет выводить из него излучение с достаточно жёстким спектром. Натуральный горизонтальный эмиттанс в таком кольце получился чуть меньше 75 пм.

Таблица 6.3

Параметры накопительного кольца источника СИ СКИФ

Энергия пучка, ГэВ	3
Симметрия	16
Периметр, м	476,14
Горизонтальный эмиттанс, пм	73,2
Энергетический разброс	$1 \cdot 10^{-3}$
Потери на оборот, кэВ	536
Бетатронные частоты, (x/y)	50,806/18,84
Коэффициент уплотнения орбит	$7,64 \cdot 10^{-5}$
Натуральный хроматизм, (x/y)	-149/-55
Энергетический акцептанс	3%
Длина сгустка, мм	5,3
Радиационные числа, (x/e)	1,94/1,06
Время затухания, (x/e), мс	9,2/16,7

В качестве источников излучения (табл. 6.4) предполагается широко использовать вставные устройства — ондуляторы и вигглеры (в основном, сверхпроводящие, созданные на основе разработок, уже существующих в ИЯФ).

Таблица 6.4

Список и параметры вставных устройств первой очереди

№	Станция, энергетический диапазон	Устр.	В (Т)	l	N_{per}	P_{SR} (кВт)
1	«Микрофокус» (5–47 кэВ)	SCU	1,2	15,6	128	7,2
2	Структурная диагностика (5–40 кэВ)	SCU	1,2	15,6	128	7,2
3	Быстропротекающие процессы (15–100 кэВ)	SCW	4	33,7	60	75
4	XAFS и магнитный дихроизм (2,5–35 кэВ)	SCU	1,2	15,6	128	7,2
5	Диагностика высокой энергии (25–200 кэВ)	SCW	4	33,7	60	75
6	Электронная структура (0,01–2 кэВ)	EMU	0,5	100/200	20/10	1,8

Дополнительное излучение вставных устройств позволяет уменьшить эмиттанс источника СИ СКИФ до ~50–60 пм.

6.4. Место на российском и международном ландшафтах

Источник СИ СКИФ принадлежит к четвертому поколению циклических источников СИ, чьим признаком является высокая яркость излучения, обеспечиваемая эмиттансом, который существенно меньше 1 нм. В настоящее время в мире имеется один работающий источник СИ четвертого поколения MAX IV (энергия — 3 ГэВ, Лунд, Швеция), два источника СИ находятся в стадии запуска — ESRF-EBS (6 ГэВ, Гренобль, Франция) и Sirius (3 ГэВ, Кампинус, Бразилия). Несколько новых проектов одобрено к реализации (например, APS-U, 6 ГэВ, США или NEPS, 6 ГэВ, Китай). В России имеется два источника СИ в Новосибирске (ВЭПП-3 и ВЭПП-4 с энергиями 2 ГэВ и 5 ГэВ, первого поколения, работающие в «паразитном» режиме совместно с экспериментами физики высоких энергий) и источник второго поколения НИЦ «Курчатовский институт» с энергией 2,5 ГэВ.

6.5. Соисполнители

Проект осуществляется в рамках широкой кооперации научно-исследовательских институтов и университетов РФ. За работы по ускорителям частиц отвечает ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН. Оборудование экспериментальных станций разрабатывается Институтом катализа СО РАН, Институтом гидродинамики СО РАН, Институтом геологии СО РАН, Новосибирским государственным университетом, Балтийским федеральным университетом, другими научными организациями.

6.6. Ресурсы и срок реализации

Проект осуществляется на новой площадке в Наукограде Кольцово (примерно в 10 км от Новосибирска и от Новосибирского Академгородка). Предполагаемая численность нового научного центра — 350–400 человек. Стоимость проекта, включая ускорительный комплекс, шесть экспериментальных станций первой очереди, вставные устройства первой очереди, необходимую инженерную инфраструктуру, лабораторный корпус и пр. — 37 млрд рублей. В конце 2023 года источник должен продемонстрировать первый пучок синхротронного излучения и в течение 2024 года должны быть запущены шесть станций первой очереди.

6.7. Международное сотрудничество

Идут переговоры о сотрудничестве СКИФ с Европейской лигой ускорительных источников фотонов (LEAPS).

6.8. Необходимые технологии

- Моделирование динамики частиц с учётом широкого класса явлений: нелинейных магнитных полей, электромагнитного поля, обусловленного пространственным зарядом пучка, ошибок изготовления и размещения элементов ускорителя, радиационного трения и квантовой раскачки колебаний, внутрисгусткового рассеяния и т. п.

- Технологии, связанные с разработкой магнитных структур со сверхмалым эмиттансом.

- Технологии работы с большими токами пучка.
- Исследование фотосорбционных свойств вакуумных поверхностей и покрытий (NEG). Освоение технологий напыления покрытий.
- Разработка, производство и измерение высокоточных магнитов ускорителей с низким содержанием нежелательных (нелинейных) компонентов поля.
- Разработка, производство и изготовление магнитных элементов ускорителей на основе постоянных магнитов.
- Разработка, производство и изготовление вставных сверхпроводящих устройств (особенно, короткопериодных ондуляторов).
- Освоение серийного производства мощных СВЧ генераторов на основе клистронов для питания линейных ускорителей.
- Разработка мощных СВЧ генераторов на основе высокочастотных транзисторов для ускоряющих систем синхротронов и накопителей частиц.

Глава 7. Синхротронный комплекс РФЯЦ-ВНИИЭФ

7.1. Цели

Целью данного проекта является создание синхротронного комплекса для испытаний радиационно-стойкой электронной компонентной базы (ЭКБ) и радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) на стойкость к воздействию ионизирующих излучений космического пространства (ИИ КП) и сопутствующим им эффектам.

7.2. Описание

Основной частью создаваемого радиационного Комплекса является циклический ускоритель синхротронного типа, ускоряющий протоны и ионы. Главной особенностью комплекса является возможность формирования и ускорения пучков заряженных частиц (от протонов до ионов Bi) с изменяемой интенсивностью. Ускоренные заряженные частицы могут воздействовать на объекты испытаний совместно с электронным и тормозным излучениями с возможностью одновременного воздействия электростатических разрядов.

Для этого в состав Комплекса (рис. 7.1) входят: бустерный ускоритель (БУ) и основной синхротрон (ОС) и установки, обеспечивающие дополнительные виды воздействий на объекты испытаний.



Рис. 7.1. Состав синхротронного комплекса

БУ является самостоятельной моделирующей установкой, позволяющей получать пучки ускоренных ионов и протонов с перестраиваемой энергией (от 7,5 до 700 МэВ по протонам). БУ включает следующие основные элементы:

- инжекционный комплекс (ИК) на основе линейного ускорителя протонов и легких ионов и линейного ускорителя тяжелых ионов;
- бустерный синхротрон (БС);
- каналы транспортировки (ТК) ионного пучка.

БУ позволяет сформировать и ускорить пучки ионов с возможностью их дальнейшего ускорения в ОС до более высоких энергий, либо с возможностью вывода в облучательные помещения.

