

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ МАГИЧЕСКИХ, ОКОЛОМАГИЧЕСКИХ И ДЕФОРМИРОВАННЫХ АТОМНЫХ ЯДЕР

В.С. Окунев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

e-mail: okunev@power.bmstu.ru

Выявлены закономерности изменения физических свойств атомных ядер, периодически повторяющиеся для групп нуклидов, составляющих так называемые треугольники стабильности в координатах число нейтронов–число протонов. Если закономерности изменения химических свойств элементов описываются периодическим законом Д.И. Менделеева, то закономерности изменения ядерно-физических свойств нуклидов — треугольниками стабильности. Определены необходимые и достаточные условия устойчивости ядер. Достаточные условия устойчивости нуклида по отношению к электроядерному взаимодействию — равенство нулю или максимум собственного квадрупольного электрического момента и оптимальное отношение чисел нейтронов и протонов в ядре. Показано, что сильно деформированные ядра проявляют свойства дважды магических ядер, а устойчивость нуклидов можно объяснить, не вводя дополнительных магических чисел. Роль заполненности ядерных оболочек в стабилизации атомных ядер сильно преувеличена. Заполненность разных оболочек вносит неодинаковый вклад в стабилизацию ядер.

Ключевые слова: устойчивость атомных ядер, магические ядра, деформированные ядра, ядерные оболочки, треугольники стабильности, период полураспада.

INVESTIGATION OF STABILITY OF THE MAGIC, NEAR-MAGIC AND DEFORMED ATOMIC NUCLEI

V.S. Okunev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

e-mail: okunev@power.bmstu.ru

The regularities of change in physical properties of atomic nuclei are revealed which are repetitive for groups of nuclides that make up the so-called triangles of stability (in the coordinates of “number of neutrons-number of protons”). If the regularities of change in chemical properties of elements are determined by Mendeleev’s periodic law, the patterns of change in nuclear and physical properties of the nuclides are determined by triangles of stability. The necessary and sufficient conditions for the stability of nuclei are defined. The sufficient conditions for stability of the nuclide in relation to electric-nuclear interaction is the zero or maximum value of intrinsic electric quadrupole moment and the optimum ratio of numbers of neutrons and protons in the nucleus. It is shown that strongly deformed nuclei exhibit the properties of doubly magic nuclei, and the stability of nuclides can be explained without introducing the additional magic numbers. The role of nuclear shell occupancy in the stabilization of atomic nuclei is greatly exaggerated. Occupancies of different shells make different contributions to the stabilization of nuclei.

Keywords: stability of atomic nuclei, magic nuclei, deformed nuclei, nuclear shells, stability triangles, half-life.

Введение. Для практического применения важную роль играет устойчивость материалов ядерной техники (атомных ядер) к электроядерному взаимодействию (объединяющему ядерное, электромагнит-

ное и слабое взаимодействия). Устойчивость к сильному взаимодействию проявляется в минимальных сечениях ядерных реакций взаимодействия адронов (главным образом, нейтронов) с ядрами и максимальном пороге кинетической энергии адронов, при которой протекают некоторые реакции, а также в максимальных периодах полураспада ($T_{1/2}$), характеризующих радиоактивные распады атомных ядер, реализующиеся в том числе за счет сильного взаимодействия (спонтанное деление ядер, α -распад, испускание нуклонов, кластерный распад). Устойчивость к электромагнитному взаимодействию характеризуется минимальными сечениями и максимальными порогами фотоядерных реакций, максимальными периодами полураспада ядер в процессах (перечислены выше), стабилизирующий фактор которых — электромагнитное взаимодействие. Устойчивость к слабому взаимодействию проявляется в максимальных периодах полураспада β -превращений (электронный и позитронный распады, электронный захват, захват нейтрино или антинейтрино). Устойчивость атомных ядер характеризуется максимальной средней удельной энергией связи нуклонов в ядре, точнее максимальной энергией связи последнего нейтрона и протона, а также α -частицы или других кластеров, которые могут сформироваться в ядре под действием адронного или γ -излучения, и следует из их большей распространенности в природе.

Для описания свойств атомных ядер используют модель электроядерного взаимодействия. Оптимальное с позиции устойчивости ядер отношение числа нейтронов (N) к числу протонов (Z) в ядре определяется по полуэмпирическому соотношению [1]

$$\frac{N}{Z} = 0,98 + 0,015A^{2/3}, \quad (1)$$

где A — массовое число. Соотношение (1) получено для β -стабильных атомных ядер (полоса стабильности в координатах $N-Z$), т.е. для ядер с зарядом $1 \leq Z \leq 83$, выполняется для наиболее долгоживущих актинидов ($84 \leq Z \leq 103$) и трансактиноидов ($Z > 103$) [2–6].

Роль заполненности ядерных оболочек в устойчивости атомных ядер сильно преувеличена. В работах [2, 6] показано, что оптимальное отношение N/Z (равновесие сил электроядерного взаимодействия, действующих в ядре) является первым фактором стабилизации. Заполненность ядерных оболочек — второй по значимости фактор стабилизации, заметный лишь вблизи оптимального значения отношения N/Z . Четность чисел N и (или) Z — третий фактор стабилизации, проявляющийся опять же при отношении N/Z равном или близком к оптимальному отношению (см. (1)).

За последние 30 лет часто выдвигались гипотезы о существовании дополнительных магических чисел, в том числе в области известных ядер. В настоящей работе сделана попытка проанализировать и систематизировать свойства наиболее устойчивых ядер, не прибегая к дополнительным магическим числам, но с использованием некоторых

закономерностей изменения ядерно-физических свойств нуклидов в зависимости от чисел A , Z и N , позволяющих объединить все известные и неизвестные ядра в так называемые треугольники стабильности на диаграмме $N-Z$ [6]. Доступность и полнота современных библиотек ядерных данных позволяет устанавливать закономерности изменения свойств атомных ядер на основе анализа свойств известных нуклидов без привлечения сложного и трудоемкого математического аппарата, связанного с адаптацией математических моделей атомного ядра к определенной области в координатах $N-Z$. В статье использованы экспериментальные данные по периоду полураспада $T_{1/2}$, приведенные в работах [7, 8].

Идентификация наиболее устойчивых ядер. Экспериментальная идентификация наиболее устойчивых ядер основана на следующих фактах.

1. Ядра с магическими числами нейтронов и протонов имеют аномально большую энергию связи (в том числе последнего нейтрона и протона) и нулевой собственный (внутренний) квадрупольный электрический момент ядра Q (сферически симметричны). Например, энергия присоединения нейтрона или протона к ядру ${}^4_2\text{He}$ отрицательна ($-0,96$ и $-1,97$ МэВ соответственно), энергия присоединения нейтрона или протона к ядрам ${}^1\text{H}$, ${}^2\text{H}$, ${}^3\text{He}$ возрастает в диапазоне значений $2,23 \dots 20,6$ МэВ для нейтрона и до $19,6$ МэВ для протона [9]. Из этого следует устойчивость ядра ${}^4\text{He}$.

2. Повышенная устойчивость магических и дважды магических ядер проявляется в уменьшении сечений захвата нейтронов [7, 8].

3. Среди различных изотопов данного элемента наиболее распространены стабильный изотоп с оптимальным отношением N/Z или стабильный дважды магический изотоп.

4. Энергия радиоактивных распадов в дважды магические ядра максимальна, что характерно для α -распадов ядер при $Z > 83$ и β -превращений (с учетом испускания запаздывающих протонов, нейтронов или γ -квантов). Энергия распада дважды магических ядер минимальна.

Дополнительные магические и полумагические числа нуклонов. К началу 1980-х гг. к магическим числам относили следующие числа протонов и нейтронов: 2, 8, 20, 50, 82, 126. В настоящее время общепризнанными в научной среде являются магические числа 2, 8, 20, 28, 50, 82, 114, 126, одинаковые для протонов и нейтронов, и число нейтронов 184. Существование магических чисел 114 и 184 было предсказано В.М. Струтинским еще в 1966 г. [10]. Все магические и четно-четные (по числам N и Z) ядра характеризуются нулевым спином, а дважды магические ядра, находящиеся в основном энергетическом состоянии, имеют форму шара.

В настоящее время известны семь дважды магических ядер, структура которых подтверждена: ${}^4\text{He}$; ${}^{16}\text{O}$; ${}^{40}\text{Ca}$; ${}^{48}\text{Ca}$; ${}^{56}\text{Ni}$; ${}^{132}\text{Sn}$; ${}^{208}\text{Pb}$.

Статус ядра ^{132}Sn как дважды магического элемента подтвердили лишь в 2012 г. ученые из Окриджской национальной лаборатории [11]. Время жизни других ядер, претендующих на статус дважды магических, настолько мало, что не позволяет изучить их структуру. В конце 1960-х гг. Струтинский теоретически обосновал возможность образования сильно деформированных (по отношению к сферической форме) ядер в квазистационарном состоянии и возможное существование еще одной нейтронной оболочки $N = 162$, связанной с деформацией ядра [10].

