

ДОКЛАДЫ ЛАУРЕАТОВ БОЛЬШОЙ ЗОЛОТОЙ МЕДАЛИ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК 2017 ГОДА

ЭКЗОТИЧЕСКИЕ ЯДРА

© 2019 г. Б. Йонсен

Технический университет Чалмерса, Гётеборг, Швеция

E-mail: bjorn.jonson@chalmers.se

Поступил в редакцию 12.02.2019 г.
Поступил после доработки 12.02.2019 г.
Принят к публикации 18.03.2019 г.

В докладе речь идёт об одной из интереснейших и бурно развивающихся областей ядерной физики – получении и исследовании экзотических ядер на границах нуклонной стабильности. Излагается история развития этой области. Приводятся методы получения таких ядер на ускорителях ведущих научных центров мира – Европейской организации по ядерным исследованиям (ЦЕРН) в Швейцарии и Центре по изучению тяжёлых ионов им. Гельмгольца (GSI) в Германии. Излагаются данные о структуре ядер, которые сильно меняются при подходе к границам нейтронной или протонной стабильности, а также результаты экспериментальных исследований нейтронно- и протонно-избыточных ядер, механизма образования нейтронного гало у изотопов гелия, лития, бериллия, бора, сильно обогащённых нейтронами. Представлена информация по использованию пучков радиоактивных ядер для медицинских приложений.

Ключевые слова: радиоактивный пучок, граница ядерной стабильности, экзотические ядра, проект ISOLDE, ускоритель тяжёлых ионов, фрагмент-сепаратор, бета-задержанный протонный распад, ядерное гало, нейтронно- и протонно-избыточные ядра, проект FAIR, бороминовское ядро, проект CERN-MEDICIS.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5873896571-581>

Тема, которую я выбрал для доклада на Общем собрании членов Российской академии наук, – "Экзотические ядра" – была лейтмотивом моей научной деятельности последних 50 лет [1–5]. Что такое экзотические ядра? На рисунке 1 изображена карта изотопов, в которую сведены все атомные ядра; каждая её ячейка соответствует нуклиду с индивидуальным числом протонов (Z) и нейтронов (N). В природе встречаются только 280 стабильных нуклидов, обозначенных на рисунке чёрными клетками и образующих линию, простирающуюся от лёгких до тяжёлых элемен-

тов. По обеим сторонам от неё находятся радиоактивные ядра. Лишь ничтожная их часть может быть найдена в природе, основная же была синтезирована и исследована в лабораторных экспериментах. По обе стороны от линии стабильности до границ стабильности простираются области радиоактивных ядер. За границами стабильности добавление нуклона к ядру не ведёт к образованию радиоактивного нуклида. Ядра вблизи этой границы называют экзотическими. Их отличает малое (от минут до микросекунд) время полураспада и значительное отклонение соотношения между числом нейтронов и протонов от значения, свойственного стабильным ядрам [1, 3, 5].

На заре развития ядерной физики информацию о структуре ядер получали из экспериментальных исследований радиоактивных распадов. Изучение естественной радиоактивности в немногочисленных цепочках распада отдельных тяжёлых элементов было явно недостаточным. Поэтому учёные начали синтезировать новые изотопы в ядерных реакциях взаимодействия ускоренных протонов и более тяжёлых изотопов с различными материалами. Вначале нуклиды выделяли методом химического синтеза, а позднее стали "очищать" с по-



ЙОНСЕН Бьорн – профессор
Технического университета
Чалмерса.

мощью электромагнитных сепараторов, получая чистый образец одного-единственного изотопа. Данный метод имел существенный недостаток: на процедуру "очищения" ещё до начала измерения приходилось тратить много времени. Даже при максимальной скорости её проведения доступными для изучения оказывались только изотопы со временем полураспада более минуты.

В 1951 г. в Копенгагенском университете (ныне – Институт Нильса Бора, Дания) впервые были сделаны попытки изучить более короткоживущие экзотические ядра. О. Кофед-Хансен, проверяя гипотезу В. Паули о существовании нейтрино, исследовал ядерные бета-распады. Для увеличения числа изотопов в эксперименте он и его коллега К.-О. Нильсен предложили использовать в качестве источника радиоактивных ионов продукты деления ядер урана, которые были получены из оксида урана при его облучении нейтронами, образованными, в свою очередь, в результате взаимодействия ускоренных дейтронов с бериллиевой мишенью. Чтобы задействовать все короткоживущие нуклиды, мишень напрямую присоединили к ионному источнику изотопного сепаратора посредством длинной

трубы. Поддерживая низкую температуру с одной стороны ионного источника, им удалось создать градиент давления между источником и мишенью так, что газообразные продукты деления начали транспортироваться в ионный источник и затем сепарироваться. Благодаря этой методике для изучения стали доступны изотопы благородных газов со временем полураспада в секундном диапазоне.

Вскоре копенгагенский эксперимент закончился. Однако идея Кофед-Хансена не была забыта! Она заронила в умах представителей европейского ядерно-физического сообщества зерно, которое дало всходы и выросло в проект ISOLDE (Isotope Separation On Line-Detector – разделение изотопов в режиме онлайн). По сути, это серия экспериментов по синтезу и изучению короткоживущих нуклидов, проводившихся международной группой учёных на синхроциклотроне (SC), генерирующем пучки протонов с энергией 600 МэВ, который расположен в лаборатории Европейской организации по ядерным исследованиям (ЦЕРН) в Женеве. Для установки было построено новое подземное помещение.

Первый эксперимент состоялся 16 октября 1967 г. Это событие можно рассматривать как от-

