

Глава 17

АТОМНО ЯДРО

§ 17.1. Въведение

Енергетични характеристики на атомите и на ядрата; Вайскопф; електромагнитни и ядрени сили; до тук за ядрата; единици в ядрената физика; главното в развитието ѝ. 416

§ 17.2. Основни свойства на ядрата

Състав – протон и неутрон; маса и магнитни моменти; нуклиди; размер; маса – изотопи и изобари; разпространеност; енергия на свързване – дефект на масата; специфична енергия на свързване – графика и изводи; спин и магнитен момент на ядрото и връзката им с тези на нуклоните. 420

§ 17.3. Ядрени сили

Фундаментални взаимодействия; гравитационни сили – гравитон; електромагнитни сили – фотон; ядрени сили; възникване на сили при обмяна; мезони, глюони и кварки; виртуални частици; слабо взаимодействие; промежуточные W^{\pm} и Z^0 бозони. 428

§ 17.4. Ядрени модели

Необходимост; капков модел; пълна енергия на свързване; графика; формула на Вайцекер; постижения; слоест модел; периодичен характер; магически числа; потенциална яма; нуклони и принцип на Паули; запълване и спин-орбитално взаимодействие; основни положения; достижения; колективен модел – сърцевина и периферия; вибрационни и ротационни спектри. 431

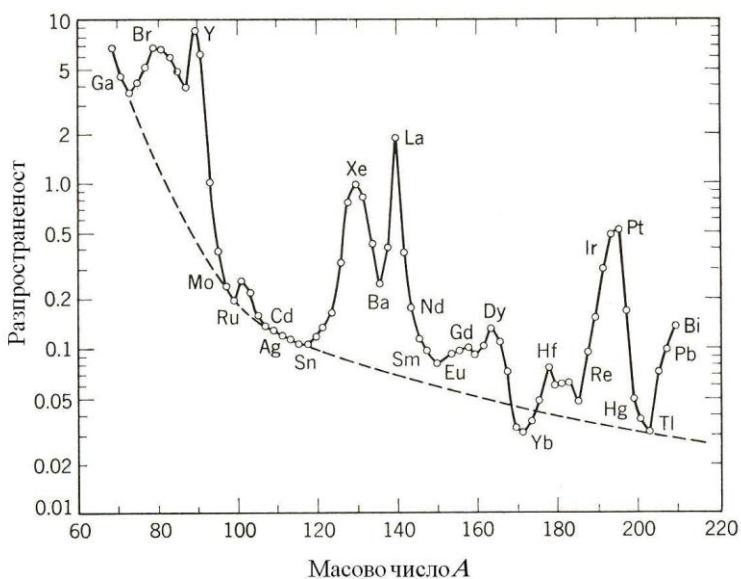
ДОПЪЛНИТЕЛНА ЛИТЕРАТУРА

1. Балабанов Н., Ядрена физика, Пловдиско УИ, 1998, Пловдив, гл. 1 ÷ 4.
2. Young H. D. and R. A. Freedman, University Physics, 12th edition, Pearson Education, Inc., 2008, San Francisco, ch. 42.

3. Матвеев, А. Н., Атомная физика, Высшая школа, 1989, Москва, § 65, 68.
4. Уилямс У. С. С., Физика на ядрото и елементарните частици, УИ „Св. Климент. Охридски”, 2000, София, § 2.2, гл. 3, 4, 8, 9.
5. Бейзер А., Основные представления современной физики, 1973, Москва, Атомиздат, гл. 21, 22.

§ 17.1. ВЪВЕДЕНИЕ

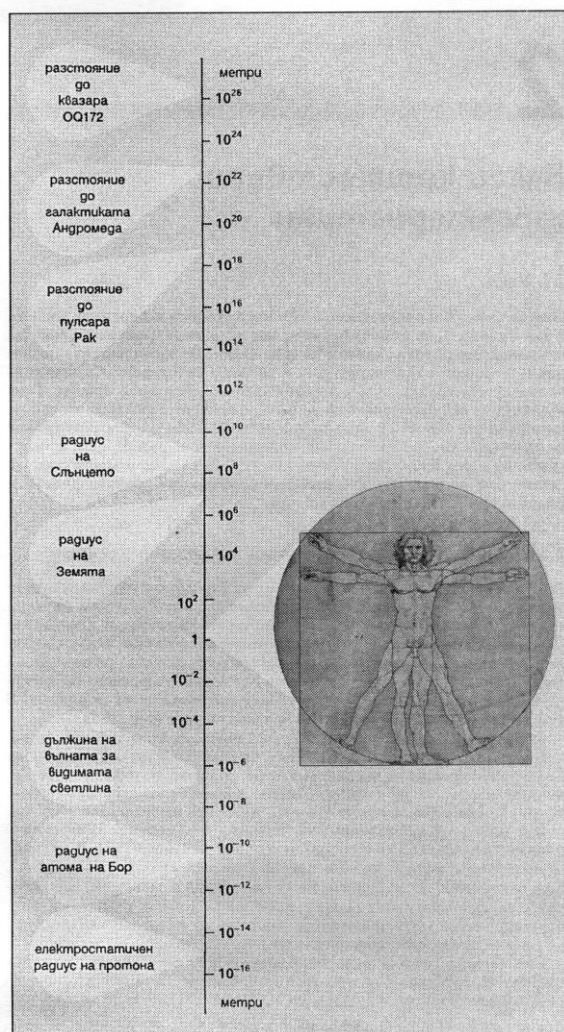
В квантовата механика считаме ядрото за материална точка с маса и положителен заряд. Основните свойства (без масата) на разгледаните атоми, молекули и твърди тела се определят от атомните електрони, а не от атомните ядра. Химичните елементи съществуват благодарение на това, че ядрата притежават различен електричен заряд, кратен на e . В непрекъснатата еволюция на Вселената източник на енергия са ядрените реакции. В останалите глави ще сменим направлението и ще се спрем на по-малки системи – на ядрата, от които се състоят атомите. Различните методи в експерименталното изучаване на атомите и на ядрата възникват от разликата между техните енергетични характеристики. Характерната енергия на ядрата е от порядъка на 1 MeV. Убедихме се (например за атома на Н), че разликата в енергиите е от порядъка на 1 eV. Поради тази ниска стойност (топлинната енергия при стайна температура е $kT^0 \approx 0,025$ eV) атомите лесно се възбуждат и без особени проблеми образуват молекули и твърди тела. Но поради високата характерна енергия за възбуждане на ядрата са необходими много специални условия. Във всекидневното ни обкръжение ядрата съществуват само в основното си състояние. Те въздействат на нашия свят само чрез масата и заряда си, но не и с интересните си свойства, не със своята сложна динамика. На Земята те проявяват нестандартните си свойства само в ускорителите. В центровете на звездите обаче протичат ядрени реакции и ядрената динамика играе определяща роля в Космоса. Ядрените реакции на Слънцето са основата на снабдяването на Земята с енергия. Ядрената физика е много важна в света, в който живеем, от гледна точка на историята на Вселената. Материята, която виждаме днес, е продукт на ядрените реакции, протичали в звездите преди много милиарди години. Един от големите ядрени физици Вайскопф (Weisskopf) пише (Weisskopf V., Problems of Nuclear Structure, Physics Today, 14:7. 1961): „Аз не мога по-добре да илюстрирам свързаността на всички факти от природата, тясно съединени със законите на физиката, освен посочвайки диаграмата на разпространение на елементите в нашата част на Вселената (вж. фиг. 17-1). Всеки максимум и минимум на кривата съответстват на особеност на динамиката на ядрото като запълнен слой, силно неутронно сечение или ниска енергия на връзката... Както и да анализираме природата – дали е с изучаването на структурата на ядрата, дали с изследването на макро-молекулите или на елементарните частици, или на структурата на твърдото тяло – ние винаги узнаваме нещо за тази величествена Вселена.” Има значителна разлика между теоретичното изучаване на атомите и на



Фиг.17-1. Относително разпространение на елементите. Силните флукуации се наслагват върху тенденцията на общо намаляване с увеличаване на масовото число A .

ядрата. Много преди да се обяснят свойствата на атомите, са били изследвани основните свойства на действащите на отделен електрон в атома електромагнитни сили. Но почти през целия период на изясняване на свойствата на ядрата се знаело много малко за ядрените сили, действащи между протоните и неутроните. Въпреки че напоследък експериментално се намериха много подробности за ядрените сили, те не са напълно разбрани и е трудно да се състави достъпно разбираема теория за ядрата. Затова има няколко модела и елементарни теории с ограничена точност. Ще опишем най-важните модели и ще ги използваме за обяснение на свойствата на ядрата. Ще се спрем (в следващата глава) на радиоактивността и ядрените реакции, а в последните три ще използваме познанията за ядрените сили, за да обясним взаимодействията между елементарните частици, от които се състои ядрото. Елементарните частици имат фундаментално значение, защото дават ключа за това, как е възникнала Вселената.

Макар и частично, дотук засегнахме атомните ядра. В гл. 4 от опитите на Ръдърфорд научихме, че радиусът на ядрата е много малък – около 10^{-14} m. Характерната дължина на ядрото е с 4÷5 порядъка по-малка от дължината $1 \text{ \AA} = 10^{-10}$ m. Това откритие позволи на човечеството да навлезе в микросвета с 4 порядъка по-малки размери от размерите на атома. Така за размерите на познатите ни обекти – от частиците, съставляващи ядрото, до радиуса на Вселената – получаваме интервал от 41 порядъка (!) (фиг.17-2). Научихме също, че зарядът на ядрото е точно равен на атомния номер Z на съответния атом. Зарядът на ядрото се определя от броя на протоните, всеки от които има заряд $+e$; следователно атомният номер на елемента е равен на броя на протоните в ядрото, а също и на броя на електроните, тъй като атомът е неутрален.



Фиг. 17-2. Размерите на познатите ни обекти във Вселената и мястото на човека в нея.

От α -разпадането в § 10.6 научихме, че съществуват ядрени сили на привличане между α -частицата и ядрото. Те са много по-големи от кулоновите сили на отблъскване между двата обекта и действат на малки разстояния – $10^{-15} \div 10^{-14}$ m. Разсейване на протони от протони показват, че ядрените сили действат на разстояние $2 \cdot 10^{-15}$ m.

Частиците в атома (с много малки изключения – напр. електронът в атома на H) и в ядрото се движат с релативистки скорости. Затова в ядрената физика се използва релативистката теория, изложена в гл. 1.

Мащабите в ядрото налагат използването на извън стандартни за SI единици. Единицата 1 F се използва в ядрената физика за дължина и се нарича *ферми*:

$$1 F = 1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m.} \quad (17.1)$$

Приети за употреба са и двете названия – *ферми* и *фемтометър*. Единицата е назована ферми в чест на големия италиански физик Енрико Ферми, който има съществен принос в ядрената физика.

