

Лабораторная работа №1

Свойства атомных ядер

Цель работы: научиться пользоваться современными базами данных в научно-исследовательской работе, получить более углубленное представление о материале, изучаемом на лекциях и семинарских занятиях по ядерной физике.

N–Z диаграмма атомных ядер

Атомные ядра представляют собой квантовые системы нуклонов, связанных между собой ядерным взаимодействием. Свойства атомных ядер определяются совместным действием сильных, электромагнитных и слабых взаимодействий.

Атомные ядра состоят из нейтронов (n) и протонов (p). Характеристики свободных нейтронов и протонов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики свободных протонов и нейтронов.

Характеристики свободных нейтронов и протонов	n	p
Масса, МэВ	939.57	938.27
Спин, $h = 6.58 \cdot 10^{-22}$ МэВс	1/2	1/2
Заряд, $e = 1.60217733 \pm 49 \cdot 10^{-19}$ Кл	$(-0.4 \pm 0.1)10^{-21}$	$(q_p+q_n)/e < 10^{-21}$
Магнитный момент	-1.91	2.79
Период полураспада	887 ± 2 с	$> 10^{32}$ лет
Четность	+	+
Статистика	Ферми-Дирака	
Схема распада	$n \rightarrow p + e^- + \nu_e$	-

В настоящее время обнаружено ~ 3000 атомных ядер, представляющих собой различные сочетания чисел протонов Z и нейтронов N . По существующим оценкам число атомных ядер может составлять ~ 6500 .

На рис. 1 показана N-Z диаграмма атомных ядер. Интерактивную диаграмму подобного рода можно найти на сайте <http://www.nndc.bnl.gov/> (база данных Брукхэвенской национальной лаборатории, Национальный центр ядерных данных, США), или, например, на сайте <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html> (секция ядерных данных МАГАТЭ, раздел онлайн карты нуклидов, LiveChart of Nuclides). Черными

точками показаны стабильные ядра. Область расположения стабильных ядер обычно называют долиной стабильности. С помощью капельной модели ядра можно найти условие, связывающее A и Z для ядер долины стабильности.

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

С левой стороны от стабильных ядер находятся ядра перегруженные протонами (протоноизбыточные ядра), справа — ядра перегруженные нейтронами (нейтроноизбыточные ядра). Линия $B_p=0$ (B_p — энергия отделения протонов) ограничивает область существования атомных ядер слева (proton drip-line). Линия $B_n=0$ (B_n — энергия отделения нейтронов) ограничивает область существования атомных ядер справа (neutron drip-line). Вне этих границ атомные ядра существовать не могут, так как они распадаются за характерное ядерное время ($\sim 10^{-23}$ с) с испусканием нуклонов.

