

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

Научная программа в новом международном центре фундаментальной физики — Европейском центре антипротонных и ионных исследований FAIR

В.Е. Фортов, Б.Ю. Шарков, Х. Штокер

Ускорительный исследовательский центр антипротонов и ионов в Дармштадте FAIR предоставит международному научному сообществу новые уникальные возможности для экспериментов, более широкие, чем какая-либо другая крупномасштабная установка в мире. Более 2500 учёных получат возможность раздвинуть границы нашего знания в таких областях, как адронная, ядерная, атомная физика с приложениями в космологии, астрофизике и в технологиях. Обсуждаются особенности самого ускорительного комплекса, а также представлена научная программа экспериментов на FAIR. Особое внимание уделено экспериментам по физике экстремального состояния материи, генерируемого при изохорическом нагреве вещества интенсивными пучками тяжёлых ионов. Проект FAIR входит в дорожную карту стратегического развития европейской исследовательской инфраструктуры (ESFRI) и является одним из крупнейших в Европе.

PACS numbers: 12.38.Mn, 25.43.+t, 29.20.-c, 52.25.Kn, 87.53.-j

DOI: 10.3367/UFNr.0182.201206c.0621

Содержание

1. Введение (621).
2. Ускорительный комплекс (622).
 - 2.1. Концепция ускорителя и компоновка основных систем.
 - 2.2. Коллекторные, накопительные и охлаждающие кольца. Подготовка пучков.
3. Структура атомного ядра, астрофизика и ядерные реакции с пучками редких изотопов — эксперимент NuSTAR (625).
4. Плотная барионная материя — эксперимент CBM (628).
 - 4.1. Научная программа CBM.
 - 4.2. Детектор CBM.
5. Антипротонная аннигиляция — эксперимент PANDA (629).
 - 5.1. Физическая программа экспериментов на пучках антипротонов.
 - 5.2. Детектор PANDA.
6. Физика высокой плотности энергии в веществе — физика плазмы (634).
 - 6.1. Эксперимент NINEH.
 - 6.2. Эксперимент LAPLAS.
 - 6.3. Эксперимент WDM.

7. Атомная физика на релятивистских пучках высокозарядных ионов и антипротонов (638).
 8. Исследования по атомной физике с пучками антипротонов и ионов низких энергий (FLAIR) (639).
 9. Радиационное материаловедение и биофизика (BIOMAT) (640).
 - 9.1. Биофизические эксперименты.
 - 9.2. Материаловедческие эксперименты.
 - 9.3. Исследования модификации материалов с помощью пучков релятивистских тяжёлых ионов.
 10. Заключение (642).
- Список литературы (642).

1. Введение

Изучение фундаментальных свойств, структуры материи, а также эволюции Вселенной с момента её зарождения всегда было одной из центральных проблем современной физики. Принципиально новые экспериментальные данные относительно окружающей нас материи, формирующие наши мировоззренческие представления, всегда давали и продолжают давать генерация экстремальных состояний вещества в лабораторных условиях наряду с наблюдениями астрофизических объектов. Особое место среди исследовательских установок занимают релятивистские ускорители, такие как Большой адронный коллайдер (Large Hadron Collider, LHC) в ЦЕРНе, релятивистский тяжёлоионный коллайдер (Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC) в Брукхейвенской национальной лаборатории (США), а также циклотронный комплекс Научного центра RIKEN (Япония) и отечественные ускорители ТВН-ИТЭФ в Институте теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова (ИТЭФ) и "Нуклотрон" в Объединённом институте ядерных исследований (ОИЯИ) [1, 2].

В.Е. Фортов. Объединённый институт высоких температур РАН, ул. Ижорская 13, 125412 Москва, Российская Федерация
E-mail: fortov@ras.ru

Б.Ю. Шарков. Государственный научный центр Российской Федерации "Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова", ул. Большая Черёмушкская 25, 117218 Москва, Российская Федерация
E-mail: boris.sharkov@itep.ru

Х. Штокер. GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Plankstr 1, 64291 Darmstadt, Germany

Статья поступила 11 мая 2011 г.,
после доработки 20 декабря 2011 г.

Центр антипротонных и ионных исследований — FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) — представляет собой проект нового исследовательского комплекса на базе многоцелевого ускорителя с такими параметрами пучков антипротонов и радиоактивных ядер, которые не имеют аналогов и открывают уникальные возможности для проведения исследований по актуальным направлениям современной науки.

Сооружаемый в Дармштадте (Германия) ультрасовременный ускорительный комплекс FAIR предоставит высокоэнергетичные, прецизионно настроенные пучки антипротонов и различных ионов, обладающие уникально высоким качеством (по яркости, фазовой плотности) и огромной интенсивностью. Отличительной особенностью создаваемого комплекса является возможность генерации высокоинтенсивных первичных и вторичных пучков стабильных и радиоактивных ядер, а также пучков антипротонов, превосходящих по интенсивности в 100–10000 раз доступные сейчас пучки.

Кроме того, эксперименты на FAIR позволят существенно продвинуться в исследовании неизвестных областей фазовой диаграммы ядерной материи, недостижимых в экспериментах на ионном коллайдере RHIC и на вводимом в строй коллайдере LHC [1], где основное внимание уделяется исследованиям свойств ядерной материи при экстремально высоких температурах, но низких плотностях барионов. В отличие от этого эксперименты FAIR нацелены на детальное изучение свойств материи при самых высоких значениях барионной плотности, которые могут быть достигнуты в земных условиях.

Научная программа на ускорительном комплексе FAIR охватывает следующие направления.

- Изучение структуры ядра и исследования в области ядерной астрофизики с использованием пучков стабильных ионов, а также пучков короткоживущих (радиоактивных) ядер, далёких от границы стабильности.
- Изучение структуры адронов, исследования, направленные на развитие и подтверждение теории сильных взаимодействий — квантовой хромодинамики (КХД), с использованием в основном пучков антипротонов.
- Построение фазовой диаграммы ядерной материи, изучение деконфайнмента кварков и кварк-глюонной плазмы.
- Исследование физики сверхплотной электромагнитной плазмы с использованием интенсивных импульсов пучков тяжёлых ионов в уникальном сочетании с излучением петаваттного лазера.
- Исследования в области атомной физики, квантовой электродинамики (КЭД) в сверхсильных электромагнитных полях с использованием пучков тяжёлых ионов с высокими зарядами и пучков антипротонов.
- Прикладные исследования с пучками ионов для радиационного материаловедения, медицины и биологии.

Для реализации необходимых экспериментальных условий потребовался поиск оригинальных инженерно-технологических решений. На FAIR будут использоваться:

- новые конструкции сверхпроводящих магнитов для получения пучков частиц с максимально высокой интенсивностью;
- оригинальные методы прецизионного управления энергией и геометрией пучков;
- крупномасштабные детекторы, способные отслеживать траектории и определять параметры множества рождающихся в экспериментах частиц.

Огромные потоки данных, поступающие от детекторов, потребуют новых аппаратных и программных решений (таких как GRID-технологии) для обработки данных, доступа к ним и их хранения.

Международный проект FAIR входит в число базовых проектов Европейского форума исследовательской инфраструктуры (European Strategy Forum on Research Infrastructures, ESFRI) [3]. В проекте FAIR принимают участие пятнадцать стран: Австрия, Великобритания, Германия, Индия, Испания, Италия, Китай, Польша, Россия, Румыния, Словакия, Словения, Финляндия, Франция и Швеция, — которые намерены вносить вклады в проект в виде поставок высокотехнологического оборудования и компонентов экспериментальных установок, а также денежных взносов.

Полная стоимость проекта, включая сооружение, содержание и эксплуатацию на период до 2025 г., составляет около 3 млрд евро. Стоимость создания стартовой фазы ускорительного центра и его базовых исследовательских установок превышает 1,3 млрд евро.

Срок сооружения установки FAIR определён в восемь лет. Предполагается завершить его сооружение в 2018 г. Однако планируется начать научные исследования на ряде подсистем ускорительного комплекса уже в 2017 г.

Около 3000 исследователей со всего мира готовятся к экспериментам на ускорительном комплексе FAIR, общей целью которых является изучение фундаментальных свойств и структуры материи и эволюции Вселенной с момента её рождения. В настоящее время созданы 14 крупных международных коллабораций, которые сгруппированы по четырём тематическим направлениям исследований:

- структура ядра и ядерная астрофизика — NuSTAR (Nuclear Structure and Astrophysics);
- плотная барионная материя — CBM (Compressed Barionic Matter);
- антипротонная программа — PANDA (antiProton ANnihilation in DArmstadt);
- физика сверхплотной плазмы, атомная физика, а также прикладные исследования по материаловедению и биологии — APPA (Atomic, Plasma Physics and Applications).

Рассмотрим каждое из направлений более подробно.

2. Ускорительный комплекс

Действующий в Институте тяжёлых ионов (Gesellschaft für Schwerionenforschung, GSI) в Дармштадте тяжёло-ионный ускорительный комплекс [4] является одной из наиболее успешно работающих установок с многоплановой научной программой международных экспериментов. Однако с 2002 г. начались разработки концепции многоцелевой установки нового поколения с новыми требованиями к качественным показателям и интенсивности пучков ионов и антипротонов для проведения экспериментальных исследований в недоступных ранее условиях. В 2006 г. международное научное сообщество — 2500 учёных и инженеров из 44 стран — составило базовый технический отчёт FAIR, детализирующий инженерную схему и компоненты требующейся системы ускорителей и типы предполагаемых экспериментов. Основной особенностью FAIR является сложная и экономически эффективная компоновка целого ряда ускорительных систем, которая нацелена на генерацию

Таблица 1. Основные параметры синхротронов и накопительных колец

Кольцо	Периметр кольца, м	Магнитная жёсткость, Тл м	Энергия пучка
Синхротрон SIS-100	1084	100	2,7 ГэВ/нуклон, $^{238}\text{U}^{28+}$ 27 ГэВ, протоны
Синхротрон SIS-300	1084	300	34 ГэВ/нуклон, $^{238}\text{U}^{92+}$
Коллекторное кольцо CR (Collector Ring)	211	13	0,74 ГэВ/нуклон, $^{238}\text{U}^{92+}$ 3 ГэВ, антипротоны
Рециркуляционное экспериментальное накопительное кольцо RESR (Recirculation Experimental Storage Ring)	245	13	0,74 ГэВ/нуклон, $^{238}\text{U}^{92+}$ 3 ГэВ, антипротоны
Новое экспериментальное накопительное кольцо NESR (New Experimental Storage Ring)	222	13	0,74 ГэВ/нуклон, $^{238}\text{U}^{92+}$ 3 ГэВ, антипротоны
Накопительное кольцо высоких энергий HESR (High Energy Storage Ring)	574	50	14 ГэВ, антипротоны

пучков частиц с беспрецедентно широким диапазоном параметров. При этом важнейшим достоинством ускорительного комплекса будет являться обеспечение одновременного, параллельного, проведения до пяти различных исследовательских программ. В целом комплекс будет работать для различных экспериментов так, как если бы он был предназначен для каждого из них в отдельности.

Основные параметры ускорительного комплекса FAIR и его общий вид представлены в табл. 1 и на рис. 1. Существующие линейный ускоритель UNILAC (UNIversal Linear ACcelerator) и синхротрон SIS-18 (тяжёлоионный

синхротрон с магнитной жёсткостью 18 Тл м) будут служить инжекторами для ускорительного комплекса FAIR.

2.1. Концепция ускорителя и компоновка основных систем

Комплекс FAIR состоит из тщательно спроектированных, связанных между собой систем для ускорения и накопления высококачественных пучков частиц, а также для получения вторичных частиц, рождающихся при бомбардировке мишеней первичными пучками. Протонные и ионные пучки высоких энергий будут использо-

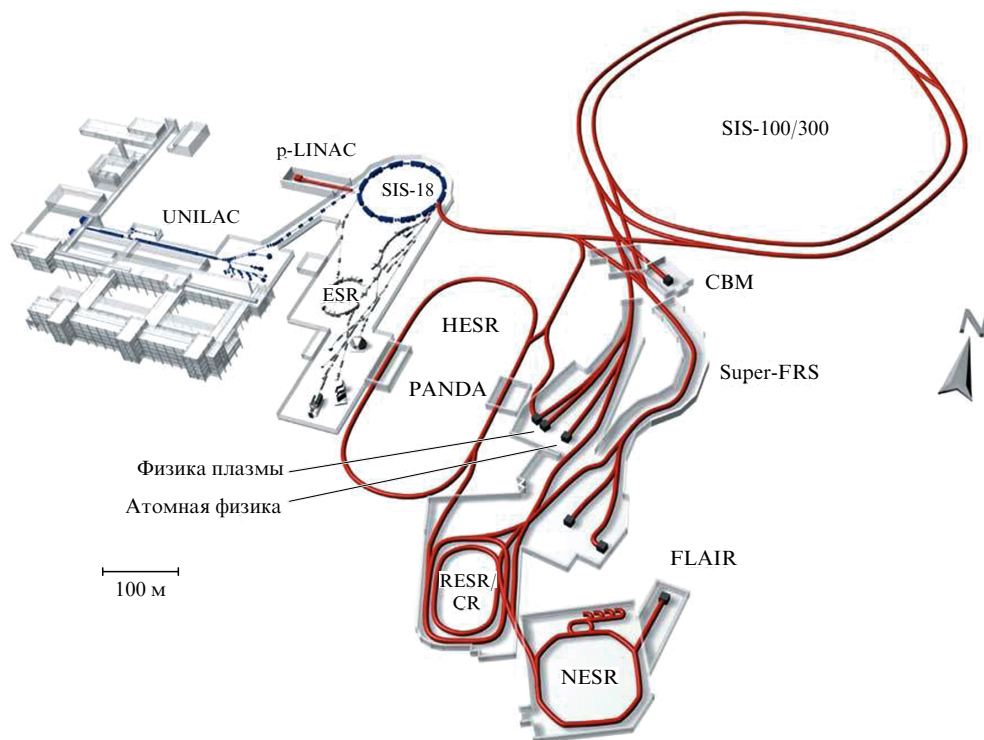


Рис. 1. Схема ускорительного комплекса FAIR. UNILAC, SIS-18, ESR (Experimental Storage Ring) — существующие сейчас установки, FLAIR — Facility of Low-Energy Antiproton and Heavy Ion Research, p-LINAC — линейный ускоритель протонов. (Расшифровку остальных аббревиатур и пояснения см. в табл. 1 и выше в тексте.)

ваться для создания вторичных пучков антипротонов, а также стабильных и нестабильных (радиоактивных) ядер. Вторичные пучки могут или применяться непосредственно, или направляться в сложную систему накопительных колец, где они будут формироваться в пучки с требуемыми для экспериментов параметрами.

Основой FAIR являются два ускорительных синхротронных кольца с периметром около 1100 м (SIS-100 и SIS-300) и магнитной жёсткостью 100 и 300 Тл м соответственно, расположенных одно над другим в подземном тоннеле. Эти синхротронные кольца предназначены для ускорения различных ионов — от ионов водорода (протоны) до ионов урана. Действующие в настоящее время ускорители UNILAC и SIS-18 будут предварительно ускорять ионы перед их инжекцией в новое кольцо SIS-100, предназначенное для генерации интенсивных импульсных ионных пучков с целью их последующей конверсии во вторичные пучки ядер редких элементов, а также для преобразования протонных пучков в антипротонные. Синхротронное кольцо будет состоять из сверхпроводящих магнитных элементов, обеспечивающих магнитные поля величиной до 4 Тл с частотой 1 Гц (скорость нарастания поля 4 Тл с^{-1}). Проектная интенсивность для ионов урана U^{28+} составляет 5×10^{11} ионов в импульсе при энергии 1 ГэВ/нуклон и для протонов — 4×10^{13} протонов в импульсе при энергии 29 ГэВ. Для инжекции высокоинтенсивных протонных пучков будет построен новый линейный ускоритель протонов, рассчитанный на энергию 70 МэВ.

И ионные, и протонные пучки будут подвергаться сжатию по длительности импульса для генерации, накопления и последующего охлаждения экзотических ядер и антипротонов с длительностями импульсов 60 и 25 нс соответственно. Короткие интенсивные импульсы тяжёлых ионов необходимы также в экспериментах по физике плазмы.

Возможен, кроме того, режим с непрерывным пучком со средней интенсивностью $\approx 3 \times 10^{11}$ ионов в 1 с и энергией 1 ГэВ/нуклон при выводе пучка либо непосредственно из кольца SIS-100, либо при переводе пучка в кольцо SIS-300 и последующем медленном выводе из последнего.

Ускоренные ядра урана инжектируются в кольцо SIS-300, построенное на основе сверхпроводящих быстроциклирующих магнитных элементов, обеспечивающих поле величиной до 6 Тл со скоростью нарастания 1 Тл с^{-1} . Максимальная энергия ионов достигает 45 ГэВ/нуклон для Ne^{10+} и 34 ГэВ/нуклон для полностью ионизованного урана U^{92+} . Обеспечивается медленный вывод пучков с интенсивностью до $\sim 10^{10}$ частиц в одну секунду с периодом экстракции 10–100 нс для экспериментов по столкновениям тяжёлых ядер с генерацией сверхплотной ядерной материи.

2.2. Коллекторные, накопительные и охлаждающие кольца. Подготовка пучков

Ускорители SIS-100 и SIS-300 связаны линиями транспортировки со сложной системой последующих колец. Введённые в эти кольца пучки накапливаются, "охлаждаются" и готовятся для конкретных экспериментов. FAIR будет работать многофункционально, позволяя одновременно выполнять до пяти исследовательских программ с пятью различными пучками частиц. Это будет обеспечиваться с помощью согласованного управ-

ления пучками как в обоих синхротронах, так и в смежных накопительных и ускорительных кольцах. Таким образом, каждый из экспериментов сможет одновременно использовать пучки с максимальной доступной интенсивностью.

