

мени в результате усилий ряда ведущих лабораторий мира ускорены ионы всех элементов, включая уран, до энергий порядка 10МэВ. Нуклон, преобладающий кулоновский барьер* на самых тяжелых элементах (калифорний, эйнштейний, фермий), которые могут быть использованы в качестве мишени для облучения. Получены также пучки релятивистских тяжелых ионов — углерода, кислорода, неона, аргона, энергия которых достигает нескольких ГэВ/нуклон. Комплекс чрезвычайно разнообразных и качественно новых по своей постановке проблем, связанных с взаимодействием ядер с ядрами, атомами или с веществом, и составляет сегодня содержание физики тяжелых ионов.

Важнейшее направление, специфическое для физики тяжелых ионов, — исследование процессов «большого масштаба» в ядрах, процессов, которые характеризуются коренной перестройкой ядерных систем, содержащих сотни нуклонов. Это происходит, например, в тех случаях, когда два сталкивающихся сложных ядра, взаимодействуя, образуют единую промежуточную систему или даже полностью «сливаются», когда в процессе столкновения двух сложных ядер происходит передача от одного ядра к другому многих десятков нуклонов — целого сгустка ядерной материи, или когда происходит распад большой составной ядерной системы на две части сравнимой величины. Таким образом, физика тяжелых ионов позволяет изучать коллективные ядерные движения большой амплитуды; которые характеризуются предельно большими изменениями ядерной формы, сильным и неоднократным перераспределением энергии между различными степенями свободы системы. В настоящее время о движениях такого масштаба в ядрах известно очень мало. В особенности мало сведений о динамике крупномасштабных изменений формы ядра, в частности о связи или взаимодействии между когерентным движением многих нуклонов ядра и движениями отдельных его частиц. Эти проблемы всегда были центральными в ядерной физике и особую актуальность приобрели при изучении механизма деления ядер; однако лишь с получением пучков ускоренных тяжелых ионов появилась адекватная основа для интенсивного развития исследований в этих направлениях. Ядерные реакции, вызываемые легкими частицами, не позволяли исследовать те процессы, которые первоначально важны для понимания свойств ядер и ядерной материи, с одной стороны, и которые, по существу, оказываются неотъемлемым следствием столкновения сложных ядер — с другой.

* Чтобы вызвать ядерную реакцию, налетающая частица с зарядом $(+Z_1)$ должна сблизиться с ядром-мишенью, имеющим заряд $(+Z_2)$, до некоторого критического расстояния R_{BZ} , преодолев силы кулоновского отталкивания. Для этого энергия частицы должна превышать пороговое значение $E_B = k(Z_1 Z_2) / R_{BZ}$, где k — коэффициент пропорциональности; величину E_B называют кулоновским барьером реакции.



ГЕОРГИЙ НИКОЛАЕВИЧ ФЛЕРОВ — физик, академик, Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской и Государственных премий СССР, директор Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований (ЛЯР ОИЯИ). Научные интересы связаны с развитием нового направления ядерной физики — исследованием процессов при столкновениях сложных ядер и проблемой синтеза и изолированных элементов.

ЮРИЙ СОЛОКОВИЧ ОГАНЕСЯН — физик, доктор физико-математических наук, лауреат Государственной премии СССР, заместитель директора ЛЯР ОИЯИ. Основная область исследований — ядерные реакции под действием тяжелых ионов, синтез и изучение свойств тяжелых трансурановых элементов.

ЮРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ЛАЗАРЕВ — физик, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник ЛЯР ОИЯИ. Занимается физикой деления ядер, синтезом и изучением свойств далеких трансурановых элементов.

МОЩНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ПОЗНАНИЯ ЯДРА

Существенный шаг в развитии исследований атомных ядер был сделан в начале 50-х годов, когда в Бирмингеме профессором Дж. Фремлингом впервые были ускорены тяжелые ионы — бор, углерод, азот и проведены эксперименты, наметившие основные черты взаимодействия сложных ядер. Этим было положено начало новой, одной из наиболее актуальных областей исследования микромира — физике тяжелых ионов, которая в значительной степени определяет лицо современной ядерной физики и обуславливает широкие захватывающие перспективы для кардинального развития науки об атомном ядре в будущем. К настоящему вре-

При столкновении тяжелых ионов с ядрами в полной мере проявляются столь интересные и важные свойства ядерного вещества, как, например, его вязкость. Ядерная вязкость во многом определяет характер динамики столкновения и его результат, в частности возможность полного слияния двух сложных ядер и величину возбуждения образовавшейся составной системы, что, в свою очередь, имеет решающее значение для проблемы синтеза новых тяжелых и сверхтяжелых элементов с помощью ускоренных тяжелых ионов — лишь тяжелые ионы предоставляют нам уникальную возможность проникнуть в область химических элементов второй сотни.

В отличие от обычного понятия вязкости в больших классических системах, например, в жидкости, в ядерных системах конечного размера, понятие вязкости наделено весьма специфическим содержанием. Это понятие в ядерной физике вводится для того, чтобы характеризовать интенсивность обмена энергией между коллективными степенями свободы, описываемыми геометрической формой ядра в целом, и внутренними степенями свободы, описываемыми движением отдельных нуклонов относительно фиксированной формы. Решение вопросов о механизме диссипации (рассеяния) энергии коллективного движения по одночастичным степеням свободы, о величине ядерной вязкости, ее зависимости от энергии возбуждения или температуры, деформации системы имеет принципиально важное значение для понимания динамики ядра, и здесь определяющую роль должны сыграть ядерные реакции с тяжелыми ионами. Чтобы сравнить порядок величин, характеризующих «вязкие» свойства различных ядерных процессов, отметим, что если с вынужденным и спонтанным делением тяжелых ядер на два осколка связано количество диссипированной коллективной энергии порядка 10 МэВ, то в случае столкновения двух сложных ядер энергия порядка 100—300 МэВ может быть рассеяна по системе за время $\sim 10^{-21}$ с. В этом смысле ядерные реакции с участием тяжелых ионов оказываются экстремальным процессом.

Важно также и то, что экспериментальные исследования свойств продуктов реакций с тяжелыми ионами — их энергетических, угловых, массовых и зарядовых распределений — позволяют достаточно определенно «развернуть» процесс столкновения сложных ядер во временной шкале, восстановить последовательность «событий» во времени; это имеет большое значение для выяснения механизма взаимодействия ядер и создания теории, описывающей явление. Получить подобную информацию, исследуя деление ядер, весьма сложно. Ядерные же реакции, вызываемые легкими частицами, не приводят к столь глубокой перестройке ядра и потому не являются показательными в отношении динамики движения больших количеств ядерного вещества.

Не менее интересной представляется возможность изучения сжимаемости ядерного вещества. Хорошо известно, что атомное ядро — весьма «разреженная» система частиц, так что среднее расстояние между нуклонами в ядре в несколько раз превышает размер нуклона. Это позволяет в принципе значительно уплотнить ядро, сближая нуклоны.