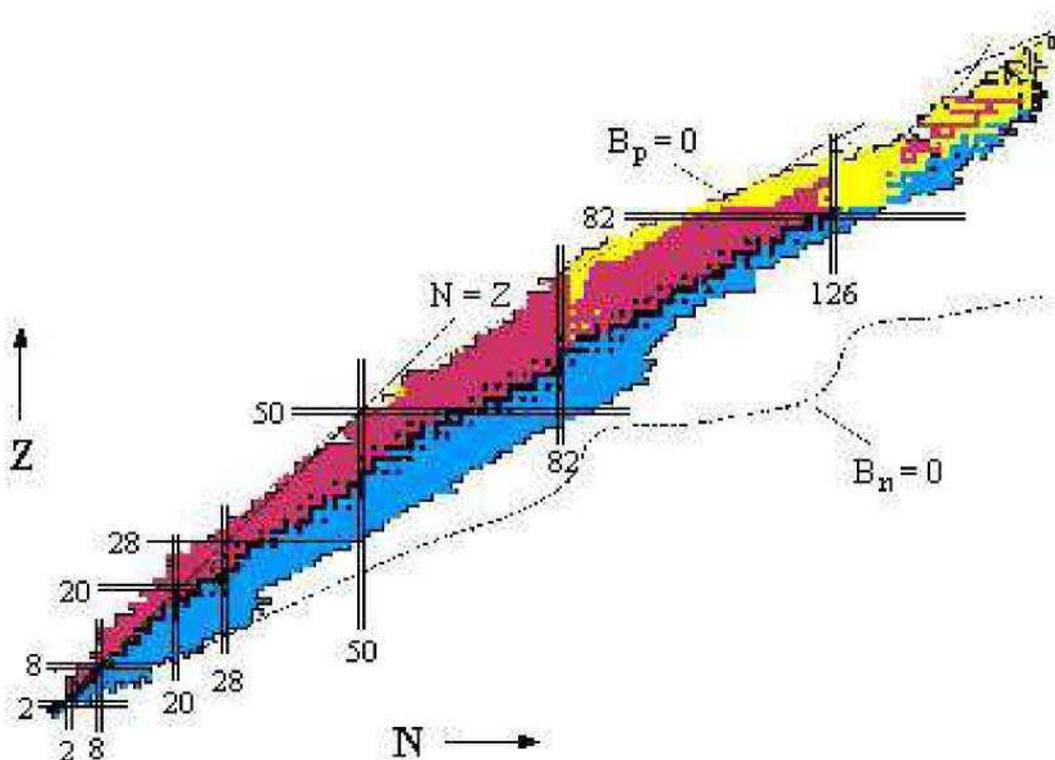


Рис. 1: N-Z диаграмма атомных ядер

Все это отчетливо можно наблюдать на начальном участке N-Z диаграммы приведенной в более крупном масштабе на рис. 2. Черными клетками показаны стабильные изотопы. Для них приведено процентное содержание в естественной смеси изотопов. Серым цветом показаны β^+ и β^- радиоактивные ядра. Для них приведены периоды полураспада и указан тип радиоактивного распада. Кроме того, приведено значение верхней границы β -спектра и характерные γ -переходы. Ядра, расположенные на границе стабильности

имеющие характерное время жизни $\sim 10^{-20}$ - 10^{-23} с показаны белыми клеточками. Для них приведены ширина распада и тип испускаемой частицы (p, n, α). В крайних левых клетках, для каждого элемента, приведены химический символ элемента и атомный вес химического элемента.

