1980 г. Май *Том 131, вып. 1*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

539.143.2

ЭКЗОТИЧЕСКИЕ ЛЕГКИЕ ЯДРА *)

Д. Черни, А. Посканцер

Ядра легких элементов с неравным числом протонов и нейтронов резко неустойчивы. Однако некоторые из этих ядер живут достаточно долго так, что могут быть зарегистрированы; для этих ядер характерны необычные виды распада.

Вообще говоря, атомные ядра можно составить из широкого набора сочетаний протонов и нейтронов. Однако ядра, соответствующие большей части таких сочетаний, не существуют: даже если такие ядра можно было бы образовать, то распад их происходил бы слишком быстро, и прямая регистрация этих ядер невозможна. Тем не менее расчеты показывают, что около 8000 ядер обладает временем жизни достаточным, чтобы объявить их существующими. Примерно 300 из этого числа абсолютно устойчивы, и поэтому относятся к самым обычным ядрам, имеющимся в природе. Еще 1600 известных ядер неустойчивы к различным видам распада, которые объединяются термином радиоактивность. Таким образом, остается еще около 6000 ядер, которые должны существовать, но пока не обнаружены.

Наиболее полно изучены ядра самых легких элементов, главным образом первых двадцати элементов Периодической таблицы Менделеева. В этой области стабильные ядра состоят из примерно равного числа протонов и нейтронов и, как правило, чем больше нарушается это равенство, тем короче становится время жизни ядра. Те ядра, которые находятся далеко от линии стабильности, называются «экзотическими» легкими ядрами.

В настоящее время среди обычных элементов Земли нет таких экзотических ядер: во многих случаях их времена жизни измеряются секундами, а часто для экзотических ядер характерные времена жизни еще гораздо меньше. Такие необычные ядра могут быть созданы в лабораториях при бомбардировке стабильных ядер ускоренными протонами или более тяжелыми частицами. Даже в этих условиях малые времена жизни затрудняют экспериментальные исследования, поскольку все сведения о ядрах, которые могут быть получены, должны быть собраны в краткий промежуток времени между образованием экзотических ядер и их распадом.

---

*) Cerny Joseph, Poskanzer Arthur M. Exotic Light Nuclei.— Scientific American, June 1978, v. 238, pp. 48—60.— Перевод В. З. Гольдберга.

Дж. Черни — профессор химии, декан химического факультета Калифорнийского университета в Беркли, США, и начальник отдела ядерной химии Лаборатории им. Э. Лоуренса в Беркли при том же университете; А. Посканцер — старший научный сотрудник указанной лаборатории и научный руководитель «Бевалака» — ускорителя тяжелых ионов высокой энергии.

© Scientific American, Inc, 1978

© Перевод на русский язык, издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы «Успехи физических наук», 1980.

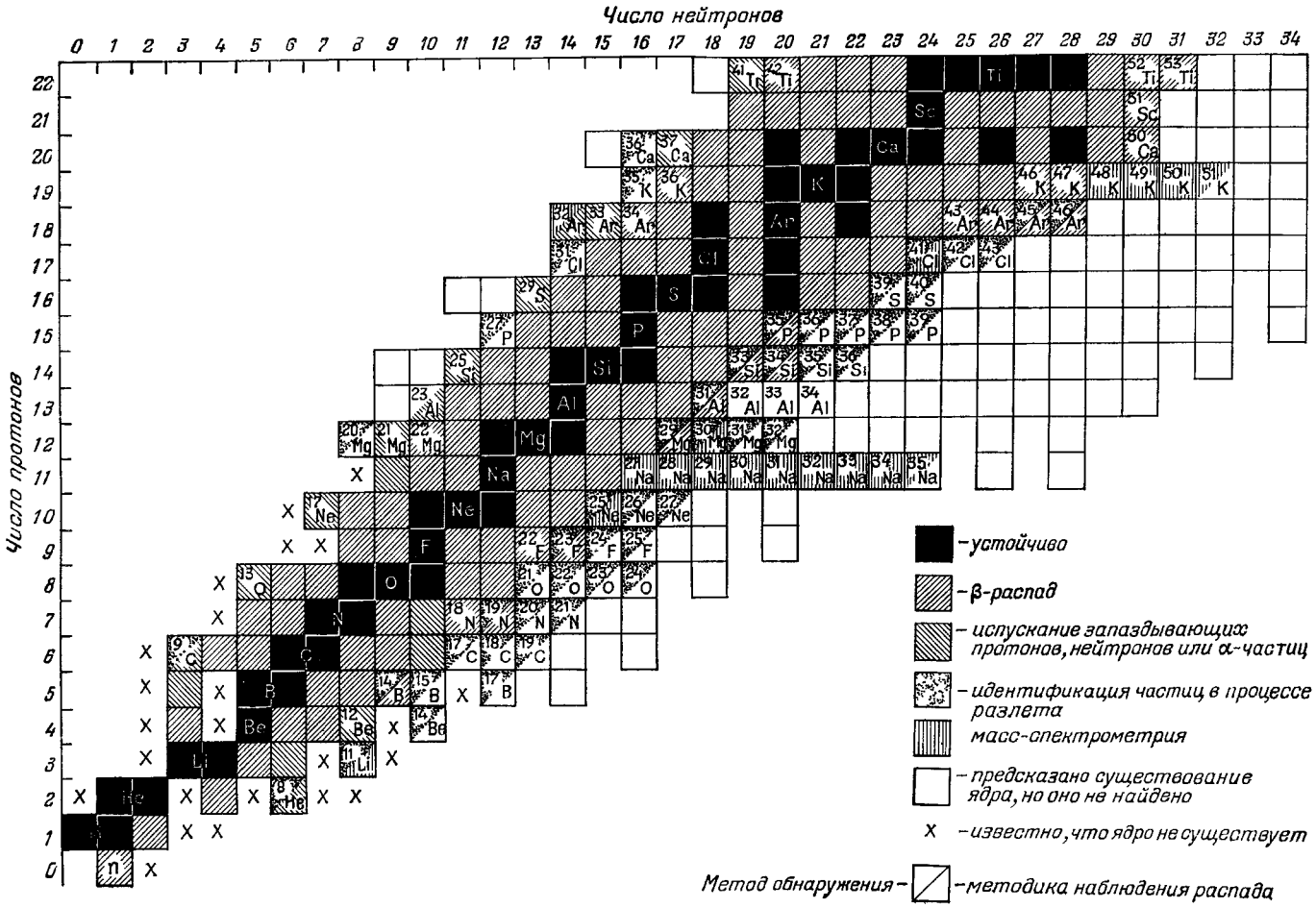

Рис. 1. Таблица ядер.

Дана систематизация ядер по их составу Каждый квадрат соответствует единственной комбинации числа протонов и числа нейтронов Верхняя левая половина квадрата указывает на метод, которым было обнаружено ядро, нижняя правая половина — на метод изучения распада ядра Наиболее устойчивые ядра легких элементов (первые 22 указаны в таблице) обычно соответствуют комбинациям из примерно равного числа протонов и нейтронов Экзотические ядра — такие ядра, у которых это обычное соотношение сильно нарушается Нейтронно-избыточные экзотические ядра лежат на правом крае последовательности ядер, а нейтронно-дефицитные — на левом Ядра, отмеченные символом, находящимся внутри соответствующего квадрата, обнаружены после 1961 г , т е после опубликования одной из обширных таблиц ядер, известных в то время

Идентифицировано около 200 ядер самых легких элементов периодической системы (вплоть до кальция); из них можно примерно 40 процентов рассматривать как экзотические. Теоретические расчеты показывают, что должно существовать еще 110 других изотопов элементов, относящихся к этой области периодической таблицы, которые находятся даже дальше от линии стабильности. Легче всего достигнуть предельных отношений числа протонов к числу нейтронов в легких ядрах просто потому, что здесь заданное отношение соответствует меньшему численному избытку. По этой причине легкие элементы дают прекрасную возможность изучения свойств экзотических ядер, многие из которых должны обладать необычными размерами, формой и спектром энергетических уровней. Многие из ядер характеризуются также необычными видами радиоактивного распада, и исследования таких распадов проводятся в лабораториях в настоящее время.

□

Для того чтобы идентифицировать ядро, необходимо определить в нем как число протонов, так и число нейтронов. По соглашению, обычно это делают путем указания числа протонов (атомного номера) и суммы числа протонов и нейтронов, величины, называемой массовым числом. Когда эти числа записывают вместе с символом химического элемента, то массовое число помещают над символом, а число протонов под символом. (Часто число протонов опускают, поскольку символ каждого элемента соответствует определенному числу протонов.) Таким образом, ядро бора, состоящее из пяти протонов и пяти нейтронов, обозначается символом $^{10}_{5}B$.

Протон и нейтрон принципиально различаются по своим электрическим свойствам: протон несет положительный единичный заряд, а нейтрон электрически нейтрален. Эти два типа частиц объединяют под названием нуклоны. Так как число протонов определяет электрический заряд ядра, то, следовательно, и конфигурацию электронного облака, окружающего ядро, а поэтому и химические свойства атома.

Итак, число протонов само по себе фиксирует элемент. Если в ядре содержится пять протонов, то такое ядро всегда есть ядро бора независимо от того, сколько в этом ядре содержится нейтронов. Ядра, состоящие из одинакового числа протонов, но разного числа нейтронов (следовательно, различающиеся массовыми числами),— изотопы. Поиск экзотических легких ядер, по существу, есть поиск самых легких и самых тяжелых изотопов элементов с числом протонов от единицы до двадцати.

Ядра могут существовать только потому, что сильно связанная группа нуклонов может иметь меньшую массу, чем сумма масс отдельных нуклонов. Небольшая «пропавшая» масса, или дефект массы, это и есть энергия связи, удерживающая нуклоны в ядре. Можно считать, что нуклоны в ядре, как электроны в атоме, занимают дискретные энергетические уровни с определенной энергией. На самом нижнем уровне могут «поселиться» только два нуклона и по мере добавления следующих частиц они должны заселять уровни со все более высокой энергией. Важная черта такой энергетической структуры состоит в том, что можно рассматривать заполнение уровней нейтронами и протонами независимо.