7.3. Параметры

Бустерный ускоритель

Параметр	Значение	
Тип ускоряемых частиц	p	²⁰⁹ Bi
Энергия инжекции, МэВ/нуклон	7,5	3,5
Энергия экстракции, МэВ/нуклон	от 7,5 до 700	от 3,5 до 36
Шаг изменения энергии пучка при выводе, % от максимальной	1	
Интенсивность, част./импульс	от 10 ⁴ до 10 ¹¹	от 10 ³ до 10 ⁸
Средняя плотность потока частиц на облучательной позиции, см ⁻² ·с ⁻¹	Регулируемая от 10 до 10	Регулируемая от 10 до 10
Максимальная частота повторения, Гц	1	
Периметр кольца, м	88	

Основной синхротрон

Параметр	Значение	
Тип ускоряемых частиц	p	²⁰⁹ Bi
Энергия инжекции, МэВ/нуклон	700	36
Энергия экстракции, МэВ/нуклон	от 700 до 4000	от 36 до 400
Шаг изменения энергии пучка при выводе, % от максимальной	1	
Интенсивность, част./импульс	от 10 ⁴ до 10 ¹¹	от 10 ³ до 10 ⁸
Средняя плотность потока частиц на облучательной позиции, см ⁻² ·с ⁻¹	Регулируемая от 10 до 10	Регулируемая от 10 до 10
Максимальная частота повторения, Гц	1	
Периметр кольца, м	168,5	

7.4. Место проекта на российском и международном ландшафте

В результате выполнения проекта в Российской Федерации на базе ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» будет создан испытательный центр федерального значения, который обеспечит возможность проведения радиационных испытаний отечественной и импортной ЭКБ на стойкость к действию всех видов ИИ КП.

7.5. Головная организация и соисполнители

Головная организация — ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» (г. Саров). В качестве основных соисполнителей в проекте участвуют ИЯФ им Г.И. Будкера СО РАН (г. Новосибирск), НИЯУ-МИФИ (г. Москва), КИ ГНЦ ИТЭФ (г. Москва), ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ» (г. Снежинск), АО НИИЭФА им. Ефремова (г. Санкт-Петербург), НИИЭФА-ЭНЕРГО (г. Санкт-Петербург), ОИЯИ (г. Дубна), АО НИИТФА (г. Москва), предприятия отечественной промышленности.

7.6. Ресурсы и сроки

Кадровые ресурсы: конструкторские и инженерно-технические специалисты — 100 человек, научные сотрудники — 50 человек, аспиранты и студенты — 30 человек.

Срок исполнения проекта — 2019–2027 гг.

7.7. Международное сотрудничество

Не предполагается.

7.8. Необходимые технологии

НИР и ОКР при создании ИК на основе линейного ускорителя протонов и лёгких ионов и линейного ускорителя тяжелых ионов и достижения заявленных параметров ионных пучков состоят в следующих расчётных и конструкторских работах и организационных мероприятиях:

1. Расчёты и разработка схемы генерации и формирования ионных пучков с требуемым зарядовым состоянием и достаточной интенсивностью (высокоинтенсивные ЭЦР- и лазерно-плазменные источники ионов и т. д.);

2. Расчёты и разработка линейных ускорителей включают различные структуры (с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой — ПОКФ (RFQ), резонаторы с трубками дрейфа — DTL и т. д.), причём проведение расчётно-теоретических работ по динамике заряженных частиц, трёхмерным электродинамическим расчётам резонансных структур, тепловым расчётам осложнены отсутствием доступных отечественных программных продуктов, сравнимых по своим возможностям с такими пакетами прикладных программ, как CST Studio, ANSYS, TRACEWIN и т. д.;

3. Создание технологий изготовления элементов комплекса: инжекторов ионов, высокодобротных резонансных структур с гальваническим покрытием, позволяющих ускорять большой набор ионов, элементов магнитно-оптических структур, обеспечение высокого вакуума за счет конструктивных особенностей;

4. Разработка ВЧ генераторов и усилителей ВЧ мощности на частоте 30÷400 МГц, с выходными импульсными мощностями до 1 000 кВт и скважностью импульсов (отношение импульсной мощности к средней) от 100 до 1 000.

Требуется создание отечественных производственных мощностей для изготовления данных генераторов с возможностями по тиражированию в течение длительного времени эксплуатации комплекса;

5. Разработка систем формирования однородных полей излучения и систем диагностики высокоинтенсивных ионных пучков в широком диапазоне энергий, обеспечивающих условия проведения испытаний ЭКБ и РЭА.

НИИР и ОКР при создании БУ и ОС для широкого набора ионов также требуют проведения следующих расчётных и конструкторских работ и организационных мероприятий:

1. Расчёт, конструирование и изготовление элементов магнитно-оптических систем (МОС) — дипольных, квадрупольных, корректирующих магнитов и др.;

2. Расчёт, конструирование и изготовление кикер-магнитов, септумов и других элементов каналов инжекции и экстракции ускоренных ионных пучков;

3. Разработка, конструирование и изготовление ускоряющих станций;

4. Создание высокопроизводительных автоматизированных рабочих мест, обеспечивающих проведение в непрерывных режимах испытаний широкой номенклатуры ЭКБ и РЭА на стойкость к воздействию всех видов ИИ КП, с возможностью обмена информацией между производителями ЭКБ и испытательными центрами.

Часть III. Подготовка кадров в области ускорителей заряженных частиц

Для проектирования, строительства и дальнейшей полноценной работы ускорительных комплексов мегасайенс класса, таких как разрабатываемые в настоящее время в России комплексы NICA, СКИФ, DERICA, ИССИ-4 (СИЛА), новые установки в ВНИИЭФ и ВНИИТФ и т.д., поддержания функционирования действующих установок, а также освоения новых ускорительных технологий, требуется большое количество высококвалифицированных профессионалов различных специальностей и уровня подготовки. Мировой опыт показывает, что при строительстве источников синхротронного излучения или относительно небольших коллайдеров «с нуля» задействовано 300–500 человек. Например, максимальное число занятых при строительстве источника синхротронного излучения NSLS-II (США) составляло 490 человек, из которых 360 занимали постоянные позиции. Можно условно разделить этих сотрудников на четыре примерно равные по численности группы: разработчики, инженерный персонал, технический персонал и дополнительные сотрудники на временных трудовых договорах, усиливающие инженерный и технический персонал. В это число не входят сотрудники подрядных организаций.

