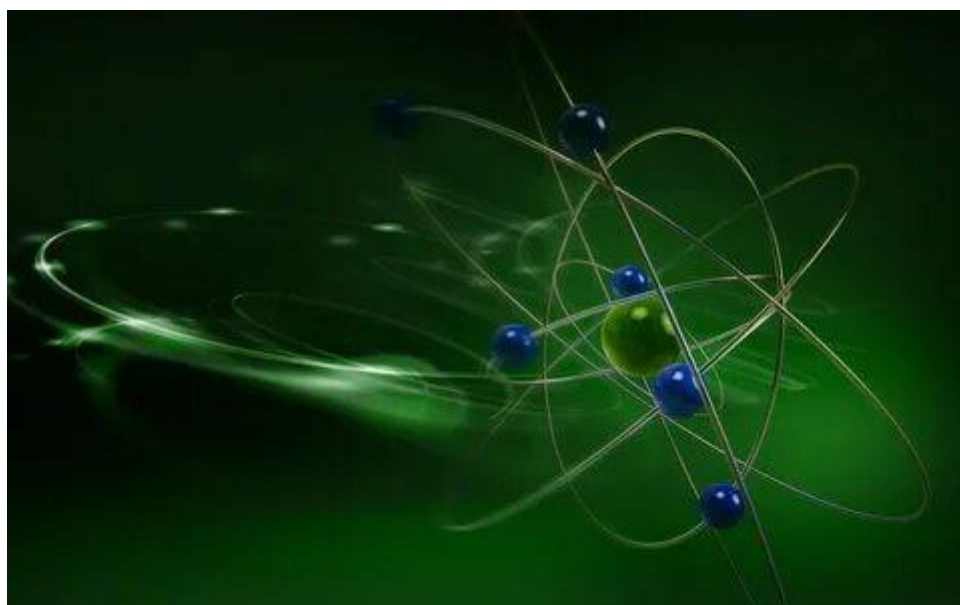


**Ж.Ш. Бермагамбетова**

# **Ядролық физика**



Қостанай, 2024

Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігі  
А. Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университетті  
Машина жасау, энергетика және ақпараттық технологиялар факультеті  
Математика және физика кафедрасы

**Ж.Ш. Бермагамбетова**

**Ядролық физика**

Оқу-әдістемелік құрал

Қостанай, 2024

**УДК 539.1**

**ББК 22.38**

**Б 46**

**Автор:**

Бермагамбетова Жанат Шектебаевна – А. Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университетінің, машина жасау, энергетика және ақпараттық технологиялар факультетінің математика және физика кафедрасының оқытушысы

**Рецензенттер:**

Ысмағұл Роза Сапабекқызы – ф.-м.ғ.к., А. Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университетінің, машина жасау, энергетика және ақпараттық технологиялар факультетінің математика және физика кафедрасының профессоры;

Курманов Аяп Конлямжаевич – т.ғ.к., Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университетінің, машина жасау, энергетика және ақпараттық технологиялар факультетінің математика және физика кафедрасының қауымдастырылған профессор;

Джаманбалин Қадырғали Қоныспаевич – ф.-м.ғ.д., З. Алдамжар атындағы Қостанай әлеуметтік университетінің профессоры.

Бермагамбетова Ж.Ш.

Ядролық физика: Оқу - әдістемелік құрал. – Қостанай: А. Байтұрсынұлы атындағы ҚӨУ, 2024.- 94 бет.

**ISBN 978-601-356-403-6**

Оқу-әдістемелік құралға ядролардың негізгі сипаттамалары, радиоактивтілік, ядролық реакциялар және элементар бөлшектері қамтиды. Осы тақырыптар бойынша шешілген есептер қарастырылған. Студенттерге өз бетінше шешуге арналған есептер ұсынылды.

Оқу-әдістемелік құралы 6В05301-Физика білім беру бағдарламасы бойынша оқитын білім алушыларына арналған.

**УДК 539.1**

**ББК 22.38**

А.Байтұрсынов атындағы Қостанай өңірлік университеті оқу – әдістемелік кеңесі бекіткен және басылымға ұсынған 14.06.2024 ж., хаттама № 4

**ISBN 978-601-356-403-6**

© А. Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті, 2024

© Бермагамбетова Ж.Ш., 2024

## Мазмұны

<b>Кіріспе</b>	5
<b>1 Атом ядроларының қасиеттері</b>	6
1.1 Атом ядролары туралы жалпы мәліметтер	6
1.2 Ядроның спині, радиусы және оның магниттік моменті	9
1.3 Ядроның массалық ақауы және байланыс энергиясы	12
1.4 Атом ядросының модельдері	15
<b>2 Радиоактивті сәулелену және оның түрлері</b>	18
2.1 Радиоактивтілік	18
2.2 Радиоактивті ыдырау заңы	20
2.3 Альфа-ыдырау	22
2.4 Бета-ыдырау	24
2.5 $\gamma$ -сәулеленудің резонанстық жұтылуын (Мёссбауэр эффектісі)	26
<b>3 Радиоактивті сәулелену мен бөлшектерді тіркеуге арналған аспаптар</b>	28
<b>4 Ядролық реакциялар</b>	29
4.1 Нейтрондардың әсерінен ядролық реакциялар	30
4.2 Ядроның бөліну реакциясы	32
<b>5 Элементар бөлшектер</b>	34
<b>Есептерді шешу мысалдары</b>	35
<b>Өз бетінше шешуге арналған есептер</b>	76
<b>Қосымша</b>	89
<b>Қорытынды</b>	93
<b>Пайдаланылған әдебиеттер тізімі</b>	94

## Кіріспе

Соңғы онжылдықта ядролық физика көптеген жаңа ашылуларға толы болды. Атап айтқанда элементтердің трансформациясы жүргізілді және атом ядроларының құрамы анықталды, оған қоса жасанды радиоактивтілік құбылыстар, трансурандық элементтер және жаңа «элементар» бөлшектер табылды (нейтрон, әртүрлі мезондар, гинерондар; антибөлшектерден - позитрон, антипротон, антинейтрон және т.б.). Сонымен қатар, элементар бөлшектердің бір-біріне айналуы дәлелденді, ядролық реакциялар кезінде бөлінетін энергия санауға және өлшеуге болады. Бүгінгі таңда физика ғылымының жаңа саласы – элементар бөлшектер физикасы құрылды.

Бұл жетістіктердің практикалық маңызы орасан зор. Адамзат энергияның жаңа көзін тапты, оны алудың техникалық мәселесі шешілді.

Түрлі типтегі атом реакторлары бар атом электрстанциялары салынууда. Басқарылатын термоядролық реакциялар бойынша жұмыстар жүргізілуде. Радиоактивті изотоптар ғылымда және халық шаруашылығында қолданылады.

Атомдық физика мен ядролық технологияның қарқынды дамуына байланысты материяның құрылымы бойынша оқу материалдары үнемі жаңартылып, оны баяндау әдістері жетілдірілуде.

Бұл оқу құралы теориялық материалдар 5 бөлімнен, шешілген есептері, өз бетінше шешуге арналған есептерден қамтиды. Әр тақырып үшін негізгі анықтамалар мен формулдар, есептерді шешу мысалдары, анықтамалық мәліметтер келтірілген.

# 1 Атом ядроларының сипаттамалары

## 1.1 Атом ядролары туралы жалпы мәліметтер

Ядро атомның орталық бөлігі деп аталады, онда атомның барлық массасы және оның оң электр заряды шоғырланған.

Резерфортың  $\alpha$ -бөлшектердің металл фольга арқылы өту тәжірибелерінде атом ядроларының өлшемдері шамамен  $10^{-14} - 10^{-15}$  м, ал атомдардың сызықтық өлшемдері шамамен  $10^{-10}$  м екендігі анықталады.

Д.Иваненко және В.Гейзенберг атом ядросының протон-нейтрондық моделін ұсынды. Олардың моделіне сәйкес:

Барлық химиялық элементтердің ядролары нуклондардан тұрады: протондар (p) және нейтрондар (n).

Латин тілінен алынған nucleus – ядро. Протонның оң заряды бар, ол электронның зарядының абсолютті шамасына тең. Нейтронның электр заряды жоқ. Демек, ядро оң зарядталған.

Ядроға протондар саны элементтер атомының атомдық немесе реттік нөмері  $Z$ -ге тең, оны заряд саны деп те атайды (элементтердің периодтық жүйесіндегі химиялық элементтің реттік нөмірімен – атомдық нөмірмен сәйкес келеді).

$N$  нейтрондары мен  $Z$  протондарының жалпы саны атом ядросының  $A$  массалық санына тең:  $A=N+Z$ . Ол бүкіл атомдық масса бірліктеріндегі ядро массасына сәйкес келеді (қысқартылған м.а.ө.=1/12 негізгі көмертегі  $C$  атомының массасының  $M_a$  бөлігі  $A=12$ ).

Химиялық элементтің жазбасы келесідей жазылады:



мұндағы  $X$  – химиялық элементтің символы;

$Z$  – заряд саны;

$A$  – массалық сан.

Атом бейтарап болғандықтан, ядро заряды атомдағы электрондардың санын анықтайды, олардың атомдағы күйлер бойынша таралуы тәуелді, сондықтан атомның химиялық қасиеттері тәуелді болады.

Табиғатта бірдей  $Z$  химиялық элементтің нуклидтері бірдей, бірақ әртүрлі  $A$  массалық сандарымен (нейтрондардың әртүрлі саны) кездеседі. Мұндай нуклидтер *изотоптар* деп аталады. Сутегі изотоптарының мысалдары протий  $H_1^1$  (ең жеңіл изотоп), дейтерий  $H_1^2$  және тритий  $H_1^3$ .

$A$  массасы бірдей, бірақ әртүрлі  $Z$  заряд сандары бар нуклидтер – *изобаралар* деп аталады. Бериллий, бор және көмертегі изобарының мысалдары –  $Be_4^{10}$ ,  $B_5^{10}$  и  $C_6^{10}$ .

Нейтрондардың саны бірдей, бірақ  $Z$  санымен ерекшеленетін нуклидтер – *изотондар* деп аталады. Мысалы,  $C_6^{13}$ ,  $N_7^{14}$ ,  $O_8^{15}$ .  $N=A - Z$  формуласы бойынша, яғни әрқайсысында 7 нейтрон бар.

$M_{\text{я}}$  ядроның массасы және оның түзілген нуклондарының массасы – м.а.ө., оны килограмм арқылы жазуға болады.

$$1 \text{ м. а. ө} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг},$$

Немесе энергетикалық бірліктер – джоульдер, электрон-вольттар:

$$1 \text{ м. а. ө} = 1,51 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} = 931,49 \text{ МэВ}.$$

$m_p$  протонының массасы  $m_e$  электронының массасынан шамамен 1836 есе көп:

$$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \approx 1836m_e = 938,27 \text{ МэВ},$$

$m_n$  нейтронының массасы протонның массасынан шамамен 0,14% артық

$$m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \approx 1839m_e = 939,56 \text{ МэВ}.$$

Табиғи элементтердің ішіндегі ең ауыры  $U_{92}^{238}$  уран изотопы. Атомдық нөмірлері 92-ден асатын элементтер трансурани деп аталады. Олардың барлығы жасанды түрде әртүрлі ядролық реакциялардан алынған.

Барлық атом ядроларын тұрақты және радиоактивті деп бөлуге болады.

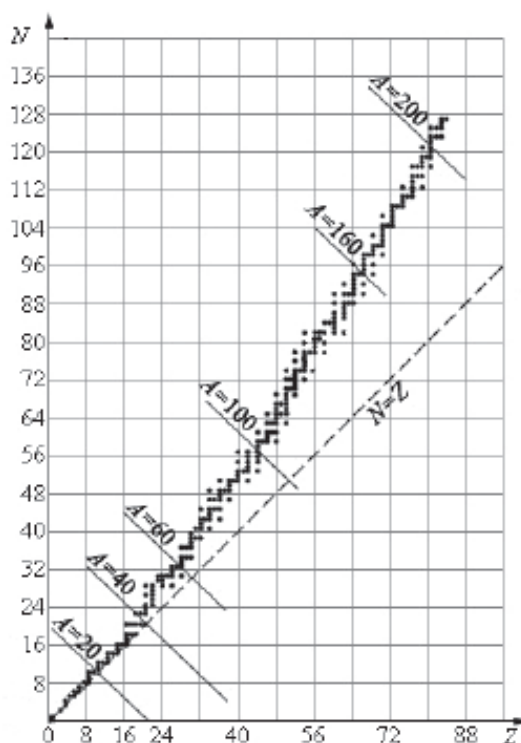
Тұрақты ядролар шексіз өзгеріссіз қалады, радиоактивті ядролар өздігінен өзгеріске ұшырайды. Тұрақты ядроның негізгі сипаттамалары – протондар саны  $Z$  және нейтрондар  $N$ , радиусы  $R_{\text{я}}$ , массасы  $M_{\text{я}}$ , байланыс энергиясы  $E_{\text{байл}}$ , спин  $\vec{I}$ , магниттік момент  $\vec{\mu}_I$ , квадрупольды электр моменті  $Q$ .

