

## ФИЗИКА ЯДРА

Согласно предложенной Резерфордом (1911) *ядерной модели* атом представляет собой систему зарядов, в центре которой расположено ядро с размерами  $d \leq 10^{-14}$  м. Вокруг этого ядра под действием электростатических сил движутся электроны. Ядро состоит из положительно заряженных протонов и не имеющих заряда нейтронов. Число электронов в атоме равно числу протонов в ядре. Так как масса электронов почти в 2000 раз меньше массы протонов или нейтронов, практически вся масса атома сосредоточена в ядре.

Структуру атома в настоящее время наиболее полно описывает квантовая механика. Положения квантовой механики используются и для атомного ядра. Полная теория атомного ядра все еще не создана

### 1. СТРОЕНИЕ И ВАЖНЕЙШИЕ СВОЙСТВА ЯДЕР

Ядром называется центральная часть атома, в которой сосредоточена практически вся масса атома и его положительный электрический заряд. Все атомные ядра состоят из элементарных частиц, протонов и нейтронов, которые считаются двумя зарядовыми состояниями одной частицы – нуклона. Термин «элементарная частица» первоначально означал простейшие, далее ни на что не разложимые частицы, лежащие в основе любых материальных образований. Позднее физики осознали всю условность термина “элементарный” применительно к микрообъектам. Сейчас уже не подлежит сомнению, что частицы имеют ту или иную структуру, но, тем не менее, исторически сложившееся название продолжает существовать.

### СТРОЕНИЕ ЯДРА. ПРОТОНЫ, НЕЙТРОНЫ, КВАРКИ

Протон представляет собой ядро простейшего атома – атома водорода. Ядра остальных атомов состоят из протонов и нейтронов. То, что ядро водорода является фундаментальной частицей вещества, установил Э.Резерфорд, который показал, что масса положительного заряда атома сконцентрирована в очень малой области пространства, и назвал его протоном. Масса протона составляет  $1,67 \cdot 10^{-27}$  кг, т.е. примерно в 1836 раз превышает массу электрона. Электрический заряд протона  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл равен по величине, но противоположен по знаку заряду электрона.

Еще в 1920 г. Резерфорд допускал существование нейтронов в ядрах, но первые убедительные доказательства существования этих частиц принесла работа его ассистента Дж. Чедвика в 1932. Чедвик облучал бериллий альфа-частицами радиоактивного источника. Тогда уже было извест-

но, что облученный бериллий становится источником нового излучения. Это излучение при столкновении с другими ядрами выбивает из них протоны. Чедвик предположил, что излучение бериллия представляет собой поток частиц с массой, примерно такой же, как у протона, но без электрического заряда. Он назвал такие частицы нейтронами.

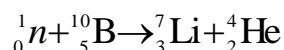


Дж. Чедвик<sup>1</sup>

Масса нейтрона несколько превышает массу протона и в 1839 раз массу электрона. Как и у протона, спин нейтрона равен  $\hbar/2$ . У нейтрона есть и магнитный момент, равный  $9 \cdot 10^{-27}$  Дж/Тл, т.е. примерно 2/3 магнитного момента протона. Но, в отличие от протона, магнитный момент нейтрона ориентирован противоположно его спину (оси вращения).

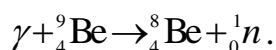
Нейтрон как нейтральная частица не отклоняется ни в электрическом, ни в магнитном поле, не оставляет треков в камерах. Поэтому их нельзя прямо зарегистрировать.

Один из способов детектирования – борные счетчики: в ионизационную камеру помещают газ – трифторид бора. Налетающие на ядра бора нейтроны приводят к образованию  $\alpha$ -частиц в ядерной реакции



Образующиеся альфа-частицы легко детектируются ионизационной камерой и так, косвенно, можно судить о наличии в камере нейтронов.

Сами нейтроны могут быть получены, например, путем облучения бериллия гамма-излучением из реакции фотораспада:



Эта реакция имеет отрицательный дефект массы, то есть конечная масса для нее оказывается больше первоначальной. Значит, требуется затратить определенную энергию, чтобы эта реакция смогла произойти. Пороговая энергия гамма-лучей для этой реакции равна 1,67 МэВ.

На первый взгляд у нейтрона, как у одного из основных (первичных) элементов, из которых все построено, есть крупный недостаток. Нейтрон недолговечен. В свободном состоянии время его жизни приблизительно 15 минут. Он распадается на протон, электрон и антинейтрино (этот процесс называется  $\beta$ -распадом, поскольку поток электронов когда-то назывался бета-лучами). Однако в стабильных ядрах, по современным оценкам, время его жизни превышает  $10^{32}$  лет. Скорее всего, столько же живет

<sup>1</sup> Джеймс Чедвик – английский ученый, Нобелевская премия по физике 1935 г. «за открытие нейтрона».

протон, распад которого старательно искали, но так пока и не обнаружили. Нестабильность протона предсказал А. Д. Сахаров.

Общее число протонов и нейтронов, образующее ядро, называют массовым числом. Число протонов определяет заряд атома, а число нейтронов находится по формуле:

$$N = A - Z,$$

где  $N$  — число нейтронов в ядре (нейтронное, или изотопическое, число);  $A$  — массовое число, число  $Z$  равно протонов числу в ядре (протонное, или зарядовое, число). Оно определяет общий заряд ядра  $+Ze$  и порядковый номер химического элемента в периодической системе Менделеева.

Тип ядра обозначается символом  ${}^A_Z\text{B}_N$ . Например, хлор  ${}^{35}_{17}\text{Cl}_{18}$  имеет  $Z = 17$  протонов,  $N = 18$  нейтронов и  $A = 35$  нуклонов. Число  $N$ , не несущее дополнительной информации, часто опускают, и ядро обозначают символом  ${}^{35}_{17}\text{Cl}$  (а иногда опускают и  $Z$ , обозначая  ${}^{35}\text{Cl}$ ).

Ядра с одинаковым числом  $Z$ , но различными массовыми числами  $A$  называются *изотопами*. Например,  ${}^1_1\text{H}$ ,  ${}^2_1\text{H}$ ,  ${}^3_1\text{H}$ . Всего известно около 300 устойчивых изотопов химических элементов и более 2000 естественных и искусственно полученных радиоактивных изотопов.