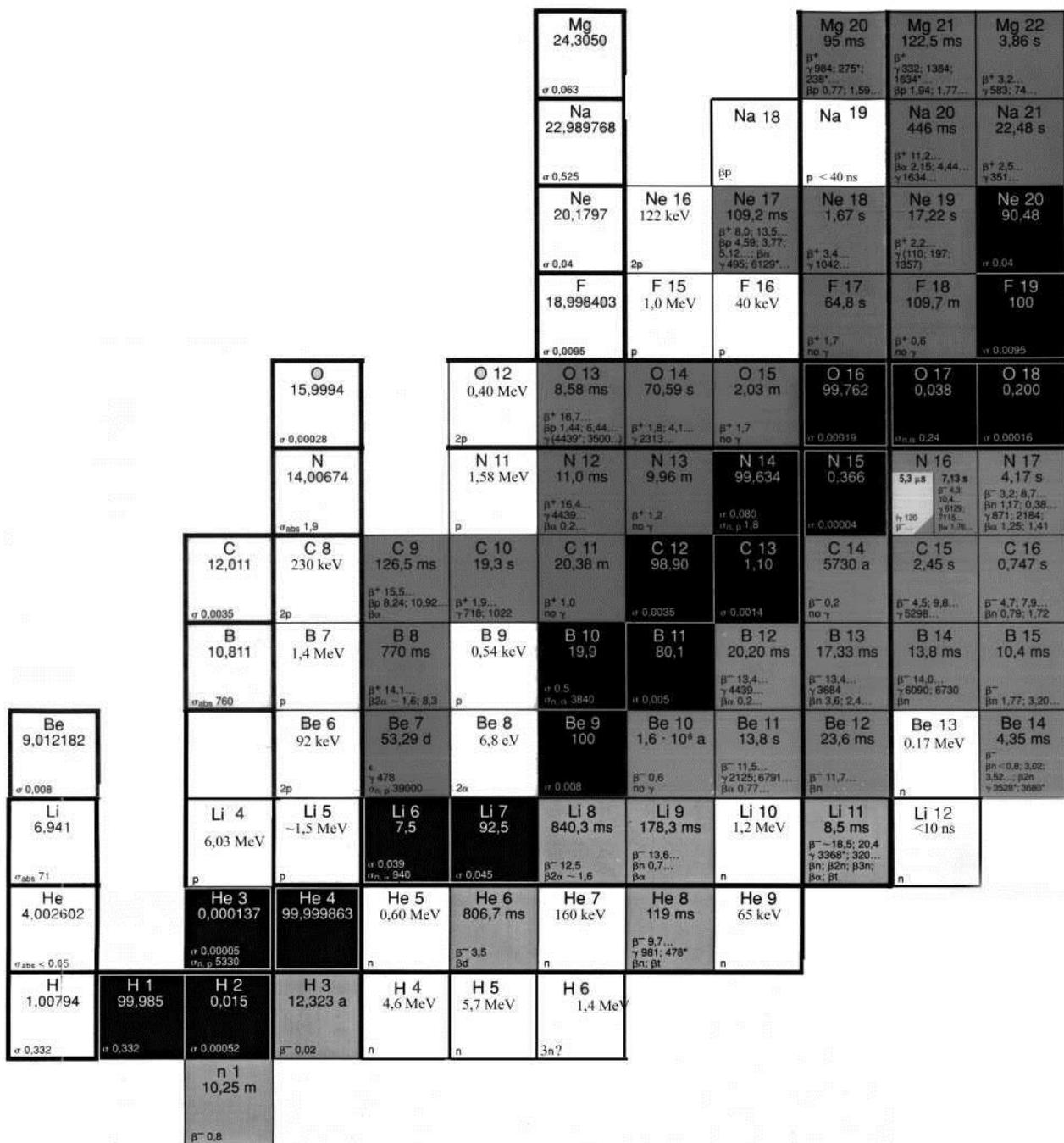


Рис. 2: N-Z диаграмма атомных ядер (начальный участок)

В качестве примера рассмотрим изотопы лития ($Z = 3$). Существует два стабильных изотопа ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$. Процентное содержание их в естественной смеси составляет соответственно 7.5 и 92.5 процента. Изотопы ${}^8\text{Li}$, ${}^9\text{Li}$, ${}^{11}\text{Li}$ являются β^- -радиоактивными. Ядро ${}^4\text{Li}$ испускает протоны из основного состояния и имеет ширину распада по протонному каналу $\Gamma = 6.03$ МэВ или

период полураспада $T_{1/2} = 7.6 * 10^{-23}$ с. Ядро ${}^5\text{Li}$ разваливается на протон и α -частицу. Таким образом, ядра ${}^4\text{Li}$ и ${}^5\text{Li}$ находятся за левой границей стабильности атомных ядер (proton drip-line). Изотопы ${}^{10}\text{Li}$ и ${}^{12}\text{Li}$ распадаются с испусканием нейтронов. Здесь проходит правая граница стабильности атомных ядер (neutron drip-line). Изотоп ${}^{11}\text{Li}$ имеет период полураспада $T_{1/2} = 8.5$ мс. Такое относительно большое время жизни по сравнению со своими соседями обусловлено тем, что это ядро является четно-нечетным ($N = 8, Z = 3$) и имеет соответственно большую энергию связи по сравнению со своими соседями нечетно-нечетными изотопами ${}^{10}\text{Li}$ и ${}^{12}\text{Li}$.

В настоящее время ситуация такова. Экспериментально обнаруженные атомные ядра практически вплотную приблизились к левой границе области возможного существования атомных ядер ($B_p=0$), граница экспериментально обнаруженных нейтроноизбыточных ядер (за исключением легких) проходит пока довольно далеко от $B_n=0$.

Масса атомного ядра

Масса атомного ядра — одна из важнейших его характеристик. Точные измерения масс атомных ядер показали, что масса ядра отличается от суммы масс свободных протонов и нейтронов, входящих в состав ядра. Энергия соответствующая этой разности масс, называется энергией связи ядра:

$$E_{\text{св}} = [(NM_n + ZM_p - M(A, Z)] * k$$

Где k — коэффициент для перевода из массы в энергию. В подавляющем большинстве работ по ядерной физике в качестве единиц массы используются атомные единицы массы, а в качестве энергии электронвольты. Коэффициент k в данном случае имеет значение 931 МэВ/а.е.м. Энергия связи ядра $E_{\text{св}}$ определяет минимальную энергию, которую надо затратить, чтобы разделить ядро на отдельные нуклоны. Для характеристики устойчивости ядра удобно использовать удельную энергию связи $\epsilon = E_{\text{св}}/A$ — энергию связи, приходящуюся на один нуклон. Величина удельной энергии связи для большинства ядер лежит в пределах 6-8 МэВ. Пропорциональность полной энергии связи числу нуклонов в ядре объясняется тем, что ядерные силы обладают свойством насыщения.