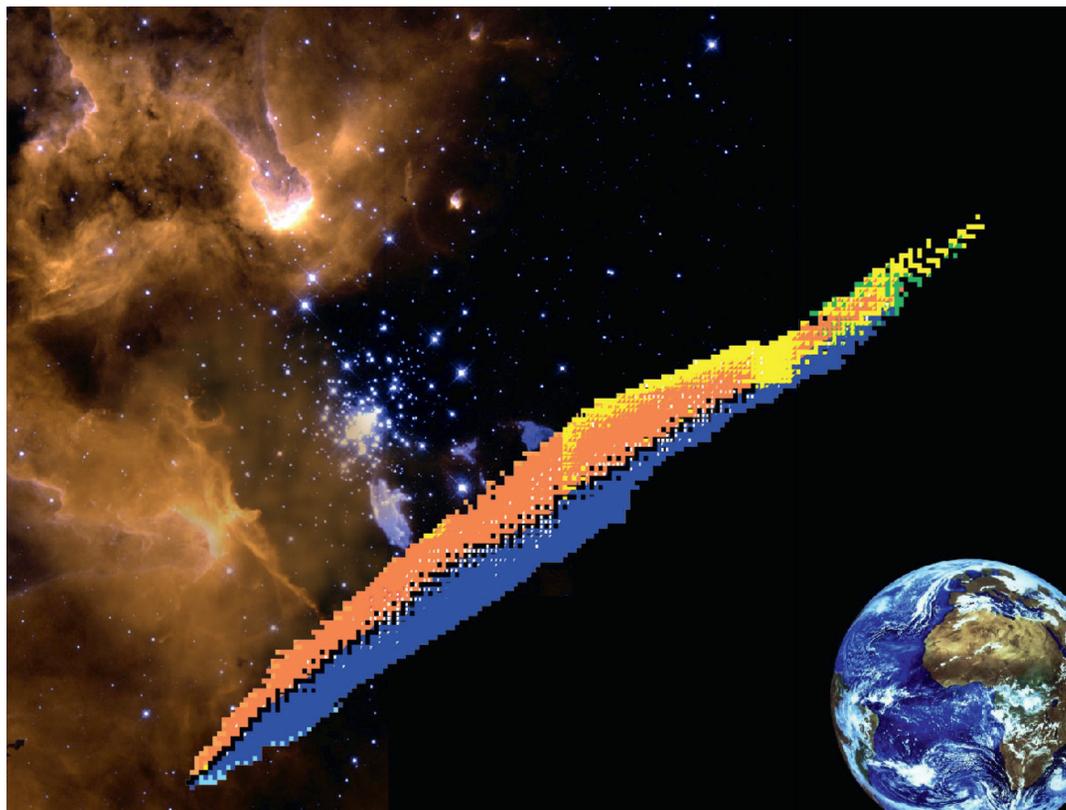


Рис. 1. В центре коллажа располагается таблица известных на сегодняшний день изотопов. Каждый её элемент (квадрат) соответствует определённому изотопу, притом по вертикали откладывается число протонов, а по горизонтали – число нейтронов. Таблица представляет собой своеобразную визуализацию спектра изотопов, доступных для экспериментов с радиоактивными пучками, которые направлены в первую очередь на изучение наиболее экзотических ядер

крытие новой эры в исследовании ранее недоступных радиоактивных ядер. С вводом в строй нового сепаратора появилась возможность получения интенсивных пучков изотопов со временем полураспада вплоть до миллисекунд. Так, при использовании первичных пучков протонов с энергией 600 МэВ на SC удалось значительно повысить выход экзотических ядер по всей области карты нуклидов.

В начале 1970-х годов, когда я работал над диссертацией, мне предложили поехать на два года с семьёй в ЦЕРН для проведения исследований в рамках проекта ISOLDE. Моё пребывание там заметно затянулось: я вернулся в Швецию только в середине 1985 г., заняв в Техническом университете Чалмерса должность заведующего кафедрой физики.

Ещё в ЦЕРНе я начал работать с П. Г. Хансеном. Наши первые совместные эксперименты того времени касались изучения экзотических процессов с так называемой бета-задержанной протонной эмиссией. Это процессы распада высоковозбуждённых состояний ядер, сопровождающие бета-распад. Опыты оказались довольно успешными: мы получили экспериментальное подтверждение существования моды бета-задержанного протонного распада в ранее неизвестных изотопах элементов Ag, Xe и Hg. Новые

данные можно было интерпретировать в рамках статистической модели. Похожие работы шли в то же время в Объединённом институте ядерных исследований (ОИЯИ) в Дубне, где группа В. А. Карнаухова добилась сравнимых результатов в изучении бета-задержанной протонной эмиссии в изотопах Ba и Cs.

В 1971 г. меня пригласили в Дубну на конференцию по физике тяжёлых ионов, где я представил данные, полученные нами в ЦЕРНе. Так я получил возможность встретиться и обсудить результаты с В. А. Карнауховым. Именно на этой конференции я впервые встретил профессора Г. Н. Флёрова. За несколько лет мне удалось ближе познакомиться с ним. Последний раз я видел Г. Н. Флёрова в 1985 г. в Гётеборге во время его приезда в Технический университет Чалмерса с приглашённым докладом. Мы с женой и шведскими коллегами были удостоены чести принять его в моём доме в Гётеборге.

Эксперименты 1970–1980-х годов в ЦЕРНе оказались весьма успешными. Помимо заполнения белых пятен на карте изотопов, были сделаны и некоторые другие впечатляющие экспериментальные открытия [2]. На базе проекта ISOLDE вскоре сформировался Международный научный центр по исследованию свойств изотопов, который и сегодня остаётся на мировом уровне.



Участники Международной конференции по тяжёлым ионам, состоявшейся 11–17 февраля 1971 г. в Дубне. На вставке – пригласительный билет на имя Б. Йонсена

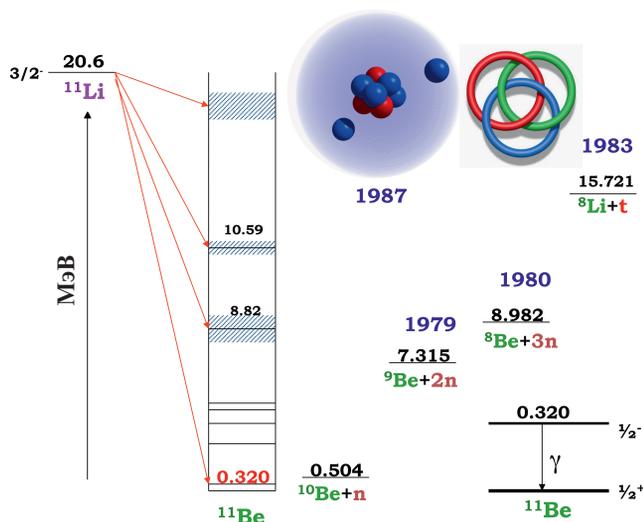


Рис. 2. Схема распада двухнейтронного гало-ядра ^{11}Li . Энергии бета-задержанных распадов ($\beta, 2n$), ($\beta, 3n$) и (β, t), впервые наблюдавшихся в ^{11}Li , приведены вместе с датами их открытия. Бета-задержанная эмиссия дейтронов также наблюдалась в ядре ^{11}Li , однако впервые её обнаружили в распаде ядра ^8Be . Дочернее ядро ^{11}Be , образующееся в результате бета-распада ядра ^{11}Li , является однеитронным гало-ядром, энергия связи нейтрона в нём 0,504 МэВ. В 1987 г. было сделано предположение о гало-структуре ядра ^{11}Li . В верхней части рисунка (по центру) изображена пространственная структура ^{11}Li вместе с бороминовскими кольцами

Тщательное развитие новых оригинальных систем "мишень—ион—источник", которые позволяют осваивать всё большие территории на карте изотопов, было и остаётся залогом успеха ISOLDE. Одним из элементов развития, или стартовой точкой в новой эре изучения экзотических ядер, явилось создание мишенной системы (матрицы) на карбиде урана — UC, которая весьма перспективна для синтеза и изучения изотопов различных элементов в реакциях скалывания, деления и фрагментации. В частности, нам удалось наблюдать большие выходы всех изотопов Li вплоть до самого тяжёлого — ^{11}Li . Это ядро с большим значением энергии бета-распада и малым значением энергии связи для разных мод бета-задержанного распада открывало хорошие перспективы для экспериментов с использованием новой техники (рис. 2). То, что среди распадов ^{11}Li наблюдается бета-задержанный нейтронный распад, было уже известно. В проекте ISOLDE основной акцент делался на поиске более экзотических мод распада — таких, как бета-задержанная двух-, трёхнейтронная эмиссия и бета-задержанная эмиссия тритона.