Ядра, которые при одинаковом  $A$  имеют различные  $Z$ , называются *изобарами*. Например,  ${}^{16}_8\text{O}$  и  ${}^{16}_7\text{N}$ .

Ядра с одинаковым числом  $N$ , например  ${}^{14}_6\text{C}_8$ ,  ${}^{15}_7\text{N}_8$  и  ${}^{16}_8\text{O}_8$  называются *изотонами*. Все ядра имеют по несколько изотопов.

Некоторые ядра, по историческим и иным причинам, имеют самостоятельные названия. Например, ядро  ${}^4_2\text{He}$  называется альфа-частицей, ядро дейтерия  ${}^2_1\text{H}$  (или  $d$ ) — дейтроном, а ядро трития  ${}^3_1\text{H}$  (или  $T$ ) — тритоном.

Наиболее распространен в природе элемент водород  ${}^1_1\text{H}$ . Его распространенность (относительная доля в чистом водороде) составляет 99,99%. Изотоп водорода дейтерий  ${}^2_1\text{H}$  имеет распространенность 0,01%, а тритий  ${}^3_1\text{H}$  встречается очень редко.

Размер ядра характеризуется *радиусом ядра*, имеющим условный смысл ввиду размытости границы ядра. Эмпирическая формула для радиуса ядра

$$R = r_0 A^{1/3},$$

где  $r_0 = (1,2 \div 1,7) \cdot 10^{-15} \text{ м} = (1,2 \div 1,7) \text{ фм}$ . При практических вычислениях можно брать усредненное значение  $r_0 = 1,3 \text{ фм}$ .

*Масса ядра пропорциональна произведению*

$$M_{\text{я}} \sim A \cdot m_N,$$

где  $A$  - массовое число, а  $m_N$  – некоторая масса, имеющая порядок массы нуклона ( $m_N = 1,67 \cdot 10^{-27}$ ) кг.

Принимая объем ядра равным

$$V_{\text{я}} = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi (r_0 A^{1/3})^3 = \frac{4}{3} \pi r_0^3 A,$$

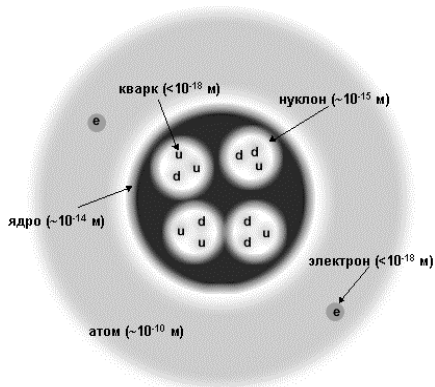
для плотности массы ядра  $\rho_{\text{я}} = M_{\text{я}} / V_{\text{я}}$  имеем

$$\rho_{\text{я}} = \frac{m_N A}{\frac{4}{3} \pi r_0^3 A} = \frac{m_N}{\frac{4}{3} \pi r_0^3}$$

Подставляя числовые значения, получим

$$\rho_{\text{я}} \approx 2 \cdot 10^{17} \text{ кг/м}^3 = 2 \cdot 10^{14} \text{ т/м}^3 \text{ !!!}$$

Это невероятно много. Например, плотность воды  $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1 \text{ г/см}^3 = 1 \text{ т/м}^3$ , а средняя плотность атома  $\rho_{\text{ат}} \approx 2 \cdot 10^5 \text{ кг/м}^3$ . (200 т/м<sup>3</sup>). Гирька в равновесии размером 1 мм<sup>3</sup>, если бы нам удалось изготовить ее из ядерного вещества, весила бы 200 000 тонн! Ее негде было бы «положить», она ушла бы к центру Земли как крошечка в воду.



Протоны и нейтроны, входящие в ядро, являются *фермионами*, так как имеют спин  $\hbar/2$ .

Ядро атома имеет *собственный момент импульса – спин ядра*:

$$L_{\text{яд}} = \hbar \sqrt{I(I+1)},$$

где  $I$  – *внутреннее (полное) спиновое квантовое число*.

Число  $I$  принимает целочисленные или полуцелые значения 0, 1/2, 1, 3/2, 2 и т.д. Ядра с *четными*  $A$  имеют *целочисленный спин* (в единицах  $\hbar$ ) и подчиняются статистике *Бозе–Эйнштейна* (бозоны). Ядра с *нечетными*  $A$  имеют *полуцелый спин* (в единицах  $\hbar$ ) и подчиняются статистике *Ферми–Дирака* (т.е. ядра – фермионы).

Ядерные частицы имеют собственные магнитные моменты, которыми определяется магнитный момент ядра  $P_{\text{тяд}}$  в целом. Единицей измерения магнитных моментов ядер служит *ядерный магнетон*  $\mu_{\text{яд}}$ :

$$\mu_{\text{яд}} = \frac{e\hbar}{2m_p}.$$

Здесь  $e$  – абсолютная величина заряда электрона,  $m_p$  – масса протона.

Ядерный магнетон в  $m_p/m_e = 1836,5$  раз меньше магнетона Бора, отсюда следует, что магнитные свойства атомов определяются магнитными свойствами его электронов.

Между спином ядра  $L_{\text{яд}}$  и его магнитным моментом имеется соотношение:

$$P_{m_{\text{яд}}} = \gamma_{\text{яд}} L_{\text{яд}},$$

где  $\gamma_{\text{яд}}$  – ядерное гиромагнитное отношение. Нейтрон имеет отрицательный магнитный момент  $\mu_n \approx -1,913\mu_{\text{яд}}$  так как направление спина нейтрона и его магнитного момента противоположны. Магнитный момент протона положителен и равен  $\mu_p \approx 2,793\mu_{\text{яд}}$ . Его направление совпадает с направлением спина протона.

Распределение электрического заряда протонов по ядру в общем случае несимметрично. Мерой отклонения этого распределения от сферически симметричного является *квадрупольный электрический момент ядра*  $Q$ . Если плотность заряда считается везде одинаковой, то  $Q$  определяется только формой ядра. Так, для эллипсоида вращения

$$Q = \frac{2}{5} Z_e (b^2 - a^2),$$

где,  $b$  – полуось эллипсоида вдоль направления спина,  $a$  – полуось в перпендикулярном направлении. Для ядра, вытянутого вдоль направления спина,  $b > a$  и  $Q > 0$ . Для ядра, сплюсненного в этом направлении,  $b < a$  и  $Q < 0$ . Для сферического распределения заряда в ядре,  $b = a$  и  $Q = 0$ . Это справедливо для ядер со спином, равным 0 или  $\hbar/2$ .