Так, в ядре ^{4}He ($^{4}_{2}He$) на самом нижнем уровне могут находиться два протона и одновременно два нейтрона. Если бы все четыре частицы были протоны, то две из них должны были занять более высокий энергетический уровень, что привело бы к образованию ядра с большей массой. Таким

образом, в области легких ядер, ядра с равным числом протонов и нейтронов имеют шансы оказаться самыми устойчивыми.

Если бы соотношение между числом нейтронов и протонов было единственным условием, влияющим на устойчивость ядер, то все стабильные ядра имели бы примерно равное число протонов и нейтронов. На самом деле, есть и другой фактор, который играет все бо́льшую роль по мере увеличения числа протонов, а именно,— увеличение электростатического отталкивания между протонами, уменьшающее энергию связи ядер.

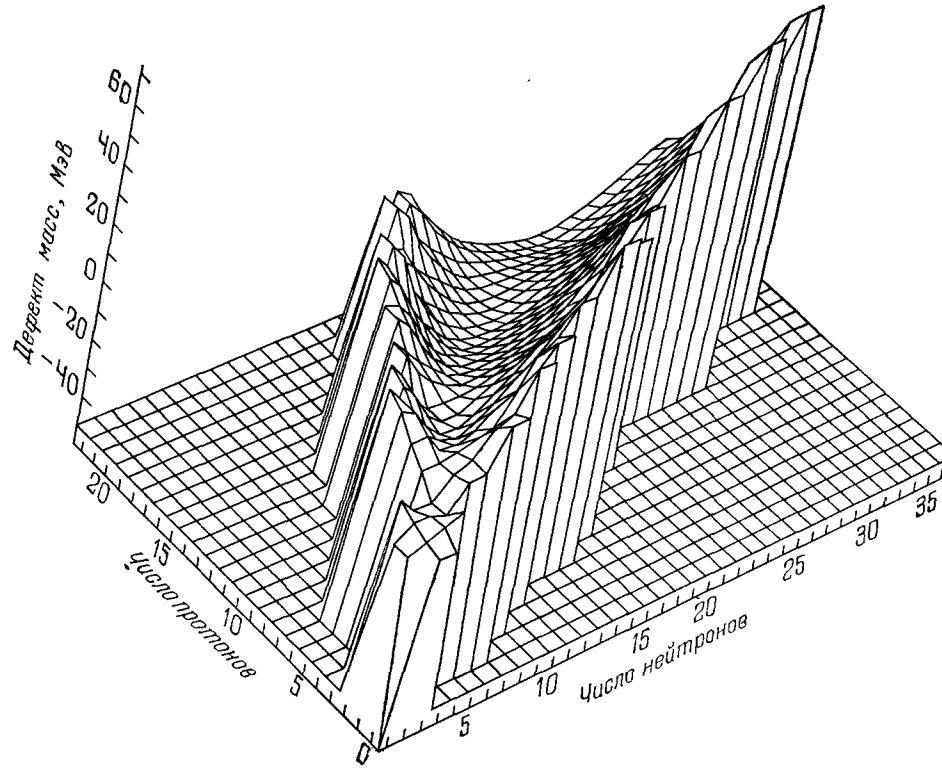

Рис. 2. Долина устойчивости заполнена ядрами, которые обладают минимальной массой и являются устойчивыми.

Эта долина очерчена с помощью указания на графике дефекта масс для каждого ядра. Дефект масс связан с отрицательными значениями энергии связи, причем дефект масс, равный нулю, приписывается ядру-реперу. В качестве такого ядра выбран изотоп углерода с массовым числом 12 ($^{12}_{6}C$). Ядра н ѐсклонах, возвышающихся над долиной, способны к уменьшению дефекта масс путем распада на более устойчивые ядра. Экзотические ядра, занимающие места на самом верху по обеим сторонам долины стабильности, характеризуются наибольшим дефектом масс, и обычно эти ядра имеют наименьшие времена распада. Рисунок выполнен с помощью вычислительной машины Дж. Посканцером, сыном одного из авторов настоящей работы.

В результате, очень тяжелые ядра оказываются более устойчивыми, если они содержат избыток нейтронов, так, например, самый долгоживущий изотоп урана, $^{238}_{92}U$, содержит нейтронов почти в 1,6 раза больше, чем протонов.

Очень наглядно можно представить себе относительную устойчивость ядер с помощью графика, указывающего дефект массы на нуклон для каждого из ядер. Ядра, характеризующиеся наибольшим дефектом массы и, следовательно, наибольшей энергией связи, составляют «долину» стабильности. Эта долина пересекает область легких элементов вдоль элементов с примерно равным числом протонов и нейтронов, затем, по мере

перехода к более тяжелым, долина отклоняется в сторону ядер с увеличивающимся избытком нейтронов. По обе стороны от этой долины, образуя пологие склоны, лежат менее устойчивые ядра с меньшим дефектом массы. Экзотические ядра лежат на самых верхних, крутых частях склонов, занятых как нейтронно-избыточными, так и нейтронно-дефицитными ядрами.

Отношение числа протонов к числу нейтронов и абсолютное число протонов определяют основные параметры долины стабильности, однако существует еще один фактор, влиянием которого на устойчивость ядер нельзя пренебрегать. Ядра с четным числом протонов или нейтронов или с четным числом обоих типов нуклонов характеризуются несколько повышенной устойчивостью. Такое небольшое увеличение устойчивости оказывается особенно важным для экзотических легких ядер; иногда можно добавить два нуклона к ядру и получить новое, в то время как промежуточное, с одним «лишним» нуклоном, может не существовать.

□

Следует отметить, что все нуклоны не всегда расположены на самых нижних возможных уровнях энергии. Если один нуклон или несколько переброшены на более высокий энергетический уровень, то говорят, что ядро находится в возбужденном состоянии. Возбужденное состояние, разумеется, должно отвечать тому же комплекту протонов и нейтронов, что и основное состояние. Однако ядро в этом состоянии может отличаться размерами и формой. Также возбужденное состояние может отличаться от основного по орбитальному моменту. Дело в том, что каждый нуклон обладает собственным спином, равным 1/2 в естественных единицах, а нуклоны в ядре также имеют орбитальные моменты, связанные с их состоянием движения, которые всегда принимают целочисленные значения (опять в естественных единицах). Эти значения могут складываться или вычитаться в зависимости от взаимной ориентации моментов, давая, таким образом, полный орбитальный момент ядра.

Любое ядро, характеризующееся малым дефектом массы, или малой энергией связи, имеет тенденцию к распаду на ядро, лежащее ниже на склоне долины стабильности. Широко известны три вида радиоактивного распада, связанного с превращением одного элемента в другой: α- и β-распады и спонтанное деление. У экзотических ядер наблюдались дополнительные виды распадов, а еще несколько новых схем распада ожидается на основе теоретических предсказаний.

α-распад — это испускание ядра гелия ($^4_2$He). Когда уран-238 испускает α-частицу, то $^{238}_{92}$U превращается в изотоп тория—$^{234}_{90}$Th. Разница между массой ^{238}U и суммой масс $^{234}_{90}$Th и $^4_2$He соответствует энергии, примерно равной четырем миллионам электрон-вольт (МэВ). Эта энергия проявляется, главным образом, как кинетическая энергия α-частицы.

В области легких ядер наиболее обычный тип распада — это бета-распад, который бывает двух видов. При β^--распаде нейтрон в ядре превращается в протон и испускаются две частицы: электрон и антинейтрино. При β^+-распаде протон в ядре превращается в нейтрон, а испускаемые частицы — позитрон и нейтрино. Ни в одном из этих типов β-распада не меняется полное число нуклонов, однако, изменяется соотношение между числом протонов и нейтронов и химические свойства нуклеида. Например, нейтронно-дефицитный изотоп углерода $^{11}_6$C распадается путем испускания позитрона; при этом образуется устойчивое дочернее ядро $^{11}_5$B. Аналогичным образом $^{11}_4$Be, нейтронно-избыточный изотоп бериллия распадается с испусканием электрона, также давая $^{11}_5$B.

Спонтанное деление оказывается возможным при условии, что одно ядро можно разделить на два дочерних с общей массой, меньшей массы материнского. Калифорний-252 может распадаться путем спонтанного деления, давая, например, ядро молибдена и ядро бария; этот процесс

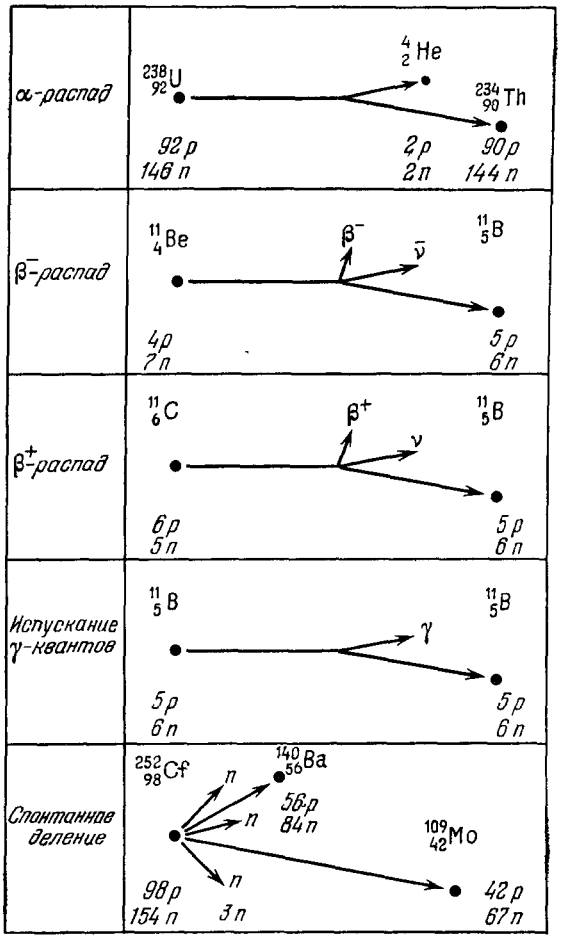

Рис. 3. Радиоактивные распады ведут к переходу ядра в более устойчивые конфигурации с меньшей энергией.

