

СТАТЬИ

УДК 531.76

ЦЕНТР ИОННЫХ И АНТИПРОТОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ FAIR В ЕВРОПЕ — НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОЙ ЯДЕРНОЙ НАУКИ И ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Шарков Б.Ю. (ГНЦ ИТЭФ, г. Москва)

Сооружаемый в Дармштадте (Германия) Центр ионных и антипротонных исследований (FAIR) представляет собой новый исследовательский комплекс на базе многоцелевого ускорителя с параметрами пучков антипротонов и радиоактивных ядер, не имеющими аналогов в мире и открывающими уникальные возможности для проведения научных исследований по актуальным направлениям современной науки и инновационных технологий в Европе. Ультрасовременный ускорительный комплекс предоставит высокоэнергетичные, прецизионно настроенные пучки антипротонов и различных ионов с уникальным качеством (яркость, фазовая плотность) и интенсивностью [1, 2]. Особенностью создаваемого комплекса является наличие высокоинтенсивных первичных и вторичных пучков стабильных и радиоактивных ядер, а также пучков антипротонов, по интенсивности превышающих существующие в настоящее время в мире пучки в 100—10 000 раз.

Цели научной программы на ускорительном комплексе состоят в проведении исследований по следующим направлениям:

структура ядра и ядерная астрофизика с использованием пучков стабильных ионов, а также пучков короткоживущих (радиоактивных) ядер, далеких от границы стабильности;

структура адронов, теория сильных взаимодействий в рамках квантовой хромодинамики, в основном, с использованием пучков антипротонов;

фазовая диаграмма ядерной материи и кварк-глюонная плазма с использованием пучков тяжелых ионов высоких энергий;

физика сверхплотной плазмы с использованием интенсивных импульсов пучков тяжелых

ионов в уникальной комбинации с петаваттным лазером;

атомная физика, квантовая электродинамика и сверхсильные электромагнитные поля с использованием пучков тяжелых ионов высокой зарядности и антипротонов;

научно-технологические разработки на пучках ионов для материаловедения, медицины и биологии.

Эксперименты, которые будут выполняться на ускорительном комплексе FAIR, потребовали значительных технологических инноваций:

новые конструкции сверхпроводящих магнитов для получения пучков частиц максимально возможной интенсивности;

оригинальные методы управления энергией и геометрией пучков;

большие детекторы, способные отслеживать траектории множества рождающихся в экспериментах частиц;

чрезвычайно высокие потоки поступающих с детекторов данных, требующие новых аппаратных и программных решений, таких, как GRID-технологии, для их обработки, доступа к ним и сохранения результатов.

Проект FAIR является международным и входит в число базовых проектов Европейского форума исследовательской инфраструктуры (ESFRI) [3]. В нем принимают участие 16 стран: Австрия, Великобритания, Германия, Греция, Индия, Испания, Италия, Китай, Польша, Россия, Румыния, Словакия, Словения, Финляндия, Франция и Швеция. Страны намерены вносить вклады в виде поставок высокотехнологического оборудования и компонентов экспериментальных установок, а также денежных взносов. Полная стоимость проекта, включая сооруже-

ние, содержание и эксплуатацию комплекса до 2025 г., составит около 3 млрд евро. Стоимость создания стартовой фазы ускорительного центра и его базовых исследовательских установок превышает 1,5 млрд евро. Срок сооружения определен в 8 лет — 2011—2018 гг. При этом научные исследования на некоторых подсистемах ускорительного комплекса предполагается начать уже в 2016 г.

Около 3000 исследователей со всего мира будут выполнять эксперименты на ускорительном комплексе FAIR, изучая фундаментальные свойства и структуру материи, эволюцию Вселенной с момента зарождения. В настоящее время созданы 14 крупных международных научных сообществ, которые сгруппированы в четыре тематических направления исследований: структура ядра и ядерная астрофизика NuSTAR, антипротонная программа PANDA, физика плотной барионной материи CBM, атомная физика, физика сверхплотной плазмы, а также прикладные исследования по материаловедению и биологии APRA.