В рамках капельной модели ядра удалось объяснить многие свойства атомных ядер и получить полуэмпирическую формулу для энергии связи атомных ядер (формула Вайцзеккера), которая позволила понять некоторые закономерности α - и β -распадов, делении ядер и оценивать массы и энергии связи новых ядер:

$$M(A, Z) = Zm_p + Nm_n - E_{CB}(A, Z) \quad (2)$$

$$m_p = 938,28 \text{ МэВ}, m_n = 939,57 \text{ МэВ}.$$

$$E_{CB}(A, Z) = a_1 A - a_2 A^{2/3} - a_3 Z^2 A^{-1/3} - a_4 ((A/2 - Z)^2)/A + a_5 A^{-3/4} \quad (3)$$

$$a_1 = 15,75 \text{ МэВ}, a_2 = 17,8 \text{ МэВ}, a_3 = 0,71 \text{ МэВ}, a_4 = 94,8 \text{ МэВ},$$

$$a_5 \begin{cases} -34 \text{ МэВ} & \text{Для нечетно - нечетных ядер (нечетные } N \text{ и } Z) \\ 0 & \text{Для четно - нечетных и нечетно - четных ядер} \\ +34 \text{ МэВ} & \text{Для четно - четных ядер (четные } N \text{ и } Z) \end{cases}$$

Экспериментальные исследования выявили некоторую периодичность в изменении индивидуальных характеристик основных и возбужденных состояний атомных ядер (таких, как энергии связи, спины, магнитные моменты, четности, некоторые особенности α - и β -распадов, размещение ядер-изомеров среди остальных ядер и др.) Эту периодичность капельная модель описать была не способна. Отмеченная периодичность подобна периодичности свойств электронных оболочек атома и определяется магическими числами нейтронов и протонов:

N	2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, 184
Z	2, 8, 20, 28, 50, 82, 114

Магические числа нейтронов и протонов по аналогии с атомами соответствуют полностью заполненным ядерным оболочкам. Различие в магических числах — 126 (для нейтронов) и 114 (для протонов) — обусловлено кулоновским взаимодействием.

Зная массу атомного ядра или дефект масс ядра, можно предсказать многие свойства атомного ядра, такие как стабильно оно или нет, и если распадается, то тип распада и его характеристики. Массы атомных ядер представляют особый интерес для идентификации новых ядер, понимания их структуры.

Отклонение энергии связи атомных ядер от гладкой кривой, предсказываемой капельной моделью, является прямым указанием на оболочечную структуру ядра. Различие в энергиях связи между четными и нечетными ядрами указывает на наличие сил спаривания в атомных ядрах. Отклонение от «гладкого» поведения величин энергий отделения двух нуклонов в ядрах между заполненными оболочками указывает на деформацию атомных ядер в основном состоянии.

Данные о массах атомных ядер лежат в основе проверки различных моделей атомных ядер, причем большое значение имеет точность знания масс ядер. Массы атомных ядер вычисляются с помощью различных феноменологических или полуэмпирических моделей, использующих различные приближения макроскопических и микроскопических теорий. Существующие в настоящее время массовые формулы достаточно хорошо описывают массы атомных ядер вблизи долины стабильности. Однако для ядер, удаленных от долины стабильности, неопределенность в предсказании массы увеличивается, достигая нескольких МэВ (рис. 4).

Сравнение предсказаний различных моделей с экспериментально измеренными массами ядер указывает на то, что предпочтение следует отдавать моделям, базирующимся на микроскопическом описании, учитывающим оболочечную структуру ядер. Существует несколько способов экспериментального определения масс атомных ядер. Ниже они кратко перечислены.