По мере развития моделей ядра и проведения работ по экспериментальному получению сверхтяжелых ядер (трансактиноидов) к магическим числам протонов стали относить числа 108 и иногда 120, а магичность числа $N = 162$ получала все большее подтверждение [12]. В работе [12] ядра $^{270}_{108}\text{Hs}^{162}$ названы дважды магическими. В 1981 г. Л. Полин (L. Pauling) предположил существование дополнительных магических чисел нейтронов, расположенных по шкале N между известными магическими числами 50 и 82: 58, 68, 76 и, возможно, 78 [13].

Анализ шестицикловой (для протонов) и восьмицикловой (для нейтронов) схемы Лукаса (C.W. Lucas, Jr.), согласно которой число протонов, находящихся на одной оболочке составляет 50, 32, 18, 18, 8, 2, нейтронов — 50, 50, 32, 32, 18, 18, 8, 2, показал: можно получить новые (дополнительные) магические числа протонов 58, 68, 76 и так называемое полумагическое число 78 [14]. Понятие “полумагическое число” было предложено американским физиком Р.А. Райдином (R.A. Rydin). Полумагические числа отличаются от магических на 2 ($Z + 2$ и $N + 2$), тем самым объединяя фактор заполненности ядерных оболочек и эффект спаривания протонов (нейтронов).

Согласно электродинамической модели ядра, предложенной Лукасом в 1996 г. и завершенной им совместно с Райдином к 2009 г. (модель Лукаса, или Лукаса–Райдина), дополнительными магическими числами протонов являются числа 90, 92, 100, 102, 108, 110, 118, 120, нейтронов — 140, 142, 158, 164, 172, 184 [14–18]. Это позволяет отнести ядра ^{230}Th и ^{234}U к дважды магическим. Расщепление и высокая частота энергетических уровней, а также действие других факторов стабилизации атомных ядер, привели к включению в рассмотрение дополнительных магических и полумагических чисел Z и N . К дополнительным магическим числам Райдин отнес следующие числа (в скобках приведены полумагические): 90, (92), 100, (102), 108, (110), 118, (120), (128), 140, (142), 158, 164, 172, 182, (184). Он также предположил, что некоторые долгоживущие изотопы тория и относительно долгоживущие изотопы фермия, nobелия и других элементов могут оказаться дважды магическими [14]. Заполненность ядерных оболочек, согласно Райдину, подтверждается тем фактом, что эти элементы имеют большое число изотопов. Действительно, известны 19 изотопов

тория, 20 — урана, 12 — нобелия, 20 — церия, 30 — диспрозия, 30 — осмия, а в кривых зависимости периода полураспада $T_{1/2}$ от чисел Z и N в области актиноидов наблюдаются максимумы при $Z = 86, 90, 92, 96$ и $N = 128, 137, 142, 150, 151, 153$ (рис. 1).

Микроскопическая модель ядра позволяет получить магические числа $Z = 114$ и 120 [15, 19, 20]. Райдин подтверждает более ранние предположения физиков о существовании заполненных протонных оболочек при $Z = 108 \dots 110$ и нейтронных при $N \approx 162$ и 172 [15]. Этим он объясняет возможное существование если не острова стабильности, то по крайней мере “отмели” (нуклиды, составляющие ее, могут быть нестабильными, хотя и долгоживущими) в координатах $N-Z$, образованной нуклидами с зарядом $Z = 104 \dots 110$ и $N = 160 \dots 170$ [15]. М. Гапта (M. Gupta) предполагает наличие области стабильности вблизи элементов с $N = 152, 164, 172$ [21]. Согласно модели Лукаса, должна существовать “отмель” на диаграмме $N-Z$ вблизи элементов с $Z = 108$ и $N = 158 \dots 164$ — часть острова стабильности с центром около $Z = 108$ и $N = 182$, “отмель” — при $Z = 102 \dots 116$, и $N = 172 \dots 184$ [14–18].

Подобные исследования по поиску и обоснованию существования дополнительных магических чисел активно ведутся в последние десятилетия. Однако их результаты нельзя полагать общепризнанными. Это замечание касается существования магического числа $Z = 108$ и дважды магического элемента ${}_{108}^{270}\text{Hs}^{162}$ [12], хотя элемент 108 изучен в меньшей степени, чем актиноиды, и пока трудно подтвердить или опровергнуть его дважды магичность.

В природной смеси изотопов одного и того же элемента наиболее распространены дважды магические и магические нуклиды, но только при условии оптимальности отношения N/Z . Как правило, дважды магические (в меньшей степени магические) ядра имеют большое число стабильных или относительно долгоживущих изотопов. Так, со-

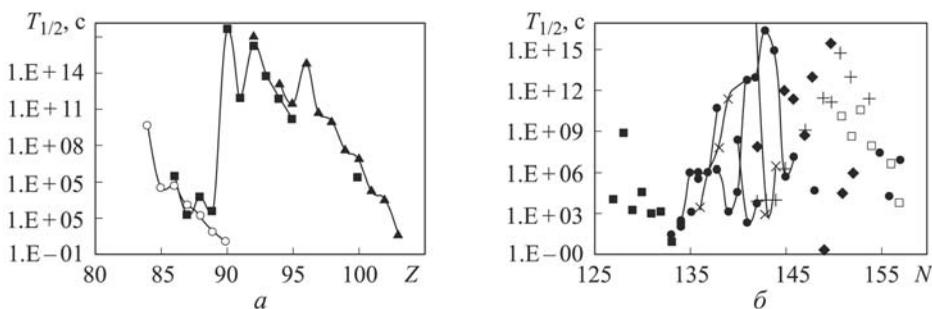


Рис. 1. Зависимость периода полураспада актиноидов от числа протонов (а) и числа нейтронов (б) в ядре (по данным работ [7, 8]; линиями соединены группы нуклидов):

○ — околomagические ($N = 125$) ядра, перегруженные протонами; ■ — ядра с оптимальным отношением N/Z ; ▲ — сильнодеформированные ядра, перегруженные нейтронами; ◆ — изотопы плутония; + — изотопы кюрия; □ — изотопы калифорния; ● — прочие нуклиды

держание дважды магического ядра ^{40}Ca в природной смеси изотопов составляет около 97%, кальций имеет шесть стабильных изотопов. Содержание ядра ^{58}Ni равно 68,27% (пять стабильных изотопов); содержание ядра ^{208}Pb — 52,4% (четыре стабильных изотопа). В соответствии с моделью Лукаса, дважды магическими являются ядра $^{140}\text{Ce}^{82}$ (четыре стабильных изотопа, содержание ядра ^{140}Ce в природном церию 88,45%), осмия с зарядом 76 и массовым числом $A = 168$ ($N = 92$), 166 (90), 176 (100), 178 (102), 184 (108), 186 (110), свинца с числом $Z = 82$ и $A = 182$ ($N = 100$), 190 (108), 192 (110), 200 (118), 202 (120), 208 (126), 210 (128) и др. [15].

Роль субъективного фактора в определении магических чисел.

Откуда такое обилие магических и дважды магических ядер? Велико ли влияние субъективного фактора в их определении? Несомненно. Основы такой субъективности сформировались при разработке и дальнейшем развитии оболочечной модели атомного ядра. Оболочечная модель ядра, созданная М. Гепперт-Майер и И.Х.Д. Йенсенем в 1949–1950 гг., во многом подобна оболочечной модели атома (модели электронных оболочек атома). Энергия нуклонов принимает определенные дискретные значения, т.е. нуклоны находятся на определенных энергетических уровнях. Уровни с близкими энергиями образуют оболочку. Расстояние (по шкале энергии) между соседними энергетическими уровнями внутри одной оболочки значительно меньше, чем между оболочками. Используя орбитальное квантовое число, спин и принцип Паули нетрудно рассчитать расположение ядерных (протонных и нейтронных) энергетических уровней и затем по формальному признаку объединить их в оболочки.

С увеличением массового числа ядра плотность уровней увеличивается. Спин-орбитальные взаимодействия приводят не только к расщеплению уровней, но и к их “перемешиванию”, т.е. один из подуровней одной оболочки формально может оказаться в другой группе близких уровней (в другой оболочке). Так, расстояние между оболочками может быть сравнимым с расстояниями между отдельными энергетическими уровнями, что наиболее ярко проявляется, например, в области магических чисел 20, 28, 50, а также в 82...126. Таким образом, формально есть основания полагать магическими и другие числа, а не только числа 2, 8, 20, 28, 50, 82, 114, 126, 184.

Всегда ли применима модель Лукаса, предполагающая существование дополнительных магических и полумагических чисел? Ядро ^{210}Po является магическим ($N = 126$). Фактор заполненности протонных оболочек (82) и эффект спаривания протонов позволяют формально принять число $Z = 82 + 2 = 84$ полумагическим, и в конечном счете ядро ^{210}Po становится “почти” дважды магическим. Однако это короткоживущий нуклид ($T_{1/2} = 138,4$ сут.), несмотря на оптимальное отношение N/Z . Согласно модели Лукаса, ядро ^{234}U также можно отнести к дважды магическому, но наибольший период полураспада

$T_{1/2}$ среди изотопов урана имеет ядро ^{238}U (4,47 млрд лет), а период полураспада ядра ^{234}U , несмотря на оптимальное отношение N/Z , составляет всего лишь 245 710 лет.