## 2. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ ЯДЕР. ДЕФЕКТ МАССЫ

*Энергией связи ядра* называется физическая величина, равная той работе, которую нужно совершить, чтобы расщепить ядро на составляющие его нуклоны без придания им кинетической энергии.

Нуклоны в ядрах находятся в состояниях, существенно отличающихся от их свободных состояний. За исключением ядра обычного водорода во всех ядрах имеется не менее двух нуклонов, между которыми существует особое ядерное сильное взаимодействие – притяжение – обеспечивающее устойчивость ядер, несмотря на отталкивание одноименно заряженных протонов.

Полный заряд ядра, состоящего из нейтронов и протонов, равен  $Q = Ze$ , где  $Z$  – протонное число, т. е. число протонов в ядре. Очевидно, что масса ядра должна быть равна сумме масс протонов и нейтронов, образующих ядро. Однако, действительная масса ядра меньше суммы масс

протонов и нейтронов! Разность этих масс  $\Delta m$  называется *дефектом массы*.

• *Энергией связи нуклона в ядре называется физическая величина, равная той работе, которую нужно совершить для удаления нуклона из ядра без сообщения ему кинетической энергии.*

• *Энергия связи ядра определяется величиной той работы, которую нужно совершить, чтобы расщепить ядро на составляющие его нуклоны без придания им кинетической энергии.*

Когда  $Z$  протонов и  $N$  нейтронов образуют ядро, некоторая масса пропадает и вместо нее выделяется эквивалентная ей энергия связи  $E_{св}$  (обычно в виде  $\gamma$ -квантов). Это значит, что для разрушения ядра необходимо сообщить ему энергию, не менее

$$E_{св} = \Delta m \cdot c^2.$$

Теоретически формула представляет собой закон сохранения массы и энергии

Энергию связи ядра, состоящего из  $Z$  протонов и  $N$  нейтронов, можно определить как

$$E_{св} = (Zm_p + Nm_n)c^2 - M_яc^2$$

где  $M_я$  – масса ядра;  $m_p$  – масса протона;  $m_n$  – масса нейтрона. Каждую массу умножили на  $c^2$ , чтобы получить соответствующую ей энергию.

Так как в таблицах свойств атомных ядер приводятся массы атомов, а не ядер, то формулу надо изменить:

*Во первых*, массу ядра вычислим по формуле

$$M_я = M_{ам} - Zm_e,$$

где  $M_{ам}$  – масса атома, соответствующая данному ядру;  $Zm_e$  – полная масса электронов, обращающихся вокруг ядра. Энергией связи электронов с ядром пренебрегаем вследствие ее малости;

*Во вторых*, массу протона найдем как

$$m_p = m_H - m_e,$$

где  $m_H$  – масса атома водорода H. Энергией связи электрона в атоме водорода ( $\approx 13,6$  эВ) пренебрегаем.

Теперь формулу (4.6) можем записать в виде

$$E_{св} = Z(m_H - m_e)c^2 + Nm_n c^2 - (M_{ам} - Zm_e)c^2,$$

или проще

$$E_{св} = (Zm_{\text{H}} + Nm_{\text{n}})c^2 - M_{\text{ам}}c^2$$

Часто оказывается удобнее выражать энергию связи в единицах массы, а не в единицах энергии. Тогда множитель « $c^2$ » следует опустить, и окончательно получим

$$E_{св} = (Zm_{\text{H}} + Nm_{\text{n}}) - M_{\text{ам}}$$

Здесь энергия связи выражается в атомных единицах массы (а. е. м.). За одну а. е. м. принимают 1/12 часть массы нуклида  $^{12}\text{C}$ . Одной атомной единице массы соответствует атомная единица энергии (а. е. э.): 1 а. е. э. = 931,5016 МэВ.

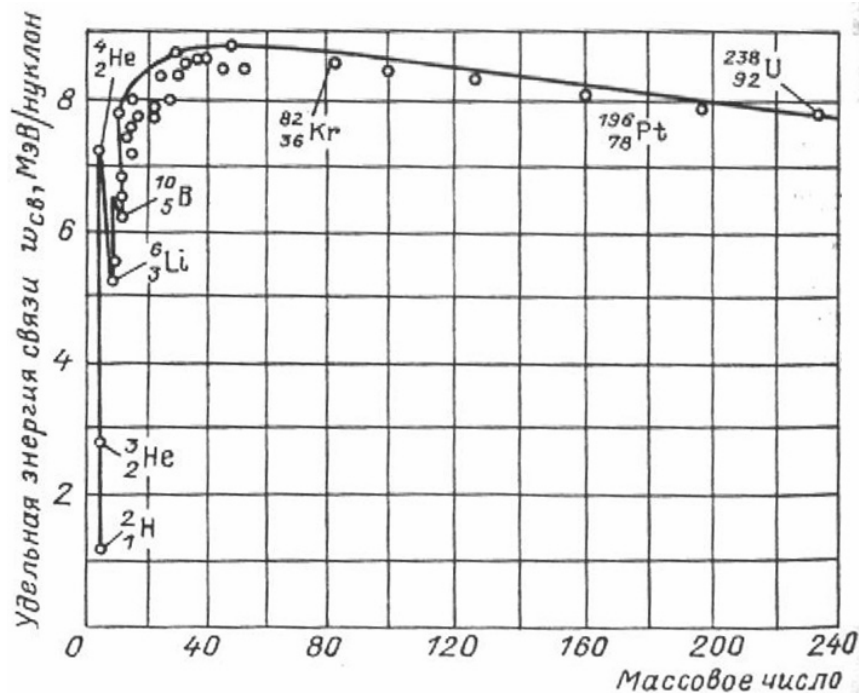
Дефект массы служит мерой энергии связи ядра: если  $E_{св} > 0$ , то ядро стабильно. Чтобы расщепить его на составные части, ему надо сообщить энергию извне. Если  $E_{св} < 0$ , то ядро нестабильно. Оно будет распадаться самопроизвольно – спонтанно.

$$W_{св} = \Delta mc^2 = [Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{яд}}] \cdot c^2.$$

*Удельной энергией связи ядра  $\omega_{св}$  называется энергия связи, приходящаяся на один нуклон:*

$$\omega_{св} = \frac{W_{св}}{A}.$$

Величина  $\omega_{св}$  составляет в среднем 8 МэВ/нуклон. На рисунке, приведена кривая зависимости удельной энергии связи от массового числа  $A$ , характеризующая различную прочность связей нуклонов в ядрах разных химических элементов. Ядра элементов в средней части периодической системы ( $28 < A < 138$ ), т.е. от  $^{14}_8\text{Si}$  до  $^{38}_{50}\text{Ba}$ , наиболее прочны.