Новые установки мегасайенс класса, которые начали строиться и проектироваться в нашей стране, потребуют еще большего числа специалистов как для строительства, так и для обслуживания ускорительных комплексов. Необходимо отметить, что подготовка физиков и инженеров, специализирующихся в области проектирования ускорителей, является одной из самых сложных. В настоящее время во всем мире действует не более 15 кафедр, занятых такой подготовкой. При этом впервые в мире специализированная подготовка физиков-ускорительщиков была организована именно в нашей стране. Для развития ускорительной техники в СССР в 1950–60-х годах были созданы три специализированные кафедры в Московском инженерно-физическом институте, Московском государственном университете, Новосибирском государственном университете. Суммарный выпуск специалистов доходил в 1970–80 годы до 100–120 человек в год. Отдельной проблемой являлась подготовка инженерных кадров в области ускорителей. Для этого дополнительно была создана еще одна профильная кафедра в Новосибирском электротехническом институте (ныне Новосибирский государственный технический университет), базировавшаяся в ИЯФ СО АН СССР. Дополнительно готовились кадры в Ленинградском политехническом институте (кафедра мощной импульсной техники, не существует в настоящее время), Московском высшем техническом училище (кафедра проектирования физической аппаратуры, перепрофилирована), Харьковском государственном университете. Кафедра электрофизических установок в МИРЭА работала с 1998 по 2012 как базовая кафедра при ОИЯИ. Выпускники этой кафедры (около 30 человек) сейчас работают в ОИЯИ. Подготовка конструкторов физической аппаратуры, которая 50 лет проводилась в МГТУ, в настоящее

время прекращена, профильная кафедра ликвидирована. Специалисты по различным системам, необходимым для работы ускорителей (вакуум, ВЧ, магниты и т.д.) ранее приходили в ускорительные лаборатории из нынешних СПбПУ, ТПУ, ХГУ, МВТУ и других университетов.

В качестве примера рассмотрим эволюцию системы подготовки кадров в области ускорителей заряженных частиц на примере МИФИ. До 1991 года специалистов в области ускорителей заряженных частиц готовили по специальности «Вакуумная техника электрофизических установок» в МИФИ на кафедре Электрофизических установок (ЭФУ). Кафедра ЭФУ является известным центром подготовки квалифицированных научных и инженерных кадров. Помимо собственно научно-педагогической деятельности, сотрудники кафедры ЭФУ успешно ведут научно-исследовательскую работу и выполняют инженерные разработки, результаты которых востребованы на практике. Со дня своего основания с 1948 года кафедрой ЭФУ НИЯУ МИФИ подготовлено свыше 3500 специалистов в области ускорительной техники.

29 марта 1995 году был утвержден государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования (ГОС ВПО) выпускника по специальности 070400 — *Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника*. Согласно общей характеристике, эта специальность являлась областью науки и техники, включающей в себя способы и методы создания, экспериментального и теоретического исследования пучков заряженных частиц и их использования в электрофизических установках, в том числе в ускорителях заряженных частиц, создания и использования электрофизических установок и их систем в научных и прикладных целях.

Государственным образовательным стандартом второго поколения (ГОС 2) была утверждена специальность 140304.65 (Квалификация: Инженер-физик, Образовательная программа: Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника, Уровень образования: высшее профессиональное, Код ОКСО: 140304.65).

С 2009 года введены в действие Федеральные государственные образовательные стандарты высшего профессионального образования (ФГОС ВПО) третьего поколения. ФГОС ВПО были призваны стать стандартами нового поколения, обеспечивающими дальнейшее развитие уровневого (бакалавриат, специалитет, магистратура, аспирантура) высшего профессионального образования с учетом требований рынка труда. Отличительными особенностями ФГОС ВПО являлись:

- выраженный компетентностный характер;
- разработка пакета стандартов по направлениям как совокупности образовательных программ бакалавра, специалиста и магистра, объединяемых на базе общности их фундаментальной части;
- обоснование требований к результатам освоения основных образовательных программ (результатов образования) в виде компетенций;
- отсутствие компонентной структуры (федерального, национально-регионального, вузовского) с одновременным значительным расширением академических свобод высших учебных заведений в части разработки основных образовательных программ.

В соответствии с Федеральным законом от 29.12.2012 № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации»:

— основные профессиональные образовательные программы разрабатываются в соответствии с федеральными государственными образовательными стандартами или образовательными стандартами и с учетом соответствующих примерных образовательных программ;

— программы профессионального обучения разрабатываются на основе установленных квалификационных требований (профессиональных стандартов);

— содержание дополнительных профессиональных программ должно учитывать профессиональные стандарты, квалификационные требования, указанные в квалификационных справочниках по соответствующим должностям, профессиям и специальностям, при этом программы профессиональной переподготовки разрабатываются на основании установленных квалификационных требований, профессиональных стандартов и требований соответствующих ФГОС среднего профессионального и (или) высшего образования к результатам освоения образовательных программ.

Задача актуализации ФГОС и образовательных программ в условиях изменения законодательства, с учетом требований профессиональных стандартов, а также в условиях отсутствия профессиональных стандартов по отдельным видам профессиональной деятельности, сформулирована в поручениях Президента РФ по итогам совещания по вопросам разработки профессиональных стандартов, состоявшегося 9 декабря 2013 года.

Профессиональный стандарт — многофункциональный нормативный документ, определяющий в рамках конкретного вида экономической деятельности (области профессиональной деятельности) требования к содержанию и условиям труда, квалификации и компетенциям работников по различным квалификационным уровням.

Постепенно профстандарты заменяют действующие квалификационные справочники ЕКС (Единый квалификационный справочник должностей руководителей, специалистов и других служащих) и ЕТКС (Единый тарифно-квалификационный справочник работ и профессий рабочих), которые утратили свою актуальность (п. 16 Комплексного плана мероприятий по разработке профессиональных стандартов, утвержденного распоряжением Правительства РФ от 31 марта 2014 г. № 487-р).

Важно отметить, что как справочники ЕТКС и ЕКС, так и профессиональные стандарты продолжают носить рекомендательный характер, за исключением некоторых профессий и должностей с особыми условиями труда. В настоящее время, для примера, ГК Росатом совместно с образовательными организациями разработано, утверждено и введено в действие 86 профессиональных стандартов (Профстандарт: 24 Атомная промышленность). По ускорительной технике таковые стандарты отсутствуют.

Активная актуализация ФГОС ВО 3++ осуществляется в части разделов, содержащих описание профессиональной деятельности, к которой готовится выпускник, и требований к результатам освоения основной образовательной программы.

Несмотря на все изменения в системе высшего образования, подготовка специалистов в области ускорительной техники не прекратилась. Можно утверждать, что после закрытия кафедры в МГУ в середине 1980-х годов (ныне действующая кафедра физики ускорителей и радиационной медицины не является прямой наследницей и специализируется, в основном, на медицинской физике) сложились две основные школы подготовки кадров — в МИФИ и в Новосибирске, действующие до сих пор. С 2012 года начата подготовка в Университете «Дубна», куда после ликвидации базовых кафедр МИРЭА перешла упомянутая выше кафедра ЭФУ. В настоящее время суммарный выпуск специалистов и магистров в области физики и техники ускорителей в НИЯУ МИФИ, НГУ и НГТУ составляет не более 30 человек в год, что явно недостаточно для удовлетворения кадрового голода даже действующих установок. Инженеров по ВЧ системам продолжают готовить в МВТУ, но в интересах оборонной промышленности. Сегодня образовательные организации, приспосабливаясь и, в какой-то мере, частично теряя компетенции обучения (в силу ограниченности времени обучения на подготовку по модулю специальности), разрабатывают образовательные программы по направлениям (специальностям): Физика (бакалавриат, магистратура), Электроника и автоматика физических установок (специалитет), Ядерная физика и технологии (бакалавриат, магистратура), Физика и астрономия (аспирантура) и др. Ситуация усугубляется еще и тем, что выпускники имеют высокий, по сравнению с другими университетами, уровень подготовки и на них имеется стабильно высокий спрос со стороны организаций ОПК, ГК Росатом, ГК Росэлектроника, специальных служб, центров высокотехнологичной медицины.

