

СУПЕРНЕЙТРОНОИЗБЫТОЧНЫЕ ЯДРА — РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ю. Э. Пенионжкевич

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Superneutron Rich Nuclei — Results and Prospects of Research

Y. E. Penionzhkevich

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna
National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow

В статье рассказывается об одном из важнейших направлений современной ядерной физики - получении и исследовании свойств экзотических ядер на границах нейтронной стабильности. Приводятся методы получения таких ядер с помощью ускорителей, а также рассматриваются необычные свойства новых, синтезированных искусственно, легких ядер. Представлена новая информация по использованию пучков радиоактивных ядер для различных исследований, в том числе для астрофизики.

The new generation of exotic nuclei near neutron drip line and the analysis of their properties are discussed. Production methods of these nuclei using accelerators, which reveal unusual characteristics of new artificially synthesized light nuclei are described. The new information obtained on radioactive nuclei beams for various researches, including astrophysics, is submitted.

ВВЕДЕНИЕ

Фундаментальной проблемой ядерной физики является получение и изучение свойств ядер, находящихся в экстремальном состоянии — экзотических ядер. Это ядра, имеющие большой угловой момент («бешено» вращающиеся ядра), высокую энергию возбуждения («горячие» ядра), большую деформацию (супер и гипердеформированные), ядра с необычной конфигурацией формы, ядра с аномально высоким числом нейтронов или протонов (нейтроноизбыточные и протоноизбыточные ядра), сверхтяжелые ядра с числом протонов $Z > 110$. Изучение свойств ядерной материи в экстремальных состояниях дает важную информацию о свойствах микромира и таким образом позволяет моделировать различные процессы, происходящие во Вселенной.

Таким образом, получая и изучая экзотические состояния ядер, мы продвигаемся в понимании не только фундаментальных свойств самого ядра, но и окружающей нас Вселенной.

Еще академик Флеров Г. Н. писал «Чем дальше отстоит изотоп от области стабильности, тем больше информации о строении ядра он может нам дать. Исследование вещества в экстремальном состоянии, в экстремальных условиях его существования — общий методологический подход, который используется в физических исследованиях. Изотопы, далекие от области стабильности, — экстремальный объект исследова-

ния, дающий возможность получить максимум информации о строении ядра» [1].

Изучение весьма необычных ядерных систем с большим избытком нейтронов на протяжении многих лет представляет одно из основных направлений исследований ядерной физики. Развитие техники получения интенсивных пучков тяжелых ионов относительно низких (вблизи кулоновского барьера ядерной реакции), промежуточных (~100 МэВ/нуклон) и высоких (1-ГэВ/нуклон) энергий и последующие эксперименты на этих пучках привели к открытию новых связанных (нуклонно-стабильных) нейтроноизбыточных ядер с предельно большим избытком нейтронов. В области легчайших ядер были обнаружены также ядра, расположенные за предполагаемой границей нейтронной стабильности (neutron drip line), которые, являясь нейтронно-нестабильными, живут достаточно долго и проявляются в виде резонансов в выходах этих ядер при определенных энергиях. Интерес к легким нейтроноизбыточным ядрам объясняется несколькими причинами. Он возрос в последнее время в связи с обнаружением их необычных свойств. Однако основной интерес к исследованию легких ядер объясняется возможностью идентификации границы между связанными (нуклонно-стабильными) и несвязанными (нуклонно-нестабильными) ядрами, т.е. границы нейтронной стабильности. Большое количество массовых формул не дают однозначной информации Теоре-

тические предсказания положения этой границы являются недостаточно определёнными. Связанные ядра живут относительно долго по отношению ко времени протекания реакции, в которой они образовались, — это радиоактивные ядра. Время жизни, при котором можно говорить, что ядро является радиоактивным, составляет $t > 10^{-12}$ с. Распад несвязанных ядер, нестабильных по отношению к эмиссии нуклонов, оказывается относительно медленным в ядерных масштабах времени, но достаточно быстрым по сравнению с радиоактивным распадом. Время жизни этих ядер находится в широких пределах $10^{-12} > t > 10^{-22}$ с. Ядерные состояния со временем жизни в этом интервале иногда называют квазистационарными. К таким ядрам относятся ${}^4\text{H}$, ${}^7\text{He}$, ${}^9\text{He}$, ${}^{10}\text{He}$, ${}^{10}\text{Li}$, ${}^{13}\text{Be}$ и др. Они проявляются в виде резонансов в вероятностях различных процессов в зависимости от энергии бомбардирующей частицы. Энергия резонанса отстоит от порога развала этой системы, сопровождающегося эмиссией одного или более нуклонов, на величину, равную энергии распада. Таким образом, наблюдение резонанса позволяет сразу определить две важные характеристики ядра — энергию распада и время жизни. Если время жизни $t \sim 10^{-22}$ с, то считается, что ядра как такового не существует (рис. 1).

Эксперименты, проводимые в разных лабораториях мира, по изучению свойств экзотических ядер с экстремальными значениями N/Z (сильно удаленных от линии β -стабильности) позволили выявить ряд неожиданных явлений — существование нейтронного и протонного гало в структуре таких ядер [2], новых областей деформации [3], новых типов распада, изменения в последовательности заполнения ядерных оболочек, ослабление и даже исчезновение стабилизирующих факторов известных «традиционных» оболочек, появление новых «магических» чисел, [4] и т.д. Безусловно, наиболее ярким из них является существование в некоторых легких ядрах гигантского нейтронного (${}^{11}\text{Li}$) и протонного (${}^8\text{B}$) гало [см. рис. 3]. Число обнаруженных галообразных ядер увеличивается, и у них обнаружены совершенно неожиданные свойства, которые не предсказывались ранее. Поэтому эксперименты по изучению ядер, сильно обогащенных нейтронами или протонами, являются также источником информации, необходимой для проверки и развития существующих теоретических моделей. Результаты исследований таких ядер играют чрезвычайно важную роль в астрофизике. Актуальность этой проблемы подтверждает большое количество международных конференций

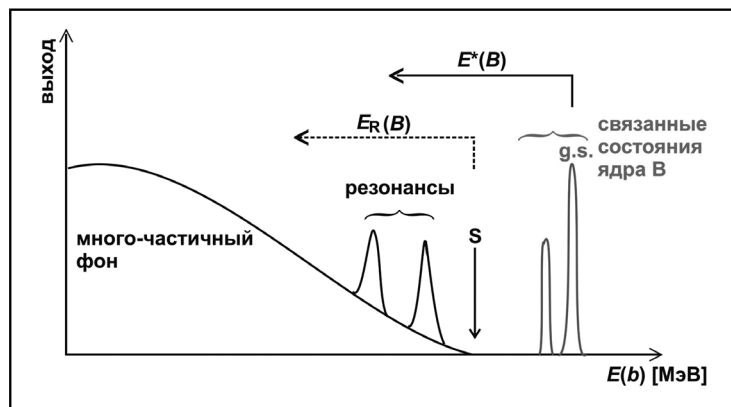


Рис. 1. Схематичное представление энергетических спектров, получаемых в двухтельных реакциях.

