

Александр Борисович Рыбаков

*Кандидат физико-математических наук,
учитель физики в гимназии № 144,
г. Санкт-Петербург.*



Об энергии связи ядер

Энергия связи – важнейшее понятие ядерной физики, и оно заслуживает более подробного разговора, чем одна страница в учебнике.

В статье показывается, как различные «энергии связи» используются для анализа возможных механизмов распада ядер, и проводится критический анализ некоторых привычных утверждений.

Введение

Ядерная физика – особый раздел школьного курса. В центре изложения темы стоит не какой-то фундаментальный закон (как почти во всех других разделах курса), а отдельные опытные факты (в частности – график зависимости удельной энергии связи ядра от массового числа).

Во всех других разделах курса мы можем сказать, что «полная теория этого явления показывает, что...». В ядерной же физике, увы, мы во многих случаях так сказать не можем – никакой полноценной теории атомного ядра у нас нет.

При изучении этой темы ученикам придётся отказаться от многих представлений, которые до этого казались им совершенно естественными и очевидными.

Чего стоит один отказ от аддитивности массы!

Вот ещё пример. Атом водорода можно ионизовать, при этом он распадается на электрон и протон. И мы говорим, что этот атом состоит из протона и электрона. С другой

стороны, мы говорим, что нейтрон распадается на протон и электрон, но не можем сказать, что нейтрон состоит из протона и электрона.

Учебники говорят об α -распаде как механизме гибели ядер, но избегают разговора о деталях этого явления. И лишь на факультативе мы можем рассказать о тех новых представлениях, которые возникают при анализе туннельного перехода.



Ещё один принципиальный момент: в микромире (в отличие от области макроскопических явлений) если какой-то процесс не запрещён законами сохранения, то он всегда происходит.

Два слова о терминологии.

Ядро является *изотопом* (т. е. занимающим то же самое ме-

сто в таблице Менделеева) только по отношению к другим ядрам с таким же Z . В общем же случае правильнее было бы для обозначения ядер с определёнными A и Z использовать термин «нуклид». Но автор не решился менять сложившуюся в учебной литературе терминологию.

Что такое энергия связи?

Понятие энергии связи можно ввести для разных физических систем: для атомных ядер, для атомов, молекул и для их разных структурных единиц. Ниже мы покажем необходимость введения самых разных величин такого типа.

Во всех случаях мы должны вести речь о двух состояниях системы из n частиц (среди которых, возможно, есть частицы разных типов). Пусть у системы, кроме связанного состояния I , есть и другое состояние II – когда система разделена на две части, не взаимодействующие между собой. Энергия, которую необходимо затратить, чтобы перевести систему из состояния I в состояние II , называется энергией связи системы (относительно конкретного состояния II). Мы спе-

циально даём столь общее определение, чтобы оно было пригодно для самых разных случаев.

Уточним сказанное на примерах. Энергия, которую необходимо затратить, чтобы отделить какую-то частицу от остальных, называется энергией связи этой частицы в данной системе. С величиной такого типа учащиеся уже встречались. Энергия связи валентного электрона в атоме (в основном состоянии) – это энергия ионизации атома $E_{\text{ион}}$.

Именно так определяется энергия связи нуклона в атомном ядре (иногда её называют энергией отделения нуклона). Под «частицей», конечно, не обязательно понимать элементарную частицу. Именно так определяется и энергия связи α -частицы в ядре.

Можно ставить вопрос об энергии связи какого-то лёгкого ядра в тяжёлом ядре.

Все упомянутые здесь энергии связи будут подробнее описаны ниже.

Аналогично определяется «полная энергия связи системы» из n частиц, например, энергия связи ядра относительно разделения его на отдельные нуклоны. Один раз назвав эту величину полностью, мы в дальнейшем будем называть её просто энергией связи ядра $E_{\text{св}}$.

Напомним общепринятые обозначения. m_p , m_n , m_e – массы протона, нейтрона и электрона соответственно, Z и N – числа протонов и нейтронов в ядре соответственно, $A = Z + N$ – массовое число, ядро

РАНЬШЕ
МИР БЫЛ
ПОЯТНЕЙ.



A_ZX в формулах будем обозначать (A, Z) , а в тексте – символом химического элемента с указанием $A, M_{\text{я}}(A, Z)$ – масса ядра.