Ускорительный комплекс. Разработка концепции многоцелевой установки нового поколения с новыми требованиями к качественным показателям и интенсивности пучков ионов и антипротонов началась в 2002 г. в научном центре GSI (Общество тяжелоионных исследований) в Дармштадте [1]. В 2006 г. международное научное сообщество — 2500 ученых и инженеров из 44 стран составило базовый технический отчет FAIR [4], детализирующий инженерную схему, компоненты системы ускорителей и типы предполагаемых экспериментов. Главной особенностью FAIR является сложная и

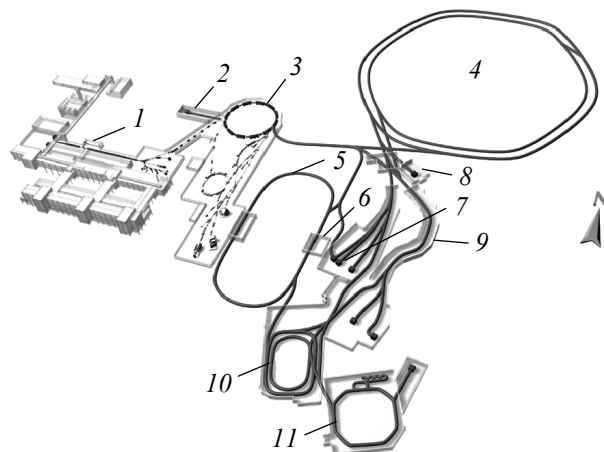


Схема ускорительного комплекса FAIR: 1 — линейный ускоритель тяжелых ионов Унилак; 2 — линейный ускоритель протонов; 3 — синхротрон SIS18; 4 — синхротроны SIS100 и SIS300; 5 — накопительное кольцо HESR; 6 — эксперимент PANDA; 7 — эксперимент APRA; 8 — эксперимент CBM; 9 — суперсепаратор ядерных фрагментов; 10 — накопительные кольца CR и RESR; 11 — накопительное кольцо NESR

экономически эффективная компоновка ускорительных систем, которая нацелена на получение пучков частиц в беспрецедентно широком диапазоне параметров. При этом важнейшей особенностью ускорительного комплекса будет одновременное параллельное проведение до пяти различных исследовательских программ. В целом комплекс будет работать для разных экспериментов так, как если бы он был предназначен для каждого эксперимента в отдельности.

Общий вид ускорительного комплекса FAIR показан на рисунке, его основные параметры приведены в таблице. Имеющиеся в Дармштадте ускорители Унилак и SIS18 после модернизации будут служить инжектором для нового ускорительного комплекса FAIR.

Основные параметры синхротронов и накопительных колец

Кольцо	Периметр кольца, м	Магнитная жесткость, Тл·м	Энергия пучка на нуклон
Синхротрон SIS100	1084	100	2,7 ГэВ $^{238}\text{U}^{28+}$ 27 ГэВ протоны
Синхротрон SIS300	1084	300	34 ГэВ $^{238}\text{U}^{92+}$
Коллекторное кольцо CR	211	13	0,74 ГэВ $^{238}\text{U}^{92+}$ 3 ГэВ антипротоны
Рециркуляционное экспериментальное накопительное кольцо RESR	245	13	0,74 ГэВ $^{238}\text{U}^{92+}$ 3 ГэВ антипротоны
Новое экспериментальное накопительное кольцо NESR	222	13	0,74 ГэВ $^{238}\text{U}^{92+}$ 3 ГэВ антипротоны
Накопительное кольцо высокой энергии HESR	574	50	14 ГэВ антипротоны

Комплекс FAIR состоит из связанных между собой систем для ускорения и накопления пучков частиц высокого качества, а также получения вторичных частиц, рождающихся при бомбардировке мишеней первичными пучками. Протонные и ионные пучки высокой энергии будут использоваться для создания вторичных пучков антипротонов, а также стабильных и нестабильных (радиоактивных) ядер. Вторичные пучки могут использоваться как непосредственно, так и быть направлены в сложную систему накопительных колец, где формируются требуемые для проведения экспериментов параметры.