Для выполнения прецизионных физических экспериментов необходимо, чтобы вторичные пучки имели определённую энергию и все частицы пучка двигались в одном направлении с одинаковой скоростью (минимальный продольный фазовый объём). Это осуществляется с помощью различных методов охлаждения пучков.

В FAIR будут применяться два вида охлаждения:

- электронное охлаждение (см., например, [4]), при котором ионы замедляются до одной и той же скорости при периодическом взаимодействии с параллельным пучком электронов, имеющих строго определённую скорость;

- стохастическое охлаждение, при котором так называемые пикап-электроды определяют геометрическое положение центра циркулирующего в кольце пучка для генерации требуемой амплитуды поля корректирующих отклоняющих кикеров (от англ. kicker — сбрасыватель) — импульсных устройств для быстрого управления пучками, расположенных на диаметрально противоположном участке накопительного кольца [5, 6].

Пучки охлаждаются и настраиваются для экспериментов в следующих четырёх кольцах.

- *Коллекторное кольцо (CR)*, в котором вторичные пучки ионов и антипротонов подвергаются стохастическому охлаждению. Это кольцо обеспечивает уменьшение полного фазового объёма пучка антипротонов в $1,6 \times 10^4$ раз (время охлаждения 10 с) и пучков редких изотопов в $1,3 \times 10^6$ раз (время охлаждения 1,5 с). CR будет также использоваться для измерений массы короткоживущих ядер.

- *Рециркуляционное экспериментальное накопительное кольцо (RESR)*, в которое каждые 10 с будут вводиться стохастически охлаждённые в CR густки из 10^8 антипротонов с энергией 3 ГэВ, что позволит за несколько часов накапливать до 10^{11} антипротонов для их последующего направления в HESR. RESR обеспечит также быстрое замедление редких изотопов, уменьшая в течение 1 с их энергию от 740 до 100–500 МэВ/нуклон.

- *Новое экспериментальное накопительное кольцо (NESR)*, предназначенное для экспериментов с экзотическими ионами и антипротонами. В NESR будет использоваться как электронное, так и стохастическое охлаждение для разного рода экспериментов, в том числе при очень низких энергиях (до 30 МэВ для антипротонов и до 4 МэВ/нуклон для радиоактивных ионных пучков).

- *Накопительное кольцо высоких энергий (HESR)*, в котором пучки антипротонов при энергиях до 14,5 ГэВ с помощью систем электронного и стохастического охлаждения будут готовиться для экспериментов.

Сверхвысокие требования к качеству и интенсивности пучков обуславливают необходимость реализации сверхсложной ускорительно-накопительной схемы FAIR.

- *Проблемы интенсивности.* Технические требования, предъявляемые к быстро циклирующим магнитам [7], в которых магнитное поле будет возрастать до 2 Тл со скоростью 4 Тл с^{-1} в ускорителе SIS-100 и до 6 Тл со скоростью 1 Тл с^{-1} в ускорителе SIS-300, не позволяют ограничиться рамками современных технологий и заставляют разработчиков обратиться к технологиям с

использованием сверхпроводимости с рекордно высокими по скорости возрастания поля параметрами.

- *Проблемы наведённой радиоактивности.* Для получения высокоинтенсивных пучков частиц потребуются создание материалов нового типа и разработка новых радиационно-стойких конструкций ускорительных и детекторных компонентов, способных выдерживать наведённую радиацию.

- *Ускорительные проблемы.* Для быстрого ускорения очень тяжёлых ионов урана U^{28+} необходимы сложные радиочастотные устройства, генерирующие экстремально мощные высокочастотные (ВЧ) поля с высокими фронтами и изменяемой частотой, предназначенные для формирования коротких (50–100 нс) интенсивных импульсов частиц.

- *Проблемы ультравысокого динамического вакуума.* Новые материалы и технические системы должны обеспечивать поддержание условий ультравысокого вакуума (10^{-12} мбар) при наличии интенсивных ионных пучков в вакуумных каналах ускорителей и накопительных колец. Неизбежные потери частиц могут вызывать десорбцию молекул со стенок устройств, что повлечёт за собой нежелательное увеличение давления остаточного газа. Специально разработанные коллиматоры призваны минимизировать эти эффекты. Более жёсткие (10^{-10} – 10^{-11} мбар) требования (по сравнению с таковыми для ЛНС) по вакууму в каналах ускорительной схемы обусловлены необходимостью ускорения ионов с широким спектром масс и зарядов, в том числе имеющих большие сечения захвата и/или ионизации орбитальных электронов.

Российское участие в сооружении ускорительного комплекса является логическим продолжением многолетнего тесного сотрудничества предприятий Росатома, Российской академии наук и Министерства образования и науки Российской Федерации с Институтом тяжёлых ионов (GSI) в Дармштадте. Ведущие научные институты (Институт физики высоких энергий, ИТЭФ, ОИЯИ, Институт ядерной физики (ИЯФ) СО РАН, Объединённый институт высоких температур РАН, Институт проблем химической физики РАН, Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова, Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Всероссийский научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А.А. Бочвара и др.) активно участвуют как в создании проекта ускорительного комплекса, так и в подготовке экспериментов на пучках ионов и антипротонов, разработке и создании новых детекторов.

3. Структура атомного ядра, астрофизика и ядерные реакции с пучками редких изотопов — эксперимент NuSTAR

Эксперименты, относящиеся к направлению NuSTAR (Nuclear Structure, Astrophysics and Reactions), представляют широкий спектр исследований по физике атомного ядра, ядерной астрофизике, фундаментальным взаимодействиям и симметриям.

Принципиально новые аспекты ядерной структуры обнаруживаются при исследованиях экзотических короткоживущих ядер с помощью вторичных пучков радиоактивных ядер [8–13]. Экзотические ядра характеризуются экстремальным избытком протонов или нейтро-

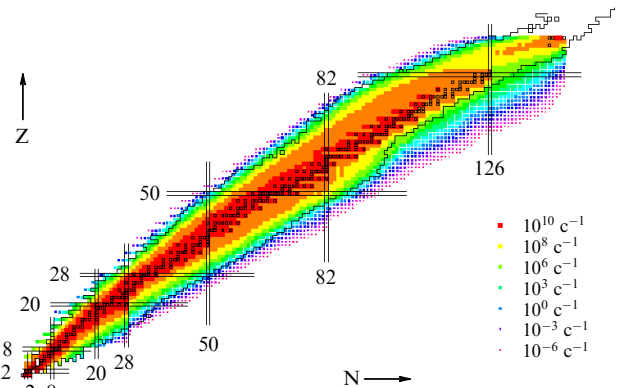


Рис. 2. (См. в цвете на www.ufn.ru.) Карта предполагаемых в FAIR интенсивностей радиоактивных пучков в 1 с (выделено цветом в соответствии с масштабной колонкой в правой части рисунка). Параллельными горизонтальными и вертикальными линиями обозначены замкнутые ядерные оболочки. Ядра первичных пучков и границы области известных ядер выделены чёрным [4].

нов, поэтому их состояния далеки от области стабильных состояний (рис. 2). Следует ожидать, что структура таких ядер существенно отличается от структуры ядра, соответствующей области стабильности [14–16]. Например, распределения протонной и нейтронной плотности экзотических ядер, которым свойственно наличие протонного и нейтронного гало, существенно различаются. Кроме того, такие ядра имеют моды возбуждения, которых нет в стабильных ядрах. Изучение связанных с экзотическими ядрами эффектов имеет большое значение для объяснения зависимости внутриядерных сил, а также явлений спаривания и кластеризации от изотопического спина и плотности (см., например, [17–20]).

Одной из основных задач FAIR является получение вторичных пучков радиоактивных ядер для исследования структуры ядра и происхождения элементов во Вселенной. Согласно современным представлениям [21] существует более 6000 разных ядер, причём большинство из них нестабильно, особенно те ядра, в которых имеется большая разница между числом протонов и нейтронов. Ядра со сложными и иногда необычными структурами могут проявлять необычное поведение, которое проливает свет на то, как действуют силы, удерживающие ядра от распада.

Несмотря на то что некоторые из этих редких изотопов существуют только в течение очень малого времени (менее 10^{-6} с), они играют решающую роль в ядерных реакциях, которые приводят к образованию тяжёлых элементов в звёздах. В то время как лёгкие элементы формируются в течение жизни звёзд при их термоядерном горении, более тяжёлые элементы (тяжелее железа) образуются, как полагают [2, 22, 23], главным образом во время предсмертной агонии супермассивных звёзд, когда звёзды взрываются как сверхновые. Осколки взрыва затем распространяются в межзвёздном пространстве и в конце концов становятся строительными блоками для следующего поколения звёзд и планет. Единственный путь проверить правильность таких представлений — это создание и изучение нестабильных изотопов в лаборатории. FAIR будет производить ещё неизвестные экзотические ядра, измеряя их массы, моды распада и

другие свойства, что недоступно никакой лаборатории в мире.

Таким образом, с пучками редких изотопов ускорительного комплекса FAIR станет возможным впервые определить такие свойства многих нестабильных ядер, как времена жизни, каналы и вероятности распадов, которые имеют важное значение для выяснения происхождения тяжёлых химических элементов, в исследованиях физики звёздных взрывов, ядерных процессов в звёздах, свойств компактных объектов, в частности белых карликов, нейтронных и странных звёзд [9]. Возникают новые возможности для изучения физики термоядерных взрывов на поверхностях гигантских звёзд, объяснения проявления активности новых астрофизических явлений, а также эволюции Вселенной после Большого взрыва.

На рисунке 2 представлена карта предполагаемых в FAIR интенсивностей (в 1 с) радиоактивных пучков для ядер с временами жизни более 100 нс.

Для работ этого направления новый ускорительный комплекс предоставит вторичные пучки радиоактивных ядер во всём диапазоне зарядовых и массовых чисел, от самых лёгких до самых тяжёлых. Эти вторичные пучки редких изотопов будут получены либо фрагментацией первичных пучков тяжёлых ионов, либо разделением пучков ^{238}U с энергией до 1,5 ГэВ/нуклон. Разделение пучков ядер с различными зарядовыми и массовыми числами будет проводиться с помощью нового частично

сверхпроводящего магнитного сепаратора Super-FRS (Super Fragment Separator) [24], ионно-оптическая схема которого представлена на рис. 3 в сравнении с аналогичной схемой сепаратора FRS в GSI.

Итак, пучки экзотических ядер образуются при прохождении через мишень первичного пучка тяжёлых ионов. Ионы при этом расщепляются на другие ядра, которые сразу же подвергаются разделению в магнитном сепараторе (рис. 4), это позволяет получать высокочистые пучки изотопов всех видов (вплоть до короткоживущих) в широком диапазоне энергий и с временными импульсными характеристиками, привязанными к конкретным экспериментам. Впервые самые тяжёлые радиоактивные ядра (до урана) будут производиться в количествах, достаточных для проведения прецизионных измерений (см. рис. 2).

Конструкция Super-FRS учитывает результаты работы фрагмент-сепаратора GSI, который основан на принципе двойного магнитного анализа с промежуточной селекцией по энергии. Высокая интенсивность первичных пучков, поступающих от SIS-100/300, обуславливает двухступенчатую схему магнитных сепараторов, оснащённых клиновидными дегрейдерами (замедлителями с переменной толщиной), позволяющими монохроматизировать проходящие через них вторичные пучки [25] благодаря различию потерь энергии частиц в веществе с различной толщиной.

Широкоапертурный сепаратор Super-FRS будет иметь большой акцептанс по моментам ($\pm 2,5\%$) и углам (± 40 мрад — горизонтальная расходимость и ± 20 мрад — вертикальная) и ионно-оптическую разрешающую способность 1500. Новая концепция сепаратора с двумя независимыми ступенями сепарирования используется для того, чтобы справиться с высокими нагрузками и таким образом обеспечить эффективное подавление фона. Около 30%–60% произведённых осколков деления будут выведены как пространственно разделённые пучки изотопов.

На ускорителях FAIR могут быть получены и использованы для исследований пучки даже самых короткоживущих изотопов. Вторичные пучки будут обладать высоким уровнем чистоты в широком диапазоне энергий при обеспечении их различной временной структуры (импульсной или квазипостоянной). Вторичные пучки

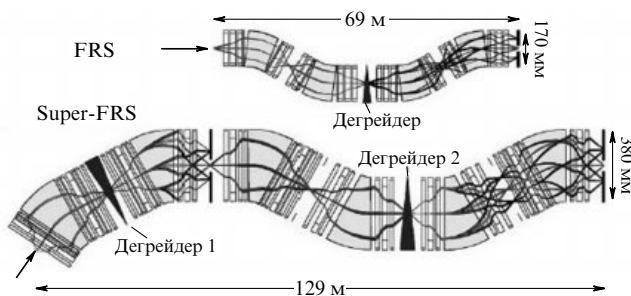


Рис. 3. Сравнение ионно-оптических схем нового сепаратора Super-FRS и сепаратора FRS в GSI. Для ясности продольный и поперечный масштабы выбраны разными, но одинаковыми для каждого из сепараторов [4].

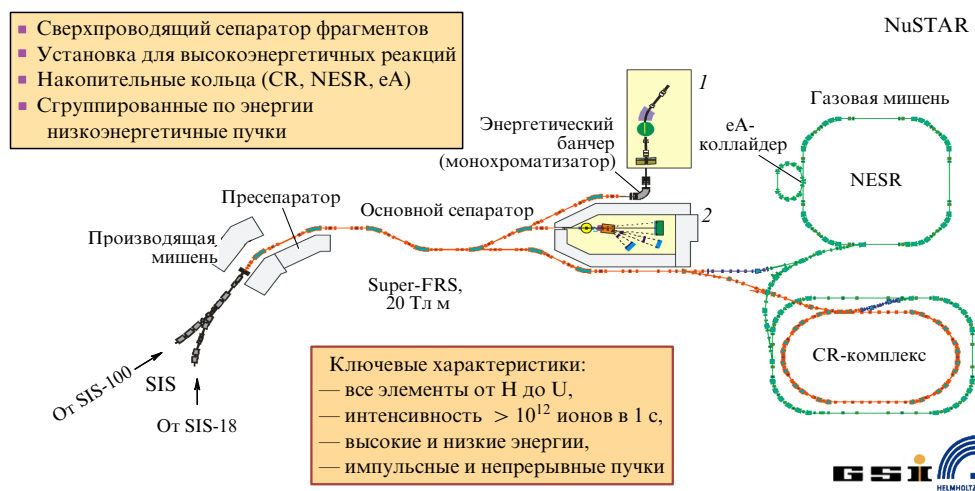


Рис. 4. Схема экспериментов NuSTAR [4]. 1 — экспериментальный зал низких энергий, 2 — экспериментальный зал высоких энергий.

могут направляться как в мишенные станции, так и в накопительные кольца.

Сегодня научное направление NuSTAR включает в себя восемь экспериментов. Коллаборация NuSTAR объединяет более 800 участников из 37 стран. Российское участие в экспериментальной программе направления представлено научными группами из Национального исследовательского центра "Курчатовский институт", Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН, ОИЯИ, ИЯФ СО РАН и др. Экспериментальные программы NuSTAR следующие:

- R³V (Reactions with Relativistic Radioactive Beams) — исследование структуры атомных ядер в ядерных реакциях при высоких энергиях радиоактивных ионных пучков. Для этой цели в фокальной плоскости высокоэнергетической ветви Super-FRS [25] будет установлено универсальное высокоэффективное оборудование, обладающее большим акцептансом и высоким разрешением.

- HISPEC (High Resolution Spectroscopy) — исследование с помощью радиоактивных пучков с промежуточной энергией эволюции оболочечной структуры сильно нейтронно-избыточных среднетяжёлых ядер с использованием реакции кулоновского возбуждения, выбивания и вторичной фрагментации, а также эволюции коллективных состояний ядер, далёких от области стабильности (см. рис. 2), посредством измерения времён жизни и гиромангнитных отношений, т.е. отношения дипольного магнитного момента элементарной частицы (или системы элементарных частиц) к её механическому моменту.

- DESPEC (DEcay SPECtroscopy) — использование глубокой имплантации ионов до их распада в активную подложку (active stopper). Многосегментный детектор позволит коррелировать во времени и пространстве сигнал, вызванный имплантацией тяжёлого иона, и сигнал, возникающий в самом детекторе, последующего β-распада. Для экзотических ядер будут исследоваться такие необычные моды распада, как β-запаздывающие нейтронная эмиссия и деление, или прямая нейтронная радиоактивность. Будет возможным изучение свойств изомерных состояний короткоживущих ядер.

- LaSpec (Laser Spectroscopy of short-lived nuclei) — изучение остановленных, охлаждённых и сформированных в сгустки (bunches) радиоактивных ионов [26–28] с помощью создаваемой многоцелевой установки по лазерной спектроскопии, что позволит с использованием различных оптических методов осуществлять модельно независимое определение ядерных спинов изотопов и изомеров, магнитных дипольных моментов, электрических квадрупольных моментов и изменений среднеквадратичных радиусов.

- MATS (Precision Measurements of very short-lived nuclei using an Advanced Trapping System for highly-charged ions) — прецизионные измерения масс короткоживущих ядер. Установка MATS будет представлять собой уникальную комбинацию электронно-пучковой ионной ловушки (Electron Beam Ion Trap, EBIT) для получения многозарядных ионов, ионных ловушек для приготовления пучка и высокопрецизионной системы на основе электромагнитной ловушки Пеннинга для измерения масс (с относительной точностью порядка 10⁻⁹) и изучения распадов (электроны конверсии и альфа-частицы) радиоактивных ядер. (См. обзор по прецизионным

ядерно-физическим измерениям с использованием ионных ловушек [26].)