Давно уже известно четыре вида распада ядер: α-, β-, γ-излучение и спонтанное деление. Все эти виды распада, за исключением испускания γ-лучей, приводят к превращению одного химического элемента в другой. α-распад и спонтанное деление, главным образом характерны для превращений тяжелых элементов. Известны два типа β-распадов. При β⁻-распаде, соответствующем превращению нейтрона в протон, испускаются электрон и антинейтрино; при β⁺-распаде, когда протон превращается в нейтрон, испускаются позитрон (положительно заряженный электрон) и нейтрино. Нейтрино и антинейтрино — это частицы с массой покоя; равной нулю, исключительно слабо взаимодействующие с ядром. При γ-распаде нуклонный состав ядра не изменяется, но происходит переход с одного энергетического уровня на другой. Испускаемые γ-лучи — это фотоны высокой энергии, или кванты электромагнитного поля. Некоторые экзотические ядра распадаются более сложным путем, чем показано здесь. Общая черта, характерная для любых распадов,— уменьшение общей массы продуктов распада по сравнению с массой материнского ядра; именно это уменьшение массы и определяет возможность распада.

обычно сопровождается вылетом нескольких свободных нейтронов. Ядра — продукты деления обычно неустойчивы сами по себе и испытывают дальнейший распад.

Однако во всех случаях сумма их масс меньше массы материнского ядра $^{252}_{9}C$. (Энергия, освобождаемая в этом процессе, проявляется в кинетической энергии осколков деления.)

Есть еще один вид радиоактивного распада, при котором химические свойства ядра не изменяются. На самом деле при этом распаде не изменяется ни число протонов, ни число нейтронов. Это — испускание γ-лучей, и в этом случае происходит только изменение энергетического состояния ядра. γ-лучи — это фотоны с большой энергией, или кванты электромагнитного излучения.

Энергия γ-кванта соответствует разнице масс ядра в дочернем и материнском состояниях. Многие ядра-продукты радиоактивных распадов образуются в возбужденных состояниях, поэтому α- или β-распад часто сопровождается мгновенным испусканием γ-лучей.

□

Скорость радиоактивного распада обычно выражается через период полураспада, т. е. через промежуток времени, требуемый для того, чтобы половина атомов данного типа распалась. Характерные времена наблюдавшихся β-распадов находятся в диапазоне от 10^{-3} с до более, чем 10^5 лет, но даже самые малые времена жизни из этого диапазона являются сравнительно долгими в рамках субатомных событий. Эта задержка обусловлена, главным образом, слабостью фундаментального процесса, ведущего к превращению одного вида нуклона в ядре в другой. Ряд других ядерных процессов, которые не связаны с таким превращением, могут протекать гораздо быстрее.

Одним из таких процессов, имеющих особое значение при изучении экзотических ядер, является спонтанное испускание нуклона. Ядро может распасться с испусканием протона или нейтрона при условии, что масса материнского ядра больше, чем общая масса дочернего ядра и испускаемого нуклона. Минимальное время, необходимое для такого распада, легко подсчитать: это просто время, требуемое нуклону, движущемуся с типичной скоростью 10^9 см/сек, для прохождения через ядро, типичный диаметр которого от 10^{-13} до 10^{-12} см. Это время оказывается в диапазоне от 10^{-21} до 10^{-22} с. Указанный промежуток времени может быть существенно больше из-за влияния различных барьеров, затормаживающих испускание нуклона, однако, только в исключительных случаях он превышает 10^{-16} с. Огромный зазор между типичными временами жизни, связанными с β-распадом (10^{-3} с и больше), и с мгновенным испусканием нуклонов (10^{-6} с и меньше), обеспечивает удобные экспериментальные границы, разделяющие ядра, которые могут считаться существующими, от тех, которые не существуют. Теория позволяет рассчитать ядра, которые устойчивы к мгновенному испусканию нуклонов и, следовательно, должны существовать согласно приведенному выше критерию, и ядра, не устойчивые к такому распаду.

Одной из работ этого типа является ряд предсказаний, сделанных Д. Т. Гарви и И. Кельсоном, которые тогда работали в Йельском университете. Их метод заключается в расчете масс неизвестных экспериментально ядер с помощью экстраполяции масс известных ядер на основе модели независимых частиц.

Теоретические пределы устойчивости к мгновенному испусканию нуклонов и пределы, достигнутые экспериментально в настоящее время, можно проиллюстрировать на примере изотопов бора — элемента, у которого известны два устойчивых изотопа, $^{10}_{5}B$ и $^{11}_{5}B$. Относительно более легких изотопов бора известно, что $^{9}_{5}B$ неустойчив по отношению к очень быстрому испусканию протона и поэтому не существует. Однако изотоп с числом нейтронов меньшим еще на единицу, $^{8}_{5}B$, оказывается, существует; этот изотоп распадается путем испускания позитрона с периодом полураспада 0,8 сек. На другой стороне долины стабильности известны пять нейтронно-избыточных изотопов бора; самый тяжелый из них $^{17}_{5}B$, который, как ожидается, должен испытывать β^--распад, хотя его период полураспада не был измерен. Не ожидается, что существует изотоп $^{18}_{5}B$, однако, изотоп $^{19}_{5}B$ должен быть устойчив к испусканию нейтрона. Пока этот изотоп не был обнаружен.

Просмотр таблицы известных и предсказанных ядер позволяет обнаружить некоторые общие черты их распределения. Наиболее заметная тенденция состоит в резком увеличении числа изотопов при увеличении атомного номера. У водорода (атомный номер — единица) только три изотопа, у натрия (атомный номер — 11) известно 16 изотопов и еще два предсказано, у кальция (атомный номер — 20) ожидается 31 изотоп.

□

Другая общая черта этого распределения ядер состоит в том, что у всех элементов существует больше нейтронно-избыточных изотопов, чем нейтронно-дефицитных. Этот эффект является еще одним следствием электрического заряда протона. При добавлении протона к ядру, которое уже нейтронно-дефицитно, не только обостряется нарушение соотношения между протонами и нейтронами, но и увеличивается электростатическое

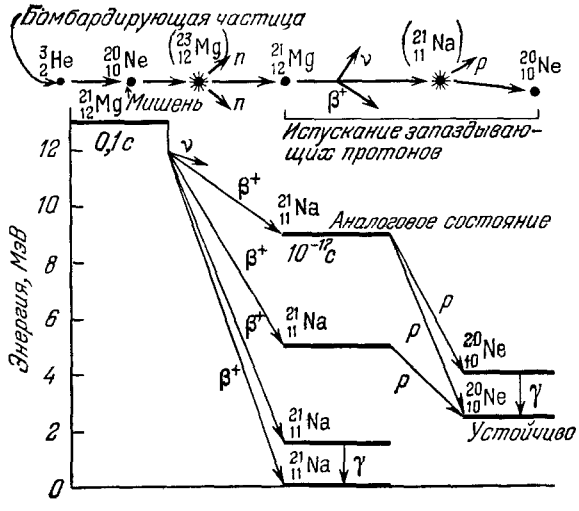

Рис. 4. Нейтронно-дефицитный изотоп магния $^{21}_{12}Mg$ в ряде случаев распадается путем необычного процесса испускания протонов, задержанного на время предыдущего β^+-распада (процесса испускания запаздывающих протонов).

Этот изотоп получали при бомбардировке атомов неона ускоренными ионами гелия-3. Такое взаимодействие приводило к образованию высоковозбужденных состояний ядра, которое испускало два нейтрона, давая таким образом $^{21}_{12}Mg$. Это ядро в свою очередь распадается путем β^+-излучения, превращаясь в изотоп натрия, $^{21}_{11}Na$. Часто этот изотоп натрия образуется в основном или низколежащем возбужденном состоянии, из которого может происходить переход в основное состояние путем γ-излучения. Однако в тех случаях, когда заселяется состояние с большей энергией возбуждения, ядро натрия быстро испускает протон, давая устойчивый изотоп неона, $^{20}_{10}Ne$. Поскольку ядро натрия испускает протон практически мгновенно, весь процесс можно рассматривать как двухступенчатый распад ядра $^{21}_{12}Mg$. Из основного состояния $^{21}_{12}Mg$ происходит сверхразрешенный β^+-распад с заселением состояния $^{21}_{11}Na$, которое называется аналоговым. В аналоговом состоянии взаимодействие нуклонов такое же, как и в материнском состоянии, из которого произошел распад; единственное различие состоит в замене протона на нейтрон.

отталкивание между протонами. Добавление нейтрона к нейтронно-избыточному ядру влияет только на соотношение между различными типами нуклонов.

Наибольший интерес в изучении экзотических ядер представляет область ядер, лежащих между теми, которые испытывают обычный β-распад, и ядрами, неустойчивыми по отношению к мгновенному испусканию нуклонов.

В этой области среди нейтронно-дефицитных ядер некоторые ядра распадаются путем двустадийного процесса, который называется испусканием запаздывающих (на время β^+-распада) протонов. Примером такого ядра является изотоп $^{21}_{12}Mg$, который содержит на три нейтрона меньше, чем самый легкий устойчивый изотоп магния ($^{24}_{12}Mg$). Изотоп $^{21}_{12}Mg$ сильно неустойчив из-за нехватки нейтронов и распадается путем испускания позитрона с периодом полураспада 0,12 с, превращаясь в ядро $^{21}_{11}Na$. Из основного состояния ядро $^{21}_{11}Na$ также распадается путем обычного β^+-распада, однако, это ядро, возникшее при распаде изотопа магния, образуется не только в основном, но и во многих возбужденных состоя-

ниях. Этой дополнительной энергии возбуждения достаточно, чтобы сделать ядро $^{21}_{11}$Na неустойчивым по отношению к мгновенному испусканию протона; при этом образуется в качестве внучатого ядра устойчивый изотоп неона $^{20}_{10}$Ne. С точки зрения экспериментатора, эта последовательность распадов выглядит как, по существу, одновременное испускание позитрона и протона. (Нейтрино, которое также испускается, не может быть зарегистрировано.)

Протоны, возникающие при вторичном распаде, дают больше информации для анализа подобных процессов, чем первичные позитроны, поскольку протоны распада, заселяющие отдельные энергетические уровни, имеют определенную энергию.