Атом ядроларының тұрақтылығының критерийі протондар мен нейтрондар саны арасындағы байланыс болып табылады:

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

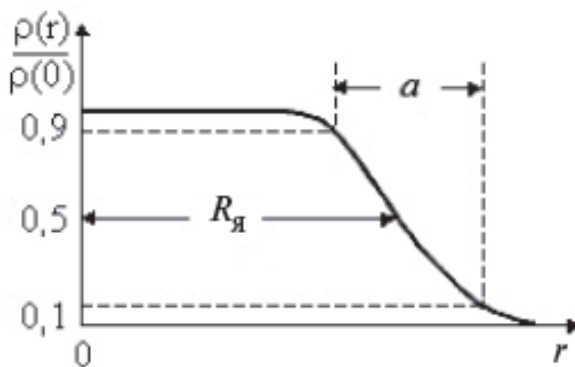
1 суретте  $N - Z$  осы теңдеуге сәйкес келетін және тұрақты ядролардағы нейтрондар санының протондарға тәуелділігі болып табылатын диаграмма көрсетілген. Нүктелер тұрақтылық аймағын белгілейді.

Суреттен  $A < 40$  жеңіл ядролар  $N \approx Z$  болған кезде тұрақты болатындығын көруге болады.  $A$  массалық санының өсуімен протондар арасындағы электростатикалық итеру айқынырақ болады және бұл итеру ядролық тартылыс арқылы өтеу үшін нейтрондар саны протондар санына қарағанда тезірек өсуі керек, сондықтан тұрақтылық аймағы  $N > Z$  ауысады.  $Z > 83$  ядроларда висмуттан кейін протондардың көп болуына байланысты толық тұрақтылық мүмкін емес, уақыт өте келе өздігінен өзгеру болмайды.



1 сурет – N – Z атом ядроларының диаграммасы

Атом ядросының мөлшері нуклондар санына байланысты және ядро шекарасының бұлыңғырлығына байланысты шартты мағынасы бар радиуспен сипатталады. Бөлшектердің, жылдам электрондардың, протондардың және нейтрондардың ядроларындағы серпімді шашырау эксперименттері  $R_{\text{я}}$  ядролардың радиусын анықтап қана қоймай, сонымен қатар ядролдағы электр заряды мен ядролық заттың  $\rho(r)$  тығыздығының таралуын егжей-тегжейлі зерттеуге мүмкіндік берді. Тәжірибелер көрсеткендей, заряд пен ядролық заттардың тығыздығы  $A < 20$  барлық ядролардың ішкі аймағында тұрақты және одан тыс экспоненциалды түрде төмендейді (2 сурет).



2 сурет– Ядро мен ядролық заттың заряд тығыздығының таралуы  
Заряд пен ядролық заттардың таралу тығыздығы іс жүзінде сәйкес келетін және Фермидің таралуымен сипатталатыны анықталды:



$$\rho(r) = \frac{\rho(0)}{1 + \exp\left(\frac{r - R_{\text{я}}}{0,228a}\right)}, \quad (2)$$

мұндағы  $\rho(0)$  – ядроның ортасындағы заряд тығыздығы (ядролық зат);  
 $a$  – диффузия параметрі;  
 $R_{\text{я}}$  – зарядтау (массалық) радиусы.

Бұл радиус зарядтың (ядролық заттың) тығыздығы екі есе төмендейтін қашықтыққа тең (3 формула):

$$\rho(R_{\text{я}}) = \frac{\rho(0)}{2}, \quad (3)$$

Диффузия параметрі  $a = 2,2 \cdot 10^{-15}$  м. ол ядро бетінің «бұрлыңғырлығын» сипаттайды, тығыздығы 90%-дан 10% -ға дейін төмендейтін аралыққа тең.

## 1.2 Ядроның спині, радиусы және оның магниттік моменті

Ядро импульстің кеншікті моменті – ядра спині - нуклон спиндерінің векторлық қосындысы ( $1/2$ -ге тең) және нуклон импульсінің орбиталық моменттері (ядро ішіндегі нуклондардың қозғалысына байланысты импульс моменті).

Ядроның спині заң бойынша квантталады

$$L_{\text{я}} = \hbar \sqrt{I(I + 1)}, \quad (4)$$

мұндағы  $I$  – спиндік кванттық сан.

Спиндік кванттық сан мәндерді қабылдайды  $0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, \dots$

Атомның толық механикалық моменті:

$$F = J + I, J + I - 1, \dots, |J - I|, \quad (5)$$

мұндағы  $J$  – атомның электронды қабығының механикалық моменті;  
 $I$  – ядроның спині.

Орналастырылған түйіспелер үшін  $\Delta F = 0, \pm 1; F = 0 \rightarrow E = 0$

Атом ядросы спиннен басқа магниттік моментке ие

$$P_{m\text{я}} = g_{\text{я}} L_{\text{я}}, \quad (6)$$

мұндағы  $g_{\text{я}}$  – пропорционалдық коэффициенті.

Әйтпесе, пропорционалдың коэффициенті ядролық гирромагниттік қатынас деп аталады.

Ядроның магниттік моменті (дәлірек айтқанда, оның максималды проекциясы):

$$\mu = gI\mu_{\text{я}}, \quad (7)$$

мұндағы  $g$  – гирромагниттік мультипликатор;

$I$  – ядроның спині;

$\mu_{\text{я}}$  – ядролық магнетон.

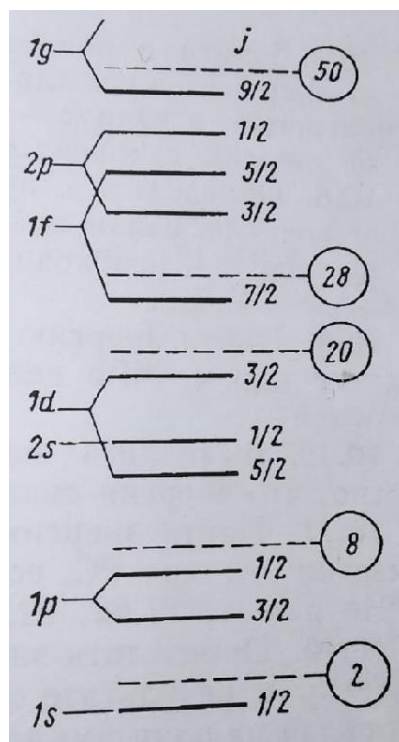
Ядролардың магниттік моменттерінің бірлігі ядролық магнетон болып табылады:

$$\mu_{\text{я}} = \frac{e\hbar}{2m_p} = 5,0508 \cdot 10^{-27} \frac{\text{Дж}}{\text{Тл}}, \quad (8)$$

Ядролық магнетон  $\frac{m_p}{m_e} \approx 1836$  есе бор магнетонынан аз, сондықтан атомдардың магниттік қасиеттері негізінен оның электрондарының магниттік қасиеттерімен анықталады.

Ядроның магниттік моментінің болуы сыртқы магнит өрісіндегі атомдар спектрлеріндегі өте жұқа құрылымды түсіндіреді.

Ядролық қабықтардың моделі 3 суретте қарастырылған.



3 сурет – Ядролық қабық моделі

Суретте  $j$  – нуклидтің толық моментінің кванттық саны; шеңберлердегі сандар – сәйкес нүктелі сызықтан – қабық шекарасынан төмен орналасқан барлық зақымдарды толтыратын бір сортты нуклондар (протондар мен нейтрондар) саны. Деңгейлерді протондар мен нейтрондармен толтыру тәуелсіз және Паули принципіне сәйкес жүреді.

Орбиталық моменті 1 және ішкі паритет  $P_i$  бөлшектің паритеті ретінде анықталады

$$P = P_i(-1)^l, \quad (9)$$

Паритет  $P$  ішкі паритеттері екі бөлшектің бөлшектері (және жалпы екі ішкі жүйеден)  $P_1$  және  $P_2$  және салыстырмалы орбиталық моменті дж:

$$P = P_1 P_2 (-1)^l, \quad (10)$$

$l_1, l_2, \dots, l_n$  орбиталық моменттері нуклондар (немесе электрондар) жүйесінің паритеті:

$$P = (-1)^{l_1 + l_2 + \dots + l_n}, \quad (11)$$

Нуклонның (және электронның) ішкі паритеттері +1 болғандықтан. Ядро байланыс энергиясының жартылай эмпирикалық формуласы, МЭВ:

$$E = 14,0A - 13,0A^{\frac{2}{3}} - 0,584 \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} - 19,3 \frac{(A-2Z)^2}{A} + \frac{33,5}{A^{3/4}} \delta, \quad (12)$$

$$\delta = \left\{ \begin{array}{l} +1 \text{ жұп } A \text{ және } Z \text{ кезінде;} \\ 0 \text{ тақ } A \text{ кезінде (} Z \text{ кез келген);} \\ -1 \text{ жұп } A \text{ кезінде және тақ } Z \text{ кезінде.} \end{array} \right\}$$

Пропорционалды коэффициенті  $r_0$  ядро радиусын есептеу үшін осы эмпирикалық формулада эксперименталды түрде анықталады:

$$r_0 = 1,1 \div 1,4 \cdot 10^{-15} \text{ м.}$$

Ядроның радиусы, фм:

$$R = 1,4 A^{1/3}, \quad (13)$$

мұндағы  $A$  – ядроның массалық сан.

### 1.3 Ядроның массалық ақауы және байланыс энергиясы

Өлшеулер көрсеткендей,  $M_{\text{я}}$  ядросының массасы әрқашан оны құрайтын бос протондар мен нейтрондардың тыныштық массаларының қосындысынан аз болады:

$$M_{\text{я}}(A, Z) < Zm_p + (A - Z)m_n$$

Бос күйдегі барлық ядро нуклондарының массаларының қосындысы мен ядро массасының арасындағы айырмашылық ядро *массасының ақауы* (артық) деп аталады:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{я}}(A, Z), \quad (14)$$

Байланыс энергиясына сәйкес келетін масса  $\Delta m$ , анықтауға болады:

$$\Delta m = \frac{E_{\text{св}}}{c^2} = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{я}}, \quad (15)$$

мұндағы  $E_{\text{байл}}$  – атом ядросындағы нуклондардың байланыс энергиясы;  
 $c^2$  – пропорционалдылық коэффициенті.

Пропорционалдылық коэффициенті  $c^2 = 8,987 \cdot 10^{16} \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = 8,987 \cdot 10^{16} \text{м}^2/\text{с}^2$ .

Егер энергия мегаэлектрон-вольтпен, ал масса атомдық бірліктермен көрсетілсе, онда коэффициент болады:

$$c^2 = 931,4 \frac{\text{МэВ}}{\text{а. е. м.}}$$

Ядроның  $\Delta m$  массалық ақауын  $M_{\text{я}}$  атомның массасы (атомдық массасы) арқылы көрсетуге болады, бұл эксперименталды түрде өлшенетін шама.

$$M_{\text{а}}(A, Z) = M_{\text{я}}(A, Z) + Zm_e - \frac{E_{\text{а}}}{c^2}, \quad (16)$$

мұндағы  $m$  – сутегі атомның массасы;

$E_{\text{а}}$  – атомдағы электрондардың байланыс энергиясы.

Масса ақауы  $\Delta m$  ядродағы нуклондардың  $E_{\text{байл}}$  байланыс энергиясын сипаттайды, бұл ядроны бос нуклондарға бөлу үшін жасалуы керек жұмысқа тең энергия. Ол массаның ақауына пропорционалды және оны есептеу үшін формула қолданылады:

$$E_{\text{б}} = mc^2 = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}]c^2 = [Zm_H + (A - Z)m_n - M_{\text{а}}]c^2, \quad (17)$$

мұндағы  $m_p$  – протонның массасы;  
 $m_n$  – нейтронның массасы;  
 $m_{\text{я}}$  – ядроның массасы.  
 $m_H = m_p + m_e - H_1^1$  сутегі атомының массасы;  
 $M_a$  – берілген заттың атомдық массасы.

Бұл байланысты түсіндірейін. Эйнштейннің қатынасы бойынша  $E = mc^2$  ядро түзілуіндегі массаның азаюы нуклондар жүйесінің толық энергиясының азаюын білдіреді. Себебі ядродағы протондар мен нейтрондар ядролық күштер арқылы бір-біріне өте қатты тартылады. Оларды ажырату және бір-бірінен алыс қашықтыққа алып тастау үшін ядролық тартылыс күштерін жеңу үшін жұмыс істеу керек. Сондықтан ядроның толық тыныштық энергиясы оның құрамдас бос нуклондарының тыныштық энергиясына тең емес, оның орнына  $E_{\text{байл}}$  байланыс энергиясына сандық тең жұмсалған жұмыс мөлшеріне аз болады. Ядроларды синтездеу кезінде нуклондардан энергия бөлінеді, ол осы байланыс энергиясына тең.

