

Потенциал Юкава весьма приблизительно характеризует свойства ядерных сил. Он дает слишком резкое возрастание этих сил при сближении частиц. Кроме того, в действительности потенциальная энергия взаимодействия нуклонов в сильной степени зависит не только от расстояния между ними, но также и от взаимной ориентации их спинов. Эта зависимость наиболее ярко проявляется в дейтоне, где спины протона и нейтрона параллельны. Вычисления, основанные на экспериментальных данных по рассеянию нейтронов, показывают, что при параллельных спинах потенциальная энергия взаимодействия нейтрона и протона почти в 2 раза больше, чем при антипараллельных (если взаимодействие нуклонов характеризовать глубиной прямоугольной потенциальной ямы, то для указанных двух случаев энергия взаимодействия получается равной 21,0 и 11,5 Мэв)

При антипараллельных спинах энергия взаимодействия протона и нейтрона недостаточна для образования связанного состояния.

Энергия взаимодействия нуклонов зависит также от скорости их относительного движения — резко уменьшается при неодинаковых орбитальных моментах количества движения.

Майоран, Гейзенберг, Вигнер и др. пытались усовершенствовать теорию ядерных сил, вводя различные предположения о свойствах мезонного потенциала. Однако достаточно точная теория еще не создана. На каждом этапе развития экспериментальных средств (когда появлялась возможность увеличить энергию бомбардирующих частиц сначала до 10 Мэв, потом до 50, 100, 400 Мэв и т. д.) применявшиеся вместо (27) уточненные формулы приходилось коренным образом изменять.

§ 113. Энергия связи ядер и средняя энергия связи нуклона

Внутренняя энергия ядра складывается из: 1) суммы собственных энергий нуклонов, которые они имели бы, находясь в покое и удалении друг от друга ($\sum m_0 c^2$, где m_0 — масса покоя изолированного нуклона); 2) энергии внутриядерного движения нуклонов $\sum E_{\text{кин}}$ и 3) отрицательной потенциальной энергии их взаимодействия в ядре U :

$$E = \sum m_0 c^2 + \sum E_{\text{кин}} + U. \quad (28)$$

По закону пропорциональности массы и энергии внутренняя энергия ядра в мегаэлектронвольтах определяется массой M покоя ядра, выраженной в атомных единицах (§ 86):

$$E = M \cdot 931,15 \text{ Мэв.}$$

Если из внутренней энергии ядра мы вычтем суммарную собственную энергию нуклонов, то получим сумму потенциальной и кинетической энергий нуклонов в ядре:

$$U + \sum E_{\text{кин}} = Mc^2 - \sum m_0 c^2.$$

Это отрицательная величина, поскольку отрицательная энергия взаимодействия нуклонов в ядре больше их энергии движения (в противном случае ядро распалось бы на составные части). Практический интерес представляет обратная по знаку величина $\bar{W} = -(U + \Sigma E_{\text{кин}})$; ее называют *полной энергией связи ядра*, так как очевидно, что она определяет работу, которую нужно затратить для расчленения ядра на неподвижные, удаленные друг от друга нуклоны:

$$W = \sum m_0 c^2 - M c^2. \quad (29)$$

Отношение указанной работы к числу нуклонов в ядре ($\bar{w} = \frac{W}{A}$, где A — массовое число ядра) называют *средней энергией связи нуклона в ядре*; это — усредненная по всем нуклонам ядра работа, потребная для удаления нуклона из ядра, причем для преодоления ядерных сил, кроме этой работы, полностью используется энергия внутриядерного движения нуклона, так что когда нуклон извлечен из ядра, то мы считаем его находящимся в покое. Итак,

$$\bar{w} A = W = 931,15 \left(\sum m_0 - M \right) \text{ Мэв}. \quad (30)$$

Масса многих ядер близка к массовому числу, которое для легких ядер приблизительно равно удвоенному атомному номеру: $M \approx A \approx 2Z$; в этих ядрах число нейтронов и протонов примерно одинаково, поэтому их собственная энергия в расчлененном состоянии равна $931,15 \left(m_n + m_p \right) \frac{A}{2}$, где m_n и m_p — собственные массы нейтрона и протона ($m_n \approx 1,009$ и $m_p \approx 1,0076$). Таким образом, для указанных ядер полная энергия связи будет:

$$W \approx 931,15 A \left(\frac{m_n + m_p}{2} - 1 \right) \text{ Мэв},$$

а средняя энергия на каждый из A нуклонов

$$\bar{w} \approx 931,15 \cdot 0,0083 \text{ Мэв} \approx 7,7 \text{ Мэв}.$$

Абсолютная величина потенциальной энергии нуклона в возбужденном ядре (глубина потенциальной ямы для нуклона в ядре) больше истинной энергии связи нуклона на величину его кинетической энергии. То же можно сказать и о средних величинах.