Дополнительную сложность решению проблемы кадрового обеспечения мегасайенс проектов придает низкий интерес школьников к естественнонаучным специальностям. Долгие годы в стране культивировался интерес к гуманитарным, юридическим и экономическим специальностям, что привело к дисбалансу между потребностью страны в кадрах и их выпуском университетами. На примере МИФИ можно утверждать, что в последние 10 лет контрольные цифры приема (КЦП) на базовые «ядерные» специальности постоянно сокращались и сейчас составляют 50–60% от уровня 10-летней давности. Например, в НИЯУ МИФИ КЦП по специальности «Электроника и автоматика физических установок» показатель упал со 190 в 2016 году до 43 в 2019 году. При этом потребность в кадрах растет как со стороны научных институтов, так и со стороны ВПК. Правда, в последние 3–4 года наметилась обратная тенденция — рост интереса со стороны абитуриентов и их родителей к естественнонаучным и техническим специальностям. При этом КЦП не увеличиваются, что приводит к росту конкурса и потере большого количества перспективных абитуриентов, а в дальнейшем студентов, уходящих на другие направления подготовки.

Еще одна проблема — подготовка кадров со средним специальным техническим образованием (техников, операторов, лаборантов, вспомогательного технического персонала и т. д.). За последние 20 лет их подготовка стала еще более специализированной и перешла на баланс заинтересованных предприятий и госкорпораций. В этих условиях привлечь технические

кадры можно только с помощью более выгодных в финансовом и социальном плане предложений. Престиж рабочих профессий снизился до уровня, при котором число желающих получать их очень мало, и образовался разрыв между потребностями высокотехнологичной промышленности и возможностью подготовки кадров достаточной квалификации в минимально необходимом количестве.

Потребность (и наличие) в кадрах для каждого проекта класса мегасайенс можно оценить следующим образом:

- специалисты-разработчики ускорительного комплекса — 60–70;
- специалисты-разработчики инженерных и вспомогательных систем, конструкторы, технологи — 40–60;
- инженерный персонал — 100–120;
- технический персонал — 100–120.

С учетом вышесказанного, для качественной подготовки специалистов в области ускорительной техники для российских проектов мегасайенс класса необходимо:

Организационные вопросы

1. Определить потребность отрасли в целом и каждого из крупных проектов в частности в специалистах разного профиля и уровня.
2. Сформировать государственный заказ на *контрольные цифры приема* (КЦП) на специальности, подлежащие замещению специалистами с высшим образованием в области ускорительной техники.
3. Сформировать заказ отрасли на контрольные цифры приема обучения по целевой подготовке специалистов по ускорителям заряженных частиц.

Образовательные вопросы и КЦП

4. Разработать совместно с заинтересованными образовательными организациями новые федеральные государственные образовательные стандарты высшего образования (ФГОС ВО 3++) и федеральные государственные образовательные стандарты среднего профессионального обучения (ФГОС СПО) подготовки бакалавров, специалистов и магистров с учетом требований профессиональных стандартов (трудовых функций) отрасли в области ускорительной техники; в том числе предлагается открыть новое направление подготовки «Ускорители заряженных частиц» (специалитет и магистратура) в рамках 160000 «Физико-технические науки и технологии» или 030000 «Физика и астрономия» укрупненных групп специальностей (УГС).

5. Начать разработку профессиональных стандартов в области ускорительной техники; при невозможности разработки стандартов, сформулировать базовые профессиональные компетенции (трудовые функции) специалистов отрасли в области ускорительной техники.

6. Для бакалавриата/специалитета/магистратуры общее число дополнительных бюджетных мест должно быть не менее 60–70 в год (в реальности — до 200, т. к. не все выпускники устраиваются на работу по специальности подготовки) с перспективой увеличения до 100–120 к 2024 году.

7. Сформировать государственный заказ на контрольные цифры приема (КЦП) на специальности, подлежащие замещению специалистами с высшим образованием в области инженерных систем, а также конструкторов и технологов (не менее 20–30 мест в год с перспективой увеличения до 60–70 в год).

8. Сформировать государственный заказ на контрольные цифры приема на специальности, подлежащие замещению техническим персоналом (не менее 40–50 человек в год); заключить соответствующие договора с учреждениями среднего профессионального образования.

9. Сформировать государственный заказ для приема на обучение в пределах целевой квоты (специалитет и магистратура).

10. Изучить вопрос о возможности подготовки инженерных кадров на базе программ бакалавриата, реализуемых на базе оставшихся отделений очно-заочной (вечерней) подготовки.

11. Разработать совместно с заинтересованными образовательными организациями новые федеральные государственные образовательные стандарты среднего профессионального образования.

12. С учетом требований профессиональных стандартов разработать программы дополнительного обучения и переподготовки кадров.

Организационно-финансовые вопросы

13. Предусмотреть меры по индивидуальной целевой поддержке обучающихся.

14. Для подготовки специалистов по ускорительной технике необходимо провести модернизацию материально-технического оснащения учебного и лабораторного оборудования в НИЯУ МИФИ, НГУ, НГТУ.

Профориентационные вопросы

15. Открыть и развивать детские технопарки, где школьники под руководством представителей ведущих организаций и преподавателей ВУЗов, непосредственно связанных с теорией, расчетом, проектированием, изготовлением и эксплуатацией всех типов ускорителей заряженных частиц, получают возможность сделать и представить на защиту в различных инженерных конкурсах свои научные проекты.

16. Разработать программы профориентации школьников для повышения интереса к естественнонаучным специальностям.

Ведущие ускорительные организации, имеющие опыт подготовки специалистов совместно с высшими образовательными центрами, готовы гарантировать режим максимального благоприятствования по приему на работу выпускников ускорительных кафедр.

Таблица 1

Оценка необходимых дополнительных контрольных цифр приема (КЦП) на программы подготовки бакалавриата / специалитета / магистратуры на 2020–2027 годы для увеличения числа специалистов в области проектирования установок, развития экспериментальных станций и последующей работы центров.

Специальность / год	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Всего 2020-24	После 2024 года (в год)
Ускорители заряженных частиц		20	20	20	20	20	100	15–20
Конструкторы систем ускорителей и экспериментальных станций		100	100	100	100	100	500	50
Исследователи, работающие на экспериментальных станциях источников синхротронного и нейтронного излучения		30	60	90	100	100	380	60
Физика реакторов и теплофизика		30	20	10			60	10–15
Спектроскопия и экспериментальная ядерная физика		20	20	20			60	15–20
Радиационная безопасность		5	5	5	5	5	25	5
Информационные технологии, в том числе «большие данные»		50	50	50	50	50	250	30
Итого ВПО	-	255	275	295	275	275	1395	185–200

Таблица 2

Примерное количество участников программ повышения квалификации и программ дополнительного профессионального образования, прошедших подготовку в качестве пользователей, проводящих исследования в центрах синхротронных и нейтронных исследований.