В 1986 г. я и П. Г. Хансен участвовали в создании обзора "Бета-задержанная эмиссия частиц из лёгких нейтроно-избыточных ядер", который, как мы понимали, был актуальным с точки зрения наблюдения новых бета-задержанных мод распада

лёгких ядер, в частности ^{11}Li . Во время написания обзора мы обратили внимание на интересную статью И. Танихаты и его группы об экспериментах в Национальной лаборатории им. Э. Лоуренса (LBL) в Беркли (США). При изучении материальных радиусов ядер путём измерения сечений взаимодействия быстрых радиоактивных пучков изотопов He и Li они наблюдали потрясающий эффект для ^{11}Li : плавное изменение радиуса в согласии с зависимостью $A^{1/3}$ для более лёгких изотопов Li неожиданно сменялось резким скачком на 30% для ^{11}Li . Последовали дискуссии на тему сильной деформации ^{11}Li , однако никакого серьёзного теоретического объяснения этому феномену не нашлось. Мы попытались вникнуть в эту проблему и обнаружили интересные факты — ключевые для понимания феномена большого радиуса: ^{11}Li — последний связанный изотоп лития, а его более лёгкий сосед, ^{10}Li , не связан. Кроме того, энергия связи двух нейтронов была мала, что означало слабую связь нейтронной пары с ядром ^9Li (см. рис. 2). Проведя расчёты в модели, где два последних нейтрона рассматривались как dineйтрон, мы показали, что наблюдаемое значение радиуса объясняется малой энергией связи двух нейтронов. Таким образом, ^{11}Li можно представить в виде кора ^9Li , окружённого облаком нейтронной материи [4]. Эта новая необычная структура, названная нами "гало", привлекла внимание мировой научной общественности — и теоретиков, и экспериментаторов. Открытие вызвало беспрецедентный интерес не только к ядерным гало, но и ко всем экзотическим ядрам вблизи и за пределами границ стабильности. Возникло ощущение, что мы стоим на пороге события, которого никто не ожидал и которое представляет собой новую парадигму ядерной физики, или субатомной физики, как я её называю. В наших руках оказалось нечто необыкновенное, и дело было в том, чтобы направить его на благо науки.

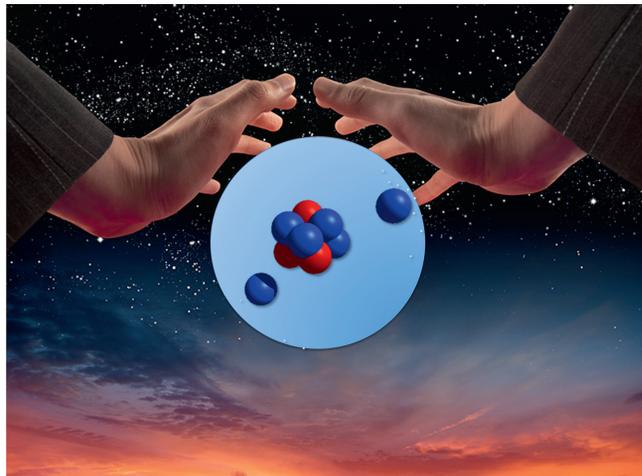
Эксперимент И. Танихаты оказался важным не только как обоснование существования гало-структуры — нового феномена в ядерной физике. Это был действительно первый эксперимент по применению быстрых радиоактивных пучков для изучения ядерных реакций. Более того, это стало важной вехой на пути развития LBL в Беркли в конце 1970-х — начале 1980-х годов, когда было показано, что релятивистские тяжёлые ионы можно эффективно использовать для производства экзотических ядер. Согласно предложенной методике, первичный пучок быстрых тяжёлых ионов попадает на тонкую мишень, где ионы фрагментируются, или делятся. Продукты реакции после их "очистения" во фрагмент-сепараторе для получения пучка изотопов с определённой массой, зарядом и импульсом на-

правляются на вторичную мишень. Сегодня уже по всему миру существуют специализированные установки, работающие с внешними пучками радиоактивных ионов, полученными из ускорителей тяжёлых ионов.

Кроме того, после открытия гало как знаменательное совпадение следует рассматривать старт программы по физике высоких энергий на ускорительном комплексе в Институте тяжёлых ионов (Gesellschaft für Schwerionenforschung – GSI) в Дармштадте (Германия), которая открыла возможность для проведения первых экспериментов по направленному изучению лёгких нейтронно-избыточных ядер. Оказалось, что в экспериментах с радиоактивными пучками при релятивистских энергиях возникает ряд проблем, но есть и свои преимущества: кинематическая фокусировка позволяет регистрировать фрагменты из реакции в удобный телесный угол. Более того, остальные тяжёлые фрагменты покидают зону реакции примерно с теми же скоростями, что и входящий пучок, и это даёт возможность проводить дальнейшую идентификацию характеристик фрагментов. В 1992 г. моя группа в Гётеборге организовала весьма плодотворное сотрудничество с учёными GSI, вместе мы смогли продолжить ключевые эксперименты, уточняющие наше понимание ядерного гало [1].

Сегодня, спустя четверть века, мы можем вспомнить эксперименты, проведённые в GSI для всех областей карты нуклидов, и сказать, что именно уникальность радиоактивных пучков была ключом к успеху. Кроме того, именно эти эксперименты дали вдохновение и опыт для разработки будущего международного проекта FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research – Центр по исследованию ионов и антипротонов) в GSI, нацеленного на изучение фундаментальных свойств и структуры материи [6].

Итак, первые эксперименты по изучению гало-ядер в Институте тяжёлых ионов начались в 1992 г. с исследования реакции срыва нейтронов из ^{11}Li на ядрах-мишенях C, Al и Pb при энергии 340 МэВ/нуклон. Измерялись продольные и поперечные импульсные распределения фрагмента ^9Li . Как ожидалось, наблюдаемые импульсные распределения оказались узкими, что говорило о широком пространственном распределении срывааемых нейтронов [4]. Тут необходимо отметить, что значительный успех этого эксперимента был связан с использованием инверсной кинематики. Вместо облучения образца с радиоактивными изотопами пучком стабильных ядер использовались пучки радиоактивных изотопов, бомбардирующие стабильные мишени. При этом центр масс изотопа ^{11}Li , время полураспада



Будущее в наших руках

которого составляет 8,75 мс, анализировался, как если бы он был радиоактивной мишенью, но не исчезал бы мгновенно.

^{11}Li – последний из ядерно-связанных изотопов лития. Его более лёгкий сосед – ^{10}Li – не связан по отношению к эмиссии нейтрона. И всё же, с научной точки зрения, ему можно приписать определённые квантовые свойства. Наиболее точные данные, полученные из выбивания нейтронов из ^{11}Li , свидетельствуют о s-волновом виртуальном состоянии, отвечающем основному состоянию с длиной рассеяния $a_s = -22,4$ Фм, и о возбуждённом p-волновом резонансе при энергии 0,566 МэВ с шириной $\Gamma = 0,548$ МэВ.