Замечания и дополнения

Несмотря на то, что в энциклопедиях и учебниках приводится формула (1), в учебном процессе чаще пользуются другой формулой. Дело в том, что в самых распространённых школьных задачниках [1, 2] в таблицах приводятся не массы ядер, а массы нейтральных атомов. Конечно, можно было бы отнять от массы атома массу его электронной оболочки Zm_e , получить массу соответствующего ядра и использовать формулу (1), но проще пойти по другому пути – использовать для расчёта энергии связи ядра A_ZX формулу

$$E_{\text{св}}(A, Z) = [m(\text{H})Z + m_n N - M_{\text{ат}}(A, Z)]c^2. \quad (2)$$

В этой формуле везде стоят массы нейтральных частиц (а не ядер), $M_{\text{ат}}$ – масса соответствующего атома, $m(\text{H})$ – масса атома водорода (а не масса протона!). Аналогично надо поступать при расчёте энергетического выхода какой-то реакции с участием протона.

Выражение в квадратных скобках в формуле (2) или (1) в школьном курсе называют дефектом массы. Но будьте осторожны! В вузовских учебниках, в научной литературе и справочниках этим термином называют совсем другую величину.

Точно ли совпадают значения $E_{\text{св}}$, подсчитанные по формулам (1) и (2)?

В этой формуле массы электронов в разных слагаемых скомпенсируют друг друга. А энергии связи

Теперь мы можем записать, что энергия связи ядра A_ZX равна

$$E_{\text{св}}(A, Z) = [m_p Z + m_n N - M_{\text{я}}(A, Z)]c^2. \quad (1)$$

электронов, строго говоря, конечно, не компенсируются, ведь энергии связи внутренних электронов атома могут отличаться от $E_{\text{ион}}(\text{H})$ во много раз. Но обусловленной этим обстоятельством малой погрешностью всегда пренебрегают.

В ранней учебной литературе по ядерной физике (см., например, [3, 4]) считали, что $E_{\text{св}} < 0$. Во всех серьёзных учебных изданиях последних десятилетий в полном соответствии с (1), (2) считается, что $E_{\text{св}} > 0$. Это же справедливо и для других «энергий связи» (которые будут введены ниже): для связанного состояния эта величина считается положительной.

Полезно иметь в виду, что $E_{\text{св}}$ только знаком отличается от внутренней энергии ядра $E_{\text{вн}}$: $E_{\text{св}} = -E_{\text{вн}}$. Мне кажется, что учащимся удобнее составлять энергетический баланс с использованием величины $E_{\text{вн}}$ и уже потом переходить к записи с использованием величины $E_{\text{св}}$.





Разные «энергии связи»

Величина $E_{уд} = E_{св}/A$, где A – массовое число, называется удельной энергией связи ядра (иногда – средней энергией связи нуклона в ядре).

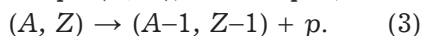
К сожалению, в школьных учебниках и пособиях, при упоминании энергии связи нуклона в ядре, отождествляют эту величину с $E_{уд}$, что принципиально неверно (заметим, что в вузовских учебниках этот вопрос изложен вполне адекватно).

Несложно догадаться, как возникло такое отождествление. Злую шутку сыграла с авторами напрашивающаяся механическая аналогия между ядром (т. е. нуклонами в потенциальной яме) и камешками в обычной ямке, которую, конечно, можно с полным основанием тоже именовать потенциальной ямой. Но есть существеннейшая принципиальная разница между этими системами. При вынимании камешка он с другими камешками не взаимодействует и ямка в земле не изменяется. При удалении же нуклона он взаимодействует со своими собратьями, и потенциальная яма, в которой они «лежат», изменяется. Так что эту аналогию надо забыть.

В МАКРО-
МИРЕ
ВСЁ
ПРОСТО!



Обсудим этот вопрос подробно. Пусть речь идёт об отделении протона от ядра (A, Z) , т. е. о процессе



Чтобы не запутаться в знаках, удобнее, как уже сказано, пользоваться общефизическим понятием внутренней энергии. Запишем энергетический баланс для процесса перехода системы из состояния I в состояние II. Энергия, затраченная на отделение протона от ядра E_p , равна изменению энергии системы:

$$E_p = E_{II} - E_I = E_{вн}(A-1, Z-1) - E_{вн}(A, Z) = E_{св}(A, Z) - E_{св}(A-1, Z-1) \quad (4)$$

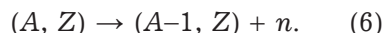
(здесь нуль энергии выбран так, чтобы энергия свободного протона была равна нулю).