При β-распаде энергия распада в любом случае произвольно делится между позитроном и нейтрино. Исследуя спектр протонов, можно сделать

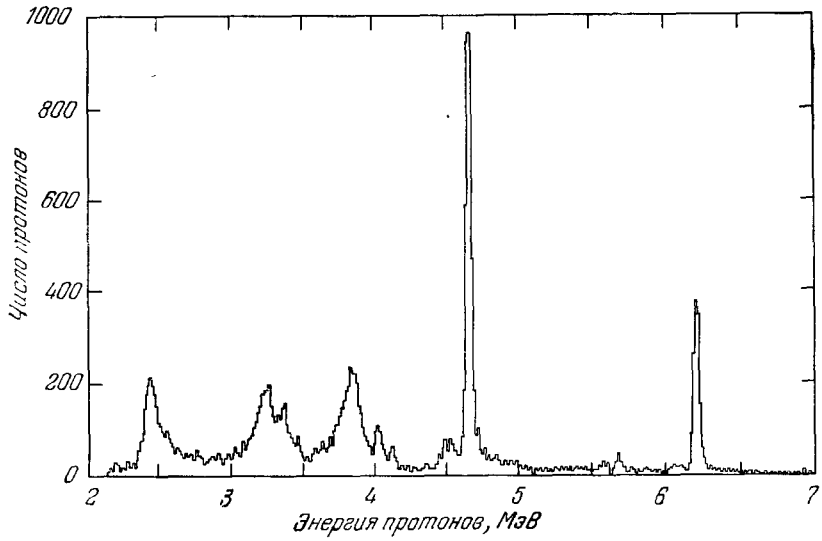

Рис. 5. Энергетический спектр протонов, излучаемых при распаде ядра $^{21}_{12}$Mg, состоит из широких групп и двух узких пиков.

Узкие пики, отвечающие энергиям протонов 4,7 и 6,2 МэВ, возникают при сверхразрешенном β+-переходе из материнского состояния $^{21}_{12}$Mg в аналоговое состояние в ядре $^{21}_{11}$Na. Две энергии протонов связаны с тем, что при протонном распаде из аналогового состояния заселяются как основное, так и возбужденное состояния $^{20}_{10}$Ne. Спектр протонов содержит отдельные, хорошо выделяющиеся группы, поскольку в процессе распада энергия протонов четко определена. По этой причине измерения спектра протонов дают больше информации о ядре, чем измерения спектра позитронов первичного β+-распада. Энергетический спектр позитронов непрерывный, так как энергия β+-распада делится произвольно между нейтрино и позитроном.

вывод о том, какие состояния ядра $^{21}_{11}$Na заселяются. Однако не во всех случаях при β-распаде заселяются состояния ядер с энергией возбуждения, достаточной для испускания протонов; из остальных состояний переход в основное состояние $^{21}_{11}$Na происходит путем испускания γ-лучей. γ-лучи также имеют определенные энергии (равные разнице в энергии возбужденного и основного состояний) и несут информацию о заселяемых состояниях.

Испускание запаздывающих протонов впервые наблюдалось в 1963 г. В. А. Карнауховым, Г. М. Тер-Акопяном и В. А. Субботиным в Объединенном институте ядерных исследований, расположенном в г. Дубне, недалеко от Москвы, и Р. Д. Бартоном, Р. Мак-Ферсоном, Р. Е. Беллом, У. Р. Фрискеном, У. Т. Линком и Р. Б. Муром в Макгилльском университете в Монреале. С тех пор, в основном усилиями трех групп исследователей, были идентифицированы многие легкие ядра, распадающиеся

таким образом. Одну из этих групп в Макгилльском университете возглавил Д. С. Харди, в другой, в Брукхейвенской Национальной лаборатории, принимал участие один из авторов настоящей работы (Посканцер), в третьей группе, в Лоуренсовской лаборатории в Беркли, развернувшей свою деятельность в этом направлении сравнительно недавно, принял участие другой автор настоящей работы (Черни).

Периоды полураспадов 10 легчайших ядер от изотопа углерода $^{6}_{9}C$ до изотопа титана $^{41}_{22}Ti$, для которых наблюдалась указанная последовательность распадов, находились в диапазоне от 9 до 470 мс.

Ядро $^{21}_{12}Mg$ было получено путем использования в качестве мишени ускорителя газ, содержащий атомы $^{20}_{10}Ne$ (поскольку это ядро является также и конечным продуктом последовательных распадов, вся реакция является циклической). Этот газ бомбардировался ядрами нейтронно-дефицитного изотопа $^{3}_{2}He$, который был ускорен до энергии 30 МэВ. В некоторых случаях взаимодействие происходило путем слияния двух ядер и образования ядра $^{23}_{13}Mg$ в высоковозбужденном состоянии. Некоторое число таких возбужденных ядер немедленно испускает два нейтрона и образуется $^{21}_{12}Mg$.

□

Поскольку период полураспада этого изотопа и других излучателей запаздывающих протонов короткий (для $^{21}_{12}Mg$ $T_{1/2} = 0{,}12$ с), то требуются особые средства доставки ядер из зоны, где расположена мишень ускорителя к приборам, регистрирующим распад таких ядер.

В первых исследованиях изотопов, полученных в лабораториях, нередко «транспортным средством» служил быстро бегущий человек, который переносил в руках образец из одной комнаты в другую. По мере того, как интерес сдвигался в сторону исследования ядер с более короткими временами жизни, для этой цели обычно использовали пневматический поступательно-возвратный механизм, или «зайчик». Но даже такой способ транспортировки оказался слишком медленным для исследования излучателей запаздывающих протонов.

Ядра $^{21}_{12}Mg$ переносились к детектору уже с помощью гелиевой струи. Ядра неона, используемые в качестве мишени, смешивали с бо́льшим объемом газа гелия, при давлении в 1,5 раза превышающем атмосферное. Ядра, продукты реакции, увлекались гелием, проносились через капиллярную трубку и попадали в другой резервуар, постоянно откачиваемый высокоскоростным насосом. Здесь ядра магния (и другие продукты реакций) осаждались на тонкие фольги, которые помещались перед детектором и сменялись несколько раз в секунду. Ядра $^{21}_{12}Mg$ были не единственными радиоактивными элементами, образующимися в этой реакции: на практике ядра $^{21}_{12}Mg$ составляли ничтожную долю всего выхода радиоактивных продуктов.

Большинство образовавшихся ядер испытывало β^+- или β^--распад, и поэтому необходимы детекторы, с помощью которых можно различить небольшой поток протонов на интенсивном фоне электронов и позитронов. В общем, действие детекторов частиц основано на чувствительности к ионизации атомов, вызываемой заряженными частицами при прохождении через вещество. Позитроны, электроны и протоны — все эти частицы несут электрический заряд, но, поскольку масса протона гораздо больше, то этот факт можно использовать для выделения протонов. Протоны теряют энергию при прохождении через вещество гораздо быстрее, поэтому, располагая последовательно два детектора так, чтобы излучаемые частицы проходили через оба, можно измерить скорость потери энергии.

Распад образца магния 21 дает большое число протонов, которые могут быть разбиты на группы в соответствии с их энергией. Каждая из групп соответствует распадам на определенный энергетический уровень промежуточного, дочернего ядра $^{21}_{11}$Na. Особенный интерес вызывают группы протонов, возникающие при благоприятных переходах из материнского ядра в состояние дочернего, которое называется аналоговым состоянием, т. е. состоянием, «аналогичным» основному состоянию материнского ядра.

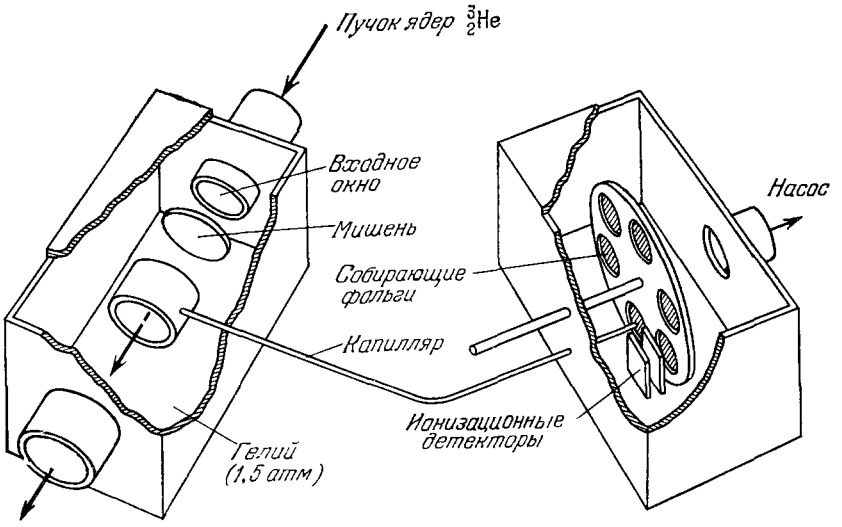

Рис. 6. Гелиевая струя применяется для транспортировки ядер-излучателей запаздывающих протонов от мишени ускорителя до детектора, за время в несколько сотен миллисекунд; допустима задержка только такого порядка, иначе большинство исследуемых ядер распадается.

Мишень находится в камере, содержащей гелий при давлении примерно в 1,5 раза больше атмосферного. Ядра, образующиеся в реакциях, вызванных пучком ускоренных ионов $^{3}_{2}$He, выбивались из мишени, а затем эти ядра увлекались струей гелия, вместе со струей проходили через капиллярную трубку и попадали в другую камеру с непрерывной откачкой газа. В рассматриваемом случае образования $^{21}_{12}$Mg твердую мишень удалили, а в качестве мишени использовали газ $^{20}_{10}$Ne, смешанный с гелием. Во второй камере ядра наносились на последовательность фольг, которые быстро меняли свое положение перед двумя детекторами заряженных частиц. С помощью этих детекторов выделяли протоны на интенсивном фоне электронов и позитронов и определяли их энергию.