В этих ядрах  $\omega_{\text{св}}$  близка к 8,7 МэВ/нуклон. По мере увеличения числа нуклонов в ядре удельная энергия связи убывает. Ядра атомов химических элементов, расположенных в конце периодической системы (например ядро урана), имеют  $\omega_{\text{св}} \approx 7,6$  МэВ/нуклон. Это объясняет возможность выделения энергии при делении тяжелых ядер. В области малых массовых чисел имеются острые «пики» удельной энергии связи. Максимумы характерны для ядер с четными числами протонов и нейтронов ( $^4_2\text{He}$ ,  $^{12}_6\text{C}$ ,  $^{16}_8\text{O}$ ), минимумы — для ядер с нечетными количествами протонов и нейтронов ( $^6_3\text{Li}$ ,  $^{10}_5\text{B}$ ,  $^{14}_7\text{N}$ ).

Если ядро имеет наименьшую возможную энергию  $W_{\text{min}} = -W_{\text{св}}$ , то оно находится **в основном энергетическом состоянии**. Если ядро имеет энергию  $W > W_{\text{min}}$ , то оно находится **в возбужденном энергетическом состоянии**. Случай  $W = 0$  соответствует расщеплению ядра на составляющие его нуклоны. В отличие от энергетических уровней атома, раздвинутых на единицы электронвольт, энергетические уровни ядра отстоят друг от друга на мегаэлектронвольт (МэВ). Этим объясняется происхождение и свойства гамма-излучения.

Данные об энергии связи ядер и использование капельной модели ядра позволили установить некоторые закономерности строения атомных ядер.

*Критерием устойчивости атомных ядер* является соотношение между числом протонов и нейтронов *в устойчивом ядре* для данных изо-



баров ( $A = \text{const}$ ). Условие минимума энергии ядра приводит к следующему соотношению между  $Z_{\text{уст}}$  и  $A$ :

$$Z_{\text{уст}} = \frac{A}{1,98 + 0,015A^{2/3}}.$$

Берется целое число  $Z_{\text{уст}}$ , ближайшее к тому, которое получается по этой формуле.

При малых и средних значениях  $A$  числа нейтронов и протонов в устойчивых ядрах примерно одинаковы:  $Z \approx A - Z$ .

С ростом  $Z$  силы кулоновского отталкивания протонов растут пропорционально  $Z \cdot (Z - 1) \sim Z^2$  (*парное взаимодействие протонов*), и для компенсации этого отталкивания ядерным притяжением число нейтронов должно возрастать быстрее числа протонов.

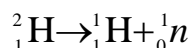
### 3. СТАБИЛЬНОСТЬ ЯДРА.ФОТОРАСПАД.

Энергия связи в ядре очень велика. При столкновении нейтрона, протона или  $\alpha$ -частицы с ядром может быть много разных событий:

- ✓ захват частицы ядром (пока не будут испущены ядром эта или другая (другие) частицы);
- ✓ расщепление ядра на фрагменты;
- ✓ отскок от ядра при упругом ударе.

Что произойдет – зависит от соотношения энергии связи и энергии налетающей частицы.

Вторым после простейшего ядра водорода (протона) является ядро атома дейтерия  ${}^2_1\text{H}$  (дейтрон  $d = p + n$ ). Ядерная реакция распада атома дейтерия



позволяет рассчитать энергию связи дейтрона в а.е.м. по формуле

$$E_{\text{св}} = Zm_{\text{H}} + Nm_n.$$

В случае дейтрона  $Z = 1$  и  $N = 1$ , поэтому

$$E_{\text{св}} = m_{\text{H}} + m_n.$$

Численно:	1,007825	а. е. м.	(масса атома ${}^1_1\text{H}$ )
	+	1,008665	а. е. м. (масса нейтрона $m_n$ )
		<hr style="width: 100%; border: 0.5px solid black;"/>	
		2,016490	а. е. м.
		-	
		2,014102	а. е. м. (масса атома ${}^2_1\text{H}$ )
		<hr style="width: 100%; border: 0.5px solid black;"/>	
		0,002388	а. е. м.

В ядерной физике вместо массы ядра  $M_n$  используют (в соответствии с соотношением Эйнштейна  $E = Mc^2$ ) её энергетический эквивалент  $Mc^2$ , причём в качестве единицы энергии используется 1 электрон-вольт (эВ). 1 эВ – это энергия, приобретаемая частицей, имеющей единичный электрический заряд, при прохождении в электрическом поле разности потенциалов в 1 вольт.

Если полученную в результате расчета энергию связи выразить в единицах энергии (1 а. е. м. = 931.494 МэВ/с<sup>2</sup>), то получим

$$E_{cs} = 0,002388 \times 931 = 2,22 \text{ МэВ.}$$

Энергию связи дейтрона в единицах энергии можно также вычислить по формуле

$$E_{cs} + m_d c^2 = m_p c^2 + m_n c^2,$$

где  $m_d$  – масса дейтрона;  $m_p c^2$  – энергия покоя протона;  $m_n c^2$  – энергия покоя нейтрона.

Наглядно

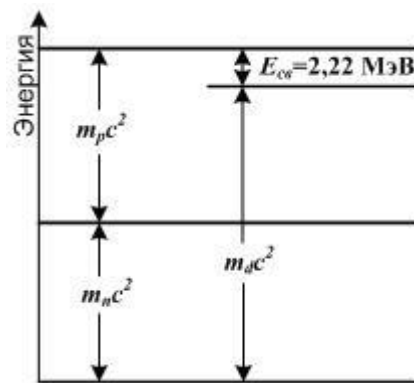


Рис. Энергия связи дейтрона

Экспериментально энергию связи дейтрона находят из реакции ядерного фотосинтеза, при которой моноэнергетический фотон поглощается дейтроном. При этом дейтрон распадается на протон и нейтрон.