$E_{\text{байл}}$  ядросының байланыс энергиясы – бұл ядроны кинетикалық энергияны айтпай-ақ оны құрайтын нуклондарға бөлу үшін жасалатын жұмысқа тең физикалық шама.

Ядроның бір нуклонына келетін байланыс энергиясы меншікті энергия деп аталады  $\varepsilon_{\text{менш}}$  (немесе бір нуклонға байланыс энергиясы). Бұл ядродан бір нуклонды алып тастау үшін жұмсалатын орташа энергияға тең. Байланыстың меншікті энергиясы  $\varepsilon$  ядроның  $E_{\text{байл}}$  байланыс энергиясын ондағы  $A$  нуклондарының санына бөлу арқылы есептеуге болады:

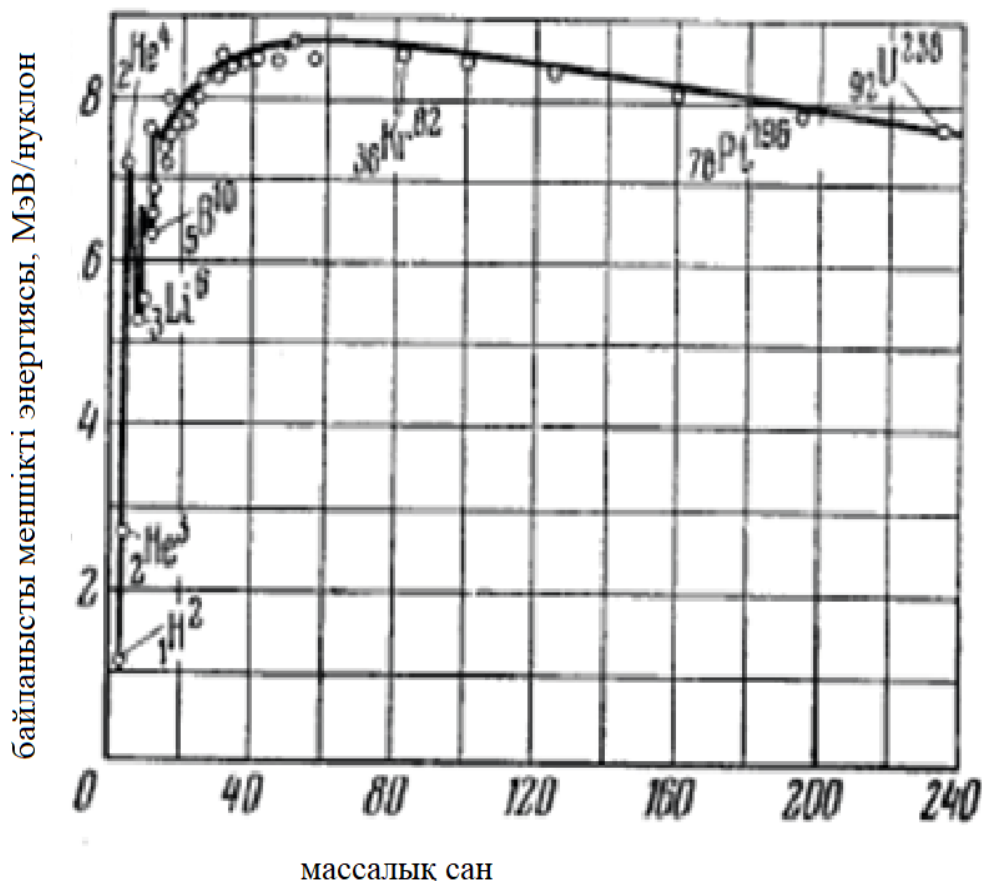
$$\varepsilon_{\text{менш}} = \frac{E_{\text{св}}}{A}, \quad (18)$$

мұндағы  $E_{\text{байл}}$  – нуклондардың баланыс энергиясы;  
 $A$  – массалық сан, ядродағы нуклондардың (протондар мен нейтрондардың) жалы саны.

Байланыстың меншікті энергиясы атом ядроларының тұрақтылығын (беріктігін) сипаттайды, яғни байланыстың меншікті энергиясы неғұрлым үлкен болса, ядро соғұрлым күшті болады

Байланыстың меншікті энергиясының массалық санға тәуелділігі 4 суретте көрсетілген.

Менделеевтің периодтық жүйенің ортаңғы бөлігінің ядролары ең тұрақты ( $28 < A < 138$ ). Бұл ядроларда байланыстың меншікті энергиясы шамамен 8,7 МэВ/нуклонды құрайды (салыстыру үшін атомдағы валенттік электрондардың байланыс энергиясы шамамен 10 эВ құрайды, бұл миллион есе аз).



4 сурет – Байланыстың меншікті энергиясының массалық санға тәуелділігі

Ауыр ядроларға ауысқан кезде байланыстың меншікті энергиясы азаяды, өйткені ядродағы протондар саны көбейген сайын олардың кулондық итерілу энергиясы артады (мысалы,  $U_{92}^{238}$  ураны үшін ол 7,6 МэВ құрайды). Сондықтан нуклондар арасындағы байланыс азаяды, ал ядролардың өздері аз берік болады.

Энергетикалық жағынан тиімді:

- 1) ауыр ядроларды жеңіл ядроларға бөлу;
- 2) жеңіл ядролардың бір-бірімен ауыр ядроларға қосылуы.

Екі процесте де үлкен энергия бөлінеді; бұл процестер қазіргі уақытта іс жүзінде жүзеге асырылады; ядролық бөліну реакциялары және ядролық синтез реакциялары.

Ядро ішінде ядро нуклондары арасындағы күшті өзара әрекеттесуге ықпал ететін күштер әрекет етеді. Мұндай күштерге ядролық деп анықтама берілді. Өйткені, оларды кулондық күштермен салыстыру мүмкін емес, себебі олар ядро ішіндегі, яғни элементар бөлшектер (протондар) арасындағы кулондық өзара әрекеттесу күштерінің итерілуінен әлдеқайда үлкен.

Ядролық күштердің қасиеттері:

- 1) ядролық күштер тартылыс күштері болып табылады;
- 2) ядролық заттар қысқа әсер етеді – олардың әсері шамамен  $10^{-15}$  м қашықтықта ғана көрінеді;

3) ядролық күштерге заряд тәуелсіздігі тән: кез келген екі нуклон арасындағы тартылыс нуклондардың (протон және нейтрон) заряд күәне қарамастан бірдей; ядролық күштер электрлік емес сипатқа ие;

4) ядролық күштер қанықтырумен сипатталады: ядродағы әрбір нуклон оған жақын орналасқан нуклондардың шектеулі санымен ғана әрекеттеседі;

5) ядролық күштер өзара әрекеттесетін нуклондардың спиндерінің өзара бағытына байланысты. Мысалы, протон мен нейтрон дейтерий  $H_1^2$  – олардың спиндері параллель бағытталған жағдайда ғана;

6) ядролық күштер орталық емес, яғни өзара әрекеттесетін нуклондардың орталықтарын қосатын сызық бойынша әрекет етеді [1].

## 1.4 Атом ядросының модельдері

Ядролық модельдер – бұл ядроның негізгі сипаттамаларын, оның әртүрлі қасиеттерін және бөлшектердің ядролармен әрекеттесу процестерін сипаттайтын модельдер. Ядро модельдерінің екі түрі бар: ұжымдық және бір бөлшекті. Ұжымдық модельдерге нуклондардың тәуелсіздігі идеясына сүйенеді.

Ең танымал модельдерді қарастырыңыз: тамшылы және қабықшалық модельдері.

### 1. Тамшылы моделі

1936 жылы Н.Бор тамшылау моделін ұсынды, содан кейін Я.Френкель бұл моделі дамытты. Бұл модельде ядро сфералық, біркелкі зарядталған сұйықтық тамшысы ретінде қарастырылады.

Тамшылы моделі ядродағы нуклондардың әрекеті мен сұйықтық тамшысындағы молекулалардың әрекеті арасындағы ұқсастыққа негізделген. Екі жағдайда да бөлшектер арасында әрекет ететін күштер қысқа әсер етеді, олар қанықтырумен сипатталады. Берілген сыртқы жағдайларда сұйықтық тамшысы заттың тұрақты тығыздығымен сипатталады. Тұрақтылық сызығына жағын ядролар да ядродағы нуклондар санына тәуелсіз бірдей тығыздыққы ие, бұл олардың практикалық сызылмайдығын көрсетеді. Ақырында, тамшының көлемі, ядроның көлемі сияқты, бөлшектердің санына пропорционалды.

Осы қарапайым модельге сүйене отырып, К. Вайцеккер Паули принципін қолдана отырып, ядроның байланыс энергиясын, демек оның массасын Вайцеккер формуласымен есептеуге мүмкіндің беретін жартылай эмпирикалық формула алынды.

$$E_{\text{байл}} = a_0 A - a_{\text{П}} A^{2/3} - a_{\text{к}} \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_c \frac{\left(\frac{A}{2} - Z\right)^2}{A} + a_{\text{ч}} A^{-3/4}, \quad (19)$$

мұндағы  $a_0=15,6$  МэВ;  
 $a_{\text{П}}=17,2$  МэВ;  
 $a_{\text{к}}=0,7$  МэВ;

$$a_c = 94,8 \text{ МэВ};$$

$$a_c = \begin{cases} 33,6 \text{ МэВ, жұп} - \text{ тақ ядролар,} \\ 0, \text{ жұп} - \text{ тақ, тақ} - \text{ жұп ядролар,} \\ -33,6 \text{ МэВ, тақ} - \text{ тақ ядролар.} \end{cases}$$

Тамшылы моделінің көмегімен төмен энергиядағы ядролары реакцияларды, әсіресе ядролық бөліну процестерін сипаттауға болады.

## 2. Қабықшалық моделі

Бір-бірімен әрекеттеспейтін нуклондар моделінің мысалы – қабықшалық моделі. Ол 1949 жылы М.Гепперс-Майер және Х.Иенсен ұсынылды. Атом ядросы сұйықтық ретінде емес, ядро нуклондарының бүкіл жиынтығы құрған дәйекті өрісте қозғалатын нуклондардан тұратын газ ретінде көрінеді. Оны енгізудің негізгі ядро көлемінің бір бөлігін нуклондар алмайтындығы болып табылады, өйткені нуклонның радиусы кішкентай, шамамен  $8,6 \cdot 10^{-16}$  м. Атом тәрізде ядро қабық тәрізде құрылымға ие, бір-бірін айналып өтетін протондар мен нейтрондардан тұратын қабықтардан тұрады.

Бұл модель сфералық симметриялы потенциалдық шұңқырдағы нуклондардың қозғалысын қарастырады, оның ішінде әдетте тиімді Вудс-Саксон потенциалы қолданылады. Ол ядролық зарядтың тығыздығының немесе Фермидің таралу түріндегі заттың таралуына ұқсас түрге ие. Протондар үшін көбірек кулондық өзара әрекеттесу қосылады. Нейтрондар мен протондардың бір бөлшекті меншікті күйлері сәйкес Шредингер теңдеуін шешу арқылы анықталады. Бұл күйлер, атомдағы электрон күйлері сияқты, кванттық сандар жиынтығымен сипатталады:  $n, l, j, m_j$ .

Қабықшалық моделі нуклондардың спин-орбиталық әрекеттесуін ескереді. Ол Паули принципін сәйкес мәндері  $n, l, j$  кванттық сандарына тәуелді дискретті энергия деңгейлерін протондар мен нейтрондармен дербес толтыру орын алады деп болжайды. Әрбір энергетикалық деңгейде  $(2j + 1)$  бірдей нуклондар болуы мүмкін. Модель ядролардың тұрақтылығын осы деңгейлердің толтырылуымен байланыстырады. Негізгі күй барлық төменгі энергия деңгейлерінің толық толтырылуымен сипатталады.

Қабықшалық моделі нуклондардың спин-орбиталық әрекеттесуін ескереді. Ол Паули принципіне сәйкес мәндері  $N, l, j$  кванттық сандарына тәуелді дискретті энергия деңгейлерін протондар мен нейтрондармен дербес толтыру орын алады деп болжайды. әрбір энергетикалық деңгейде  $(2j+1)$  бірдей нуклондар болуы мүмкін. Модель ядролардың тұрақтылығын осы деңгейлердің толтырылуымен байланыстырады. Негізгі күй барлық төменгі энергия деңгейлерінің толық толтырылуымен сипатталады.