Единицата за площ на сечение на реакциите е *барн*:

$$1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2 = 10^2 \text{ fm}^2. \quad (17.2)$$

Енергията се измерва в *електронволт* (eV) и нейните кратни килоелектронволт (keV), мегаелектронволт (MeV), гигаелектронволт (GeV) и тераелектронволт (TeV) както в квантовата физика:

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J},$$

$$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-16} \text{ J}, \quad 1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-13} \text{ J}, \quad (17.3)$$

$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-10} \text{ J}, \quad 1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-7} \text{ J}.$$

За масата вече използвахме *една атомна единица за маса* ($1 \text{ amu} = (1/12)m_{12\text{C}} = 1.676 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$). В ядрената физика въз основа на (1.65) за нея се използват енергетични единици. В (1.65) всеки член има размерност енергия на квадрат, така че за масата (и за импулса) е удобно да работим в eV, keV, MeV, GeV и TeV, делени на c^2 :

$$1 \text{ MeV}/c^2 = 1,783 \cdot 10^{-30} \text{ kg}, \quad (17.4)$$

$$1 \text{ amu} = 931,5 \text{ MeV}/c^2.$$

За частица с маса на покой, например за протон ($m_0 c^2 = 938 \text{ MeV}$), казваме, че има маса $938 \text{ MeV}/c^2$. Членът $1/c^2$ често се изпуска (нататък и ние ще ги изпускате) и казваме, че протонът има маса 938 MeV .

В заключение да проследим главното в развитието на ядрената физика:

1896 г. – Бекерел (Becquerel) – открива радиоактивността на урана;

1911 г. – Ръдърфорд – открива атомното ядро;

1925 г. – Блекет (Blackett) – наблюдава пряко протона;

1928 г. – Дирак (Dirac) – открива теоретично (въз основа на намереното от него уравнение на електрона) позитрона;

1931 г. – Андерсън (Anderson) – открива позитрона в космичните лъчи;

1931 г. – Паули (Pauli) – предсказва съществуването на неутрино;

1932 г. – Чадуик (Chadwick) – открива неутрона;

1932 г. – Кокрофт (Cockroft) и Уолтън (Walton) – осъществяват първо то ядрено разцепване с изкуствено ускорени частици;

1934 г. – И. и Ф. Жолио-Кюри (I. и F. Joliot-Curie) – откриват изкуствената радиоактивност и позитронното разпадане;

1935 г. – Юкава (Yukawa) – създава мезонната теория за произхода на ядрените сили и предсказва π -мезоните;

1937 г. – Андерсън и Нидермайер (Nedermayer) – откриват мюона;

1942 г. – Ферми – построява първия ядрен реактор (на 2.12.1942 г.);

1947 г. – Пауъл (Powell) – открива π -мезона;

1953 г. – Райнес (Reines) и Коуен (Cowan) – експериментално откриват неутрино.

§ 17.2. ОСНОВНИ СВОЙСТВА НА ЯДРАТА

17.2.1 Състав и размер

Частиците, които изграждат атомно ядро, са *протоните* (означение p) и *неутроните* (означение n), които се наричат с общото име *нуклони*.

Протонът е първата открита частица в ядрото (на гръцки *протос* – пръв). Електронът вече е бил намерен от Томсън (§ 4.5). След откриването на ядрото Ръдърфорд издига планетарния модел. По това време са намерени изотопите и се оказва, че техните атомни маси са кратни на атомната маса на водорода. През 1919 г. Ръдърфорд осъществява първата ядрена реакция – α -частици избиват водороден атом от ядрото на азотния атом. Изводът му е, че „образуващият се атом на Н е съставна част от ядрото на азота“. Малко по-късно той нарича ядрото на водородния атом протон. Тъй като атомът на Н съдържа само един електрон, неговото ядро има заряда на електрона. Протонът има заряд $+e$. Масата на протона m_p е много по-голяма от масата на електрона m_e и е почти 1 amu:

$$m_p = 1836,13 m_e = 1,007276 \text{ amu} = 1,67826 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 938,27 \text{ MeV}. \quad (17.5)$$

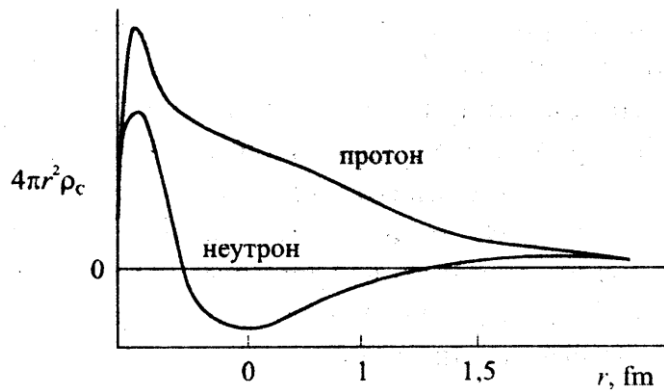
Откриването на другата частица на ядрото става по следния начин. През 1920 г. при облъчването на берилий с α -частици В. Боте и Х. Бекер наблюдавали силно проникващо лъчение. През 1932 г. ученикът на Ръдърфорд Чадуик пропуска тези „берилиеви лъчи“ през азотосъдържащи материали и определя експериментално скоростта на отскачащите при взаимодействието азотни ядра. Той предположил, че „берилиевите лъчи“ са поток от неутрални частици, и използвайки законите за запазване на енергията и на импулса, сметнал масата на частицата, която се оказала много близка до масата на протона. По-късно нарекли тази частица неутрон (от латинското *neuter* – нито такъв, нито онакъв). От резултатите на Чадуик нейната маса m_n е

$$m_n = 1836,6 m_e = 1,008665 \text{ amu} = 1,67470 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 939,57 \text{ MeV}. \quad (17.6)$$

Така била открита втората съставна частица на ядрото, която е с нулев електрически заряд, т.е. тя е неутрална.

Експериментално е установено, че нуклоните (протоните и неутроните) имат магнити свойства. Те се характеризират с ядрения магнетон. Магнитните свойства на електрона (гл. 14) се определят от магнетона на Бор $\mu_B = e\hbar / 2m_e$. Аналогично дефинираме ядрения магнетон μ_n – $\mu_n = e\hbar / 2m_p$. Масата на протона m_p е почти 2000 пъти по-голяма от електрона и толкова пъти по-малък е ядреният магнетон μ_n от μ_B . Магнитните моменти за нуклоните са съответно $-1,91\mu_n$ за неутрона и $+2,79\mu_n$ за протона. Магнитният момент на неутралната частица неутрон показва, че тя има вътрешна структура и се състои от

електрически заредени обекти. Експерименталното разпределение на заряда за нуклоните е показано на фиг. 17-3.



Фиг. 17-3. Зарядът на протона и неутрона в нуклона (ρ_c е плътността на заряда).

Съставът на ядрото се задава с две цели числа: броя на протоните със *зарядово число* Z и броя на нуклоните с *масовото число* A . Броят на неутроните N е $N = A - Z$. От квантовата механика знаем, че зарядовото число съвпада с номера на атома в периодичната система – то определя физико-химичните свойства на елемента, които зависят главно от заряда на ядрото и почти не зависят от неговата маса.

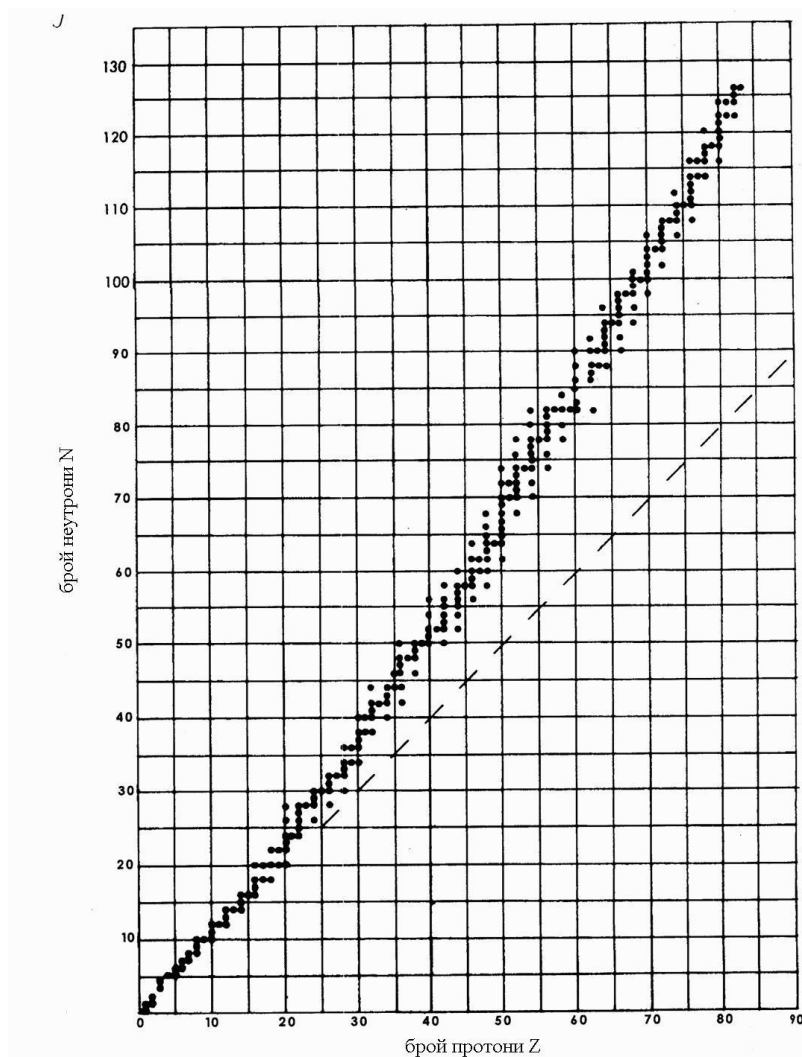
В ядрената физика наричат ядрата нуклиди. За означението им символите са същите, както за съответните елементи. На символа на елемента долу отляво се отбелязва броят на протоните, а горе отляво – броят на нуклоните. Например ${}^2_1\text{H}$, ${}^4_2\text{He}$, ${}^6_3\text{Li}$, ${}^{10}_5\text{B}$, ${}^{14}_7\text{N}$, ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{197}_{79}\text{Au}$, ${}^{238}_{92}\text{U}$.

Броят на нуклоните в един нуклид е различен, като броят на протоните и на неутроните може да бъде равен или различен. На фиг. 17-4 е показана зависимостта на броя на неутроните N от зарядовото число Z за стабилните нуклиди. От фигурата е ясно, че стабилен нуклид ${}^{46}_{20}\text{Ca}$ съществува, но стабилен нуклид ${}^{238}_{92}\text{U}$ не съществува. Вижда се, че в първите 15÷20 елемента броят на протоните е примерно равен на броя на неутроните. По-нататък е явна тенденцията на превишаване броя на неутроните спрямо броя над протоните, например за бисмута ${}^{209}_{83}\text{Bi}$ неутроните са 126, а протоните – 83 (по-долу ще видим защо).

В зависимост от характера на броя на нуклоните в ядрото е прието да се употребяват следните термини:

- четно-четни ядра – при Z четно и N четно;
- четно-нечетни ядра – при Z четно и N нечетно;
- нечетно-четни ядра – при Z нечетно и N четно;
- нечетно-нечетни ядра – при Z нечетно и N нечетно.

Ядрата са квантовомеханични системи и се описва с вълнови функции. Теоретично те се простират до безкрайност и не са твърди сфери.



Фиг. 17-4. Зависимост на N от Z за устойчиви нуклиди – диаграма на Сегре (Segré).