С другой стороны, мы, как всегда, можем записать энергию связи E_p через соответствующий дефект масс:

$$E_p = [M_{я}(A-1, Z-1) + m_p - M_{я}(A, Z)]c^2. \quad (5)$$

В зависимости от того, какие данные у нас под рукой, мы можем пользоваться либо формулой (4), либо формулой (5).

Отделение нейтрона от ядра – это процесс



Для энергии отделения нейтрона от ядра имеем:

$$E_n(A, Z) = E_{св}(A, Z) - E_{св}(A-1, Z) = [M_{я}(A-1, Z) + m_n - M_{я}(A, Z)]c^2. \quad (7)$$

Нет ни малейших оснований для отождествления этих трёх различных «энергий связи»: E_n , E_p , $E_{уд}$ (автор посвятил этому вопросу отдельную статью [5]).

Заметим, что эти величины могут существенно отличаться друг от друга. Приведём для примера данные о разных «энергиях связи» для радиоактивного изотопа азота ^{13}N : $E_{уд} = 7,2$ МэВ, $E_n = 20,1$ МэВ, $E_p =$

= 1,9 МэВ (все данные о ядрах мы заимствуем из таблиц в [6]).

Но если мы захотим подсчитать эти величины для ядра ^{19}Na , нас ждёт сюрприз! Вот что получается:

$E_{\text{уд}} = 6,9$ МэВ, $E_n = 19,3$ МэВ, $E_p = -0,3$ МэВ – энергия связи протона для этого ядра оказывается отрицательной. Что это значит?! Вот об этом и пойдёт речь далее.

Ядра – стабильные и нестабильные

Для дальнейшего разговора необходимо напомнить некоторые сведения о ядрах.

В учебной литературе обычно говорят о том, сколь прочным образованием являются атомные ядра. Между тем подавляющее большинство известных нам ядер нестабильны, т. е. рано или поздно распадутся.

Распадом (или радиоактивным распадом) называют любой самопроизвольный процесс преобразования ядер с вылетом из ядра какой-нибудь частицы. Условно главными типами радиоактивного распада можно считать α - и β -распады и самопроизвольное деление ядер. Только эти типы распада и упоминаются в школьном курсе.

Поясним сказанное. В школьном курсе упоминается ещё и γ -распад, мы не включили его в наш перечень, потому что он не приводит к изменению структуры ядра.

Под β -распадом в действительности обычно имеют в виду несколько разных типов распада. В частности, кроме β^- -распада (вылет электрона из ядра), говорят и о β^+ -распаде (вылете позитрона). За рамками школьного курса остаются другие типы распада: из ядер могут вылетать протоны (они могут вылетать и по два) и даже ядра меньшего размера, есть и другие, «экзотические», виды распада.

Нестабильные ядра характеризуются средним временем жизни τ (или периодом полураспада $T_{1/2}$; между этими величинами существует простая связь: $T_{1/2} = \tau \ln 2$).

Очень информативная картина получается, если сопоставить каждому изотопу клеточку в осях N, Z и закрасить её в соответствии с главным для этого изотопа типом распада. Именно так построен рис. 1.

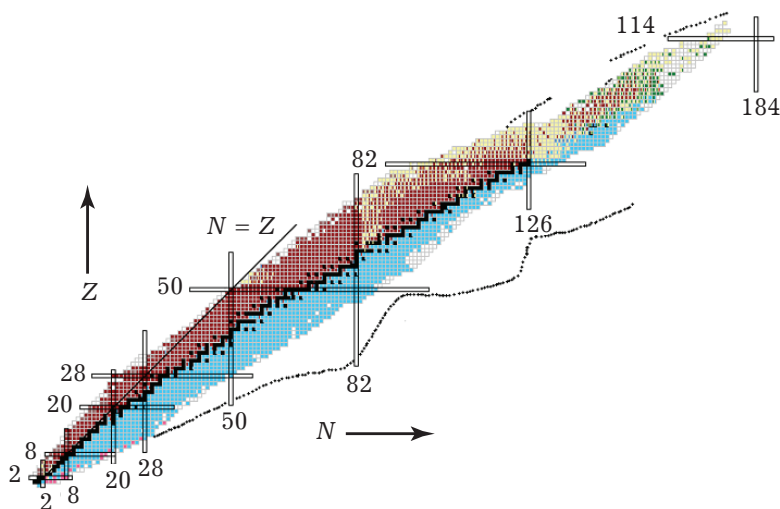


Рис. 1



Стабильные изотопы на этом рисунке представлены чёрными клеточками. Узкую дорожку, которую они образуют, называют *дорожкой стабильности* (иногда – *долиной стабильности*).