Пользователи / год	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Всего 2020-24	После 2024 года (в год)
Пользователи, использующие синхротронное и нейтронное излучение для научных исследований		130	130	330	550	1100	2240	1000
Пользователи, использующие синхротронное и нейтронное излучение для развития промышленных и медицинских технологий		70	120	120	130	160	600	100
Пользователи, использующие синхротронное и нейтронное излучение для развития специальных технологий		40	60	60	70	90	320	50
Всего		230	300	500	750	1350	3130	1200

Таблица 3

Перечень ВУЗов, в которых в настоящее время реализуются или могут быть потенциально реализованы программы ВО и ДПО в области синхротронных и нейтронных исследований.

Специальность	Университет
Ускорители заряженных частиц	НИЯУ МИФИ, НГУ
Конструкторы систем ускорителей и экспериментальных станций	НГТУ, МВТУ, ТПУ, Балтийский ГУ, ЛЭТИ, НИЯУ МИФИ
Исследователи, работающие на экспериментальных станциях источников синхротронного и нейтронного излучения	НГУ, ЮФУ, СПбГУ, МГУ, НИЯУ МИФИ, УРФУ, ТГУ, СФУ, ДВФУ, ИТМО
Физика реакторов и теплофизика	НИЯУ МИФИ, ТПУ, МВТУ
Спектроскопия и экспериментальная ядерная физика	НИЯУ МИФИ, МФТИ, МГУ, СПбГУ
Радиационная безопасность	НИЯУ МИФИ, ТПУ
Информационные технологии, в том числе «большие данные»	НГУ, НИЯУ МИФИ, МГУ, ИТМО, ЮФУ
Программы ДПО и ПК	НИЯУ МИФИ, НГУ, НГТУ, МГУ, СПбГУ, МВТУ, УРФУ, ТГУ, ТПУ, ЮФУ, СФУ, ДВФУ, ИТМО, ЛЭТИ, Балтийский ГУ, ЛЭТИ, НИЯУ МИФИ

Часть IV. Заключение

1. Дорожная Карта «Развитие физики и технологии ускорителей заряженных частиц» соответствует Разделу 1.3.3.5 фундаментальных и поисковых исследований (Физика ускорителей заряженных частиц, включая синхротроны, лазеры на свободных электронах, источники нейтронов и др.), являясь составной частью направления 1.3.3 «Ядерная физика и физика элементарных частиц» Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 гг.).

2. В РФ действуют крупные ускорители мирового класса, которые являются базовыми экспериментальными установками таких всемирно известных научных центров как ОИЯИ, ИЯФ СО РАН, ИЯИ РАН, институты НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ, ИТЭФ, ПИЯФ. В настоящее время в этих научных центрах сохранились выдающиеся школы ускорительной физики и технологий, действуют крупные ускорительные комплексы, обеспечивающие высокий уровень фундаментальных и прикладных исследований в стране.

3. Ученые и инженеры-ускорительщики РФ активно сотрудничают в передовых зарубежных ускорительных центрах — на ускорителях LHC (CERN), RHIC (BNL), CEBAF (JNL), Spiral2 (GANIL), RIKEN, JPARC, KEK, FNAL, FAIR/GSI, DESY, XFEL и др., внося весомый вклад в развитие новейших ускорительных систем. Участие в таких международных проектах обеспечивает отечественным учёным постоянное информирование и получение доступа к самым передовым технологиям в области физики и техники ускорителей. Опираясь на опыт участия РФ в проектах LHC, FAIR и XFEL, необходимо сохранять российское участие в ведущих научных проектах, в частности, в проекте Future Circular Collider (FCC), разрабатываемом в ЦЕРН.

4. Предлагаемая программа (Дорожная Карта) призвана восстановить в РФ современную экспериментальную базу на основе ускорителей заряженных частиц, а также создать условия для ее непрерывного развития, позволяющего оперативно и адекватно отвечать на вызовы современного мира.

5. В Дорожной Карте формулируются предложения по созданию новых ускорительных проектов/центров/установок для фундаментальной ядерной физики, физики высоких энергий (физики частиц). Создание этих ускорительных центров и установок в РФ позволит вывести отечественную науку на передовые позиции в мире, обеспечить консолидацию потенциала ведущих коллективов российского научного сообщества, поднять на новый уровень подготовку кадров и международное научно-техническое сотрудничество.

6. Особое внимание уделено ускорителям для ряда важнейших современных прикладных применений. Сформулированы предложения по созданию новых ускорительных установок для прикладных задач. Продвижение прикладных отечественных ускорителей и радиационных технологий на внутреннем рынке сопровождается ростом производства и развитием

связанных технологий (микроэлектроника, СВЧ и вакуумная техника, СП и т. д.), без которых невозможно построить современный ускоритель. Таким образом, развитие ускорительной техники для ряда важнейших прикладных применений даст весомый положительный эффект в индустрии высоких технологий в РФ.

Рекомендации

1. В области релятивистской ядерной физики тяжелых ионов и фазовых переходов в сильновзаимодействующей материи

Ускорительный комплекс на встречных ионных пучках NICA создается как многофункциональная исследовательская лаборатория, призванная обеспечить выполнение широкой программы исследований фундаментального и прикладного характера, а также стать базой для подготовки высококвалифицированных специалистов для стран-участниц ОИЯИ.

Коллайдерный комплекс NICA во многом является новым шагом в применении современных ускорительных технологий. Часть из них впервые реализуется в России, а некоторые не имеют аналогов в мире. В установке используется оригинальная трехступенчатая схема накопления и формирования пучков, в проект заложены три системы охлаждения пучков.

Параметры ускорительного комплекса в целом и коллайдера в частности позволят исследовать ранее не достигавшиеся состояния сверхплотной барионной материи.

Наличие устройств по управлению спином поляризованных пучков и поляриметрии позволяет вывести на новый уровень целый ряд прецизионных экспериментов в области спиновой физики.

Рекомендация: поскольку создание ускорительного комплекса NICA обеспечивает осуществление и развитие богатой и многосторонней программы фундаментальных и прикладных исследований в ближайшие несколько десятилетий, рекомендуется последовательное продолжение реализации проекта в полном объеме.

2. В области физики частиц

«Супер Чарм-Тау Фабрика» (СЧТФ) — электрон-позитронный коллайдер, разрабатываемый в ИЯФ СО РАН, для работы с энергией в системе центра масс $\sim 3\text{--}7$ ГэВ со светимостью на два порядка превышающую достигнутую в этом диапазоне энергий ранее. Этот шаг по энергии обеспечит возможность исследования природы чарм-кварка на новом уровне точностей его параметров. Основной целью экспериментов на СЧТФ является изучение процессов с с-кварками и тау-лептонами в конечном состоянии. Возможна работа с продольно поляризованным электронным пучком, что значительно обогащает научную программу.

Рекомендация: поскольку для реализации «Супер Чарм-Тау Фабрики» необходим целый ряд передовых ускорительных технологий, не существующих в мире или в РФ, для уменьшения рисков рекомендуется рассмотреть возможность создания в ИЯФ СО РАН малогабаритной электрон-позитронной ускорительной установки, отрабатывающей такие технологии. По проекту Фабрики определиться с графиком, сроками и ресурсным обеспечением.