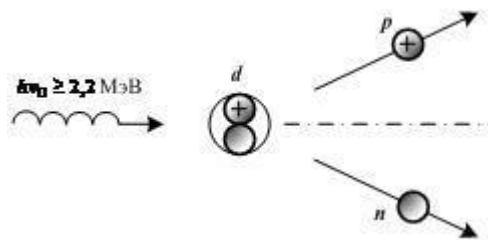
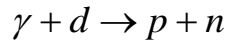


Рис. 4.3.

Уравнение реакции имеет вид



Закон сохранения массы и энергии для этой реакции дает

$$h\nu + m_d c^2 \rightarrow m_p c^2 + m_n c^2 + W_p + W_n$$

где  $W_p$  и  $W_n$  - кинетическая энергия протона и нейтрона.

Полагаем, что дейтрон покоится. Минимальную или *пороговую* энергию налетающего фотона  $E = h\nu$  найдем, если в ней положить  $W_p = W_n = 0$ . Таким образом для пороговой энергии имеем:

$$(h\nu_0)_\gamma + m_d c^2 = m_p c^2 + m_n c^2$$

Очевидно, что  $h\nu_0 = E_{\text{св}}$ .

В обратной реакции – реакции *ядерного фотоэффекта* – в результате ядерной реакции слияния (синтеза) покоящихся протона и нейтрона образуется  $\gamma$  - фотон с энергией 2,22 МэВ.

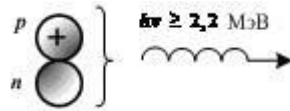
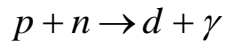


Рис. 4.4.

Реакция ядерного фотоэффекта записывается уравнением



#### 4. ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ

Атомное ядро как целостная система существует благодаря силам притяжения, связывающих протоны и нейтроны в атомном ядре. Эти силы совершенно не похожи на те, с которыми мы встречались до сих пор – ни на гравитационные, ни на электростатические. Чтобы объяснить, почему протоны внутри ядра очень прочно связаны, потребовалось ввести новую фундаментальную силу. Эти силы назвали *сильным взаимодействием* или *ядерными силами*. **Ядерные силы являются короткодействующими** силами. Они проявляются лишь на весьма малых расстояниях между нуклонами в ядре порядка  $10^{-15}$  м. Длина  $(1,5 \div 2,2) \cdot 10^{-15}$  м называется *радиусом действия ядерных сил*.



Хидэки Юкава<sup>2</sup>

Для объяснения ядерных сил японский физик Хидэки Юкава постулировал существование пиона. По теории (она была создана Юкава в 1935 году) два нуклона притягиваются друг к другу, потому что обмениваются между собой частицей. Частицу назвали пи-мезоном, или пионом. Один нуклон испускает пи-мезон, другой его поглощает, а в результате нуклоны притягиваются друг к другу. В слове «мезон» окончание «он» как у всех названий частиц, а корень «мезо» взят из греческого «мезос» – промежуточный. Масса пи-мезона больше массы электрона и меньше массы протона. Между радиусом действия ядерных сил  $r_p$  и мас-

сой пи -мезона  $m_p$  существует простая связь:

$$m_p \geq \hbar / cr_p$$

Есть три сорта пи-мезонов – положительный, отрицательный и нейтральный. Их массы несколько отличаются, но все они примерно в 300 раз больше массы электрона. Таким образом, масса пи-мезона стала известна задолго до экспериментального открытия этой частицы (1947 г.).

К отличительным свойствам ядерных сил относятся:

*Зарядовая независимость:*

*Короткодействие:*

*Способность к насыщению:*

*Ядерные силы являются самыми мощными из известных в природе сил.*

Остановимся подробнее об этих особенностях.

1. *Зарядовая независимость:* Когда говорят о ядерных силах, часто не различают протон и нейтрон. Как установлено из опытов силы взаимодействия между протоном и нейтроном, между нейтроном и нейтроном, а также между протоном и протоном, за вычетом кулоновских сил, одинаковы.

---

<sup>2</sup> Хидэки Юкава - японский физик-теоретик, Нобелевская премия (1949) «за предсказание существования мезонов и теоретические исследования природы ядерных сил»



Энрико Ферми<sup>3</sup>

2. *Короткодействие*: Если электростатические силы действуют как на микроскопических, так и на макроскопических расстояниях, то ядерные силы проявляют себя на только микроскопических расстояниях. Радиус действия ядерных сил составляет величину порядка  $10^{-15}$  метра. Для этой сверхмалой длины, характеризующей размеры атомных ядер, ввели специальную единицу измерения, названную в честь Э.Ферми, «1 Фм =  $10^{-13}$  см». В системе СИ, введенной в России с 1978 г., эта единица носит название «фемтометр»  $1 \text{ фм} = 10^{-15}$  метра.

Короткодействие ограничивает действие ядерных сил ближайшим окружением нуклона, в то время как медленно спадающее с расстоянием электростатическое отталкивание протонов действует во всем объеме ядра. С ростом числа нуклонов ядра становятся неустойчивыми, и поэтому большинство тяжелых ядер радиоактивны, а совсем тяжелые вообще не могут существовать. Конечное число элементов в природе – следствие короткодействия ядерных сил.

3. *Способность к насыщению*: Когда нуклон оказывается полностью окруженным другими нуклонами, но теряет способность притягивать другие нуклоны. Нуклоны вне этого окружения «не чувствуют» сил притяжения такого (окруженного со всех сторон) нуклона. Это явление аналогично экранировке внешнего электрона в атоме.

4. *Ядерные силы самые мощные*: В пределах радиуса действия ядерные силы характеризуются очень большой величиной. Если взаимодействие описывать при помощи потенциала  $U$  (рис. 4.5), то глубина этого потенциала с радиусом действия (шириной)  $\sim 1$  фм должна быть порядка  $eU = 50$  МэВ. Для сравнения – энергия кулоновского взаимодействия двух протонов на расстоянии 1 фм по порядку величины равна 1,4 МэВ. В связи с этим ядерные силы называют *сильным взаимодействием*.