Когда из возбужденного ядра происходит выброс нуклона, энергия возбуждения уменьшается на величину избыточной кинетической энергии, полученной нуклоном в момент предшествующий его выбросу из ядра. Часть этой избыточной кинетической энергии расходуется на преодоление связи данного нуклона с ядром, а оставшаяся часть сохраняется как энергия движения нуклона вне ядра. Таким образом, при выбросе нуклона энергия возбуждения убывает на величину суммы кинетической энергии нуклона вне ядра и его энергии связи с ядром.

Конечно, все эти энергетические понятия применимы не только к ядру, но и к любой системе частиц, в частности к электронной обо-

лочке атома. Но только в ядерной физике (и в физике жидкостей, кристаллов и в некоторых разделах химии) представление о средней энергии связи является оправданным и полезным. Теоретический анализ экспериментальных сведений о ядрах показал, что *истинные энергии связи нуклонов в любом (не слишком легком) ядре сравнительно мало отличаются от средней энергии связи нуклонов в том же ядре*. В этом отношении квантовая структура ядер, можно сказать, противоположна квантовой структуре электронных оболочек атомов. Энергия связи для периферических электронов в атомах измеряется несколькими электроновольтами, а для электронов, ближе расположенных к ядру, сотнями и тысячами электроновольт; в наиболее тяжелых атомах связь электронов K -слоя с ядром превосходит 100 000 эв. Понятно, что при такой ситуации вычисление средней энергии связи электронов в атоме бесполезно. Напротив, для ядер часто не имеет практического значения определение истинных энергий связи нуклонов, так как благодаря малой разнице между истинной и средней связью ход ядерных процессов нередко определяется достаточно точно средней энергией связи.

Когда одному из внутриядерных нуклонов сообщена избыточная энергия, то эта энергия возбуждения благодаря сильному взаимодействию всех (или большинства) нуклонов ядра немедленно *распределяется между всеми нуклонами* (или между большинством нуклонов ядра, § 94). В противоположность этому энергия возбуждения (или даже энергия отрыва внешнего электрона атома) совершенно недостаточна для возбуждения электронов более глубоких слоев.

Средняя энергия связи нуклонов играет важную роль в ядерных расчетах еще и потому, что она *определяется составом ядра* и для всех известных (не слишком легких ядер) *изменяется в узких пределах*, примерно от 7 до 8,6 Мэв. Это во многих случаях позволяет, экстраполируя свойства изученных ядер, предугадывать свойства неисследованных или совершенно неустойчивых ядер.

Для вычисления энергии связи нуклонов в ядре по формуле (30) достаточно знать: массу ядра M , число протонов в нем Z , число нейтронов $A-Z$ и массы покоя протона и нейтрона. Но о массе ядра мы судим по массе атома, которая отличается от массы ядра на массу Z электронов, связанных с ядром. Подставляя в формулу (30) вместо M массу атома и учитывая, понятно, в сумме собственных энергий частиц собственную массу Z электронов, мы получаем, строго говоря, полную энергию связи атома, а не одного только ядра, т. е. получаем сумму энергий связи нуклонов в ядре и энергии связи электронной оболочки с ядром. Энергия внутриядерной связи измеряется миллионами электроновольт на нуклон, а энергия связи электрона с ядром измеряется для периферических электронов несколькими электроновольтами и только для глубинных слоев электронных оболочек тяжелых атомов достигает десятых долей мегаэлектронвольта; но полная энергия связи тяжелых ядер составляет сотни мегаэлек-

троновольт, и поэтому в сравнении с ней величиной энергии связи электронной оболочки можно пренебречь, если ограничиваться точностью расчетов до десятых долей процента. Таким образом, понимая под M массу атома, измеренную в шкале O^{16} , мы получаем для вычисления полной энергии ядерной связи и средней энергии связи нуклона в ядре следующую формулу, в которой $m_p + m_e$, т. е. масса атома водорода, принята равной $1,007596 + 0,000549 = 1,008145$, а масса нейтрона $m_n = 1,008985$:

$$\bar{w}A = W = 931,15 [(A - Z) \cdot 1,008985 + Z \cdot 1,008145 - M] \text{ Мэв.} \quad (31)$$

Например, средняя энергия связи нуклона в ядре ${}_{20}\text{Ca}^{40}$, масса атома которого 39,9753, равна:

$$\begin{aligned} \bar{w} &= \frac{931,15}{40} (20 \cdot 1,008145 + 20 \cdot 1,008985 - 39,9753) = \\ &= 931,15 \cdot 0,009183 \approx 8,51 \text{ Мэв.} \end{aligned}$$

Сопоставим энергию связи нуклона в ядре ${}_{20}\text{Ca}^{40}$ с энергией связи нуклона в 2 раза более легком ядре ${}_{10}\text{Ne}^{20}$, масса которого по табличным данным в физической шкале 19,9988. Масса 10 протонов и электронов 10,08145 и 10 нейтронов 10,08985, что в сумме составляет 20,1713. Стало быть, уменьшение массы, вызванное образованием из этих частиц атома, равно 0,1743, или в среднем на один нуклон 0,00871. Таким образом, $\bar{w} = 931,15 \cdot 0,00871 \approx 8,15 \text{ Мэв}$. Мы видим, что, несмотря на большое различие масс и зарядов кальция и неона, средняя энергия связи нуклона в них различается менее чем на 5%.