Дорожка стабильности расположена вдоль кривой, описываемой зависимостью

$$N/Z = 0,98 + 0,015A^{2/3}. \quad (8)$$

Цветные клеточки вокруг дорожки стабильности – это известные в настоящее время нестабильные изотопы, их более 3000. А стабильных изотопов всего 264.

Справа от дорожки стабильности располагаются ядра, у которых больше нейтронов, чем у стабильных с тем же Z . Основной механизм гибели для этих ядер – β^- -распад. Слева и выше – ядра, испытывающие β^+ -распад. Дорожка стабильности обрывается в области больших массовых чисел. Там находятся ядра, испытывающие α -распад, и спонтанно делящиеся ядра. Пунктирная линия, ограничивающая область существования атомных ядер слева и сверху, соответствует условию $E_p = 0$. Здесь уже найдены ядра, вплотную подошедшие к указанной границе. Пунктирная линия, ограничивающая область существования атомных ядер справа и снизу, соответствует условию $E_n = 0$. Между известными ядрами и этими гра-

ницами есть шансы обнаружить ещё около трёх тысяч новых ядер. Как уже сказано, есть много разных типов распадов, и мы не будем пояснять цвета всех клеточек на этой диаграмме.

Есть некоторые основания думать, что в области $Z = 110 - 114$ и $N = 178 - 184$ удастся обнаружить новые стабильные изотопы («островок стабильности»).

Конечно, в эксперименте можно создать практически любой комплекс из протонов и нейтронов, но если среднее время жизни их связанного состояния $\tau < 10^{-22}$ с, то считается, что ядро не существует. Именно такая ситуация имеет место вне указанных областей на этой диаграмме.



И снова об энергиях связи $E_{св}$ и $E_{уд}$

Каких только удивительных утверждений об энергии связи не доводилось встречать в разных книгах и на просторах Интернета!

Например, доводилось читать, что «энергия связи ядра характеризует его прочность».

Начнём с того, что это утверждение удивляет даже на лексическом уровне. А что такое эта самая

«прочность» вообще? Обратимся к «Большой советской энциклопедии»: прочность – это свойство твёрдых тел сопротивляться разрушению под действием внешних нагрузок. А нельзя ли поконкретней? Оказывается, нет, нельзя! БСЭ так прямо и пишет: «...в технике приняты различные меры прочности (предел текучести, временное сопротивление

ние, предел усталости и др.) ...технические меры прочности – условные величины и не могут считаться исчерпывающими характеристиками». Итак, нет никакого определённого содержания у термина «прочность».

Пойдём дальше. Ясно, что энергия связи $E_{\text{св}}$ растёт с ростом массового числа A , так что наибольшие энергии связи у ядер трансурановых элементов – но о какой же их прочности можно говорить? Ведь хорошо известно, что они «не жильцы на этом свете». Впрочем, этот пример – лишь самый яркий, всем известный пример нестабильных ядер. Выше уже сказано, что большая часть ядер из известных нам – как раз нестабильные ядра. Стоит ли вообще говорить о прочности объектов, которые рано или поздно сами по себе развалятся?

Вспомним ещё, что некоторые тяжёлые ядра разваливаются как раз под действием *медленных* нейтронов – о какой же «прочности» здесь можно говорить?

Некоторые авторы предпочитают говорить не о «прочности», а об «устойчивости» ядер. От этого смысл высказывания становится ещё более туманным.

Скажем совершенно чётко и определённо. У изотопа есть важнейшая характеристика – энергия связи ядра $E_{\text{св}}$. У изотопа есть важнейшая характеристика – среднее время жизни ядра τ . Приведённое выше утверждение имело бы смысл, если бы существовала монотонная зависимость τ от $E_{\text{св}}$. Но никакой корреляции между этими величинами не существует. Ведь ядра гибнут совсем не в результате развала на отдельные нуклоны.

Теперь обратимся к удельной энергии связи $E_{\text{уд}}$.