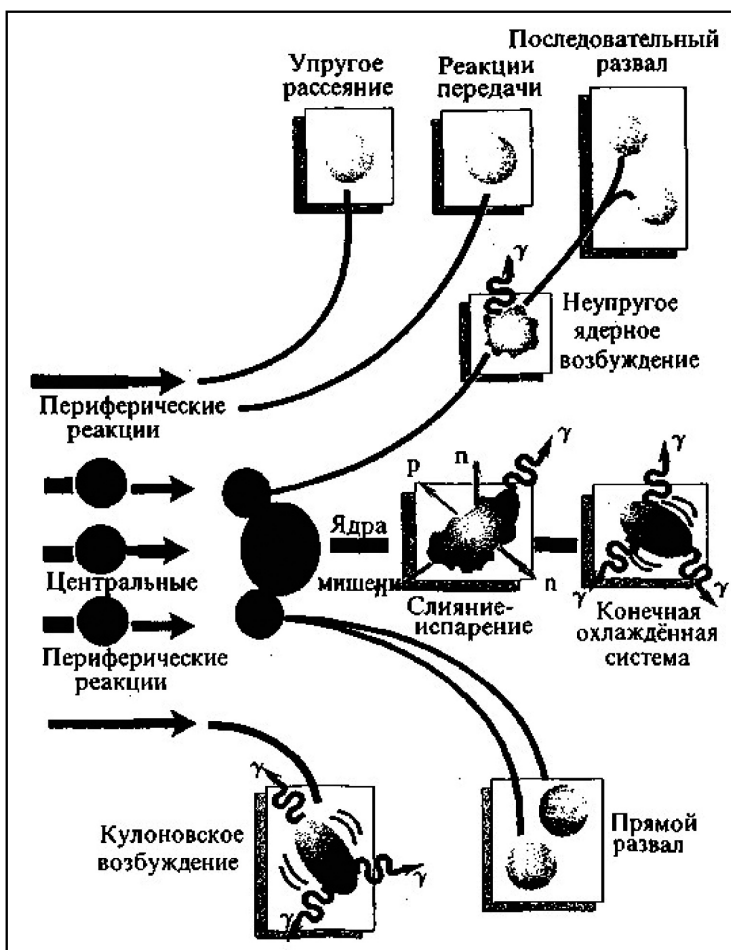


Рис. 2. Различные ядерные реакции между двумя сложными ядрами для центральных и периферических столкновений. Стрелками показаны каналы «охлаждения» образующихся «горячих» ядер: прямыми — испарение протонов и нейтронов, извилистыми — вылет гамма-квантов.

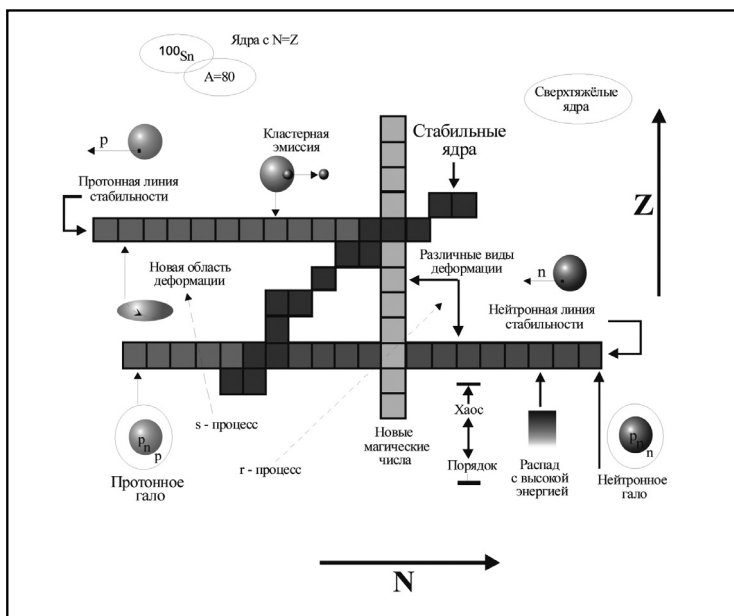


Рис. 3. Схематическое представление нейтронно-протонной карты нуклидов с обозначением областей, где наблюдаются или ожидаются необычные состояния и распады ядер.

[5], а также большое количество публикаций посвященных этой проблеме. Идет интенсивное накопление новой информации о свойствах легчайших ядер.

СИНТЕЗ НОВЫХ ЯДЕР У ГРАНИЦ НЕЙТРОННОЙ СТАБИЛЬНОСТИ

Искусственный синтез экзотических ядер является чрезвычайно сложной задачей, требующей нетрадиционных методов решения. В частности, в последние несколько лет она решается с использованием ускорителей тяжёлых ионов с энергиями от десятков мегаэлектронвольт (МэВ) до сотен гигаэлектронвольт (ГэВ). Для того, чтобы началась ядерная реакция, энергия ускоренного ядра должна превышать кулоновскую энергию отталкивания двух положительно заряженных ядер, которая обычно составляет несколько десятков МэВ. При энергиях выше кулоновского барьера открываются различные каналы реакции, вероятность которых зависит от энергии ядра — снаряда, от свойств самих взаимодействующих ядер, а также от расстояния, на котором сталкиваются два ядра (радиус взаимодействия). На рис. 2 схематически представлены различные процессы, происходящие с двумя сталкивающимися ядрами, в зависимости от радиуса взаимодействия (центральные столкновения — радиус взаимодействия минимальный и периферические столкновения радиус взаимодействия равен или больше суммы радиусов двух взаимодействующих ядер).