Как показали эксперименты по изучению реакций $^1\text{H}(^{14}\text{Be}, 2\text{pn})^{12}\text{Li}$ и $^1\text{H}(^{14}\text{Be}, 2\text{p})^{13}\text{Li}$ в жидкой водородной мишени при энергии пучка ^{14}Be 304 МэВ/нуклон, экстремально экзотические ядерные системы ^{12}Li и ^{13}Li могут быть отнесены к несвязанным ядрам. Эксперименты этого типа позволили пересечь границу стабильности и начать изучение несвязанных ядерных систем за её пределами [3] (рис. 3).

Связанную трёхчастичную ядерную систему, в которой ни одна из бинарных подсистем не связана, называют бороминовским ядром¹ [4]. В качестве примера можно привести ядро ^6He , которое имеет простую трёхчастичную структуру $\alpha+n+n$. Его исследовали в ряде экспериментов. В ходе одного из них изучался срыв нейтронов из ядер ^6He в углеродной и свинцовой мишенях

¹ В математике бороминовские кольца состоят из трёх топологических окружностей, объединённых таким образом, что никакие два кольца не сцеплены между собой, но все три соединены, как показано на рисунке 2. Такие кольца называют бороминовскими (borgomean rings) из-за сходства их архитектуры с гербом жившего в XV в. на севере Италии аристократического семейства Борromeо.

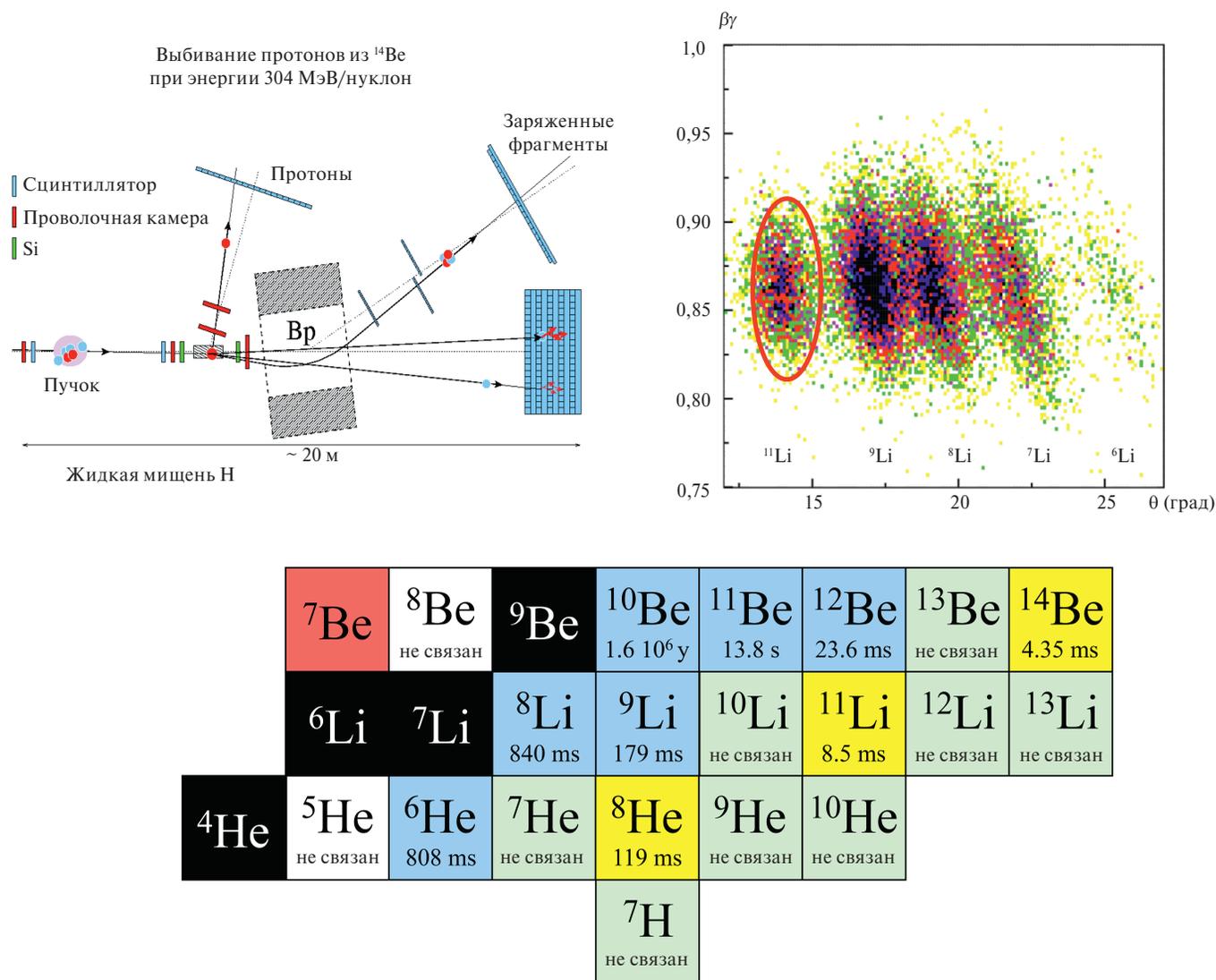


Рис. 3. Схема эксперимента по идентификации двух несвязанных изотопов лития — ^{12}Li и ^{13}Li (верхняя часть рисунка). Пучок ядер ^{14}Be , обладающих гало из двух нейтронов, падает на жидкую водородную мишень. Регистрируются рассеянные протоны, заряженные фрагменты и нейтроны. В правой верхней части рисунка — график с детектируемыми изотопами лития. ^{11}Li — чрезвычайно слабо связанный изотоп, выживает и может быть зарегистрирован на совпадении с одним или двумя нейтронами, указывая на существование изотопов ^{12}Li и ^{13}Li . На фрагменте таблицы изотопов (нижняя часть рисунка) показаны три боровских ядра: ^8Be , ^{11}Li и ^{14}Be . Пучки этих ядер использовались для получения и детального изучения несвязанных ядерных систем

при энергии пучка 240 МэВ/нуклон. В результате удалось получить спектр электромагнитного возбуждения, а также обнаружить, что величина силы $E1$ -перехода исчерпывает как энергетически взвешенное кластерное правило сумм, так и невзвешенное правило сумм при интегрировании силы до энергий возбуждения до 10 МэВ. Из этих данных можно извлечь среднеквадратичное расстояние между кором α и двумя валентными нейтронами $r_{\alpha-2n} = 3,2$ Фм. В Дубне на экспериментальном комплексе для пучков радиоактивных ядер (DRIBS-1), включающем фрагмент-сепаратор ACCULINNA, изучалось упругое рассеяние $^6\text{He} + ^4\text{He}$ при энергии пучка ^6He 151 МэВ. Стоял

вопрос: как пространственно распределены два нейтрона — находятся ли они близко друг к другу, образуя динейтронную конфигурацию, или максимально удалены, создавая сигарообразную конфигурацию? Из сопоставления данных по рассеянию с теоретическими расчётами было сделано заключение о доминирующей динейтронной конфигурации (рис. 4).