Основой FAIR являются два ускорительных синхротронных кольца SIS100 и SIS300 периметром 1100 м каждое и магнитной жесткостью 100 и 300 Тл·м соответственно, расположенных одно над другим в подземном туннеле и предназначенных для ускорения ионов — от ионов водорода (протоны) до ионов урана. Действующие ускорители Унилак и SIS18 будут предварительно ускорять ионы перед их инжекцией в новое кольцо SIS100, которое будет генерировать интенсивные импульсные ионные пучки в целях их последующей конверсии во вторичные пучки ядер редких элементов или для конверсии протонных пучков в антипротоны. Синхротронное кольцо будет состоять из сверхпроводящих магнитных элементов, обеспечивающих поле до 2 Тл со скоростью нарастания до 4 Тл/с. Проектная интенсивность составит $5 \cdot 10^{11}$ ионов урана U^{28+} в импульсе при энергии на нуклон 1 ГэВ и $4 \cdot 10^{13}$ протонов при энергии 29 ГэВ. Для инжекции высокоинтенсивных протонных пучков будет построен новый линейный ускоритель протонов (*p*-Унилак) на энергию 70 МэВ.

И ионные, и протонные пучки будут подвергаться компрессии по длительности импульса для генерации, накопления и последующего охлаждения экзотических ядер и антипротонов с длительностью импульса 60 и 25 нс соответственно. Короткие интенсивные импульсы тяжелых ионов необходимы также в экспериментах по физике плазмы. Возможен режим с непрерывным пучком средней интенсивностью $\sim 3 \cdot 10^{11}$ ионов в 1 с и энергией на нуклон 1 ГэВ при экстракции либо непосредственно из кольца SIS100, либо при переводе и медленном выводе из кольца SIS300.

Ускоренные ядра урана инжектируются в кольцо SIS300 со сверхпроводящими быстроциклирующими магнитными элементами, обеспечивающими поле до 6 Тл и скорость его нарастания 1 Тл/с. Максимальная энергия ионов Ne^{10+} достигает 45 ГэВ на нуклон, для полностью ионизованных ионов урана U^{92+} она составит 34 ГэВ на нуклон. Медленный вывод пучков интенсивностью до 10^{10} частиц в 1 с с периодом экстракции 10—100 нс необходим для экспериментов по генерации сверхплотной ядерной материи при столкновении тяжелых ядер.

Ускорители SIS100, SIS300 связаны линиями транспортировки со сложной системой последующих колец. Введенные в эти кольца пучки накапливаются, охлаждаются и подготавливаются для конкретных экспериментов. Многофункциональность ускорительного комплекса FAIR будет достигаться с помощью согласованного управления пучками как в обоих синхротронах, так и в смежных накопительных и ускорительных кольцах. Таким образом, каждый из пяти параллельных экспериментов сможет полностью использовать максимально доступную интенсивность пучков.

Для прецизионных физических экспериментов необходимо, чтобы вторичные пучки имели определенную энергию и чтобы все частицы пучка двигались в одном направлении с одинаковой скоростью (минимальный продольный фазовый объем). Это достигается за счет использования систем охлаждения пучков. В FAIR будут применяться два вида охлаждения:

электронное (см., например, [5]), при котором ионы замедляются до одной и той же скорости при периодическом взаимодействии с параллельным пучком электронов, имеющих строго определенную скорость;

стохастическое, при котором электроды-сенсоры определяют геометрическое положение центра циркулирующего в кольце пучка для генерации требуемой амплитуды поля корректирующих отклоняющих устройств — кикеров, расположенных на диаметрально противоположном участке накопительного кольца [6, 7].

Пучки охлаждаются и настраиваются для экспериментов в следующих четырех кольцах:

коллекторное кольцо (CR — Collector Ring) — в нем вторичные пучки ионов и антипротонов подвергаются стохастическому охлаждению, которое уменьшает полный фазовый

объем пучка антипротонов в $1,6 \cdot 10^4$ раз (время охлаждения 10 с) и пучков редких изотопов в $1,3 \cdot 10^6$ раз (время охлаждения 1,5 с). Это кольцо также будет использоваться для измерения массы короткоживущих ядер;

рециркуляционное экспериментальное накопительное кольцо (RESR — Recirculation Experimental Storage Ring) — в него каждые 10 с будут вводиться стохастически охлажденные в коллекторном кольце сгустки из 10^8 антипротонов энергией 3 ГэВ, что позволит за несколько часов накапливать до 10^{11} антипротонов для их последующего использования в накопительном кольце высокой энергии. Коллекторное кольцо обеспечит также быстрое замедление (в течение 1 с) редких изотопов от энергии на нуклон 740 МэВ до энергии в диапазоне 100—500 МэВ;