3. В области ядерной физики низких энергий

Для того чтобы кардинально переломить ситуацию после трёх десятилетий стагнации требуется перспективное видение, консолидация усилий и инвестиции гораздо большего уровня с целью создания ядерно-физического центра (центров) мирового класса. Во всем мире для ядерной физики низких энергий стандартом стало создание крупного национального лидера — «фабрики радиоактивных изотопов» — который обладает самой современной дорогостоящей инфраструктурой и концентрирует вокруг себя усилия мирового научного сообщества. При этом, наличие в разных научных центрах установок разной направленности позволяет существенно расширить проблематику экспериментальных исследований и поддержать «видовое разнообразие» в научной «экосистеме». Мировое лидерство сегодня возможно только на базе крупнейших общенациональных центров, где созданы лучшие условия.

Рекомендация: начать реализацию общенационального проекта по ядерной физике. Таким проектом может стать электрон-ионный коллаيدر для ядерной физики низких энергий — проект DERICA.

4. В области нейтронной физики

В соответствии с постановлением Правительства РФ от 16 марта 2020 г. № 287 действует Федеральная научно-техническая программа развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019–2027 гг. Тем не менее, в стране высок запрос на импульсные источники нейтронов, основанные на ускорителях протонов. Потенциально лидирующим проектом здесь может стать **нейтронный комплекс ИЯИ РАН**, где имеется уникальная инфраструктура, пригодная для использования при создании мощного современного ускорителя релятивистских протонов.

Сооружение нового ускорителя в ИЯИ РАН в существующем тоннеле ускорителя длиной около 450 метров при использовании современных сверхпроводящих ускоряющих структур позволяет создать ускоритель протонов на энергию до 5,5 ГэВ для источника нейтронов с мощностью в пучке 1,5–2,0 МВт и плотностью потока нейтронов на уровне 10^{16} н/(см²·с). Создание ускорителя открывает новые возможности для фундаментальных исследований по физике атомного ядра и элементарных частиц.

Реализация проекта потребует развития и внедрения в России новых технологий создания сверхпроводящих ускоряющих структур, твердотельных ВЧ генераторов высокой мощности, современной вакуумной техники, систем контроля, детекторов излучений и пр.

В ходе проектирования и изготовления оборудования нового мощного ускорителя важно поддерживать и модернизировать действующий ускоритель протонов и комплекс нейтронных источников ИЯИ РАН так, чтобы остановка для монтажа и запуска новой установки заняла минимально возможное время.

Следует отметить также важность развития в России программы разработки и создания компактных нейтронных источников, что будет не только способствовать широкому внедрению ряда передовых, жизненно важных

технологий, но и послужит распространению ядернофизических методов в целом.

Рекомендация: определить национальную стратегию в области источников нейтронов, приступить к реализации проекта мощного нейтронного комплекса «испарительного» типа (spallation) в ИЯИ РАН и программы развития компактных нейтронных источников.

5. Развитие комплекса адронных ускорителей НИЦ КИ — ИФВЭ

Ускорительный комплекс **У-70 НИЦ КИ — ИФВЭ** является крупнейшим в России действующим ускорителем заряженных частиц и входит в десятку крупнейших ускорителей мира. Устойчивая эксплуатация и улучшение характеристик крупнейшего в России действующего ускорителя протонов и ядер углерода У-70 обеспечит проведение исследований по физике частиц высоких энергий и релятивистской ядерной физике на выведенных пучках (вариант “fixed-target”) на отечественной экспериментальной базе.

Развитие научно-технической базы ИФВЭ необходимо для проведения актуальных прикладных исследований на базе выведенных ускоренных адронных пучков — протонной радиологии быстропротекающих процессов в плотных средах, углеродной радиобиологии и лучевой терапии, техники и технологии получения и использования импульсных потоков нейтронов.

Рекомендация: провести модернизацию и техническое перевооружение технологических систем Ускорительного комплекса У-70. Обеспечить перевод ключевых технологических систем ускорителей и специальной инженерной инфраструктуры на новые аппаратурные и программные решения, улучшающие функциональные параметры установок (интенсивность пучка, доступность пучкового времени для физического эксперимента).

6. Ускорители для прикладных целей

а) ЦКП «СКИФ»

«Сибирский кольцевой источник фотонов» (СКИФ) — источник синхротронного излучения (СИ) поколения 4+ с энергией пучка 3 ГэВ. СКИФ предназначен для проведения исследований с яркими, интенсивными и когерентными пучками излучения в широком диапазоне длин волн от вакуумного ультрафиолета до жесткого рентгена. В качестве источников излучения предполагается широко использовать вставные устройства — ондуляторы и вигглеры, в т.ч. сверхпроводящие, создаваемые на основе существующих в ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН разработок. Использование таких устройств позволяет уменьшить эмиттанс источника СИ СКИФ до ~50–60 пм.

В конце 2023 года источник должен продемонстрировать первый пучок синхротронного излучения, в течение 2024 года должны быть запущены шесть станций на каналах СИ первой очереди.

Рекомендация: обеспечить реализацию проекта в запланированные сроки.

б) Синхротронный комплекс в РФЯЦ ВНИИЭФ создается для проведения испытаний радиационно-стойкой электронной компонентной базы и радиоэлектронной аппаратуры на стойкость к воздействию ионизирующих излучений космического пространства.

Рекомендация: объединить научный и технологический потенциал ведущих институтов и специалистов-ускорительщиков РФ в обеспечении успешной реализации проекта ускорительного комплекса в РФЯЦ ВНИИЭФ, Саров.

в) Ускорители для ядерной медицины

В стране крайне необходимо развивать ускорители для прикладных исследований и, прежде всего, для ядерной медицины.

В программу развития и организации производства необходимого стране количества таких ускорителей включаются:

1) Ускорители для лучевой терапии онкологических заболеваний — линейные ускорители электронов на 6 и 18 МэВ, ускорители протонов на энергию 70–230 МэВ, ускорители ионов углерода, а также установки для нейтрон-захватной терапии.

2) Ускорители для наработки радиоизотопов для диагностики и терапии сердечно-сосудистых и онкологических заболеваний.

Крайне важно при этом поддерживать и развивать действующие в стране ускорительные комплексы для указанных выше целей (например, в ИЯИ РАН, НИЦ «Курчатовский институт», ОИЯИ и др.)

Рекомендация: поддержать усилия по разработке и созданию отечественного парка ускорителей заряженных частиц медицинского назначения, предназначенных для терапии социально значимых заболеваний.

7. Кадровое обеспечение

Проектирование и строительство в России, а также последующая эксплуатация научных и прикладных установок, требуют подготовки значительного числа научных, инженерных и технических кадров. В России сохранились две мощных научных школы в области подготовки специалистов по физике и технике ускорителей — новосибирская и московская. Тем не менее, кадровый вопрос требует пристального внимания в рамках программы. В частности, необходимо как увеличить количество выпускников, так и повысить их уровень подготовки. Для этого необходимо развивать действующие образовательные программы, а также провести глубокую модернизацию учебной лабораторной базы ключевых университетов.