Экспериментальные факты и возникающие вопросы. Числа, которые Райдин называет полумагическими, — не что иное, как дополнительный фактор стабилизации, связанный с эффектом спаривания, характерный для околумагических по числам N и Z ядер. Этот эффект наблюдается вблизи и на полосе стабильных ядер, а также в области нестабильных нуклидов, для которых выполняется соотношение (1) с точностью до четности чисел N и (или) Z . Таким образом, полумагических чисел должно быть гораздо больше, чем предлагает использовать Райдин.

Некоторые дважды магические ядра, удаленные от полосы стабильности, имеют меньший период полураспада, чем ядра, предшествующие им по числу нейтронов и (или) протонов, если числа N и (или) Z нечетные. Как объяснить бóльшую стабильность (большой период $T_{1/2}$) ядер с нечетным числом N или Z ? Никакие полумагические числа объяснить этот факт не могут, хотя бы вследствие их четности. Заполненность ядерных оболочек не объясняет гораздо больший период $T_{1/2}$ ядер ^{232}Th , чем магических ядер $^{216}\text{Th}^{126}$ (0,028 с).

Возникает вопрос: почему нестабильные ядра с ненулевым спином и нечетным числом N или Z , по форме отличающиеся от сферической, оказываются более долгоживущими, чем магические? Действительно, всегда присутствующие, дополнительные факторы стабилизации атомных ядер могут:

- быть незаметными (для ядер с оптимальным отношением N/Z);
- быть заметными, но несущественными (вблизи границ нуклонной стабильности);

- доминировать (вдали от полосы стабильных ядер, расположенных внутри области нуклонной стабильности в координатах $N-Z$ вдали от границ нуклонной стабильности) [2]. Объяснить перечисленные факты иногда нелегко, но очевидно, что ни магичность, ни полумагичность не играют роли. В связи с этим в вершине при прямом угле треугольника стабильности может располагаться более короткоживущий нуклид по сравнению с соседними нуклидами, расположенными на катетах (рис. 2, 3). Например, это ядра ^{216}Th , ^{218}U , ^{242}Cm , ^{242}Cf и др. Такая закономерность характерна при большом отдалении нуклидов от оптимального отношения N/Z .

Возможность минимизации субъективного фактора в определении магических чисел. Исследования доминирования разных факторов стабилизации с помощью треугольников стабильности. Высокую степень субъективизма в определении повышенной устойчивости атомных ядер можно формализовать без ввода дополнительных магических и тем более полумагических чисел, основываясь на факторах стабилизации нуклидов, ранжировав их по степени значимости в

каждом конкретном случае. Следует отметить, что магичность и устойчивость ядра — разные, не всегда взаимосвязанные понятия. Именно в таком ранжировании наиболее значимых факторов стабилизации чаще всего встречаются некоторые трудности [2–6].

Некоторые атомные ядра обладают свойствами дважды магических ядер, не являясь при этом “единожды” магическими. Ярким примером таких нуклидов может служить “отмель” на диаграмме $N-Z$, сформировавшаяся вокруг долгоживущих нуклидов ^{232}Th и ^{238}U . Их ядерно-физические свойства и повышенную устойчивость легко объяснить наличием деформированных ядер в квазистационарном состоянии. В работе [6] показано, что существуют некоторые закономерности изменения физических свойств атомных ядер внутри ограниченной области на диаграмме $N-Z$, по форме близкой к прямоугольному треугольнику (треугольник стабильности), содержащей группу нуклидов. Закономерности изменения свойств ядер для всех таких треугольников одинаковы и носят периодический характер. В области известных ядер в пределах области нуклонной стабильности можно выделить шесть треугольников стабильности, каждый из которых имеет по одному дважды магическому нуклиду: ^{40}Ca , ^{48}Ca , ^{56}Ni , ^{132}Sn , ^{196}Pb (рис. 2, а), ^{208}Pb (рис. 2, б). Можно полагать, что ядро ^{208}Pb характеризуется оптимальным отношением N/Z с точностью до четности чисел N и Z , и соответствующий треугольник содержит всего пять нуклидов: ^{208}Pb , ^{207}Pb , ^{206}Pb , ^{209}Bi (стабильны); ^{210}Po ($T_{1/2} = 2,68 \times 10^5$ лет). Вне этого треугольника расположен короткоживущий ну-

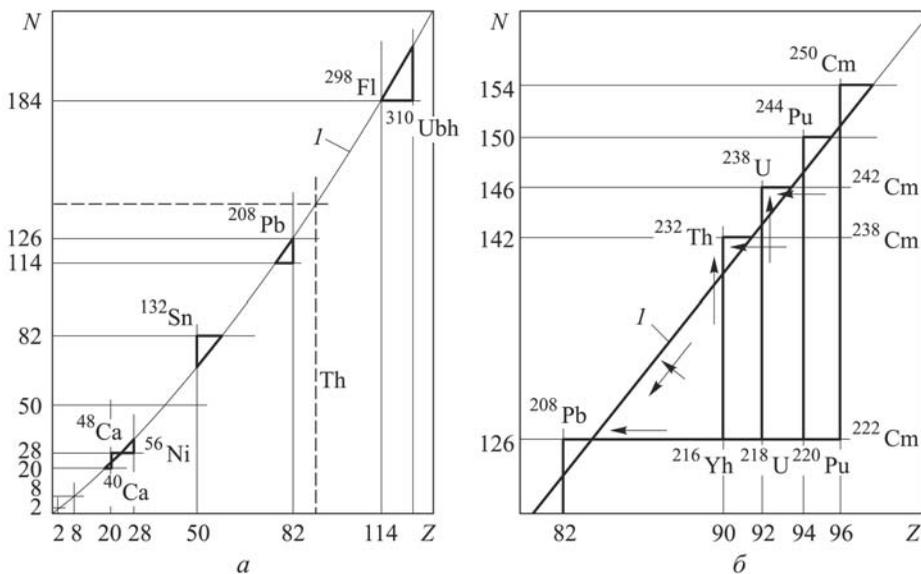


Рис. 2. Треугольники стабильности в координатах $N-Z$, содержащих дважды магические ядра (координатные линии соответствуют магическим числам) [6] (а), и треугольники стабильности ^{208}Pb и актинов (направления повышения устойчивости ядер показаны стрелками; при переходе от ^{232}Th к ^{238}U , ^{244}Pu и ^{250}Cm уменьшается значение Q) (б):

I — кривая электроядерного равновесия

квид ^{210}Po ($T_{1/2} = 138,4$ сут.). Еще один треугольник можно выделить в области трансактиноидов [6]. Относительно большие треугольники могут содержать меньшие треугольники (см. рис. 2, б).

В вершине прямого угла треугольника стабильности должен располагаться наиболее устойчивый нуклид (по сравнению с соседними, находящимися вне треугольника), причем не обязательно дважды магический. Учитывая разные факторы стабилизации атомных ядер, на диаграмме $N-Z$ можно выделить достаточно много треугольников стабильности. В вершине прямого угла могут располагаться:

— стабильные протонно-избыточные нуклиды ($^{46}_{20}\text{Ca}$, $^{48}_{20}\text{Ca}$, $^{76}_{32}\text{Ge}$, $^{92}_{42}\text{Mo}$, $^{96}_{44}\text{Ru}$, $^{102}_{46}\text{Pl}$, $^{106}_{48}\text{Cd}$, $^{112}_{50}\text{Sn}$, $^{120}_{52}\text{Te}$, $^{124}_{54}\text{Xe}$, $^{126}_{54}\text{Xe}$, $^{130}_{56}\text{Ba}$, $^{132}_{56}\text{Ba}$, $^{136}_{58}\text{Ce}$, $^{138}_{58}\text{Ce}$, $^{144}_{62}\text{Sm}$, $^{156}_{66}\text{Dy}$, $^{158}_{66}\text{Dy}$, $^{162}_{68}\text{Er}$, $^{164}_{68}\text{Er}$, $^{168}_{70}\text{Yb}$, $^{180}_{74}\text{W}$, $^{184}_{74}\text{Os}$, $^{196}_{80}\text{Hg}$);

— стабильные нейтронно-избыточные нуклиды ($^{54}_{24}\text{Cr}$, $^{54}_{26}\text{Fe}$, $^{58}_{28}\text{Ni}$, $^{74}_{34}\text{Se}$, $^{78}_{36}\text{Kr}$, $^{84}_{38}\text{Sr}$, $^{86}_{36}\text{Kr}$, $^{94}_{40}\text{Zr}$, $^{96}_{40}\text{Zr}$, $^{100}_{42}\text{Mo}$, $^{104}_{44}\text{Ru}$, $^{112}_{50}\text{Sn}$, $^{110}_{50}\text{Pl}$, $^{114}_{48}\text{Cd}$, $^{116}_{48}\text{Cd}$, $^{124}_{50}\text{Sn}$, $^{128}_{52}\text{Te}$, $^{130}_{52}\text{Te}$, $^{134}_{54}\text{Xe}$, $^{136}_{54}\text{Xe}$, $^{148}_{60}\text{Nd}$, $^{150}_{60}\text{Nd}$, $^{154}_{62}\text{Sm}$, $^{160}_{64}\text{Gd}$, $^{170}_{68}\text{Er}$, $^{176}_{70}\text{Yb}$, $^{186}_{74}\text{W}$, $^{198}_{78}\text{Pt}$);

— относительно долгоживущие нейтроноизбыточные (^{232}Th , ^{238}U , ^{244}Pu , ^{250}Cm) и протоноизбыточные (^{236}Pu , ^{242}Cm , ^{242}Cf) нуклиды (см. рис. 2, б и 3).