---

<sup>3</sup> Энрико Ферми – итальянский физик, Нобелевская премия по физике 1938 г. «За доказательства существования новых радиоактивных элементов, полученных при облучении нейтронами, и связанное с этим открытие ядерных реакций, вызываемых медленными нейтронами»

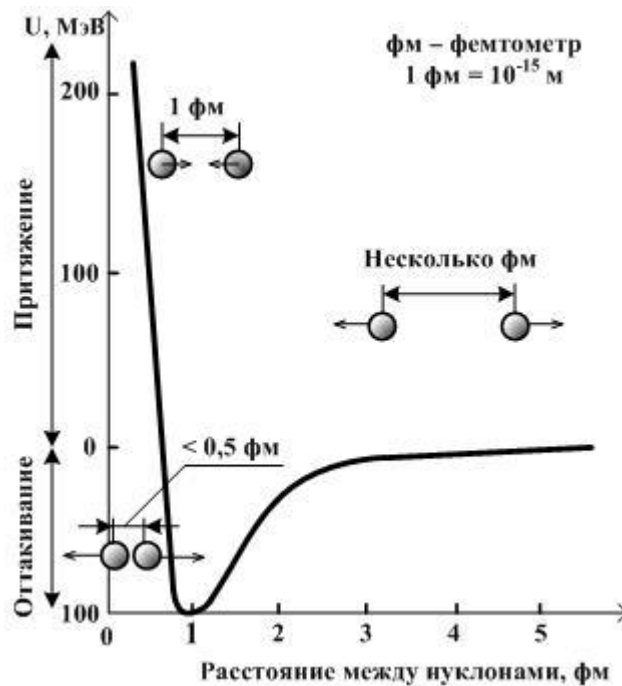


Рис.. Потенциальная энергия взаимодействия протона с полем ядра.

Сильное взаимодействие быстро уменьшается с увеличением расстояния. Кроме того, некоторые опыты показывают, что при еще меньших расстояниях, порядка 0,5 фм притяжение нуклонов сменится отталкиванием.

На рисунке показан протон с энергией  $E$ , налетающий на ядро. Потенциальное поле кулоновского заряда ядра

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze}{r}.$$

таково, что  $dU/dr < 0$  и электрическая сила

$$F = eE = -e \frac{dU}{dr} < 0$$

отрицательная, т. е. она отталкивает протон от ядра. По мере приближения протона к ядру действие отталкивающих сил кулоновского поля ядра увеличивается и кинетическая энергия  $W$  протона будет уменьшаться. На рис. 4.6 полная энергия протона  $E = W + eU$  изображена отрезком  $AB = AC + CB$ , где  $AB = E$  – полная энергия;  $AC = k \frac{Ze^2}{r} = eU$  – потенциальная энергия поля ядра;  $CB = W$  – кинетическая энергия протона.

На рисунке полная энергия  $E$  меньше высоты кулоновского барьера. По классической механике, когда протон достигает точки  $B'$ , в которой его кинетическая энергия  $W$  будет точно равна нулю, он испытает «клас-

сическое» столкновение с ядром и остановится, затем отскочит назад, не будучи в состоянии преодолеть барьер и подвергнуться действию ядерных сил.

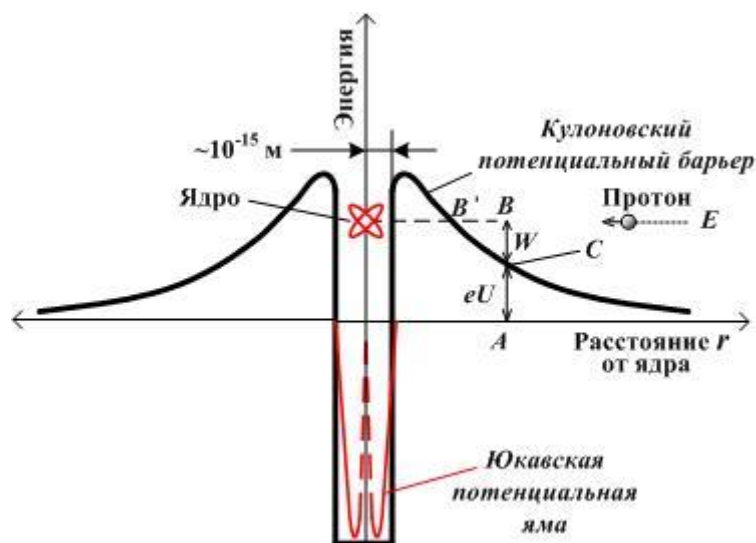


Рис. 4.6

По квантовой механике имеет место *туннельный эффект*, согласно которому протон имеет отличную от нуля вероятность *протуннелировать* (проникнуть) в Юкавскую потенциальную яму, описывающую ядерные силы с потенциалом

$$U = -g^2 \frac{e^{-ar}}{r}$$

где  $a = \frac{m_{0p}c}{\hbar}$ ,  $m_{0p}$  – масса пиона;  $g$  – постоянная ядерных сил.

Радиус ядра (формула (4.1)) не является чисто геометрической характеристикой и связан прежде всего с радиусом действия ядерных сил. При бомбардировке ядра протонами они должны проникнуть через барьер и подойти к центру ядра настолько, чтобы почувствовать ядерные силы. Радиус нуклона  $r_0$  в этом случае принимается равным  $r_0 = 1,2$  фм.

Так кулоновский барьер не оказывает никакого влияния на рассеяние нейтрона на ядре, нейтрон почувствует ядерные силы на несколько большем расстоянии от ядра, чем заряженные частицы и для них в формуле (4.1)  $r_0 = 1,5$  фм.

Итак, перечислим **общие свойства ядерных сил**:

- малый радиус действия ядерных сил ( $R \sim 1$  Фм);
- большая величина ядерного потенциала  $U \sim 50$  МэВ;
- зависимость ядерных сил от спинов взаимодействующих частиц;
- тензорный характер взаимодействия нуклонов;

- ядерные силы зависят от взаимной ориентации спинового и орбитального моментов нуклона (спин-орбитальные силы);
- ядерное взаимодействие обладает свойством насыщения;
- зарядовая независимость ядерных сил;
- обменный характер ядерного взаимодействия;
- притяжение между нуклонами на больших расстояниях ( $r > 1$  Фм), сменяется отталкиванием на малых ( $r < 0,5$  Фм).