Рекомендация: провести ревизию состояния подготовки специалистов по физике и технике ускорителей заряженных частиц, сформировать государственный заказ на выпускников по указанным специальностям, разработать профессиональный стандарт в области ускорителей заряженных частиц, начать модернизацию учебной лабораторной базы ключевых университетов.

Кроме ресурсной и организационной поддержки ориентированных НИ-ОКР по новым ускорительным установкам класса “mega-science”, создаваемым во исполнение Национального проекта «Наука» и Федеральной НТП

развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019–2027 годы, необходима существенная и постоянная ресурсная поддержка эксплуатации и текущей модернизации уже имеющихся и действующих ускорительных установок класса “mega-science” в стране. В их число входят Ускорительный комплекс У-70 в Протвино, сильноточный линейный ускоритель протонов в Троицке (Новая Москва), электрон-позитронные установки со встречными сталкивающимися пучками в Новосибирске, Фабрика сверхтяжелых элементов в Дубне и другие. Их устойчивая работа и развитие являются фундаментом для новых проектов и технологий — экспертиза и компетенции, стендовая испытательная база на релятивистских пучках, подготовка научного и инженерного персонала, международное сотрудничество в условиях уже реально действующих ускорительных установок.

Приложение. Список сокращений

Б

БС – бустерный синхротрон или бустер-синхротрон

Г

ГРБС – главный распорядитель бюджетных средств

ГК – государственная корпорация

В

ВИАМ – Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» (Москва, РФ)

ВНИИЭФ – Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (ФГУП «РФЯЦ — ВНИИЭФ») (Саров, РФ)

ВТСП – высокотемпературная сверхпроводимость

ВЭПП – встречные электрон-позитронные пучки

И

ИБР-2 – импульсный быстрый реактор, вариант 2

ИИ КП – ионизирующее излучение космического пространства

ИК – инжекционный комплекс

ИЛФ СО РАН – ФГБУН «Институт лазерной физики Сибирского отделения РАН» (Новосибирск, РФ)

ИН – источник нейтронов

ИПФ РАН – ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (Нижний Новгород, РФ)

ИРИНА – Исследование Радиоактивных Изотопов на Нейтронах (см. ПИЯФ)

ИСЭ СО РАН – ФГБУН «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН» (Томск, РФ)

Исток – АО «Научно-производственное предприятие «Исток» им. Шокина» (Фрязино, РФ)

ИТЭФ – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт теоретической и экспериментальной физики имени А. И. Алиханова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт"» («НИЦ "Курчатовский институт" — ИТЭФ») (Москва, РФ)

- ИФВЭ – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий им. А. А. Логунова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт"» (Протвино, РФ)
- ИЯИ РАН – ФГБУН «Институт ядерных исследований РАН» (Троицк, РФ)
- ИЯП БГУ – Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета (Минск, Беларусь)
- ИЯФ СО РАН – ФГБУН «Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения РАН» (Новосибирск, РФ)
- ИОЗИ – источников отрицательно заряженных ионов

К

- КГП – кварк-глюонная плазма
- КИСИ – Курчатовский источник синхротронного излучения
- КТ – каналы транспортировки

Л

- ЛСЭ – лазер на свободных электронах

М

- МИФИ – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва, РФ)

Н

- НИЦ КИ – Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (Москва, РФ)
- НИИ ТФА ГК «Росатом» – АО «НИИ технической физики и автоматизации» (Москва, РФ)
- НИИЭФА – АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова» (Санкт-Петербург, РФ)
- НПП «Фаза» – АО «Научно-производственное предприятие "ФАЗА"», (Ростов-на-Дону, РФ)

О

- ОИВТ РАН – ФГБУН «Объединенный институт высоких температур РАН» (Москва, РФ)
- ОИЯИ – Объединенный институт ядерных исследований (Дубна)
- ОПК – оборонно-промышленный комплекс
- ОС – основной синхротрон

П

- ПИК – реактор ПИК получил название от заглавных букв фамилий ученых его ведущих разработчиков — Юрия Петрова и Кира Коноплева; впрочем, некоторые ученые придерживаются более официальной версии расшифровки аббревиатуры — «пучковый исследовательский комплекс»
- ПИЯФ – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константина Национального исследовательского центра "Курчатовский институт"» (Гатчина, РФ)
- ПРГК – протонный радиографический комплекс (Протвино, ИФВЭ, РФ)
- ПУИ – промышленные ускорители ионов
- ПУЭ – промышленные ускорители электронов

Р

- РАДЭКС – установка для радиационного материаловедения (ИЯИ РАН, Москва)
- РИ – радиоактивный изотоп
- РФЯЦ – Российский федеральный ядерный центр
- РЭА – радиоэлектронная аппаратура

С

- СВЗ – свинцовый замедлитель (ИЯИ РАН, Москва)
- СКИФ – Сибирский кольцевой источник фотонов (Кольцово, Новосибирская обл., РФ)
- СМ – стандартная модель
- СПбГУ – Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, РФ)
- Супер Чарм-Тау Фабрика – e^+e^- коллайдер на энергию частиц выше 2.5 ГэВ и светимость выше $10^{35} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
- СЭО – система электронного охлаждения

Т

- ТМС – Ч. I, стр. 24
- «Триада-ТВ» – ООО «НПП Триада ТВ» (Новосибирск, РФ)

У

- УМС – ускорительный масс-спектрометр
- УР – ускоритель-рекуператор

Ф

- «Фаза» – АО «Научно-производственное предприятие "ФАЗА"» (Ростов-на-Дону, РФ)
- ФИАН – ФГБУН «Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН»
- ФМБА – Федеральное медико-биологическое агентство РФ (Москва, РФ)
- ФТИ НАНБ – Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (Минск, Беларусь)

Ц

- ЦЕРН – Европейская лаборатория по физике частиц (см. также CERN)
- ЦКП – Центр коллективного пользования

Э

- ЭЗАН – Федеральное государственное унитарное предприятие Экспериментальный завод научного приборостроения со Специальным конструкторским бюро РАН (Черноголовка, РФ)
- ЭКБ – электронно-компонентная база
- ЭЦР – электронно-циклотронный резонанс

А

- ANL – Argonne National Laboratory (Лемонт, США)
- ASIPP – Institute of plasma physics Chinese Academy of Sciences (Хэфей, Китай)
- APPA – Atomic, Plasma Physics and Applications (FAIR)
- AWAKE – The Advanced Proton Driven Plasma Wakefield Acceleration Experiment (ЦЕРН)

В

- BNL – Brookhaven National Laboratory (Уpton, США)

С

- CLIC – Compact Linear Collider (ЦЕРН)
- CBM – Compressed Baryonic Matter (FAIR)
- CEPC – Circular Electron-Positron Collider (Китай)
- CERN – Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (фр.): Европейская организация по ядерным исследованиям, оригинальное название, используется как имя собственное; современное официальное название CERN — The European Particle Physics Laboratory

- COSY – COoler SYnchrotron (Юлих, Германия)
 CSNS – Chinese Spallation Neutron Source (Дунгуан, Китай)
 CPHS – Compact Pulsed Hadron Source — (Циньхуа, Китай)