На диаграмме $N-Z$ эти нуклиды расположены в непосредственной близости от оптимального значения отношения N/Z . Треугольников стабильности много, а закономерности одинаковы: повторяются при переходе от одного треугольника к другому, т.е. от одной группы нуклидов к другой. Это позволяет прогнозировать свойства еще не открытых атомных ядер.

Согласно закономерностям, наблюдающимся для треугольников стабильности, при приближении к оптимальному значению N/Z (с точностью до четности чисел N и Z) по катетам треугольника в сторону возрастания числа N или Z , увеличивается период полураспада ядер. Если в вершине прямого угла расположено дважды магическое ядро, а других дважды магических ядер такой треугольник не имеет, то при приближении от этой вершины к гипотенузе (оптимальному значению N/Z) по биссектрисе прямого угла (по изобарам дважды магического нуклида), период $T_{1/2}$ может увеличиваться независимо от четности числа N или Z . Четность и даже магичность числа N или Z ядер при удалении от оптимального значения N/Z не является главным фактором стабилизации.

В области α -стабильных легких и средних ядер наблюдаются следующие закономерности. Если треугольник стабильности находится над кривой I (см. рис. 2) в координатах $N-Z$ (в области перегруженности нейтронами), то наиболее долгоживущим оказывается околомагическое ядро с большим числом Z и меньшим числом N . При расположении треугольника под кривой I (в области перегруженности протонами) более долгоживущим будет ядро с меньшим числом Z и большим числом N . В этих случаях геометрическая форма ядра

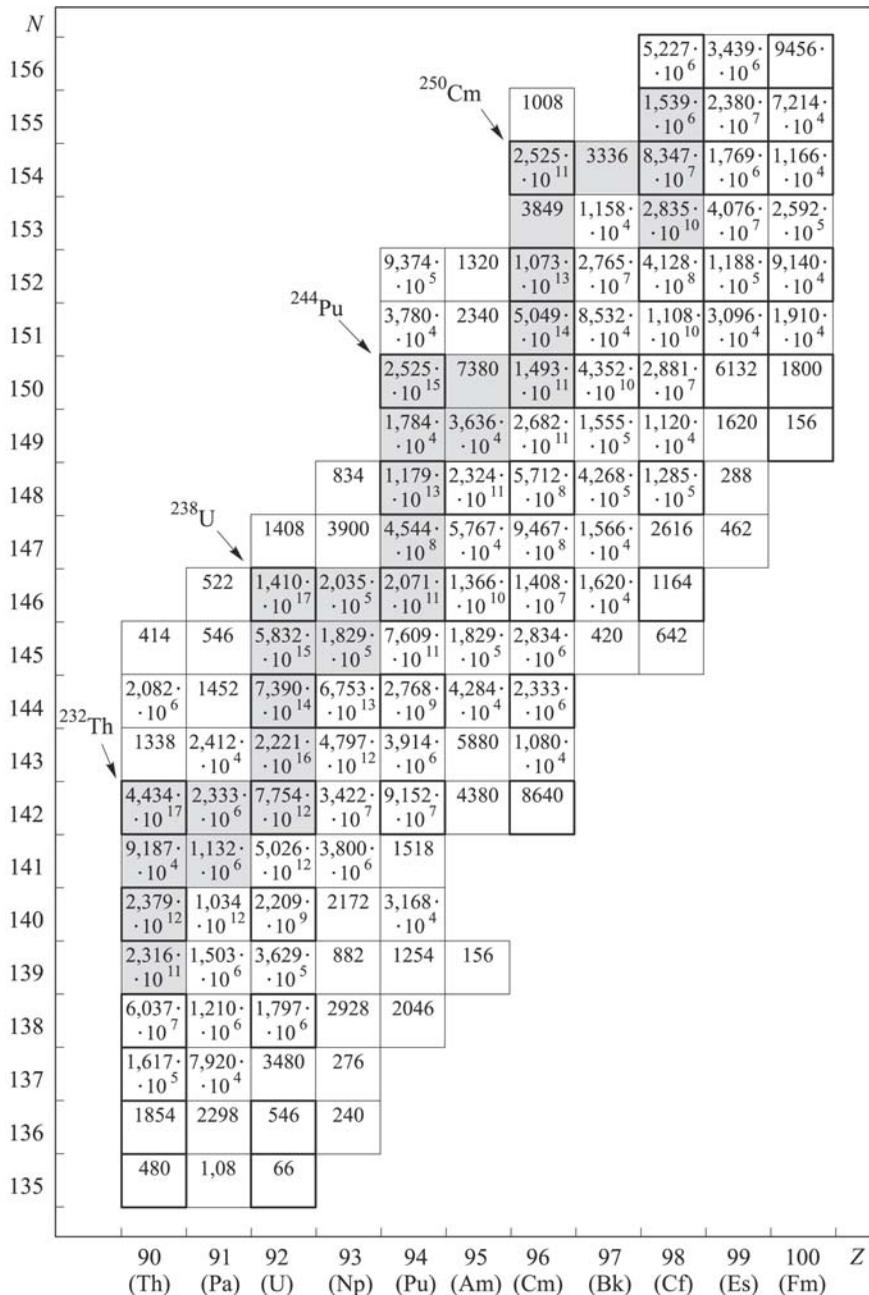


Рис. 3. “Отмель”, образованная пересекающимися треугольниками тория, урана, плутония, кюрия, калифорния (треугольники ^{232}Th , ^{238}U , ^{244}Pu и ^{250}Cm выделены серым; каждый прямоугольник соответствует конкретному нуклиду; вершины прямого угла показаны стрелками; значения периода $T_{1/2}$ приведены в секундах [7]; нуклиды, преимущественно α -излучатели, выделены черной рамкой)

и форма ядерного потенциала отличаются от сферической. Анализ окрестностей треугольников стабильности (нуклидов, расположенных вне этих треугольников) показывает, что последние закономерности

нарушаются в области тяжелых α -активных ядер (см. рис. 1, 3). Так, ядра Ac, Th, U и другие с магическим числом $N = 126$ имеют меньший период полураспада $T_{1/2}$, чем их изотопы еще в большей степени недогруженные нейтронами (^{213}Ac , ^{214}Ac , ^{215}Th , ^{217}U и т.д.). Это объясняется переходом от α -активности, “выгодной” для ядер с магическими числами N и четными числами Z (вследствие дважды магичности α -частицы), к β -превращениям, “выгодным” для ядер с нечетными числами N и (или) Z (предшествующих магическим и дважды магическим) [2]. Бета-превращения, реализующиеся в результате слабого взаимодействия, — более длительные процессы (за редким исключением), чем α -распады, протекающие за счет ядерного взаимодействия со стабилизацией электромагнитным взаимодействием.

В любом случае околоматические ядра, расположенные на диаграмме N – Z ближе к оптимальному значению N/Z , являются более долгоживущими, чем нестабильные магические или дважды магические ядра. Для нуклидов, близко расположенных к кривой I (см. рис. 2), эта закономерность выполняется с точностью до четности чисел N и (или) Z ; для нуклидов, в большей степени отдаленных от оптимального значения N/Z , такая закономерность справедлива вне зависимости от четности или нечетности числа N и (или) Z (эффект спаривания не является фактором стабилизации).

В области суперактиноидов нуклиды $^{309}_{126}\text{Ubh}^{183}$, $^{309}_{125}\text{Ubp}^{184}$ и $^{308}_{125}\text{Ubp}^{183}$ должны быть более долгоживущими, чем дважды магический нуклид $^{310}_{126}\text{Ubh}^{184}$, в связи с их сильной удаленностью от оптимального значения N/Z и близостью к границе протонной стабильности [6]. Точное расположение границ нуклонной стабильности неизвестно. Например, точно известно, что на границе протонной стабильности расположены нуклиды с $Z = 12$ и $N = 8$; $Z = 22$ и $N = 18$; $Z = 70, 72$ и $N = 84, 85$; $Z = 85, 86$ и $N = 108, 110$.