Радиус ядра (A,Z)

Радиус ядра можно приближённо оценить по следующей формуле:

$$R \approx 1.3 A^{1/3} \cdot 10^{-13} \text{ см},$$

где A – число нуклонов (суммарное число протонов и нейтронов) в ядре. Атомные ядра вблизи долины стабильности представляют собой довольно компактные объекты. Их радиусы изменяются от 1.5 до 3 Фм для самых легких ядер и от 7 до 8 Фм для самых тяжелых.

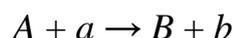
Для ядер, удаленных от долины стабильности, ситуация иная. Для некоторых ядер, перегруженных нейтронами, наблюдается так называемый нейтронный слой - область вблизи поверхности ядра, в которой плотность нейтронов больше плотности протонов

Наиболее подробную информацию о распределении электрических зарядов и токов в атомных ядрах получают в экспериментах по рассеянию на ядрах быстрых электронов.

Данные о плотности распределения ядерной материи извлекаются из экспериментов по рассеянию на ядрах адронов.

Измерение энергии реакции Q

В двухчастичных реакциях:



массы ядер связаны соотношением

$$M_A + M_a = M_B + M_b + Q$$

Таким образом, если известны массы трех ядер, то масса четвертого ядра вычисляется по результатам измерения энергии реакции Q . В основном этот метод применим для легких и средних ядер. С тяжелыми ядрами возникают проблемы, связанные с образованием конечных ядер в возбужденном состоянии с малой энергией возбуждения.

Энергия связи ядра $E_{\text{св}}(A, Z)$

$$E_{\text{св}}(A, Z) = [ZM_p + (A - Z)M_n - M(A, Z)] k \quad (4)$$

где M_p — масса протона, M_n — масса нейтрона, $M(A, Z)$ — масса ядра (A, Z) . Сравнение энергий связи легких и тяжелых атомных ядер показывает энергетическую выгодность слияния легких ядер и деления тяжелых ядер. Эта информация дает прекрасный иллюстративный материал при изучении вопросов деления тяжелых ядер и ядерного нуклеосинтеза легких ядер. Более точные представления о величине энергии связи ядер можно получить, сравнивая различные сечения энергетической зависимости удельной энергии связи ядра $\varepsilon(A, Z)$ от массового числа A , числа протонов Z и числа нейтронов N .

Энергии отделения протона $B_p(A, Z)$, нейтрона $B_n(A, Z)$

$$B_p(A, Z) = [M(A - 1, Z - 1) + M_p - M(A, Z)] k \quad (5)$$

$$B_n(A, Z) = [M(A - 1, Z) + M_n - M(A, Z)] k \quad (6)$$

Энергия α -распада $Q_\alpha(A, Z)$

$$Q_\alpha(A, Z) = [M(A, Z) - (M(A - 4, Z - 2) + M(4, 2))] k \quad (7)$$

Исследуя зависимость величины энергии α -распада $Q_\alpha(A, Z)$ от A , Z и N можно наглядно продемонстрировать зависимость энергии α -распада от оболочечной структуры атомных ядер. В частности, данные приведенные на рис. 10 показывают поведение величины энергии α -распада $Q_\alpha(A, Z)$ для

различных изотопов с $Z = 85, 87, 89, 91, 93, 95$ вблизи магического числа нейтронов $N = 126$. Точки, соответствующие различным изотопам одного и того же элемента, соединены между собой. Характерная особенность в районе $N = 126$ проявляющаяся для всех изотопов является следствием заполнения нейтронной оболочки. Используя эмпирическое соотношение (12) связывающее период полураспада $T_{1/2}$ и энергию α -частицы E_α

$$\lg T_{\frac{1}{2}}(\text{сек}) = \frac{C}{\sqrt{E_\alpha(\text{МэВ})}} - D \quad (8)$$

где константы $C = 150$ и $D = 55$ мало меняются для тяжелых ядер, можно оценить периоды α -распада и сравнить их с экспериментально измеренными значениями периодов полураспада.