Нет на свете такого учебника, где в теме «Ядерная физика» не

приводился бы график зависимости $E_{\text{уд}}(A)$ (потому-то нет никакой необходимости приводить этот график здесь). Очень полезная кривая! Глядя на эту кривую, мы видим, что для грубых оценок можно полагать $E_{\text{уд}} \approx 8$ МэВ/нуклон (исключая самые лёгкие ядра). Именно вид этой кривой со всей определённостью говорит нам о том, что ядерные силы обладают свойством насыщения. Эта кривая чрезвычайно удобна для объяснения энергетического выхода при делении тяжёлых ядер или при синтезе лёгких ядер.

Но иногда утверждается, что «особенно прочные ядра расположены в максимуме этой кривой».

Проверим это утверждение, обратившись к конкретным данным об изотопах.

В максимуме этой кривой расположены ядра с $E_{\text{уд}}$ около 8,7 МэВ. Возьмём ряд изотопов с $E_{\text{св}} = 8,7$ МэВ и выпишем их периоды полураспада $T_{1/2}$ (они приведены в скобках):

^{49}Ca (8,7 мин), ^{48}Sc (44 час),
 ^{49}Sc (57 мин), ^{51}Ti (5,8 мин),
 ^{52}Ti (1,7 мин),
 ^{54}V (50 с), ^{57}Cr (21 с), ^{62}Fe (68 с),
 ^{64}Co (0,3 с)...

А вот у изотопа ^{59}Fe $E_{\text{уд}} = 8,8$ МэВ (больше не бывает!), но $T_{1/2} = 44$ сут.

О какой же особой прочности (или устойчивости) этих ядер можно говорить?

В то же время вдали от области максимума, на концах этой кривой можно найти и стабильные ядра (ну, например, ^6Li , ^7Li , ^{238}U). Итак, на разных участках кривой $E_{\text{уд}}(A)$ расположены ядра с самыми разными временами жизни, нет никакой корреляции между временем жизни и удельной энергией связи (вопреки утверждениям учебной литературы разного уровня). Снова повторим:

ядра гибнут не в результате развала на отдельные «кирпичики» (нукло-

ны), а в результате совсем других процессов.

Распады и энергии связи

Обсудим «самые главные» типы распадов ядер.

Как уже сказано, в микромире, если процесс не запрещён какими-то законами (обычно – законами сохранения), то он всегда происходит (хотя, быть может, с очень малой вероятностью).

Любой тип распада ядра возможен, только если он энергетически выгоден, т. е. происходит с выделением энергии. Иначе говоря, если суммарная масса продуктов распада меньше, чем масса исходного ядра. Поэтому в ядерной физике информация о массах ядер (и, следовательно, об энергиях связи) позволяет делать выводы о возможных механизмах их распада. Заметим, впрочем, что сформулированное условие является необходимым, но не всегда достаточным. Даже при выполнении этого условия распад может быть запрещён другими законами сохранения (электрического заряда, числа нуклонов и другими «специальными» законами сохранения ядерной физики).

Покажем роль таких расчётов на нескольких примерах. Начнём с самых простых, но очень важных.

Самое простое ядро – протон. Не может ли он распасться на какие-нибудь частицы?

Первое, что попадает под подозрение – это распад на нейтрон и позитрон. Но эту идею приходится сразу отбросить – масса нейтрона m_n больше массы протона m_p : $m_p = 938,27$ МэВ, $m_n = 939,57$ МэВ, $m_e = 0,51$ МэВ.

Тогда обратим вопрос! А не может ли нейтрон распасться на протон и электрон?

Легко видеть, что закон сохранения энергии этого не запрещает, ведь

$$m_n > m_p + m_e. \quad (9)$$

Так вот, потому-то свободный нейтрон и распадается на протон и электрон, что закон сохранения энергии (и другие законы сохранения) позволяет ему это сделать (автор помнит о роли нейтрино в рассматриваемых процессах, но в интересующих нас здесь соотношениях нейтрино не играет никакой роли, ведь считается, что его масса равна нулю).

А в ядре? Распадается ли нейтрон в ядре?

Ответ нам в общих чертах уже известен: в тех ядрах, где закон сохранения энергии ему это позволит, распадается, и тогда мы говорим о β^- -распаде ядра. В других же ядрах этого не происходит. Нетрудно записать необходимое условие β^- -распада ядра (A, Z):

$$M_{\text{я}}(A, Z) > M_{\text{я}}(A, Z + 1) + m_e. \quad (10)$$

Снова вспомним, что на уроках мы обычно пользуемся таблицей масс атомов, а не ядер. Как записать это условие через массы атомов? Добавим в неравенстве (10) справа и слева Zm_e , теперь условие β^- -распада принимает совсем простой вид:

$$M_{\text{ат}}(A, Z) > M_{\text{ат}}(A, Z + 1). \quad (11)$$

Значит, чтобы найти ядра, подверженные β^- -распаду, даже ничего считать не надо – просто смотри на таблицу масс атомов и делай выводы!