Необходимые и достаточные условия устойчивости атомных ядер. Два треугольника стабильности тория (с вершинами ^{216}Th , ^{232}Th), два — урана (^{218}U , ^{238}U), три — плутония (^{220}Pu , ^{236}Pu , ^{244}Pu), три — кюрия (^{222}Cm , ^{242}Cm , ^{250}Cm), один — калифорния (^{242}Cf) и их окрестности приведены на рис. 2, б и 3. Указаны периоды полураспада ядер этих треугольников. Катеты и гипотенуза, представляющая собой ломаную линию, выделены серым. Анализ ядерно-физических свойств нуклидов, расположенных в этих треугольниках, позволяет сделать вывод: нуклиды ^{232}Th , ^{238}U , ^{236}Pu , ^{244}Pu , ^{242}Cm , ^{250}Cm и ^{242}Cf действительно ведут себя как дважды магические. Формально эти нуклиды могут быть помещены в вершину прямого угла соответствующего треугольника. Согласно закономерностям изменения физических свойств нуклидов, находящихся внутри каждого из треугольников стабильности, ядра ^{230}Th и ^{234}U не должны быть дважды магическими (вопреки модели Лукаса). “Интерференция” треугольников тория, урана, плутония (их взаимное влияние), а также “интерференция” ядерно-физических свойств нуклидов приводят к тому, что

период $T_{1/2}$ α -распадов превышает период $T_{1/2}$ β -превращений, что связано с близостью к определенным числам N и Z (см. рис. 3).

Ядра ^{232}Th , ^{238}U , ^{244}Pu и ^{250}Sm , расположенные в вершинах соответствующих треугольников, перегружены на 2, 5, 4 и 4 нейтрона соответственно по отношению к оптимальному значению N/Z . Каждое из ядер ^{236}Pu , ^{242}Sm , ^{242}Cf недогружено пятью нейтронами, что заметно снижает период $T_{1/2}$ ядер ^{242}Sm и ^{242}Cf (см. рис. 2, б и рис. 3). “Интерференция” этих треугольников образует “отмель”. Короткоживущие ядра ^{216}Th , ^{218}U , ^{220}Pu , ^{222}Sm с магическим числом $N = 126$, расположенные в вершинах других треугольников, сильно перегружены протонами. Наиболее устойчивые деформированные нуклиды, находящиеся в вершинах прямого угла (^{232}Th , ^{238}U , ^{236}Pu , ^{244}Pu , ^{242}Sm , ^{250}Sm , ^{242}Cf), заметно влияют на повышение устойчивости других ядер, расположенных на катетах (N или $Z = \text{const}$), даже за пределами данных треугольников (см. рис. 2, б). Треугольники с дважды магическими ядрами оказывают гораздо меньшее влияние на нуклиды, лежащие вне этих треугольников, и характеризуются более резким переходом от относительно долгоживущих или стабильных нуклидов к короткоживущим нуклидам. Это связано с широким “размытым” максимумом в зависимости $Q(N, Z)$ и малым градиентом $\text{grad } Q$ для деформированных ядер в квазистационарном состоянии, а также с большим градиентом $\text{grad } Q$ в окрестности $Q = 0$ для дважды магических ядер.

Однако модель Лукаса не всегда применима. Специфика оболочечной структуры атомного ядра в отличие от оболочечной структуры атома (электронных оболочек) заключается в отсутствии выделенного силового центра и сильном взаимодействии нуклонов между собой. В связи с этим оболочечную модель ядра построить труднее и сделать это возможно лишь благодаря тому, что сильное взаимодействие нуклонов и короткодействующее влияние ядерных сил позволяют получить сферически симметричный потенциал, в поле которого нуклоны движутся независимо друг от друга [10]. Оболочечная модель неприменима для ядер, находящихся в сильно возбужденных энергетических состояниях: нуклоны в таком ядре нельзя принять практически невзаимодействующими. Оболочечная модель плохо применима для легких сферических ядер, находящихся даже в основном энергетическом состоянии [10].

Как было отмечено ранее, атомные ядра ^{232}Th и ^{238}U имеют свойства дважды магических, не являясь даже “единожды” магическими. Ряд четно-четных ядер с наполовину заполненной оболочкой обладает ярко выраженной структурой вращательных уровней. Этот экспериментальный факт противоречит модели, основанной на предположении о сферической симметрии самосогласованного ядерного потенциала и, следовательно, формы ядра: сферически симметричное ядро согласно законам квантовой механики не имеет вращательных степеней свободы [10]. Таким образом, для некоторых ядер, находящихся в

основном состоянии, и для некоторых возбужденных состояний роль магичности чисел N и (или) Z в устойчивости ядер может не иметь значения, например, ^{232}Th , ^{238}U и в гораздо меньшей степени — ^{244}Pu , ^{236}Pu и ^{248}Cm .

Отклонение распределения электрического заряда в атомном ядре от сферически симметричного характеризует электрический квадрупольный момент ядра. Существуют следующие закономерности. В зависимости собственного (внутреннего) квадрупольного электрического момента Q ядра от чисел N или Z на общем фоне возрастания значения Q при увеличении числа N или Z есть множество локальных максимумов и минимумов. Максимумы соответствуют значениям $Q > 0$ (вытянутые ядра), минимумы — значениям $Q < 0$ (сплюснутые ядра). Магическим числам соответствует $Q = 0$. Зависимость $Q(N)$ или $Q(Z)$, полученная теоретически, пересекает прямую $Q = 0$ в точках N или Z , равных 2, 4, 8, 9, 15, 16, ≈ 20 , 22, 27, 30, 38, 42, 49, 54, 82, 84, 126, 133 [10]. Ядра, соответствующие $Q = 0$, сферически симметричны. Известные (общепризнанные) магические числа соответствуют $Q = 0$ с точностью до четности чисел N или Z (выделены курсивом). Максимумы (указаны в скобках) и минимумы Q , соответствующие максимальному отлнчию от сферической формы ядра, достигаются при значениях N или Z , равных (1), 3, (6), 9, (12), 16, (18), ≈ 20 , (25) 28, (34), 4, (47), 52, (70), 83–84, (108), 128. Возможно, это объясняет обилие дополнительных магических чисел, введенных Полином, Ч. и Дж. Лукасами, Райдином и др. Всего в диапазоне значений N и Z 1...140 находится девять точек максимума Q , девять точек минимума Q , 18 точек пересечения с прямой $Q = 0$. В итоге $9 + 9 + 18 = 36$ магических чисел. Учитывая сильную “размытость” максимумов Q , соответствующих числам N или Z , равным 70 и 104, магических или полумагических чисел может оказаться еще больше. Подавляющее большинство из них не являются магическими в традиционном понимании. Все они соответствуют повышенной устойчивости ядра. Нулевой момент Q — необходимое, но недостаточное условие устойчивости ядра, а значения чисел N и Z , соответствующие экстремумам в зависимости $Q(N)$ или $Q(Z)$, в наибольшей степени отдалены от магических чисел. Деформированные ядра ($Q \rightarrow \max$), как и дважды магические, характеризуются повышенной устойчивостью. Кроме того, деформированное состояние ядра может оказаться более значимым фактором стабилизации, чем заполненность ядерных оболочек. Так, ^{238}U — наиболее долгоживущий изотоп урана, несмотря на неоптимальное отношение N/Z . Известно, что обобщенная модель ядра учитывает отличие ядерного потенциала от сферически симметричного и от взаимодействия между нуклонами ядра. Модель объясняет возникновение вращательных уровней (степеней свободы) у несферических ядер при относительно большом избытке нейтронов и протонов сверх заполнения оболочек (середина заполнения оболочек). Достаточное условие устойчивости ядра: $Q = 0$ или $Q \rightarrow \max$

и оптимальное отношение N/Z (1) с точностью до четности чисел N и Z .

Теоретические зависимости $Q(N)$ и $Q(Z)$ предполагают наличие максимума при $N = 104$ или $Z = 104$ [10]. При этом числа 104, 114 и 120 — немагические ($Q \neq 0$). У экспериментальной зависимости, отличающейся от теоретической, существует несколько локальных максимумов ($Q > 0$) и минимумов ($Q < 0$) вблизи каждого экстремума теоретической зависимости в области тяжелых ядер [1, 10]. Числам $N = 90$ или $Z = 90$ соответствует несколько экспериментальных точек со значениями Q в диапазоне значений $-3 \dots 3$ б ($1 \text{ б} = 10^{-28} \text{ м}^2$), причем большее число точек соответствует $Q > 0$, и нет ни одной экспериментальной точки с $Q = 0$. Для $Z = 92$ (уран) $Q = 1,5, 5,0$ и $6,0$ б. Для $Z = 108$ (хассий) $Q = 3,0$ и $5,8$ б. Таким образом, ядра Th, U и Hs сильно деформированы и числа $Z = 90, 92$ и 108 не являются магическими. Для N и $Z = 114$ определены три экспериментальных значения: $Q = -2,0, 0,9$ и $1,7$ б; для $N = Z = 120$: $Q = -0,7, 0,2$ и $0,5$ б. Это означает, что ядра 114-го и 120-го элементов могут быть либо деформированными, либо магическими по числу Z . При таких значениях Q , не соответствующих сильной деформации, относительно большой период $T_{1/2}$ полученных экспериментально изотопов флеровия можно объяснить лишь магичностью числа $Z = 114$. Максимальным значением Q характеризуются некоторые изотопы тория, урана и кюрия. Это сильно деформированные ядра.