При лобовых столкновениях с энергиями ниже порога фрагментации двух ядер (30 МэВ/нуклон), когда происходит полный развал — фрагментация

ядер частицы и мишени, в основном протекают реакции полного слияния ядер мишени и бомбардирующего иона с образованием нового составного ядра, имеющего заряд и массу, близкую к сумме зарядов и масс двух взаимодействующих ядер. Это новое составное ядро имеет очень высокую температуру, т.к. вся кинетическая энергия бомбардирующей частицы переходит во внутреннюю энергию возбуждения нового ядра и большой угловой момент, т.е. большую скорость вращения. В таком состоянии это экзотическое ядро существует всего лишь $10^{-14} - 10^{-16}$ секунды и затем переходит в менее экзотическое состояние, «остывая» и уменьшая скорость вращения. После этого ядро переходит в основное состояние, уменьшая массу на число испарившихся нейтронов, которое может достигать значительной величины (до 18—22 нейтронов). Т.о., масса конечного ядра может быть меньше начального составного ядра на 18—22 единицы, т.е. может образоваться новое сильнонейтроннодефицитное экзотическое ядро, расположенное на границе ядерной стабильности. Это один из способов получения экзотических

ядер. В ядро, как и в любое другое вещество, нельзя закачать любую энергию. При определенной энергии может наступить фазовый переход, например, «жидкость — газ». Кроме реакций слияния могут протекать и другие процессы — реакции передачи нуклонов, развала бомбардирующего ядра с захватом части его ядром мишени и другие, которые успешно используются для получения и изучения различных экзотических состояний ядерной материи. С увеличением энергии бомбардирующего ядра при её определённом пороговом значении (30 МэВ/нуклон) ядра начинают фрагментировать, т.е. раскалываться на множество более лёгких ядерных систем в широком диапазоне масс, зарядов, температур. И вот здесь основной задачей экспериментаторов является выделение ядра в определённом состоянии на фоне во много раз большего числа других ядер. Для этого используются различные детекторы частиц, позволяющие измерять с высоким разрешением заряд, массу, импульс, координату вылета, а также определять его температуру, угловой момент и время жизни, которое часто достигает $10^{-20} - 10^{-21}$ секунды. Такие детекторы, как правило, регистрируют ядра, основываясь на принципе измерения степени ионизации вещества детектора, которая находится в прямой зависимости от массы и заряда ядра. Из них создают сложные спектрометры, состоящие из нескольких сотен детекторов, расположенных вокруг мишени и перекрывающих практически все углы (4-геометрия).

Оказалось, что в реакциях фрагментации могут образовываться в больших количествах ядра как сильнонейтронноизбыточные, так и сильнонейтроннодефицитные. Избыток и дефицит нейтронов в конечных

ядрах зависит от соотношения нейтронов и протонов в бомбардирующем ядре. В совместных экспериментах, проведённых учеными из Лаборатории ядерных реакций Объединённого института ядерных исследований в Дубне и Национальной Лаборатории ГАНИЛ во Франции, был использован пучок редкого изотопа кальция-48, содержащегося в природе в ничтожных количествах и полученном в российских институтах на специальных электромагнитных разделительных установках. Это самый нейтронообогащённый изотоп (20 протонов и 28 нейтронов), содержащийся в природе. В совместных экспериментах было получено более 30 новых нейтроноизбыточных изотопов, расположенных у самой границы ядерной стабильности — бор — 19, углерод — 20, азот — 23, кислород — 24 и др.

Впоследствии с развитием техники получения интенсивных пучков тяжёлых ионов промежуточных и высоких энергий стало возможным ускорять ионы элементов с большим Z . Так на пучке ^{56}Fe был синтезирован самый тяжёлый изотоп бора ^{19}B . Последующие эксперименты с использованием пучков ^{48}Ca при энергии -50 МэВ/А не только подтвердили полученные ранее результаты по нуклонной стабильности ядер ^{14}Be , ^{19}B , ^{20}C и ^{27}F , но также привели к обнаружению новых связанных нейтроноизбыточных ядер ^{22}C , ^{31}F , $^{29-32}\text{Ne}$ [6].

В области легчайших ядер были обнаружены также ядра, расположенные за границей нейтронной стабильности, т.е. такие ядра, которые, являясь нуклонно-нестабильными, живут достаточно долго и проявляются в виде резонансов.

На рис. 4 представлена (N-Z)-диаграмма изотопов. Стабильные ядра, существующие в природе, на диаграмме представлены чёрными квадратами. Всего их 273 ядра. В области легких ядер удалось синтезировать последние ядра у границ нуклонной стабильности. Однако в области более тяжёлых ядер кулоновские силы ограничивают область их существования. Короткодействующие ядерные силы не могут компенсировать кулоновские силы отталкивания, и тяжёлые ядра с числом протонов $Z > 90$ распадаются (спонтанное деление) с образованием двух более стабильных ядер -осколков деления. Этим же объясняется и то, что ядра тяжелее урана ($Z=92$) в природе пока не обнаружены. За границей нуклонной стабильности начинается море нестабильных ядер (голубой цвет), хотя и среди них могут появляться островки стабильности, которые и пытаются обнаружить экспериментально. Определение положения границы стабильности является само по себе важной и достаточно сложной задачей, которая зависит от многих параметров, определяющих свойства ядер. Радиоактивные ядра, находящиеся между линиями нейтронной и протонной стабильности, а их около 7000, могут быть синтезированы только искусственно в лабораторных ус-

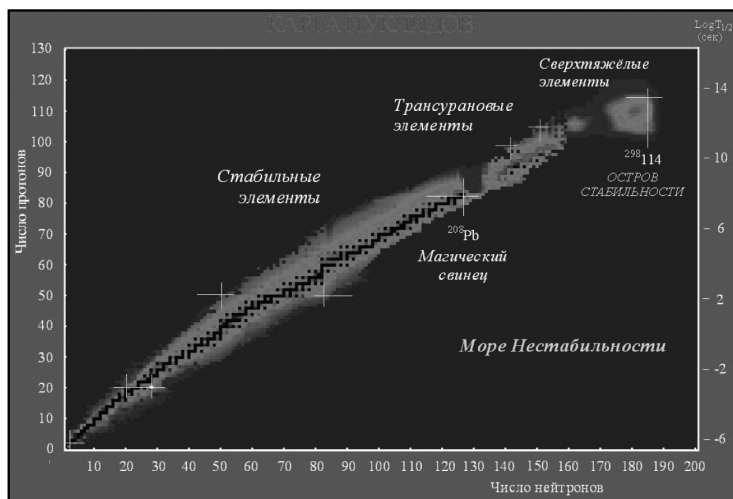


Рис. 4. Нейтронно-протонная карта нуклидов. Черными квадратами представлены ядра стабильные или долгоживущие. Зеленая область — ядра, испытывающие электронный распад (β^- и β^+ -распады) — предполагаемая область стабильных ядер. За этой областью начинается «море» нестабильности. Нижняя часть области определяет нейтронную границу стабильности (n-распад), верхняя — протонную (p-распад).