- ILIMA (Isomeric Beams, Lifetimes and MAsses) — измерение масс и времён жизни экзотических ядер в основном и изомерных состояниях при релятивистских энергиях. С этой целью пучки ионов экзотических ядер будут инжектироваться в накопительное кольцо CR. Измерения масс (с точностью ±50 кэВ) и времён жизни очень короткоживущих ядер (до нескольких микросекунд) с помощью измерения частотных спектров ионов, циркулирующих в накопительном кольце (см., например, [29]), будут выполняться в CR, работающем в изохронном режиме. Более долгоживущие ядра (время жизни более 1 с) после их предварительного стохастического охлаждения в CR будут направляться в следующее кольцо, RESR, и затем инжектироваться в NESR. Здесь ядра будут подвергнуты дополнительно электронному охлаждению, после чего их массы будут измерены аналогичным методом [30]. За одним из дипольных магнитов в CR и NESR будут установлены переносные детекторы идентификации частиц для независимых измерений времён жизни.

- EXL (EXotic nuclei studied in Light-ion induced reactions at the NESR storage ring) — изучение прямых реакций экзотических ядер с лёгкими стабильными ядрами в обратной кинематике с помощью современной техники ускорителей-накопителей и универсальной детекторной системы. Исследования со стабильными ядрами, выполненные ранее, с очевидностью показали, что такие прямые реакции на лёгких ядрах при промежуточных и высоких энергиях являются необходимым инструментом для изучения структуры атомных ядер. Детекторная система EXL, установленная на накопительном кольце NESR, будет включать в себя:

- 1) расположенный вокруг внутренней газоструйной мишени кремниевый детектор ядер отдачи для продуктов реакций, дополненный детекторами медленных нейтронов и высокосегментированной сборкой сцинтилляторов для регистрации γ-квантов и измерения полной энергии более высокоэнергетических ядер отдачи мишени;

- 2) детекторы для вылетающих вперёд быстрых нейтронов и лёгких заряженных частиц;

- 3) детекторы для тяжёлых фрагментов, вылетающих из газоструйной мишени.

- ELISe (ELectron-Ion Scattering experiment at the NESR) — изучение структуры экзотических ядер в экспериментах по упругому, неупругому и квазисвободному рассеянию электронов на ионах с использованием пересекающихся ионного (NESR) и электронного (ER) накопительных колец, а также электронного спектрометра, работающего в сочетании с детекторной системой продуктов реакций. Наиболее надёжные сведения о распределении плотности в атомном ядре получены именно в экспериментах по электронному рассеянию. Однако до сих пор эксперименты по электронному рассеянию на ядрах ограничивались стабильными изотопами. Целью программы ELISe является развитие этого мощного инструмента, который уже дал много ценной информации о структуре стабильных ядер, с целью распространения его применимости на область состояний ядер, далёких от стабильности. Для этого вторичные пучки радиоактивных ионов, охлаждённые в NESR, будут приводиться в столкновение с интенсивным электронным пучком, циркулирующим в накопительном электронном кольце, пересекающемся с NESR.

Вторичные пучки (см. рис. 4) распределяются для проведения экспериментов по трём направлениям:

— ветвь высоких энергий — исследование важных для астрофизических процессов реакций с тяжёлыми ионами высоких энергий при инверсной кинематике с использованием наивысшей эффективности регистрации и покрытием полного телесного угла — эксперимент R³V (в котором тяжёлые частицы пучка взаимодействуют с лёгкими ядрами мишени, а вторичные частицы регистрируются под большими углами);

— ветвь низких энергий — изучение таких свойств ядер, как моды распада и энергетические уровни, с использованием моноэнергетических пучков ионов с низкими энергиями (от нескольких единиц до 100 МэВ/нуклон) — эксперименты HISPEC, MATS, LaSpec, DESPEC;

— ветвь, направленная в систему колец CR – RESR – NESR, в которых экзотические ядра накапливаются, охлаждаются и аккумулируются, для экспериментов по измерению масс и времён жизни неизвестных экзотических ядер, а также изучению их структуры с помощью электронного или антипротонного пучков — эксперименты ILIMA, EXL, ELISe.

Во многих отношениях эксперименты, разрабатываемые на FAIR, по своим возможностям будут существенно превосходить эксперименты с пучками радиоактивных ядер в других научных центрах. FAIR будет иметь существенные преимущества по сравнению с подобными проектами в США (RIA (Rare Isotope Accelerator) в Аргонской национальной лаборатории [31] и LEBIT (Low Energy Beam and Ion Trap) в Мичиганском университете [32]), Европе (REX-ISOLDE (Radioactive beam EXperiment at ISOLDE) в ЦЕРНе [33], SPIRAL-2 (Système de Production d'Ions Radioactifs Accélérés en Ligne) в Научном центре GANIL [34], CYCLONE (CYClotron of LOuvain la Neuve) [35] в университете Лювен-ла-Нёв (Louvain la Neuve), MAFF (Munich Accelerator for Fusion Fragments) в Мюнхенском университете Людвиг-Максимилиана [36], SHIP (Separator for Heavy Ion reaction Products) [37] и SHIPTRAP [28] в GSI) и Японии (RIBF (Radio-Isotope Beam Factory) [37] в Научном центре RIKEN) благодаря применению новых технологий, высоким интенсивностям вторичных радиоактивных пучков, имеющих наибольшие энергии — до 1,5 ГэВ/нуклон (для сравнения, в RIA — 400 МэВ/нуклон, в RIBF — 350 МэВ/нуклон) в широком диапазоне масс, и главным образом благодаря уникальной комбинации широкоапертурного сепаратора фрагментов Super-FRS с системой накопительных колец CR – RESR – NESR [38].

4. Плотная барионная материя — эксперимент CBM

4.1. Научная программа CBM

Научная программа эксперимента CBM (Compressed Baryonic Matter) включает в себя исследования экстремальных состояний ядерной материи и фазового перехода к кварк-глюонной плазме при высокой барионной плотности в ядро-ядерных столкновениях; исследования структуры и уравнения состояния барионной материи при плотностях, сравнимых с плотностью ядер нейтронных и кварк-глюонных ("странных") звёзд [2]; поиск границы между фазами барионной и кварк-глюонной материи, поиски критической точки и признаков начала

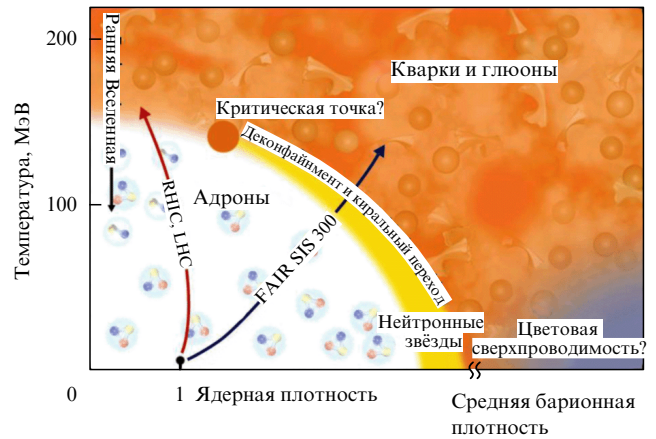


Рис. 5. Фазовая диаграмма ядерной материи.

восстановления киральной симметрии при высокой барионной плотности (рис. 5) [39] и многое другое.

Энергия тяжёлых ионов на SIS-300 FAIR достигнет 35–45 ГэВ/нуклон при увеличении интенсивности в 1000 раз по сравнению с сегодняшней интенсивностью ускорителя SIS-18 в GSI и в 10 раз превзойдёт интенсивность пучков LHC [40]. Планируемые работы позволят существенно продвинуться в исследовании неизвестных областей фазовой диаграммы по сравнению с экспериментами на RHIC и LHC [41], в которых основное внимание уделено исследованиям свойств материи при экстремально высоких температурах, но низких плотностях барионов, т.е. при очень малых значениях барионного химического потенциала. Напротив, эксперимент CBM FAIR нацелен на детальное изучение свойств материи при самых высоких значениях барионной плотности, которые могут быть достигнуты в земных условиях (рис. 5).

Для того чтобы исследовать, как ведёт себя ядерная материя в области высоких плотностей, типичных для взрывов сверхновых и для компактных астрофизических объектов, на FAIR будут проводиться эксперименты по столкновениям между тяжёлыми ионами на фиксированных мишенях при энергиях, обеспечивающих максимальное сжатие ядерной материи. Предполагается, что при очень высоких плотностях протоны и нейтроны атомных ядер "сплавляются" в кварк-глюонную плазму. Этот фазовый переход в новое состояние, который длится только 10^{-23} с, должен наблюдаться в центральных столкновениях между ядрами при высоких энергиях, доступных на ускорителе SIS-300 FAIR [42].

В отличие от экспериментов в ЦЕРНе и Брукхейвенской национальной лаборатории, где поиск критической точки осуществляется только посредством регистрации спектральных характеристик потоков вторичных частиц (bulk observables), эксперименты FAIR благодаря высокой интенсивности первичных пучков открывают дополнительную возможность регистрировать редкие события со сканированием обширной области фазовой диаграммы по энергиям частиц. В частности, планируется впервые непосредственно исследовать сигнатуры (наблюдаемые проявления) возникновения "огненного шара" (fire ball) — области ядерной материи, в которой произошёл переход от барионной фазы к кварк-глюонной фазе, — с помощью регистрации короткоживущих векторных

мезонов, распадающихся на электрон-позитронные (дилептонные) пары.

Диапазон энергий FAIR 2–35 ГэВ/нуклон для ионов золота хорошо подходит для проведения экспериментов в области фазовой диаграммы с высокими плотностями ядерной материи, превосходящими нормальную плотность в 8–10 раз.

Для однозначной интерпретации результатов очень важно, что можно будет проводить прямое сравнение данных, полученных в ядро-ядерных столкновениях, с данными протон-протонных и протон-ядерных столкновений, поскольку ускорительный комплекс FAIR будет генерировать пучки протонов с энергиями до 90 ГэВ.

4.2. Детектор CBM

На рисунке 6 [43] представлена схема детектора, создаваемого коллаборацией CBM. Универсальная детектирующая система будет идентифицировать частицы, рождающиеся в плотной зоне реакции. Эксперимент будет работать с числом событий 10^7 в 1 с и регистрировать до 1000 заряженных частиц за одно центральное столкновение ионов золота [40].

Радиационно-стойкий кремниевый регистратор треков вторичных частиц — "трекер" STS (Silicon Tracking System) состоит из трёх плоских слоёв кремниевых пиксельных и стриповых (ленточных) детекторов, за которыми следуют четыре слоя микростриповых детекторов. Весь детектор расположен в зазоре дипольного магнита для определения значений импульса с разрешением лучшим, чем 1%. Назначение кольцевого черенковского детектора (Ring Imaging Cherenkov detector, RICH) состоит в идентификации электронов и обеспечении подавления пионов в диапазоне импульсов электронов от распада низкоэнергетичных векторных мезонов. Детектор переходного излучения (Transition Radiation Detector, TRD) будет обеспечивать трекинг (регистрацию треков) заряженных частиц и идентификацию быстрых электронов и позитронов. Задачей является разработка высокогранулированных газовых счётчиков, способных работать с частотой 100 кГц см^{-2} . В то же время фактор дискриминации пионов должен достигать нескольких сотен при эффективности детектирования электронов 90%. Идентификация адронов будет осуществляться с помощью времяпролётной системы (Time Of Flight, TOF) на основе плоских резистивных камер (Resistive Plate Chambers, RPC). Допустимая ошибка

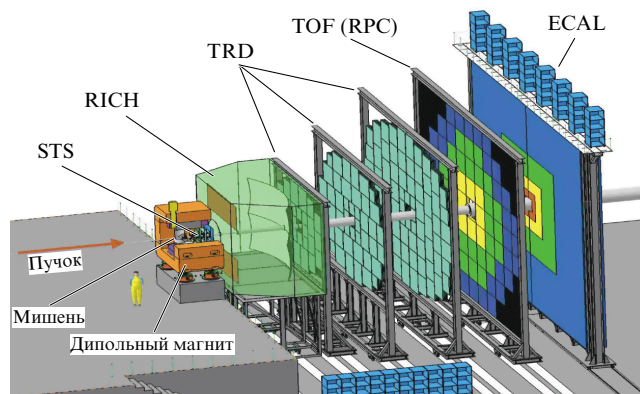


Рис. 6. Детектор CBM (см. пояснение и расшифровку аббревиатур в тексте).

измерений не должна превышать 100 пс при потоках частиц до 25 кГц см^{-2} . Электромагнитный калориметр (Electromagnetic CALorimeter, ECAL), созданный на основе уникальной российской технологии "шашлык" (см., например, [43–45]), будет использоваться для идентификации электронов и фотонов, режекции пионов.

Важным достоинством детектора CBM станет высокоскоростная система сбора информации при соответствующей концепции триггерной системы.

5. Антипротонная аннигиляция — эксперимент PANDA

5.1. Физическая программа экспериментов на пучках антипротонов

Физическая программа эксперимента PANDA (anti-Proton ANnihilation in DArmstadt) охватывает широкую область исследований — от исследования фундаментальных проблем адронной и ядерной физики до проверки фундаментальных симметрий посредством изучения взаимодействия ускоренных антипротонов с нуклонами и атомными ядрами с помощью универсального детектора PANDA, установленного на оси ускорителя-накопителя высоких энергий HESR (рис. 7).

Физическая программа нацелена на поиск новых форм материи, при этом будет достигнута беспрецедентно высокая точность в исследованиях глюонных возбуждений и по физике странных и очарованных кварков [4, 46], которая обеспечивается двумя принципиальными достоинствами ускорительного комплекса

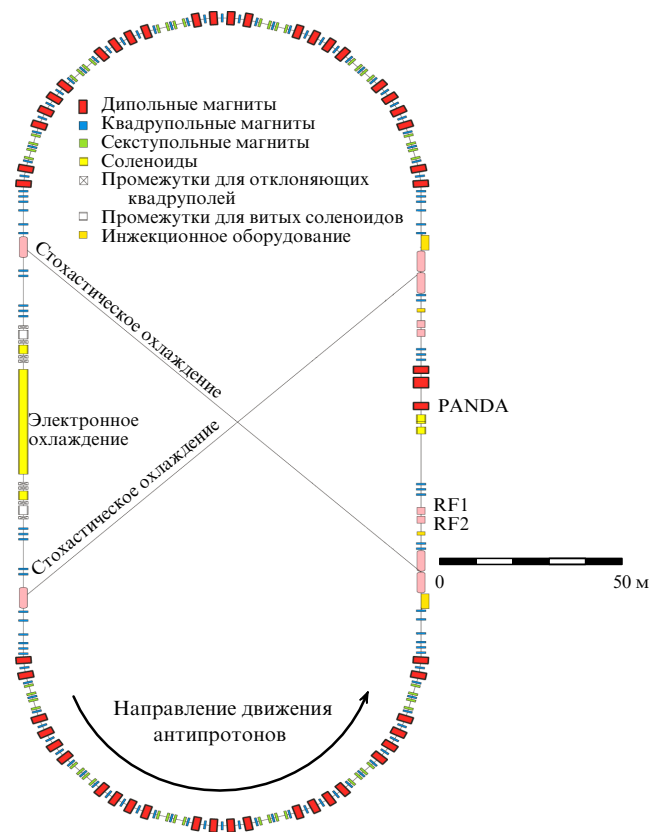


Рис. 7. Антипротонное ускорительно-накопительное кольцо HESR с детектором PANDA [4].

FAIR: а) наличием интенсивного пучка антипротонов с энергией до 15 ГэВ и б) возможностью сканирования по энергии антипротонов с точностью ± 10 кэВ. Это позволит на новом уровне точности экспериментально исследовать свойства сильного взаимодействия.

Экспериментальное исследование структуры как обычных, так и экзотических адронов можно проводить с использованием пучков электронов, пионов, каонов, протонов или антипротонов. В процессах адронной аннигиляции, в частности антипротон-нуклонной и антипротон-ядерной, частицы с глюонными степенями свободы, так же как и пары частица-античастица, рождаются в избытке. Это позволяет проводить спектроскопические исследования с беспрецедентно большой статистикой и высокой точностью. Таким образом, пучки антипротонов ускорительного комплекса FAIR в сочетании с детектором PANDA обеспечат получение качественно новых результатов по сравнению с результатами экспериментов, выполненных в Национальной лаборатории им. Э. Ферми (FNAL, США) и в ЦЕРНе. FAIR будет обеспечивать в 100 раз большую интенсивность пучка накопленных и охлаждённых антипротонов, чем в ЦЕРНе, а также превзойдёт по интенсивности пучки в FNAL и пучки сооружаемой в Японии установки J-Park [4, 47].

Впервые станут возможными измерения с высокой точностью не только электромагнитных, но и адронных мод распада при резонансной протон-антипротонной аннигиляции, а также поиски глюонных возбуждений (глоболов и гибридов) в интервале энергий, соответствующем чармониевым массам 3–5 ГэВ/ c^2 (рис. 8).

Однозначное определение глюонных мод станет важным этапом в решении проблемы пленения кварков в адронах. В частности, частица, состоящая из очарованного кварка и антикварка (чармоний), позволит изучать с высокой точностью не исследованные до сих пор аспекты сильного взаимодействия, основной теорией которого в настоящее время является КХД. При этом эксперимент PANDA создаст широкие возможности для открытий, в дополнение к экспериментам на LHC при относительно высокой энергии антипротонов, и, кроме того, благодаря сканированию по энергии с точностью 10 кэВ сможет

определять ширины узких резонансов, таких, например, как состояния чармония.