Но плътността на съставлящите ги нуклони спада много бързо и е затова се приемат за сфери. Основните експериментални данни са от разсейването на електрони. Накратко резултатите от тях са:

1. Радиусите на ядрата се описват добре с израза

$$R = r_0 A^{1/3} \cong 1,2 A^{1/3} \text{ fm.} \quad (17.7)$$

2. Почти цялата маса на атома е съсредоточена в ядрото, чийто обем е почти $\sim 10^{-15}$ от атомния обем. Това определя изключително високата плътност на ядрото – около $2 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$.

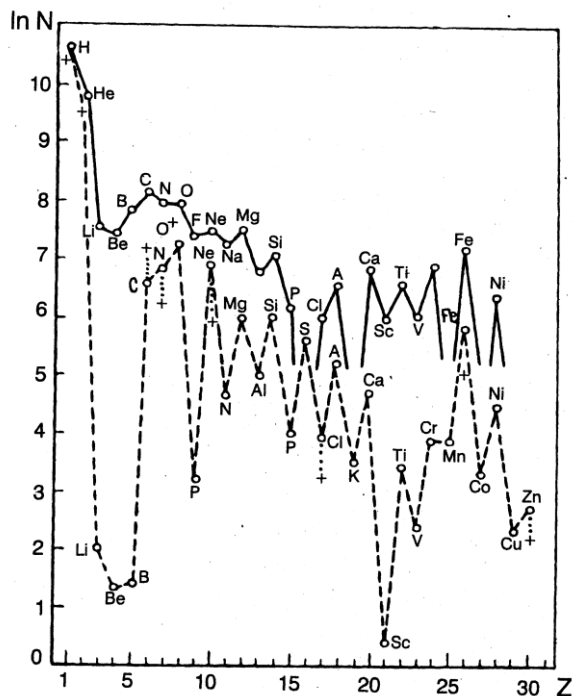
Многобройните експерименти доказват, че обемът на ядрото е пропорционален на броя на нуклоните A (17.7). С увеличаване на броя на нуклоните *плътността на ядрото остава постоянна*, а обемът

нараства. Това е следствие от насищането на силите, които действат между тях, или както често казват, от тяхното късо действие. Ще се спрем малко по-подробно на този въпрос в следващия параграф.

17.2.2. Маса и енергия на свързване

Масата на ядрото M_n се определя от масовото число A . Ядрата с еднакъв брой нуклони (еднакво A), се наричат *изобари* (от гръцки ισοζ – еднакъв, и βαροζ – маса, тегло); по принцип названието е неточно, тъй като при еднакъв брой нуклони, както ще видим по-надолу, благодарение на енергията на свързване ядрата имат различна маса. На приведената по-горе диаграма на Сегре изобарите се намират на линията $A = \text{const}$ под ъгъл 45° спрямо осите. Изобари са ${}^{40}_{19}\text{K}$ и ${}^{40}_{20}\text{Ca}$.

Ядрата с еднакъв брой протони (с еднакво Z) се наричат *изотопи* (от гръцки ισοζ – еднакъв и τοποζ – място). На диаграмата на Сегре изотопите се намират на вертикалната линия $Z = \text{const}$. Например изотопи са ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ и ${}^{48}_{20}\text{Ca}$, ${}^{40}_{19}\text{K}$ и ${}^{39}_{19}\text{K}$. Отношението на броя на нуклидите на изотопа към общия брой нуклиди на всички изотопи на елементите се нарича *относителна разпространеност на изотопите*. Разпространеността се определя предимно от вероятността за образуване на различни ядра по време на възникване на атомите. Това се вижда на двете криви на относителната разпространеност на изотопите с еднаква периодичност във Вселената и на Земята (фиг. 17-5).



Фиг. 17-5. Относителна разпространеност на изотопите на Земята – пунктирна линия, и във Вселената – пълтна линия (ординатната ос е логаритмична!).

Масата на ядрата се определя пряко (по метода на ядрените превръщания) или чрез маспекроскопия (вж. за подробности [2, § 9]).

Масата на ядрата е тяхна важна характеристика, понеже определя енергетичните им запаси (за еквивалентност между маса и енергия вж. § 1.9).

Свързването на частиците и възникването при това на енергията на свързване разгледахме в § 1.9. Какъв е физичният смисъл на *енергията на свързване на ядрата*? Ядрото е стабилна система – нуклоните в него са свързани със сили на привличане. За да разделим ядрото на съставлящите го нуклони, трябва да извършим известна работа. Тази работа е равна на енергията на свързване на нуклоните в ядрото. Съгласно (1.91) енергията на едно ядро $M_n c^2$ е равна на

$$M_n c^2 = Zm_p c^2 + (A - Z)m_n c^2 - B. \quad (17.8)$$

Тук енергията на свързване (E_b) в ядрата е с приетото в ядрената физика обозначение B . Енергията на свързване на ядрата е отрицателна величина, тъй като при свързване на нуклоните в ядро се отделя енергия. Колкото по-голяма е абсолютната стойност на тази енергия толкова връзката между нуклоните е по-здрава, а ядрото по-стабилно.

Величината

$$\Delta M = [Zm_p + (A - Z)m_n] - M_n \quad (17.9)$$

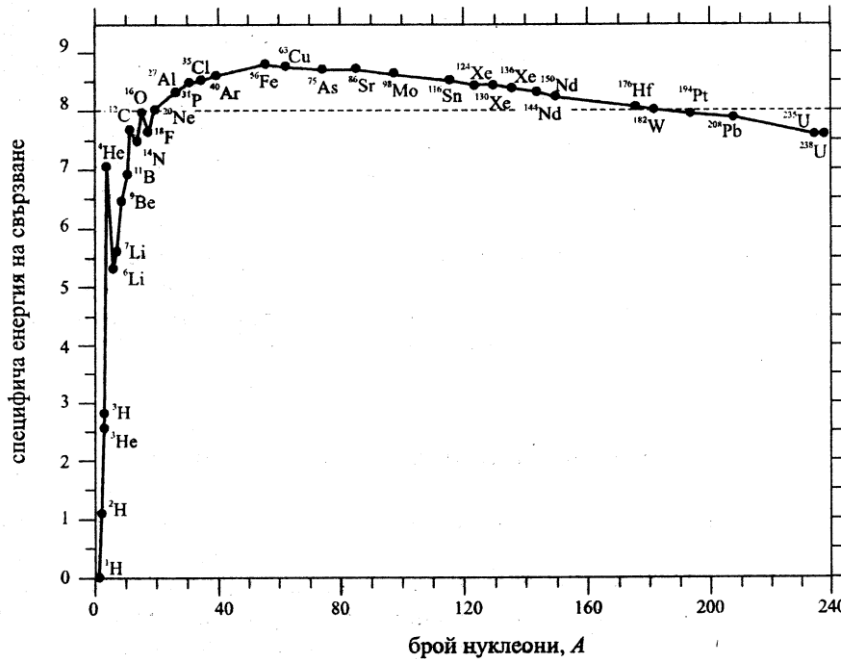
се нарича *дефект на масата* или *масов излишък*. Най-често за характеристика на ядрата се използва *специфичната енергия на свързване*

$$\varepsilon = B / A, \quad (17.10)$$

която физически изразява средната енергия за отделяне на нуклон от ядрото. Зависимостта на специфичната енергия на свързване от масовото число A е показана на фиг. 17-6. Вижда се, че за много леките елементи ($A < 20$) специфичната енергия на свързване бързо нараства до 8 MeV/нуклон, а за останалите ядра е почти постоянна

~8 MeV/нуклон. От тази фигура можем да направим следните изводи:

- Енергията на свързване на нуклоните е много голяма – от порядъка на MeV. Ядрените сили, удържащи нуклоните, са много по-големи от кулоновите, удържащи електрона в атома. Енергията на свързване на валентните електрони в атома е от порядъка на единици eV (в редки случаи десетки eV). Това може да се види от зависимостта на йонизационната енергия от Z (фиг. VIII-2).
- Енергията на свързване с нарастване на числото A отначало се увеличава, достигайки максимум при Fe, а след това бавно намалява. Поведението на функцията $\varepsilon(A)$ подсказва възможностите за отделяне на ядрена енергия. При синтез на тежки ядра от по-леки получените ядра са с по-големи стойности на енергията на свързване, т.е. при синтеза им се отделя енергия (да не забравяме, енергията на свързване е отрицателна!). Прието е тази енергия да се нарича термоядрена. При делене на тежките ядра се получават



Фиг. 17-6. Зависимост на специфичната енергия на свързване ε от масовото число A .

по-леки ядра също с по-големи стойности на енергията на свързване, т.е. при деленето им се отделя енергия. Прието е тази енергия да се нарича атомна (понякога ядрена).

- Четно-четните ядра (с четен брой протони и четен брой неутрони) имат по-голяма специфична енергия на свързване (ядрата на ${}^4_2\text{He}$, ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{16}_8\text{O}$). Нечетно-нечетните ядра пък имат по-малка специфична енергия на свързване (ядрата на ${}^2_1\text{H}$, ${}^6_3\text{Li}$, ${}^{10}_5\text{B}$, ${}^{14}_7\text{N}$).
- При внимателно разглеждане на фигурата се вижда, че ядрата, изградени от протони и неутрони, чийто брой се определя от едно от числата 2, 8, 20, 50, 82 и 126, притежават по-голяма енергия на свързване от съседните ядра, т.е. те са по-устойчиви. В началото на изследване на ядрото това се е приемало като много странна загадка и тези числа са били наречени „магически“, а съответните ядра – „магически“ ядра. Тази странност ще обясним при разглеждане на слоестия ядрен модел в § 17.4.
- Специфичната енергия на свързване с изключение на тази на най-леките ядра е приблизително еднаква:

$$\varepsilon = \frac{B}{A} \approx 8 \frac{\text{Mev}}{\text{нуклеон}}. \quad (17.11)$$

Да се опитаме да разберем какво означава това. Ясно е, че енергията на свързване на ядрото е пропорционална на A ($B \propto A$) – да не забравяме, че в ядрото има A нуклона и всеки прибавя в нея

$\sim 8 \text{ MeV/нуклон}$, т.е. една и съща енергия. Това е възможно, ако всеки нов нуклон взаимодейства с най-близките съседни нуклони, а не с всичките от ядрото. Ако всеки нуклон взаимодейства с всички останали, които са $A-1$ нуклона, енергията на свързване на ядрото щеше да е пропорционална на A^2 :

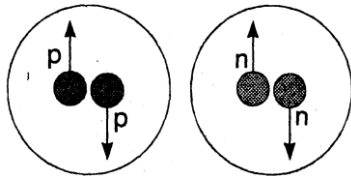
$$\varepsilon \propto A(A-1) \approx A^2. \quad (17.12)$$

- (Ще отбележим, че при кулоновите сили един електрон взаимодейства с всички останали електрони в атома, а един протон взаимодейства кулоново с всички останали протони в ядрото.) Ядрените сили притежават свойството *насищане*, т.е. *един нуклон взаимодейства със съседните си нуклони*, не с всичките.