ловиях и число ещё не известных ядер составляет около 4000. Таким образом, физикам предстоит ещё достаточно работы, чтобы приблизиться к линии стабильности, особенно в области средних и тяжёлых масс ядер.

ЛЕГЧАЙШИЕ ЭКЗОТИЧЕСКИЕ ЯДРА

Для ядер легчайших элементов (изотопов водорода, гелия, лития, бериллия) граница стабильности уже достигнута, т.е. синтезированы все ядра, в которых энергия связи нуклона положительная. Между тем даже несвязанные ядра (с отрицательной энергией связи) могут существовать в виде ядерных систем, в которых взаимодействие нуклонов приводит к появлению некоторых ядерных состояний, хотя и чрезвычайно короткоживущих (10—21 секунды), проявляющихся в виде резонансов. Исследование таких резонансных состояний несвязанных ядерных систем даёт важнейшую информацию о возможности дальнейшего продвижения к островкам стабильности, которые, как предполагают теоретики, существуют в «море» нестабильности. Первый такой островок может существовать для чисто нейтронных ядер с числом нейтронов начиная с 20. Однако в настоящее время экспериментально в лабораторных условиях синтезировать такие нейтронные ядра практически невозможно.

Пока удалось исследовать стабильность динейтрона ($2n$), тринейтрона ($3n$), тетранейтрона ($4n$). Они оказались несвязанными, однако для динейтрона был обнаружен резонанс, на основе чего был сделан вывод о том, что эта система почти связанная (очень маленькая отри-

цательная энергия связи, около 70 кэВ). Многократные попытки обнаружить ядра $3n$ и $4n$ также не дали положительного результата — они не наблюдались даже в виде короткоживущей квантовой системы, т.е. резонанса.

Интригующая ситуация существует со свойствами сверхтяжёлых изотопов водорода и гелия. Сначала была обнаружена т.н. «гелиевая аномалия», когда стабильность ядер с увеличением числа нейтронов при приближении к линии стабильности не уменьшалась, а даже увеличивалась (ядро ^8He оказалось более стабильным, чем ядро ^6He). Такую же зависимость обнаружили и для несвязанных изотопов гелия: гелия-5, гелия-7, гелия-9, гелия-10. В системе гелия-10 (два протона и восемь нейтронов) был обнаружен резонанс, который свидетельствовал, что в этом ядре отрицательная энергия связи равна всего лишь 1 МэВ. Впоследствии такая аномалия наблюдалась и для тяжёлых несвязанных изотопов водорода (водород-6 оказался более стабильным, чем водород-4), проявляющихся также в виде резонансных состояний. Таким образом, стабильность этих ядер не так сильно уменьшается, как это предсказывалось различными теоретическими моделями. Эти закономерности в поведении энергии связи тяжёлых изотопов легчайших элементов позволили более оптимистически взглянуть на проблему существования острова стабильности для сильнонейтроноизбыточных изотопов лёгких элементов.

Исследование свойств таких ядер, сильнообогащённых нейтронами, позволило обнаружить ещё одно интересное явление — существование т.н. «нейтронных гало». Это явление проявляется у слабосвязанных ядер, находящихся у границы стабильности, таких как ^8He , ^{11}Li , ^{14}Be , ^{17}B , ^{22}C . В этих ядрах было экспериментально обнаружено высокое значение нейтронного радиуса ядра. Так, у ^{11}Li оказалось, что два слабосвязанных нейтрона находятся на большом удалении от основного остова, представляющего из себя ядро ^9Li . Показано существование в этом ядре двухнейтронного гало в виде динейтрона. У ядра ^{11}Li радиус оказался равным 12 фм (для ^9Li он равен 2,5 фм). Такая необычная структура этих ядер проявляется самым разным образом, в частности, сильно увеличивается вероятность протекания ядерных реакций, которая пропорциональна радиусу взаимодействующих ядер. Эта особенность ядер с гало сыграла немаловажную роль для развития нового направления ядерной физики — физики с пучками ускоренных экзотических ядер.

Таким образом, как следует из вышесказанного, обнаруженные в последние годы новые явления при изучении свойств легчайших ядер у границы нейтронной стабильности привели к необходимости пересмотра наших представлений об этих ядрах. Остается ряд открытых вопросов, на которые в ближайшее время должен быть получен экспериментальный ответ:

- Во-первых, это структура ядер с нейтронным гало. Для таких ядер предсказываются возбужденные состояния, которые могут распадаться с испусканием сложных кластеров.

- Необходимы данные о возможном существовании нейтронных гало в более тяжёлых ядрах (пока известны только несколько ядер с двухнейтронным гало: ^6He , ^8He , ^{11}Li , ^{14}Be , ^{17}B , ^{22}C и всего два ядра с однонейтронным гало: ^{11}Be и ^{19}C).

- Открытым вопросом является корреляция нуклонов в нейтронном гало. С этим связана проблема существования динейтрона и тетранейтрона в ядрах с нейтронным гало.

Все эти проблемы могут быть успешно решены при использовании реакций с пучками радиоактивных ядер.

ЯДРА С $N=20,28$

Простая качественная интерпретация энергии связи в ядрах указывает на ее сильную чувствительность, а следовательно и стабильность, к поверхностным эффектам (кулоновское растапливание, гало и т.п.), особенно вблизи магических чисел — 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126.

Т.о. в соответствии с оболочечной моделью ядра магические или дважды-магические являются более стабильными, чем соседние ядра.

Экспериментальные исследования ядер более тяжёлых элементов в области замкнутых нейтронных оболочек $N=20$ и $N=28$ показали, что свойства этих ядер (энергия связи, деформация, правила заполнения энергетических уровней и др.), сильно меняются по мере удаления от стабильных ядер и проявляются неожиданные эффекты, приводящие к изменению (уменьшению или увеличению) стабильности этих ядер у границ нуклонной стабильности. Обнаруженные эффекты приводят к необходимости пересмотра теоретических представлений о свойствах таких ядер, в том числе к объяснению появления новых магических чисел, определяющих оболочечные эффекты. Вместо хорошо известных в этой области магических чисел обнаружено появление новых магических чисел таких, как 16, 22 или 26.