Наиболее эффективный путь к уплотнению — столкновение двух сложных ядер. Теоретические оценки показывают, что при столкновении тяжелых ионов с относительной энергией на нуклон, несколько превышающей энергию Ферми (порядка 40 МэВ), можно надеяться на уплотнение ядра в два раза. При увеличении энергии столкновения возможно дальнейшее уплотнение ядерного вещества, и при энергиях порядка нескольких сотен МэВ на нуклон может возникнуть явление, аналогичное ударной волне; при этом плотность ρ в области фронта может в 4—6 раз превышать плотность ρ_0 обычного ядра. Если зависимость полной энергии ядра от его формы (при постоянной плотности) изучена уже достаточно хорошо как экспериментально, так и теоретически, то зависимость энергии от плотности — диаграмма состояния ядерного вещества — остается совершенно неясной даже качественно.

В настоящее время нельзя исключить, что при некотором значении плотности $\rho > \rho_0$ существует еще одно связанное состояние ядерного вещества, метастабильное, или даже более устойчивое (более выгодное энергетически). В последние годы предложен ряд механизмов, которые могли бы приводить к образованию и существованию сверхплотных ядерных состояний. Так, академиком А. Б. Мигдалом предложена и вместе с его сотрудниками развита теория пионной конденсации в ядрах*, согласно которой ядерное вещество, начиная с некоторой критической плотности $\rho_{кр} > \rho_0$ становится неустойчивым относительно рождения связанных л-мезонов и переходит в состояние с пионным конденсатом. При этом выигрывает в энергии, обусловленный таким фазовым переходом, может привести к появлению устойчивого ядерного состояния, плотность которого в несколько раз превышает плотность обычного ядра. Существуют также и другие предсказания, в частности аномальное состояние Ли и Вика — новое сверхплотное состояние ядра, которое может образовываться в результате фазового перехода в том случае, если при сильном сжатии ядерное вещество становится неустойчивым относительно рождения нуклон-антинуклонных пар. Однако, как показано А. Б. Мигдалом, если такое состояние и возникает, то при очень больших плотностях $\rho \geq 100\rho_0$.

Поскольку свойства ядер с повышенной плотностью должны

* См. статью А. Б. Мигдала «Динамика нейтронных звезд и пионная конденсация» в этом выпуске ежегодника. — Ред.

существенно отличаться от тех, которыми обладают нормальные ядра, их экспериментальное обнаружение положило бы начало новой области в ядерной физике. Эти интереснейшие возможности теории предсказывает лишь качественно. Количественная неопределенность теоретических оценок весьма велика, и при некоторых, априори столь же разумных значениях ядерных констант, входящих в расчет и не известных с необходимой точностью, стоит минимум на кривой «энергия — плотность»^{*} будет отсутствовать — уплотнение ядра будет сопровождаться монотонным увеличением его энергии, и тогда сжатие не приведет к образованию стабильного или квазистабильного уплотненного ядра. Ответ на этот и многие другие вопросы предстоит получить путем экспериментальных исследований сжимаемости ядра прежде всего на пучках тяжелых ионов, и, несмотря на всю неопределенность теоретических предсказаний, подобные эксперименты представляются необычайно ценными и своевременными. В любом случае они приведут к принципиальному уточнению теории, к существенному развитию и обобщению наших представлений об атомном ядре и силах, действующих между нуклонами на малых расстояниях.

Уникальные свойства тяжелых ионов позволяют получить и исследовать ядра, существенно отличающиеся от известных, либо находящиеся в необычных состояниях. Исключительно многообразие ядерных реакций, протекающих при взаимодействии тяжелых ионов с ядрами, огромное число доступных комбинаций ион — ядро мишени открывают благоприятные перспективы для получения изотопов известных элементов с большим избытком или недостатком нейтронов, значительно удаленных от области β -стабильности, для увеличения скачком заряда ядра (порядкового номера элемента) на 10—30 единиц, для проникновения в области неизвестных и недоступных другим методам тяжелых и сверхтяжелых элементов. По существу, ядерные реакции с тяжелыми ионами дают нам пример механизма нуклеосинтеза, не имеющего, по видимому, аналога в природе.

Тяжелые ионы позволяют получать ядра с очень высокой энергией возбуждения до 150—200 МэВ и с предельно большим угловым моментом, т. е. быстро, «бешено» вращающиеся ядра, исследовать эволюцию формы и внутренней структуры ядерных объектов в зависимости от их энергии возбуждения или частоты вращения.

Несколько более подробно мы хотели бы остановиться на проблеме существования сверхтяжелых элементов с $Z \geq 110$, которая — и это весьма примечательно — была поставлена перед

ядерной физикой в итоге стремительного развития исследований с тяжелыми ионами.

Основной процесс, определяющий устойчивость тяжелых ядер, и, следовательно, границы Периодической системы элементов Д. И. Менделеева, — спонтанное деление. Поэтому необходимым условием для существования сверхтяжелых ядер является наличие барьера, препятствующего их самопроизвольной деформации и распаду на два осколка.

С точки зрения классических представлений, заложенных Н. Бором и Дж. А. Уилером, тяжелое ядро становится абсолютно неустойчивым относительно спонтанного деления, если параметр Z^2/A , где Z — число протонов в ядре, а A — полное число нуклонов, достигает некоего критического значения $(Z^2/A)_{кр} \approx 46$. В такой модели ядро рассматривается по аналогии с каплей равномерно заряженной жидкости, и его поведение при деформации определяется конкуренцией двух сил классического происхождения: действующих между протонами и направленных на растяжение ядра, и короткодействующих сил кулоновского отталкивания, действующих между действующими ядерных сил между нуклонами, рассматриваемых как силы поверхностного натяжения, которые стремятся сократить площадь поверхности капли ядерного вещества и тем самым стабилизируют ее. В тяжелых ядрах эти две силы, имеющие противоположный знак, почти скомпенсированы: несмотря на то, что каждая из них очень велика, разностный эффект, который и определяет высоту барьера деления, составляет для тяжелых ядер, например для урана $(Z^2/A \approx 36)$, лишь 5—6 МэВ. Тем не менее в области урана барьер такой высоты приводит к времени жизни ядра относительно спонтанного деления порядка 10^{16} лет. По мере перехода в область более тяжелых ядер кулоновские силы возрастают гораздо быстрее сил поверхностного натяжения, высота барьера деления уменьшается, и при $(Z^2/A)_{кр}$ деление становится невозможным. Барьер исчезает, вследствие чего ядро оказывается абсолютно нестабильным относительно бесконечно малых самопроизвольных изменений формы и должно испытывать спонтанное деление за время порядка 10^{-22} с. Таким образом, в модели жидкой капли переход от урана ($Z = 92$) в область ядер с $Z = 110$ —116 должен сопровождаться катастрофической потерей устойчивости относительно спонтанного деления, характеризующейся фактором порядка 10^{40} .

Однако модель жидкой капли полностью игнорирует индивидуальную внутреннюю структуру ядер и поэтому дает лишь самые грубые представления об их устойчивости. Вместе с тем в последние 10—15 лет благодаря экспериментальному обнаружению спонтанно делящихся изомеров, ряда других явлений и факторов, связанных с изомерией формы атомных ядер и послуживших

* Первый минимум на этой кривой отвечает обычным ядрам.