Толығымен толтырылған қабықшалары ядролар ең тұрақты болып табылады -  $Z$  протондарының немесе  $N$  нейтрондарының саны сиқырлы сандардың біріне тең болатын сиқырлы ядролар: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126.

$Z$  және  $N$  сиқырлы ядролар екі рет сиқырлы деп аталады. Екі рет сиқырлы ядролардың білгілі барлығы бес:  $He_2^4, O_8^{16}, Ca_{20}^{40}, Ca_{20}^{48}, Pb_{82}^{208}$ .



Қабықшалық моделі ядролардың магниттік моменттерінің эксперименттік мәндерін қайталайды, ерекше тұрақты сиқырлы ядролардың болуын, сондай-ақ әртүрлі ядролардың қасиеттерінің өзгеру жиілігін түсіндіреді. Бұл модель негізгі және әлсіз қойған күйдегі жеңіл және орташа ядроларға тән. Модельдің кемшіліктеріне оның қатты қозған ядролардың әрекетін түсіндіре алмауы жатады. Мұның себебі модельдің негізінде жатқан болжамдар: тиімді потенциалдың сфералық симметриясы, нуклондар арасындағы өзара әрекеттесудің болмауы.

## 2 Радиоактивті сәулелену және оның түрлері

### 2.1 Радиоактивтілік

Француз физигі А.Беккерель 1896 жылы уран тұздарының люминесценциясын зерттеді. Люминесценциясын зерттеу кезінде олардың фотопластикаға әсер ететін, ауаны иондайтын, жұқа металл плиталарға енетін, бірқатар заттардың люминесценциясын тудыратын белгісіз сипаттағы сәулеленудің өздігінен шығуын кездейсоқ анықтады. Құрамында полоний  $Po_{84}^{210}$  және радий  $Ra_{88}^{226}$  бар заттар да осындай қасиетке ие болды.

А.Беккерель кейздейсоқ анықталған уран тұздарының радиоактивті сәулеленуін *радиоактивтілік* деп атады, ал сәулеленудің сәйкесінше *радиоактивті сәулелену* деп атады.

Радиоактивтілік дегеніміз – бір химиялық элементтің басқа химиялық элементтің изотоптарына өздігінен айналуы, кейбір бөлшектердің, мысалы, гелий ядроларының шығарылуымен бірге жүреді.

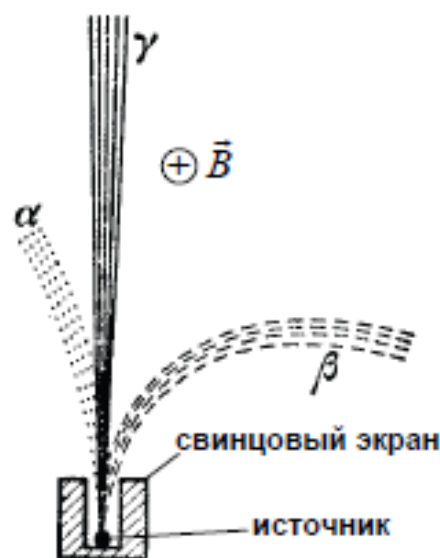
Радиоактивтілік табиғи және жасанды болып бөлінеді.

Табиғи радиоактивтілік табиғатта болатын тұрақсыз изотоптардың радиоактивтілігі деп аталады.

Жасанды радиоактивтілік ядролық реакциялар нәтижесінде алынған изотоптардың радиоактивтілігі деп аталады. Белгілі бір изотоптың қасиеттері оны алу әдісіне байланысты емес.

Радиоактивті изотоптардың ең аз өмір сүру уақыты  $\sim 10^{-13} - 10^{-12}$  с.

Радиоактивті зат сәулеленудің келесі түрлерінің көздері болып табылады:  $\alpha$ -сәулелену,  $\beta$ -сәулелену (электрондар немесе позитрондар ағыны) және  $\gamma$ -сәулелену. 5 суретте радиоактивті сәулеленудің түрлері көрсетілген.



5 сурет – Радиоактивті сәулеленудің түрлері

$\alpha$ ,  $\beta$  және  $\gamma$  – сәулелердің құрамы олардың магнит крісіндегі ауытқуынан анықталады.

**$\alpha$ -сәулелену** электр және магнит өрістерімен ауытқиды, иондау қабілеті жоғары (мысалы, қалыңдығы шамамен 0,05 мм алюминий қабатымен жұтылады).  $\alpha$  – сәулелену – гелий ядроларының ағыны;  $\alpha$ -бөлшектің заряды  $+2e$ , ал массасы  $He_2^4$ . гелий изотопының ядросының массасына сәйкес келеді. Электр және магнит өрістеріндегі  $\alpha$ -бөлшектердің ауытқуынан олардың нақты заряды  $\frac{Q}{m_\alpha}$  анықталады, оның мәні олардың табиғаты туралы идеялардың дұрыстығын растады.

**$\beta$ -сәулелену** электр және магнит өрістерімен ауытқиды; оның иондану қабілеті  $\alpha$ -бөлшектерге қарағанда едәуір аз (шамамен екі реттік), ал ену қабілеті әлдеқайда үлкен (қалыңдығы шамамен 2 мм алюминий қабатымен жұтылады).  $\beta$  – сәулелену – бұл жылдам электрондардың ағыны (олардың нақты зарядын анықтаудан туындайды).

Біртекті затта бірдей жылдамдықтағы электрондар ағынының жұтылуы экспоненциалды заңға бағынады.

$$N = N_0 e^{-\mu x}, \quad (20)$$

мұндағы  $N_0$  және  $N$  – зат қабатының қалыңдығы мен шығысындағы электрондар саны;

$x$ ,  $\mu$  – сіңіру коэффициенттері.

$\beta$ -сәулелену затта қатты шашырайды, сондықтан  $\mu$  тек затқа ғана емес, сонымен қатар  $\beta$ -сәулелену түсетін денелердің мөлшері мен пішініне де байланысты.

**$\gamma$ -сәулелену** электр және магнит өрістерінен ауытқымайды, салыстырмалы түрде әлсіз иондау қабілетіне ие және өте үлкен ену қабілетіне ие (мысалы, қалыңдығы 5 см қорғасын қабаты арқылы өтеді), кристалдар арқылы өткенде дифракцияны анықтайды.  $\gamma$ -сәулелену – бұл толқын ұзындығы өте аз қысқа толқынды электромагниттік сәулелену  $\lambda < 10^{-10}$  м, нәтижесінде айқын корпускулалық қасиеттері бар, яғни бөлшектердің ағыны –  $\gamma$ -кванттар (фотондар) [1].

Позитрон – массасы бірдей, бірақ қарама-қарсы белгісі бар электронға арналған антибөлшек электр заряды.

Радиоактивтіліктің негізгі түрлеріне мыналар жатады:

- 1) альфа-ыдырау;
- 2) бета-ыдырау;
- 3) ауыр ядролардың өздігінен бөлінуі;
- 4) нуклондық радиоактивтілік;
- 5) кластелік радиоактивтілік.

Радиоактивті ыдырауды бастан кешіретін ядро және осы ыдырау нәтижесінде пайда болатын ядро сәйкесінше аналық және еншілес ядролар деп аталады. Егер радиоактивті ыдырау кезінде қозған күйдегі еншілес ядро пайда

болса, содан кейін негізгі немесе төменгі қозған күйге ауысса, онда радиоактивтіліктің бұл түрі гамма-сәулеленумен бірге жүреді.

Радиоактивті ыдырау кезінде электр зарядтарының сақталу заңы және массалық сандардың сақталу заңы орындалады:

$$Z_{\text{я}}e = \sum_i Z_i e, \quad A_{\text{я}} = \sum_i A_i$$

мұндағы  $Z_{\text{я}}e$  – аналық ядроның заряды;

$A_{\text{я}}$  – аналық ядроның массалық саны;

$Z_i e$  – зрадиоактивті ыдырау нәтижесінде пайда болған бөлшектердің зарядтары;

$A_i$  – радиоактивті ыдырау нәтижесінде пайда болған бөлшектердің массалық саны.

Аналық ядроға қатысты еншілес  $A$  ядроның массасы мен  $Z$  зарядының өзгеруі радиоактивті орын ауыстыру заңымен сипатталады (Содди-Фаянстың радиоактивті орын ауыстыру ережесі).

$$\begin{cases} \dot{A} = A - 4 \\ \dot{Z} = Z - 2 \end{cases} \alpha - \text{ыдырау үшін}, \quad \begin{cases} \dot{A} = A \\ \dot{Z} = Z \pm 1 \end{cases} \beta - \text{ыдырау үшін}$$

мұндағы  $\dot{A}$  – еншілес ядроның массалық саны;

$\dot{Z}$  – еншілес ядро бөлшектерінің заряды.

Радиоактивті ыдырау нәтижесінде пайда болатын ядролар өз кезегінде радиоактивті болуы мүмкін. Бұл тізбектің немесе тұрақты элементпен аяқталатын бірқатар радиоактивті түрлендірулердің пайда болуына әкеледі. Мұндай тізбекті құрайтын элементтер жиынтығы радиоактивті отбасы деп аталады.

Табиғи радиоактивті ядро құрайды үш радиоактивті отбасы ( $U_{92}^{238}$ ) уран отбасы, ( $Th_{90}^{232}$ ) торий отбасы және ( $Ac_{89}^{235}$ ) актиний отбасы, кейін тізбек  $\alpha$  - және  $\beta$  – ыдырауларының тұрақты изотоптар қорғасын  $Pb_{82}^{206}$ ,  $Pb_{82}^{208}$  және  $Pb_{82}^{207}$  аяқталады (ерекше орнықтылығы ядролардың бар сиқырды саны протондардың – 82). Белгілі отбасылардың төртіншісі – нептуний отбасы, жасанды жолмен алынған  $Np_{93}^{237}$  трансурани элементінен басталып,  $Bi_{83}^{209}$  висмутында аяқталады.

## 2.2 Радиоактивті ыдырау заңы

Радиоактивті ыдырау өздігінен пайда болатын ядролардың табиғи радиоактивті түрленуі деп аталады. Радиоактивті ыдырауды бастан кешіретін аналық ядро деп аталады; пайда болған еншілес ядро әдетте қозады және оның негізгі күйге өтуі  $\gamma$ -фотонның шығарылуымен бірге жүреді. Осылайша, гамма-сәулелену негізгі формасы болып табылады қозған радиоактивті түрлендіру өнімдерінің энергиясын азайту.

Атом ядроларының өздігінен ыдырауы радиоактивті ыдырау заңына бағынады, оған сәйкес ыдырамаған ядролардың саны экспоненциалды заң бойынша уақыт өте азаяды (формула 21).

$$N = N_0 \exp(-\lambda t), \quad (21)$$

мұндағы  $N_0$  – бастапқы сәтте берілген көлемдегі ядролардың саны уақыт  $t = 0$ ;  
 $N$  –  $t$  сәтіне қарай бірдей көлемдегі ядролардың саны;  
 $\lambda$  – радиоактивті ыдырау тұрақтысы.

Радиоактивті ыдырау тұрақтысы 1 с ядросының ыдырау ықтималдығы және уақыт бірлігінде ыдырайтын ядролардың үлесіне тең.

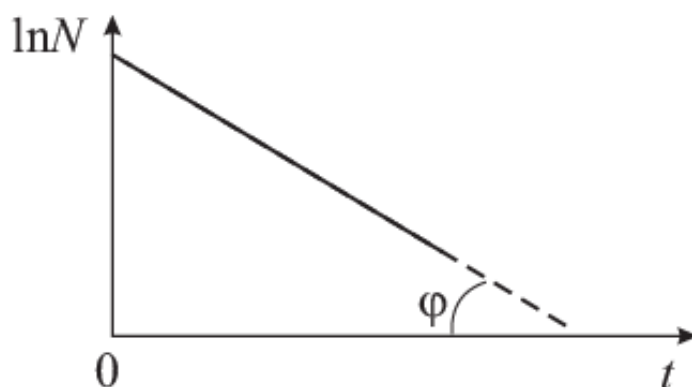
Радиоактивті ыдырау теориясы екі тұжырымды ұсынады:

- 1) ыдырау тұрақтысы сыртқы жағдайларға байланысты емес;
- 2)  $dt$  уақытында ыдырайтын ядролардың саны ядролардың қолма-қол санына пропорционалды. Ядро санының азаюы  $-dN$ :  $-dN = \lambda N dt$ .

Демек, ыдырау заңы айнымалыларды бөліп, содан кейін өрнекті біріктіру арқылы алынады:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt, \quad (22)$$

Радиоактивті ыдырау заңының орындылығын абсцисса осі бойынша  $t$  уақытын, ал  $\ln N$  ординат осі бойынша кейінге қалдыру арқылы тексеру ыңғайлы. Түзу сызық алынады (6 сурет), онда бұрыштың тангенсі  $\varphi$  көлбеу радиоактивті ыдырау тұрақтысын анықтайды  $\lambda$ :  $t g \varphi = \lambda$ .