Концепция аналоговых состояний основана на теории зарядовой независимости ядерных сил. Эта теория справедлива, если электромагнитными силами можно пренебречь. Тогда взаимодействия протона с протоном, протона с нейтроном и нейтрона с нейтроном должны быть одинаковыми. Таким образом, если два ядра содержат одно и то же число нуклонов, и эти нуклоны находятся в одном и том же состоянии движения, то такие два ядра имеют идентичные свойства независимо от соотношения между протонами и нейтронами, образующими эти ядра. В нашем случае оба ядра содержат 21 нуклон, и теория зарядовой независимости предсказывает, что движение этих нуклонов в аналоговом возбужденном состоянии такое же, как и в основном состоянии ядра $^{21}_{12}$Mg. Разумеется, в действительности целиком электромагнитным взаимодействием пренебречь нельзя, и должно наблюдаться небольшое различие в указанных состояниях этих ядер. Степень различия может быть определена с помощью исследования протонных спектров. Для ядра $^{21}_{12}$Mg и ряда других излучателей запаздывающих протонов было найдено, что различия очень малы: аналоговые и материнские состояния удивительно похожи друг на друга, степень их идентичности обычно около 90%.

□

Эти эксперименты позволили установить существование $^{21}_{12}$Mg, а также период полураспада этого ядра и моды его распада, однако, не дали достаточно точного значения его массы. Масса была измерена с помощью иной методики одним из авторов настоящей работы (Черни) с сотрудниками, а также У. Бенесоном и Я. Каши с их коллегами в Мичиганском университете. Опять ускорялись частицы $^{2}_{3}$He, но в качестве мишени использовали стабильный изотоп $^{24}_{12}$Mg. При столкновениях этих ядер происходили иногда очень редкие события, соответствующие подхвату ядром $^{3}_{2}$He трех дополнительных нейтронов и образованию изотопа ^{6}He и остаточного ядра $^{21}_{12}$Mg. Ядро $^{21}_{12}$Mg не регистрировали, но изменяли энергию ионов $^{6}_{2}$He. Поскольку энергии и массы трех из четырех участвующих

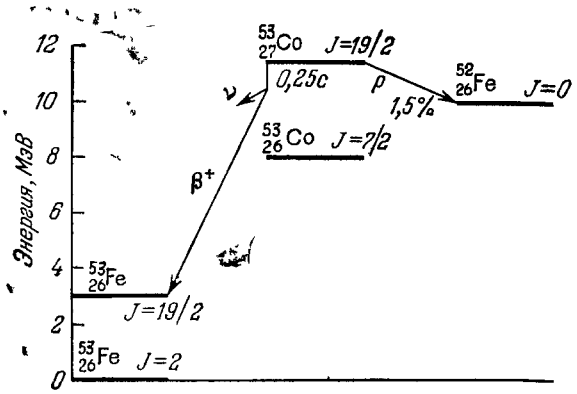

Рис. 7. Протонная радиоактивность наблюдалась при распаде нейтронно-дефицитного изотопа кобальта, $^{53}_{27}$ Co, из долгоживущего возбужденного состояния.

С подавляющей вероятностью $^{53}_{27}$Co в указанном состоянии испытывает самый обычный β+-распад в $^{53}_{26}$Fe, но примерно в 1,5% случаев ядро кобальта просто испускает протон, давая изотоп железа $^{52}_{26}$Fe. Замечательным в этом распаде является время жизни ядра. Большинство ядер, распадающихся путем прямого испускания протона или нейтрона, испытывают такой распад очень быстро, за очень малые времена порядка 10^{-21}с Напротив, ядро $^{53}_{27}$Co имеет период полураспада 0,25 с и если бы протонная радиоактивность была единственным возможным способом распада, то время его жизни было бы около 17 с. Символом J обозначены спины ядерных состояний в фундаментальных единицах.

в реакции ядер были известны, то точную массу четвертого ядра $^{21}_{12}$Mg можно было рассчитать на основе законов сохранения энергии и импульса.

Немедленное испускание нуклонов рассматривалось выше как такая быстрая мода распада, что соответствующие ядра нельзя считать существующими. Но испускание протона или нейтрона ядром может соответствовать сравнительно большим временам, если это испускание резко подавлено большим барьером. Ядро такого типа было обнаружено в в 1970 г.: это долгоживущее возбужденное состояние изотопа кобальта, $^{53}_{27}$Co; прямой протонный распад ядра из этого состояния происходит с периодом полураспада 0,25 с. Эта протонная радиоактивность была открыта в лаборатории исследований в области атомной энергии в Харуэлле (Англия) группой сотрудников из Оксфордского университета в составе Дж. Черни (автор настоящей работы), К. П. Джексона, С. У. Кардинала, Г. С. Эванса, Н. А. Джелли. Открытие было подтверждено в последующих экспериментах в Лоуренсовской лаборатории в Беркли, которые были проведены Дж. Черни, Э. Эстерлом, Р. А. Гуфом и Р. Г. Секстро. В этих исследованиях ядро кобальта получали путем бомбардировки изотопа железа $^{54}_{26}$Fe, протонами, ускоренными до энергии 35 МэВ. В качестве промежуточного нерегистрируемого продукта реакции образовывался изотоп

кобальта $^{55}_{27}Co$, который мгновенно испускал два нейтрона, давая возбужденное состояние ядра $^{53}_{27}Co$. В отличие от распада большинства возбужденных состояний, γ-распад из этого состояния с переходом в основное состояние $^{53}_{27}Co$ подавлен и поэтому ядро $^{53}_{27}Co$ в таком состоянии называется ядерным изомером. Основной вид распада из этого состояния — β^+-распад, однако в 1,5% случаев наблюдается испускание протонов. Все протоны, испускаемые ядром $^{53}_{27}Co$, сгруппированы вблизи единственного значения энергии 1,59 МэВ, в отличие от случая испускания запаздывающих

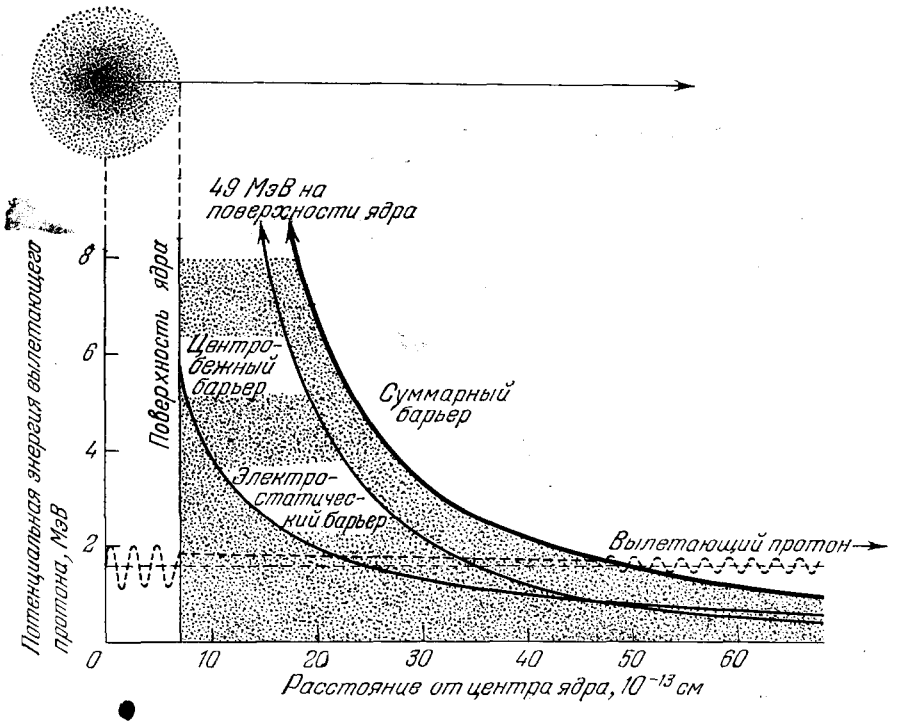

Рис. 8. Увеличение времени жизни ядра $^{53}_{27}Co$ можно объяснить, если учесть барьеры, сквозь которые должен пройти протон, чтобы вылететь из ядра.

В случае $^{53}_{27}Co$ имеются два барьера: электростатический, возникающий в результате электрического отталкивания, действующего между протонами, и центробежный связанный с тем, что протон должен унести большой орбитальный момент материнского ядра. Суммарная высота барьера примерно 49 МэВ на поверхности ядра, и поскольку энергия испускаемых протонов всего лишь около 1,6 МэВ, то ясно, что протоны не должны преодолеть этот барьер. Однако существует небольшая вероятность прохождения протона через барьер путем квантовомеханического процесса, который называется туннельным эффектом. Протон можно рассматривать как волну, которая ударяется о барьер и снова появляется уже на другой стороне барьера. Выходящая волна имеет ту же длину волны, что и волна внутри ядра. Это означает, что протон имеет ту же энергию, но резкое уменьшение амплитуды свидетельствует о малой вероятности обнаружить протон вне ядра. Амплитуда уменьшается примерно в 10^7 раз, поэтому такое уменьшение нельзя продемонстрировать на этом рисунке. Именно ничтожная вероятность туннельного прохождения вместе с требуемой маловероятной ядерной перестройкой является причиной большого времени жизни этого изотопа кобальта.

протонов, когда после β^+-распада протоны испускаются из нескольких возбужденных состояний и поэтому дают несколько значений энергии.

β^+-распад ядра $^{53}_{27}Co$ — сверхзавершенный, поскольку при этом распаде образуется «зеркальное» ядро $^{53}_{26}Fe$, нуклоны которого находятся в том же состоянии, что и в материнском ядре кобальта. Зеркальные ядра — особый случай аналоговых состояний: у зеркальных ядер единственное различие состоит в том, что число протонов в одном равно числу нейтронов в другом и наоборот. В нашем случае материнское ядро кобальта содержит 27 протонов и 26 нейтронов, а дочернее ядро железа — 26 протонов и 27 нейтронов. Поскольку переходы между соответствующими состояниями таких

ядер сверхразрешенные, то время жизни $^{53}_{27}Co$ главным образом зависит от возможности β^+-распада. Действительно, если было бы можно «выключить» β^+-распад, и испускание протонов было бы единственным возможным способом распада, то период полураспада этого ядра был бы примерно 17 с, т. е. почти на двадцать порядков больше, чем обычный временной масштаб, характерный для прямого испускания нуклонов. Именно этот «парциальный» период полураспада должна объяснить теория медленного протонного испускания.

□

Объяснение основано на учете чрезвычайно большого барьера, который необходимо преодолеть протонам при испускании. Более того, это объяснение очень похоже на теоретическое описание испускания α-частиц тяжелыми ядрами, такими, как уран-238. Основной барьер при испускании α-частиц возникает из-за электромагнитного взаимодействия протонов, подчиняющегося закону Кулона для электрических зарядов. Энергия α-частиц должна быть около 25 МэВ для того, чтобы они могли преодолеть этот барьер и вылететь из ядра.