D

- DARIA – neutron source Dedicated to Applied Research and Industrial Applications (ИТЭФ)
 DFS – DERICA Fragment Separator
 DERICA – Dubna Electron-Radioactive Ion Collider fAcility (ОИЯИ, Дубна)
 DWA – Dielectric Wave Accelerator

E

- EBIS – Electron Beam Ion Source
 EBIT – Electron Beam In Trap
 EH – Experimental Hall
 emA – electro-miliAmpere
 ESIS – Electron String Ion Source
 ESS – European Spallation Source (Лунд, Швеция)
 ESRF-EBS – European Synchrotron Radiation Facility — Extremely Brilliant Source (Гренобль, Франция)
 ESD – electrostatic discharge

F

- FAIR – Facility for Antiproton and Ion Collider (Дармштадт, Германия)
 FACET – Facility for Advanced Accelerator Experimental Tests (SLAC)
 FCC – Future Circular Collider (ЦЕРН)
 FCC-hh – Future hadron-hadron Circular Collider (ЦЕРН)
 FCC-ee – Future e^+e^- Circular Collider (ЦЕРН)
 FECR – 4th generation Electron Cyclotron Resonance ion source (ИМР)
 FETS – (Великобритания)
 FNAL – Fermi National Accelerator Laboratory (Батавия, США)
 FRIB – Facility for Rare Isotope Beams (MSU, США)
 FRR – fast ramping ring
 FT – fixed target

G

- GANIL – Grand Accélérateur National d'Ions Lourds (Каен, Франция)
 GSI – Gesellschaft fuer Schwere Ionen forschung (Общество для исследований тяжёлых ионов)

Н

- HL-LHC – High Lumi(nosity) LHC
HESR – High Energy Storage Ring (FAIR)
HIAF – Heavy Ion Accelerator Facility (ИМР, Ланчжоу, Китай)

И

- IBA – корпорация Ion Beam Applications (Бельгия)
IBA Proteus ONE – Технология протонной терапии IBA
ICT – Information and Communication Technology
IFMIF – International Fusion Materials Irradiation Facility установка для облучения термоядерных материалов
ILC – International Linear Collider (Япония)
INFN – Laboratori Nazionali del Sud (Катания, Италия)
IMP – Institute of Modern Physics Chinese Academy of Sciences (Ланчжоу, Китай)
IonPlus – Scientific Instruments for Radiocarbon Dating and Accelerator Mass Spectrometry (Швейцария)
IPP – Institute of Particle Physics (Кингстон, Канада)
ISR – Intersecting Storage Rings (ЦЕРН)
ISIS – Название ISIS не является акронимом, это отсылка одновременно к египетской богине Исиде (лат. *Isis*) и названию реки Темзы, которую в верхнем течении, в Оксфорде называют Isis [Интернет]
ISOL – Isotope Separator On Line DEvice (ЦЕРН)
IUCF – Indiana University cyclotron Facility (США)

Д

- J-PARC – Japan Proton Accelerator Complex (КЕК, Япония)

К

- КЕК – High energy accelerator research organization (Цукуба, Япония)
KRION – Криогенный ионный источник (русское сокращение)

Л

- LANSCCE – Los Alamos Neutron Science Center (Лос-Аламос, США)
LBNL – Lawrence Berkeley National Laboratory (Беркли, США)
LENS – Low Energy Neutron Source (Индиана Университет, США)
LEP – Large Electron-Positron collider (ЦЕРН)
LHC – Large Hadron Collider (ЦЕРН)

- LCLS – II — Linac Coherent Light Source (SLAC)
 LPWA – Laser Plasma Wave Accelerator

М

- MAX-IV – Microtron, Accelerator, X-rays (Лунд, Швеция)
 MICE – Muon Ionization Cooling Experiment
 MPI – Heidelberg Max Planck Institute (Heidelberg)
 MSU – Michigan State University (Ист Лансинг, США)
 MYRHHA – Multi-purpose Hybrid Research reactor for High-tech Applications
 (Франция-Бельгия)
 MICADAS – Mini Carbon Dating System

N

- NICA – Nuclotron-based Ion Collider fAcility (ОИЯИ, Дубна)
 NuSTAR – NUclear STructure, Astrophysics and Reactions (FAIR)
 NSLS-II – National Synchrotron Light Source (Брукхэйвенская нац. Лабо-
 ратория, США)

P

- PANDA – antiProton ANnihilation in DArmstadt (Дармштадт, Германия)
 pmcA – particle microamper
 Project-X – проект линейного ускорителя в Фермилаб (США)
 PSI – Paul Scherrer Institute (Виллиген, Швейцария)
 PWA – Plasma Wave Acceleration

R

- RAON – Rare isotope Accelerator complex for ON-line experiment
 (Daejeon, South Korea)
 RANS – RIKEN Accelerator-driven Neutron Source (RIKEN)
 RHIC – Relativistic Heavy Ion Collider (Брукхейвен, США)
 RIKEN – Research center for physics, chemistry and biology (Вако-Ши,
 Япония)
 rcs – rapid cycling synchrotron
 RIB – radioactive ion beam
 RIBF – Radioactive Ion Beam Facility

S

- SARAF – Soreq Applied Research Accelerator Facility (Израиль)
 SILHI – Source d'Ions Legers de Haute Intensité (Сакле, Франция)
 SKEKB – коллайдер SuperKEK В-фабрика (Цукуба, Япония)

SLAC	– Stanford Linear Accelerator Center (США)
SLED	– Stanford Linear Energy Doubler — компрессор СВЧ мощности
SLC	– Stanford Linear Collider (Стэнфорд, США)
SNS	– Spallation Neutron Source (Окридж, США)
Solaris	– источник синхротронного излучения (Краков, Польша)
SPIRAL2	– Système de Production d'Ions Radioactifs en Ligne de 2e generation (GANIL, Франция)
SPL	– Superconducting Proton Linac (ЦЕРН)
SppC	– Super proton-proton Collider (проект, Китай)
SPS	– Super Proton Synchrotron (ЦЕРН)
SuperB	– SuperB factory (Гран Сассэ, Италия)

Т

TRIUMF	– Canada's National Particle Accelerator Centre (Ванкувер, Канада)
JLab	– Thomas Jefferson National Accelerator Laboratory (Newport News, США)

Х

XFEL	– X-ray Free Electron Laser
------	-----------------------------

У

Jyväskylä	– город и университет (циклотронный центр) в Финляндии
-----------	--------------------------------------------------------

Для заметок

РАЗВИТИЕ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИИ УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Подписано в печать 10.12.2021. Формат 70x100 1/16.
Гарнитура Times. Печ. л. 8,75.
Тираж 300 экз. Заказ № 6232.

Издатель – Российская академия наук

Оригинал-макет подготовлен
ООО «Красногорский полиграфический комбинат»

Публикуется в авторской редакции

Отпечатано в ООО «Красногорский полиграфический комбинат»
115093 г. Москва, Партийный переулок д. 1 корп. 58, стр. 1, эт. 1, пом. 1

Издается в соответствии с постановлением Научно-издательского совета
Российской академии наук (НИСО РАН) от 12 февраля 2021 г. № 01
и распространяется бесплатно