Итак, научная программа коллаборации PANDA включает в себя:

- поиск экзотических частиц, таких как глоболы и гибриды;
- спектроскопию состояний чармония при энергиях, превышающих энергетический порог образования пар D-анти-D-мезонов;
- исследования гиперядер (в том числе двойных) и очарованных ядер, в которых странная (одна или две) или очарованная частица замещают собой обычный нуклон.

На установке PANDA предполагается также изучать редкие распады, содержащие одиночные фотоны, π^0 - и η -мезоны в широком диапазоне энергий (см. рис. 8).

Предполагается, что эксперименты PANDA будут проводиться в двух режимах: режим высокой светимости и режим высокого разрешения. Высокое разрешение по импульсам достигается охлаждением пучка, эффективность которого убывает с возрастанием интенсивности из-за внутрипучкового рассеяния. Параметры, характеризующие эти режимы, представлены в табл. 2.

Протоны, ускоренные в SIS-100 до энергии 29 ГэВ, используются для генерации пучка антипротонов, которые рождаются при бомбардировке мишени протонами, затем охлаждаются в двух кольцах (CR и RESR) и поступают в накопительное кольцо высоких энергий (HESR), схема которого представлена на рис. 7. В HESR осуществляется взаимодействие антипротонных пучков с протонной мишенью (водород), для того чтобы получить составные частицы, содержащие странные и очарованные кварки.

В экспериментах PANDA будут использоваться два типа внутренних водородно-пучковых мишеней: струйная кластерная мишень (см., например, [48, 49]), в которой кластерами являются частицы, состоящие из порядка 10^5 слабосвязанных атомов водорода, и мишень, представляющая собой цепочку падающих в вакууме замёрзших водородных микросфер [50], так называемых пеллет (pellets), с характерными диаметрами 20–40 мкм.

Аналогичные мишени из других газов (например, неона, азота, аргона, ксенона) также будут доступны для экспериментов PANDA.

Пучки антипротонов для экспериментов PANDA будут получать следующим образом [7]. Сначала им-

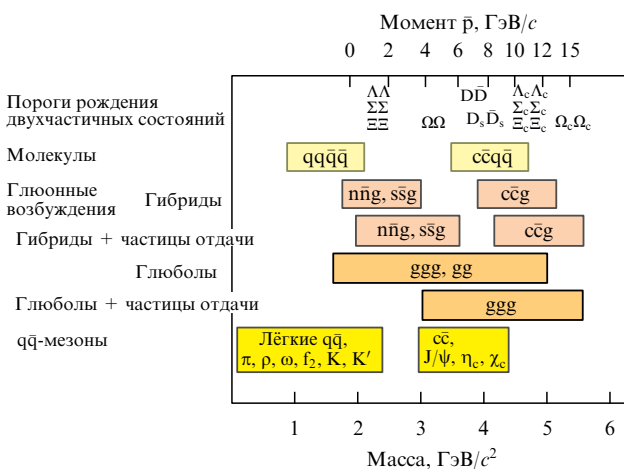


Рис. 8. Область масс адронов, которая будет доступна в экспериментах PANDA. Верхняя шкала указывает соответствующие импульсы антипротонов, требуемых в экспериментах с фиксированной мишенью [4].

Таблица 2. Параметры двух режимов проведения экспериментов PANDA (при предположении, что эффективная толщина внутренней водородной мишени 4×10^{15} атомов на 1 см^2 , а эмиттанс пучка — 0,3 мм мрад)

Параметр	Рабочий режим	
	Высокое разрешение	Высокая интенсивность
Диапазон импульсов, ГэВ/c	1,5–8,9	1,5–15
Число накопленных антипротонов	1×10^{10}	1×10^{11}
Светимость, $\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	2×10^{31}	2×10^{32}
Разрешение по импульсам $\delta p/p$	$< 4 \times 10^{-5}$	1×10^{-4}

пульсы протонных пучков с током 70 мА, длительностью импульса 40 мкс и частотой повторения 5 Гц, ускоренные в линейном ускорителе р-LINAC до энергии 70 МэВ, будут инжектироваться в синхротрон SIS-18.

Для увеличения числа ускоренных протонов кольцо синхротрона SIS-18 будет наполняться восемью последовательными протонными импульсами (так называемыми банчами) перед их разгоном до энергии 2 ГэВ, необходимой для последующей инжекции в основной ускоритель FAIR — синхротрон SIS-100.

В SIS-100 протоны будут ускорены до конечной энергии 29 ГэВ и перед их выводом на мишень, производящую антипротоны, сжаты в один банч длиной около 7,5 м, что соответствует длительности ≈ 25 нс. Каждые 10 с банч из 2×10^{13} протонов будет сбрасываться на толстую (эффективная толщина 60–80 мм) иридиевую или вольфрамовую мишень, в которой будет производиться до 1×10^8 антипротонов (выход на один протон 5×10^{-6}) со средней энергией 3 ГэВ.

Из полученного спектра с помощью магнитной системы "вырезается" короткий банч антипротонов с разбросом по импульсам $\delta p/p = \pm 3\%$ и поперечным эмиттансом $\varepsilon_{x,y} = 200$ мм мрад (эффективность процесса $\approx 2-3\%$). Затем пучок вводится в накопительное кольцо CR, где его фазовый объём трансформируется таким образом, что длина банча увеличивается от $l_b \approx 15$ м до $l_b \approx 45$ м при соответствующем уменьшении разброса по импульсам до $\delta p/p = \pm 1\%$. Далее благодаря свободной циркуляции в кольце пучок утрачивает импульсную структуру (так называемый адиабатический ребанчинг) и таким образом подготавливается для охлаждения. После стохастического охлаждения пучок антипротонов ($\delta p/p = \pm 0,1\%$, $\varepsilon_{x,y} = 5\pi$ мм мрад) снова группируется в банчи и передаётся в кольцо RESR, где происходит накопление антипротонов.

В RESR пучок антипротонов подвергается стохастическому охлаждению в течение всего времени накопления, в процессе которого каждые 10 с в RESR инжектируется новый банч антипротонов. Скорость накопления антипротонов сопоставима со скоростью их охлаждения в CR. Это означает, что можно будет получать до 7×10^{10} антипротонов в 1 ч. Выбор времени накопления (или общего числа накопленных антипротонов) определяется требованиями эксперимента.

Перед инжекцией антипротонов, накопленных в RESR, в кольцо высоких энергий HESR пучок антипротонов с импульсами 3,8 ГэВ/с сжимается в один банч. В HESR антипротонный пучок может быть как ускорен, так и замедлен до желаемого в данном эксперименте импульса со скоростью, близкой к 0,1 ГэВ/с в секунду.

Таким образом, ускорительный комплекс FAIR обеспечит пучки антипротонов с беспрецедентно высокими интенсивностью и качеством в диапазоне импульсов от 1,5 до 15 ГэВ/с (или энергий от 0,83 до 14,1 ГэВ) для аннигиляционных экспериментов с использованием внутренней мишени и универсального 4π-детектора PANDA. В кольце длиной 574 м могут циркулировать до $\sim 10^{11}$ антипротонов. Для компенсации нагрева антипротонного пучка вследствие его взаимодействия с внутренней мишенью и внутривидового рассеяния кольцо HESR будет оснащено установкой электронного охлаждения с энергией электронов до 4,5 МэВ и системой стохастического охлаждения.

5.2. Детектор PANDA

PANDA является 4π-детектором с внутренней фиксированной мишенью, который устанавливается на высокоэнергетическом накопительном кольце HESR.

Детектор PANDA, который будет иметь близкий к 4π акцептанс, высокое разрешение по трекингу, идентификации частиц и калориметрии, обеспечит эффективный сбор данных и селекцию событий при загрузке 2×10^7 взаимодействий в 1 с на внутренней водородной мишени [46].

Для того чтобы обеспечить высокое разрешение по импульсам, детектор будет состоять из двух магнитных спектрометров (рис. 9): спектрометра мишени, базирующегося на сверхпроводящем магнитном соленоиде, который располагается вокруг точки взаимодействия антипротонов с мишенью и будет использоваться для измерений при больших углах, и переднего спектрометра, имеющего дипольный магнит для измерений треков частиц, вылетающих из мишени под малыми углами к оси антипротонного пучка.

В обоих спектрометрах будет обеспечен трекинг, идентификация заряженных частиц, электромагнитная калориметрия и мюонная идентификация, которые позволят регистрировать полный спектр конечных состояний, важных для достижения целей программы исследований коллаборации PANDA.

Спектрометр мишени, схема которого представлена на рис. 10, будет измерять треки заряженных частиц в высокооднородном (отклонение от однородности не более $\pm 2\%$) соленоидальном поле величиной 2 Тл. Конфигурация этого спектрометра (схожая с конфигурацией детекторов в коллайдерных экспериментах) подобна структуре луковичи — различного типа детекторы будут располагаться слоями вокруг оси. Вакуумные трубки для введения и последующего удаления из антипротонного пучка вещества мишени (т.е. пучка кластеров или пеллет) будут пересекать спектрометр сверху вниз перпендикулярно вакуумной трубе с антипротонным пучком. В соответствии с углами вылета частиц из мишени данный спектрометр можно условно разделить на следующие три части: бочка, покрывающая

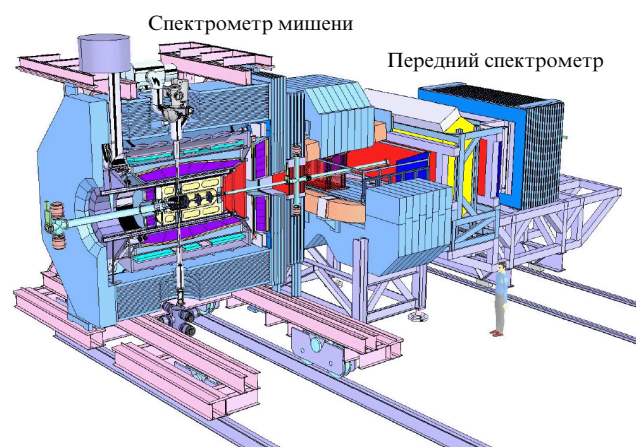


Рис. 9. Детектор PANDA, состоящий из двух магнитных спектрометров: спектрометра мишени, расположенного вокруг точки взаимодействия антипротонов с мишенью, и переднего спектрометра, предназначенного для измерений треков частиц, вылетающих из мишени под малыми углами к оси антипротонного пучка. Полная длина детектора 10 м [4].

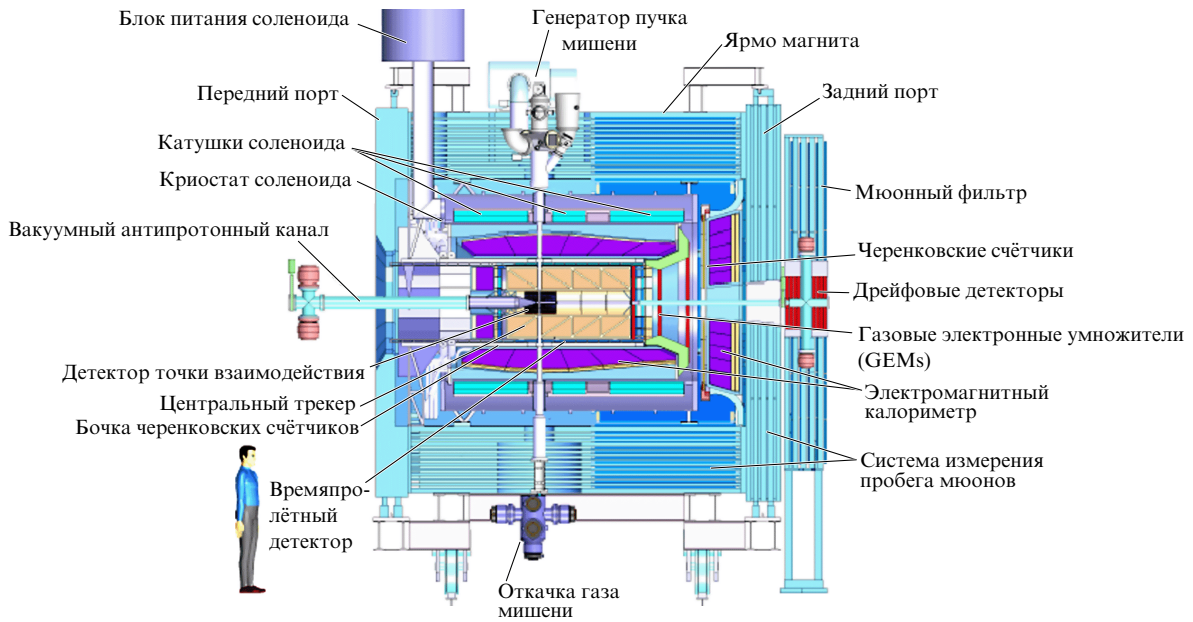


Рис. 10. Вид сбоку спектрометра мишени детектора PANDA. Пояснения в тексте.

углы величиной между 22° и 140° ; передняя крышка, расширяющая диапазон углов в меньшую сторону, до 5° в вертикальной и до 10° в горизонтальной плоскостях; задняя крышка, покрывающая область углов $\approx 145^\circ - 170^\circ$.

Кратко опишем основные элементы спектрометра мишени.

Сверхпроводящий соленоид. Обеспечение магнитного поля величиной 2 Тл в свободной для размещения детекторов области длиной 4 м и диаметром 1,9 м является нетривиальной инженерно-технической задачей, которая дополнительно усложняется жёсткими требованиями, предъявляемыми к однородности магнитного поля, наличием пересекающих магнит тёплых труб для проводки пучка мишени, необходимостью обеспечения доступа к детекторам и т.д. Криостат соленоида будет окружать все детекторы и служить поддерживающей их структурой. Ярмо магнита будет дополнительно играть роль мюонной регистрирующей системы за счёт размещения в нём (между 13 слоями железа) мини-дрейфовых трубок — Muon Range System (см. рис. 10). Основные параметры сверхпроводящего соленоида приведены в табл. 3.

Микровершинный детектор (Micro-Vertex Detector) расположен в спектрометре мишени наиболее близко к месту взаимодействия пучка антипротонов с пересекающим его пучком частиц мишени. Микровершинный детектор, концепция которого основана на использовании радиационностойких кремниевых пиксельных и стриповых детекторов, является трековым устройством для заряженных частиц. Этот детектор очень важен для прецизионного определения вершин вторичных распадов короткоживущих частиц, таких как очарованные или странные гипероны и D-мезоны.

Центральный трековый детектор (Central Tracker). Вокруг микровершинного детектора располагается имеющий также форму бочки центральный трековый детектор, работа которого основана на использовании процесса ионизации газа при прохождении через него заряженной частицы. Появившиеся в результате ионизации

Таблица 3. Основные параметры сверхпроводящего соленоида

Центральное поле	2,0 Тл
Неоднородность поля	$\leq 2\%$
Внутренний диаметр	1,9 м
Параметры холодной массы	
Длина	2,7 м
Энергия	20 МДж
Ток	5000 А
Вес	4,5 т
Сечение кабеля	$3,4 \times 2$ мм
Плотность тока	59 А мм^{-2}
Параметры ярма	
Длина	4,9 м
Внешний диаметр	4,6 м
Число слоёв железа	13
Общий вес	300 т

ции газа электроны дрейфуют в приложенном электрическом поле к чувствительному электроду, и по известным дрейфовой скорости в газе и пространственному положению электрода можно определить трек заряженной частицы.

В качестве вариантов реализации центрального трекового детектора в настоящее время рассматриваются две следующие детектирующие системы.

Первая система (Straw Tube Tracker) — это многослойная сборка из 4200 самоподдерживающихся дрейфовых трубок со стенками из тонкой (30 мкм) плёнки алюминизированного майлара, имеющих на оси электрод в виде покрытой золотом проволоки из вольфрама

или рения диаметром 20 мкм. Длина и диаметр трубок 150 см и 10 мм соответственно. Трубки заполнены смесью аргона (90 %) и углекислого газа (10 %).

Вторая система (Time Projection Chamber) состоит из двух больших наполненных газом полуцилиндрических камер, торцы (крышки) которых играют роль электродов (катода и анода). Электрическое поле, направленное вдоль оси цилиндра, заставляет электроны, рождённые в газе проходящей через него заряженной частицей, двигаться с постоянной скоростью к аноду, конструктивно выполненному в виде матрицы из отдельных регистрирующих сенсоров малого размера. Таким образом удаётся получить информацию о двух координатах трека, а его третья координата определяется по измерениям времени дрейфа электронов от места их первоначального образования в газе до анода, где они регистрируются.

Станции газовых электронных умножителей (Gas Electron Multipliers, GEMs). Частицы, летящие под углами к оси $< 22^\circ$, т.е. частицы, которые не попадают в центральный трековый детектор, будут регистрироваться тремя станциями из газовых электронных умножителей, установленных на расстояниях 1,17, 1,53 и 1,89 м от мишени.

Идентификаторы частиц. Возможность идентификации адронов и лептонов в широком диапазоне импульсов и углов является важным свойством установки PANDA. Идентификация частиц со спектром импульсов выше 1 ГэВ/с будет обеспечиваться черенковскими детекторами. Для медленных частиц, вылетающих под большими углами, идентификация будет осуществляться времяпролётным детектором. Так как пролётная база в спектрометре мишени составляет только 50–100 см, такой детектор должен иметь очень хорошее временное разрешение, в диапазоне 50–100 пс. Сборка времяпролётного детектора в виде бочки (Barrel TOF) с внутренним и наружным радиусами 42 и 45 см будет покрывать углы между 22° и 140° . Идентификация более быстрых частиц в этом же диапазоне углов будет производиться посредством детектирования внутренне отражённого черенковского света (Detection of Internally Reflected Cherenkov (DIRC) light), так же как это реализовано в установке BaBar [51]. Черенковский детектор будет представлять собой бочкообразную сборку (Barrel DIRC) из кварцевых пластин толщиной 1,7 см, окружающих антипротонный пучок на расстоянии 45–54 см от оси. Подобный черенковский детектор, но в виде диска (Disc DIRC) будет использоваться для частиц, вылетающих вперёд под углами от 5° до 22° . Этот диск будет установлен непосредственно перед передней крышкой электромагнитного калориметра.