В соответствии с законами классической физики только частицы с такой или большей энергией могли бы вылетать из ядра, но на самом деле из урана испускаются α-частицы с энергией 4,2 МэВ. Такие частицы с малой энергией могут испускаться благодаря квантовомеханическому процессу туннельного прохождения через кулоновский барьер.

Согласно концепциям квантовой механики частицы можно рассматривать как волны, а для волны существует малая вероятность проникновения через барьер. При распаде ядер урана у α-частицы есть один шанс из 10^{38} вылететь из ядра в каждой данной попытке. Хотя эта вероятность очень мала, α-частица ударяется в «стенки» ядра 10^{21} раз в секунду. Поэтому можно ожидать, что α-частица вылетит из ядра примерно через 10^{17} с, или три миллиарда лет. Измеренный период полураспада урана 238 равен 4,5 млрд. лет.

Похожий кулоновский барьер затормаживает испускание протонов из ядра $^{23}_{57}Co$, но при учете вероятности туннельного прохождения протонов через этот барьер период полураспада оказывается равным только 10^{-19} с, все еще на много порядков величины меньше экспериментально полученного значения. Часть расхождения можно связать с дополнительным барьером, который называют центробежным барьером. Ядро $^{53}_{27}Co$ имеет чрезвычайно большой спин — 19/2, в то время как дочернее ядро $^{52}_{26}F$ образуется в основном состоянии и имеет спин, равный нулю. Поэтому вылетающий протон должен унести 19/2 единиц момента: 1/2 связана с собственным спином протона, остальные девять единиц должны проявиться как орбитальный момент в системе, состоящей из дочернего ядра и испущенного протона.

Период полураспада, который ожидается в результате учета туннельного прохождения протона через кулоновский центробежный барьеры, равняется $\sim 6 \cdot 10^8$ с. Оставшийся множитель $3 \cdot 10^8$ может быть объяснен исключительно сложной и маловероятной перегруппировкой ядерного вещества, необходимого для того, чтобы произошел распад ядра $^{53}_{27}Co$ из возбужденного состояния в основное состояние ядра $^{52}_{26}Fe$. Итак, требуется удовлетворить двум различным условиям для того, чтобы произошел распад: во-первых, протон должен проникнуть сквозь оба барьера, во-вторых, структура остаточного ядра должна соответствовать структуре основного состояния $^{52}_{26}Fe$.

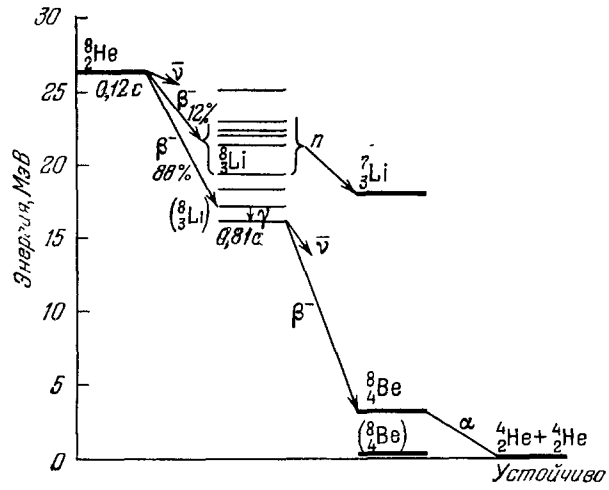

Рис. 9. Нейтронно-избыточный изотоп гелия, $^8_2$He, может распадаться любым из двух необычных видов распада.

В каждой из них начальное событие — это β-распад, приводящий к образованию изотопа лития — $^8_3$Li. Если $^8_3$Li образуется в высоковозбужденном состоянии, то он быстро испускает нейтрон, давая устойчивый продукт распада $^7_3$Li. Весь этот процесс — испускание запаздывающих нейтронов. Если $^8_3$Li образуется в более низких возбужденных состояниях, то в основное состояние идет переход путем испускания гамма-лучей, затем из основного состояния идет бета-распад на неустойчивое возбужденное состояние $^8_4$Be. В свою очередь ядро бериллия мгновенно испускает альфа-частицы, или, другими словами, расщепляется на два ядра $^4_2$He, которые являются самыми обычными изотопами гелия. В последнем случае распад $^8_3$Li можно рассматривать как испускание запаздывающих α-частиц.

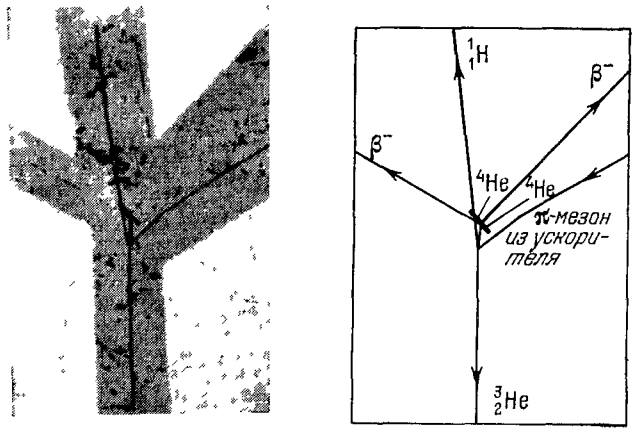

Рис. 10. Распад ядра гелия-8, зарегистрированный в фотоэмульсии, показан слева.

Те же события показаны на схеме справа. Ядро $^8_2$He оказалось одним из трех фрагментов, образованных при захвате низкоэнергетичного π-мезона ядром углерода в фотоэмульсии. Видно, что два других фрагмента протон ($^1_1$H) и ядро гелия 3 ($^3_2$He) уходят из поля зрения. Ядро $^8_2$He проходит небольшой путь в эмульсии до остановки и затем испытывает два последовательных β-распада, давая $^8_4$Be, который расщепляется на два ядра $^4_2$He. Треки, соответствующие двум ядрам $^4_2$He, направлены в противоположные стороны, так как ядро $^8_4$Be, по существу, покоится при распаде. Фотография принадлежит Ю Батусову из Объединенного института ядерных исследований в СССР.

Еще один способ распада должен наблюдаться у некоторых сильно нейтронно-дефицитных ядер. Эта мода распада, состоящая в одновременном испускании двух протонов, впервые была предсказана В. И. Гольданским из Института химической физики в Москве. Такой распад возможен для четно-четных ядер, когда распад в следующее более легкое (и следовательно, нечетно-четное) ядро невозможен из энергетических соображений; в этом случае усиленная устойчивость четно-четных ядер может приводить к благоприятным условиям для распада с испусканием двух протонов.

□

Со стороны нейтронно-избыточных ядер от долины стабильности характерные явления протонного испускания не имеют места. Естественно здесь ожидать испускания нейтронов, задержанных на время предыдущего β-распада, и, действительно, испускание запаздывающих нейтронов известно очень давно, с 1939 г. Первый легкий элемент—излучатель запаздывающих нейтронов был обнаружен в 1948 г. Э. О. Лоуренсом и идентифицирован как $^{17}_{7}$N Л. В. Альваресом. Поскольку нейтроны электрически

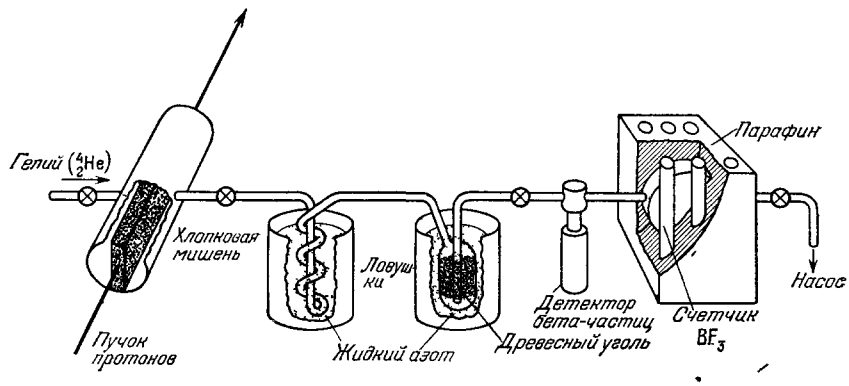

Рис. 11. Регистрация гелия-8 основана на выделении ^{8}He от различных других ядер, образованных при соударениях ускоренных частиц с ядрами мишени, возможном благодаря своеобразным физико-химическим свойствам гелия.

Использованная мишень — хлопок, который, с точки зрения анализа представляющих интерес ядерных реакций, можно рассматривать как углерод. Ядра $^{8}_{2}$He диффундируют из хлопкового волокна и захватываются в струю обычного гелия ($^{4}_{2}$He) Другие элементы удаляются из струи двумя криогенными ловушками, в которых происходит конденсация газов. Гелий проходит через ловушки, поскольку обладает очень низкой температурой кипения Затем очищенный газ мимо сцинтилляционного детектора β-частиц поступает в резервуар, помещенный в большой блок парафина. Нейтроны распада ядра $^{8}_{2}$He замедляются в парафине и взаимодействуют с ядрами бора в ионизационных детекторах.

нейтральны, то зарегистрировать их не так просто, как протоны, и требуется другая методика. В тех случаях, когда представляющее интерес ядро является изотопом элемента — газа, то, по-прежнему, возможна его транспортировка от мишени ускорителя к детектору. Такая методика была использована Альваресом для идентификации $^{17}_{7}$N, а затем одним из авторов настоящей работы (Посканцером) для исследования $^{8}_{2}$He, самого тяжелого изотопа гелия и единственного ядра, содержащего нейтронов в три раза больше, чем протонов. Ядра $^{8}_{2}$He образовались при бомбардировке углерода, содержащегося в хлопке, протонами высокой энергии. В ряде случаев это взаимодействие приводило к развалу углерода и образованию $^{8}_{2}$He. Атомы гелия диффундировали из тонкого хлопкового волокна и затем подхватывались потоком обычного гелия, проходящего через ряд криогенных ловушек, в которых конденсировались все элементы, кроме

гелия, и попадали к регистрирующим приборам. Здесь испускание электронов и гамма-лучей регистрировали с помощью сцинтилляционных детекторов, а нейтроны замедлялись в парафине, а затем попадали в детектор, содержащий трифлорид бора. Регистрация в этом последнем детекторе основана на известном процессе, состоящем в том, что ядро $^{10}_{5}B$ после захвата медленного нейтрона в ряде случаев испускает α-частицу; ионизацию, вызываемую альфа-частицами, можно обнаружить. Такой детектор позволяет вести счет нейтронов, но энергия нейтронов не может быть измерена.