17.2.3. Спин и магнитен момент

Разглеждайки състава на ядрото, споменахме, че ядрените частици имат магнитен момент. В § 14.1, където подробно анализирахме магнитните свойства на електрона, направихме важен извод, че всяка заредена частица, която има момент на импулса, притежава магнитен момент. Това означава, че протоните и неутроните имат момент на импулса. В ядрената физика е прието пълният момент на импулса на ядрото J , който включва както собствените S , така и орбиталните моменти L на нуклоните му, да се нарича *спин на ядрото* (терминът е останал от времето, когато вътрешната структура на ядрото не е била известна, но е било установено, че то има магнитен момент). Но щом нуклоните имат орбитален и вътрешен механичен момент, пълният момент на ядрото може да бъде в резултат на LS - или на JJ -връзка (вж. § 13.4). Експериментално е установено, че LS -връзката е характерна за най-леките ядра, а в повечето ядра се осъществява JJ -връзката. Накратко ще споменем основните свойства на спина на ядрото:

- В основното състояние четно-четните ядра имат нулев спин, защото е изгоднo енергетически нуклоните да се групират по двойки – 2 протона, 2 неутрона – и спиновете им са противоположни и се компенсират (фиг. 17-7). Това се нарича *ефект на сдвояване на нуклоните*.



Фиг. 17-7. Ефект на сдвояване – два протона и два неутрона с противоположни спинове.

В края на 20-те години, когато неутронът не е бил открит, за да се обясни неутралният характер на атома, се е предполагало, че в ядрото с атомно тегло A има A протона и $A-Z$ електрона. Например

${}^{10}_5\text{B}$ – 10 протона + 5 електрона, или общо 15 фермиона;

${}^{14}_7\text{N}$ – 14 протона + 7 електрона, или общо 21 фермиона.

И в двата случая фермионите са нечетен брой и се очаквало, че спиновете на ядрата са полуцели. Но експериментът убедително показал, че спинът на ядрото на N е $1\hbar$! Това опровержение на очакваното тогава се е приемало като „азотна катастрофа” (подобно на „ултравиолетовата катастрофа” при опита за обяснение на спектъра на АЧТ).

- Сумата от моментите на импулса на нуклоните в дадено ядро е $A\hbar/2$, а спиновете на всички ядра J са от няколко единици \hbar ;
- Максималният експериментално измерен спин за ядрата с нечетен брой нуклони е $9\hbar/2$; максималният експериментално измерен спин за ядрата с четен брой нуклони е $7\hbar$; вижда се, че $J \ll A\hbar/2$.
- Спиновете на възбудените състояния на ядрата не съвпадат със спиновете на основните състояния. В различните състояния на ядрата движението на нуклоните е различно.

Ядрото е електрически заредено и има момент на импулса, т.е. то притежава и магнитен момент. В § 14.2 въведохме понятието жиромагнитно отношение (че електронът се разглежда като точкова частица). В експеримента се измерва z -компонентата на магнитния момент и за μ_z^p на протона като точкова частица очакваме, че

$$\mu_z^p = g_s^p \frac{e\hbar}{2m_p} s = g_s^p \mu_n s, \quad g_s^p = 2. \quad (17.13)$$

Тук $\mu_n = e\hbar/2m_p$ е ядреният магнетон (по подобие на магнетона на Бор $\mu_B = e\hbar/2m_e$). Аналогично за неутрона, който няма заряд, би трябвало

$$\mu_z^n = g_s^n \mu_n s, \quad g_s^n = 0. \quad (17.14)$$

Експериментално измерените магнитни моменти за двата нуклона са съответно $\mu_z^p = +2,79\mu_n$ и $\mu_z^n = -1,91\mu_n$. След заместването на магнитните моменти получаваме:

$$\begin{aligned} g_s^p &= 5,58 && \text{за протон,} \\ g_s^n &= -3,82 && \text{за неутрон.} \end{aligned} \quad (17.15)$$

Експериментално получените стойности на жиромагнитните отношения на свободните нуклони се различават силно от очакваните стойности за точкови частици (още едно съмнение за вътрешния им строеж).

И накрая ще приведем някои емпирични закономерности за магнитните моменти на ядрата:

- Магнитният момент на ядрото не е сума от магнитните моменти на нуклоните. Ще дадем пример с магнитния момент μ_D на деутрона, съставен от един протон и един неутрон. Спиновото число на ядрото му е $j = 1$ (спиновете на двата нуклона са паралелни) и очакваме, че:

$$\mu_{Dz} = \mu_z^p + \mu_z^n = 2,79\mu_n - 1,91\mu_n = 0,88\mu_n. \quad (17.16)$$

- Експерименталната стойност се различава с 2% от очакваната:

$$\mu_D = 0,86\mu_n \neq \mu_z^p + \mu_z^n. \quad (17.17)$$

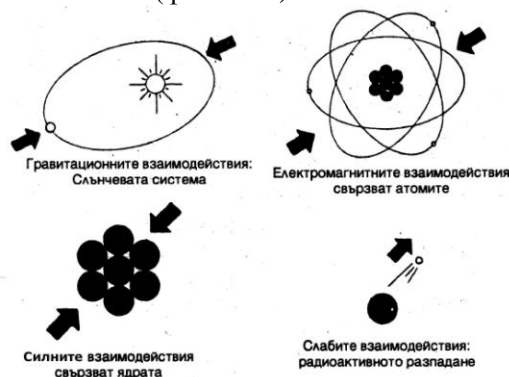
- Разликата е указание за нецентралния характер на ядрените сили.
- Четно-четните ядра имат нулев магнитен момент благодарение на ефекта на сдвояването. При групирането на нуклоните от всеки тип в дадено състояние по двойки се компенсират механичните им моменти, а следователно и магнитните им моменти.
- Магнитните моменти на другите ядра са от порядъка на ядрения магнетон $\mu_n \sim A\mu_n$, т.е. магнитните моменти на ядрата се обуславят не от всички нуклони, а от един или няколко нуклона.

§ 17.3. ЯДРЕНИ СИЛИ

Всички сили във физиката произтичат от четирите фундаментални форми на взаимодействие:

- гравитационно,
- електромагнитно,
- силно,
- слабо.

Нека накратко разгледаме тези взаимодействия и посочим тяхната роля в природните явления (фиг. 17-8).



Фиг. 17-8. Фундаментални взаимодействия в природата: гравитационно, електромагнитно, силно и слабо.

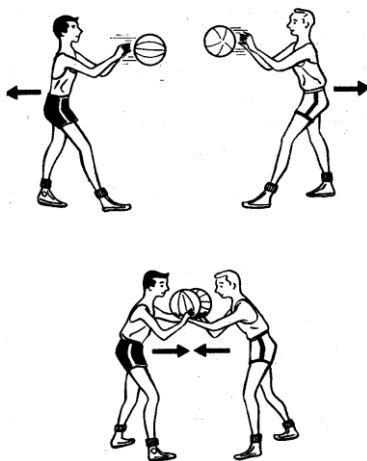
Резултатът от взаимодействията е появата на съответните сили. Силното взаимодействие поражда ядрените сили. Електромагнитните и гравитационните сили са далекодействащи (без ограничение на радиуса им) – и двете се характеризират със зависимост от разстоянието като $1/r^2$.

В природата рядко се наблюдават свободни електрически заряди и затова човек непрекъснато усеща действието само на *гравитационните сили*. Гравитационните сили действат на всички частици, но са много слаби в сравнение с другите типове сили и затова играят важна роля само в случаите, когато обектът се състои от огромен брой частици.

Тези сили са определящи в структурата на Вселената – планети, звезди, галактики и т.н. Преносител на гравитационното взаимодействие е *гравитонът*, който още не е наблюдаван експериментално.

Електромагнитните сили действат на всички заредени частици и на неутроните (видяхме, че те имат магнитен момент). Гравитационните сили могат да бъдат само сили на привличане, но електромагнитните се проявяват не само като сили на привличане и сили на отблъскване. Огромно разнообразие от процеси, наблюдавани в макроскопичните явления, се дължи на електромагнитното взаимодействие: триене, деформации, агрегатни състояния, химически реакции, всичко свързано с електромагнитните вълни (излъчване, поглъщане, разпространение) и мн. др. Електромагнитните сили удържат частиците в атомите и молекулите. По-нататък ще се убедим, че тези сили са отговорни за радиационните разпадания на елементарните частици (това са разпадания с излъчване на фотон) и на възбудените състояния на ядрата. Преносител на електромагнитното взаимодействие е *фотонът*. Всички сили, които наблюдаваме в макроскопическите явления, се свеждат до гравитационните и електромагнитните.

Преди да се спрем на *ядрените сили, породени от силното взаимодействие*, да разгледаме възникването на сили при обмяна на частици. Тъй като не е просто математически да се покаже, че при обмяната на частици възникват сили (на отблъскване и на привличане), ще се опитаме с грубичка аналогия да опишем процеса. Представяме си двама младежи, разменящи си топките. Ако хвърлят топките от единия към другия, то всеки се наклонява назад. Когато ловят топките, те още по-силно се наклоняват назад. Възникващият ефект е аналогичен на появата на отблъскващи сили (фиг. 17-9, горе). Ако младежите измъкват топките от ръцете си един от друг, се появяват сили на привличане (фиг. 17-9, долу).



Фиг. 17-9. При обмяната на частици (в случая топки) могат да възникват както сили на отблъскване (горе), така и сили на привличане (долу).

В § 17.2 видяхме, че ядрата имат почти еднаква плътност. Ако ядрените сили създаваха само привличане между нуклоните, то с уве-

личаване на атомния номер на ядрата привличането би се увеличавало и в края на краищата нуклоните биха се „слели“. Фактът, че това не е така, показва, че на малки разстояния действат сили на отблъскване. Значи на относително големи разстояния ядрените сили са сили на привличане, а на малки – сили на отблъскване. В това отношение те не приличат на гравитационните, нито на електромагнитните сили.

Електромагнитните сили се обясняват с обмен на фотони. Затова би било логично ядрените сили да се обяснят с обмен на частици. През 1932 г. Хайзенберг изказал предположението, че нуклоните си обменят електрони и позитрони. Изчисленията върху експериментални данни от β -разпадането обаче показват, че силите между нуклоните при обмяна на електрони и позитрони са много малки – поне 10^{14} пъти по-малки от необходимите за стабилна структура на ядрото. През 1935 г. японският физик Юкава разработва мезонната теория. Според нея взаимодействието между нуклоните се обуславя от частици с маса около 200 електронни маси, наречени от него мезони. Те създават мезонното поле, аналогично както фотоните създават електромагнитното. Юкава показал, че при взаимодействие между нуклоните с участие на мезони се получават резултати, които съвпадат с експеримента. Един вид мезони – π -мезони, експериментално са открити през 1947 от Пауъл и сътрудниците му. Днес е известно цяло семейство мезони. Пи-мезоните (π^0, π^+ и π^-), наречани още пиони, са преносители на ядрените сили при взаимодействието на нуклоните.

Силното взаимодействие обуславя не само появата на ядрените сили, но и пораждането на пиони и някои други частици (вж. гл. 20) при високоенергетичните удари. На най-високо фундаментално ниво силното взаимодействие се описва с преносителите-частици *глуони* (табл. 17-1). Силното взаимодействие между нуклоните се описва много по-лесно с преносители мезони. Но самите мезони не са истински

Таблица 17-1. Четирите типа фундаментални взаимодействия

Взаимо- действия	Интен- зитет	Радиус на действие	Преносители			
			Име	Маса	Заряд	Спин
Гравита- ционно	1	Голям $\sim 1/r^2$	Гравитон	0	0	2
Електро- магнитно	10^{37}	Голям $\sim 1/r^2$	Фотон	0	0	1
Силно	10^{39}	Малък $\sim 1\text{fm}$	Глуон	0	0	1
Слабо	10^{25}	Малък $\sim 0,001\text{fm}$	W^\pm, Z^0	80,4, 91,2 GeV/c ²	$\pm e, 0$	1

елементарни частици – те се състоят от кварк и антикварк (вж. гл.20). Затова взаимодействието между нуклоните е много по-сложен процес,

отколкото привличането и отблъскването. (Любознателният читател ще намери оригинални коментари по въпроса на високо педагогическо ниво в книгата на Садбери А., Квантовая механика и физика элементарных частиц, Мир, 1989, Москва, § 1.8.)