правило, приводят к созданию принципиально новых теорий, методов, приборов, существенно обогащают смежные научные направления и — это особенно ценно — позволяют значительно продвигаться в решении важнейших научно-технических проблем.

Показателем в этом отношении прогресс в развитии ускорительной техники, вызванный потребностями физики тяжелых ионов.

Можно полагать, что история ускорения тяжелых ионов началась в 1940 г., когда Р. Альваресом на классическом циклотроне с диаметром полюсов электромагнита 93 см были получены отдельные следы ускоренных ионов углерода.

Дальнейшее развитие эти работы получили лишь 10 лет спустя, когда Дж. Фремли и его коллеги на циклотроне Бирмингемского университета ускорили ионы углерода, азота и кислорода с интенсивностью до 10^{10} частиц/с, что, безусловно, было очень большим достижением по сравнению с результатами первой попытки. В этих опытах процесс ускорения происходил в два этапа. В точнике ввиду малой его мощности образовывались лишь низзарядные ионы, которые тем не менее могли быть до некоторой степени ускорены на высшей гармонике высокочастотного электрического поля. Столкновение слегка ускоренных ионов с атомами остаточного газа в камере циклотрона приводило к перезарядке — увеличению заряда ионов, в результате чего некоторая их часть могла попасть в режим ускорения на основной гармонике высокочастотного потенциала, имеющей максимальную амплитуду, и, следовательно, получить достаточно большую энергию, необходимую для иницирования ядерных реакций. Естественно, что в таких условиях ускоренные ионы имели большой разброс по энергии, а интенсивность пучка была низкой и зависела от многих плохо контролируемых факторов. Тем не менее, пионерские эксперименты с тяжелыми ионами в Бирмингеме были выполнены и вызвали широкий интерес.

Принципиально метод двухкаскадного ускорения, в котором ионы в процессе набора энергии скачком увеличивают свой заряд, сыграл большую роль и послужил основой для создания целой серии ускорителей тяжелых ионов во многих лабораториях мира. Одним из первых среди них был линейный ускоритель NPLAC в Беркли (США), введенный в строй в 1957 г. С тех пор при сохранении принципиальной схемы — «предускоритель — перезарядка ионов — основной ускоритель» метод двухкаскадного ускорения претерпел существенное развитие и усовершенствование и нашел воплощение в весьма разнообразных конструктивных решениях: линейный ускоритель плюс линейный ускоритель, линейный ускоритель плюс циклотрон, циклотрон плюс циклотрон и др.

Мы полагаем, что наряду с этим возможен и другой подход к проблеме получения пучков тяжелых ионов — метод прямого

мощным стимулом для развития теории, было показано, что оболочечная структура ядра — большие неоднородности в спектре энергетических состояний индивидуальных частиц — оказывает существенное влияние на многие стороны процесса деления, в частности на высоту и форму барьера деления. В. М. Струтинским, которому принадлежит принципиально важный вклад в развитие и углубление представлений о роли оболочечных эффектов в ядрах, был создан теоретический аппарат, пригодный для реальных расчетов потенциальной энергии ядра как функции его формы и числа частиц. В этом подходе рассмотрение свойств ядра на основе макроскопической капельной модели удачным образом дополнено включением оболочечных, существенно квантовых эффектов, обусловленных особенностями движения отдельных частиц внутри ядра.

Такой макро-микроскопический метод оказался весьма плодотворным и позволил по-новому подойти к задаче определения барьеров деления, рассматривая теперь наряду с жидкокапельной составляющей барьера оболочечную поправку, которая является особенно заметной для сферических «магических» ядер. Многочисленные расчеты по методу В. М. Струтинского показали, что в районе $Z \sim 114$ и $N = 184$ существует довольно обширная область ядер, для которых барьер деления по разным оценкам имеет высоту от 8 до 14 МэВ. При наличии барьера деления такой величины, время жизни сверхтяжелых ядер (с учетом также других видов распада) может достигать 10^9 — 10^{11} лет, что сравнимо, например, с геологическим возрастом Земли.

Итак, существование или отсутствие целой области новых элементов прямо связано с тем, в какой степени справедливы наши сегодняшние представления о структуре ядра, базирующиеся на оболочечной модели. Поэтому получение ответа на вопрос о существовании сверхтяжелых элементов путем экспериментальных исследований изначально бы, пожалуй, наиболее критическую проверку концепции ядерных оболочек, успешно выдержавшей до сих пор многие испытания при объяснении свойств известных атомных ядер. Это и выдвигает проблему сверхтяжелых элементов в число самых актуальных и перспективных задач ядерной физики.

Подводя некоторый итог сказанному в целом, можно отметить, что физика тяжелых ионов — это прежде всего физика экстремальных ядерных состояний и физика ядерных превращений, протекающих в экстремальных условиях. Именно возможность исследования предельных, качественно необычных (революционных!) ядерных ситуаций, позволяет безусловно согласиться с высказыванием О. Бора о том, что в ближайшем десятилетии наиболее интересные результаты по ядерной физике будут получены с помощью тяжелых ионов. С другой стороны, опыт развития науки пока-зывает, что постановка и решение предельных научных задач, как

ускорения, в котором высокозарядные ионы получают непосредственно из ионного источника и далее могут быть ускорены сразу до конечной энергии. В этом случае наиболее эффективным ускорителем является циклотрон, где конечная энергия пропорциональна квадрату заряда иона, а не его первой степени, как это имеет место в линейном ускорителе. Это направление развития техники ускорения тяжелых ионов было выбрано в начале 50-х годов в Москве, в Институте атомной энергии и нашло горячее одобрение и поддержку его директора Игоря Васильевича Курчатова.

Здесь в коллективе, руководимом академиком Л. А. Арцимовичем, был создан в своей основе мощный источник многозарядных ионов плазменного типа. Это позволило получить пучки ускоренных тяжелых ионов на 150-см циклотроне Института атомной энергии, осуществить с ними первый цикл исследований по выяснению принципиальных особенностей взаимодействия тяжелых ионов с ядрами и уже в 1956 г. приступить к синтезу элемента 102.

Работы, выполненные в Москве, явились основой для дальнейшего развития прямого метода ускорения. В 1960 г. в Дубне, в Объединенном институте ядерных исследований, вступил в строй трехметровый классический циклотрон У-300 — первый циклотрон, предназначенный специально для ускорения тяжелых ионов. На протяжении 17 последующих лет эта установка оставалась лучшей среди действующих ускорителей тяжелых ионов и уверенно обеспечивала рекордные интенсивности пучков.

Итак, если первые попытки ускорения тяжелых ионов и первые эксперименты с ними проводились на плохо приспособленных для этого ускорителях легких частиц, то становление и развитие физики тяжелых ионов как самостоятельного направления физики ядра происходило на базе специальных ускорителей, предназначенных для получения ускоренных ионов с массой $A \leq 40$ и энергией до 10 МэВ/нуклон. Наибольшее развитие исследования с тяжелыми ионами получили после запуска линейного ускорителя НИЛАС в Беркли и циклотрона У-300 в Дубне.