Исследования позволили обнаружить необычайную последовательность распадов для ядра $^{8}_{2}He$. Примерно в 12% случаев это ядро распадается путем испускания электронов, приводящих к заселению высоколежащего состояния изотопа лития $^{8}_{3}Li$; затем ядро $^{8}_{3}Li$ в этом состоянии мгновенно испускает нейтрон, давая $^{7}_{3}Li$. Другими словами, этот распад является примером испускания запаздывающих нейтронов. В остальных случаях β^--испускание приводит к заселению более низкого состояния $^{8}_{3}Li$. Из этого состояния уже невозможно испускание нейтрона, а вместо этого происходит переход в основное состояние путем испускания гамма лучей. Однако ядро $^{8}_{3}Li$ и в основном состоянии неустойчиво и распадается путем β-распада в $^{8}_{4}Be$, который быстро разваливается на два ядра $^{4}_{2}He$. (Последний распад можно рассматривать как пример запаздывающего испускания α-частиц.) Всю реакцию целиком можно описывать как развал одного атома гелия ($^{8}_{2}He$) на два атома гелия ($^{4}_{2}He$) плюс два электрона и два антинейтрино.

□

Эффективный метод получения многих нейтронно-избыточных изотопов состоит в бомбардировке тяжелых элементов, таких как уран, протонами высокой энергии, которые могут выбивать небольшие фрагменты из ядра. В ядре урана соотношение нейтронов и протонов 1,6 : 1 является оптимальным для обеспечения устойчивости, однако, если то же соотношение передается легким фрагментом, то они оказываются сильно нейтронно-избыточными. Одним из недостатков такого метода является одновременное образование чрезвычайно широкого набора ядер, а следовательно, необходимо как-то уметь отличать одно ядро от другого. Несмотря на это препятствие, большая часть крайних нейтронно-избыточных изотопов была обнаружена с помощью какой-либо разновидности этого метода.

Один из способов идентификации разнообразных ядер — продуктов реакций — связан с использованием кинетической энергии, которой обладают ядра при вылете из мишени. Идентификация может осуществляться с помощью простого «телескопа», состоящего из двух детекторов, которые последовательно проходит вылетающее ядро. Первый детектор — тонкий, и ядра проходят сквозь него, оставляя только часть своей энергии, второй детектор обладает толщиной, достаточной для того, чтобы ядро остановилось в нем, и позволяет измерять всю оставшуюся энергию. Известно, что произведение этих двух долей энергии пропорционально произведению массового числа на заряд ядра в квадрате. Для большинства ядер таким образом можно получить их неповторимую «подпись», хотя и существуют некоторые ядра, которые нельзя различить этим методом.

С помощью указанного метода сильно нейтронно-избыточное ядро $^{11}_{3}Li$ было обнаружено авторами настоящей работы и Е. К. Хайдом и С. В. Коспером в Лоуренсовской лаборатории в Беркли. Ядра $^{11}_{3}Li$ проявляют себя небольшим «горбом» на кривой записи выхода различных более обычных ядер. Появление этого горба не означает ничего, кроме

того, что время жизни данного ядра достаточно велико для того, чтобы ядро долетело до детекторов, т. е. около 10^{-8} с. Однако уже это само по себе было неожиданностью, поскольку теоретические оценки указывали, что ядро $^{11}_{3}Li$ должно быть излучателем мгновенных нейтронов. Другие излучатели мгновенных нейтронов не проявляли себя как «горбы» на указанной кривой.

Г. В. Батлер, Д. Д. Боуман и один из авторов настоящей работы (Посканцер) улучшили эту методику так, что дифференциальные потери энергии в тонком детекторе использовались только для определения заряда

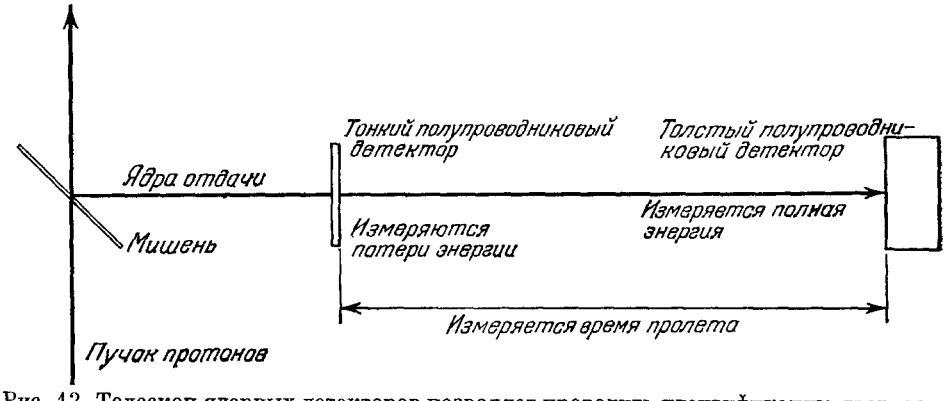

Рис. 12. Телескоп ядерных детекторов позволяет проводить идентификацию ядер, вылетающих из металлической фольги, которая служит мишенью для пучка ускорителя.

Эта идентификация основана на измерении определенных физических свойств вылетающих ядер. Телескоп состоит из двух полупроводниковых детекторов, расположенных один за другим так, что вылетающие ядра последовательно проходят оба детектора. Первый детектор — тонкий и служит для измерения скорости потерь энергии при прохождении ядра через вещество; второй детектор более толстый, в нем ядра останавливаются, и служит этот детектор для измерения всей оставшейся энергии ядра. Исходя из полученных таким образом данных, можно определить безразмерную величину, называемую идентификационным числом частицы, пропорциональную произведению массового числа на квадрат заряда ядра. В улучшенном варианте этого метода измеряется также время пролета ядром расстояния между двумя детекторами. Это позволяет измерить скорость ядра и вместе с данными о его кинетической энергии дает возможность получить независимые и более точные данные о массовом числе ядра.

ядра. Массовое число определяли по значению полной кинетической энергии и скорости частицы, а скорость частицы находили путем измерения времени пролета между двумя детекторами. Поскольку скорости частиц составляют около 5 процентов от скорости света, а пролетные расстояния, на которых измеряется скорость, равны 25 см, то измерения времени должны быть выполнены с точностью примерно 10^{-10} с. Зато, в вознаграждение за эти более точные измерения, ядра идентифицируются однозначно, как по числу протонов, так и по массовому числу. Применение этого метода позволило обнаружить новый изотоп бора, $^{17}_{5}B$. В прежних измерениях образование этого изотопа маскировалось различными изотопами углерода.

В экспериментах, проведенных в Лаборатории мезонной физики в Лос-Аламосе Батлером, Д. Г. Перри, Л. П. Ремсбером, Д. В. Натовицем, Ф. Плазилом и одним из авторов настоящей работы (Посканцером), были найдены новые возможности улучшения рассмотренной методики. Очень интенсивный пучок протонов из ускорителя этой лаборатории был разбит на сгустки длительностью всего 10^{-9} с. В этих условиях оказалось возможным определить, какой именно сгусток вызвал образование данного фрагмента, путем измерения времени пролета фрагмента между двумя детекторами, каждый из которых находился далеко от мишени. Определив этот временной интервал, затем можно найти время пролета пятиметрового расстояния от мишени до первого детектора. Достигнутое таким

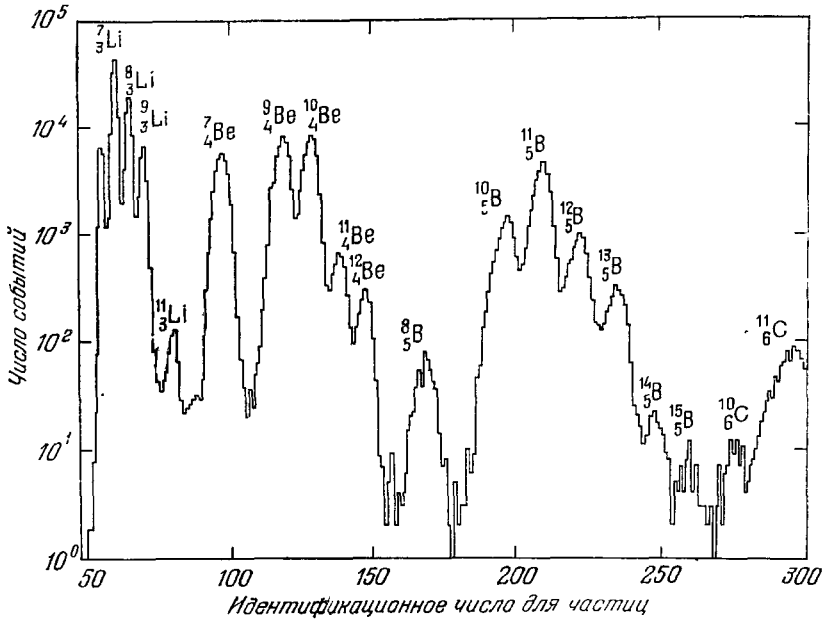

Рис. 13. Ядра, выбиваемые из мишени из тяжелого элемента протонами высокой энергии, идентифицированы путем измерения кинетической энергии и скорости потерь энергии, без измерения скорости.

Наблюдаемые пики связаны с выходом различных изотопов, образующихся в этой реакции. Впервые в таком эксперименте были обнаружены нейтронно-избыточные ядра $^{11}_{3}$Li, $^{14}_{5}$B и $^{15}_{5}$B. Однако самый тяжелый, известный в настоящее время, изотоп бора, $^{17}_{5}$B, не мог быть найден из-за маскировки соответствующего пика более интенсивным спектром изотопов углерода. Такое наложение пиков связано с тем, что идентификационный номер ядра неоднозначен: произведение массового числа на квадрат ядерного заряда почти одно и то же для определенных тяжелых изотопов бора и легких изотопов углерода.