Электромагнитный калориметр (Electromagnetic Calorimeter). Для того чтобы справиться с высокими нагрузками при компактной конструкции спектрометра мишени, в электромагнитном калориметре необходим быстрый сцинтилляционный материал с малой радиационной длиной X_0 . Лучшее всего для этого подходят кристаллы из вольфрамата свинца ($PbWO_4$) — неорганического сцинтиллятора высокой плотности, обеспечивающего высокое энергетическое и временное разрешение при регистрации фотонов и электронов даже в области промежуточных энергий [52]. Именно поэтому кристаллы $PbWO_4$ используются, например, в установке компактного мюонного спектрометра коллаборации

Таблица 4. Основные конструктивные параметры электромагнитного калориметра

Материал	$PbWO_4$
Размеры кристалла	2 см × 2 см × 20 см
Длина	22 X_0
Энергетическое разрешение	$1,54\%/\sqrt{E [ГэВ]} + 0,3\%$
Временное разрешение	< 20 нс
Число кристаллов	15552
Покрываемый телесный угол	96 % 4π

CMS (Compact Muon Solenoid) в ЦЕРНе [53]. Чтобы достичь энергетического разрешения, лучшего, чем 2 %, при энергии 1 ГэВ, кристаллы в электромагнитном калориметре должны иметь длину 20 см (т.е. приблизительно 22 X_0). В бочке калориметра, имеющей внутренний радиус 57 см, будут установлены 11360 профилированных кристаллов с площадью передней грани $2,1 \times 2,1$ см². Для передней и задней крышек этой бочки потребуется 3600 и 592 кристалла соответственно. Таким образом, полное число кристаллов $PbWO_4$ составит 15552. Основные конструктивные параметры электромагнитного калориметра представлены в табл. 4.

Передний спектрометр (рис. 11) будет регистрировать частицы, испущенные в диапазоне вертикальных и горизонтальных углов $\pm 5^\circ$ и $\pm 10^\circ$ соответственно. Для анализа заряженных частиц с разрешением по импульсу $\leq 1\%$ будет использоваться дипольный магнит с зазором 1 м и апертурой 2 м. Отклоняющая сила магнита равняется 2 Тл м, что заставляет антипротоны с максимальным импульсом 15 ГэВ/с отклоняться в его поле на угол $2,3^\circ$. Отклонение пучка антипротонов будет компенсировано затем двумя или тремя корректирующими магнитами, размещаемыми за установкой PANDA.

Изменение траекторий частиц в поле дипольного магнита будет измеряться многопроволочными дрейфовыми камерами. Две камеры будут установлены перед магнитом, другие две — за магнитом. Это позволит регистрировать треки частиц с наибольшими импульсами. Для регистрации треков частиц с небольшими

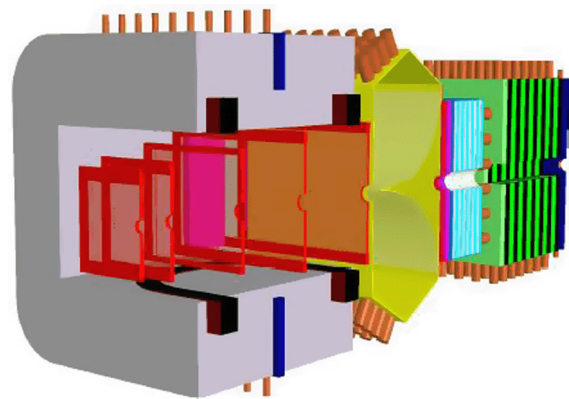


Рис. 11. Трёхмерный конструктивный вид переднего спектрометра детектора PANDA. Дипольный магнит (в левой части рисунка) с зазором 1 м и апертурой более 2 м имеет отклоняющую силу 2 Тл м.

импульсами будут установлены две дополнительные дрейфовые камеры внутри зазора магнита.

Сборка из пластин пластиковых сцинтилляторов с быстрыми фотоумножителями на обоих концах пластин для считывания сигналов, установленная на расстоянии 7 м от мишени, будет служить в качестве стоповых время-пролётных счётчиков для измерения времени пролёта от стартового детектора, помещённого в области мишени, до этих стоповых счётчиков. Дополнительно подобные стоповые детекторы будут установлены внутри дипольного магнита для регистрации низкоэнергетических частиц, которые не могут вылететь из этого магнита. При ожидаемом временном разрешении 50 пс отделение пионов от каонов (π/K) и каонов от протонов (K/p) на уровне трёх стандартных ошибок будет возможно для частиц с импульсами до 2,8 и 4,7 ГэВ/с соответственно.

Калориметр для частиц, вылетающих в область передних углов, будет состоять из двух частей. В качестве первой части, предназначенной для детектирования фотонов и электронов с высокими разрешением и эффективностью, будет использоваться калориметр типа "шашлык" (см., например, [44]). В работе [54] для подобного калориметра получено энергетическое разрешение $4\%/\sqrt{E}$. Вторая часть калориметра будет служить для измерений энергии нейтральных адронов, а также использоваться как быстрый триггер и активный мюонный фильтр. Эта часть калориметра будет установлена сразу за калориметром типа "шашлык" перед стенкой из счётчиков для идентификации мюонов (эти счётчики подобны мюонным счётчикам, которые окружают описанный выше сверхпроводящий соленоид спектрометра мишени). Подробное описание переднего спектрометра можно найти в [55].

6. Физика высокой плотности энергии в веществе — физика плазмы

Исследования по физике высокой плотности энергии в веществе и экстремальных состояний вещества при интенсивном импульсном воздействии необходимы для

получения новых знаний о физических процессах и свойствах материалов в условиях сверхвысоких давлений, плотностей и температур. Эти сведения составляют научную основу перспективных энергетических проектов — управляемого термоядерного синтеза (УТС) с инерционным удержанием горячей плазмы, магнито-гидродинамических и магнито-кумулятивных генераторов, ядерных космических установок и т.п. [2]. Кроме того, эти знания применяются для совершенствования свойств материалов ядерно-энергетических установок, находящихся под воздействием мощных потоков излучения, и разработки новых технологий энергетического применения.

На основе экспериментальных данных разрабатываются обладающие высокой достоверностью и хорошими прогностическими качествами физико-математические модели, которые составят основу компьютерного моделирования. Точность прогнозов такого моделирования зависит от используемых фундаментальных моделей, глубины понимания существа физических процессов, надёжности описания свойств материалов при сверхвысоких давлениях и температурах.

Рекордно высокие значения давления в веществах в диапазоне плотностей $1 - 1000 \text{ г см}^{-3}$ и температур $10^{-1} - 10^5 \text{ эВ}$ были получены ранее при проведении подземных ядерных испытаний [2]. В настоящее время появилась возможность получения экспериментальных данных на исследовательских установках, которые позволяют перекрыть те или иные области фазовой диаграммы вещества. Наиболее крупными из них являются мощные лазеры Omega и NIF (National Ignition Facility) (США), Gekko-12 (Япония), Vulkan (Великобритания) и "Искра-5" (Россия), мощные электроразрядные системы ZX (США), "Ангара-5-1" (Россия), мощные тяжёлоионные ускорители SIS-18 (ФРГ), ТВН-ИТЭФ (Россия) и др. На рисунке 12 отражены возможности различных установок по исследованиям в различных областях диаграммы состояния вещества.

На комплексе FAIR будет достигнута интенсивность импульсного пучка ионов $\sim 10^{12}$ при энергии до

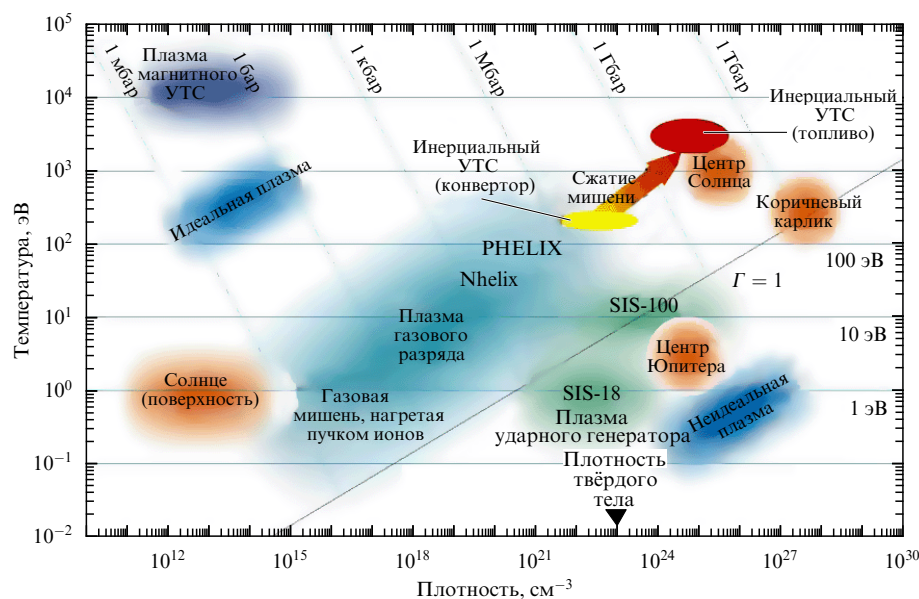


Рис. 12. Фазовая диаграмма вещества. (Nhelix (Nanosecond high energy laser for ion beam experiments) — наносекундный высокоэнергетический лазер для экспериментов с ионными пучками (GSI).)

1000 МэВ/нуклон. За счёт увеличения интенсивности пучков тяжёлых (вплоть до урана) ионов и сжатия пучков во времени до длительности импульсов в 50 нс удельный энерговыделительный коэффициент установки FAIR в 600(!) раз превысит энерговыделительный коэффициент комплекса SIS-18 в Институте тяжёлых ионов и в 10 раз — комплекса ТВН-ИТЭФ, создаваемого в Росатоме. Это позволит изучать свойства сверхплотной неидеальной плазмы и вещества при сверхвысоких давлениях, что необходимо для разработки технологий инерциального УТС и моделирования ядерного взрыва, на уникально высоком уровне статистической точности в недостижимых на других экспериментальных установках диапазонах плотностей и температур.

Две крупные международные коллаборации, HEDGENOV (High Energy Density Generated by Heavy Ion Beams) и WDM, имеют целью использовать свойство объёмного энерговыделения интенсивного ионного пучка в веществе для генерации состояний материи с высоким уровнем энтропии. Мощные импульсы пучков, которые будут генерироваться ускорителями FAIR, способны создавать большие объёмы плотной плазмы с уровнем плотности энергии, представляющим интерес для решения широкого круга задач фундаментальной физики плазмы, радиационной гидродинамики и магнетогидродинамики, радиационного материаловедения, планетарной геофизики, атомной и молекулярной физики и др. Ожидаемые параметры пучков для ионов урана U^{28+} приведены в табл. 5.

Пучки ионов с указанными параметрами, сфокусированные в пятно диаметром ≈ 1 мм, способны обеспечивать нагрев макроскопических объёмов плотного вещества мишеней до температуры в несколько десятков электронвольт.

Ядро экспериментальной программы по исследованию физики высоких плотностей энергии в веществе составляют три базовых эксперимента:

- HINEX (Heavy Ion Heating and EXpansion — нагрев тяжёлыми ионами и расширение);
- LAPLAS (LABoratory PLANetary Science — лабораторная планетарная физика);
- WDM (Warm Dense Matter — плотная "тёплая" материя).

Важнейшей особенностью этих трёх экспериментов на ускорителях FAIR станет уникальная возможность диагностики плазмы с помощью пучков высокоэнергетичных протонов (радиография) при одновременном использовании излучения мощного петаваттного лазера ($\approx 10^{15}$ Вт). Такой лазер способен обеспечивать плотность потока излучения на мишени 10^{21} Вт $см^{-2}$. Пред-

усматривается создание соответствующей линии транспортировки протонного пучка от ускорителя SIS-18 в экспериментальный зал физики плазмы, так же как и для подачи излучения мощного лазера в мишенные вакуумные камеры. Сочетание высокоинтенсивного лазерного импульса, диагностического пучка протонов и интенсивного ионного пучка открывает на FAIR новые уникальные экспериментальные возможности.

6.1. Эксперимент HINEX

Интенсивные пучки тяжёлых ионов с длительностью импульса 50–100 нс позволяют быстро (по сравнению с характерным временем гидродинамического движения) нагреть вещество в окружающую среду, т.е. создать высокий уровень энерговыделения и последовательно наблюдать изоэнтропическое расширение. В подобном эксперименте [1, 56] нагретый материал при расширении пройдёт через целый ряд новых интересных состояний. Так, исходный металл с нормальной плотностью в результате нагрева достигнет состояния перегретой жидкости с разупорядоченной ионной компонентой и вырожденными электронами. В ходе изоэнтропического расширения вещество проходит состояние квазинеидеальной бальцмановской плазмы и разреженного газа. При дальнейшем расширении степень вырождения, сопровождающаяся перераспределением энергетического спектра ионов и атомов, а также частичной рекомбинацией плотной плазмы, уменьшается. В разупорядоченной электронной системе могут происходить фазовые переходы металл–диэлектрик, а плазма в окрестностях критической точки и точки равновесия жидкость–испарённая фаза становится неидеальной. Когда изоэнтропа входит в двухфазную область жидкость–пар, начинается конденсация газовой фазы. При более высоких уровнях энерговыделения изоэнтропическое расширение может сопровождаться ещё более экзотическими эффектами с сильной вариацией степени ионизации плазмы α и параметра неидеальности Γ . Диапазон изменения термодинамических параметров вещества в одном эксперименте может изменяться весьма существенно: до шести порядков по давлению и до четырёх порядков величины по плотности.

На диаграмме в координатах давление–энтропия (рис. 13) состояния материи с высокой плотностью энергии [56], включая горячее сжатое ионизованное вещество, неидеальную плазму, разогретую расширяющуюся жидкость и квазиидеальную плазму, занимают обширную область.

Имеющаяся сегодня информация о свойствах металлов, полученная с помощью метода изоэнтропического расширения ударно-сжатого материала [57], в основном сосредоточена вдоль ударной адиабаты Гюгонно и дополнена модельными оценками положения критических точек на фазовой плоскости (см. рис. 13). Поэтому обширная область фазовой диаграммы под ударной адиабатой, в том числе области с критическими точками металлов и область неидеальной плазмы ($\Gamma \geq 1$), требует дальнейших исследований [58–61].

На рисунке 13 выделены более тёмным цветом области фазовой диаграммы, соответствующие достижимым на тяжёлоионных ускорительных установках SIS-18 и SIS-100 параметрам. Так, действующий ускоритель SIS-18 создаёт греющий импульс ионов урана с

Таблица 5. Параметры пучков ионов U^{28+}

Параметр	Значение
Полная энергия в импульсе	80 кДж
Длительность импульса	50 нс
Полное число частиц	2×10^{12}
Удельная мощность	10 ТВт г^{-1}
Удельная вложенная энергия	$> 100 \text{ кДж г}^{-1}$
Энергия ионов	$\sim 1 \text{ ГэВ/нуклон}$

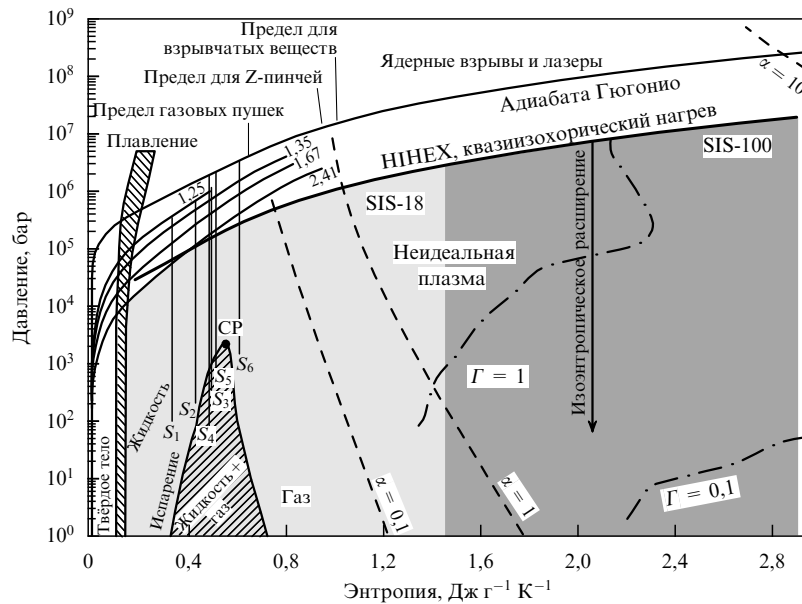


Рис. 13. Диаграмма состояний вещества в координатах давление–энтропия [56]. (CP — критическая точка.)

интенсивностью $\approx 10^{10}$ частиц, длительностью ≈ 100 нс и энергией ионов 300 МэВ/нуклон. При фокусировке такого импульса на мишень обеспечивается уровень энерговыделения ≈ 1 кДж $г^{-1}$. В дальнейшем планируется увеличить интенсивность пучка, доведя уровень энерговыделения до 10 кДж $г^{-1}$. Запущенный в 2003 г. в ИТЭФ ускоритель-накопитель ТВН-ИТЭФ нацелен на получение уровня энерговыделения $\approx 10-20$ кДж $г^{-1}$ при концентрации на мишени импульса ионов меди или кобальта с энергией до 700 МэВ/нуклон. Новый ускоритель SIS-100 в FAIR достигнет уровня энерговыделения более 100 кДж $г^{-1}$.