Частиците, които пренасят взаимодействие, се наричат *виртуални*. Понятието е много съдържателно и се обяснява по различни начини в източниците. Частиците преносители съществуват през изключително малък интервал от време Δt . От съотношението за неопределеност между времето и енергията (8.63) $\Delta t \Delta E \geq \hbar / 2$ следва, че енергията е неопределена. Виртуалните частици пренасят импулс, но не и енергия. За тях стандартните връзки между енергията, импулса и масата не са изпълнени. Много автори считат, че за краткия период от време законът за запазване на енергията не се изпълнява. Ние не споделяме това мнение. Подобно на Садбери смятаме, че виртуалните мезони притежават определена потенциална енергия, свързана (според класическите представи) със силите на взаимодействие между нуклоните. Затова тяхната енергия не е равна на свободно движещите се мезони. Тези мезони (виртуалните) не могат да съществуват самостоятелно, а се захващат от някой от нуклоните. Те са част от процеса на взаимодействие на нуклоните, т.е. те са част от системата нуклони плюс мезони. По аналогичен начин при взаимодействието на електрони и протони в атома чрез виртуални фотони тези фотони притежават потенциална енергия и са част от системата електрони и протони плюс виртуални фотони.

Силите на слабото взаимодействие действат на всички елементарни частици (вж. гл. 19). В макроскопически мащаб се проявяват в β -радиоактивността (вж. § 18.1). Те са най-късо действащите сили. Експерименталните резултати дават данни за много малък радиус на действие – $< 10^{-18}$ m. Макар че в названието на тези сили има думичката „слаби“, те, както се вижда от табл. 17-1, съвсем не са слаби. Причината за тяхната привидна слабост се крие в много малкия им радиус на действие, а не в действителната им слабост. Преносители на слабото взаимодействие са промеждутъчните W^{\pm} и Z^0 бозони (за тях вж. гл.12). Свойствата им са сумирани в табл. 17-1.

§ 17.4. ЯДРЕНИ МОДЕЛИ

Споменахме, че дълго време преди теорията, обясняваща свойствата на атомите, природата на електромагнитните сили, действащи на електрон в атома, е била известна; при изучаването на ядрото се знаело малко за силите между нуклоните. Получени са прекрасни и подробни експериментални резултати за ядрените сили, но те се оказват толкова сложни, че математически задачата се оказва по принцип трудна. Поради недостатъчното познаване на ядрените сили и принципната математическа сложност на задачата за взаимодействие на нуклоните не можем да обясним свойствата на ядрата и взаимодействащите си сили между нуклоните. Затова са необходими и съществуват редица модели с ограничена валидност. Всеки от тях може да обясни ограничен брой от свойствата на ядрото, като използва съображения и доводи, не

включващи всички характеристики на ядрените сили. При създаването на ядрените модели се включват отделни характеристики и никой модел не взима всички свойства и особености на ядрото. Ще разгледаме три от моделите – капковия, слоестия модел и колективния (наричан още обобщен) модел. (Разбираем преглед на моделите е даден в гл. 4 на [1].)

17.4.1. Капков модел

В капковия модел ядрото се представя като течна капка, която е електрически заредена несвиваема ядрена „течност“ от нуклони. Аналогията между течната капка и ядрото е позволила на Бор и Вайцекер да го предложат. Той е от най-ранните модели. Течната капка има сферична форма под действие на силите на повърхностното напрежение. В § 17.2 приехме, че под действие на ядрените сили ядрата имат сферична форма (17.7) (истината е, че повече ядра са деформирани. Плътноста на течността е постоянна, такава е и плътността на ядрото (коментара под (17.7)). Ядрената „материя“ е несвиваема, както и течната. Ядрените сили действат само между най-близките нуклони. В течността всяка молекула взаимодейства само с молекулите, които са в непосредствена близост с нея.

Енергията на свързване на ядрото е сумата от обемната енергия E_V на свързване, повърхностна енергия на свързване E_σ и кулонова енергия E_C :

$$B = E_V + E_\sigma + E_C. \quad (17.18)$$

(За подробности вж. § 22.5 на [5].) Всеки нуклон взаимодейства със съседните. Затова обемната енергия на свързване е пропорционална на броя на нуклоните A – $E_V \propto A$:

$$E_V = \alpha_1 A. \quad (17.19)$$

Ако приемем тази формула за всички нуклони, допускаме, че всеки нуклон по еднакъв начин взаимодейства с останалите. Нуклоните, на ядрената повърхност на капката имат по-малко съседни и взаимодействат с по-малко нуклони. Броят на тези нуклони зависи от повърхнината S : $S = 4\pi R^2 = 4\pi r_0^2 A^{2/3}$. За сметка на тези нуклони пълната енергия трябва да се намали с повърхностното напрежение σS (σ е коефициент на повърхностното напрежение) на ядрената капка. Или

$$E_\sigma = -\sigma S = -4\pi\sigma r_0^2 A^{2/3} \equiv -\alpha_2 A^{2/3}. \quad (17.20)$$

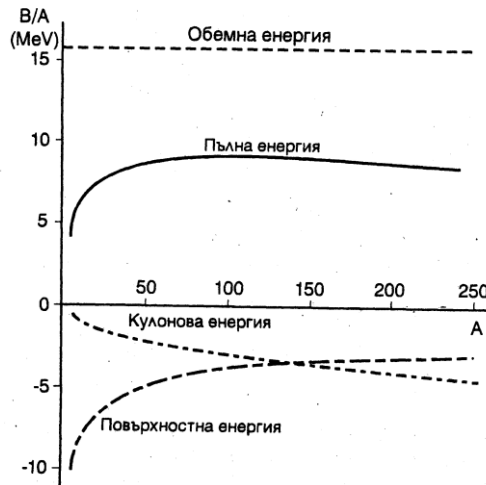
Кулоновата енергия E_C е енергията на отблъскване на протоните. В ядро със Z протона E_C е пропорционална на протонните двойки $Z(Z-1)/2$ и обратнопропорционална на радиуса на ядрото $R = r_0 A^{1/3}$:

$$E_C = -\alpha_3 Z(Z-1) / A^{1/3}. \quad (17.21)$$

Пишем знак минус, защото кулоновата енергия на отблъскване на протоните препятства устойчивостта на ядрото. Тогава специфичната енергия на свързване на един нуклон $\varepsilon = B/A$ е равна на

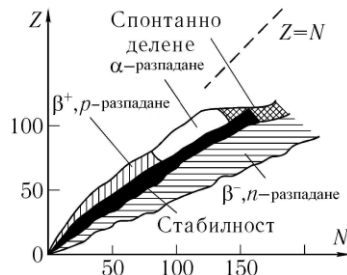
$$B/A = \alpha_1 - \alpha_2/A^{1/3} - \alpha_3 Z(Z-1)/A^{4/3}. \quad (17.22)$$

Кривата е показана на фиг.17-10.



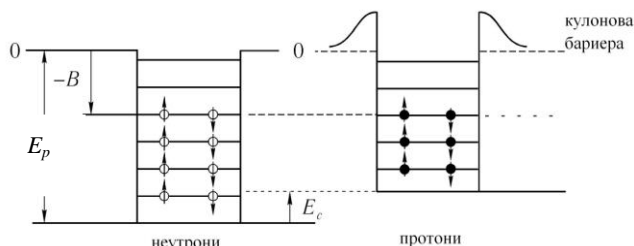
Фиг. 17-10. Специфичната енергия на свързване в капковия модел е равна на сумата от обемната, повърхностната и кулоновата енергия.

Ако в последната формула се ограничим само със споменатите събираеми, логически следва, че колкото повече са неутроните в ядрото, т.е. колкото повече е атомното число A при постоянно Z , толкова по-голяма трябва да бъде ε (респективно енергията на свързване B). В действителност не всички възможни комбинации от протони и неутрони са стабилни (устойчиви). На фиг. 17-11 е показано, че на координатната равнина ZN на стабилните ядра съответства само много тясна ивица с напълно определени Z и N . Проблемът е разрешен от Вайцзекер, който е отчел ефекта на четни и нечетни протони и неутрони (енергията E_{sm} , която е добавил, се нарича симет-



Фиг. 17-11. Стабилни и нестабилни ядра на координатната равнина ZN .

рична енергия). Протоните и неутроните са фермиони и за тях е в сила принципът на Паули. Следователно нуклоните запълват енергетичните нива на потенциалната яма на ядрото аналогично на това, както електроните запълват нивата в атома. Тъй като протоните и неутроните имат различен електрически заряд, те запълват енергетичните нива поотделно. Освен това поради кулоновото отблъскване потенциалната яма за протоните е по-плитка. Това е показано на фиг. 17-12.



Фиг. 17-12. Запълване на енергетичните нива на потенциалната яма на ядрото от неутрони и протони (разликата в дълбочината на потенциалните ями за различните нуклони е означена с E_c).

Всяка система се стреми към минимална енергия. Енергията на ядрото е минимална, когато най-горните нива на неутроните и протоните се намират на еднаква височина (примерно на височината на специфичната енергия на свързване $\varepsilon = 8 \text{ MeV}$). Когато примерно неутроните са повече и тяхното най-горно енергетично ниво е по-високо от протонното ниво, чрез β -разпадане се преминава в състояние с по-малка енергия. Аналогично се получава, ако в ядрото има повече протони от неутроните. От тези разсъждения е ясно, че ако големината на неутронния и на протонния потенциал е еднаква (така е в леките ядра), броят на протоните и неутроните е еднакъв. Този факт многократно е потвърден експериментално. С увеличаване на Z расте кулоновото отблъскване между протоните и дълбочината на тяхната потенциална яма намалява – в резултат в ядрото има повече неутрони.

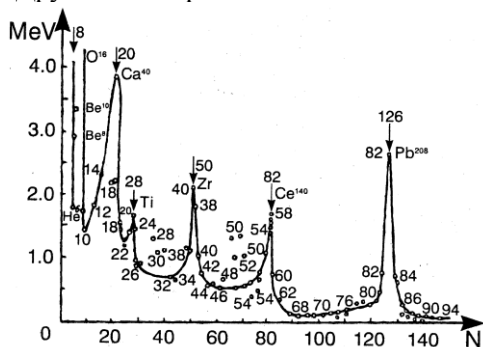
Освен E_{sm} Вайцекер отчита и енергията E_{couple} на ефекта на сдвояване. Експериментът показва допълнително взаимодействие на привличане, водещо до сдвояване на два еднакви нуклона и те образуват състояние с нулев спин. Явлението е напълно аналогично на познатото ни състояние на два електрона с различно ориентиран спин (§ 40). Обстоятелството е причината четно-четните ядра да са по-устойчиви. При добавяне на E_{sm} и E_{couple} в (17.22) се получава *формулата на Вайцекер*.