Ещё в 1960 г. В. И. Гольданский предсказал существование протонной и двухпротонной радиоактивности в протонно-избыточных изотопах лёгких ядер. Доказать существование протонной радиоактивности не составляло большого труда, в то время как открытия более

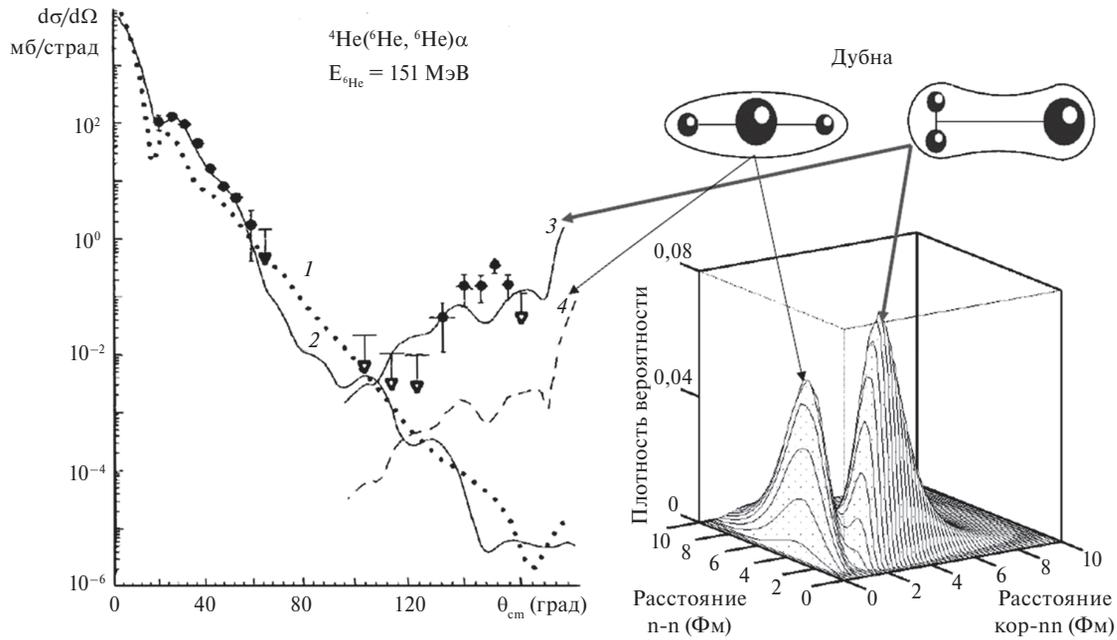


Рис. 4. Дифференциальное сечение рассеяния ${}^6\text{He}$ при энергии 151 МэВ на гелиевой газообразной мишени. Чёрными точками показаны экспериментальные данные. Справа приводятся рассчитанные корреляционные плотности распределения нейтронов, которые позволяют предсказать поведение сечения в случае динейтронной (кривая 3) и сигарообразной (кривая 4) конфигурации двухвалентных нейтронов. Из сравнения с экспериментальными данными видно, что доминирует динейтронная конфигурация

редкого двухпротонного распада пришлось ждать до 2003 г. Это произошло примерно в одно и то же время в экспериментах на установках FRS в GSI и SSISS-LISE3 в GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds – Ускорительный комплекс тяжёлых ионов, Франция) в ядре с исключительным дефицитом нейтронов ${}^{45}\text{Fe}$. Тогда же проводилось и теоретическое исследование этой моды распада в модели core+p+p, в ходе которого были

рассчитаны и проанализированы время полураспада и импульсные корреляции протонов. Теоретические предсказания потрясающим образом подтвердились в 2007 г., когда ядро ${}^{45}\text{Fe}$ изучалось в эксперименте в Мичиганском государственном университете (MSU, США) с применением оригинальной техники, использующей газовый детектор, в котором ведётся цифровая съёмка треков излучаемых протонов (рис. 5).

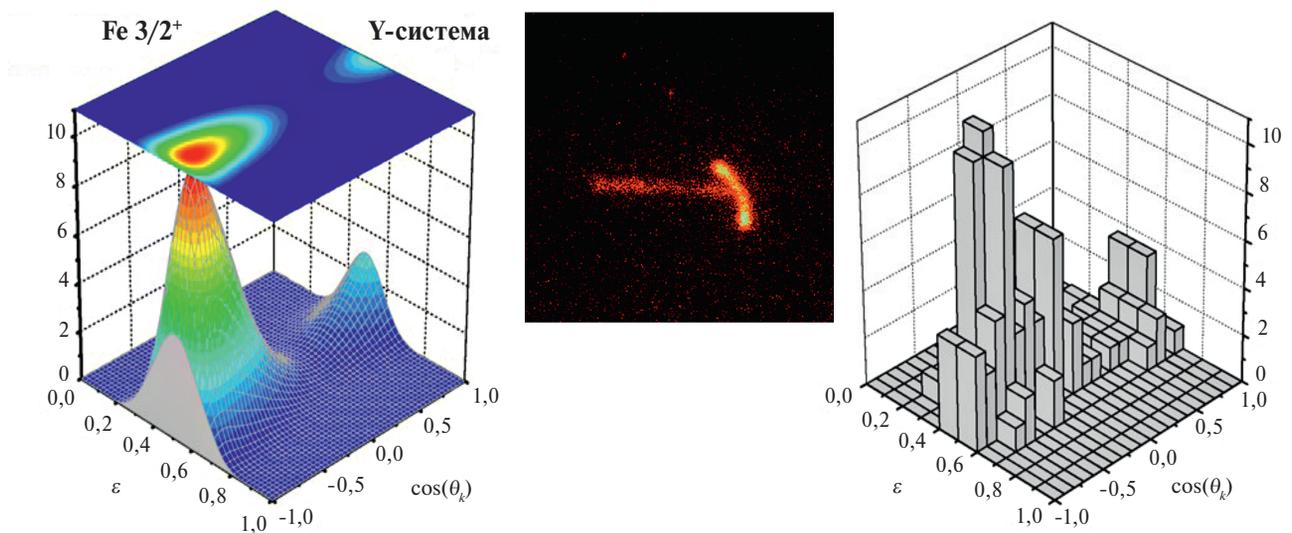


Рис. 5. Корреляционная диаграмма, рассчитанная для двухпротонных радиоактивных ядер ${}^{45}\text{Fe}$ в Y-системе в якобиевских координатах (слева), и та же корреляционная картина, экспериментально полученная с использованием время-проекционной камеры (справа). В центре – фото двухпротонного распада ${}^{45}\text{Fe}$, записанного с помощью ПЗС-камеры, где видны горизонтальный трек ядра ${}^{45}\text{Fe}$ (слева) и два интенсивных трека испущенных им протонов

Быстрый прогресс в понимании наиболее экзотических ядерных систем в значительной степени обусловлен непрерывным развитием оригинальных методов производства пучков. Не менее важная роль отводится модернизации детектирующих систем. Эти обстоятельства стимулировали выдвижение новых идей для создания усовершенствованных экспериментальных установок. Смею заметить, что в истории ядерной физики никогда ранее не наблюдалось такого стремительного развития новых и модернизированных экспериментальных установок, какое мы видим сегодня [5, 7]. Приведу только три примера, иллюстрирующие этот тезис.