6 сурет –  $\ln N$  уақытқа тәуелділігі

$t$  уақытында ыдырайтын ядролардың саны өрнек арқылы анықталады

$$N_0 - N = N_0(1 - e^{-\lambda t}), \quad (23)$$

Радиоактивті ыдырау процесінің қарқындылығы екі шамамен сипатталады:  $T_{1/2}$  жартылай шығарылу кезеңі радиоактивті ядроның орташа өмір сүру уақытында  $\tau$ .

Жартылай шығарылу кезеңі – радиоактивті ядролардың бастапқы саны орта есеппен екі есе азаятын уақыт.

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \exp(-\lambda T_{1/2})$$

Жартылай ыдырау кезеңі болады

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}, \quad (24)$$

Белгілі радиоактивті заттар үшін  $T_{1/2}$  жартылай шығарылу кезеңі  $10^{-7}$  с-тан  $10^{15}$  жылға дейін өзгереді.

$dN$  ядроларының жалпы өмір сүру ұзақтығы  $t|dN| = t\lambda N dt$ .

Барлық бастапқы ядролар үшін орташа өмір сүру ұзақтығы  $\tau$ :

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda N t dt = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda N_0 t \exp(-\lambda t) dt = \lambda \int_0^{\infty} t \exp(-\lambda t) dt = \frac{1}{\lambda}$$

Радиоактивті көздегі  $A$  нуклидінің белсенділігі 1 с-дағы үлгі ядроларында болатын ыдырау саны деп аталады.

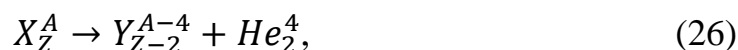
$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N, \quad (25)$$

Белсенділік бірлігі - это беккерель (Бк):

1 Бк – нуклидтің белсенділігі, онда 1 с үшін бір ыдырау актісі орын алады. Радиоактивті көздегі нуклид белсенділігінің жүйеден тыс бірлігі - кюри (Ки): 1 Ки =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк.

### 2.3 Альфа-ыдырау

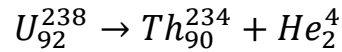
Альфа-ыдырау – атом ядросының басқа ядроға және  $\alpha$ -бөлшекке (гелий атомының ядросы) өздігінен ыдырау процесі. Бұл ыдырау схема бойынша радиоактивті орын ауыстыру заңына сәкес жүреді:



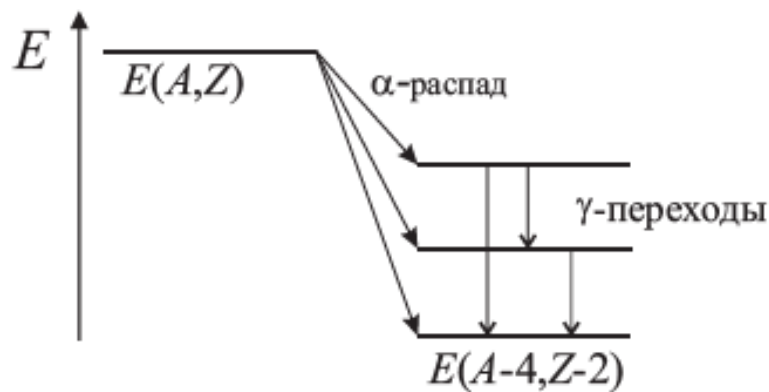
мұндағы  $X$  және  $Y$  сәйкесінше ыдырайтын (аналық) және түзілетін (еншілес) атом ядроларының химиялық элементтерінің таңбалары.

$\alpha$ -ыдырау нәтижесінде ядроның  $Z$  заряды екіге, ал  $A$  массалық саны төртке азаяды. Үеншілес ядросында аналық  $X$ -ге қарағанда 2 протон және 2 нейтрон аз.

Мысал ретінде тұрақсыз торий-234 изотопын және тұрақты гелий-4 изотопын қалыптастыру үшін  $U_{92}^{238}$  уран изотопының (уран-238) ыдырауын келтіруге болады:



Негізгі күйден альфа-ыдырауы массасы 200-ден асатын ауыр ядроларда  $A$  ғана байқалады.  $\alpha$ -ыдырау кезінде  $\gamma$ -сәулеленудің шығуы жиі кездеседі, өйткені еншілес ядро тек негізгі күйде ғана емес, қозған күйде де пайда болады (7 сурет).



7 сурет– Еншілес ядродағы  $\gamma$ -ауысулары бар мүмкін  $\alpha$ -ауысулар

$\alpha$ -сәулелену спектрі дискретті, ол  $\alpha$ -сәулеленудің жұқа құрылымы деп аталатын бірнеше сызықтардан тұрады және ядролардың энергетикалық деңгейлері туралы ақпарат береді.

Тек аналық ядроның массасы болған жағдайда ғана  $M_{\text{я}}(A, Z)$  еншілес ядроның массаларының қосындысынан үлкен  $M_{\text{я}}(A - 4, Z - 2)$  және  $\alpha$ -бөлшектер  $M_{\alpha}$ ,  $\alpha$ -ыдырау мүмкін

$$M_{\text{я}}(A, Z) > M_{\text{я}}(A - 4, Z - 2) + M_{\alpha}, \quad (27)$$

$T_{\alpha}$  ұшатын  $\alpha$ -бөлшектің кинетикалық энергиясының шамасын энергия мен импульстің сақталу заңдарына сүйене отырып табуға болады, ал масса центрі жүйесінде еншілес ядроның қайтарылуын есепке алғанда ол өрнек арқылы анықталады

$$T_{\alpha} = \frac{M_{\text{я}}(A-4, Z-2)}{M_{\text{я}}(A-4, Z-2) + M_{\alpha}} E_{\alpha}, \quad (28)$$

(28) формула  $\alpha$ -ыдырау энергиясын анықтайды.  $\alpha$ -ыдырау энергиясы оң мән болып табылады және 10 МэВ-тан аспайды.

## 2.4 Бета-ыдырау

Бета - ыдырау дегеніміз – ядроның өздігінен бірдей массалық саны  $A$  бар ядроға айналу процесі (изобаралар), электрон шығарумен (бета-минус-ыдырау), немесе позитрон (позитронды ыдырау немесе бета-плюс-ыдырау), немесе атомның электронды қабаттарының бірінен электронды алу (Е-түсіру), әдетте К-қабатынан (К-түсіру).

$\beta$ -белсенді ядролардың жартылай ыдырау кезендері өте кең шектерде  $10^2$  с-тан  $10^{18}$  жылға дейін өзгереді.

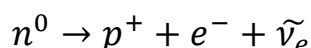
$\beta$ -ыдыраудың үш түрі белгілі:

1. электрондық ( $\beta^-$  - ыдырау)
2. позитрондық ( $\beta^+$  - ыдырау)
3. е-түсіру (К-түсіру)

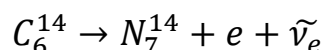
**Электрондық ( $\beta^-$  - ыдырау) схема бойынша жүреді:**



$\beta^-$  - ыдырауда әлсіз өзара әрекеттесу ана ядросының нейтрондарының бірін протонға айналдырады, электрон мен электронды антинейтрино шығарылады.



Электрондық  $\beta^-$  - ыдыраудың мысалы ретінде шамамен 5600 жылдық жартылай ыдырау кезеңі бар радиокөміртектен –  $^{14}\text{C}$  ядросының тұрақты азт –  $^{14}\text{N}$  ядросына айналуы болады:



Электрондық ( $\beta^-$  - ыдырау) аналық ядроның массасы болған кезде ғана пайда болады  $M_{\text{я}}(A, Z)$  еншілес ядроның массаларының қосындысынан үлкен  $M_{\text{я}}(A, Z + 1)$  және электрона  $m_e$ . Бұл шартты орындаған кезде  $\beta^-$  - ыдырау энергиясы оң болады:

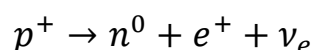
$$E_{\beta^-} = [M_{\text{я}}(A, Z) - M_{\text{я}}(A, Z + 1) - m_e]c^2, \quad (30)$$

**Позитрондық ( $\beta^+$  - ыдырау) схема бойынша жүреді:**

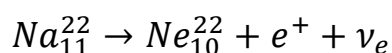




$\beta^+$  - ыдырауында әлсіз өзара әрекеттесу аналық ядродағы протондардың бірін позитрон мен электронды нейтрино шығаратын нейтронға айналдырады.



Мысал ретінде натрий изотопының ыдырауы болуы мүмкін  $Na^{22}$  тұрақты неон изотопын қалыптастыру  $Ne^{22}$ :



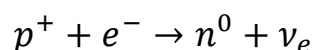
$\beta^+$  - ыдырауы үшін шарт орындалуы керек:

$$E_{\beta^+} = [M_{\text{я}}(A, Z) - M_{\text{я}}(A, Z - 1) - m_{e^+}]c^2, \quad (32)$$

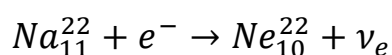
**е-түсіру** үшін процесс схемасы келесідей:



Аналық ядро өз атомындағы электрондардың бірін сіңіреді, нәтижесінде ядро протондарының бірі электронды нейтрино шығару арқылы нейтронға айналады:



Мысал ретінде  $Na^{22}$  натрий ядроларының  $Ne^{22}$  неон ядроларына айналуын келтіруге болады:



Бета-ыдырау сәулеленумен бірге жүруі мүмкін.

### **Ауыр ядролардың өздігінен бөлінуі**

Ядроның өздігінен бөлінуі – бұл сыртқы қозусыз пайда болатын бөліну, нәтижесінде сынықтар (жеңіл элементтердің ядролары) және бірнеше нейтрондар пайда болады.

### **Нуклондық радиоактивтілік**

Нуклондық радиоактивтілік – бұл ядроның протонды (протонның ыдырау) немесе нейтронды (нейтронның ыдырауы) шығаратын басқа ядроға өздігінен айналуы.

### **Кластерлік радиоактивтілік**

Кластерлік радиоактивтілік – ядроның ядролық фрагменттерді (кластерлерді) өздігінен шығару процесі  $\alpha$ -бөлшекке карағанда ауыр. Кластерлік радиоактивтіліктің себебі – туннельдік әсер.

## 2.5 $\gamma$ -сәулеленудің резонанстық сіңірілуі (Мёссбауэр эффектісі)

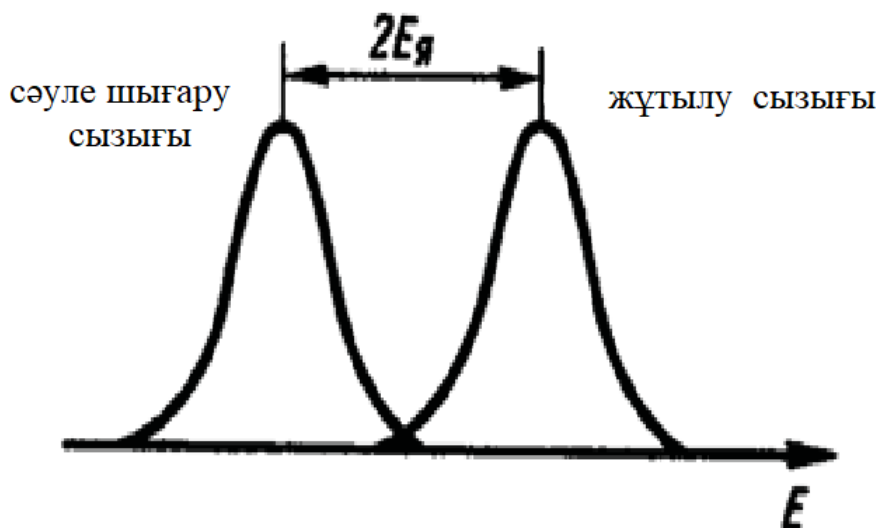
Мёссбауэр эффектісі дененің ішкі энергиясының өзгеруімен бірге жүрмейтін қатты денеде байланысқан атом ядроларының  $\gamma$ -кванттардың серпімді шығарылуы немесе жұтылу құбылысы деп аталады (яғни кристалдық тор – фонондардың тербеліс кванттарын қоздырмай жүреді) [1].

$\gamma$ -квантты бос атомның ядросы сәулелендіргенде немесе жұтқанда, импульстің сақталу заңына байланысты атом ядросы сәулеленген немесе жұтылған фотонның импульсіне тең импульс алады, демек кинетикалық энергия – ядроның кері кетуінің кинетикалық энергиясы ( $E_{\gamma}$ ).