Таким образом, развитие тяжёлоионных ускорителей-драйверов предоставит новые возможности для исследований трудно достижимых областей фазовой диаграммы разнообразных по физическим свойствам веществ.

На рисунке 14 изображена схема эксперимента НИНEX, в котором цилиндрическая мишень объёмно нагревается интенсивным пучком тяжёлых ионов. Нагретое вещество (плазма) начинает изоэнтропически расширяться в окружающий вакуум. Параметры расширения,

необходимые для построения уравнения состояния веществ, измеряются с помощью диагностических систем, использующих рентгеновскую "подсветку" от петаваттного лазера.

6.2. Эксперимент LAPLAS

В эксперименте LAPLAS реализуется режим сильного сжатия вещества при цилиндрической имплозии на оси цилиндра. Интерес к этому явлению обусловлен возможностью генерации в лаборатории состояния материи в центральных частях планет Юпитера и Сатурна, где вещество имеет плотность $1-2$ г $см^{-3}$ при давлении $5-10$ Мбар и температуре в несколько электронвольт. Кроме того, эксперимент связан с разработкой пробелы УТС с инерционным удержанием на основе тяжёлоионного ускорителя-драйвера [1, 62]. Как правило, мишени представляют собой структуру из цилиндрических слоёв с различной начальной плотностью (рис. 15).

Центральную область занимает вещество, которое необходимо сжать для получения возможно большей конечной плотности, например водород или эквимольная смесь дейтерия и трития. Слой вещества, поглощающий энергию ионов (абсорбер), подвергается воздействию "трубчатого" пучка специальной формы, в сечении представляющего собой кольцо. Решение проблемы создания трубчатых ионных пучков посредством их вращения с помощью ВЧ-поля на этапе транспортировки от ускорителя к

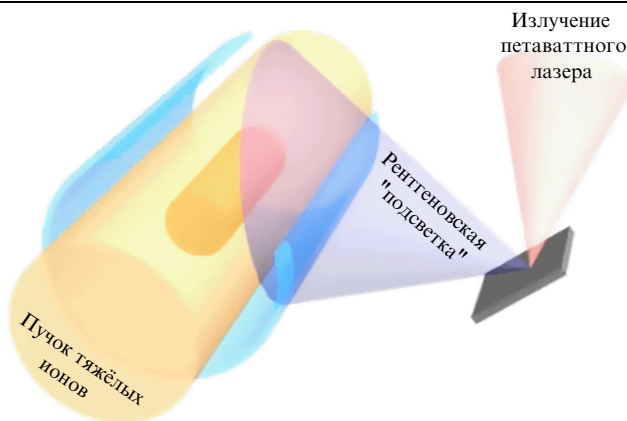


Рис. 14. Схема эксперимента НИНEX.

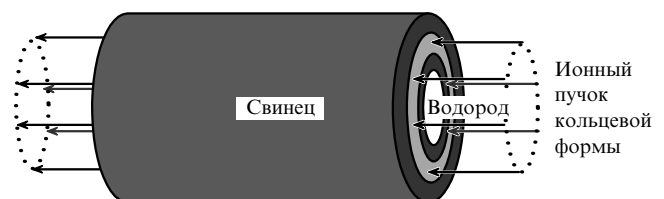


Рис. 15. Структура многослойной цилиндрической мишени для эксперимента LAPLAS [63].

мишени предложено в работах [62, 64]. Ряд расчётно-теоретических работ посвящён поиску оптимальных условий для обеспечения однородности гидродинамического отклика вещества абсорбера на энерговыделение подобного быстровращающегося пучка [64, 65].

Особое внимание при этом уделяется подбору таких параметров греющего импульса ионного пучка, геометрических размеров слоёв мишени и значений их начальной плотности, которые обеспечивали бы режим сжатия топлива на оси цилиндра, близкий к адиабатическому [66–69] (см. также [70, 71]), — так называемый квазиизэнтропический режим.

Цель эксперимента LAPLAS [63, 64] состоит в изучении металлизации водорода, характерной для внутренних слоёв Юпитера и Сатурна. С помощью двумерного гидродинамического кода [72] проведены численные исследования возможности реализации квазиизэнтропического режима сжатия при воздействии тяжёлоионного пучка для получения эффекта металлизации водорода, предсказанного ещё в 1935 г. Вигнером и Гюгонио. В численном эксперименте рассматривалась многослойная цилиндрическая мишень длиной и внешним радиусом по 3 мм (см. рис. 15). Радиус внутреннего цилиндра, состоящего из твёрдого замороженного водорода, 0,5 мм. С торца цилиндра на мишень воздействует пучок ионов урана 10^{12} ионов с энергией 400 МэВ/нуклон и длительностью импульса 50 нс. Важным моментом является кольцевая форма сечения пучка: пучок фокусируется в кольцо с внешним и внутренним радиусами соответственно 2,0 и 0,5 мм, воздействуя не на водород, а на цилиндрический слой из свинца. Энерговыделение вдоль свинцового слоя полагается однородным, поскольку пробег ионов урана с энергией 400 МэВ/нуклон в свинце составляет 4,25 мм, а значит, пик Брэгга оказывается за пределами мишени.

Особенность эксперимента состоит в обеспечении режима генерации множества последовательных ревербирующих слабых ударных волн, сжимающих водород вдоль изэнтропы. Двумерный гидродинамический код BIG-2 [72] даёт возможность рассчитать распределение плотности водорода по радиусу цилиндра в различные моменты времени. Результаты расчёта показывают, что при относительно медленном адиабатическом движении границы водород–свинец к оси цилиндра между этой границей и осью возникает серия отражённых слабых ударных волн, под воздействием которых вещество переходит в состояние, отвечающее условиям металлизации водорода. В соответствии с уравнением состояния из таблицы SESAME — это давление 3 Мбар, плотность $\sim 1 \text{ г см}^{-3}$ и температура $\geq 0,1 \text{ эВ}$ [63]. Такие параметры остаются неизменными в течение 160–200 нс, что вполне достаточно для проведения измерений проводимости водорода в экстремальных условиях. Выполненные недавно эксперименты по квазиадиабатическому сжатию водорода [1, 2] свидетельствуют о том, что металлизация давлением наступает уже при давлениях около 1 Мбар и плотности $\approx 0,6 \text{ г см}^{-3}$.

6.3. Эксперимент WDM

Целью эксперимента WDM является реализация квазиизохорического режима нагрева материи и достижение экстремального состояния плазмы при сильном межчастичном взаимодействии при больших значениях параметра неидеальности, $\Gamma \geq 1$ [2].

В работе [73] представлено физическое обоснование готовящегося эксперимента на пучках ионов ускорителя SIS-100, создаваемого в рамках проекта FAIR. Эксперимент нацелен на изучение состояния твёрдого водорода при уровне энерговыделения 130 кДж г^{-1} , что обеспечивается пучком ионов урана с энергией 200 МэВ/нуклон и интенсивностью 8×10^{10} при его фокусировке в пятно радиусом $r_b = 350 \text{ мкм}$ (среднеквадратичное значение). Согласно уравнению состояния из таблиц SESAME, это соответствует температуре 0,6 эВ — режиму "плотной тёплой материи", в котором вся энергия пучка преобразуется во внутреннюю энергию вещества.

В случае объёмного энерговыделения ионного пучка, характерного для ионов с энергией $E \geq 10 \text{ МэВ/нуклон}$, удельное энерговыделение E_s является определяющей характеристикой, которая может быть измерена с хорошей точностью. И если плотность вещества ρ_0 образца в процессе нагрева остаётся неизменной, то термодинамические параметры вещества после облучения определяются величинами ρ_0 и E_s . Таким образом, любые измеряемые физические величины являются функциями характеристик такого, хорошо определённого, термодинамического состояния.

Выбор материала мишени продиктован возможностями диагностического метода, основанного на регистрации спектрального и углового распределения рентгеновских квантов, рассеянных веществом нагреваемого образца, — метода рентгеновского томсоновского рассеяния [74]. Такую рентгеновскую подсветку с временным разрешением способен обеспечить петаваттный лазер PHELIX (Petawatt High-Energy Laser for Heavy Ion Experiments), создаваемый в GSI [1, 75]. Тем не менее при энергии рентгеновских квантов в диапазоне $\approx 1–3 \text{ кэВ}$ выбор материалов конструкции мишени ограничивается элементами с малым атомным номером Z . Для проведения диагностики состояния вещества и интерпретации данных желательно иметь однородное распределение плотности по объёму образца. Наиболее простой мишенью для проведения квазиизохорического эксперимента является цилиндр из замороженного водорода радиусом $R_H \geq r_b$ (рис. 16). В случае прямоугольного распределения интенсивности по сечению пучка плотность на оси цилиндра остаётся постоянной, до тех пор пока её не достигнет волна разгрузки. Однако для реального пучка с гауссовым распределением интенсив-

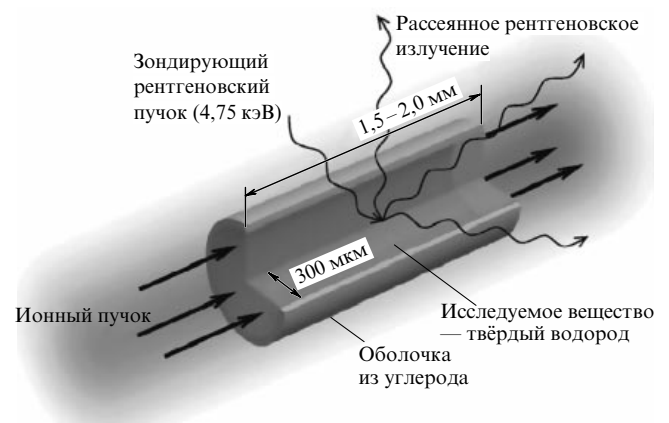


Рис. 16. WDM. Схема эксперимента по квазиизохорическому нагреву водорода [73].

ности по сечению, для которого вторая производная давления по радиусу не равна нулю, плотность начинает уменьшаться ещё до прихода волны разгрузки на ось мишени.

Подобный эффект гидродинамической разгрузки нагретой области мишени может быть компенсирован инертной оболочкой (тампером), ограничивающей замороженный водород. Для обеспечения требуемого "удержания" нагретого вещества прозрачным для рентгеновских квантов материалом с малым Z тампер также нагревается периферийной частью ионного пучка. При этом нагретый слой тампера создаёт удерживающее противодавление для основного вещества материала мишени. Очевидно, что в качестве тампера выгодно использовать материал с большой энергией сублимации для временной задержки начала процесса гидродинамического разлёта самого тампера.

Численное моделирование с помощью двумерного гидродинамического кода BIG-2 [72] показало, что плотность тампера должна быть меньше, чем у графита. Поэтому в качестве материала тампера выбран пластик плотностью $1,5 \text{ г см}^{-3}$ при нормальных условиях. Изменение плотности слоёв мишени во времени показано на рис. 17. Первоначально из-за гауссова профиля ионного пучка плотность водорода начинает уменьшаться. Давление в веществе тампера превышает давление водорода, поэтому тампер начинает двигаться внутрь, создавая слабую ударную волну. Позднее, когда плотность тампера уменьшается, давление выравнивается и граница водород–тампер останавливается. Затем возрастающее давление водорода возвращает границу в начальное состояние. Вычисления показывают, что к концу длительности ионного пучка устанавливается практически однородная плотность по радиусу мишени.

На рисунке 18 представлена эволюция средней плотности водорода по сечению мишени. Толщина тампера ΔR_c может быть оптимизирована в зависимости от того, какой результат требуется: минимизация вариаций плотности за время нагрева в пределах 10%–15% ($\Delta R_c = 50 \text{ мкм}$) или достижение плотности водорода в конце греющего импульса, равной начальной плотности $0,1 \text{ г см}^{-3}$ ($\Delta R_c = 60 \text{ мкм}$).

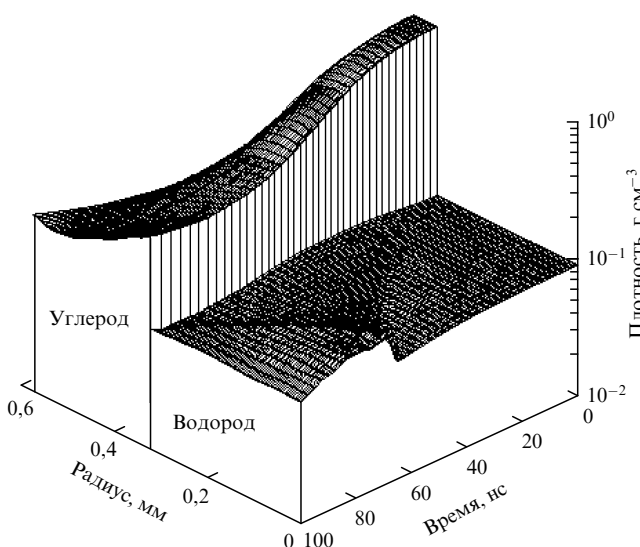


Рис. 17. Зависимость плотности слоёв мишени от времени [30].

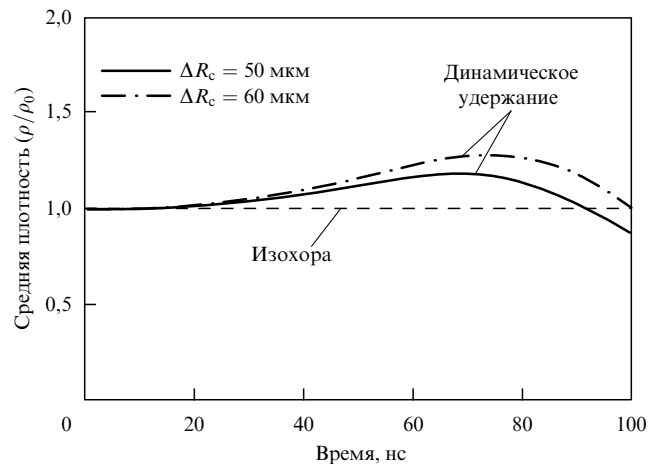


Рис. 18. Эволюция средней плотности водорода по сечению мишени [73].

Таким образом, показано, что ионный пучок при заданном наборе исходных параметров способен обеспечить квазиизохорический режим нагрева водорода с плотностью твёрдого тела при температуре 5000 °C , т.е. обеспечить динамический конфайнмент в течение 100 нс.

7. Атомная физика на релятивистских пучках высокозарядных ионов и антипротонов

В экспериментах будут реализованы практически все основные возможности FAIR — высокоинтенсивные пучки стабильных ионов в разных зарядовых состояниях в диапазоне скоростей от нуля до значения, близкого к скорости света ($v \sim 0,99 c$), а также ультрахолодные антипротоны. Кроме того, будут использоваться не только обычные мишени, но и необычные, такие как ультрахолодные электроны, атомы, молекулы или кластеры, которые могут быть подвергнуты воздействию интенсивных световых полей, производимых мощными лазерами.

Исследования по атомной физике на ускорительном комплексе FAIR концентрируются на трёх основных задачах.

1. Физика экстремально сильных электромагнитных полей, возникающих при использовании пучков накопленных ионов, является основной темой коллаборации SPARC (Stored Particle Atomic physics Research Collaboration) [76]. Планируется проведение высокоточных экспериментов с наиболее тяжёлыми релятивистскими ионами с целью детального изучения их электронной структуры и внутренней динамики электронных оболочек. Результаты этих экспериментов позволят сделать содержательный вывод о применимости фундаментальной теории взаимодействия вещества со светом в предельно сильном поле. В экспериментах первого типа будут использоваться наиболее тяжёлые релятивистские ионы для исследования взаимодействия высокоионизованных атомов с электронами и фотонами в условиях быстро изменяющегося во времени сверхсильного электромагнитного поля при больших значениях релятивистского доплеровского сдвига [76, 77]. При этом становится возможным преодоление критического значения напряжённости поля для спонтанного рождения лептонных пар (e^+e^-) (величины порядка $10^{16} \text{ В см}^{-1}$) — так

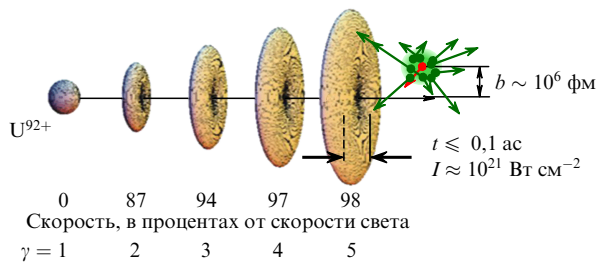


Рис. 19. Угловое распределение напряжённости радиального электрического поля точечного заряда, движущегося с релятивистскими скоростями (лоренц-фактор γ от 1 до 5 в лабораторной системе отсчёта) [76].

называемого швингерского предела [78]. В качестве иллюстрации на рис. 19 приведено угловое распределение напряжённости радиального электрического поля, создаваемого точечным зарядом, движущимся с релятивистскими скоростями [76].

Из рисунка видно, что с приближением скорости заряда к скорости света электрическое поле в направлении, перпендикулярном к траектории движения, возрастает, тогда как продольная составляющая поля уменьшается как $\sim \gamma^{-2}$. При этом время взаимодействия с атомом мишени, находящимся на расстоянии прицельного параметра $b \sim 10^6$ фм, составляет 0,1 ас (10^{-19} с). Таким образом, становится возможным измерить зависимость прицельного параметра взаимодействия как от продольной, так и от поперечной составляющих поля для ионизации внутренних оболочек атома и их возбуждения. В этих экспериментах потребуются использование высокоточных спектроскопических методов регистрации эмиссии фотонов, электронов и позитронов, которые дают необходимую информацию о механизмах возбуждения в таких сверхсильных полях.