Первый пример. В Дармштадте, в Центре по изучению тяжёлых ионов им. Гельмгольца (до 2008 г. – Институт тяжёлых ионов, GSI), на базе существующей установки создаётся усовершенствованный ускорительный комплекс тяжёлых ионов FAIR. Среди важнейших программ будущего проекта – изучение реакций и свойств экзотических ядер. Один из основных экспериментов – NuSTAR (Nuclear Structure, Astrophysics and Reactions – ядерная структура, астрофизика и реакции), выполняемых в рамках широкого сотрудничества, – пройдёт на установке R³B

(Reactions with Relativistic Radioactive Beams – реакции с релятивистскими радиоактивными пучками), созданной на базе нейтронного времяпролётного детектора ALADIN-LAND, размещённого на фрагмент-сепараторе FRS. R³B будет расположена на конце линии пучка Super-FRS. Имея исключительно широкую зону детектирования вторичных продуктов реакции, эта установка станет своего рода комплексом внутри FAIR (рис. 6).

Второй пример. В Объединённом институте ядерных исследований недавно прошла модернизация фрагмент-сепаратора ACCULINNA [8]. Новый фрагмент-сепаратор ACCULINNA-2, работающий по методу In-Flight (сепарация ионов "в пучке"), связан с циклотроном U-400M и обеспечивает высокую интенсивность радиоактивных пучков ядер от водорода ($Z = 1$) до криптона ($Z = 36$) в области низких энергий (10–50 МэВ/нуклон), достижимых для такого типа установок. Более того, ACCULINNA-2 станет основой для первой ступени нового мощного проекта электрон-ионного коллайдера DERICA (Dubna Electron-Radioactive Ion Collider Facility), который совместит в себе технологию In-Flight-сепарации для производства радиоактивных пучков во фрагментации (первичные

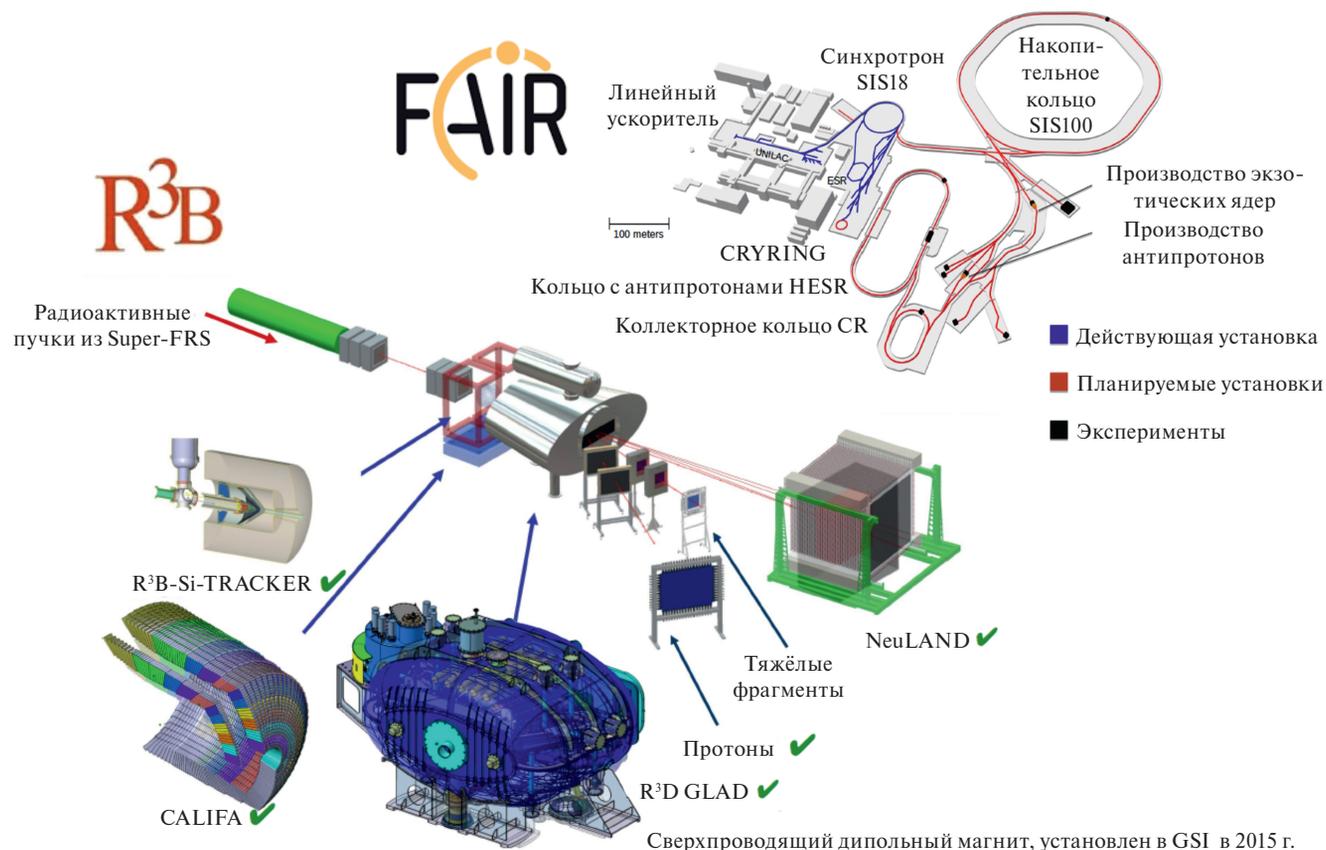


Рис. 6. Схематическое изображение установки R³B, которая строится в Центре по исследованию ионов и антипротонов (FAIR) в Дармштадте совместными усилиями европейских лабораторий, и схематическое изображение ускорительного комплекса FAIR

пучки урана при энергии ~ 100 МэВ/нуклон для $A/Z = 3$) с остановкой радиоактивных ионов в газовой ячейке и их последующим доускорением в комбинированной системе LINAC+ синхротрон. Это позволит использовать доускоренные радиоактивные пучки для изучения реакций в накопительном кольце. DERICA открывает возможность проведения широкого ряда современных экспериментов в ядерной физике, например, связанных с производством новых изотопов, измерением их масс, времени жизни и распада, включая ядерные реакции и ядерную спектроскопию. Тем не менее основной акцент будет сделан на исследованиях с использованием накопительных колец, цель которых – изучать рассеяние электронов на радиоактивных ионах в коллайдерных экспериментах. Предполагается, что новая установка будет построена на территории ОИЯИ рядом с корпусом Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флёрва (рис. 7). Здесь необходимо подчеркнуть, что проект DERICA при реализации всех его компонентов (имеется в виду фрагментация ускоренных ионов на мишени и сепарация экзотических ядерных пучков, использование техники газовой ячейки с последующим доускорением радиоактивных пучков в комбинированной системе LINAC+синхротрон и их выводом в накопительное кольцо, наконец, рассеяние электронов на радиоактивных пучках) приобретёт мировой масштаб.