Взаимодействие между нуклонами возникает в результате испускания и поглощения квантов ядерного поля –  $\pi$ -мезонов. Они определяют ядерное поле по аналогии с электромагнитным полем, которое возникает как следствие обмена фотонами. Взаимодействие между нуклонами, возникающее в результате обмена квантами массы  $m$ , приводит к появлению потенциала  $U_{\text{я}}(r)$ :

$$U_{\text{я}}(r) = g_{\text{я}} \frac{e^{-(mc/\hbar)r}}{r}.$$

## 5. СТРОЕНИЕ ЯДЕР. МОДЕЛЬ ЯДЕРНЫХ ОБОЛОЧЕК

Теория ядра не закончена. Сведения о структуре ядра, свойствах его взаимодействия с частицами и другими ядрами получают на основе сравнения экспериментальных данных об энергетических уровнях, эффективных сечениях, ядерных реакциях с теоретическими представлениями о ядре как системе сильно взаимодействующих частиц – нуклонов. Исследование структуры ядра сопряжено со многими теоретическими и экспериментальными трудностями. Поэтому при построении моделей ядра используются различные аналогии и полуэмпирические схемы.

В теории ядра широкое распространение получил подход, при котором реальное ядро моделируется физической системой, которая, с одной стороны, описывает вполне определенную совокупность свойств ядра, а, с другой, являясь простой с математической точки зрения, допускает строгий количественный расчет.

Так, еще в 1936 г. Н. Бор и советский физик Я. Френкель выдвинули капельную модель атомного ядра. В ней ядро рассматривается по аналогии с каплей жидкости, которая, однако, состоит из интенсивно взаимодействующих между собой протонов и нейтронов. Поверхность такой капли может колебаться и при определенных условиях привести к разделению капли на части, т.е. к разрушению ядра.

Другая модель была предложена американским ученым М. Гепперт-Майер и немецким физиком Х. Йенсенем в 50-х гг. XX в. Она была



названа оболочечной моделью ядра, согласно которой нуклоны, как и электроны в атоме, заполняют соответствующие оболочки в ядре, которые характеризуются разными значениями энергий.

В противовес этой модели датские ученые О. Бор (сын Н. Бора) и Б. Моттельсон выдвинули обобщенную модель ядра, которая состоит из устойчивой внутренней части, вокруг которой движутся внешние нуклоны. Под воздействием этих нуклонов внутренняя часть ядра может изменять свою структуру, принимая форму вытянутого эллипсоида, напоминающую своего рода каплю. Поскольку указанная модель в определенной мере объединяет представления капельной и оболочечной моделей, ее и назвали обобщенной.

Рассмотрим одну из наиболее распространенных моделей ядра.

Итак, ядро состоит из нейтронов и протонов.

Из опыта известно, что многие свойства ядер изменяются периодически подобно свойствам атомов, составляющих периодическую таблицу элементов Менделеева. Например, для самых стабильных ядер число протонов ( $Z$ ) или число нейтронов ( $N = A - Z$ ) равно одному из следующих чисел:

$$2, 8, 20, 28, 50, 82 \text{ и } 126,$$

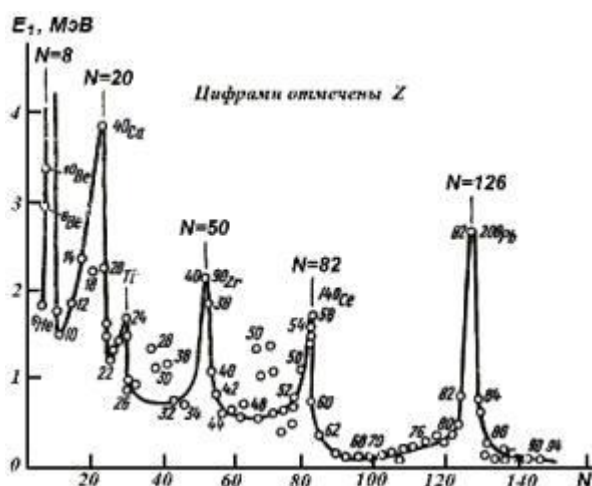
которые называются *магическими числами*.

Ядро, у которого  $N$  или  $Z$  равно магическому числу, называется *магическим*. Если оба числа  $N$  и  $Z$  магические, то ядро называется *дважды магическим* (их всего пять  ${}^4_2\text{He}$ ,  ${}^{16}_8\text{O}$ ,  ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ ,  ${}^{48}_{20}\text{Ca}$ ,  ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ ).

Значения этих чисел успешно объяснила *модель ядерных оболочек*, в которой считается, что протоны и нейтроны в ядре образуют заполненные оболочки, подобные заполненным оболочкам в атоме.

О проявлении магических чисел свидетельствуют множество фактов. В природе наиболее распространены ядра  ${}^4_2\text{He}$ ,  ${}^{16}_8\text{O}$ ,  ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ ,  ${}^{48}_{20}\text{Ca}$ ,  ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ ,  ${}^{60}_{28}\text{Ni}$ ,  ${}^{88}_{38}\text{Sr}$ ,  ${}^{120}_{50}\text{Sn}$ ,  ${}^{90}_{40}\text{Zr}$ . Для этих ядер числа  $n$  и  $p$  – магические.

Ярко выраженную периодическую зависимость от массового числа  $A$  имеет энергия первых возбужденных состояний  $E_1$  ядер (рис. 4.7). Максимумы наблюдаются у ядер с числом нуклонов, равным одному из магических чисел (4.21).



Энергия первых возбужденных состояний ядер

Магические числа проявляются также и при рассмотрении числа типов стабильных ядер, имеющих заданное число протонов и нейтронов. Оказывается, что число стабильных ядер имеет «пики» при числе протонов и нейтронов, равном 20, 50 или 82.

Периодичность химических свойств элементов в таблице Менделеева хорошо объясняется на основе предположения о группировке электронов в атомах в оболочках и подоболочках. Дж. Бартлет в 1932 г. предположил, что экспериментальные данные по стабильным ядрам тоже можно объяснить с помощью оболочечной структуры ядра. Только теперь надо говорить о *ядерных оболочках*.