То обстоятельство, что свободный протон не может распасться на нейтрон и позитрон, не запрещает этот процесс в ядре. Ведь при вылете позитрона из ядра должно иметь место энергии лишь для ядра в целом,

как иногда говорят, протон может замедлиться необходимой для этого распада энергией у своих «соседей» по ядру. Итак, необходимое условие β^+ -распада имеет вид:

$$M_{\text{Я}}(A, Z) > M_{\text{Я}}(A, Z - 1) + m_e. \quad (12)$$

Нетрудно, как и выше, записать это условие через массы атомов:

$$M_{\text{ат}}(A, Z) > M_{\text{ат}}(A, Z - 1) + 2m_e. \quad (13)$$

Теперь мы понимаем и смысл того, что энергия связи протона в ядре ^{19}Na оказалась отрицательной (см. п. 3), это значит, что ядро погибнет (и очень быстро), выбросив протон.

В 1935 г. Мария Гепперт-Майер обратила внимание на один фрагмент в таблице масс ядер:

Изотоп	Масса ядра, МэВ
$^{130}_{52}\text{Te}$	120980,30
$^{130}_{53}\text{I}$	120980,21
$^{130}_{54}\text{Xe}$	120976,74

Как вы думаете, что здесь привлекло её внимание?

Она заметила, что масса ядра $^{130}_{52}\text{Te}$ превышает массу ядра $^{130}_{54}\text{Xe}$ более, чем на $2m_e$. И она сделала

вывод, что первое ядро может испустить два электрона (и два антинейтрино) и перейти во второе. Но эти два электрона не могут вылететь из ядра друг за другом, ибо в этом случае хотя бы на мгновение образовывалось бы ядро $^{130}_{53}\text{I}$, а это запрещено законом сохранения энергии, ведь масса ^{130}Te превышает массу ^{130}I менее, чем на m_e (см. таблицу). Следовательно, два электрона и два антинейтрино должны вылетать строго одновременно! После долгих поисков этот процесс (имеющий громадный период полураспада) действительно был обнаружен [7, стр. 159 – 163]. Вот так иногда делаются открытия!



Ещё о распадах

Скажем здесь несколько слов о распадах с вылетом из ядра тяжёлых частиц. Напомним, α -распад был обнаружен на заре ядерной физики, спонтанное деление – в 1940 г. При спонтанном делении ядро делится на два ядра, сравнимых по массе. В 80-е годы было обнаружено, что из тяжёлых ядер могут вылетать лёгкие ядра (их в этом случае называют кластерами). Все эти виды распада обусловлены сильным взаимодействием в ядре.

Очевидно, что по общим правилам энергией связи α -частицы в ядре A_ZX надо называть такую величину:

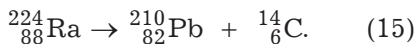
$$E_{\alpha} = [M_{\text{Я}}(A - 4, Z - 2) + M_{\text{Я}}(4, 2) - M_{\text{Я}}(A, Z)]c^2. \quad (14)$$

Если $E_{\alpha} < 0$, т. е. масса продуктов распада меньше массы исходного ядра, то α -распад ядра может произойти, при этом выделится энергия $\Delta E = -E_{\alpha}$. Если же $E_{\alpha} > 0$, то ядро устойчиво относительно α -распада.



Аналогично тому, как мы записали условие α -распада, можно записать условие вылета из ядра любого кластера. Зададимся, например, вопросом – не может ли из ядра $^{224}_{88}\text{Ra}$ вылететь $^{14}_6\text{C}$?

Составляем уравнение реакции:



Энергией связи $^{14}_6\text{C}$ в ядре $^{224}_{88}\text{Ra}$ надо называть величину:

$$E_{\text{C}14}(224,88) = [M_{\text{я}}(210,82) + M_{\text{я}}(14,6) - M_{\text{я}}(224,88)]c^2. \quad (16)$$

Смотрим в таблицы в [6]: масса ядра $^{224}_{88}\text{Ra}$ равна 208628 МэВ, а сумма масс ядер $^{210}_{82}\text{Pb}$ и $^{14}_6\text{C}$ равна 208597 МэВ, т. е. интересующая нас энергия связи меньше нуля. Следо-

вательно, такой распад может иметь место.