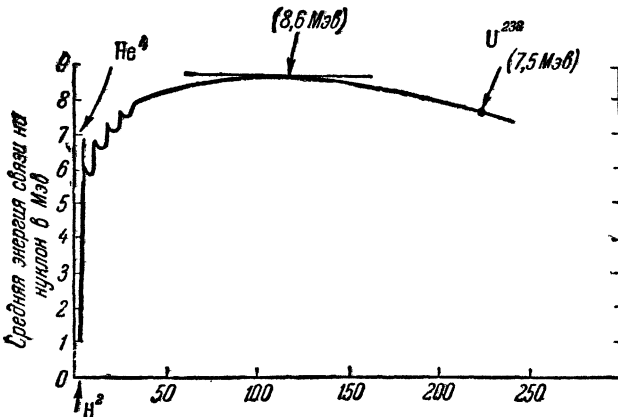


Рис. 413. Средняя энергия связи нуклонов.

В помещенной ниже таблице приведены полные энергии связи ряда ядер, а характерная для стабильных атомов зависимость средней энергии связи нуклонов в ядре от массы ядра показана на рис. 413. Только для самых легких элементов энергия связи нуклона довольно резко изменяется при изменении атомного номера.

Полные энергии связи некоторых ядер

Ядро	Энергия связи W	Ядро	Энергия связи W	Ядро	Энергия связи W
n^1	0,00	C^{13}	96,54	Na^{21}	163,00
H^1	0,00	C^{14}	104,70	Na^{22}	174,66
H^2	2,22	C^{15}	104,79	Na^{23}	186,44
H^3	8,33	N^{12}	72,78	Na^{24}	193,52
He^3	6,70	N^{13}	93,58	Na^{25}	202,57
He^4	28,11	N^{14}	104,10	Mg^{22}	168,05
He^5	27,30	N^{15}	114,85	Mg^{23}	181,94
He^6	28,90	N^{16}	121,66	Mg^{24}	197,52
Li^5	26,64	N^{16}	117,47	Mg^{25}	204,52
Li^6	31,81	N^{17}	122,99	Mg^{26}	216,56
Li^7	38,96	O^{14}	98,14	Mg^{27}	222,07
Li^8	40,94	O^{15}	111,39	Al^{23}	199,77
Be^6	26,47	O^{16}	126,96	Al^{26}	212,92
Be^7	37,33	O^{17}	131,08	Al^{27}	224,02
Be^8	56,17	O^{18}	139,02	Al^{28}	231,96
Be^9	57,80	O^{19}	138,95	Al^{29}	241,20
Be^{10}	64,49	F^{16}	109,92	Al^{30}	243,83
Be^{11}	62,62	F^{17}	127,54	Si^{27}	218,62
B^9	55,96	F^{18}	136,78	Si^{28}	234,66
B^{10}	64,29	F^{19}	146,95	Si^{29}	242,97
B^{11}	75,71	F^{20}	155,54	Si^{30}	254,44
B^{12}	78,28	F^{20}	150,88	Si^{31}	259,96
B^{13}	85,01	F^{21}	162,27	Si^{32}	269,48
C^{10}	59,05	Ne^{18}	131,47	P^{29}	237,28
C^{11}	72,99	Ne^{19}	143,12	P^{30}	249,87
C^{12}	91,66	Ne^{20}	159,85	P^{31}	260,98
		Ne^{21}	167,35	P^{32}	270,78
		Ne^{22}	176,77	P^{33}	279,18
		Ne^{23}	182,42	S^{31}	255,01

Формулу (31) часто записывают, вводя в нее обозначение так называемого «дефекта массы». Под *дефектом массы* понимают разность между массой атома M , выраженной в физической шкале масс (изотопическим весом), и массовым числом A :

$$\Delta = M - A,$$

т. е. под дефектом массы понимают отступление действительной массы атома, выраженной в физической шкале масс, от ближайшего целочисленного значения, причем дефект массы считают положительным, когда массовое число A меньше массы атома, что наблюдается у наиболее легких атомов (водорода, гелия, бериллия, углерода

и др.); в противном случае дефект массы считают отрицательным (дефект массы отрицателен для всех атомов с массой, превышающей 20 и меньшей 185).