С этими ускорителями — ускорителями тяжелых ионов первого поколения — связана целая плеяда фундаментальных достижений в изучении атомного ядра.

В частности, ученые Дубны, выполнив ряд основополагающих исследований, внесли большой вклад в развитие физики тяжелых ионов: впервые осуществили синтез 6 новых трансурановых элементов с $Z = 102-107$, открыли три новых вида радиоактивности — спонтанное деление ядер из изомерного состояния, существенно отличающегося по форме от основного, распад ядер путем испускания запаздывающих протонов, запаздывающее деление ядер, удаленных от области β -стабильности, происходящее после β -

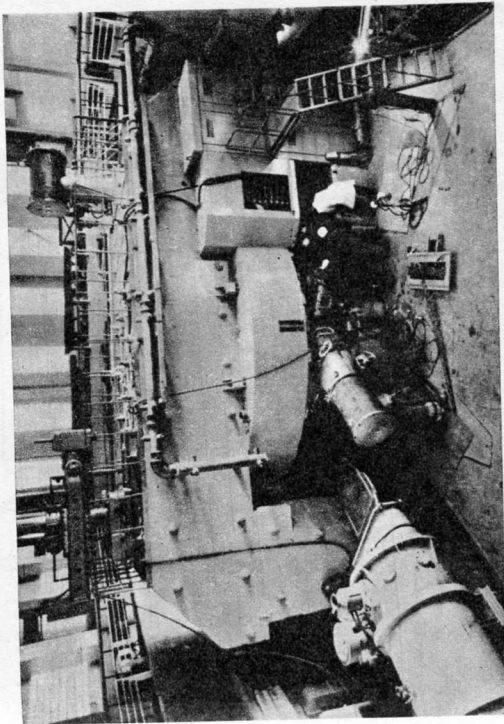


Рис. 1. Общий вид изохронного циклотрона У-400

распада. Была получена обширная информация о делении сложных возбужденных ядер, открыт новый класс ядерных реакций — реакции глубоконеупругой передачи нуклонов, синтезирован ряд новых изотопов с большим избытком нейтронов. Эти исследования в значительной степени показали актуальность и перспективность физики тяжелых ионов, стимулировали широкое развитие работ в этом направлении во многих странах мира, обладающих наиболее высоким научно-техническим и экономическим потенциалом.

Интерес к физике тяжелых ионов чрезвычайно возрос в последние десятилетия, в результате чего «география» центров, где проводятся подобные исследования, значительно расширилась: во многих странах построены или строятся новые мощные ускорители, специально предназначенные для получения пучков тяжелых ионов, создаются крупные экспериментальные установки для исследований. В ряде стран физика тяжелых ионов легла в основу национальных программ по ядерной физике. Так, вступил в строй линейный ускоритель UNILAC в Дармштадте (ФРГ), позволяющий ускорять ионы всех элементов, включая уран, до энергии около 10 МэВ/нуклон, реализуется проект по созданию национального ускорителя тяжелых ионов GANIL во Франции, сооружается гигантский тандем-ускоритель в Дарсбери (Англия), близки к завершению работы по сооружению национального ускорителя

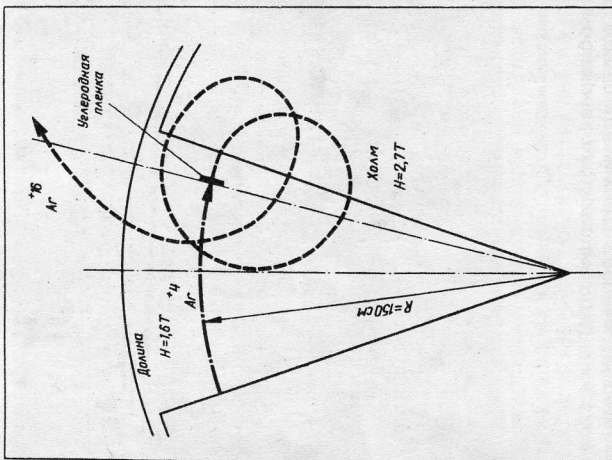
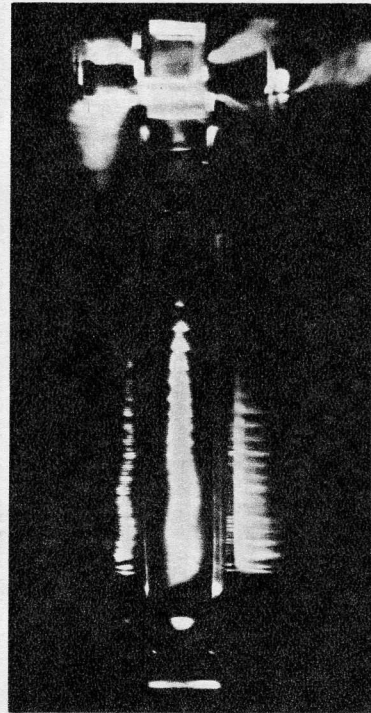


Рис. 2. Схема двухоборотного вывода пучка ионов из камеры циклотрона У-400

Рис. 3. Пучок ионов $^{40}\text{Ar}^{+4}$ внутри камеры циклотрона. Слева — сечение тонких фольгаемых нитей, вызванное пучком ионов. Свечение справа — источник ионов.



тяжелых ионов в Ок-Ридже (США). Разворачиваются работы также в ряде других стран. Эти установки второго поколения использовали новейшие достижения физики и техники ускорения тяжелых ионов, многих смежных областей техники, таких, как криогеника, вакуумная техника, высокочастотная электроника больших мощностей.

Одним из самых совершенных среди этих уникальных установок для ядерно-физических исследований, а по ряду важнейших параметров, в частности по интенсивности пучков, и самым мощным является интернациональный четырехметровый изохронный циклотрон У-400, пуск которого состоялся в Дубне, в Объединенном институте ядерных исследований, в последние дни декабря 1978 г. (рис. 1).

Новый ускоритель предназначен для получения интенсивных пучков быстрых ионов практически всех элементов таблицы Д. И. Менделеева. Основной диапазон по массовому числу ускоряемых частиц $20 \leq A \leq 140$. Ионы этого диапазона массы могут быть ускорены до энергии 10 МэВ/нуклон и ниже. Необходимую для прикладных исследований энергию 1—2 МэВ/нуклон можно получить для всех ионов с массовым числом $12 \leq A \leq 240$. Легкие частицы с $A \leq 20$ возможно ускорять до энергии 30—40 МэВ/нуклон.

При проектировании ускорителя основное внимание было уделено достижению высокой интенсивности пучков частиц основного диапазона массы. При этом конструкция была оптимизирована с точки зрения простоты сооружения ускорителя, высокой надежности работы и малой стоимости эксплуатации. В результате анализа различных вариантов выбор типа машины снова был сделан в пользу циклотрона: это направление техники ускорения тяжелых ионов стало традиционным для Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. В основу проекта ускорителя У-400, разработанного в ЛЯР ОИЯИ, положены итоги 20-летних экспериментальных исследований специалистов Лаборатории в области физики и техники ускорителей.