Ядра в этом примере мы выбрали, конечно, не случайно – именно такой распад был обнаружен в 1984 году. Можно догадаться, в чем состояла сложность этого эксперимента: основной механизм гибели ядра $^{224}_{88}\text{Ra}$ – α -распад, ядер $^{14}_6\text{C}$ вылетало в 10^{10} (!) раз меньше, чем α -частиц.

Конечно, для какого-то ядра могут одновременно выполняться условия различных типов распада. Для такого случая при построении рис. 1 цвет клеточки выбирался соответственно тому типу распада, который обеспечивал меньшее время жизни ядра.

Несколько задач

Закрепим изложенный выше теоретический материал в конкретных расчётах. Фактически в школе в этой теме решают задачи лишь двух типов: 1) найти удельную энергию связи какого-то ядра и 2) найти энергетический выход реакции. При этом в качестве исходных данных используются массы ядер. Попробуем немного расширить этот репертуар. Но сначала скажем два слова об особенностях расчётов в этой теме.

В учебных задачах вполне приемлемы ответы с тремя (или даже двумя) значащими цифрами. Но при расчёте энергий связи с такой невысокой точностью мы исходные данные, т. е. массы ядер, должны задавать с большой относительной точностью (т. е. с большим числом значащих цифр). Физическая причина этого в том, что интересующие нас энергии связи очень малы по сравнению с полной энергией ядра $M_{\text{я}}c^2$. И потому при расчётах нам приходится вычислять разности двух близких величин – при этом число значащих цифр в результате оказы-

вается заметно меньше их числа в исходных данных.

Таблицы в школьных задачниках очень малы, поэтому мы, как уже сказано, будем использовать таблицы в [6], где массы ядер приведены в МэВ. Заметим, что в этих же таблицах содержится информация о временах жизни и механизмах распада радиоактивных ядер. А книгу [6] легко найти и скачать в Интернете.

1. Выберем какое-нибудь ядро, например, ^9_5B и сосчитаем для него разные энергии связи. Выпишем из [6] необходимые данные в МэВ:

$$M_{\text{я}}(^9_5\text{B}) = 8393,31,$$

$$M_{\text{я}}(^8_5\text{B}) = 7472,32,$$

$$M_{\text{я}}(^8_4\text{Be}) = 7454,85.$$

Удельная энергия связи равна

$$\begin{aligned} E_{\text{уд}}(^9_5\text{B}) &= (5m_p + 4m_n - M_{\text{я}})/9 = \\ &= (5 \cdot 938,37 + 4 \cdot 939,57 - 8393,31)/9 = \\ &= 6,26 \text{ МэВ}. \end{aligned} \quad (17)$$

При отрыве от ядра ^9_5B нейтрона образуется ядро ^8_5B . Поэтому энергия связи (или энергия отделения) нейтрона равна

$$E_n({}_5^9\text{B}) = M_{\text{я}}({}_5^8\text{B}) + m_n - M_{\text{я}}({}_5^9\text{B}) = 7472,32 + 939,57 - 8393,31 = 18,58 \text{ МэВ.} \quad (18)$$

При отрыве от ядра ${}_5^9\text{B}$ протона образуется ядро ${}_4^8\text{Be}$. Поэтому энергия связи (или энергия отделения) протона равна

$$E_n({}_5^9\text{B}) = M_{\text{я}}({}_4^8\text{Be}) + m_p - M_{\text{я}}({}_5^9\text{B}) = 7454,85 + 938,27 - 8393,31 = -0,20 \text{ МэВ.} \quad (19)$$

Снова обратим внимание на большие различия этих величин.

Ядро	${}_1^2\text{H}$	${}_1^3\text{H}$	${}_2^3\text{He}$	${}_2^4\text{He}$	${}_3^6\text{Li}$	${}_3^7\text{Li}$	${}_3^8\text{Li}$
$E_{\text{уд}}, \text{ МэВ}$	1,1	2,8	2,7	7,1	5,3	5,6	5,2

По этим данным определить, какая энергия W выделяется при образовании двух α -частиц в результате синтеза ядер ${}_3^6\text{Li}$ и ${}_1^2\text{H}$.