Для большинства легких сильнонейтроноизбыточных ядер вблизи оболочек $N=20$ и $N=28$ обнаружено еще одно необычное свойство — появление так называемого сосуществования двух форм — сферической и деформированной в основном состоянии.

Проявление новых оболочек обнаружено у нейтроноизбыточных ядер с $Z \geq 8$. Для этой области ядер, как установлено экспериментально, граница нейтронной стабильности достигнута для фтора, неона и натрия при гораздо большем соотношении нейтронов и протонов $(N-Z)/Z$, чем для изотопов кислорода

(^{24}O — последний связанный изотоп). Удивительным является тот факт, что добавление одного протона к ^{24}O , приводящее к образованию ^{25}F позволяет удерживать в ядре фтора еще 6 дополнительных нейтронов (^{31}F имеет 22 нейтрона, а ^{24}O — 16 нейтронов). Также экспериментально установлено, что магическое ядро ^{28}O ($N=20$) является несвязанным. Все это еще раз свидетельствует об изменении роли магических чисел 8, 20, 40 для стабильности ядер, удаленных от долины стабильности.

В ряде работ, в частности работе [7], была сделана попытка теоретической интерпретации появления новых оболочек для нейтронно-избыточных ядер. С этой целью использовалась Монте-Карло оболочечная модель (MCSM). Эта модель имеет ряд преимуществ. Во-первых, имеется возможность включения множества одночастичных состояний, что позволяет описать большие возбуждения в ядрах. Таким образом, можно рассчитать сферические ираст-состояния, деформационные ротационные полосы, а также недеформированные состояния, используя один и тот же гамильтониан. Другое преимущество заключается в возможности использования большого числа валентных частиц. Этот особенно существенно для описания целого ряда ядер вдоль оси изотопия, когда увеличивается число нуклонов. Этот подход использовался для описания переходов из сферической конфигурации в деформированное состояние. В таком подходе, изменение формы, а также возможное сосуществование различных форм в одном и том же ядре рассматривается как следствие влияния валентных нуклонов. Для объяснения этого сосуществования двух форм в ядрах вводятся эффективные одночастичные энергии (ESPEs), которые соответствуют одночастичным орбиталям. Показано, что разность в энергии между орбиталями $0d_{3/2}$ и $1s_{1/2}$ для изотопов кислорода с числом нейтронов $N=16$ имеет максимум и составляет величину 6 МэВ. Это достаточно большая величина, сравнимая с величиной расстояния между оболочками sd и pf в ядре Ca. С ростом Z , начиная от кислорода, эта величина уменьшается и достигает своего минимума для Mg и Al. Такое поведение одночастичных уровней происходит из-за изменения влияния нейтронной оболочки $0d_{3/2}$ с изменением числа протонов, что можно наблюдать на примере двух ядер ^{30}Si и ^{24}O , которые имеют одинаковое $N=16$. Ядро ^{30}Si имеет 6 валентных протонов в пространстве sd над оболочкой-кором из $Z=8$ и является стабильным ядром, в то время как ^{24}O не имеет валентных протонов. Для ядра ^{30}Si уровни $0d_{3/2}$ и $1s_{1/2}$ расположены достаточно близко к друг другу, а для ^{24}O уровень $0d_{3/2}$ расположен высоко и близко к группе оболочек pf , вследствие чего разница между $0d_{3/2}$ и $1s_{1/2}$ составляет величину около 6 МэВ. Эта величина для стабильного ядра ^{34}Si имеет меньшее значение, из-за большой разницы в энергиях (4 МэВ) между $0d_{3/2}$ и pf оболочками и объясняется сильным взаимодействием между протон-нейтронными орбиталями (валентные протоны добавляются только на $0d_{5/2}$ для Z от 8 до 14). Из-за сильного взаимодействия между протонами на $0d_{5/2}$ и нейтронами на $0d_{3/2}$ -орбиталях, большее число протонов, добавленных на $0d_{5/2}$, приводит к более связанному состоянию для нейтронов на орбитале $0d_{3/2}$. Поэтому уровень $0d_{3/2}$ расположен ниже в ядре ^{34}Si по сравнению с ^{24}O . Это и обуславливает магичность оболочки $N=16$. Как показано в работе [7], похожие тенденции имеют место и для других ядер, что приводит к новым магическим числам $N=6$, 16 и 34 для нейтронно-избыточных ядер, вместо $N=8$, 20 и 40 для ядер в долине стабильности. Например, для легких нейтронно-избыточных ядер, так называемых p -оболочечных ядер, вместо магического числа $N=8$ появляется число $N=6$. Как следствие

этого, ядро ^8He является достаточно хорошо связанным, а изотопы ^{10}He — несвязанными. Такая же ситуация имеет место для связанного магического ядра ^{24}O и несвязанных $^{25,26,27,28}\text{O}$. С точки зрения проявления новых оболочек интерес представляют нейтронно-избыточные ядра с $Z > 8$. Как установлено экспериментально, граница нейтронной стабильности достигается для изотопов фтора, неона и натрия при гораздо большем соотношении нейтронов и протонов $(N-Z)/Z$, чем для изотопов кислорода (последний связанный изотоп ^{24}O). Удивительным является тот факт, что добавление одного протона к ядру ^{24}O , позволяет удерживать в ядре фтора еще 6 дополнительных нейтронов (^{31}F имеет 22 нейтрона, по сравнению с ядром ^{24}O , где 16 нейтронов). Также экспериментально установлено, что дважды магическое ядро ^{28}O ($N=20$) является несвязанным. Все это еще раз свидетельствует об изменении магических чисел 8, 20, 40 для ядер, удаленных от долины стабильности.

Для изотопов Mg, S, P, Si, Cl увеличение энергии связи наблюдается в районе чисел $N=22$ и $N=26$. Особенно наглядно видно исчезновение оболочки с $N=28$ и появление новой с $N=26$ для изотопов Cl.

Измеренная [4] энергия связи двух нейтронов (S_{2n}) для этих изотопов оказалась существенно выше экстраполированных значений из таблиц масс [8]

Впервые аномальные значения массы и периода полураспада были получены для ^{31}Na . Это ядро, находящееся далеко от долины стабильности, оказалось более связанным, чем ожидалось. В дальнейшем такая же ситуация была обнаружена и для изотопов магния ($^{31,32,33}\text{Mg}$).

Для объяснения свойств ядер в этой области было высказано предположение о нарушении привычного порядка заселения нейтронами уровней. Это приводит к тому, что ядро становится деформированным. Область ядер, где проявляются подобные эффекты, получила название области инверсии.