Мұның салдары мынада:

- ядро энергиямен қозған күйден  $E$ -ден негізгі күйге ауысқанда, сәулелену процесінде ядроның кері кетуіне байланысты сәулеленетін  $\gamma$ -кванттың  $E_{\gamma}$  карағанда біршама аз энергиясы  $E$  болады:  $E_{\gamma} = E - E_{\gamma}$ ;
- ядро қозған кезде және ол негізгі күйден энергиямен қозған күйге ауысқанда  $E$ ,  $\gamma$ -кванттың энергиясы  $E$ -ден біршама үлкен болуы керек:  $E_{\gamma} = E + E_{\gamma}$ .

Сондықтан, сәулелену және сіңіру сызықтарының максимумдары бір-біріне қатысты 2-ге ауысуы керек, бұл бос ядролар үшін  $2 E_{\gamma}$  ауысуы керек, бұл бос ядролар  $\gamma$ -кванттардың резонанстық жұтылуын мүмкін етеді. (8 сурет).



8 сурет –  $\gamma$ -кванттардың резонанстық сіңірілуі

$\gamma$ -сәулеленудің резонанстық сіңірілуін ядроның қайтарылуына энергия шығынын өтеу кезінде ғана алуға болады.

Бұл жағдай қатты денеде атомдар бір-бірімен тығыз байланысқан кезде жүзеге асырылады және энергия мен кері импульс бір атомға емес, тұтастай алғанда бүкіл кристалға беріледі. Бұл жағдайда кері қайтару энергиясының жоғалуы өте аз болады, өйткені кристалдың массасы бір атомның массасынан әлдеқайда көп және бүкіл кристалл алатын кинетикалық энергия шамалы.

Жеткілікті төмен температурада, атомдардың қайтарылуына байланысты фонндардың қозу ықтималдығы төмендеген кезде,  $\gamma$ -сәулелену және сіңіру процестері дененің ішкі энергиясын өзгертпестен энергияны жоғалтпай (өте серпімді) практикалық түрде жүреді.

Мёссбауэр эффектiнiң арқасында сәулелену энергиясын немесе жиiлiгiн салыстырмалы дәлдікпен өлшеуге болады  $\frac{\Gamma}{E} = 10^{-15} - 10^{-17}$ .

### 3 Радиоактивті сәулелену мен бөлшектерді тіркеуге арналған аспаптар

Радиоактивті сәулеленуді ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) және бөлшектерді бақылау және тіркеу олардың қорғашаған орта атомдарының иондауын немесе қозуын шығару қабілетіне негізделген. Кейбір құрылдыларды қарастырамыз.

*Сцинтилляциялық есептегіш* – ядролық бөлшектердің детекторы, оның негізгі элементтері сцинтиллятор (бөлшектер түскен кезде жарық жарқылын шығаратын кристаллофосфор) және фотоэлектрондық көбейткіш (ФЭУ) болып табылады, бұл әлсіз жарық жарқылдарын электронды аппаратурамен тіркелген электрлік импульстарға айналдыруға мүмкіндік береді.

*Иондану есептегіштері* – газбен толтырылған электр конденсаторлары – зарядталған бөлшектердің газ иондануын тудыру қабілетіне негізделген бөлшектер детекторлары, содан кейін электр өрісінде иондану өнімдерін бөлу. Егер есептегіш бөлшектердің әсерінен түзілген иондарды ғана тіркесе, онда мұндай есептегіш импульстік иондау камерасы деп аталады. Бастапқы иондардың атомдармен және газ молекуларымен соқтығысуына байланысты екінші реттік иондау негізгі рөл атқаратын есептегіштер, нәтижесінде газда разряд пайда болады, разрядты есептегіштер деп аталады. Разряд есептегішінің мысалы – Гейгер-Мюллер есептегіші.

*Жартылай өткізгіш есептегіштер* – жартылай өткізгіш диодтар, кейбір тіркелген бөлшектер арқылы өту диод арқылы электр тогының пайда болуына әкеледі.

*Вильсон камерасы* – бейтарап газбен толтырылған тығыз поршенді цилиндр. Күрт (адиабаталық) кеңею кезінде газ қаныққан болады және камера арқылы ұшатын бөлшектердің траекторияларында тұман тректері пайда болады, олар суретке түседі.

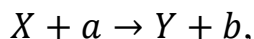
*Көпіршікті камера* – құрылымдық жағынан Вильсон камерасына ұқсас және мөлдір, қызып кеткен сұйықтықпен толтырылған. Камера арқылы ұшқан зарядталған бөлшек сұйықтықтың қатты қайнауына әкеледі және бөлшектің траекториясы газ көпіршіктерінің тізбегімен белгіленеді – Вильсон камерасындағыдай суретке түсетін трек түзеді. Көпіршікті камераның тиімді көлемі. Вильсон камерасына қарағанда 2-3 ретке артық, өйткені сұйықтықтар газдарға қарағанда әлдеқайда тығыз.

*Ядролық фотоэмульсиялар* – қалың қабатты фотографиялық эмульсиялар, зарядталған бөлшектердің өтуі иондануды тудырады, нәтижесінде эмульсияда жасырын кескін пайда болады. Көрсетілгеннен кейін зарядталған бөлшектердің іздері металл күміс дәндерінің тізбегі ретінде анықталады. Жоғары энергиялы бөлшектерді зерттеу үшін пластиналардың аяқтары қолданылады – бөлшектердің жолына орналастырылған және микроскоппен өлшенгеннен кейін таңбаланған фотоэмульсиялық пластиналардың көп саны.

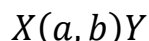
## 4 Ядролық реакциялар

Ядролық реакция – бұл әртүрлі элементтердің және мүмкін элементар бөлшектердің өзара әрекеттесуінің күрделі процесі.

Символдық түрде реакциялар келесідей жазылады:



немесе қысқаша болады



мұндағы  $X$  және  $Y$  – бастапқы және соңғы ядролар;

$a$  и  $b$  – бомбалаушы және ядролық реакцияда шығарылатын (немесе шығарылатын) бөлшектер.

Кез-келген ядролық реакцияда келесі заңдары орындалады, оларсыз реакция мүмкін емес:

- 1) нуклон сандары  $A_1 + A_2 = A_3 + A_4$ ;
- 2) заряды  $Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4$ ;
- 3) релятивистік толық энергия  $E_1 + E_2 = E_3 + E_4$ ;
- 4) импульс  $p_1 + p_2 = p_3 + p_4$ .

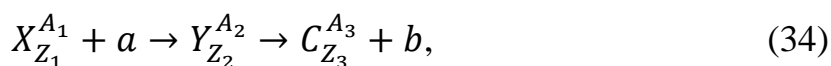
Ядролық реакциялар бөлінеді:

- 1) экзотермиялық (энергияны бөледі);
- 2) эндотермиялық (энергияны сіңіреді).

Ядролық реакциялар бірнеше сатыда жүреді.

Бірінші кезеңде ұшатын бөлшек мақсатты ядроға жабысып, құрама ядро немесе қосылыс ядросын құрайды және оның энергиясы кез-келген нуклонға берілмейді, бірақ құрама ядроның барлық бөлшектері арасында біркелкі бөлінеді, сондықтан олардың ешқайсысы ядродан шығуға жеткілікті энергия алмайды. Құрама ядро сұйық тамшыдағы бөлшектердің қозғалысы сияқты ретсіз қозғалыстар жасайтын қозған бөлшектердің статистикалық жүйесі ретінде қарастырылады. Күрделі ядро бөлшектері арасындағы козу энергиясының біркелкі таралуынан кездейсоқ ауытқулар нәтижесінде осы бөлшектің ядродан шығуы үшін жеткілікті энергия олардың біреуіне шоғырланады.

Ядролық реакцияның екінші кезеңі уақыт өткеннен кейін жүреді ( $10^7 \div 10^8$ ) ·  $\tau_{\text{я}}$  мен бірнеше кезеңнен кейін, мұндағы  $\tau_{\text{я}}$  – тән ядролық уақыт ( $\sim 10^{-22}$  с). Қосылыс ядросын құрайтын ядролық реакция схемасы:



мұндағы  $X_{Z_1}^{A_1}$  – бастапқы мақсатты ядро;

$a$  – ұшатын бөлшек;

$Y_{Z_2}^{A_2}$  – негізгі ядро;

$C_{Z_3}^{A_3}$  – ядро - ядролық реакцияның өнімі;

$b$  -реакция нәтижесінде ядродан шыққан бөлшек.

Егер  $a \equiv b$  болса, онда бөлшектің ядромен шашырауы орын алады: серпімді –  $E_b = E_a$  кезінде, серпімді емес -  $E_b \neq E_a$  кезінде. Егер шығарылған бөлшек ұсталғанмен бірдей болмаса ( $b \neq a$ ), онда сөздің тура мағынасында ядролық реакция жүреді [1].

Ядролық реакциялар төрт сыныпқа бөлінеді. Төменде кестеде реакциялардың түрлері және олардың орындалуы көрсетілген (1 кесте).

1 кесте - Ядролық реакцияның түрлері

№ п/п	Ядролық реакциялардың түрі	Реакцияны жүзеге асыру
1	оларға қатысатын бөлшектердің тұқымы	- нейтрондардың әсерінен; - зарядталған бөлшектер; - $\gamma$ -кванттар
2	олардың бөлшектерін тудыратын энергия	- шағын реакциялар; - орта энергиялар, - жоғары энергиялар
3	оларға қатысатын ядролардың бір түрі болып жатқан	- жеңіл ( $A < 50$ ); - орташа ( $50 < A < 100$ ); - ауыр ( $A > 100$ ) ядролардағы реакциялар
4	Ядролық қайта құрулардың пайда болу сипаты	- нейтрондардың, зарядталған бөлшектердің шығарылуымен реакциялар; - ұстау реакциялары (бұл реакциялар жағдайында құрама ядро ешқандай бөлшектер шығармайды, бірақ бір немесе бірнеше $\gamma$ - кванттар шығаратын негізгі күйге өтеді)

Бұл реакциялар есептерді шешу мысалдарында қарастырылады.

#### 4.1 Нейтрондардың әсерінен ядролық реакциялар

Жылдамдыққа (энергияға) байланысты нейтрондар баяу және жылдам болып бөлінеді. 2 кестеде осы тәуелділіктер көрсетілген.

## 2 кесте – Нейтрон жылдамдығының тәуелділігі

Атау түрі	Нейтрондардың жылдамдығы
1	2
Баяу нейтрондар	
ультра суық	$\leq 10^{-7}$ эВ
өте суық	$10^{-7} \div 10^{-4}$ эВ
суық	$10^{-4} \div 10^{-3}$ эВ
жылу	$10^{-3} \div 0,5$ эВ
резонанстық	$0,5 \div 10^4$ эВ
Жылдам нейтрондар	
жылдам	$10^4 \div 10^8$ эВ
жоғары энергиялы	$10^8 \div 10^{10}$ эВ
релятивистік	$\geq 10^{10}$ эВ

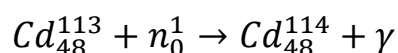
Модераторлар деп аталатын заттарда (графит, ауыр су  $D_2O$ ,  $HDO$ , бериллий қосылыстары), жылдам нейтрондар ядроларға таралады және олардың энергиясы модератор атомдардың жылу қозғалысының энергиясына айналады.

Баяу нейтрондар ядролық реакцияларды қоздыруда тиімді, өйткені олар атом ядросының жанында салыстырмалы түрде ұзақ уақыт болуы мүмкін, сондықтан нейтронды ядроға түсіру ықтималдығы өте жоғары.

Баяу нейтрондар ядролардағы серпімді шашыраумен сипатталады (типті реакция  $(n, n)$ ) және радиациялық ұстау (типті реакция  $(n, \gamma)$ ).  $(n, \gamma)$  типті реакция бастапқы заттың жаңа изотопының пайда болуына әкеледі.



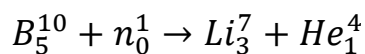
Мысалы:



Жеңіл ядролардағы жылу нейтрондарының әсерінен протондар мен бөлшектердің  $(n, p)$  және  $(n, \alpha)$  типті реакциялар) шығарылуымен нейтрондарды алу реакциялары байқалады.

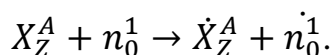


(n,  $\alpha$ ) типті реакцияның мысалы.



Бірақ негізінен (n, p) және (n,  $\alpha$ ) типті реакциялар жылдам нейтрондардың әсерінен жүреді, өйткені бұл жағдайда энергия протондар мен  $\alpha$ - бөлшектердің ұшуына кедергі келтіретін потенциалды тосқауылды жеңуге жеткілікті.

Жылдам нейтрондар үшін серпімді емес шашырау (n, n') бар:



Ядродан ұшатын нейтронның  $n_0^1$  ұшатын нейтронның  $n_0^1$  энергиясынан аз энергиясы бар, ал нейтронның ұшуынан қалған ядро  $X_Z^A$  қозған күйде болады, сондықтан оның қалыпты күйге өтуі  $\gamma$ -кванттың шығарылуымен бірге жүреді.