Необходимость дополнительных магических чисел. Критерий заполненности ядерных оболочек. Из изложенного выше следует, что нет оснований вводить в рассмотрение дополнительные магические числа. В целях минимизации субъективного фактора в определении дополнительных магических чисел основным признаком магичности или заполненности ядерных оболочек полагают относительно высокую устойчивость атомных ядер к ядерному, электромагнитному и слабому взаимодействиям. Если подтвержденный экспериментально факт существования таких ядер необъясним с позиции других (кроме заполненности ядерных оболочек) факторов стабилизации, а момент Q относительно невелик (возможно, $Q = 0$), то можно предположить существование дополнительных магических чисел, которые могут различаться (теоретически должны различаться для тяжелых ядер) для протонов и нейтронов. В областях относительно высокого различия в плотности энергетических уровней и сильного “перемешивания” расщепляющихся уровней, например, между числами протонов и нейтронов 82 и 126, формально можно выделить “дополнительные” оболочки — дополнительные магические числа (например, 114, 120, если $Q = 0$). Таким образом, единственный критерий заполненности ядерных оболочек — это $Q = 0$. Все остальные свойства (нулевой спин, сферически симметричный ядерный потенциал) — следствия этого равенства $Q = 0$.

Устойчивость ядер по отношению к электроядерному взаимодействию нельзя принимать за подтверждение заполненности ядерных оболочек.

Различие свойств дважды магических ядер с оптимальным значением N/Z . Ядерно-физические свойства дважды магических ядер с оптимальным значением N/Z могут заметно различаться. В этом случае в прикладном значении можно утверждать, что ядра “в большей или в меньшей степени” магические или дважды магические. С позиции наибольшей стабильности важна не только заполненность ядерных оболочек, но и оптимальность отношения N/Z , и расстояние (по шкале энергии) до соседних оболочек при присоединении дополнительных нуклонов к этому ядру (обычно магичность нуклида экспериментально подтверждают, облучая пленку из соответствующего изотопа дейтронами). Если это расстояние относительно велико, то ядра с заполненными оболочками стабильны и наиболее устойчивы к электроядерному взаимодействию, если — малó, то радиоактивны (хотя могут быть долгоживущими) и менее устойчивы.

Оболочки, соответствующие магическим числам 28 и 50, расположены заметно ближе друг к другу по шкале энергии. Кроме того, оболочка, соответствующая магическому числу 28, содержит всего лишь один энергетический уровень (подуровень расщепляющегося уровня) $1f$, т.е. подуровень первого уровня с орбитальным квантовым числом $l = 3$ и полным моментом нуклона (сумма орбитального и спинового момента), равным $7/2$. Подуровень этого же уровня $1f$ с полным моментом нуклона $5/2$ формально входит в следующую оболочку (соответствующую магическому числу 50). При этом расстояния между оболочками, соответствующими магическим числам 20 и 28, приближенно равны, и для тяжелых ядер (Th или U) составляют 2,04 МэВ. Расстояния между энергетическими уровнями, образующими оболочки, соответствующие магическим числам 20 и 50, в 2 раза меньше. Таким образом, оболочки, соответствующие магическим числам 20, 28, 50, можно формально объединить в одну оболочку, а число 28 “в меньшей степени” магическое, чем 20 или 50. Действительно, распространенность дважды магического нуклида $^{48}\text{Ca}^{28}$ в природной смеси изотопов кальция 0,187 %.

Для определения положения энергетических уровней нуклонов необходимо знать форму, ширину и глубину потенциальной ямы. Обычно полагают, что форма ямы близка к прямоугольной: имеет плоское дно и размытые края, ширина определяется диаметром атомного ядра, а глубину находят из условия, что энергия связи нуклона в ядре приблизительно равна 8 МэВ. Решение уравнения Шрёдингера для частицы, находящейся в такой яме, позволяет получить множество собственных значений и соответствующих им собственных функций, описывающих различные состояния частицы и уровни энергии в потенциальной яме. Например, для ядер Th, U и Pu радиусом около

8 фм глубина ямы составляет 42,8 МэВ. В такой потенциальной яме оболочки, соответствующие магическим числам 50 и 82, разделены энергетическим интервалом 3,2 МэВ, а соответствующие числам 82 и 126 — более 3,6 МэВ. Расстояние между самым нижним и самым верхним уровнями (подуровнями), объединенными формально в одну оболочку, соответствующую магическому числу 126 (без расщепления на 108, 114 и др.), равно 3,63 МэВ. Следовательно, в этой оболочке формально можно выделить три оболочки, разделенные энергетическими интервалами 1,36 и 0,9 МэВ. В связи с этим вводят дополнительные магические числа 108, 114 (иногда 120). Расстояния между этими тремя энергетическими оболочками заметно меньше, чем расстояния между уровнями в оболочке, соответствующей магическому числу 20, и равны 1,135 и 1,36 МэВ. Таким образом, объединение энергетических уровней и подуровней в оболочки весьма условно и отчасти носит субъективный характер. При таком определении магических чисел может быть заметно больше, чем принято рассматривать.

Магические и дважды магические ядра с оптимальным значением N/Z всегда более устойчивы, чем другие ядра. Наиболее устойчивы средние по числу A ядра с максимальной энергией связи (^{58}Fe , ^{62}Ni). Магические и дважды магические ядра, у которых отношение N/Z не оптимально, могут быть гораздо менее устойчивыми, чем немагические ядра с оптимальным значением N/Z .

Общая тенденция, связанная с увеличением плотности уровней и массового числа, позволяет формально вводить дополнительные магические числа при N и $Z > 82$. Магическими их можно принять только в случае $Q = 0$. Можно с уверенностью полагать, что магические числа 2 и 8 при оптимальном значении N/Z соответствуют атомным ядрам, наиболее устойчивым к электроядерному взаимодействию. Три оболочки (20, 28, 50) можно объединить в одну, оболочки с N и $Z > 82$ также формально можно сгруппировать в одну или несколько.

“Отмели”. Как было отмечено, два давно известных максимума (см. рис. 1) в зависимости периода $T_{1/2}(A)$ для ядер с оптимальным или близким к оптимальному значению N/Z (с точностью до четности чисел N и Z), соответствуют двум (и более) перекрывающимся “отмелям” на диаграмме $N-Z$ с центрами в точках $N = 142$, $Z = 90$ (^{232}Th) и $N = 146$, $Z = 92$ (^{238}U) (см. рис. 3). Предполагается, что “отмели”, в отличие от областей стабильности, содержат радиоактивные (хотя и долгоживущие) нуклиды. Тогда можно ли отнести к области стабильности объединения долгоживущих нуклидов, сформировавшиеся вокруг дважды магического 114-го элемента ($^{298}_{114}\text{Fl}^{184}$), если, по оценкам Ю.Ц. Оганесяна, его среднее время жизни составляет несколько миллионов (возможно, миллиардов) лет? Если элемент $^{298}_{114}\text{Fl}$ нестабилен, то вокруг него может возникнуть лишь “отмель” из долгоживущих атомных ядер. Следующим долгоживущим нуклидом с оптимальным значением N/Z может быть магический по числу

$Z = 126$ элемент ${}_{126}^{342}\text{Ubh}^{216}$ [5, 6]. Он не является дважды магическим, значительно отдален от средних ядер, вследствие чего может оказаться более короткоживущим, чем элемент ${}_{114}^{298}\text{Fl}^{184}$. Дважды магический 126-й элемент сильно перегружен протонами и вряд ли будет долгоживущим [2, 5, 6]. Таким образом, при переходе к актиноидам за “отмелью”, образованной долгоживущими изотопами тория и урана, следует другая, “более глубокая отмель”, сформировавшаяся вокруг ядра ${}_{114}^{298}\text{Fl}^{184}$, затем — еще одна, более глубокая с центром в ядре ${}_{126}^{342}\text{Ubh}^{216}$, возможно, вытянутым в сторону увеличения числа нейтронов [6]. В итоге самым тяжелым стабильным нуклидом может оказаться нуклид ${}^{209}\text{Bi}$ и никаких областей стабильности может и не быть: на их предполагаемом месте на диаграмме $N-Z$ расположены всего лишь “отмели”. По мере возрастания массового числа (по крайней мере, пока структура ядра не будет представлять собой полупузырь или пузырь и пока не повлияет гравитационное взаимодействие при переходе к сверхтяжелым ядрам — нейтронным звездам) эти “отмели” будут расположены все глубже, т.е. периоды полураспада ядер, составляющих их, будут все меньше.