новое экспериментальное накопительное кольцо (NESR — New Experimental Storage Ring) — оно предназначено для экспериментов с экзотическими ионами и антипротонами. В нем будет использоваться как электронное, так и стохастическое охлаждение для разных экспериментов, включая эксперименты при очень низкой энергии (до 30 МэВ для антипротонов и до 4 МэВ на нуклон для радиоактивных ионных пучков);

накопительное кольцо высоких энергий (HESR — High Energy Storage Ring) — в нем пучки антипротонов при энергии до 14,5 ГэВ формируются для экспериментов с помощью электронного и стохастического охлаждения.

Пучки антипротонов для экспериментов по программе PANDA будут получать следующим образом [4]. Сначала импульсы протонных пучков током 70 мА, длительностью импульса 40 мкс и частотой повторения 5 Гц, ускоренные в специальном линейном ускорителе *p*-Унилак до энергии 70 МэВ, будут инжектироваться в синхротрон SIS18. Для увеличения числа ускоренных протонов кольцо синхротрона SIS18 будет наполняться восемью протонными микроимпульсами перед их разгоном до энергии 2 ГэВ, необходимой для последующей инжекции в основной ускоритель FAIR — синхротрон SIS100. Циркулирующие в SIS100 протоны будут ускорены до конечной энергии 29 ГэВ и сжаты в один микроимпульс длиной $\sim 7,5$ м (длительность ~ 25 нс) перед их выводом на производящую антипротоны мишень. Каждые 10 с микроимпульс из $2 \cdot 10^{13}$ протонов будет

сбрасываться на толстую (эффективной толщиной 60—80 мм) иридиевую или вольфрамовую мишень, где будет производиться до $1 \cdot 10^8$ антипротонов (выход на один протон $5 \cdot 10^{-6}$) средней энергией 3 ГэВ. Полученный таким образом короткий микроимпульс антипротонов с разбросом по импульсам $\delta p/p = \pm 3\%$ и поперечным эмиттансом $\epsilon_{x,y} = 200$ мм·мрад вводится затем в коллекторное кольцо, где его фазовый объем трансформируется таким образом, что длина микроимпульса с $l_b \sim 15$ м увеличивается до 45 м при соответствующем уменьшении разброса по импульсам до $\delta p/p = \pm 1\%$. Далее с помощью адиабатического группирования пучок антипротонов подготавливается для стохастического охлаждения, после чего ($\delta p/p = \pm 0,1\%$, $\epsilon_{x,y} = 5$ п·мм·мрад) снова будет разгруппировываться и передаваться в рециркуляционное кольцо RESR, где происходит накопление антипротонов.

В рециркуляционном кольце RESR пучок антипротонов подвергается стохастическому охлаждению в течение всего времени накопления, при этом каждые 10 с в него инжектируется новый микроимпульс антипротонов. Скорость накопления антипротонов сопоставима со скоростью их охлаждения в коллекторном кольце CR. Это значит, что можно будет получать до $7 \cdot 10^{10}$ антипротонов в 1 ч. Выбор времени накопления или общего числа накопленных антипротонов будет задаваться требованиями эксперимента.

Перед инжекцией антипротонов в накопительное кольцо высокой энергии HESR пучок антипротонов импульсом 3,8 ГэВ/с сжимается в один микроимпульс. В HESR, длина окружности которого составляет 574 м, антипротонный пучок может быть как ускорен, так и замедлен до требуемого в данном эксперименте импульса со скоростью, близкой к 0,1 ГэВ/с в 1 с.

Таким образом, ускорительный комплекс FAIR обеспечит пучки антипротонов беспрецедентной интенсивности и качества в диапазоне импульса от 1,5 до 15 ГэВ/с (или энергии от 0,83 до 14,1 ГэВ) для аннигиляционных экспериментов с использованием внутренней мишени и универсального 4 π -детектора PANDA. Для компенсации нагрева антипротонного пучка вследствие его взаимодействия с внутренней мишенью и внутривидового рассеяния кольцо HESR будет оснащено как установкой электронного

охлаждения с энергией электронов до 4,5 МэВ, так и системой стохастического охлаждения.