Электрондардың энергиясы 10 МэВ-қа жеткенде (n, 2n) типті реакциялар мүмкін болады. Мысалы, реакция нәтижесінде

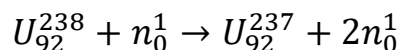
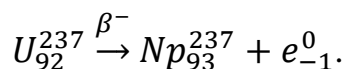


Схема бойынша ыдырайтын белсенді изотоп  $\beta^-$  түзіледі



## 4.2 Ядролық бөліну реакциялары

Ауыр ядролардың бөліну реакциясы нейтронның резонанстық ұсталуымен қозған ауыр қосылыс ядросы шамамен екі тең бөлікке бөлінуі мүмкін.

Алынған бөліктер бөліну сынықтары болады. Ауыр ядролардың тұрақсыздығы ядролардағы көптеген протондардың өзара итерілуіне байланысты.

Ауыр ядроның екі сыныққа бөлінуі әр нуклонға шамамен 1 МэВ энергия бөлумен бірге жүреді.

Ядролардың бөліну ықтималдығы активтену энергиясымен анықталады – ядроның бөліну реакциясын жүзеге асыруға қажетті минималды энергия. Аз қосу энергияларында бөлінудің активтену энергиясынан гөрі, тамшы



ядросының деформациясы критикалық деңгейге жетпейді, ядро бөлінбейді және  $\gamma$ -квантты шығару арқылы негізгі энергетикалық күйге оралады.

Ауыр ядролар бөлуге қабілетті, егер олар үшін  $Z^2/A \geq 17$  шырты орындалса,  $Z^2/A$  – эбөлу парметрі болып табылады. Бұл шарт күмістен бастап барлық ядролар үшін орындалады, ол үшін  $Z^2/A \approx 20$ .

Бөліну реакциясында пайда болған лездік нейтрондардың әрқайсысы көршілес бөлінетін зат ядроларымен әрекеттесіп, оларда бөліну реакциясын тудырады.

Тізбекті реакцияның пайда болу шарты – көбейетін нейтрондардың болуы.

Нейтрондардың көбею коэффициенті  $k$  реакцияның кейбір буынында пайда болатын нейтрондар санының алдыңғы буындағы осындай нейтрондар санына қатынасы деп аталады.

Тізбекті реакцияның дамуының қажетті шарты:  $k > 1$ . Мұндай дамушы реакция деп аталады.  $k = 1$  кезіндегі өзін-өзі қамтамасыз ететін реакция жүреді.  $k < 1$  кезінде әлсірейтін реакция жүреді.

Тізбекті реакциялар басқарылатын және басқарылмайтын болып бөлінеді. Атом бомбасының жарылуы бақыланбайтын реакцияның мысалы болып табылады. Басқарылатын тізбекті реакциялар ядролық реакторда жүзеге асырылады.

Осылайша, ядролық реактор басқарылатын тізбекті бөлу реакциясы жүзеге асырылатын және сақталатын құрылғы деп аталады.

Атом ядроларының синтез реакциясы жеңіл ядролардан ауыр ядроларға түзілу деп аталады. Синтез реакцияларында ядролық байланыстың меншікті энергиясы дейтерий мен тритий ядроларынан литий мен гелийге ауысқанда күрт артады. Бұл энергияның көп бөлінуіне әкеледі.

Жеңіл ядролардың синтез реакциялары, олардың кулондық итеріуін жеңуге байланысты, тек  $10^8 - 10^9$  К шамасында өте жоғары температурада тиімді жүруі мүмкін, мұндай реакциялар синтездің термоядролық реакциялары деп аталады. Және олар плазмалық күйде болатын затта пайда болады (көздер – жұлдыздардың энергиясы). Сутегі ядролары гелий ядроларына айналатын күнге термоядролық реакциялар екі термоядролық циклдің бірі түрінде жүруі мүмкін: протон-протон циклі және көмертегі-азот циклі.

## 5 Элементар бөлшектер

Әрбір элементар бөлшектің антибөлшектегі бар, ол сол таңбамен белгіленеді, бірақ оның үстіне тильда қосылады.

Фотонның антибөлшектері,  $\pi^0$  - және  $\eta^0$  – мезондар бөлшектердің өздерімен бірдей. Бұл бөлшектер шынымен бейтарап, олар жойылуға қабілетті емес, бірақ барлық элементар бөлшектердің негізгі қасиеті болып табылатын өзара түрленулерді бастап кешіреді.

Элементар бөлшектер үш топқа біріктіріледі: фотондар, лептондар және адрондар.

Фотондар тоюы бір бөлшектен тұрады – фотон – электромагниттік өзара әрекеттесу кванты.

Лептон топтары электрон, мюон, электрондық және мюондық нейтрино, ауыр лептон –  $\tau$ -лептон (таон), таондық нейтрино, сондай-ақ оларға сәйкес келетін антибөлшектерден тұрады. Олар тек электромагниттік және әлсіз өзара әрекеттесуге қатысады.

Адрондар тобына мезондар (пиондар мен каондар) және бариондар (нуклондар – протон, нейтрон және тұрақсыз бөлшектер) жатады. Барионның ыдырауы кезінде басқа бөлшектермен бірге әрқашан жаңа барион пайда болады – барион зарядының сақталу заңы. Адрондар электромагниттік және әлсіздермен бірге күшті өзара әрекеттеседі.

Адрондар кварктардан тұрады. Әрбір мезон  $M$  бір кварк  $q$  және бір антикварк  $\bar{q}$ , әрбір барион  $B$  – үш кварк  $q$ .

$$M = q \cdot \bar{q},$$

Тиісінше барион:

$$B = qqq$$

Лептондар саны кварк түрлерінің санына тең – кварк-лептон симметриясының принципі.

Лептондар сияқты үшдублет немесе үш ұрпақ (u, d), (c, s), (t, b) құрайтын алты типті кварктар бар:

- 1) жоғары (up) - u
- 2) төмен (down) - d
- 3) «сиқырлы» (charm) - c
- 4) «оғаштық» (strange) - s
- 5) «ақиқат» (true) - t
- 6) «сүйкімді» (beauty) - b

Кварктарда антибөлшектер бар - антикварктар.

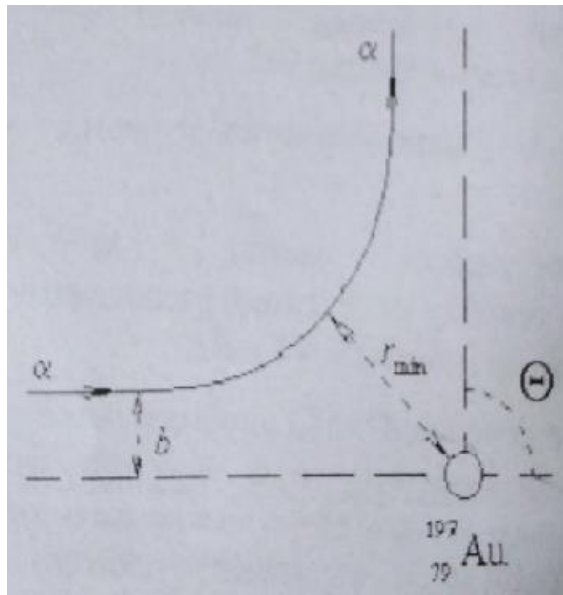
## Есептерді шешу мысалдары

### Тақырыбы: Атом ядроларының қасиеттері

#### 1 есеп

Кинетикалық энергиясы бар альфа-бөлшегі  $T=6,5 \text{ МэВ}$   $Au^{197}$  алтын ядросында Резерфордтың шашырауын сезінеді. Анықтау:

- 1) бұрышпен бақыланатын альфа бөлшектері үшін  $b$  соқтығысу параметрі  $\theta = 90^\circ$ ;
- 2) альфа-бөлшектерінің ядроға жақындауының минималды  $r_{min}$  қашықтығы;
- 3) осы нүктедегі альфа бөлшектерінің кинетикалық ( $T'$ ) және потенциалдық ( $E'$ ) энергиясы.



9 сурет – Алтын ядросындағы Резерфордтың шашырауы

Шешуі:

- 1) Жылжымалы ядроның Кулон өрісіндегі релятивистік емес зарядталған бөлшек шашырайтын  $\theta$  бұрышы қатынаспен анықталады

$$\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{2bT}, \quad (37)$$

мұндағы  $Z_1$  – бөлшектің заряды;

$Z_2$  – ядро заряды.

Содан кейін

$$b = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{2T \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}}, \quad (38)$$

Соқтығысу параметрін есептейік  $b$ :

$$b = \frac{2 \cdot 79 \cdot 1,44 \text{ МэВ} \cdot \Phi_{\text{М}}}{2 \cdot 665 \text{ МэВ}} \approx 18 \text{ ФМ}$$

2) Полярлық координаттарда энергияның сақталу заңын жазамыз

$$\frac{m}{2} (\dot{r}^2 + r^2 \dot{\varphi}^2) + \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} = \frac{mV^2}{2}, \quad (39)$$

және импульстің моментін сақтау заңы

$$m b v = m r^2 \dot{\varphi}, \quad (40)$$

$r=r_{\min}$  кезінде  $\dot{r} = 0$  туындысы. Біз теңдеулер жүйесін аламыз:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{m r_{\min}^2 \dot{\varphi}^2}{2} + \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r_{\min}} = \frac{m v^2}{2} \\ \dot{\varphi} = \frac{b v}{r_{\min}^2} \end{array} \right\}$$

Екінші теңдеуді біріншіге ауыстырып  $b$ , өрнегін ескере отырып, біз аламыз

$$r_{\min} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{2T} \left[ 1 + \frac{1}{\sin \frac{\theta}{2}} \right]$$

Ауыстыру

$$r_{\min} = \frac{2 \cdot 79 \cdot 1,44 \text{ МэВ} \cdot \Phi_{\text{М}} \cdot (1 + 1,41)}{2 \cdot 6,5 \text{ МэВ}} \approx 42 \text{ ФМ}$$

3) ядроға ең үлкен жақындау нүктесіндегі бөлшектің потенциалдық энергиясы

$$\dot{E} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r_{\min}}$$

Энергияны табамыз

$$\dot{E} = \frac{2 \cdot 79 \cdot 1,44 \text{ МэВ} \cdot \Phi_{\text{М}}}{42 \text{ ФМ}} \approx 5,4 \text{ МэВ}$$

Және сәйкесінше,

4) кинетикалық энергия

$$\dot{T} = T - \dot{E}$$

Кинетикалық энергияны анықтаймыз

$$T = 6,5 \text{ МэВ} - 5,4 \text{ МэВ} = 1,1 \text{ МэВ}.$$

### 2 есеп

Кинетикалық энергиясы  $\alpha$ -бөлшектің шашырау қимасын есептеңіз  $T = 5 \text{ МэВ}$   $Pb^{208}$  ядросының Кулон өрісі  $90^\circ$ -ден астам бұрыштарда.

Шешуі:

Қажетті қиманы Резерфорд формуласын біріктіру арқылы аламыз

$$\begin{aligned} \sigma(\theta > \theta_0) &= \int_{\Omega} \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega = \int_{\theta_0}^{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{d\sigma}{d\Omega} \sin\theta \, d\theta \, d\varphi = \\ &= 2\pi \int_{\theta_0}^{\pi} \left( \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4T} \right)^2 \frac{\sin\theta \, d\theta}{\sin^4 \frac{\theta}{2}} = \\ &= 4\pi \left( \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4T} \right)^2 \left( -\frac{1}{\sin^2 \frac{\theta}{2}} \right) \Big|_{\theta_0}^{\pi} = 4\pi \left( \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4T} \right)^2 \left( \frac{1}{\sin^2 \frac{\theta}{2}} - 1 \right) = \\ &= 4\pi \left( \frac{Z_1 Z_2 e^2}{2T} \right)^2 = \\ &= 4 \cdot 3,14 \left( \frac{2 \cdot 82 \cdot 1,44 \text{ МэВ} \cdot \Phi_M}{2 \cdot 5 \text{ МэВ}} \right)^2 = 7000 \text{ ФМ}^2 = 70 \text{ б}. \end{aligned}$$

### 3 есеп

Қалыңдығы  $l = 1 \text{ мкм}$  алтын тақтайшаны ағын тығыздығы  $j = 10^5$  бөлшек/ $\text{см}^2 \cdot \text{с}$   $\alpha$  – бөлшектің кинетикалық энергиясы  $T = 5 \text{ МэВ}$ . Дене бұрышының бірлігіне қанша  $\alpha$  – бөлшек сәуле өсіне  $\theta = 170^\circ$  бұрышында орналасқан детекторға секундына түседі? Мақсатты сәуленің дақ ауданы  $S = 1 \text{ см}^2$ .