На рис. 5 представлены результаты расчетов потенциальной энергии для изотопов ^{28}Ne , ^{32}Mg и ^{34}Si в зависимости от деформации. Наличие локальных минимумов для деформаций, отличных от сферических указывает на, так называемое, сосуществование форм, а возможно, и проявление новых форм изомерии ядер.

Таким образом, в расчетах энергий связи ядра может появиться некоторое увеличение их энергий связи за счет деформационных эффектов. Смешивание оболочечных конфигураций влечет за собой смешивание форм, т.е. для одного и того же ядра можно наблюдать различные формы — деформированные и сферические (сосуществование двух форм).

Ярким примером этого является ситуация со стабильностью ^{28}O . Граница нуклонной стабильности для изотопов кислорода остается там, где она предсказывается для сферических ядер. Ядро ^{28}O является нестабильным, несмотря на то, что соседнее ядро ^{29}F , у которого такое же число нейтронов $N=20$, стабильно. Можно предположить, что в данном случае, когда число нейтронов одно и то же, а число протонов отличается на единицу, деформация или протон-нейтронное взаимодей-

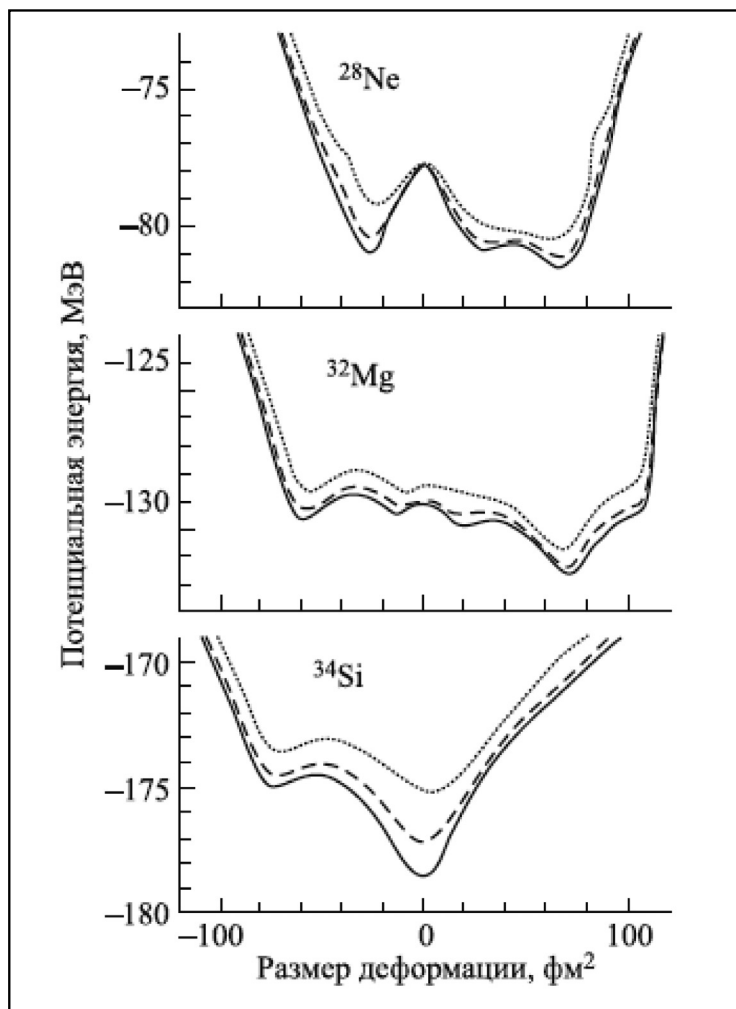


Рис. 5. Поверхности потенциальной энергии для ядер ^{28}Ne , ^{32}Mg , ^{34}Si .

вие играют более важную роль для стабилизации ^{29}F чем оболочечные эффекты. Эта ситуация похожа на ту, что имеет место для ядра ^{11}Li , где наличие дополнительного протона делает его нуклонно-стабильным.

В совместном RIKEN (Япония)–Дубна эксперименте была обнаружена ядерная стабильность самого тяжелого изотопа фтора — ^{31}F [9]. Таким образом было показано, что в то время как самые тяжелые нуклонно-стабильные изотопы азота и кислорода ($Z=7, 8$) имеют число нейтронов $N=16$, самый тяжелый изотоп фтора ($Z=9$) имеет $N=22$.

Только учет эффектов деформации может объяснить ядерную стабильность ^{29}F и ^{31}F вопреки ожидаемой сферической конфигурации, связанной с оболочкой $N=20$. Окончательный ответ на этот принципиальный вопрос могут дать прямые эксперименты, по измерению масс или деформаций в этой области ядер.

Достаточно ярко особенности влияния эффектов деформации проявляется для изотопов Mg при продвижении в область нейтронного избытка — к ядрам $^{37,38}\text{Mg}$. Как уже отмечалось, существование деформации ядер

приводит к изменению границ нуклонной стабильности. С ростом числа нейтронов влияние оболочек $N=20$ и $N=28$ ослабевает. Недавно была подтверждена стабильность ядра ^{40}Mg [10].

Таким образом для большинства легких ядер вблизи оболочек $N=20$ и $N=28$ проявилось т.н. сосуществование двух форм — сферической и деформированной в основном состоянии. Это привело к пересмотру существующих оболочечных моделей для предсказания линии стабильности легких ядер и появлению новых оболочечных чисел $N=16, 26$. В связи с важностью этой проблемы для дальнейшего развития наших представлений о свойствах ядерной материи при большом изотопическом спине (экзотические ядра), практически во всех научных центрах, где имеются ускорительные комплексы стабильных и радиоактивных пучков тяжелых ионов, реализуется физическая программа, направленная на синтез и изучение свойств ядер у границ нуклонной стабильности вблизи оболочечных чисел $N=20$ и $N=28$. В мае 2012 года был проведен совместный Дубна–ГАНИЛ (Франция) эксперимент по исследованию структуры ядра ^{44}S . На рис. 6 приведены предварительные данные по схеме низколежащих уровней в этом ядре и сравнение с расчетами по модели среднего поля. Убедительно показано, что это ядро имеет сосуществование с одинаковой вероятностью двух форм — сферической и деформированной.