Существенными этапами этих исследований явились разработка ионных источников дугового типа, сооружение и эксплуатация классического циклотрона У-300, создание двухметрового изохронного циклотрона У-200, который был введен в строй в 1968 г. и явился прототипом ускорителя У-400 (масштаб 1:2), сооружение тандем-циклотрона У-300 → У-200 и получение на нем ускоренных ионов Хе, Кг, Ge.

Решение о сооружении ускорителя тяжелых ионов У-400 силами Лаборатории ядерных реакций и ряда других подразделений Объединенного института было принято в 1974 г. Первые детали будущего циклотрона начали обрабатывать 7 июля 1975 г. Монтаж ускорителя был закончен в августе 1978 г., а в ноябре начались работы с пучком. Месяц спустя пучок был доведен до конечного радиуса и выведен из камеры ускорителя.

Ускорение тяжелых ионов в У-400 осуществляется высококачественным электрическим полем в присутствии постоянного во времени, но изменяющегося по азимуту изохронного магнитного поля. Магнитное поле удерживает частицы на циклической орбите (спираль) и осуществляет жесткую фокусировку пучка.

Электромагнит циклотрона массой 2000 т собран из отдельных пакетов, изготовленных из листов обычной стали. Изготовление и сборка пакета остова магнита проводились непосредственно в циклотронном зале. Параллельно с этим осуществлялся монтаж электромагнита в целом. Уникальные станки для сборки и обработки пакетов остова были поставлены в Дубну из Чехословакии. Высокое качество изготовления и сборки электромагнита позволило получить рекордную для обычных (не использующих сверхпроводимость) методов напряженность магнитного поля. Она варьируется по азимуту от 2,7 Т в холме до 1,6 Т в долине, составляя в среднем около 2,2 Т. Это является отличительной особенностью У-400 — на конечном радиусе ускорителя (180 см) энергия ускоренных ионов с зарядом и массой А составляет около 700 (Z^2/A^2) МэВ/нуклон.

По интенсивности пучка частиц циклотрон У-400 должен по меньшей мере в несколько раз превосходить все существующие ускорители тяжелых ионов, вместе взятые. Как уже отмечалось, интенсивность пучка существующим образом определяется мощностью ионного источника. Сейчас в У-400 применяется источник многозарядных ионов плазменного типа. Будущее мы связываем с использованием в ускорителе У-400 ионного источника нового типа, основанного на применении столь плодотворно развивающихся в СССР лазерной физики и техники. Создание лазерного источника многозарядных тяжелых ионов, которое успешно осуществляется сейчас в Московском инженерно-физическом институте профессором Ю. А. Быковским и его сотрудниками, значительно расширит возможности циклотрона У-400 как по ассортименту ускоряемых частиц, так и по их энергии.

Одной из трудных задач циклотронного метода ускорения является вывод пучка частиц из вакуумной камеры ускорителя. В ускорителе У-400 эта задача решается нетрадиционно — для вывода пучка ионов используется метод перезарядки, предложенный двумя из авторов настоящей статьи в 1964 г.

Сущность этого метода состоит в том, что у ионов, проходящих через тончайшую углеродную пленку, увеличивается заряд, в результате чего возникает сильная радиальная неустойчивость движения — своеобразная «мертвая петля» в аксиально-неоднородном магнитном поле.

Описывая резко раскручивающуюся спираль с одним или двумя витками (поворот на 360° или $\approx 700^\circ$), частицы выходят из камеры ускорителя наружу (рис. 2). (Главное регулирование энергии ионов

достигается за счет перемещения углеродной пленки по радиусу, а ее перемещение по азимуту позволяет направлять пучки ионов разной энергии на мишень, находящуюся в фиксированном положении. Метод отличается высокой эффективностью вывода (до 90—95%), не требует создания сложных конфигураций сильных электрических полей, что необходимо в традиционных способах вывода. Дополнительным преимуществом этого метода является то, что применение двухоборотного вывода позволяет получать одновременно три пучка*, заряд ионов в которых отличается на одну или две единицы (например, $^{40}\text{Ar} + 16$, $^{40}\text{Ar} + 17$ и $^{40}\text{Ar} + 18$).

К настоящему времени на циклотроне У-400 получен пучок ионов $^{40}\text{Ar} + 4$ с интенсивностью в импульсе $2 \cdot 10^{14}$ частиц и энергией 5 МэВ/нуклон (рис. 3). В дальнейшем будет повышаться интенсивность и энергия пучков ионов, расширится ассортимент ускоряемых частиц, будут развиваться системы транспортировки выведенных пучков.

Естественно, что создание столь мощных ускорителей, позволяющих получать пучки тяжелых ионов в широком диапазоне масс и энергий, является сложнейшей научно-технической задачей и требует больших финансовых затрат.

Однако те уникальные свойства для фундаментальных и прикладных исследований, которыми обладают тяжелые ионы, оправдывают затраченные усилия.

Достижения физики тяжелых ионов, отдельные из которых мы упомянули выше, поистине впечатляющие. Вместе с тем единое мнение специалистов, работающих в этой области, таково, что сегодняшние результаты не исчерпывают возможностей для получения ценной информации о ядре, а составляют лишь малую долю того, что предстоит сделать в уже начатых направлениях. Число же направлений должно значительно расширяться. Естественно, что прогнозирование в столь стремительно развивающейся области исследований — задача весьма сложная и ответственная: одно «незапланированное» открытие может существенно изменить тщательно выверенные прогнозы. Отдавая себе отчет в этом, мы попытаемся тем не менее наметить здесь основные направления развития этой благодатной области исследований на ближайшие годы и в первую очередь остановимся на тех проблемах, которые представляются наиболее интересными и перспективными в связи с наступлением в строй ускорителя У-400.

Из всего многообразия возможных научных задач физики тяжелых ионов синтез новых элементов таблицы Д. И. Менделеева

* Поскольку взаимодействие ионов с веществом носит статистический характер, после прохождения перезаряжающей пленки в пучке присутствуют ионы с различным зарядом. Однако этот спектр зарядов достаточно узкий, так что отклонение заряда от наиболее вероятного больше чем на единицу наблюдается редко.

По оценкам, основанным на экстраполяции ряда экспериментальных результатов, и предсказаниям диффузионной теории столкновения сложных ядер, развитой западногерманским теоретиком В. Нёренбергом, вероятность такой передачи при определенных условиях достаточно заметна. Трудность, однако, состоит в том, что для интенсификации диффузии нуклонов приходится «нагревать» ядерную систему, т. е. повышать кинетическую энергию налетающих ионов, которая затем в процессе столкновения преобразуется в «тепло» за счет эффектов ядерной вязкости. Поэтому и продукты реакции, распределяя при распаде промежуточной системы ее энергию возбуждения между собой, получают сильно «нагретыми», возбужденными, в особенности более тяжелый. Тяжелые же ядра, как известно, весьма неустойчивы по отношению к делению, и потому, будучи сильно возбужденными, они более охотно испытывают мгновенное деление на два осколка, нежели «охлаждение» путем испарения нескольких нейтронов.