Следовательно, существует узкая “полоса” (в координатах $N-Z$) стабильных ядер, 52 стабильных нуклида, расположенных в виде 52 островков в непосредственной близости от нее, и несколько “отмелей”, с центрами ${}^{232}\text{Th}$ и ${}^{238}\text{U}$, которые соответствуют деформированным четно-четным ядрам с максимальным собственным квадрупольным электрическим моментом (сливающихся в одну “отмель”), дважды магическому ${}^{298}\text{Fl}$ и магическому ${}_{126}^{342}\text{Ubh}^{216}$. Последние две “отмели” принято называть островами стабильности. Центры этих “отмелей” лежат на кривой I в координатах $N-Z$ (см. рис. 2) или в непосредственной близости от нее (${}^{232}\text{Th}$, ${}^{238}\text{U}$). В некотором отдалении от кривой электроядерного равновесия I расположены и другие “отмели”, сформировавшиеся вокруг дважды магических ядер, например ${}^{132}\text{Sn}$. По мере отдаления от этой кривой период полураспада дважды магических ядер заметно уменьшается. Кроме того, если принадлежность к магическим числам $Z = 114$ не удастся подтвердить экспериментально, то нуклид ${}^{298}\text{Fl}$ будет гораздо менее короткоживущим (слабо деформирован), чем нуклиды ${}^{232}\text{Th}$ и ${}^{238}\text{U}$. Вблизи границ нуклонной стабильности среднее время жизни ядер, в том числе дважды магических, незначительно превышает среднее время ядерного взаимодействия. Такие ядра формально относят к несуществующим.

Если тенденция, связанная с уменьшением периода $T_{1/2}$ при увеличении массового числа для дважды магических ядер и сильно деформированных ядер, находящихся в квазистационарном состоянии, сохранится (пока не проявятся другие, возможно, не известные факторы стабилизации), то может оказаться бесполезным стремиться получить стабильные нуклиды из числа трансактиноидов. Однако в практическом использовании таких нуклидов долгоживучесть и стабильность не имеют принципиальных различий.

Заключительные замечания. Полагают, что дважды магические ядра наиболее устойчивы. Анализ современных библиотек ядерных данных показывает, что роль заполненности ядерных оболочек в устойчивости атомных ядер сильно преувеличена [7, 8]. Действительно, магические и дважды магические ядра наиболее устойчивы, но только при условии равновесия ядерных, электромагнитных сил и сил слабого взаимодействия. Это соответствует отношению чисел нейтронов и протонов в ядре, определенному по полуэмпирической формуле (1). При этом не ставится под сомнение применимость современных моделей ядра, основанных на его оболочечной структуре. Заполненность ядерных оболочек — второй по степени значимости фактор стабилизации после равновесия электроядерных сил в ядре. Например, дважды магические ядра ^{56}Ni , ^{132}Sn , ^{196}Pb должны быть наиболее устойчивыми (долгоживущими или стабильными), но являются короткоживущими, так как находятся на некотором отдалении от кривой, построенной по соотношению (1) в координатах $N-Z$ (см. рис. 2, а). Дважды магический нуклид ^{208}Pb стабилен, что связано не только с заполненностью ядерных оболочек, но и с оптимальным соотношением N/Z .

Физиками предсказано существование двух островов стабильности, сформировавшихся вокруг дважды магических ядер 114-го ($^{298}\text{Fl}^{184}$) и 126-го ($^{310}\text{Ubn}^{184}$) элементов. Для дважды магического ядра $^{298}\text{Fl}^{184}$ выполняется соотношение (1), и по этим двум причинам (заполненность оболочек и равновесие электроядерных сил) нуклид может оказаться долгоживущим. Ядро $^{310}\text{Ubn}^{184}$ расположено на заметном отдалении от кривой I в координатах $N-Z$ и, несмотря на заполненность ядерных оболочек может оказаться короткоживущим.

Совместное использование оболочечной, обобщенной и микроскопической моделей позволяет сделать вывод: наиболее устойчивые ядра характеризуются нулевым (магические ядра) или максимальным (деформированные) собственным квадрупольным электрическим моментом Q . Для тяжелых ядер теоретически и экспериментально определенные значения Q максимально различаются. Погрешности экспериментального определения момента Q также максимальны для тяжелых ядер. Однако это проблемы не моделей ядра, а точности экспериментального определения значения Q .

При дальнейшем развитии оболочечной, обобщенной и микроскопической моделей ядра возникают некоторые проблемы. Так, согласно электродинамической модели Лукаса–Райдина и модели Полина, существует большое число дополнительных магических (и полумагических) чисел, т.е. чисел, соответствующих заполненности протонных или нейтронных оболочек в ядре [13–18]. Повышенную устойчивость атомных ядер можно объяснить, не вводя дополнительные магические числа.

Предлагаемые в настоящей статье треугольники стабильности в координатах $N-Z$ позволяют качественно прогнозировать физические свойства еще не открытых (не полученных экспериментально) атомных ядер в терминах “стабильный”, “долгоживущий”, “короткоживущий”, “несуществующий нуклид”. Для четкого количественного определения, например периода полураспада, требуются эксперименты. Современные математические модели ядра при их комплексном использовании не позволяют точно экспериментально устанавливать период полураспада неизученных нуклидов. Теоретически полученный период полураспада ^{132}Sn составляет 40 с, экспериментальный — около 4 с. Точность теоретического определения периода полураспада ^{298}Fl также невелика (по оценкам Оганесяна, от нескольких миллионов до нескольких миллиардов лет). Это получено на основе современных математических моделей ядра и при интерполяции с хорошей точностью известных характеристик более легких изотопов флеровия, и некоторых более тяжелых нуклидов, синтезированных в последние годы в лабораториях мира.

Выводы. 1. Роль заполненности ядерных оболочек в стабилизации атомных ядер сильно преувеличена. Основной фактор заполненности ядерных оболочек — равенство нулю собственного квадрупольного электрического момента Q . Все остальные факторы — не причины устойчивости, а следствия. Сильно деформированные ядра ($Q \rightarrow \max$) в квазистационарном состоянии, как и дважды магические, характеризуются повышенной устойчивостью. Деформированное состояние ядра может оказаться более значимым фактором стабилизации, чем заполненность ядерных оболочек.

2. Заполненность ядерных оболочек и существование сильно деформированного квазистационарного состояния — необходимое, но недостаточное условие устойчивости нуклида по отношению к электроядерному взаимодействию. Достаточное условие устойчивости $Q = 0$ или $Q \rightarrow \max$ и оптимальное отношение N/Z (1) с точностью до четности чисел N и Z .

3. Заполненность разных оболочек вносит неодинаковый вклад в стабилизацию ядер. В результате существуют разные дважды магические ядра с одинаковой (сферической) формой, одинаковые некоторые квантовые числа, отличающиеся по свойствам ($T_{1/2}$, сечениям ядерных и фотоядерных реакций), в том числе не связанным с различием массовых чисел.

4. Стабильность или наибольшую устойчивость элементов можно объяснить, не вводя дополнительных магических и полумагических чисел.

5. Околомагические ядра со значением N/Z , далеким от оптимального (1), могут оказаться более долгоживущими, чем магические по причине перехода от α - (для магических ядер) к β -радиоактивности.

6. К магическим числам можно с уверенностью отнести числа 2, 8, 20, 28, 50, 82 (одинаковые для протонов и нейтронов) и числа нейтронов 114, 126, 184. Магичность $Z = 114$ и 126 не подтверждена экспериментально, хотя есть все основания полагать магическим число $Z = 114$. Числа $Z = 90, 92$ и 108 не являются магическими и соответствуют деформированным состояниям ядер. Полностью отпадает необходимость во введении новых магических и полумагических чисел. Повышение устойчивости ядер с числами N и Z , отличными от магических, объясняется другими факторами стабилизации, не связанными с заполненностью ядерных оболочек.

7. “Интерференция” треугольников стабильности позволяет объяснить парадокс, связанный с большим периодом $T_{1/2}$ α -распадов, чем β -превращений, для соседних нуклидов.