Таким образом, сравнивая экспериментальные данные с различными модельными предсказаниями, можно утверждать, что граница нейтронной стабильности достигнута для всех элементов с $Z < 10$. Однако некоторыми авторами высказывается предположение, что в

принципе может иметь место ряд обстоятельств, при которых граница нейтронной стабильности не существует вообще или при которых не исключено существование «островов стабильности» далеко за ее пределами, там, где N/Z имеет очень большие значения [7, 12]. На это указывает систематика энергий связи одного и двух нейтронов [11], из которой видно, что для некоторых тяжелых изотопов легких элементов вблизи границы стабильности, при увеличении массового числа, значения энергии связи плавно уменьшаются и приближаются к значению $S_{n,2n}=0$ почти тангенциально. Кроме того, как и для ядер с двухчастичным гало, может оказаться, что нейтронные кластеры, содержащие большее число нейтронов, могут быть связаны с кором и образовывать еще более тяжелые слабосвязанные системы.

Таким образом, точное определение границ не-стабильности (как нейтронной, так и протонной) является весьма сложной теоретической задачей. Это объясняется тем, что параметры массовых формул определяются экстраполяцией известных ядерных свойств вблизи линии β -стабильности в область ядер с го-

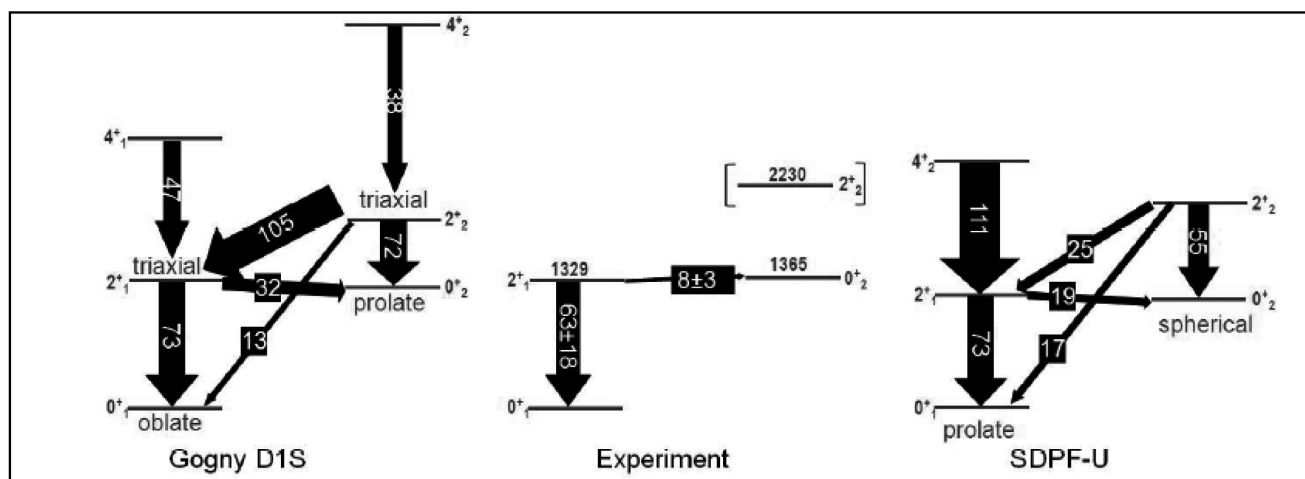


Рис. 6. Сравнение схемы уровней ^{44}S между экспериментальными данными (средняя схема) и расчетами по модели среднего поля (mean-field) — левая схема. Из рисунка следует существенное уменьшение вероятности перехода $B(E2)$ по сравнению с расчетом.

раздо большими отношениями N/Z . Подробный анализ [13] различных расчетов масс показывает, что они могут существенно отличаться в предсказании стабильности одного и того же ядра. Результаты иногда отличаются на 5 МэВ и более по величине энергии связи валентных нуклонов в ядре. В связи с этим положение границы стабильности по отношению к эмиссии нуклонов является модельно-зависимым. Поэтому ответ на вопрос о стабильности ядер с большим избытком нейтронов и об их структуре может дать только эксперимент. В этом смысле любой новый экспериментальный результат для ядер с необычным отношением N/Z является и важной проверкой существующих теоретических моделей.

Как частный случай задачи определения местоположения границы нейтронной стабильности, можно рассматривать и попытки проверить возможность существования островов нуклонно-стабильных ядер, находящихся далеко за пределами предсказанной границы стабильности, а также возможность существования ядер, состоящих из одних нейтронов.

Несмотря на то, что вычисления масс конечных ядер, дают отрицательные предсказания о возможности существования ядер с аномально большим нейтронным избытком, тем не менее, можно привести соображения, свидетельствующих о том, что нельзя исключить эту возможность чисто теоретическим путем.

Хорошо известна аналогия между нейтронной материей и жидким гелием. Два нейтрона, так же как и два атома гелия не образуют связанной системы. Их потенциалы взаимодействия очень похожи, они являются притягивающими, но недостаточно сильны для образования устойчивого ядра или молекулы соответственно. В то же время очень большое число атомов гелия образуют жидкую каплю. Возникает вопрос, не может ли осуществиться аналогичная ситуация с нейтронами. А.И.Базя с сотрудниками [14] пытались решить задачу появления связанной мультинейтронной системы на

микроскопическом уровне. Основной вывод, сделанный ими, состоял в том, что небольшим изменением потенциалов, практически не меняющим фазы нуклон-нуклонного рассеяния при малых энергиях, можно стабилизировать ядро, если число нейтронов не меньше нескольких десятков.

В рамках метода К-гармоник были проведены точные расчеты для пяти различных наборов потенциалов. Результаты расчетов показали, что если число нейтронов меньше 100, то ни один из этих потенциалов не приводит к существованию связанного мультинейтронного состояния. При $N > 112$ связанное состояние возникало для трех из пяти потенциалов. Все эти потенциалы не являлись произвольными, а были апробированы на расчетах энергии связи и радиусов многих ядер, правда, расположенных вблизи долины стабильности.

Расчеты А.И.Базя показали возможность альтернативного, по сравнению с общепринятыми, подхода к проблеме существования нейтронных ядер и подтверждает сделанное выше утверждение, что в настоящее время ни один из теоретических расчетов не дает однозначного вывода о существовании или отсутствии чисто нейтронных ядер. Таким образом, проблему существования нейтронных ядер можно решить только экспериментальным путем. Этот путь должен включать в себя два направления. Первое — это прямое продвижение в сторону ожидаемой границы стабильности посредством синтеза новых ядер с все большим нейтронным избытком, вплоть до обнаружения нейтронно-распадных ядер. Второе — измерения их масс и соответственной энергии связи.