Запишем закон сохранения энергии:

$$E_{\text{вн}}({}_3^6\text{Li}) + E_{\text{вн}}({}_1^2\text{H}) = 2 E_{\text{вн}}({}_2^4\text{He}) + W. \quad (20)$$

Перейдём от $E_{\text{вн}}$ к $E_{\text{св}}$:

$$W = 2E_{\text{св}}({}_2^4\text{He}) - E_{\text{св}}({}_3^6\text{Li}) - E_{\text{св}}({}_1^2\text{H}) = 8 \cdot 7,1 - 6 \cdot 5,3 - 2 \cdot 1,1 = 22,8 \text{ МэВ.} \quad (21)$$

Невысокая точность ответа обусловлена невысокой точностью исходных данных.

3. А вот задача в духе приключенческого романа.

В руки Николая попал обрывок таблицы масс ядер. Известно, что только об одном из этих ядер можно с уверенностью сказать, что оно β -радиоактивно. Известно, что в числе, выражающем массу этого ядра, зашифровано важное сообщение. Помогите Николаю найти это ядро.

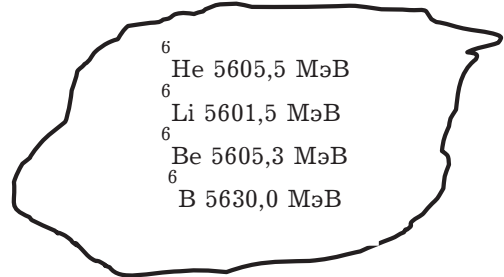
Условие того, что ядро является β -радиоактивным, – это неравенство

А что значит условие $E_p < 0$, мы уже знаем – это значит, что ядро со временем погибнет, выбросив из своих недр один из протонов. Так будет, если нет другого механизма распада с меньшим временем жизни. Но для этого ядра такого конкурирующего механизма нет.

2. Можно было бы в качестве исходных данных использовать не массы ядер, а их энергии связи.

А эти данные можно снять (хотя бы и с невысокой точностью) прямо с кривой $E_{\text{уд}}(A)$:

(10). В приведённом списке ему удовлетворяет только ${}_2^6\text{He}$.

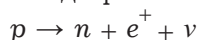




4. А напоследок займёмся ненаучной фантастикой.

Зададимся простым вопросом: что было бы, если бы между массой протона и нейтрона было обратное соотношение, т. е. протон был бы немного тяжелее нейтрона?

Тогда распад протона



Заключение

Напомним, что изложение физики атома в учебниках отличается логической стройностью: опыты Резерфорда, планетарная модель атома, проблема устойчивости этой модели (по отношению к электромагнитному излучению) – и разрешение этой проблемы в раннем варианте квантовой механики.

Аналогично в ядерной физике после изложения сведений о строении ядра надо обозначить важнейшие вопросы – об устойчивости ядер относительно различных типов распадов (и о возможности конкретных ядерных реакций). Понятие энергии связи позволяет ответить на вопрос о возможности того или иного процесса с точки зрения закона сохранения энергии.

Мы показали, что вопрос, не может ли ядро распасться каким-то определённым образом, совсем не сложен – для ответа на него надо лишь иметь под рукой табли-

происходил бы не только внутри ядра, но и в свободном состоянии, т. е. ядро ${}^1_1\text{H}$ было бы нестабильным, по-видимому, с малым временем жизни. И не было бы в природе никакого водорода. И никакой воды. И нас с вами. Подумать только, от какой малости всё зависит!

цу масс ядер (или атомов) и микрокалькулятор.

Но, ответив на один вопрос, мы всегда приходим к другим вопросам, зачастую более сложным.

Если ядро *может* распасться, то чего же оно ждёт? Почему не распадается? Иногда в течение миллионов лет? Никуда нам от этих вопросов не уйти.

Но здесь мы на этом остановимся.



Литература

1. Степанова Г.Н., Степанов А.П. Сборник вопросов и задач по физике. – СПб.: СТП Школа, 2005.
2. Рымкевич А.П. Физика. Задачник. 10 – 11 классы. – М.: Дрофа, 2006.
3. Гейзенберг В. Физика атомного ядра. – М.: ОГИЗ, Гостехиздат, 1947.
4. Борн М. Атомная физика. – М.: Мир, 1965. (1-е издание – 1933 г.)
5. Рыбаков А.Б. Что такое энергия связи нуклона в ядре? Физика (ПС), №9/2009.
6. Варламов В.В., Ишханов Б.С., Комаров С.Ю. Атомные ядра. Основные характеристики. – М.: Университетская книга, 2010.
7. Абрамов А.И. История ядерной физики. – М.: КомКнига, 2006.