Бартлет заметил, что нуклонный состав естественных изотопов резко меняется, начиная с ядра  $^{16}_8\text{O}$ , и еще раз, начиная с ядра  $^{18}_{36}\text{Ar}$ . Между ядрами  $^4_2\text{He}$  и  $^{16}_8\text{O}$  все стабильные изотопы строятся по схеме  $^4_2\text{He} + n + p + n + p + \dots$ . Между ядрами  $^{16}_8\text{O}$  и  $^{18}_{36}\text{Ar}$  нуклонный состав оказывается иным:  $^{16}_8\text{O} + n + n + p + p + n + n + \dots$ . Естественно было предположить, что нуклоны в ядре тоже подчиняются *принципу запрета Паули*. Так и оказалось.

Таким образом, на первую оболочку ядра (*s*-оболочку) с орбитальным моментом импульса нуклона, равным нулю ( $l_1 = 0$ ), можно поместить по два нейтрона и по два протона. Полностью протонная и нейтронная оболочка заполнена в дважды магическом ядре гелия  $^4_2\text{He}_2$ .

За *s*-оболочкой оболочка следует *p*-оболочка ядра с орбитальным моментом импульса нуклона, равным единице ( $l_2 = 1$ ). Она имеет места для размещения уже шести протонов и шести нейтронов. Когда *s*- и *p*-оболочки заполняются, получается дважды магическое ядро  $^{16}_8\text{O}_8$ .

Следующей идет  $d$ -оболочка с орбитальным моментом импульса нуклона  $l_3 = 2$ . На ней может уместиться десять протонов и десять нейтронов. Когда заполняются  $s$ -  $p$ - и  $d$ -оболочки, образуется дважды магическое ядро  ${}_{18}^{36}\text{Ar}_{18}$ .

Общее число протонов или нейтронов, заполняющих любую из оболочек, равно  $N = 2(2l + 1)$ , причем  $l = 0, 1, 2, 3, \dots$ .

Таблица

№ оболочки	Орбитальный момент	Число нейтронов	Число протонов	Атомное ядро
1. $s$ -оболочка	$l_1 = 0$	2	2	${}^4_2\text{He}_2$
2. $p$ -оболочка	$l_2 = 1$	6	6	${}^{16}_8\text{O}_8$
3. $d$ -оболочка	$l_3 = 2$	10	10	${}^{36}_{18}\text{Ar}_{18}$

Поскольку нуклоны обладают собственным механическим моментом, или спином, равным  $s = \hbar/2$ , то и ядра должны иметь механические моменты. Кроме того, нуклоны участвуют в ядре в орбитальном движении, которое также характеризуется определённым моментом количества движения  $l$  каждого нуклона. Причем орбитальные моменты принимают только целочисленные значения  $\hbar$  (1, 2, 3, ...)

Полный момент количества движения  $J$  в системе покоя ядра называется спином ядра. Спин ядра  $J$  складывается из спиновых  $s_1 - s_A$  и орбитальных  $l_1 - l_A$  моментов отдельных нуклонов:

$$\vec{J} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2 + \dots + \vec{s}_A + \vec{l}_1 + \vec{l}_2 + \dots + \vec{l}_A = \vec{J}_1 + \vec{J}_2 + \dots + \vec{J}_A$$

Несмотря на то, что число нуклонов в ядре может быть очень велико, спины ядер обычно невелики и составляют не более нескольких  $\hbar$ , что объясняется особенностью взаимодействия одноимённых нуклонов.

Напомним, что по принципу запрета никакие два нейтрона или два протона не могут иметь одинаковых наборов квантовых чисел. Протоны заполняют свои, предназначенные им, протонные уровни парами, на каждый уровень попадают два протона. Также заполняют свои уровни и нейтроны. Все парные протоны и нейтроны взаимодействуют только так, что их спины взаимно компенсируются, то есть пары всегда взаимодействуют.

Наконец, когда протоны и нейтроны достраивают свои замкнутые оболочки, тогда полный момент импульса, то есть полный спин ядра, равен нулю. В результате ядра, состоящие из чётного числа протонов и чётного числа нейтронов, не имеют механического момента. Например, ядро  ${}_{28}^{60}\text{Ni}_{32}$  имеет нулевой спин –  $Z$  чётно и  $N$  чётно.

Отличные от нуля спины существуют только у ядер, имеющих в своём составе непарные нуклоны.

В случаях ядер, для которых  $Z$  чётно,  $N$  нечётно или  $Z$  нечётно,  $N$  чётно, один протон или один нейтрон не объединен в пару ни с каким другим нуклоном. Спин такого нуклона  $\frac{1}{2}\hbar$  суммируется с его же орбитальным моментом импульса  $l$ . Поскольку  $l$  – целое, суммарный спин ядра может иметь какое-либо полуцелое значение:  $1/2, 3/2, 5/2$ . Два примера: ядра  ${}_{27}^{63}\text{Co}_{34}$  и  ${}_{30}^{67}\text{Zn}_{37}$  имеют спины  $(3/2)\hbar$  и  $(5/2)\hbar$ .

Нечётно-чётные ядра имеют по одному не спаренному протону и по одному не спаренному нейтрону, и их полный спин равен

$$\hbar, 2\hbar, 3\hbar, \dots$$

Так, ядро  ${}^2_1\text{H}_1$  имеет спин  $1\hbar$ , а ядро  ${}^{10}_5\text{B}_5$  – спин  $3\hbar$ .

Таким образом, с помощью модели оболочек можно объяснить значения спинов всех стабильных ядер, встречающихся в природе

Таблица

$Z$	$N$	$A$	Ядерный спин	Число нуклидов
Чётное	Чётное	Чётное	0	160
Чётное	Нечётное	Нечётное	$1/2, 3/2, 5/2, 7/2, \dots$	56
Нечётное	Чётное	Нечётное	$1/2, 3/2, 5/2, 7/2, \dots$	52
Нечётное	Нечётное	Чётное	$1, 2, 3, \dots$	4

В природе наблюдается 272 стабильных ядра, которые разбиваются на четыре группы в зависимости от того, четны или нечетны в них числа протонов и нейтронов.

Как видно из таблицы 4.2, природа предпочитает комбинации из четных чисел протонов и нейтронов. Сочетания нечетные чисел нейтронов и протонов мы находим только у ядер легких химических элементов. Число комбинаций с четно-нечетными нечетно-четными состояниями примерно одинаково.