Третий пример. Заметный подъём научной активности в рамках программы ISOLDE произошёл в ЦЕРНе, когда стало доступным до-

ускорение широкого спектра получаемых радиоактивных пучков. Ускоритель REX-ISOLDE, предшественник новой установки, давший первые пучки для экспериментов в 2001 г., изначально планировался для ускорения лёгких изотопов с массами не выше $A = 50$. Однако оказалось, что его возможности существенно шире: уже через несколько лет в исследованиях ядерных реакций он обеспечивал доускорение ионов от ${}^6\text{He}$ до ${}^{224}\text{Ra}$. За 15 лет работы с помощью REX-ISOLDE было произведено свыше 100 различных изотопов более 30 химических элементов.

Со временем стало очевидно, что глобальная модернизация установки, подразумевающая увеличение энергии, интенсивности и качества пучка, способна открыть новую эру в изучении высокоэнергетичных частиц. В сентябре 2009 г. был утверждён проект HIE-ISOLDE, который предусматривал многоступенчатую модернизацию ныне существующей установки ISOLDE с целью повышения энергии ускорителя REX до 5,5–10 МэВ/нуклон и совершенствования его резонаторов. Качество пучков предполагалось повысить благодаря установке нового радиочастотного квадрупольного кулера (RFQ), а интенсивность пучка – усилить благодаря двум независимым факторам инжекторов. Первый фактор: генерация пучков должна линейно возрастать с увеличением интенсивности протонов, поставляемых LINAC-4, второй – сечения фрагментации и скалывания должны увеличиваться с ростом энергии в бустере протонного синхротрона (PS-бустере) до 2 ГэВ.

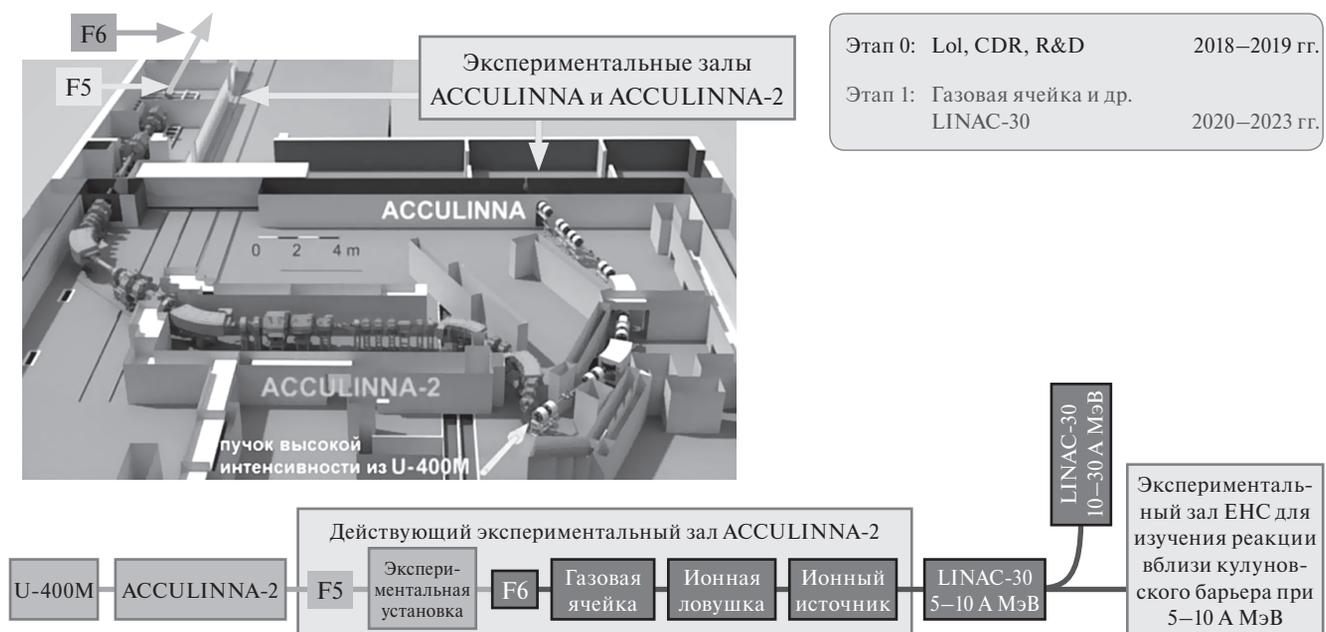


Рис. 7. Экспериментальные залы фрагмент-сепаратора ACCULINNA и ACCULINNA-2. В нижней части рисунка представлено новое предполагаемое расширение экспериментальной зоны для реализации первой фазы проекта DERICA

Первый шаг модернизации, связанный с повышением энергии, уже осуществлён. В октябре—ноябре 2015 г. состоялся тестовый эксперимент, в котором экзотические ионы Zn ускорились до энергии 4 МэВ/нуклон. Недавно были установлены два дополнительных криогенных модуля, которые вместе с установленными ранее увеличили энергию пучка до 10 МэВ/нуклон (рис. 8).

Использование ускорителей для выработки медицинских радиоизотопов в терапевтических и диагностических целях имеет глубокие традиции. Долгие годы учёные изыскивали возможности производства радиоизотопов на установке ISOLDE. Наконец, в 2012 г. стартовал проект CERN-MEDICIS (MEDical Isotopes Collected from ISOLDE), благодаря которому станет возможным поиск радионуклидов с нужными свойствами для повышения точности диагностики и лечения тяжёлых заболеваний. Если говорить о цифрах, то эксперименты на ISOLDE используют пример-

но половину протонов из PS-бустера. Протонный пучок теряет только 10% своей интенсивности и энергии при взаимодействии со стандартной мишенью ускорителя. Таким образом, протоны, прошедшие через мишень, можно применять вторично. Для проекта CERN-MEDICIS вторичная мишень расположена за мишенью спектрометра высокого разрешения (HRS). Спроектированный для производства определённых изотопов автоматический конвейер транспортирует эту облучённую мишень в сепаратор, который располагается в отдельном строении CERN-MEDICIS, пристроенном к лаборатории класса А. После нагревания нужный изотоп сепарируется и аккумулируется. Таким образом, многолетний опыт и знания, накопленные на ISOLDE, будут максимально использованы в инновационных медицинских приложениях. Работы по возведению нового строения, начатые в 2013 г., завершились в 2016 г. Первые облучения вторичной мишени состоялись в 2017 г.