Таким образом, тяжелые и сверхтяжелые ядра, если они и образуются в процессе столкновения, выживают очень редко — в одном случае из 10⁶ или еще реже. Этим и объясняется сейчас тот экспериментальный факт, что в реакции U + U выходы тяжелых ядер с Z ≥ 100 в основном состоянии крайне низки. Тем не менее этот путь к сверхтяжелым еще далеко не исчерпан, и, в частности, особые надежды связываются с увеличением выхода сверхтяжелых элементов при замене урановой мишени мишенью из ²⁴⁸Cm или ²⁴⁹Cf.

Другой, на наш взгляд, более эффективный путь к синтезу сверхтяжелых элементов состоит в использовании реакций полного слияния тяжелого ядра-мишени с ускоренными ионами ⁴⁸Ca — эти частицы обладают поистине замечательными свойствами. Большой избыток нейтронов в ядре ⁴⁸Ca (8 нейтронов сверх двух магического образования ⁴⁰₂₀Ca) позволяет свести к минимуму нейтронный дефицит синтезируемых ядер по сравнению с реакциями полного слияния на других ионах. С другой стороны, если кинетическую энергию ионов ⁴⁸Ca выбрать близкой к кулоновскому барьеру системы ион — мишень, то энергия возбуждения составного ядра ²³⁸U + ⁴⁸Ca, которое образуется, например, в реакции ²⁴⁴Pu + ⁴⁸Ca, будет невелика — оно будет почти «холодным», поскольку перестройка системы сталкивающихся ядер в новую, соответствующую составному ядру, требует значительных энергетических затрат.

Несмотря на столь очевидные достоинства, ионы ⁴⁸Ca вплоть до 1976 г. нигде не ускорились. Причина этого состоит в том, что содержание ⁴⁸Ca в естественной смеси изотопов кальция очень мало (0,18%), а его выделение — задача весьма сложная и дорогостоящая. Мировой запас этого изотопа составляет, по-видимому, всего несколько десятков граммов.

безусловно является наиболее сложной и принципиальной проблемой, давшей значительный импульс развитию нового поколения ускорителей, методов исследования, экспериментальных установок. Мы уже отметили, что пучки тяжелых ионов — единственное средство для проникновения в область трансфермиевых элементов с Z > 100. Именно таким образом в этой области получено 6 новых химических элементов. Основные же перспективы этого направления связаны с возможностью получения сверхтяжелых элементов с Z ≥ 110, повышенная стабильность которых предсказана теоретически. Несмотря на то, что многочисленные усилия, затраченные на искусственный синтез сверхтяжелых элементов в ядерных реакциях, пока не привели к желаемому результату, важность решения этой задачи настолько велика, что она продолжает оставаться необычайно актуальной, и физики ведущих ядерно-физических лабораторий мира настойчиво пытаются отыскать новые пути к достижению острова сверхтяжелых элементов. Наиболее перспективными представляются в настоящее время два подхода.

Один из них состоит в использовании реакций между предельно тяжелыми ядрами, таких, как Xe + U или U + U. Большой цикл экспериментов по синтезу сверхтяжелых элементов в подобных реакциях был выполнен в Дубне в 1972—1973 гг., когда два цикла трона Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ — U-300 и U-200 были введены в режим совместной работы и на tandem-ускорителе U-300 → U-200 были впервые получены пучки ионов Xe с энергией около 1 ГэВ. В настоящее время этот подход развивается в Дармштадте (ФРГ), где исследуется реакция U + U.

Согласно принятой в настоящее время точке зрения облучение мишени из ²³⁸U ускоренными ионами ²³⁸U приводит к образованию гигантской гантелеобразной промежуточной системы с Z = 184, обладающей сравнительно большим в ядерном масштабе временем жизни — ≤ 10⁻²¹с. В принципе этого времени достаточно для того, чтобы процесс своеобразной ядерной диффузии, происходящей в зоне перекрытия сталкивающихся ядер, привел к перемещению от одного ядра к другому нескольких десятков нуклонов, прежде чем образовавшаяся составная система вновь распадется на две части. На процесс передачи большого числа нуклонов и возлагаются надежды в этом подходе. Для того чтобы в реакции получило сверхтяжелое ядро, например ²³⁸U + ²³⁸U, необходимо, как нетрудно видеть, передать от одного ядра к другому около 60 нуклонов — 22 протона и 38 нейтронов:



Кроме того, калций как химический элемент не имеет подходящих газообразных соединений, что исключает возможность его использования в ионных источниках обычного типа с рабочим веществом в виде газа.

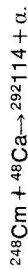
Эта сложнейшая научно-техническая задача в полном объеме была решена в Лаборатории ядерных реакций на ускорителе У-300, что позволило впервые получить пучок ускоренных ионов ^{48}Ca с интенсивностью около 10^{12} частиц/с и энергией 260 МэВ и провести первый цикл экспериментов по синтезу сверхтяжелых элементов. Впоследствии подобные эксперименты были поставлены также в Радиационной лаборатории им. Лоуренса в Беркли (США). Однако в результате длительных и трудоемких экспериментов по облучению различных трансурановых мишеней ионами ^{48}Ca не было обнаружено радиоактивного распада, который можно было бы отнести к сверхтяжелым элементам. Это означает прежде всего, что необходимо повышение чувствительности опытов и увеличение быстродействия аппаратуры, регистрирующей радиоактивный распад; искусственные сверхтяжелые изотопы могут оканчиваться весьма короткоживущими. Ускоритель У-400 представляет качество новые возможности для развития этих исследований. Интенсивность пучка ионов ^{48}Ca на У-400 будет по крайней мере в 100 раз превосходить все, что имело место до сих пор, и это обещает 100-кратное увеличение чувствительности. Кроме того, ставит возможным на 10 и более порядков увеличить быстродействие аппаратуры: с помощью современных методов, разрабатываемых для экспериментов на ускорителе У-400, мыслимы попытки получения сверхтяжелых элементов с временами жизни вплоть до 10^{-7} с.

Наряду с этим в самое последнее время в результате исследований механизма взаимодействия сложных ядер появилась возможность указать новый интересный подход к проблеме получения сверхтяжелых ядер. Недавние эксперименты, проведенные в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ, показали, что при столкновении тяжелых ионов с ядрами проявляется механизм своеобразной ядерной кумуляции — сосредоточение большей части доступной энергии на одной частице, покидающей систему. Так, например, при облучении мишени из ^{197}Au ускоренными ионами ^{40}Ar с большой вероятностью наблюдается эмиссия высокоэнергичных α -частиц.