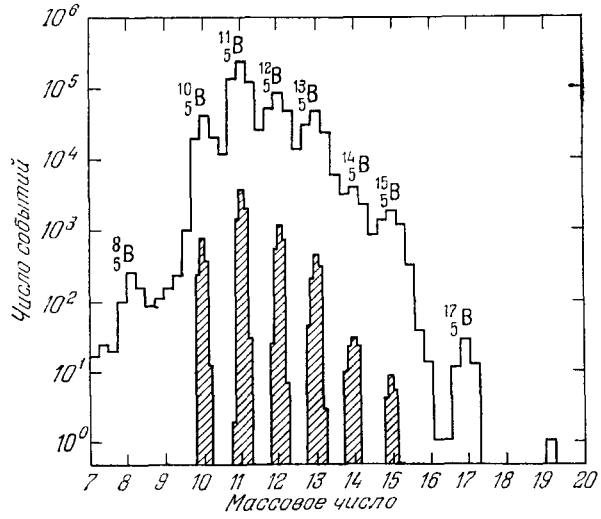

Рис. 14. Отдельные линии в спектре изотопов бора полностью разрешены в экспериментах, в которых проводили измерения и скорости вылетающих ядер.

Бор-17 был найден в эксперименте, в котором измеряли время пролета ядром расстояния между первым и вторым детектором (верхняя кривая). Еще лучшее разрешение достигнуто благодаря измерению времени пролета ядрами расстояния между мишенью и первым детектором (заштриховано).

образом лучшее разрешение по массе фрагментов позволило произвести идентификацию пяти неизвестных ранее нейтронно-избыточных ядер в области от неона до фосфора.

Много нейтронно-избыточных ядер обнаружили В. В. Волков с сотрудниками в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне. Эта группа также использовала мишень из тяжелого элемента, которая бомбардировалась пучками частиц таких, как ядра гелия. Ядра — продукты реакций — идентифицировали путем измерения их кинетической энергии ионизационным детектором и одновременного измерения импульса в магнитном поле. Несмотря на успех указанных методов, еще очень много нейтронно-избыточных ядер предстоит открыть.

□

Экспериментальные методы, рассмотренные выше, в лучшем случае позволяют обнаружить только факт существования ядра; нужны еще более сложные методы для того, чтобы определить массу ядер, время жизни и моды их распада. Д Р. Гусман и Д. Е. Альбургер в Брукхейвенской Национальной лаборатории исследовали много экзотических ядер,

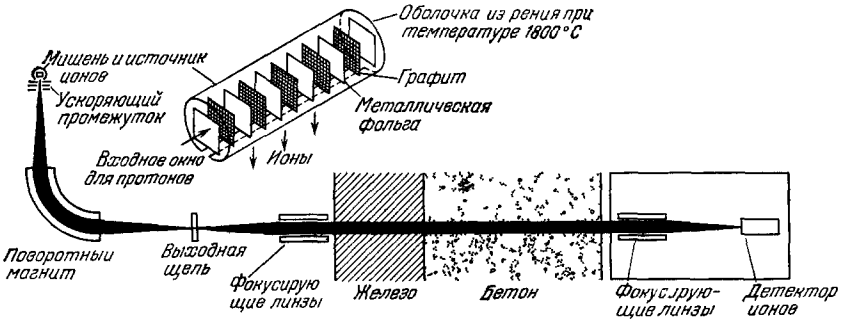

Рис 15 Масс-спектрометр, прямо связанный с ускорителем заряженных частиц, позволяет разделять короткоживущие ядра по их массе

Устройство детали которого показаны вверху, является одновременно мишенью ускорителя и ионным источником масс-спектрометра Ядра, образующиеся при взаимодействии протонов с материалом металлической фольги, останавливаются в графите здесь они захватывают электроны и становятся электрически нейтральными атомами Атомы щелочных металлов диффундируют из графита и ионизуются при попадании на горячую оболочку из рения Затем эти ионизованные атомы ускоряются в электростатическом потенциале 10 000 В и попадают в магнитный спектрометр В магнитном поле ионы отклоняются на различные углы в соответствии с их массой Массы, представляющие интерес выделяются с помощью выходной диафрагмы ионы с соответствующей массой проходят через защиту из железа и бетона и попадают в детектор Такой масс-спектрометр в линию с ускорителем был создан в Лаборатории ядерной и масс-спектроскопии в Орче (Франция)

используя селективность их образования при подборе нестандартных пучков частиц и мишеней их разделенных изотопов Однако когда необходимо облучать мишени из тяжелых элементов, то возникает такое разнообразие продуктов ядерных реакций, что неизбежно нужно удалить исследуемые ядра от мишени и отделить их от множества других.

Р Клапич и С. Тибо из лабораторий в Орсе (Франция) разработали мощный метод, обеспечивающий такое выделение искомых ядер с достаточной скоростью. В этом методе использовали выход ядер — продуктов ядерных реакций из мишени в виде ионизованных атомов и инжекцию этих атомов прямо в масс-спектрометр. В спектрометре ионы ускорялись до заданной скорости и попадали в магнитное поле. Степень их отклонения в магнитном поле зависит от импульса ионов и, следовательно, от массы. На выходе находится щель, которая позволяет попадать в детектор ионов только ядрам с отобранной массой, представляющей интерес. Подобное

оборудование применили в другом приборе, названном «ISOLDE», в Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН) около Женевы. Здесь недавно был найден самый нейтронно-дефицитный изотоп аргона $^{32}_{18}$Ar, существование которого предсказывали теоретические расчеты.

Прибор, созданный в Орсе, особенно пригоден для изучения щелочных металлов и главным образом именно работам, поставленным на этой машине, мы обязаны тому, что нейтронно-избыточных изотопов натрия и калия

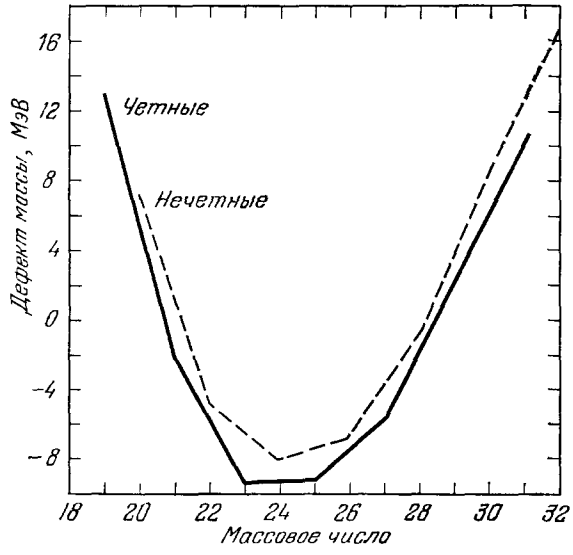

Рис. 16. Массы изотопов натрия вплоть до сильно нейтронно-избыточных были определены на масс-спектрометре, находящемся в линии с ускорителем в экспериментах, проведенных в Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН).

График является поперечным сечением долины стабильности, соответствующим линии с числом протонов-11. Опять на оси ординат указан дефект масс. Массы изотопов с нечетным и четным числом нейтронов указаны различными кривыми (сплошная и штриховая соответственно). Различие кривых объясняется тем, что ядра с четным числом нуклонов любого типа характеризуются повышенной устойчивостью. Кроме указанных изотопов, массы еще двух изотопов натрия (с массовыми числами 33 и 34) были определены экспериментаторами и впервые был обнаружен изотоп с массовым числом 35.

известно больше, чем любого другого легкого элемента. Более того, были определены массы, времена жизни и способы распада большинства изученных изотопов.

Группа в Орсе сумела измерить время жизни ядра $^{11}_{3}$Li, контролируя скорость уменьшения активности после каждого сгустка частиц, бомбардирующих мишень. Найденный период полураспада $^{11}_{3}$Li оказался равным 8,5 мс.

Для того чтобы измерить другие свойства этого ядра, детектор ионов за выходной щелью заменили на металлическую фольгу, на которую осаждались ионы. β-, γ- и нейтронное излучение регистрировали с помощью стандартных детекторов, но в условиях свободных от фона, создаваемого излучением других ядер. Этим методом обнаружили, что $^{11}_{3}$Li и все изотопы натрия от $^{29}_{11}$Na до $^{32}_{11}$Na являются излучателями запаздывающих нейтронов.

Наконец была измерена масса $^{11}_{3}$Li с помощью сотрудников Орсе и одного из авторов настоящей работы (Посканцера). Масс-спектрометр имел собственное разрешение 1 : 500, что вполне достаточно для разделения изотопов, но не хватает для точного определения массы. Для того чтобы определить энергию связи ядра, масса дожна быть известна с точ-

ностью 0,1 МэВ и, поскольку вся масса $^{11}_{3}$Li почти 11 000 МэВ, это требует разрешения 1 : 100000. Необходимая точность была получена измерением массы десятков тысяч ядер $^{11}_{3}$Li и усреднением результатов. Было найдено, что литий 11 устойчив к мгновенному испусканию нейтронов всего лишь на 0,17 (±0,08) МэВ.

Исследования экзотических ядер продолжают приносить неожиданные результаты. Хотя обнаружены все предсказанные ядра вплоть до $^{20}_{12}$Mg на нейтронно-дефицитной стороне долины стабильности, только для изотопов водорода, гелия, лития и бериллия обе границы продвинуты до пределов стабильности. О других легких элементах предстоит узнать еще очень много. Для этого требуется разработать новые возможности образования экзотических ядер и остроумные методы регистрации. Представляет интерес изучение ядер во всех экзотических формах, не ограничиваясь областью вблизи узкого дна долины стабильности. Здесь, возможно, будут открыты новые виды радиоактивного распада и, безусловно, знание структуры ядра поднимется на новую ступень.

ЛИТЕРАТУРА

Cerny J.— In: Annual Review of Nuclear Science. V. 18/Ed. E: Segré.— Annual Reviews, Inc., 1968.
Harely C.— In: Nuclear Spectroscopy and Reactions PtC/Ed. J. Cerny.— N. Y: Academic Press, 1977.
Klapische R.— Ibid.—Pt. A.
Hardy C.— In: Annual Review of Nuclear Science. V. 27/Ed. E. Segré.— Annual Reviews, Inc., 1977.