Капковият модел има важна роля в изследванията на ядрената физика. Той позволява с висока точност да се определят масите на ядрата. Моделът обяснява специфичната енергия на свързване, деленето на тежките ядра, доста закономерности при α -разпадането и др. Но той не може да обясни ядрения спин, ядрения магнитен момент, електромагнитните моменти (в частност квадруполния момент) и т.н. Освен това не е в състояние да обясни магическите числа (вж. за тях в слоестия модел) и голямата разпространеност на ядра с такива числа в

природата. Въпреки ограничения си характер с успех се използва за описване на някои важни характеристики на ядрата.

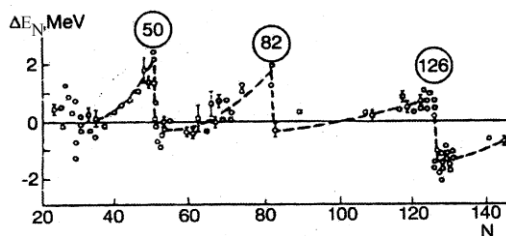
17.4.2. Слоест модел

Основното допускане на капковия модел е, че нуклоните взаимодействат с най-близките си съседи, така както молекулите в течността. Редица опити потвърждават това. Но много експериментални данни могат да бъдат обяснени само ако се допусне, че нуклоните взаимодействат главно с обобщено силово поле в ядрото. Това допускане води до извода, че нуклоните са разположени в енергетични слоеве. Аналогична ситуация имат електроните в атома – в определени квантови състояния съгласно принципа на Паули може да има само два електрона; в резултат на това електроните се групират в слоеве (гл. 15). Нека да покажем за илюстрация на сходството две експериментални криви. Първата е зависимостта на енергията на първото възбудено състояние на ядрата от броя на неутроните в тях (фиг. 17-13). Вижда се, че тази енергия има ясно изразен периодичен характер. Максимумите ѝ се достигат при брой на неутроните 2, 8, 20, 50, 82 и 126. Тези числа се наричат *магически*, а ядрата с този брой – *магически ядра*. Другата експериментална зависимост е енергията, не-



Фиг. 17-13. Зависимост на енергията на първото възбудено състояние на ядрата от броя на неутроните в тях.

обходима за отделяне на един неутрон от ядрото като функция на броя на неутроните (фиг. 17-14). От фигурата се вижда, че при брой на неутроните $N = 50, 82, 126$ (отново при магическите числа) се наблюдават



Фиг. 17-14. Зависимост на енергията ΔE_N , необходима за отделяне на неутрона от ядрото.

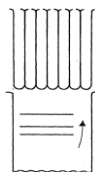
резки изменения на ΔE_N . Максимуми в горните две криви напомнят за кривата на йонизация на елементите на фиг. VIII-2. Там тези максимуми

се наблюдават при атомите на инертните газове и те се обясняват чрез електронните слоеве. Тъй като магическите ядра играят важна роля в слоестия модел, да сумираме накратко най-главното за тях:

- Експериментът показва, че магическите ядра имат сферична форма (техният квадруполен момент е равен на нула).
- Магическите ядра имат по-голяма разпространеност във Вселената. Експерименталните данни сочат, че в Слънчевата система най-разпространени са магическите ядра на ${}^4_2\text{He}$, ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{40}_{20}\text{Ca}$, ${}^{88}_{38}\text{Sr}$ и ${}^{120}_{50}\text{Sn}$ (първите три са двойно магически).
- Магическите ядра (особено двойно магическите) са по-устойчиви – енергията им на свързване е с 0,5 MeV по-голяма от тази на съседните: ${}^4_2\text{He}$ (2p, 2n), ${}^{16}_8\text{O}$ (8p, 8n), ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ (20p, 20n) и ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ (82p, 126 n).

Периодичността на магическите ядра напомня периодичното изменение на свойствата на атома, което води до слоестия характер на електронната му обвивка. Магическите ядра предполагат наличието на запълнени слоеве. В атома има силов център (там действа кулоново поле, което има сферична форма и всеки електрон се движи в самосъгласувано поле, създадено от ядрото и другите електрони), електроните си взаимодействат слабо и се подчиняват на принципа на Паули. Но в ядрото не съществуват тези условия. Нуклоните са фермиони, но ядрото не притежава силов център и за разлика от електроните нуклоните силно си взаимодействат. Затова догадката от редицата експериментални данни за слоестата структура на ядрото дълго време изглеждала несъстоятелна. И все пак моделът се наложил. Ще приведем качествено разсъжденията за това.

Експериментите с деутрона показват, че взаимодействието между два нуклона се описва с тясна (1 fm) и дълбока (30 MeV) яма (приблизително правоъгълна). Понеже плътността на нуклоните е висока, потенциалните ями на нуклоните се наслагат и образуват сумарна яма, независеща от времето. Потенциалното поле на ямата почти не се изменя, поради тясното съседство на нуклоните и то може да се смята за еднородно вътре в ямата и рязко спадащо до нула на границите (фиг. 17-15). Потенциалната яма има сферична форма, тъй като в първо приближение ядрото е сферично.

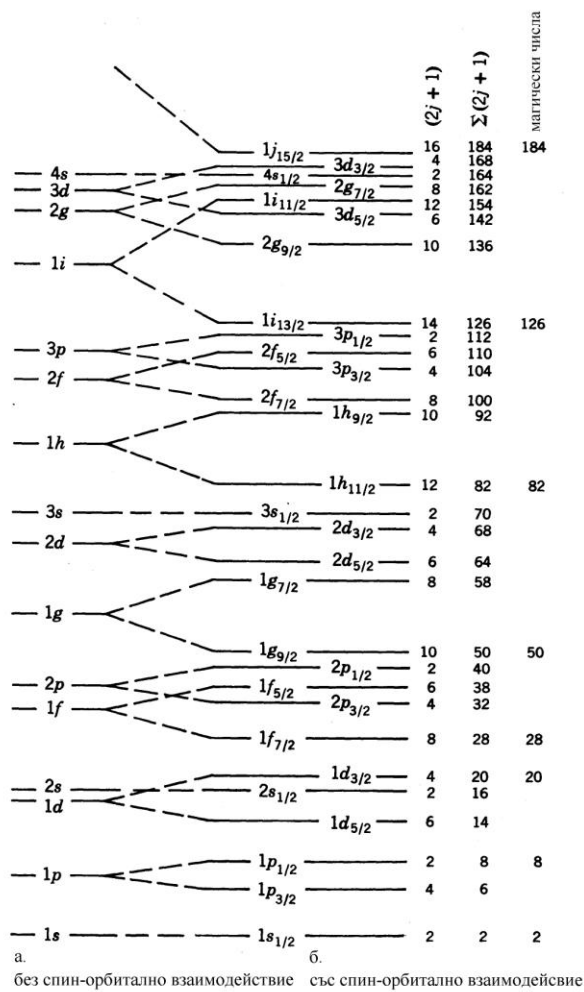


Фиг. 17-15. Потенциалните ями (горе) на отделните нуклони се наслагат една върху друга и образуват потенциалната яма на ядрото (долу).

Нуклоните са квантови обекти и заемат определени енергетични нива в ямата. В основното състояние са заети всички най-ниски нива. При удар на два нуклона извън ямата става преразпределение на енергията им – единият отдава част от енергията си и преминава в състояние с по-малка. Но вътре принципът на Паули не позволява на дадено ниво

да се намира повече от един нуклон. Тъй като всички по-ниски нива са заети, принципът на Паули „забранява“ ударите (!). Следователно средната дължина на свободния пробег става по-голяма и приблизително нуклоните могат да се разглеждат като невзаимодействащи частици. Разсъжденията са за основното състояние на ядрото (за невъзбуденото) и те не се отнасят за възбуденото. Условието за слоестия модел на електроните могат да се приложат и за нуклоните на ядрото.

При неотчитане на спин-орбиталното взаимодействие (в повечето ядра съществува *JJ*-връзка между орбиталния момент и спина на нуклоните), поради изотропността на полето на всичките $2l + 1$ ориентации на *L* и на двете ориентации на *S* съответства една и съща енергия. Тези нуклони образуват един слой. Запълването е показано на фиг. 17-16а. Показано е за пълването с един вид нуклони – протони или неутрони. В действителност присъстват и двата вида и броят им се умножава по две – $2(2l+1)$.



Фиг. 17-16. Запълване на енергетичните нива на ямата: а) без спин-орбитално взаимодействие, б) със спин-орбитално. Стълбът с $(2j + 1)$ е броят на частиците, запълващи нивото. Стълбът със $\sum(2j + 1)$ е броят на дадено ниво и всички нива под него.

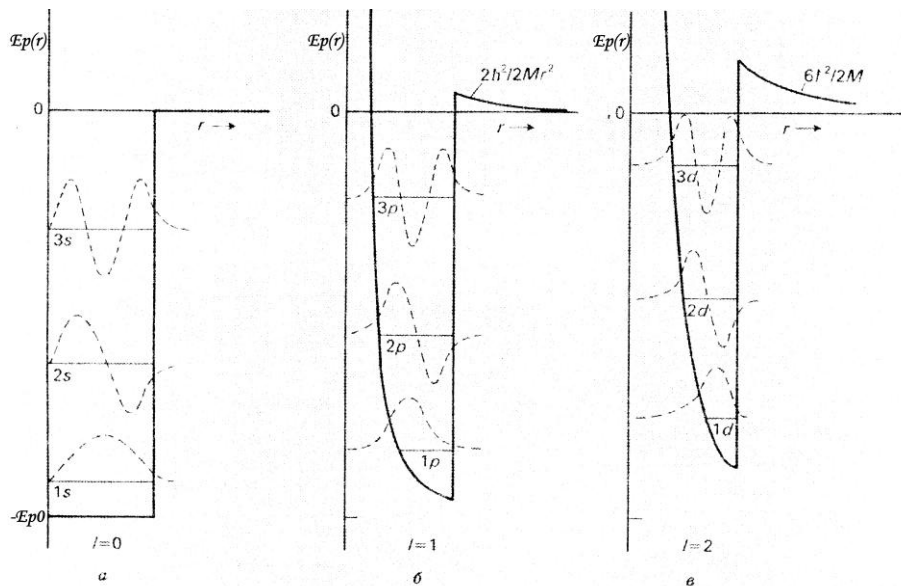
Неутронните и протонните слоеве се запълват независимо.

В ядрата обаче съществува силно спин-орбитално взаимодействие на нуклоните, вследствие на което ядрените нива се разцепват на две (ядрена фина структура) с пълнен момент на импулса с $j=l+1/2$ и $j=l-1/2$.

(Спин-орбиталното взаимодействие на нуклоните (20 пъти по-силно от това на електроните) и ядрената фина структура са аналогични на спин-орбиталното взаимодействие на електроните и атомната фина структура; нуклонът има орбитално движение и в отправната система, свързана с него, неговият спинов магнитен момент взаимодейства с орбиталния магнитен момент на останалите нуклони. В много книги спин-орбиталното е обяснено като взаимодействие на спиновия момент на импулса с орбиталния момент – механичните моменти се събират, но не си взаимодействат (!).)

Експериментално е установено, че състоянието с паралелни механични моменти (орбитален и спинов), когато $j=l+1/2$, е енергетически по-изгодно от състоянието с антипаралелни моменти, когато $j=l-1/2$. Това добре се вижда от енергетичните нива на фиг. 17-16. На фигурата също се вижда, че поради силното спин-орбитално взаимодействие за $l \geq 4$ нуклоните в състояния с $j=l-1/2$ преминават в по-горния слой – сравни на фиг. 17-16 слоевете на състоянията: $1g_{7/2}$ и $1g_{9/2}$, $1h_{9/2}$ и $1h_{11/2}$, $1i_{11/2}$ и $1i_{13/2}$.