По предварительным данным, выход этих α -частиц достаточно велик, а их энергия достигает 60—80 МэВ, т. е. 15—20 МэВ/нуклон. В то же время энергия налетающих ионов ^{40}Ar составляет всего 5—8 МэВ/нуклон. Ни вероятность эмиссии таких α -частиц, ни их энергетический спектр не описываются в рамках сложившихся теоретических представлений, в частности, как в рамках статистической модели испарения частиц из возбужденных ядер.

так и с помощью обычных моделей, развитых для интерпретации прямых процессов.

Этот необыкновенный механизм, исследование которого только начинается, в будущем может иметь определяющее значение в проблеме синтеза сверхтяжелых элементов. В самом деле, если имеет место эмиссия столь энергичных α -частиц, то это означает, что после вылета α -частицы остаточное ядро может оказаться совершенно «холодным». Тогда становится возможной, например, такая реакция:



Получение же сверхтяжелого ядра «холодным» и есть решение ключевой задачи при синтезе сверхтяжелых элементов. Важное дополнительное преимущество реакций с вылетом α -частицы заключается в том, что в этом случае синтезируемое сверхтяжелое ядро содержится на несколько нейтронов больше в отличие от обычных реакций полного слияния с испарением 2—3 нейтронов из возбужденного составного ядра, т. е. оказывается по числу нейтронов на несколько единиц ближе к магическому с $N = 184$ и, следовательно, более долгоживущим.

С проблемой искусственного получения сверхтяжелых элементов в ядерных реакциях между сложными ядрами неразрывно связана проблема поиска их в природе. Теория отнюдь не исключает, что период полураспада наиболее стабильных сверхтяжелых ядер может быть сравнимым с возрастом Земли, и тогда вполне вероятно, что, образовавшись в момент зарождения Солнечной системы, они сохранились до наших дней. Поскольку до настоящего времени сверхтяжелые элементы не были обнаружены, это может означать, что их концентрация является крайне низкой. Поэтому сейчас во многих лабораториях мира различными методами ведется поиск сверхтяжелых элементов в природе, включая не только земные образцы, но и космические объекты, в частности, метеориты, а также галактические космические лучи.

Современная наука располагает чрезвычайно мощными методами для обнаружения ультрамалых количеств сверхтяжелых элементов. Наиболее чувствительными из них являются те, которые основаны на детектировании продуктов радиоактивного распада ядер, в особенности спонтанного деления. Достаточно указать, например, что в Дубне на пути непрерывного повышения чувствительности, борьбы с фоном, увеличения надежности создана и используется установка, способная регистрировать распад ядра сверхтяжелого элемента, если его концентрация в образце составляет 10^{-14} г на 1 г. На протяжении многих лет эта чувствительность является рекордной.

Экспериментальные установки, обладающие столь высокой

чувствительностью, позволили зарегистрировать новый природный спонтанно делящийся нуклид в ряде земных и космических объектов — в метеорите Алленде, принадлежащем к классу углистых хондритов, в железо-марганцевых конкрециях, в геотермальных водах. Все эти объекты содержат ультрамалые, но вместе с тем вполне измеримые количества нового излучателя осколков спонтанного деления, позволяющие даже получить некоторые оценки его физических и химических свойств. Безусловно, главные задачи будущих исследований в этой области связаны с разработкой эффективных методов концентрирования и выделения сверхтяжелых элементов, с тем чтобы получить основные весовые количества этих элементов порядка сотых долей микрограмма. Опыты в этом направлении уже проводятся в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Важность выделения сверхтяжелых элементов из природных образцов трудно переоценить. Подобно тому, как уран явился исходным материалом для получения 15 новых искусственных трансурановых элементов, один долгоживущий сверхтяжелый нуклид мог бы послужить великолепной стартовой площадкой для расширения области сверхтяжелых элементов. Здесь можно назвать два направления. Используя ускорители легких частиц, которые уже сейчас дают пучки дейтронов, α -частиц интенсивностью в десятки миллиампер, можно продвигаться по острову стабильности в сторону дальнейшего увеличения порядкового номера Z сверхтяжелых ядер. Использование мощных потоков γ -квантов, которые достигаются в современных микрофонах и других установках, позволило бы получать ядра с меньшими Z . Особенно же привлекательной представляется возможность облучения сверхтяжелых ядер тяжелыми ионами, такими, как ^{24}Mg или ^{27}Al для того, чтобы попытаться проникнуть в области ядер с $Z \sim 126$, которая сейчас при использовании любых существующих мишеней является, по-видимому, практически недоступной.

Реализация этих возможностей означала бы принципиально существенное расширение «географии» ядер, расположенных за классическим (жидкокапельным) пределом устойчивости относительно спонтанного деления, явилась бы исключительно мощным стимулом для развития теории ядра и имела бы важное значение для ряда смежных областей науки.

Выше мы кратко рассмотрели лишь одно, главное направление будущих исследований на ускорителе У-400 — синтез элементов в новой области стабильности. Вполне естественно, что оно органически включает в себя многие отдельные перспективные направления работ, в частности, такие, как успешно развивающийся последовательный синтез новых химических элементов таблицы Д. И. Менделеева, в котором, шаг за шагом увеличивая Z ядра на единицу, к настоящему времени удалось получить уже два изотопа

107-го элемента и приступить к синтезу элемента с атомным номером 108; физика деления ядер, которая дала жизнь многим замечательным открытиям, идеям и предсказаниям в ядерной физике и, несмотря на солидный для научной проблемы 40-летний возраст, продолжает оставаться актуальной, получив второе рождение с внедрением тяжелых ионов в практику ядерно-физического эксперимента; исследования механизма взаимодействия сложных ядер, в особенности такие, в которых удается изучать процесс столкновения во «временной развертке»; получение и изучение свойств новых изотопов, удаленных от области β -стабильности, — по оценкам, даже в области известных элементов можно получить более 6000 различных изотопов, и это в несколько раз превосходит число всех стабильных и радиоактивных ядер, известных в ядерной физике до сих пор; исследование ряда актуальных проблем атомной физики и квантовой электродинамики сверхсильных полей и многое, многое другое. Ускоритель У-400 обеспечивает качественно новые возможности для исследований по всем этим направлениям.

Вместе с тем использование тяжелых ионов не только создает прочную основу для плодотворного развития фундаментальных исследований по физике ядра, но и открывает уникальные возможности для решения многих актуальных прикладных задач. Практическое применения пучков тяжелых ионов чрезвычайно разнообразны и обнаруживаются во многих отраслях современной техники и технологии; в биологии, медицине, сельском хозяйстве и т. д. Мы кратко остановимся лишь на двух аспектах этих применений, которые представляют наибольший практический интерес сейчас и значение которых еще более возрастет в будущем.

Тяжелые ионы позволяют не только осуществлять экстремальное воздействие на вещество. С точки зрения практических применений одним из важнейших свойств ускоренных тяжелых ионов является высокий уровень удельных потерь энергии при прохождении через вещество. Благодаря этому с помощью пучка тяжелых ионов можно достигать плотности энерговыделения в веществе порядка 100 кВт/см² и вызывать сильную деструкцию материала. Наиболее подходящими для этого оказываются тяжелые ионы с массой $A \lesssim 100$ и энергией 2—3 МэВ/нуклон. Важно, что при таких энергиях облучение тяжелыми ионами не вызывает ядерных реакций и, следовательно, не приводит к возникновению наведенной радиоактивности. С этим замечательным свойством пучков тяжелых ионов связаны многие их применения на практике.