Следует отметить, что на различных накопительных кольцах установки FAIR может быть реализовано значение лоренц-фактора γ от 1 до ~ 30 . Поэтому величина напряжённости электрического поля во взаимодействии с атомами мишени может превосходить напряжённость поля, удерживающего 1s-электрон на K-оболочке иона урана ($\sim 10^{16}$ В см $^{-1}$) [76].

2. Другой тип экспериментов коллаборации SPARC нацелен на достижение высоких степеней ионизации ионов, вплоть до получения полностью "ободранных" ядер урана, циркулирующих в синхротронном кольце SIS-100. Задачей является высокоточная проверка квантовой электродинамики в экстремально высоких электрических полях. Здесь требуется измерить поправки в тонкой структуре одно-, двух- и трёхэлектронных атомов, в особенности $1s_{1/2}$ - и $2s_{1/2}$ -состояний. Для Li-подобных тяжёлых ионов становится возможным прямое возбуждение переходов $2s-2p$ за счёт использования эффекта Доплера при направлении лазерного луча навстречу движению релятивистского пучка ионов (рис. 20) [76].

В результате лазерного возбуждения испускаемый фотон будет иметь доплеровский сдвиг (пропорциональный 2γ), что позволит провести измерения с высокой чувствительностью и надёжным подавлением рассеянных первичных фотонов. Так, энергия перехода 280 эВ в уране при $\gamma = 23$ может быть измерена с рекордно высокой точностью: $\pm 0,007$ эВ. Взаимодействие циркулирующего в кольце тяжёлоионного пучка с лазерным излучением

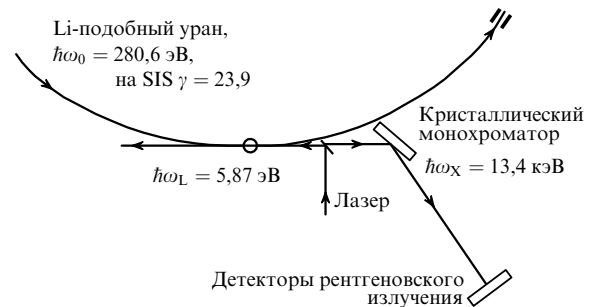


Рис. 20. Схема эксперимента по измерению сверхтонкой структуры Li-подобных тяжёлых ионов [76].

будет использоваться для эффективного охлаждения пучка, вплоть до возникновения в нём упорядоченной структуры ионов — генерации так называемых кристаллических пучков тяжёлых высокозарядных ионов [79].

Эксперименты будут проводиться на новом экспериментальном накопительном кольце NESR с использованием петаваттного лазера PHELIX и синхротронного кольца SIS-300 [75].

В отличие от типичных экспериментальных устройств в этой области физики, накопительное кольцо позволяет обеспечить высокоточный контроль ионного состава пучка, а также диагностику конечных состояний атомов и электронов на уровне единичных частиц и событий. Это означает возможность создания уникальных невозмущённых контролируемых условий, при которых в процессе взаимодействия участвуют один ион, поле лазерного излучения и один электрон. Таким образом, будут исследоваться фундаментальные квантово-электродинамические поправки к энергиям связи в атомах, магнитный момент и магнитное взаимодействие в режиме сверхвысокого поля. Исследования будут проводиться с помощью рентгеновского кристаллического спектрометра, низкотемпературного калориметра, комптоновского поляриметра, электронного спектрометра и других диагностических систем с высоким аксептансом, которые делают возможным верификацию моделей квантовой электродинамики по результатам спектроскопии последовательных атомных переходов [77, 80].

8. Исследования по атомной физике с пучками антипротонов и ионов низких энергий (FLAIR)

Темы планируемых экспериментальных исследований коллаборации FLAIR (Facility for Low-energy Antiproton and Ion Research) включают в себя изучение фундаментальных симметрий, влияния гравитации на антиматерию, взаимодействия между материей и антиматерией и физики атомов антиматерии.

В создаваемый комплекс установок FLAIR [81] входят установки нового поколения для генерации пучков ультрахолодных антипротонов, необходимых для спектроскопических исследований с наивысшим разрешением охлаждённых лазером атомов антиводорода и антигелия, захваченных в ловушки [81]. Генерируемые пучки антипротонов с эффективной интенсивностью до $\approx 10^{12}$ с $^{-1}$ позволят затормозить и захватить антипротоны в количестве, в 100 раз большем, чем получаемые в настоящее время в ЦЕРНе [82].

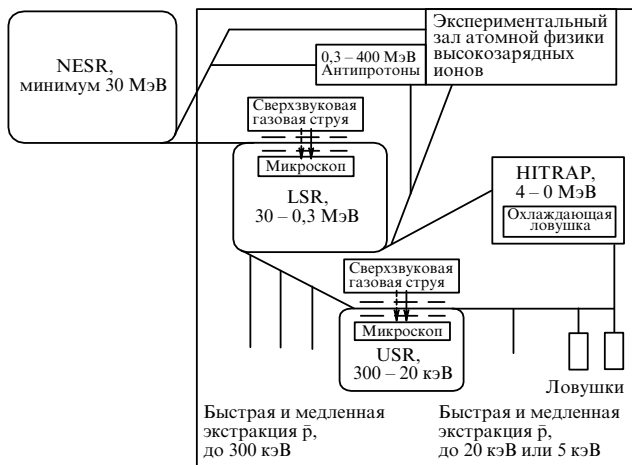


Рис. 21. Схема размещения экспериментальных установок в здании FLAIR [80].

Антипротоны, образующиеся при взаимодействии интенсивного пучка протонов (с энергией 29 ГэВ) с толстой (≈ 8 см) производящей иридиевой мишенью [83], направляются в кольцо CR (см. раздел 2), где подвергаются охлаждению при энергии 3 ГэВ. Далее интенсивность антипротонов увеличивается в кольце RESR, из которого они направляются в NESR, где они тормозятся до энергии 30 МэВ. Дальнейшее торможение антипротонов до энергий, требующихся для экспериментов (от 0 до 5 МэВ), осуществляется замедлением изначально быстрого антипротонного пучка в двух последовательных накопительных кольцах: магнитном кольце LSR (Low-Energy Storage Ring) (30 МэВ–300 кэВ) и электростатическом кольце USR (Ultra-low Energy Storage Ring) (300 кэВ–20 кэВ) [6] (рис. 21).

В кольцах LSR и USR, в которых используется электронное охлаждение для обеспечения малых значений эмиттанса ($\epsilon \approx \text{п м мрад}$, $\Delta p/p \approx 10^{-4}$), имеются внутренние газовые мишени для исследования атомных столкновений с антипротонами. Пеннинговская ловушка универсальной установки НИТРАР [84] применяется для охлаждения и торможения антипротонов вплоть до их полной остановки.

Наличие такого низкоэнергетичного пучка антипротонов открывает новые экспериментальные возможности, которые не были ещё реализованы нигде в мире. Так, сверхпрецизионная спектроскопия сверхтонкого расщепления линии 1,4 ГГц основного состояния антиводорода с относительной точностью 10^{-4} ($\Delta\nu \approx 100$ кГц) или линии 2,5 ГГц для $1s-2s$ -перехода с относительной точностью около 10^{-10} позволит достичь чувствительности, необходимой для регистрации нарушения CPT -инвариантности [85–87] и верификации результатов КЭД-вычислений [88].

Охлажденные лазером антипротоны, захваченные в ловушку, открывают доступ к экспериментальному исследованию проблемы влияния гравитации на антиматерию — ранее это было затруднено, поскольку гравитационные эффекты перекрывались на много порядков более сильным электромагнитным взаимодействием. Для этих целей предполагается проведение соответствующих экспериментов с высокой чувствительностью на охлажденных нейтральных атомах антиводорода [89].

Столкновительные эксперименты с антипротонами и антигелием позволят впервые полностью реконструировать столкновительные процессы. Благодаря наличию непрерывно выводимого пучка станут возможными измерения рентгеновских спектров антипротонных атомов и изучение ядро-антиядерного рассеяния, например на таких больших системах антиматерии, как положительно заряженный атом антиводорода \bar{H}^+ (один антипротон и два позитрона). Кроме того, комбинация в одной установке нестабильных ядер и антипротонов в качестве пробных частиц открывает новую возможность изучения структуры экзотических ядер.

9. Радиационное материаловедение и биофизика (BIOMAT)

Пучки тяжёлых ионов ускорительного комплекса FAIR с энергиями более чем 10 ГэВ/нуклон представляют большой интерес для изучения радиационного воздействия галактических и солнечных частиц как на живые биологические объекты, так и на различные материалы. Область практического применения включает в себя радиационное материаловедение, в частности контроль радиационной стойкости элементной базы микроэлектроники, ядерную медицину (имитация воздействия космического излучения тяжёлых заряженных частиц на живые клетки) и др. При этом особую роль при постановке и проведении экспериментов играет свойство быстрых ионов проникать на контролируемую глубину внутрь образцов.

9.1. Биофизические эксперименты

Подробные сведения о радиологическом воздействии быстрых тяжёлых заряженных частиц на живые организмы необходимы для снижения до минимально необходимого уровня толщины дорогостоящей радиобиологической защиты на космических кораблях межпланетных миссий [90, 91]. Кроме того, создаваемая установка по облучению образцов важна для тестирования и калибровки различных приборов и оборудования, используемых в космосе.

Космическое излучение солнечного и галактического происхождения представляет наибольшую опасность при исследованиях межпланетного пространства и в ходе обитаемых межпланетных миссий, поскольку персонал и аппаратура находятся вне защитного воздействия магнитного поля Земли [91, 92]. Генетические изменения и онкологические эффекты могут возникать уже при низких уровнях облучения. Однако в случае вспышек на Солнце и выброса массы солнечной короной летальная доза может быть набрана менее чем за 30 мин. В то время как солнечное излучение состоит в основном из протонов и ядер гелия, галактическое излучение имеет в своём составе и более тяжёлые частицы, вплоть до железа. При этом, поскольку радиационное воздействие определяется тормозными потерями частиц, которые в соответствии с формулой Бете–Блоха пропорциональны квадрату заряда частицы [1, 93], коэффициент риска возникновения онкологических заболеваний (рис. 22) [90] при облучении релятивистскими ионами железа на три порядка больше, чем при облучении протонами.

Как для живых организмов, так и для электронных приборов основным фактором является доза. Доза обычно определяется макроскопически как энергия,

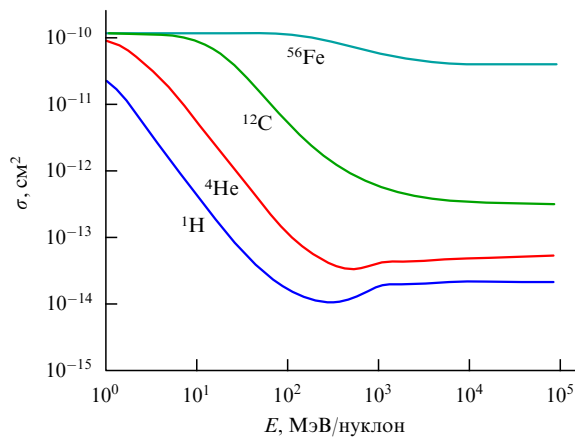


Рис. 22. Расчётный коэффициент риска возникновения злокачественных изменений в клетках молочной железы при долгосрочном воздействии тяжёлых заряженных частиц [90].

поглощённая единицей массы ($1 \text{ Дж кг}^{-1} = 1 \text{ грей (Гр)}$), однако более важным является локальное распределение дозы вдоль индивидуального трека частицы [94], которое достигает многих килогрэй в центре трека. Именно такой непропорционально большой отклик наблюдается во многих биологических системах при сравнительно низких макробиологических дозах. Это явление роста радиобиологической эффективности (РБЭ) [95, 96] связывают со множественными повреждениями обеих нитей дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК) в окрестности трека тяжёлой заряженной частицы. РБЭ и явление фрагментации тяжёлой релятивистской частицы при торможении обуславливают усиленную трансформацию клеток при облучении ионами железа, несмотря на низкую интенсивность по сравнению с интенсивностью пучка протонов.

Особое внимание в предстоящих на FAIR экспериментах будет уделяться влиянию фрагментации релятивистских ядер и образующегося ливня вторичных низкоэнергетических частиц с высоким РБЭ на живые объекты. Поскольку вторичные частицы коррелированы в пространстве и во времени, предполагается исследование радиобиологического воздействия не только на генетическом молекулярном уровне, но и на уровне клеток живых тканей [97].

9.2. Материаловедческие эксперименты

Эксперименты на ускорителе FAIR по имитации воздействия тяжёлой компоненты галактического космического излучения на материалы преследуют две основные цели:

а) калибровка детектирующей аппаратуры космических аппаратов, применяемой для регистрации космических частиц высоких энергий ($> 1 \text{ ГэВ/нуклон}$), с высоким разрешением по массам и зарядам частиц;

б) исследование радиационных эффектов в электронных компонентах, используемых в аппаратуре космических спутников, — от отдельных чипов и до микропроцессоров [98]. Такие эффекты приводят к единичным отказам, возникновению деструктивных операционных ошибок или блокированию критических функций бортовой электроники.

Тяжёлые ионы, полученные на SIS-100, будут использоваться в многоцелевой установке BIOMAT, оборудо-

ванной системой растрового сканирования [99], которая обеспечит превосходное качество пучка при равномерном облучении большой площади поля в широком диапазоне плотности потока частиц с различной атомной массой. Для позиционирования образцов будет использоваться специальный робот [4].

Для биофизических и материаловедческих исследований потребуется широкий набор ионных пучков, от протоновых до урановых. Максимальные требуемые интенсивности пучков при энергии 10 ГэВ/нуклон в диапазоне масс ионов от протона ($5 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$) до железа ($1 \times 10^8 \text{ см}^{-2}$) соответствуют дозе 10 Гр , однородно поглощённой за 1 мин мишенью площадью 100 см^2 . При такой мощности дозы могут быть достигнуты приемлемые времена облучения, что очень важно для облучения чувствительных биологических образцов (т.е. клеточных культур), которые должны находиться в питательной среде. Максимальные интенсивности пучков более тяжёлых ионов, от криптоновых до урановых ($1 \times 10^8 \text{ см}^{-2}$), определяются требуемыми для материаловедческих исследований потоками в сочетании с разумными временами экспозиции.

Ионопровод пучка ионов высоких энергий и экспериментальную площадку коллаборация BIOMAT будет использовать совместно с коллаборацией SPARC. В коллаборации принимают участие 14 исследовательских групп.

9.3. Исследования модификации материалов с помощью пучков релятивистских тяжёлых ионов

Тяжёлые ионы высоких энергий, проходящие через твёрдое вещество, индуцируют сверхвысокие электрические поля (порядка 10^{12} В м^{-1}) за короткие ($\sim 10^{-18} \text{ с}$) промежутки времени, которые воздействуют на атомы и электроны в окрестности траектории движения, преобразуя кинетическую энергию быстрой частицы во внутреннюю энергию вещества. Энергетические потери возбуждают сложные процессы, такие как генерация быстрых электронов, сопровождающаяся кулоновским расталкиванием ионизированных атомов, эмиссия рентгеновских квантов и оже-электронов, электрон-фононное взаимодействие и др. [100–102]. Как результат, быстрая частица может образовывать длинные цилиндрические зоны с радиусом в несколько нанометров, в которых свойства вещества существенно отличаются от его исходных свойств. В качестве примера можно привести переход из кристаллического состояния в аморфное или образование метастабильных высокотемпературных фаз высокого давления [101, 102].

Для объяснения механизмов образования трека наиболее важным является изучение переходных процессов, вызванных прохождением быстрой частицы через вещество (рис. 23) [103].

Так, электронные процессы доминируют при эволюции трека на временном интервале от $\sim 10^{-18} \text{ с}$ до $\sim 10^{-13} \text{ с}$. Диагностика процесса разрушения с высоким разрешением (на уровне 10^{-14} с) может быть обеспечена посредством регистрации конвойных электронов и оже-электронов или с помощью рентгеновских методов [2, 3]. Однако полная картина механизмов формирования трека в результате смещения атомов из-за возбуждения электронами включает в себя более медленные процессы ($\sim 10^{-13} - 10^{-12} \text{ с}$), связанные с прохождением ударной волны и релаксацией решётки [104, 105].

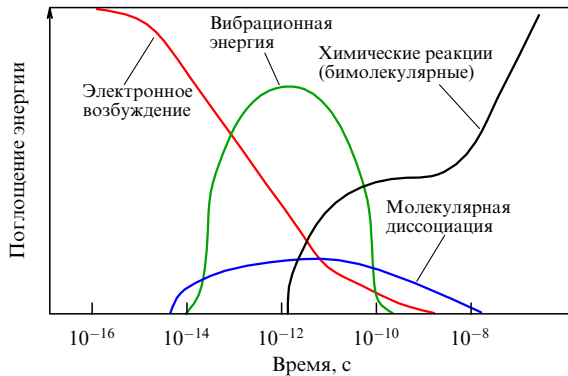


Рис. 23. Временная диаграмма диссипации энергии в полимерном образце после прохождения быстрой частицы [103].

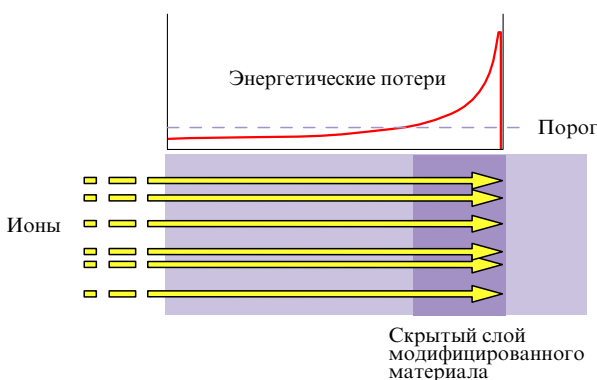


Рис. 24. Модификация материала в области пика Брэгга в предварительно сжатом образце [103].