Энергия отделения двух нейтронов $E_{2n}(A, Z)$

$$E_{2n}(A, Z) = [M(A, Z) - M(A - 2, Z) + 2M_n]k \quad (9)$$

Энергии β^\pm -распадов $E_{\beta^+}(A, Z)$ и $E_{\beta^-}(A, Z)$

$$E_{\beta^+}(A, Z) = [M(A, Z) - (M(A, Z - 1) + M_e)] k \quad (10)$$

$$E_{\beta^-}(A, Z) = [M(A, Z) - (M(A, Z + 1) + M_e)] k \quad (11)$$

Исследование энергии β^\pm -распадов для ядер, перегруженных нейтронами или протонами позволяет изучать явление испускания запаздывающих частиц: нейтронов, протонов и других более сложных частиц, изучить запаздывающее деление, исследовать области ядер в которой могут наблюдаться эти явления.

Порядок выполнения работы

Студенту необходимо выполнить несколько упражнений по указанию преподавателя. Для выполнения численных расчетов использовать данные, приведенные в различных базах данных по атомным ядрам.

Некоторые базы данных для использования в работе

http://cdfc.sinp.msu.ru/services/calc_thr/calc_thr.html - сервис для расчета энергий связи ядер, энергий отделения нуклидов от ядра, порогов и выходов ядерных реакций и т.д.;

<http://cdfc.sinp.msu.ru/services/gsp.en.html> - база данных значений спинов ядер, дипольных и квадрупольных моментов, а также деформации ядер;

<http://www.nndc.bnl.gov/sigma/>

базы данных по сечениям взаимодействия элементов с элементарными частицами (альфа, гамма, протоны и др.);

<http://www.oecd-nea.org/janisweb/index.html>

<http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/> - интерактивная база данных атомных ядер (тип распада, время жизни и т.д.);

<https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html> интерактивная база данных атомных ядер МАГАТЭ (массы ядер, энергетические уровни, тип распада, период полураспада, квантовые моменты и др.);

http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/indx_dec.jsp - сервис поиска нуклидов по известным линиям радиоактивного излучения, которое данный нуклид испускает (также можно посмотреть линии излучений для выбранного нуклида);

<http://cdfc.sinp.msu.ru/services/radchart/radmain.html> - база данных значений радиусов атомных ядер

Примеры упражнений, которые могут быть заданы при выполнении данной лабораторной работы

Упражнение 1

Для заданного Z , пользуясь данными, приведенными в таблице атомных ядер, определить для каких изотопов возможно испускание запаздывающих нейтронов. Для каждого из этих изотопов рассчитать максимальную энергию запаздывающих нейтронов.

Запаздывающие нейтроны могут испускаться возбужденными ядрами, образующимися после β^- распада.

Упражнение 2

Пользуясь полуэмпирической формулой для энергии связи ядра (3), для ядер с числом протонов Z определить пределы изменения числа нейтронов N , при которых возможно существование атомных ядер. Сравнить с данными из таблицы атомных ядер.

Упражнение 3

Используя данные, приведенные в таблице атомных ядер, рассчитать энергию отделения фрагментов ^{12}C , ^{16}O , ^{40}Ca из различных изотопов с $Z = 90-110$.

Сравнить с результатами расчета на основе полуэмпирической формулы для энергии связи ядра (3).

Упражнение 4

Для известного Z , зная некоторые характеристики неизвестного радиоактивного изотопа данного элемента, определить, что это за изотоп. В качестве характеристик изотопа может приводиться тип распада, тип испускаемых частиц (электроны, позитроны, гамма-кванты и т.д.), их энергия и интенсивность.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем определяются границы области существования атомных ядер?
2. Какая физическая модель лежит в основе формулы Вайцзеккера?
3. Как зависит удельная энергия связи ядра от массового числа A ?
4. Почему удельная энергия связи ядра уменьшается в случае легких ядер?
5. В какой области массовых чисел A возможно спонтанное деление атомных ядер?
6. Какие существуют методы измерения масс атомных ядер?
7. Что такое слабое взаимодействие? Какие процессы обусловлены слабым взаимодействием?
8. Рассчитайте энергию связи ядра ^{40}Ca .
9. Рассчитайте энергии отделения α -частиц в изотопах ^{31}S , ^{32}S , ^{33}S .
10. Что такое магические числа?
11. Как можно экспериментально определить магические числа?
12. В каком случае атомные ядра могут испускать запаздывающие α -частицы?
13. С помощью каких методов можно получать изотопы, удаленные от долины стабильности?