Широкое развитие атомной энергетики в СССР и в социалистических странах на современном этапе выдвигает в числе наиболее важных применений пучков тяжелых ионов их использование для радиационного материаловедения, в частности, для моделирова-

ния радиационных повреждений, вызываемых быстрыми нейтронами в конструкционных материалах атомных реакторов. Быстрые нейтроны изменяют структуру облучаемого вещества, что приводит при больших дозах облучения к ряду крайне нежелательных последствий. Одним из них является радиационное распухание конструкционных материалов, т. е. увеличение их объема, которое может достигать 10—15% и является особенно интенсивным при достаточно высоких температурах, имеющих место в атомных реакторах. Большие дозы облучения могут приводить также к изменению других свойств материалов, в частности их устойчивости по отношению к различного типа деформациям и др. Эти явления в материалах зависят от многих условий и являются крайне сложными. Предсказать же результат длительного радиационного воздействия облучения на материалы теоретически в настоящее время невозможно. Необходимо моделировать эти процессы, однако экспериментальное изучение радиационных повреждений различных материалов непосредственно в существующих атомных реакторах является весьма трудной задачей. Типичное значение плотности потока быстрых нейтронов в мощном современном атомном реакторе составляет по порядку величины 10^{15} нейтрон/см²·с, в то время как заметные повреждения конструкционных материалов начинают сказываться лишь при значениях интегральной дозы облучения порядка 10^{22} нейтрон/см² и более. Поэтому для моделирования радиационных повреждений в атомных реакторах необходимы годы.

Задача тем более усложняется, если речь идет о выборе оптимальных материалов для атомных и термоядерных реакторов будущего, в которых плотность потока нейтронов будет заведомо превышать 10^{16} нейтрон/см²·с.

В этих условиях перспективным методом моделирования радиационных повреждений является использование тяжелых ионов — они оказываются эффективнее в 10^5 — 10^6 раз по сравнению с быстрыми нейтронами. Это означает, что процесс, который в самых мощных атомных реакторах длится несколько лет, с помощью пучка тяжелых ионов даже при интенсивности 10^{12} частиц/с (что составляет не более 1% предельной интенсивности пучка ионов на ускорителе У-400) может быть воспроизведен за несколько часов. Поэтому есть все основания считать, что в важной народнохозяйственной задаче — увеличении надежности и долговечности конструкций, создаваемых Атоммашем, — тяжелым ионом будет принадлежать большая роль.

С другой стороны, существует великолепная возможность использовать сильное деструктивное действие тяжелых ионов на материалы в соиздавательных целях — для получения ядерных фильтров.

Проходя сквозь тонкую пленку облучаемого вещества — слой

того или иного полимера, например лавсана, — тяжелые ионы образуют каналы сильных радиационных повреждений, которые при последующей химической обработке (травлении) превращаются в сквозные отверстия. Диаметр отверстий зависит от типа и энергии используемых ионов, от облучаемого материала и условий травления. Таким образом можно создавать совершенно идеальные фильтры со строго дозированным и большим числом микроотверстий на единицу площади (до 10^9 отверстий на 1 см²), имеющих строго определенный размер. Сегодня можно получать ядерные фильтры с размером пор от 40А до нескольких микрон, причем даже на ускорителе У-300 при интенсивности ионов Хе порядка 10^{12} — 10^{13} частиц/с и энергии 1 МэВ/нуклон можно легко производить многие сотни тысяч квадратных метров облученной пленки.

Область возможных применений ядерных фильтров чрезвычайно широка.

Достаточно напомнить, сколь остро поставлены сейчас перед обществом экологические проблемы, порожденные интенсивным развитием промышленного производства, непрерывным качественным обновлением технологии. Парадокс состоит в том, что современная технология производства, в свою очередь, все чаще сама предъявляет необычайно высокие «экологические» требования к чистоте среды технологических помещений, гораздо более высокие, чем те, которые вытекают из условий нормальной жизни и деятельности человека. Решение этих проблем имеет первостепенное значение, и здесь много важных применений найдут ядерные фильтры.

Уже сейчас ядерные фильтры с успехом используются в электронике, при изготовлении сложных систем для очистки различных газообразных и жидких материалов — воды, растворителей, кислот в пищевой промышленности, для активационных исследований загрязнений воды и воздуха при решении экологических проблем и т. д. С помощью алюминизированных ядерных фильтров можно создать тепловую изоляцию, практически не пропускающую излучение с длиной волны больше половины диаметра отверстия.

Особый интерес представляет изготовление ядерных фильтров из материалов, способных работать в условиях сильно агрессивных химических сред и высоких температур, что имеет большое значение для задач интенсификации химических процессов, реакторостроения и др. В этом отношении одним из перспективных материалов для будущих исследований и ядерных фильтров является синтетическая слюда.

Завершая этот краткий и по необходимости неполный обзор, мы хотели бы подчеркнуть, что двадцать пять лет использования пучков тяжелых ионов для исследования атомных ядер и ядерных

превращений не только продемонстрировали исключительную плодотворность этого направления, но и стимулировали постановку ряда новых крупномасштабных физических задач, решение которых предстоит получить в будущем. Качественно новый этап в развитии этих исследований открывает вступление в строй ускорителей тяжелых ионов второго поколения. В частности, с интенсивными пучками ионов циклотрона У-400 мы связываем большие надежды на решающее продвижение в область новых тяжелых и сверхтяжелых элементов, на самое широкое применение ускоренных тяжелых ионов как мощного и вместе с тем прецизионного инструмента для решения прикладных задач большого народного хозяйственного значения. ■



АРКАДИЙ БЕЙНУСОВИЧ МИГДАЛ — физик-теоретик, академик. Основная область исследований — теория ядра. В 1977 г. награжден премией имени Л. Д. Ландау АН СССР.

НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ И ПИОННАЯ КОНДЕНСАЦИЯ

Эйнштейну принадлежат слова: «Самое прекрасное и глубокое переживание, выпадающее на долю человека, — это ощущение таинственности». Не потому ли человека издавна волновало строение звезд, природа далеких миров?

Мы обсудим одну из загадок мироздания, в решении которой недавно удалось продвинуться вперед.

Вспышки сверхновых

Уже в древности астрономы наблюдали внезапно появляющиеся сверхяркие звезды. Сейчас это явление хорошо изучено и обнаружено не только в нашей Галактике, но и в других звездных скоплениях. Оно называется вспышкой сверхновой. Наиболее поразительным из всех остатков сверхновых звезд нашей Галактики можно считать Крабовидную туманность, которая наблюдается в том месте, где в 1054 г. вспыхнула яркая Сверхновая звезда, отмеченная в китайских и японских хрониках. В максимуме блеска светимость сверхновых звезд в миллиард раз превышает свети-