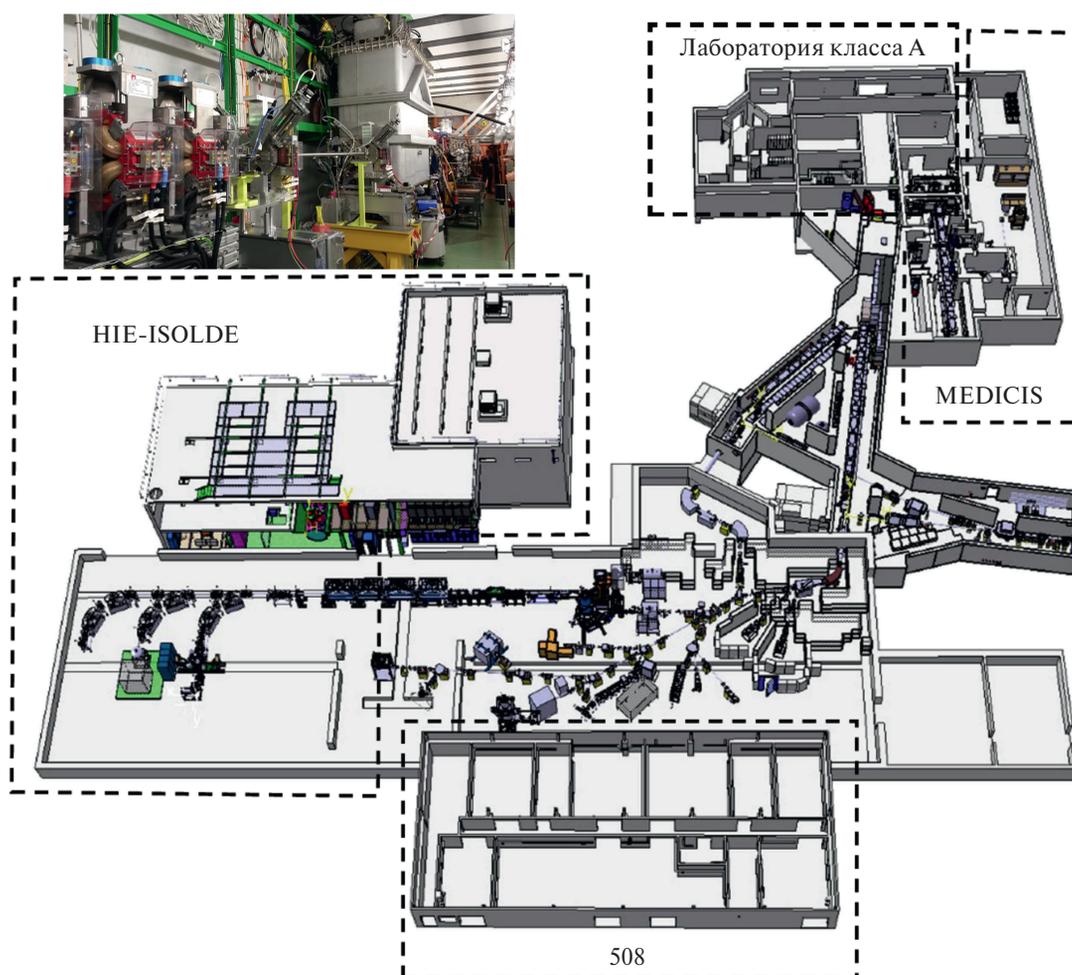


Рис. 8. Комплекс для работы с радиоактивными пучками ISOLDE и его пристройки. Изотопный сепаратор HIE-ISOLDE с дополнительными криогенными модулями (верхняя левая часть рисунка) производит радиоактивные пучки с энергиями до 10 МэВ/нуклон. Лаборатория класса А для безопасного обращения с радиоактивными мишенями и строение MEDICIS (верхняя правая часть рисунка)

Итак, в этом докладе я рассказал о науке, в рамках которой мы пытаемся понять основные законы природы на микроскопическом уровне.



*Tu detta är det herrliga hos menskan
att hon kan fatta tingens inre väsen
ej hvad de synas, men hvad de betuda;
och verkligheten, hvart vårt öga ser,
den är symbolen endast af ett högre.*

Эсайас Тегнер. Эпилог на праздновании присвоения ему степени магистра в Лундском университете (Швеция).

Всё, что мы узнали о природе на ядерном уровне, базируется на экспериментах, в которых мы идентифицируем сигналы от сложнейших детекторов, пытаемся соотнести экспериментальные результаты с теоретическими расчётами и на этой основе вывести фундаментальные законы природы. С каждым шагом на пути изучения экзотических ядер нам открывались всё новые секреты природы. Суммируя их с уже имеющимися знаниями, мы делаем шаг к большему, но всё ещё не полному пониманию мира, в котором живём.

Подводя черту, хотелось бы с благодарностью вспомнить моего соотечественника Эсайаса Тегнера (1782–1846) — поэта и артиста, профессора греческого языка в Лундском университете, графа из города Ваксхё, а также члена Шведской королевской академии наук. В 1820 г. на праздновании в Лундском университете по случаю присвоения

Тегнеру звания магистра науки он написал замечательный длинный эпилог, из которого пять строчек могут быть адресованы нашей области науки:

*Чудесная способность человека:
Увидеть внутреннюю сущность феномена,
Не глазом созерцая, но сознанием,
...А та реальность, видимая глазу,
Всего лишь символ нам чего-то свыше.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Hansen P.G., Jensen A.S., Jonson B. Nuclear Halos // Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 1995. V. 45. № 1. P. 591–634.
2. Jonson B. Light Dripline Nuclei // Physics Reports. 2004. V. 389. № 1. P. 1–59.
3. Chulkov L.V., Jonson B., Zhukov M.V. Light Nuclei in the Vicinity of the Dripline and Beyond // Eur. Phys. J. A. 2015. V. 51. № 8. P. 97–120.
4. Zhukov M.V., Danilin B.V., Fedorov D.V. et al. Bound state properties of Borromean halo nuclei ${}^6\text{He}$ and ${}^{11}\text{Li}$ // Physics Reports. 1993. V. 231. № 4. P. 151–199.
5. Pfützner M., Karny M., Grigorenko L.V., Riisager K. Radioactive decays at limits of nuclear stability // Rev. Mod. Phys. 2012. V. 84. № 2. P. 567–619.
6. Durante M., Indelicato P., Jonson B. et al. All the Fun of the FAIR: Fundamental physics at the Facility for Antiproton and Ion Research // Phys. Scr. In press.
7. Borge M.J. G., Jonson B. ISOLDE past, present and future // J. Phys. G. Nucl. Part. Phys. 2017. V. 44. № 4. P. 044011.
8. Fomichev A.S., Grigorenko L.V., Krupko S.A. et al. The ACCULINA-2 project: The physics case and technical challenges // Eur. Phys. J. A. 2018. V. 54. № 6. P. 97–118.

EXOTIC NUCLEI

© 2019 B. Jonson

Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden

E-mail: bjorn.jonson@chalmers.se

Received 12.02.2019

Revised version received 12.02.2019

Accepted 18.03.2019

One of the most interesting and intensively examined research directions in nuclear physics, i.e., the production and investigation of exotic nuclei in the vicinity of drip-lines is investigated. An historical overview of the development of research area is provided. Methods to produce such nuclei realized at the foremost research facilities in the world, e.g., CERN in Switzerland and GSI in Germany, are described. The critical change of the nuclear structure on approaching proton and neutron drip-lines, as well as the results of experimental studies of neutron- and proton-rich nuclei, the mechanism of neutron halo formation in neutron-rich isotopes of helium, lithium, beryllium, and boron, are discussed. In addition, medical applications of radioactive beams are discussed briefly.

Keywords: radioactive beam, nuclear drip-line, exotic nuclei, ISOLDE facility, heavy ion accelerator, fragment separator, beta-delayed proton emission, nuclear halo, neutron- and proton-rich nuclei, FAIR project, Borromean nucleus, CERN-MEDICIS project.