С отчитането на орбиталния момент се изменя и приведената потенциална енергия, т.е. ямата и дълбочината ѝ се променят (фиг. 17-17).



Фиг. 17-17. Потенциална енергия на сферична яма от r – няма орбитално движение (а). При наличие на орбитален момент на импулса ефективната потенциална енергия се променя от добавянето на центробежната енергия (стойността ѝ е горе вдясно на (б) и (в), за $l=1$ и $l=2$; M е масата на частицата). Енергетичните състояния са показани с хоризонтална линия за $n=1, 2, 3$, с пунктирна линия са радиалните вълнови функции.

Няма да решаваме задачата за потенциалната яма в слоестия модел. Ще приведем накратко сумираните основни положения на самия модел:

1. Нуклоните се движат независимо в самосъгласувано поле, което се създава от всички нуклони и не зависи от времето. Принципът на Паули забранява ударите между нуклоните – те се движат на разстояния, сравними с ширината на ямата. Отчитайки принципа на Паули и това, че в ядрото има два вида нуклони, можем да кажем, че в едно енергетично ниво има $2(2l+1)$ броя нуклони. Напълно заселените слоеве имат повишена устойчивост. Това са слоевете, за които N или Z е равен на 2, 8, 20, 50, 82, 126. Това е физичният смисъл на тези числа, които се наричат магически. (В атома запълнените слоеве отговарят на числата 2, 10, 18, 36, 54, 86; да не забравяме, че в атома имаме кулоново поле, а в ядрото – потенциална яма и естествено запълването е различно.)
3. В ядрата съществува силно спин-орбитално взаимодействие, което води до разцепване на енергетичните нива на две, със сумарен пълен момент съответното $j=l+1/2$ и $j=l-1/2$.
4. Нуклоните от даден тип се обединяват в двойки с нулев сумарен момент на импулса. Следователно четно-четните ядра имат нулеви механични и магнитни моменти, а ядрата с нечетни нуклони имат спин, равен на спина на последния несдвоен нуклон.

Слоестият модел обяснява много повече характеристики и явления в ядрото от капковия модел. Да повторим, че поради основните допускания той е в сила за основните състояния и за най-нисковъзбудените състояния. Най-голямото му постижение е обяснението на експериментално доказаните енергетични нива. Макар че запълването на слоевете от нуклоните в много отношения е аналогично на запълването на електронните слоеве в атома, има съществена разлика в двата процеса. Спин-орбиталното взаимодействие между електроните е слабо и затова в повечето атоми се осъществява LS -връзка. В ядрото спин-орбиталното взаимодействие между нуклоните е много по-силно и в него съществува предимно JJ -връзка. В резултат нуклоните се обединяват в двойки – всички съвкупности от четен брой протони (и неутрони) имат сумарен спин нула. При електроните това не е така – вж. например в табл. VII-1 елементите ${}_6\text{C}$ и ${}_8\text{O}$, които имат съответно 6 и 8 електрона; техният спин не е нула, а е $S_a = 1\hbar$. Слоестият модел обяснява спина и магнитните моменти на ядрата, както и много свойства на ядрените реакции (в това число правилата на подбор при β -разпадането). Но в модела не могат да намерят обяснение несферичността на ядрата и съществените квадруполни моменти на ядрата във възбудено състояние (въобще слоестият модел не може да обясни поведението на неквантовите характеристики на ядрото).

17.4.3. Колективен модел

Главната идея на слоестия модел е в независимото движение на ядрените частици. Капковият модел предполага точно обратното, тъй като в капката на несвиваема течност движението на коя да е частица се съгласува с движението на съседните ѝ части. Всеки модел осигурява описанието само на ограничено множество явления, без да отчита противоположния модел, използван за описването на друго множество.

Ядрената физика се опитва да отстрани противоречията между различните модели, като ги обедини в по-разбираеми, и целта е да се описват много характеристики на ядрото, като желанието е те да са всичките. Пример за това е *колективният (обобщеният) модел на ядрото*, обединяващ много черти на капковия и слоестия модел. Колективният модел е синтез между капковия и слоестия модел. Той е създаден от А. Бор (A. Bohr), син на Н. Бор и Б. Мотелсън (B. Mottelson).

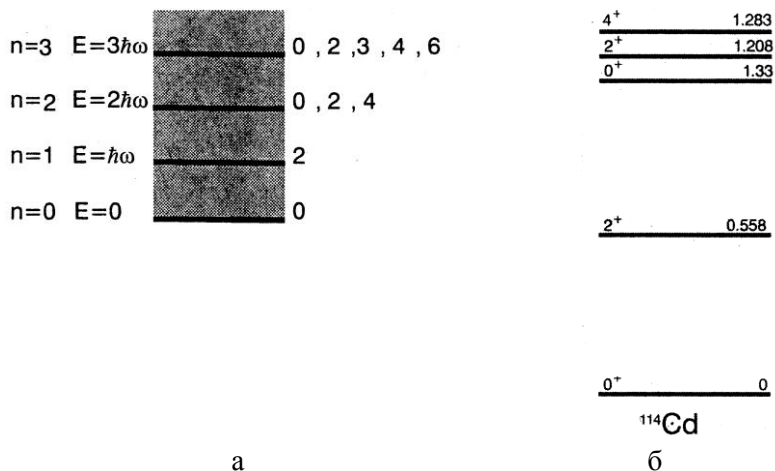
Колективният модел предполага, че ядрото се състои от периферия с незапълнени слоеве от нуклони (външни), движещи се независимо в потенциалното поле, породено от сърцевина от запълнени с нуклони (вътрешни) слоеве, както са описани в слоестия модел. Потенциалната енергия на това поле не е постоянна сферично симетрична енергия, както в слоестия модел. Тя се определя от деформацията на сърцевината, причинена от взаимодействието ѝ с периферията. По същество деформацията е колективна форма на движението на нуклоните – появяват се различни вибрации и ротации. Същественото е, че взаимодействието между нуклоните чрез деформираната ядрена повърхност е много по-силно от непосредственото между тях.

Особеност на колективния метод е, че в сърцевината се отчитат само колективните форми на движение – вибрационни и ротационни. Вибрационните включват: еластичните трептения при изменение на плътността; диполните трептения при поляризация на ядрото; квадруполните трептения при изменение на разпределението на електричните заряди, и трептения на ядрената повърхност по отношение на равновесната форма. На фиг. 17-18а са отчетени само квадруполните трептения на сферични четно-четни ядра, а на фиг. 17-18б са показани първите енергетични нива от прилагане на целия модел към възбуденото състояние на ^{114}Cd .

Тъй като ядрото се деформира, то има момент на импулса като на система от частици L^{cl} :

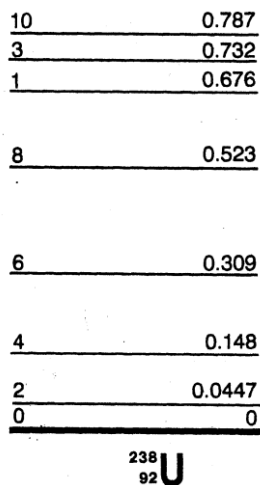
$$L^{\text{cl}} = Y\omega = \sum_i m_i r_i^2 \omega. \quad (17.23)$$

Тук m_i и r_i са масата на i -тия нуклон и разстоянието му от оста на въртене, Y е инерчният момент на ядрото, а ω е ъгловата честота на въртене. Пълният момент на ядрото е сума от вектора на спина на ядрото и L^{cl} . Затова моделът теоретически предсказва енергетичните нива и на възбуденото ядро. Колективният метод предсказва ротационни нива $E = (\hbar^2 / Y_{\text{ef}}) J(J + 1)$ за четно-четните ядра (Y_{ef} е ефективният инерчен момент на ядрото с движещи се частици). Първите пет нива на



Фиг. 17-18. а) Энергетични нива на квадруполните трептения на сферично четно-четни ядра – $E = n\hbar\omega$, $n=1, 2, 3, \dots$, ($n=0$ е основното състояние); при $n=2 - 3$ изродени състояния със спинови числа 0, 2, 4, при $n=3 - 5$ изродени състояния с числа 0, 2, 3, 4, 6 (спиновите числа са отдясно). б) Энергетичните нива на възбудено състояние на ^{114}Cd според колективния модел – второто възбудено ниво ($n=2$) е триплет, чиято наблюдавана енергия е близка до удвоената енергия на нивото $n=1$ с число 2 (отляво са спиновите числа, а отдясно – енергията в единици MeV).

ротационната ивица на ядрото на ^{238}U са показани на фиг. 17-19.



Фиг. 17-19. Ротационен спектър на ^{238}U според колективния метод; отляво са спиновите числа, а отдясно – енергията в единици MeV.

Във възбудено състояние ядрото се деформира и може да се върти около осите на симетрия. В резултат на това получаваме ротационните нива на енергията. В качествено отношение ротационната ивица на ядрото е аналогична на ротационната ивица на двуатомна молекула – сравни фиг. 17-19 с фиг. 5-26 в [Л1].

РЕЗЮМЕ

Отличителната разлика в експерименталното изучаване на атомите и експерименталното изучаване на ядрата възниква от разликата между техните енергетични характеристики. Характерната енергия на атомите е от порядъка на 1 eV, а на ядрата – от порядъка на 1 MeV.

В теоретичното изучаване на атомите и това на ядрата също има значителна разлика. Много преди да се обяснят свойствата на атомите (класически), основните свойства на действащите на отделен електрон в атома електромагнитни сили са били изследвани подробно. Но почти през целия период на изясняване на свойствата на ядрата много малко се е знаело за ядрените сили, действащи между протоните и неутроните в ядрото.

Мащабите в ядрото налагат използването на извънстандартни за SI единици. В ядрената физика за дължина се използва единицата ферми (или фемтометър):

$$1 \text{ F} = 1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m.}$$

За площ и сечение на реакциите се използва барн:

$$1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2 = 10^2 \text{ fm}^2.$$

Както в квантовата физика, за енергия се използва единицата електронволт:

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J.}$$

За масата въз основа на формулата ($E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$) се използват енергетични единици. Най-често за масата се използва $1 \text{ MeV}/c^2$:

$$1 \text{ MeV}/c^2 = 1,783 \cdot 10^{-30} \text{ kg.}$$

Частичите, които изграждат атомното ядро, са протоните и неутроните и се наричат с общото име нуклони. Нуклоните имат магнитни свойства, които се характеризират с ядрения магнетон $\mu_n = e\hbar / 2m_p$. Магнитните моменти са $-1,91\mu_n$ за неутрона и $+2,79\mu_n$ за протона.

Съставът на ядрото се задава с две цели числа: зарядовото число Z , равно на броя на протоните, и масовото число A , равно на броя на нуклоните в ядрото. Зарядовото число съвпада с номера на атома в периодичната система. Броят на неутроните N е разликата от двете: $N = A - Z$.

Радиусите на ядрата се описват добре с израза

$$R = r_0 A^{1/3} \cong 1,2 A^{1/3} \text{ fm.}$$

Ядрата с еднакъв брой нуклони, т.е. с еднакво число A , се наричат изобари. Ядрата с еднакъв брой протони, т.е. с еднакво число Z , се наричат изотопи.