Наиболее важной количественной характеристикой при описании торможения быстрой частицы в твёрдом веществе является тормозная способность dE/dx (потери энергии на единице длины пробега). Для нерелятивистских ионов ($E_i < 1$ ГэВ/нуклон) механизмы торможения подробно изучены теоретически и экспериментально [106, 107]. Однако для релятивистских ионов с энергией $E_i > 2$ ГэВ/нуклон экспериментальных данных по тормозной способности чрезвычайно мало.

Одна из экспериментальных материаловедческих задач на установке FAIR — это изучение модификации предварительно сжатых до давлений 25 ГПа твёрдых веществ, в объёме которых тормозится интенсивный пучок тяжёлых ионов. Идея эксперимента заключается в изучении фазовых изменений вещества, сжатого с помощью алмазных наковален, в окрестности пика Брэгга, где тормозная способность наиболее высока [106, 107] (рис. 24).

Тяжёлые ионы выделяют энергию в течение короткого промежутка времени в малом объёме, обеспечивая пороговое изменение структуры твёрдого вещества, находившегося в подпороговом состоянии в результате предварительного сжатия. Кроме того, ионный пучок вызывает генерацию акустических волн в образце, которые также влияют на процессы фазовых переходов. Таким образом, комбинация высокого давления и быстрого энерговыделения ионного пучка в локальной области откроет новые возможности в генерации таких фазовых превращений, которые не могут произойти при приложении только одного давления. В исследованиях предполагается применить ряд перспектив-

ных диагностических методов, включая дифракцию рентгеновских квантов и нейтронов, спектроскопию комбинационного рассеяния, а также резонансные измерения спина мюонов [108].

10. Заключение

Проект FAIR представляет значительный научный и практический интерес для российского научного сообщества, открывая возможности получения новых фундаментальных знаний о структуре и свойствах материи, подготовки кадров молодых учёных, инженеров, а также развития информационных технологий. Эксперименты на FAIR позволят сделать новый шаг в изучении структуры ядра благодаря использованию пучков стабильных ионов, а также пучков короткоживущих (радиоактивных) ядер, далёких от состояния стабильности.

Сочетание высокой интенсивности и высокой фазовой плотности пучков тяжёлых ионов предоставит возможность исследовать деконфайнмент кварков и свойства кварк-глюонной плазмы в новых, ранее недоступных областях фазовой диаграммы ядерной материи.

Использование интенсивных антипротонных пучков даст новый импульс исследованиям структуры адронов и сильных взаимодействий в рамках квантовой хромодинамики.

Уникальная комбинация интенсивных импульсных пучков тяжёлых ионов с излучением петаваттного лазера позволит проводить эксперименты по физике сверхплотной неидеальной электромагнитной плазмы в областях фазовой диаграммы экстремального состояния вещества, труднодоступных для других экспериментальных методик.

Атомная физика, квантовая электродинамика при сверхсильных электромагнитных полях, а также прикладные исследования по радиационному материаловедению, медицине и биологии получат дальнейшее развитие на установках FAIR при использовании пучков тяжёлых ионов высокой зарядности и пучков антипротонов.

Уже в стартовой версии проекта [109] исследования будут проводиться на уникальном исследовательском комплексе, не имеющем аналогов.

В ходе участия России в проекте FAIR основные средства будут вложены в развитие вовлечённых в проект институтов, а также предприятий, выпускающих высокотехнологичную наукоёмкую продукцию. В процессе сооружения ускорительного комплекса российские научные организации и промышленные предприятия получат заказы на разработку и изготовление высокотехнологичных компонентов экспериментальных детекторов и элементов ускорителя, а также получат доступ к зарубежным высоким технологиям.

Авторы выражают благодарность А.Н. Скринскому, Р. Боку, П. Зенгеру, И.Н. Мешкову, Х. Гутброду, О.О. Патаракину за полезные обсуждения, а также В.Л. Варенцову за высокопрофессиональную экспертизу, содержательные дискуссии и помощь при подборе и подготовке материалов к публикации.

Список литературы

1. Фортвов В Е, Хоффманн Д, Шарков Б Ю *УФН* **178** 113 (2008) [Fortov V E, Hoffmann D N H, Sharkov B Yu *Phys. Usp.* **51** 109 (2008)]

2. Фортвов В Е *Экстремальные состояния вещества на Земле и в космосе* (М.: Физматлит, 2008) [Fortov V E *Extreme States of Matter on Earth and in the Cosmos* (Berlin: Springer, 2011)]
3. ESFRI, the European Strategy Forum on Research Infrastructures, http://ec.europa.eu/research/infrastructures/index_en.cfm?pg=esfri
4. Gutbrod H H (Ed.-in-Chief) FAIR Baseline Technical Report (Darmstadt: GSI, 2006)
5. Пархомчук В В, Скринский А Н *УФН* **170** 473 (2000) [Parkhomchuk V V, Skrinskii A N *Phys. Usp.* **51** 433 (2000)]
6. Van der Meer S, Preprint CERN/ISR PO 72-31 (Geneva: CERN, 1972)
7. Mohl D, CAS-87, CERN 87-03 (1987)
8. Golovkov M S et al. *Phys. Lett. B* **672** 22 (2009)
9. Neidherr D et al. *Phys. Rev. Lett.* **102** 112501 (2009)
10. Sun B et al. *Int. J. Mod. Phys. E* **18** 346 (2009)
11. Nörtershäuser W et al. *Phys. Rev. Lett.* **102** 062503 (2009)
12. Nakamura T et al. *Phys. Rev. A* **74** 052503 (2006)
13. Rubio B, Nilsson T *Nucl. Phys. News* **16** (1) 9 (2006)
14. Tanihata I et al. *Phys. Rev. Lett.* **55** 2676 (1985)
15. Orr N A et al. *Phys. Rev. C* **51** 3116 (1995)
16. Yamazaki T et al. *Z. Phys. A* **355** 219 (1996)
17. Rudolph D et al. *Phys. Rev. C* **78** 021301(R) (2008)
18. Regan P H et al. *Nucl. Phys. A* **787** 491 (2007)
19. Tomaselli M et al. *Hyperfine Interact.* **171** 243 (2006)
20. Nakamura T et al. *Phys. Rev. A* **74** 052503 (2006)
21. Gutbrod H H et al. (Eds) "An international accelerator facility for beams of ions and antiprotons", Conceptual Design Report (Darmstadt: GSI, 2001) p. 12; <http://www.fair-center.eu/fair-users/publications/fair-publications.html>
22. Pfeiffer B et al. *Nucl. Phys. A* **693** 282 (2001)
23. Kratz K-L et al. *Hyperfine Interact.* **129** 185 (2000)
24. Winkler M et al. *Eur. Phys. J.* **150** 263 (2007)
25. Scheidenberger C et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **204** 119 (2003)
26. Herfurth F *Int. J. Mod. Phys. E* **18** 392 (2009)
27. Schwarz S et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **204** 507 (2003)
28. Neumayr J B et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **244** 489 (2006)
29. Radon T et al. *Phys. Rev. Lett.* **78** 4701 (1997)
30. Litvinov Yu A et al. *Nucl. Phys. A* **756** 3 (2005)
31. York R C *Physica C* **441** 31 (2006)
32. Kester O et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **204** 20 (2003)
33. Mittag W, Villari A C C *Eur. Phys. J. A* **25** (Suppl. 1) 737 (2003); in *4th Intern. Conf. on Exotic Nuclei and Atomic Masses, ENAM'04, Pine Mountain, Georgia, September 2004*
34. Loiselet M et al., in *Cyclotrons and their Applications: 14th Intern. Conf., Cape Town, South Africa, 8–13 October 1995* (Ed. J C Cornell) (Singapore: World Scientific, 1996) p. 629
35. Habs D et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **204** 739 (2003)
36. Hofmann S, Münzenberg G *Rev. Mod. Phys.* **72** 733 (2000)
37. Goto A, Yano Y, Katayama T *J. Phys. G Nucl. Part. Phys.* **24** 1341 (1998)
38. Report of the NSAC Subcommittee on Comparison of the Rare Isotope Accelerator (RIA) and the Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) Future Facility, 2004, http://science.energy.gov/~media/np/nsac/pdf/docs/ria_gsi_nsac_022604.pdf
39. FAIR — Baseline Technical Report, Vol. 3A. Experiment Proposals on QCD Physics. 3.1 CBM (2006) p. 1; http://www.fair-center.eu/fileadmin/fair/publications_FAIR/FAIR_BTR_3a.pdf
40. Senger P "Status of the CBM experiment at FAIR", in CBM Progress Report 2009 (Eds F J Müller, V Friese) (Darmstadt: GSI, 2010) p. 1; <http://www.gsi.de/documents/DOC-2010-Apr-17-1.pdf>
41. Дремин И М *УФН* **179** 571 (2009) [Dremim I M *Phys. Usp.* **52** 541 (2009)]
42. Friman B L, Hohne C, Rapp R (Eds) *Strongly Interacting Matter: The CBM Physics Book* (Lecture Notes in Physics, Vol. 814) (New York: Springer, 2010)
43. Detector CBM, <http://www.gsi.de/fair/experiments/CBM/detector.html>
44. Atoyán G S et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **320** 144 (1992)
45. Бумажнов В А и др. *ПТЭ* (4) 77 (1999) [Bumazhnov V A et al. *Instrum. Exp. Tech.* **42** 505 (1992)]
46. Föhl F *Eur. Phys. J.* **162** 213 (2008)
47. Bartoszek L et al. "Proposal 986: Medium-energy antiproton physics with The Antiproton Annihilation Spectrometer (TAPAS*) at Fermilab", http://www.fnal.gov/directorate/program_planning/Nov2010PACPublic/986_TAPAS_Proposal_2010_11_10.pdf
48. Ekström C "Internal targets", CERN Report 92-01 (Geneva: CERN, 1992) p. 120
49. Reich H et al. *Nucl. Phys. A* **626** 417 (1997)
50. Trostell B *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **362** 41 (1995)
51. Aleksan R et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **397** 261 (1997)
52. Novotny R et al. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **47** 1499 (2000)
53. CMS Technical Proposal, CERN/LHCC 94-38, LHCC/P1 (1994)
54. Chiang I H et al. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **42** 394 (1995)
55. PANDA Collab. "Strong interaction studies with antiprotons", Technical Progress Report for: PANDA (2005)
56. Hoffmann D H H et al. *Phys. Plasmas* **9** 3651 (2002)
57. Коробенко В Н, Рахель А Д, Савватимский А И, Фортвов В Е *Физика плазмы* **28** 1093 (2002)
58. Зельдович Я Б, Райзер Ю П *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений* (М.: Наука, 1966) [Zel'dovich Ya B, Raizer Yu P *Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena* (Mineola, NY: Dover Publ., 2002)]
59. DaSilva L B et al. *Phys. Rev. Lett.* **81** 224 (1998)
60. Batani D et al. *Europhys. News* **27** 210 (1996)
61. Batani D et al. *Phys. Rev. Lett.* **88** 235502 (2002)
62. Кошкарев Д Г, Чуразов М Д *Атомная энергия* **91** (1) 47 (2001) [Koshkarev D G, Churazov M D *Atom. Energy* **91** 564 (2001)]
63. Tahir N A et al. *Phys. Rev. E* **63** 016402 (2001)
64. Piriz A R, Tahir N A, Hoffmann D H H, Temporal M *Phys. Rev. E* **67** 017501 (2003)
65. Basko M M et al. *Laser Part. Beams* **20** 411 (2002)
66. Basko M *Phys. Plasmas* **7** 4579 (2000)
67. Kazarin A et al., GSI-2001-4 Annual Report (2000) p. 48
68. Basko M, Kemp A, Meyer-ter-Vehn J *Nuclear Fusion* **40** 59 (2000)
69. Churazov M D, Sharkov B Yu *Nuovo Cimento A* **106** 1945 (1993)
70. Tahir N A et al. *Contrib. Plasma Phys.* **41** 287 (2001)
71. Tahir N A et al. *Contrib. Plasma Phys.* **43** 373 (2003)
72. Fortov V et al. *Nucl. Sci. Eng.* **123** 169 (1996)
73. Kozyreva A et al., GSI-2003-2 Annual Report (2003) p. 27
74. Gregori G et al. *Phys. Rev. E* **67** 026412 (2003)
75. Kuehl Th et al. *Hyperfine Interact.* **162** 55 (2006)
76. Stöhlker Th et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **205** 156 (2003)
77. The SPARC Collab. "Technical report for the design, construction, commissioning and operation of the SPARC Project: Stored Particle Atomic Physics Collaboration at the FAIR Facility", http://www-linux.gsi.de/~sparc/documents/pdf_files/06_01_06_SPARC_TR.pdf
78. Schwinger J *Phys. Rev.* **82** 664 (1951)
79. Maletic D M, Ruggiero A G (Eds) *Crystalline Beams and Related Issues. Proc. of the 31st Workshop, Erice, Sicily, Italy, Nov. 1995* (Singapore: World Scientific, 1996)
80. Schuch R, Stöhlker T (for the SPARC-Collab.) "Stored Particle Atomic Physics Research Collaboration: Atomic Physics with Stored Highly-Charged Heavy Ions at the Future FAIR Facility", http://www-linux.gsi.de/~sparc/documents/pdf_files/sparc_stori05.pdf
81. Welsch C P, Grieser M, Ullrich J, Wolf A (for the FLAIR Collab.), FLAIR Project at GSI, International Workshop on Beam Cooling and Related Topics, COOL05, Galena, IL, USA (2005), http://www.oaw.ac.at/smi/flair/pub/Cool05_FLAIR.pdf
82. Maury S, "The Antiproton Decelerator (AD)", CERN/PS 99-50 (HP)
83. FAIR Baseline Technical Report, Vol. 2. Accelerator Facilities (2006) p. 471
84. The HITRAP decelerator and trap facility, http://www.gsi.de/forschung/ap/projects/hitrap/index_e.html
85. Widmann E *Nucl. Phys. A* **752** 87 (2005)
86. Ellis J R et al. *Phys. Rev. D* **53** 3846 (1996)
87. Cellady D, Kostecky A *Phys. Rev. D* **55** 6760 (1997)
88. Bluhm R, Kostecky V A, Russel N *Phys. Rev. D* **57** 3932 (1998)
89. Walz J, Haensch T W *Gen. Relat. Grav.* **36** 561 (2004)

90. Weyrather W K *Int. J. Radiat. Biol.* **75** 1357 (1999)
91. Durante M, Cucinotta F A *Nature Rev. Cancer* **8** 465 (2008)
92. Curtis S B et al. *Adv. Space Res.* **22** (2) 197 (1998)
93. Bethe H A *Handbuch für Physik* Vol. 24/2 (Berlin: Springer-Verlag, 1933)
94. Curtis S B *Radiat. Measurements* **23** (1) 5 (1994)
95. Kraft M *Nucl. Sci. Appl.* **3** 1 (1987)
96. Kraemer M et al. *Rad. Environ. Biophys.* **33** 91 (1994)
97. Durante M J. *Radiat. Res.* (Tokyo) **50** (Suppl. A) A55-8 (2009)
98. Holmes-Siedle A, Adams L *Handbook of Radiation Effects* (Oxford: Oxford Univ. Press, 2002)
99. Haberer Th et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **330** 296 (1993)
100. Marletta G, Bouffard S, Neumann R (Eds) *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **209** 1 (2003)
101. Schwietz G et al. *Phys. Rev. Lett.* **69** 628 (1992)
102. Xiao G et al. *Phys. Rev. Lett.* **79** 1821 (1997)
103. BIOMATCollab: "Letter of Intent for Materials Research with Relativistic Heavy Ion Beams", http://www.gsi.de/fair/experiments/biomat/BIOMAT_LOI_Mat.pdf
104. Kumbara T et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **164–165** 415 (2000)
105. Kumbara T et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **193** 371 (2002)
106. Geissel G, Scheidenberger C *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **136–138** 114 (1998)
107. Scheidenberger C, Geissel G *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **135** 25 (1998)
108. Stämmler Th et al. *Hyperfine Interact.* **106** 307 (1997)
109. Sturm C, Sharkov B, Stocker H *Nucl. Phys. A* **834** 682c (2010)

European Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR): a new international center for fundamental physics and its research program

V.E. Fortov

Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences,
ul. Izhorskaya 13, 125412 Moscow, Russian Federation
E-mail: fortov@ras.ru

B.Yu. Sharkov

Russian Federation State Scientific Center "A.I. Alikhanov Institute for Theoretical and Experimental Physics",
ul. Bol'shaya Cheremushkinskaya 25, 117218 Moscow, Russian Federation
E-mail: boris.sharkov@itep.ru

H. Stöcker

GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH,
Plankstr 1, 64291 Darmstadt, Germany

The Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR) accelerator center at Darmstadt, Germany, will provide the international scientific community with unique experimental opportunities of a scope and scale out of reach for any other large-scale facility in the world. With its staff of over 2500, it is expected to fundamentally expand our knowledge of hadron, nuclear and atomic physics and their application to cosmology, astrophysics and technology. In this review, the design details of the accelerator complex are discussed and the experimental research program for FAIR is presented. Particular attention is paid to experiments on extreme state of matter arising from the isochoric heating of a material by heavy ion beams. One of the largest in the world, FAIR is a part of the strategic development roadmap for the European Strategic Forum for Research Infrastructures (ESFRI).

PACS numbers: 12.38.Mn, **25.43.+t**, **29.20.-c**, 52.25.Kn, **87.53.-j**

DOI: 10.3367/UFNr.0182.201206c.0621

Bibliography — 109 references

Received 11 May 2011, revised 20 December 2011

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **182** (6) 621–644 (2012)

Physics–Uspekhi **55** (6) (2012)