Очевидно, что нуклонно-стабильные нейтронно-избыточные ядра будут β -радиоактивными, причем весьма вероятно, что β -распад в возбужденные состояния дочернего ядра будет сопровождаться испусканием запаздывающих нейтронов. С ростом нейтронного избытка энергия связи последнего нейтрона будет уменьшаться,

и на самой границе стабильности может быть весьма мала. Ясно, что особый интерес вызывает обнаружение всякого рода аномального поведения энергии связи с ростом нейтронного избытка, т.к. это может служить указанием на проявление качественно новых свойств.

Особую роль вблизи нейтронной границы стабильности должно играть парное взаимодействие. Во многих случаях энергия спаривания (2—3 МэВ) оказывается больше энергии связи последнего нейтрона, что приводит к резко выраженным четно-нечетным эффектам. Добавление к ядру с нечетным числом нейтронов только одного нейтрона приводит к существенному повышению его устойчивости, вплоть до изменения знака энергии связи. Следует ожидать, что нечетные (по нейтронам) нуклонно-нестабильные ядра будут чередоваться с четными нуклонно-стабильными. Таким образом, нейтронная граница стабильности представляет собой на диаграмме N-Z не линию, а полосу большей или меньшей ширины. Размеры этой полосы по N определяются конкуренцией между убыванием устойчивости с ростом числа нейтронов и стабилизирующим действием сил спаривания.

В этом случае нейтронный распад может быть замедлен по двум причинам: из-за необходимости преодоления центробежного барьера (для нейтронов с $l > 0$), и в случае, когда в результате распада должна сильно измениться исходная конфигурация нейтронов.

Оценки проницаемости центробежного барьера показывают, что при $l=6$ и энергии распада $E=0,5$ МэВ время жизни может достигать 10^{-16} с. Структурные запреты это время могут еще увеличить. Хотя времена жизни нейтронно-распадных ядер значительно меньше, чем протонно-распадных в области A-100 и не доступны непосредственному измерению, физическая причина их существования одна — вероятность прохождения через потенциальный барьер. С этой точки зрения есть все основания говорить о нейтронной радиоактивности.

Для нейтронной радиоактивности трудно ожидать конкуренции со стороны других типов распада. С ростом нейтронного избытка энергия распада ней-

тронно-радиоактивных ядер должна увеличиваться, а время жизни уменьшаться, достигая постепенно времени свободного разлета. Поиски нейтронной радиоактивности является одной из фундаментальных задач ядерной физики и включены в научные программы современных фабрик радиоактивных пучков.

Одной из сложнейших проблем экспериментальной ядерной физики является синтез экзотических у границ стабильности. Эти ядра, как правило, на 10 и более нейтронов удалены от стабильных ядер, имеют малое время жизни (> 1 мс) и слабую энергию связи. Все это предъявляет особые требования к выбору реакций синтеза таких ядер, метода их транспортировки и регистрации. В основном для синтеза экзотических ядер используются реакции фрагментации бомбардирующего тяжелого иона, прямые реакции типа (p,d) , (d,p) , (d,n) , $(d,^3\text{He})$ и др., а также реакции деления и широко неупругих передач.

Большое будущее в этих исследованиях принадлежит использованию пучков радиоактивных ядер. Исследования с использованием пучков радиоактивных ядер расширяются, что объясняется появлением во многих странах мира новых мощных ускорителей тяжелых ионов средних и промежуточных энергий — ускорительный комплекс UNILAC — SIS — ESR и создание нового ускорительного комплекса FAIR в Дармштадте (ФРГ), ускорительный комплекс GANIL- SPIRAL1 и создание нового комплекса для ускорения радиоактивных пучков SPIRAL2 в Кане (Франция), ускорительный комплекс тяжелых ионов RIKEN (Япония), сверхпроводящий циклотрон в Мичигане (США) и создание нового комплекса (FRIB), циклотронный комплекс тяжелых ионов с накопительным кольцом в Ланчжоу (Китай), сверхпроводящий циклотрон в Катанье (Италия), циклотронный комплекс тяжелых ионов DRIBs в Лаборатории ядерных реакций им.Г.Н.Флёрова ОИЯИ в Дубне (Россия). Новое поколение ускорителей, имеющих высокоинтенсивные (до 10^{14} с $^{-1}$) пучки заряженных частиц от протонов и ядер гелия до ионов урана позволяют в настоящее время начать новый этап исследования ядер у границ нуклонной стабильности с использованием пучков радиоактивных ядер [15].

Литература

1. Флёров Г.Н., Ильинов А.Г. «На пути к сверхэлементам». Библиотечка детской энциклопедии. М.: «Педагогика», 1977.
2. Hansen P.G., Jonson B. //Europhys. Lett., 1987; 4: 409.
3. Detraz C., Vieira D.J. // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci., 1989; 34: 407.
4. Лукьянов С.М., Пеннионжкевич Ю.Э. // Ядерная Физика. 2004; 67: 1654.
5. Intern. Symposium on Exotic Nuclei (EXON2009), Sochi, AIP Conference Proceeding, Editors Penionzhkevich Yu., Lukyanov S. New York. 2010: 1224.
6. Guillemaud- Mueller D., Penionzhkevich Yu. // Z.Phys., 1989; A332: 189.
7. Otsuka T. et al. // Eur.Phys. J. 2002 ; A13: 69.
8. Audi G. et al. // Nucl.Phys. 2003; A729: 3.
9. Sakurai H., Lukyanov S. et al. // Phys.Lett. B, 1999; 409: 180.
10. Baumann T. et al. //Nature (London). 2007; 449: 102.
11. Azaiez F. et al. // Nucl.Phys. 2002; A704: 37.
12. Reed A.T. et al. //Phys.Rev. 1999; C60: 02431.
13. Summerer W. et al. // Phys. Rev. 1990; C42: 2546.
14. Базь А.И. и др. Легкие и промежуточные ядра вблизи границ нуклонной стабильности. М.: «Наука», 1972.
15. Пеннионжкевич Ю.Э. // Ядерная физика. 2008; 71. No.7: 1155.

Сведения об авторе:

Пеннионжкевич Юрий Эрастович — доктор физико-математических наук, профессор, руководитель научным сектором Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований, Дубна, академик-секретарь отделения естественных наук Русской секции Международной академии наук (Здоровье и Экология).
E-mail: puer@lnr.jinr.ru