8. По сравнению с треугольниками, образованными деформированными тяжелыми ядрами, треугольники, содержащие дважды магические ядра, гораздо меньше влияют на нуклиды, лежащие вне этих треугольников, и характеризуются более резким переходом от относительно долгоживущих или стабильных к короткоживущим нуклидам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ядерная физика в Интернете*. Проект кафедры общей ядерной физики физического факультета МГУ. URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/enc/e189.htm> (Дата обращения: 17.12.2012).
2. *Окунев В.С.* Исследование эффектов стабилизации и влияния перегруженности протонами на ядерно-физические свойства тяжелых нуклидов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Естественные науки”. 2011. № 4. С. 81–98.
3. *Окунев В.С.* Об одной особенности деления легких изотопов тяжелых ядер с четным числом нейтронов // Необратимые процессы в природе и технике: Труды Шестой Всероссийской конференции 26–28 января 2011 г. В 3 ч. Ч. 1. 2011. С. 29–33.
4. *Окунев В.С.* Особенность деления тяжелых ядер, перегруженных протонами // Научная сессия НИЯУ МИФИ–2011. Аннот. докл. В 3 т. Т. 1. Инновационные ядерные технологии. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. С. 58.
5. *Окунев В.С.* О возможном смещении центра острова стабильности, образованного 126-м элементом // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2012. Аннот. докл. В 3 т. Т. 1. Инновационные ядерные технологии. Высокие технологии в медицине. М.: НИЯУ МИФИ. 2012. С. 63.
6. *Окунев В.С.* Об островах стабильности трансактиноидов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. № 4. 2012. С. 13–32.
7. *The JEFF Nuclear Data Library*. URL: <http://www.oecd-nea.org/dbdata/jeff/> (Дата обращения: 17.12.2012).
8. *Секция ядерных данных МАГАТЭ*. Nuclear Data Services. URL: <http://www.nds.iaea.org> (Дата обращения: 17.12.2012).
9. *Окунев В.С.* Основы прикладной ядерной физики и введение в физику ядерных реакторов / Под ред. В.И. Солонина. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 462 с.
10. *Мухин К.Н.* Экспериментальная ядерная физика. В 2 кн. Кн. 1. Ч. 1. М.: Энергоатомиздат, 1993. 315 с.

11. *Lenta.ru*. Издание Rambler Media Group. 07.12.2012. URL:<http://lenta.ru/news/2010/05/27/magic/> (Дата обращения: 07.12.2012).
12. *Dvorak J., Brichle W., Chelnokov M.* et al. Doubly magic nucleus $^{270}_{108}\text{Hs}^{162}$ // *Physical Review Letters*. 2006. Vol. 97. P. 242501.
13. *Pauling L.* Changes in the structure of nuclei between the numbers 50 and 82 as indicated by a rotating-cluster analysis of the energy values of the first 2+ excited states of isotopes of cadmium, tin and tellurium // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. 78 (1981).
14. *Lucas J.C., Lucas Jr., C.W.* A physical model for atoms and nucleus. Part 1 // *Found. Sci.* 2002. 5(1). P. 1.
15. *Rydin R.A.* A new approach to finding magic numbers for heavy and superheavy elements // *Annals of Nuclear Energy*. 2011. No 38. P. 238–242.
16. *Rydin R.A.* New magic numbers in the continent of isotopes // *Annals of Nuclear Energy*. 2011. No 38. P. 2356–2358.
17. *Lucas Jr., C.W.* A classical electrodynamic theory of the nucleus // *Galilean Electrodyn.* 1996. No 7 (January/February). P. 1.
18. *Lucas Jr., C.W., Rydin R.A.* Electrodynamics model of the nucleus // *Nucl. Sci. Eng.* 2009. No 161. P. 255–256.
19. *Айзенберг М., Грайнер В.* Микроскопическая теория ядра. М.: Атомиздат, 1976.
20. *Слив Л., Стрикман М.И., Франкфурт Л.Л.* Проблемы построения микроскопической теории ядра и квантовая хромодинамика // *Успехи физических наук*. 1976. Т. 145. Вып. 4. С. 553–592.
21. *Gupta M.* The superheavy elements. April, 13. 2010. URL: http://www.scitopics.com/The_Superheavy_Elements.html (Дата обращения: 17.12.2012).

REFERENCES

- [1] *Yadernaya fizika v Internetе*. Proekt kafedry obshchey yadernoy fiziki MGU [Nuclear physics on the Internet. Project of General Nuclear Physics Department of Moscow State University]. Available at: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/enc/e189.htm> (accessed: 17.12.2012).
- [2] Okunev V.S. Study of stabilization effects and the influence of proton congestion on nuclear-physical properties of heavy nuclides. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2011, no. 4, pp. 81–98 (in Russ.).
- [3] Okunev V.S. On fission of light isotopes of heavy nuclei with an even number of neutrons. *Tr. 6 Vseross. Konf. "Neobratimye protsessy v prirode i tekhnike". Ch. 1* [Proc. 6 All-Russ. Conf. "Irreversible processes in nature and technology". Vol. 1.], 2011, pp. 29–33 (in Russ.).
- [4] Okunev V.S. The fission of heavy nuclei congested with protons. *Nauch. Sess. NIYaU MIFI-2012*. Annot. dokl. T. 1. "Innovatsionnye yadernye tekhnologii. Vysokie tekhnologii v meditsine" [Proc. Sci. Sess. MIFI 2012. Vol. 1. "Innovative nuclear technology. High technology in medicine"]. Moscow, NIYaU MIFI Publ., 2012, p. 58 (in Russ.).
- [5] Okunev V.S. On the possible displacement of the center of the stability area formed by the 126th element. *Nauch. Sess. NIYaU MIFI-2012*. Annot. dokl. T. 1. "Innovatsionnye yadernye tekhnologii. Vysokie tekhnologii v meditsine" [Proc. Sci. Sess. MIFI 2012. Vol. 1. "Innovative nuclear technology. High technology in medicine"]. Moscow, NIYaU MIFI Publ., 2012, p. 63 (in Russ.).
- [6] Okunev V.S. On the stability areas of transaktinoids. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2012, no. 4, pp. 13–32 (in Russ.).
- [7] The JEFF Nuclear Data Library. Available at: <http://www.oecd-nea.org/dbdata/jeff/> (accessed: 17.12.2012).

- [8] IAEA Nuclear Data Services. Available at: <http://www.nds.iaea.org> (accessed: 17.12.2012).
- [9] Okunev V.S. Solonin V.I. *Osnovy prikladnoy yadernoy fiziki i vvedenie v fiziku yadernykh reaktorov* [Fundamentals of applied nuclear physics and introduction to the physics of nuclear reactors]. Moscow, MG TU im. N.E. Bauman Publ., 2010. 462 p.
- [10] Mukhin K.N. *Eksperimental'naya yadernaya fizika*. Kn. 1. [Experimental nuclear physics. Vol. 1]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1993. 315 p.
- [11] Lenta.ru. Rambler Media Group. Available at: <http://lenta.ru/news/2010/05/27/magic/> (accessed: 07.12.2012).
- [12] Dvorak J., Bruchle W., Chelnokov M., Dressler R., Düllmann Ch.E., Eberhardt K., Gorshkov V., Jäger E., Krücken R., Kuznetsov A., Nagame Y., Nebel F., Novackova Z., Qin Z., Schädel M., Schausten B., Schimpf E., Semchenkov A., Thörle P., Türler A., Wegrzecki M., Wierczinski B., Yakushev A., Yeremin A. Doubly magic nucleus $^{270}_{108}\text{Hs}^{162}$. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, vol. 97, no. 24, 4 p.
- [13] Pauling L. Changes in the structure of nuclei between the numbers 50 and 82 as indicated by a rotating-cluster analysis of the energy values of the first 2+ excited states of isotopes of cadmium, tin, and tellurium. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.*, 1981, vol. 78.
- [14] Lucas J.C., Lucas Jr., C.W. A Physical Model for Atoms and Nucleus. Part 1. *Found. Sci.*, 2002, no. 5 (1), p. 1.
- [15] Rydin R.A. A new approach to finding magic numbers for heavy and superheavy elements. *Ann. Nucl. Energy*, 2011, no. 38, pp. 238–242.
- [16] Rydin R.A. New magic numbers in the continent of isotopes. *Ann. Nucl. Energy*, 2011, no. 38, pp. 2356–2358.
- [17] Lucas Jr., C.W. A classical electrodynamic theory of the nucleus. *Galilean Electrodyn.*, 1996, no. 7, p. 1.
- [18] Lucas Jr., C.W., Rydin R.A. Electrodynamics model of the nucleus. *Nucl. Sci. Eng.*, 2009, no. 161, pp. 255–256.
- [19] Eisenberg J.M., Greiner W. *Microscopic theory of the nucleus*. North-Holland, 1976. 519 p. (Russ. ed.: Ayzenberg M., Grayner V. *Mikroskopicheskaya teoriya yadra*. Moscow, Atomizdat Publ., 1976. 488 p.).
- [20] Sliv L., Strikman M.I., Frankfurt L.L. The problems of the microscopic nuclear theory and quantum chromodynamics. *Usp. Fiz. Nauk* [Sov. Phys.-Usp.], 1976, vol. 145, no. 4, pp. 553–592 (in Russ.).
- [21] Gupta M. The superheavy elements. Available at: <http://www.scitopics.com> (accessed: 13 April 2010).

Статья поступила в редакцию 29.04.2013

Вячеслав Сергеевич Окунев — канд. техн. наук, доцент кафедры “Ядерные реакторы и установки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 148 научных работ в области исследования операций, вариационных методов, оптимизации и обоснования безопасности ядерных реакторов, в том числе в условиях неопределенности исходной информации, ядерной физики низких энергий.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская, д. 5.

V.S. Okunev — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of “Nuclear Reactors and Plants” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 148 publications in the field of investigation of operations, variational methods, optimization and substantiation of safety of nuclear reactors (including those under conditions of indeterminacy of initial information), low-energy nuclear physics.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russia.