Отношение дефекта массы к массовому числу называют *упаковочным коэффициентом*

$$P = \frac{M - A}{A}.$$

Зависимость упаковочного коэффициента P от атомного номера представлена на рис. 414.

В широком смысле слова «дефект массы» — это убыль массы, вызываемая выделением энергии (а с ней и массы) при возрастании связи между частицами. При таком широком понимании дефекта массы выражение, заключенное в скобки в формуле (30), и представляет собой действительный дефект массы ядра по отношению к изолированным нуклонам, из которых ядро образовалось. Однако установилась традиция применять термин «дефект массы» не в указанном его широком понимании, а как отступление массы ядра от ближайшего целочисленного значения, т. е. совершенно условно. В этом случае выражение «дефект массы» только фиксирует в памяти, что для всех не слишком легких и не слишком тяжелых элементов массы атомов меньше их массового числа.

Подчеркнем еще раз, что энергия связи $W = W_{\text{яд}} + W_{\text{эл}}$ входит по уравнению (29) в величину энергии атома с отрицательным знаком:

$$E = Mc^2 = \sum m_0 c^2 - W_{\text{яд}} - W_{\text{эл}}.$$

Здесь первый член — собственная энергия нуклонов (и электронов атомной оболочки) — более чем в 100 раз превышает второй член, т. е. энергию ядерной связи, а этот второй член в 500—1000 раз превышает третий член — энергию связи электронов с ядром. Хотя собственная энергия частиц и является главным по величине и притом положительным членом, однако эта часть полной энергии атома обычно не представляет практического интереса: за исключением случаев аннигиляции и других превращений элементарных частиц их собственная энергия остается связанной с ними и в начальных и в конечных состояниях.

Выделение энергии в ядерных реакциях происходит за счет уменьшения полной энергии атома, т. е. *за счет возрастания энергии ядерной связи*. В очень небольшой части (не более чем на тысячные доли) выделение энергии в ядерных реакциях зависит от изменения энергии связи электронов с ядром. Перестройка электронной оболочки является следствием превращения атомных ядер, и поэтому в ядерных реакциях, протекающих «без принуждения», т. е. без затраты работы, энергия электронной связи может и возрастать и убывать, тогда как энергия ядерной связи в реакциях, происходящих с выделением энергии, всегда возрастает.

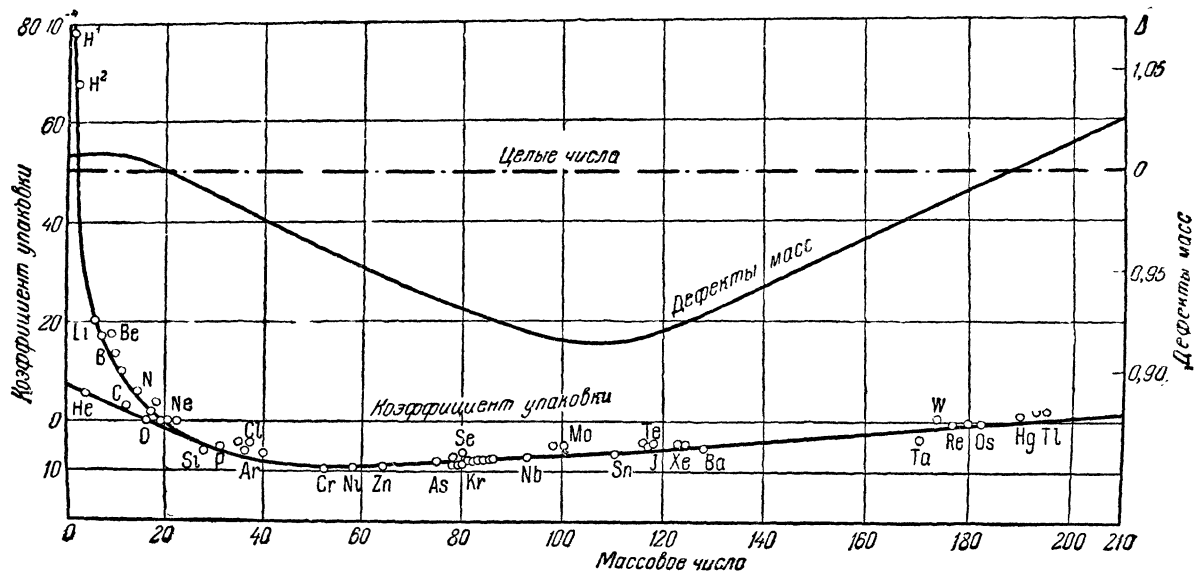


Рис. 414. Зависимость дефекта массы и упаковочного коэффициента от атомного номера.