Участие в сооружении ускорительного комплекса российских ученых и инженеров является логическим продолжением многолетнего тесного сотрудничества предприятий Росатома, РАН и Минобрнауки с GSI в Дармштадте. Ведущие научные институты (ИФВЭ, ИТЭФ, ОИЯИ, ИЯФ СО РАН, НИИЭФА, ТРИНИТИ, ВНИИНМ и др.) активно участвуют в создании ускорительного комплекса и подготовке научных экспериментов на пучках ионов и антипротонов, в разработке и создании новых детекторов. Особенно востребованными являются отечественные разработки в области сверхпроводящих технологий (ИФВЭ, ОИЯИ, ВНИИНМ, НИЦ «Курчатовский институт») и технологий электронного охлаждения (ИЯФ СО РАН). Особую важность при этом имеют разработки ИФВЭ по конструкции сверхпроводящих магнитов для синхротронного кольца SIS300 и разработки ОИЯИ для сверхпроводящего синхротронного кольца SIS100. ИТЭФ активно участвует в разработке мощного протонного линейного ускорителя на энергию 70 МэВ, ускоритель-накопитель в ИТЭФе активно используется для разработки и тестирования детекторов, а также исследований динамики пучков тяжелых ионов и методов их концентрации на экспериментальные мишени.

Заключение. Проект FAIR представляет большой научный и практический интерес для нашей страны, придавая новый импульс развитию информационных, высоких технологий в различных отраслях экономики, подготовке кадров молодых ученых, инженеров, развитию, а также дальнейшей интеграции в мировое и европейское научное и технологическое пространство. Основными аргументами целесообразности участия ученых нашей страны в проекте FAIR являются:

возможность получения уникальных знаний о структуре и свойствах материи на уровне ее основных составляющих, а также фундаментальных законов, сил и симметрий, необходимых для создания научно-технологической базы ядерной энергетики нового поколения, расширения сферы внедрения ядерных технологий и поиска перспективных способов использования энергии атомного ядра;

доступ ученых и специалистов к уникальной экспериментальной базе;

возможность получения отечественными научными организациями и промышленными предприятиями заказов на разработку и изготовление высокотехнологичной продукции, а также доступ к зарубежным высоким технологиям;

укрепление позиций России на международных рынках высоких технологий наукоемкой продукции в области использования атомной энергии и других областях, повышение престижа российской науки;

возможность подготовки научных кадров при проведении исследований на передовом научном оборудовании;

интеграция новейших информационных технологий в информационную среду России.

Участие наших ученых в проекте FAIR будет способствовать инновационному развитию ядерного энергетического комплекса и созданию научно-технологической базы ядерной энергетики нового поколения, расширению сферы внедрения ядерных технологий и поиска перспективных способов использования энергии атомного ядра. Так, в ходе создания ускорительно-накопительного комплекса и последующих экспериментов будут освоены важные для атомной отрасли технологии в таких областях, как ядерный оборонный комплекс, атомный энергопромышленный комплекс и инерциальный управляемый термоядерный синтез.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фортов В.Е., Хоффманн Д., Шарков Б.Ю.** Интенсивные ионные пучки для генерации экстремальных состояний вещества. — Успехи физ. наук, 2008, т. 178, № 2, с. 113—138.
2. **Фортов В.Е.** Экстремальные состояния вещества на земле и в космосе. М.: Физматлит, 2008.
3. **Sturm C., Sharkov B., Stocker H.** 1,2,3 FAIR. — Nucl. Phys. A, 2010, v. 834, p. 682—687.
4. **FAIR Baseline Technical Report.** GSI, Darmstadt, 2006.
5. **Пархомчук В.В., Скринский А.Н.** Электронное охлаждение — 35 лет развития. — Успехи физ. наук, 2008, т. 178, № 5, с. 473—493.
6. **Meer S.** Stochastic Cooling of Intense Proton Beams. CERN/ISR PO 72-31, 1972.
7. **Moehl D.** Beam cooling: principles and achievements. — Nucl. Instrum. Meth. in Phys. A, 2004, v. 532, № 1—2, p. 1—10.

Поступила в Редакцию 4.02.11