Енергията на ядрото е по-малка от енергията на свободните съставлящи го нуклони. Разликата от двете се нарича енергия на свързването:

$$B = Zm_p c^2 + (A - Z)m_n c^2 - M_n c^2.$$

Физическият смисъл на енергията на свързване на нуклоните в ядрото е работата, която трябва да се извърши за разделяне ядрото на съставлящите го нуклони.

Най-често за характеристика на ядрата се използва специфичната енергия на свързване $\varepsilon = B/A$, която физически изразява средната енергия за отделяне на един нуклон от ядрото. За много леките елементи ($A < 20$) тази енергия бързо нараства до 8 MeV/нуклон, а за останалите ядра е почти постоянна ~ 8 MeV/нуклон. Такова положение е възможно, ако всеки нов нуклон взаимодейства с най-близките съседни нуклони, а не с всичките от ядрото.

Величината

$$\Delta M = [Zm_p + (A - Z)m_n] - M_n$$

се нарича дефект на масата или масов излишък.

В ядрената физика е прието пълният момент на импулса на ядрото J , който включва както собствените S , така и орбиталните моменти L на съставлящите го нуклони, да се нарича спин на ядрото. Ядрата с четен брой нуклони (четно A) имат цял спин. Ядрата с нечетен брой нуклони (нечетно A) имат полуцял спин. Пълният момент на импулса на отделен нуклон е полуцял. В основното си състояние четно-четните ядра имат нулев спин – следователно нуклоните са сдвоени.

Всички сили във физиката произтичат от четирите фундаментални форми на взаимодействие:

- гравитационно,
- електромагнитно,
- силно,
- слабо.

Най-интензивно е силното взаимодействие. То обуславя ядрените сили, които действат между нуклоните в ядрото и осигуряват неговата стабилност.

Преносители на фундаменталните взаимодействия са съответно следните частици:

- гравитон,
- фотон,
- глюон (за ядрото математически по-лесен е моделът с мезон),
- W^\pm и Z^0 бозони.

Интензитетът, радиусът на действие и характеристиките на частиците преносители на четирите взаимодействия са дадени в табл. 17-1.

Поради недостатъчното познаване на ядрените сили и принципната математическа сложност на задачата за взаимодействие на нуклоните, свойствата на ядрата и взаимодействащите сили между протоните и неутроните не могат да бъдат обяснени. Затова са необходими и съществуват редица модели с ограничена валидност.

В капковия модел ядрото се представя като течна капка, която е електрически заредена несвиваема ядрена „течност“, състояща се от протони и неутрони. Пълната енергия на свързване на ядрото B е равна на сумата от обемната енергия E_V на свързване, повърхностната енергия на свързване E_σ и кулоновата енергия E_C :

$$B = E_V + E_\sigma + E_C.$$

Към тези енергии Вайцекер отчита ефекта на четни и нечетни протони и неутрони, който поражда симетричната енергия E_{sm} и ефекта на вдвояване, от който произтича E_{couple} .

Капковият модел позволява с висока точност определянето на масите на ядрата. Той обяснява специфичната енергия на свързване, деленето на тежките ядра, множество закономерности при α -разпадането и др. Но не може да обясни ядрения спин, ядрения магнитен момент, електромагнитните моменти (в частност квадруполния момент) и т.н. Той не е в състояние да обясни магическите числа и голямата разпространеност в природата на ядра с такива числа.

Слоестият модел успешно обяснява много характеристики и явления на ядрото. Основните положения са противоположни на капковия модел:

- Нуклоните се движат независимо в самосъгласувано поле, което се създава от всички нуклони и не зависи от времето. Принципът на Паули забранява ударите между нуклоните.
- Запълнените слоеве имат повишена устойчивост. Те имат N или Z , равен на 2, 8, 20, 50, 82, 126. Това е физическият смисъл на тези числа, които се наричат магически.
- В едно енергетично ниво има $2(2l+1)$ броя нуклони; в ядрата съществува силно спин-орбитално взаимодействие, което води до разцепване на две на енергетичните нива, съответно с квантово число на сумарния ъплен момент $j=l+1/2$ и $j=l-1/2$.
- Нуклоните от даден тип се обединяват в двойки с нулев сумарен момент на импулса. В резултат на това четно-четните ядра имат нулеви механични и магнитни моменти, а ядрата с нечетни нуклони имат спин, равен на спина на последния несдвоен нуклон.

Слоестият модел е в сила за основните състояния и за най-слабовъзбудени състояния на ядрата. Неговото най-голямо постижение е обяснението на експериментално установените енергетични нива на

ядрата. В ядрото спин-орбиталното взаимодействие между нуклоните е много силно и те се обединяват в двойки – всички четни протони (и неутрони) имат сумарен спин нула. Слоестият модел добре обяснява спина и магнитните моменти на ядрата, много свойства на ядрените реакции (в това число правилата на подбор при β -разпадането и доста свойства въобще при разпадането). Но в рамките на модела не могат да намерят обяснение несферичността на ядрата и съществените квадруполни моменти (слоестият модел въобще не може да обясни поведението на неквадратни характеристики на ядрото).

Колективният модел обединява капковия и слоестия модел. Той предполага, че ядрото се състои от периферия с незапълнени слоеве от нуклони. Тези периферни електрони се движат независимо в потенциалното поле, породено от сърцевина от запълнени слоеве, подобно на тези в слоестия модел. Полето се определя от деформацията на сърцевината, причинена от взаимодействието на нуклоните от сърцевината и от периферията. Движението е същото както в капковия модел. Деформация на ядрената повърхност води до различни вибрационни и ротационни движения.

Колективният модел обяснява от единна гледа точка свойствата, описвани както от капковия модел, така и от слоестия модел.

ВЪПРОСИ

2. Какви са характерните енергии за атома и за ядрата?
3. На какво се дължи материята, която виждаме днес?
4. Коя е причината теорията на атома да е много по-добре развита от недостатъчната теория на ядрото?
5. Какви единици за дължина, енергия и маса се използват в ядрената физика?
6. С откритието на кое явление започва ядрената физика?
7. От какви частици се състои ядрото?
8. По какво си приличат и се различават нуклоните на ядрото?
9. Имат ли магнитни свойства нуклоните на ядрото и защо?
10. Какво означават числата A , Z и N ?
11. Какво е нуклид и как се означава той?
12. Какви са радиусът и плътността на ядрото в сравнение с тези на атома?
13. Кои ядра се наричат изобари?
14. Кои ядра се наричат изотопи?
15. Какво е енергия на свързване на ядрата и какъв е нейният физичен смисъл?
16. Какво е специфична енергия на свързване на ядрата и какъв е нейният порядък?
17. Какво представлява масовият дефект?
18. Каква е разликата между взаимодействието на нуклоните и взаимодействието на електроните?

19. Какво се нарича спин на ядрото и защо?
20. Коя от връзките LS или JJ преобладава между нуклоните в ядрото?
21. С каква единица се измерват магнитните моменти на нуклоните и какво представлява тя?
22. Какво показва сравнението на жиромагнитните отношения на нуклоните с тези на електроните?
23. Обуславят ли се магнитните моменти на ядрата от всички нуклони?
24. Какво представлява ефектът на сдвояването?
25. Кои са фундаменталните форми на взаимодействие в природата?
26. Какви са същността, радиусът на действие и преносителят на гравитационните сили?
27. Какви са същността, радиусът на действие и преносителят на електромагнитните сили?
28. Какви са същността, радиусът на действие и преносителят на силите на силното взаимодействие?
29. Какви са същността, радиусът на действие и преносителят на силите на слабото взаимодействие?
30. Как при обмяната на частици възникват сили?
31. Кои са преносителите на ядрените сили?
32. Какво представляват виртуалните частици?
33. Слаби ли са силите на слабото взаимодействие?
34. Какво означава, че ядрените сили са сили на насищане?
35. Защо в ядрената физика има модели, а в атомната физика – теория?
36. Аналогията между кои свойства на течната капка и тези на ядрото са позволили на Бор и Вайцекер да предложат капковия модел?
37. Сума от какви енергии е пълната енергия на свързване на ядрото в капковия модел?
38. Какъв е физическият смисъл на енергиите на взаимодействие между нуклоните в капковия модел?
39. Какви енергии е добавил Вайцекер към пълната енергия на свързване на ядрото в капковия модел?
40. Какъв е физическият смисъл на добавените от Вайцекер енергии на взаимодействие между нуклоните в капковия модел?
41. Какво може и какво не може да обясни капковият модел?
42. Какъв е физическият смисъл на магическите числа?
43. Защо атомните магически числа не са същите като ядрените магически числа?
44. Кой закон от физиката е отговорен за съществуването на магическите числа?
45. Какви са формата, устойчивостта и разпространеността във Вселената на магическите ядра?
46. Кои зависимости в ядрата имат периодичен характер?
47. Защо принципът на Паули „забранява“ ударите между нуклоните?
48. Защо в повечето ядра има JJ връзка, а в повечето атоми – LS връзка?
49. До какво води отчитането на орбиталния момент в слоестия модел?
50. Кои са основните положения на слоестия модел?

51. Защо слоевете в ядрото се описват с модел (слоестия модел), а в атома – с теория (теорията на Хартри–Фок)?
52. Какво може и какво не може да обясни слоестият модел?
53. Защо колективният модел е синтез между капковия и слоестия модел?
54. Кои са колективните движения в колективния модел?
55. Кои са основните положения в колективния модел?
56. Кои енергетични нива обяснява колективният модел?

ЗАДАЧИ

1. Енергията на свързване на нуклида $^{35}_{17}\text{Cl}$ е равна на 298 MeV. Намерете неговата маса в аму.
2. Масата на нуклида $^{10}_{20}\text{Ne}$ е равна на 19,9924 аму. Намерете неговата енергия на свързване в MeV.
3. Намерете средната енергия на свързване на един нуклон в $^{16}_8\text{O}$, чиято маса е 15,9949 аму.
4. Колко енергия е нужна, за да се отдели един протон от $^{15}_8\text{O}$, чиято маса е 15,9949 аму? (Масата на атома $^{15}_7\text{N}$ е 15,0030 аму.)
5. Колко енергия е нужна, за да се отдели един неутрон от $^{15}_8\text{O}$?
6. Масовото число и атомният номер на най-разпространения изотоп на азота са: $A=14$ и $Z=7$. Измереното число на ядрения спин е $j=1$. Покажете, че спинът е в противоречие с допускането, че ядрото се състои от A протона и $A-Z$ електрона. Също покажете, че спинът потвърждава допускането, че ядрото се състои от A нуклона, от които Z са протони и $A-Z$ са неутрони.
7. Използвайки фиг. 17-15 и принципа на Паули, определете спина на нуклидите $^{15}_7\text{N}$, $^{18}_8\text{O}$ и $^{39}_{19}\text{K}$.
8. Оценете в MeV енергията на гравитационното привличане между два сферичносиметрични протона, разстоянието между центровете на които е 2 fm. Оценете енергията на кулоновото отблъскване. Сравнете вашите резултати с ядрената енергия на привличане, която при това разстояние е -10 MeV.
9. Използвайки масите на въглерода, протона и неутрона ($m_C=12$ аму, $m_p=1,00759$ аму и $m_n=1,00898$ аму), покажете, че специфичната енергия на свързване за $^{12}_6\text{C}$ е 7,68 MeV.