Шешуі:

Бірлік дене бұрышына уақыт бірлігіне шашыраған бөлшектердің саны

$$N = j S_n \left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right)$$

мұндағы  $n$  – нысананың беткі ауданының бірлігіне шаққандағы ядролар саны;

$\frac{d\sigma}{d\Omega}$  – серпімді шашыраудың дифференциалды қимасы.

Нысана бетінің бірлігіне шаққандағы ядролар саны

$$n = \frac{\rho l N_A}{A}$$

мұндағы  $\rho$  – мишені заттың тығыздығы;  
 $l$  – нысананың қалыңдығы;  
 $A$  – мишені заттың массалық саны;  
 $N_A$  – Авогадро саны.

Детектор арқылы бөлшектер ағыны

$$N = \frac{j S_p l N_A}{A} \left( \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4T} \right) \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

Ауыстыру

$$N = \frac{10^3 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot 1 \text{ см}^2 \cdot 19,3 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \cdot 10^{-4} \text{ см} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}}{197 \text{ г/моль}} \cdot \left( \frac{2 \cdot 79 \cdot 1,44 \text{ МэВ} \cdot \text{Фм} \cdot 10^{-13} \text{ см/Фм}}{4 \cdot 5 \text{ МэВ}} \right)^2 \cdot 1,015 \approx 0,77 \text{ с}^{-1}$$

#### 4 есеп

Энергиясы бар электрондардың серпімді шашырауы кезінде  $T = 750 \text{ МэВ}$   $\text{Ca}^{40}$  ядроларында көлденеі қимада  $\theta_{min} = 18^\circ$  бұрышында дифракциялық минимум байқалады. Ядро радиусын бағалау  $\text{Ca}^{40}$ .

Шешуі:

Бірінші минимумның серпімді шашырау қимасындағы орнын  $\theta_{min}$  радиус  $R$  дискісіндегі жазық толқын дифракциясының формуласы арқылы бағалауға болады.

$$\sin \theta_{min} = \frac{0,6\lambda}{R}$$

Электрондардың ультрарелятивистік екенін ескере отырып, біз аламыз

$$R = \frac{0,6\lambda}{\sin \theta_{min}} = \frac{0,6}{\sin \theta_{min}} \frac{2\pi\hbar c}{T}$$

$$R = \frac{0,6 \cdot 6,28 \cdot 197 \text{ МэВ} \cdot \text{Фм}}{750 \text{ МэВ} \cdot 0,31} \approx 3,2 \text{ Фм.}$$

### 5 есеп

R ядросының радиусының  $A(A > 10)R \approx r_0 A^{1/3}$  нуклондар санына эмпирикалық тәуелділігі.  $r_0 \approx 1,23 \cdot 10^{-13}$  см = 1,23 Фм параметрі барлық ядролар үшін шамамен бірдей. Атом ядроларының радиустарын бағалау  $Al^{27}$ ,  $Zr^{90}$ ,  $U^{238}$ .

Шешуі:

$$\text{Үшін } Al^{27} R = 1,23 \text{ Фм} \cdot 27^{\frac{1}{3}} = 3,7 \text{ Фм.}$$

$$\text{Үшін } Zr^{90} R = 1,23 \text{ Фм} \cdot 90^{\frac{1}{3}} = 5,5 \text{ Фм.}$$

$$\text{Үшін } U^{238} R = 1,23 \text{ Фм} \cdot 238^{\frac{1}{3}} = 7,6 \text{ Фм.}$$

### 6 есеп

Ядролық заттың тығыздығын бағалау.

Шешуі:

Ядродағы бір нуклонның массасы  $m_N \approx 1$  а. е. м. =  $1,66 \cdot 10^{-24}$  г. Ядролық заттың тығыздығы – ядроның массасы оның көлеміне бөлінеді.

$$\rho = \frac{m_N A}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{3m_N}{4\pi r_0^3},$$

Ядролық заттың тығыздығын есептейік

$$\rho = \frac{3 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24}}{4 \cdot 3,14 \cdot (1,3 \cdot 10^{-13} \text{ см})^3} = 1,8 \cdot \frac{10^{14} \text{ г}}{\text{см}^3} = 180 \frac{\text{млн.тонн}}{\text{см}^3}$$

Ядролық заттың тығыздығы A-ға тәуелді емес.

### 7 есеп

Энергетикалық бірліктердегі нейтрон мен протонның массалары сәйкесінше  $m_n = 936,6$  МэВ және  $m_p = 938,3$  МэВ құрайды. Егер дейтронның байланыс энергиясы  $E_{\text{байл.}}(2,1) = 2,2$  МэВ болса, энергетикалық бірліктердегі  $H^2$  ядросының массасын анықтаңыз.

Шешуі:

Ядроның массасы формула бойынша анықталады

$$M(A, Z) = Zm_p + (A - Z)m_n - E_{\text{св}}(A, Z)$$

мұндағы  $Z$  – ядро заряды;  
 $A$  – ядро массасы.

Сонда дейтрон үшін масса болады:

$$M(2,1) = 1 \cdot 938,3 \text{ МэВ} + 1 \cdot 939,6 \text{ МэВ} - 2,2 \text{ МэВ} = 1875,7 \text{ МэВ}$$

### 8 есеп

Бейтарап атомның массасы  $O^{16}m_{\text{ат}}(A, Z) = 15,9949$  м.а.ө. Ядро байласының меншікті энергиясын анықтаңыз  $O^{16}$ .

Шешуі:

Ядро байланысының меншікті энергиясы

$$E_{\text{менш}}(A, Z) = \frac{E_{\text{св}}(A, Z)}{A}$$

мұндағы  $E_{\text{байл}}(A, Z)$  – ядроның байланыс энергиясы;  
 $A$  – массалық сан.

Ядроның толық байланыс энергиясы

$$\begin{aligned} E_{\text{св}}(A, Z) &= [Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}(A, Z)]c^2 = \\ &= [Zm_H + (A - Z)m_n - M_{\text{а}}(A, Z) - Zm_e]c^2 \end{aligned}$$

1 м.а.ө. = 931,49 МэВ, массалары үшін энергия бірліктерін қолдана отырып, ядро үшін  $O^{16}$  аламыз:

$$\begin{aligned} E_{\text{байл}} &= \frac{8 \cdot 938,27 \text{ МэВ} + (16 - 8) \cdot 939,57 \text{ МэВ} - 15,9949 \cdot 931,49 \text{ МэВ} - 8 \cdot 0,511 \text{ МэВ}}{16} \\ &= 7,5 \text{ МэВ/нуклон} \end{aligned}$$

### 9 есеп

Бейтарап атомдардың массалары м.а.ө.:  $O^{16} - 15,9949$ ;  $O^{15} - 15,0030$ ;  $N^{15} - 15,0001$ .  $O^{16}$  ядросындағы нейтрон мен протонның бөліну энергиясы неге тең  $O^{16}$ ?

Шешуі:

Нейтронның бөліну энергиясы

$$E_n(A, Z) = m_n + m(A - 1, Z) - m(A, Z)$$

протон үшін

$$E_p(A, Z) = m_p + m(A - 1, Z - 1) - m(A, Z)$$



Екі формулада да массалар энергия бірлігінде болуы керек.

$O^{16}$  ядро үшін

$$E_n = 936,6 \text{ МэВ} + (15,0030 \text{ а. е. м.} - 15,9949 \text{ а. е. м.}) \cdot 931,5 \text{ МэВ} = 15,6 \text{ МэВ}$$

$$E_p = 938,3 \text{ МэВ} + (15,0001 \text{ а. е. м.} - 15,9949 \text{ а. е. м.}) \cdot 931,5 \text{ МэВ} = 15,6 \text{ МэВ}$$

### 10 есеп

Формуламен көмегімен Вайцеккер есептеу энергия бөлімшесінің нейтрондар тіпті-тақ изотоптарда  $Ca^{38}$ ,  $Ca^{40}$ ,  $Ca^{48}$ .

Шешуі:

Ядродағы нейтронның бөліну энергиясы  $(A, Z)$

$$E_n(A, Z) = [m_n + m(A - 1, Z) - m(A, Z)]c^2$$

Ядро массасы

$$m(A, Z)c^2 = [Zm_p + (A - Z)m_n]c^2 - E_{св}(A, Z)$$

Нейтронның бөліну энергиясы

$$E_n(A, Z) = [m_n + Zm_p + (A - 1 - Z)m_n]c^2 - E_{св}(A - 1, Z) - \\ - [Zm_p + (A - Z)m_n]c^2 = E_{св}(A, Z) - E_{св}(A - 1, Z)$$

Атом ядроларының байланыс энергиясы Вайцеккер формуласы арқылы сипатталады

$$E_{св}(A, Z) = a_1A - a_2A^{\frac{2}{3}} - a_3 \frac{Z(Z - 1)}{A^{\frac{1}{3}}} - a_4 \frac{\left(\frac{A}{2} - Z\right)^2}{A} + a_5 \frac{1}{A^{\frac{3}{4}}}$$

мұндағы  $a_1 = 15,78 \text{ МэВ};$

$a_2 = 17,8 \text{ МэВ};$

$a_3 = 0,71 \text{ МэВ};$

$a_4 = 94,8 \text{ МэВ};$

$a_5 = 0$  тақ ядролар үшін  $A$ ,  $a_5 = +34 \text{ МэВ}$  жұп ядролар үшін жәнетақ ядролар үшін  $a_5 = -34 \text{ МэВ}$ .

Содан кейін ядролар үшін  $(A, Z)$  байланыс энергиясы болады:  
 $Ca^{38}$

$$E_{CB}(38,20) = 15,78 \text{ МэВ} \cdot 38 - 17,8 \text{ МэВ} \cdot 38^{\frac{2}{3}} - 0,71 \text{ МэВ} \frac{20(20-1)}{38^{\frac{1}{3}}} -$$

$$-94,8 \text{ МэВ} \frac{\left(\frac{38}{2}-20\right)^2}{38} + \frac{38,4 \text{ МэВ}}{38^{\frac{3}{4}}} = 317,9 \text{ МэВ}.$$

Ca<sup>40</sup>

$$E_{CB}(40,20) = 15,78 \text{ МэВ} \cdot 40 - 17,8 \text{ МэВ} \cdot 40^{\frac{2}{3}} - 0,71 \text{ МэВ} \frac{20(20-1)}{40^{\frac{1}{3}}} +$$

$$+ \frac{34 \text{ МэВ}}{40^{\frac{3}{4}}} = 3463 \text{ МэВ}.$$

Ca<sup>48</sup>

$$E_{CB}(48,20) = 15,78 \text{ МэВ} \cdot 48 - 17,8 \text{ МэВ} \cdot 48^{\frac{2}{3}} - 0,71 \text{ МэВ} \frac{20(20-1)}{48^{\frac{1}{3}}} -$$

$$-94,8 \text{ МэВ} \frac{\left(\frac{48}{2}-20\right)^2}{48} + \frac{34 \text{ МэВ}}{48^{\frac{3}{4}}} = 4184 \text{ МэВ}.$$

*Ядролар үшүн (A - 1, Z) байланыс энегрисы болады:*

Ca<sup>37</sup>

$$E_{CB}(37,20) = 15,78 \text{ МэВ} \cdot 37 - 17,8 \text{ МэВ} \cdot 37^{\frac{2}{3}} - 0,71 \text{ МэВ} \frac{20(20-1)}{37^{\frac{1}{3}}} -$$

$$-94,8 \text{ МэВ} \frac{\left(\frac{37}{2}-20\right)^2}{37} = 299,5 \text{ МэВ}.$$

Ca<sup>39</sup>

$$E_{CB}(39,20) = 15,78 \text{ МэВ} \cdot 39 - 17,8 \text{ МэВ} \cdot 39^{\frac{2}{3}} - 0,71 \text{ МэВ} \frac{20(20-1)}{39^{\frac{1}{3}}} -$$

$$-94,8 \text{ МэВ} \frac{\left(\frac{39}{2}-20\right)^2}{39} = 330,6 \text{ МэВ}.$$

Ca<sup>47</sup>

$$E_{CB}(47,20) = 15,78 \text{ МэВ} \cdot 47 - 17,8 \text{ МэВ} \cdot 47^{\frac{2}{3}} - 0,71 \text{ МэВ} \frac{20(20-1)}{47^{\frac{1}{3}}} -$$

$$-94,8 \text{ МэВ} \frac{\left(\frac{47}{2}-20\right)^2}{47} = 410,3 \text{ МэВ}.$$

Нейтронның бөліну энергиясы:

$$\text{Ca}^{38} - E_n(38,20) = 317,9 \text{ МэВ} - 299,5 \text{ МэВ} = 18,4 \text{ МэВ}$$

$$\text{Ca}^{40} - E_n(40,20) = 346,3 \text{ МэВ} - 330,6 \text{ МэВ} = 15,7 \text{ МэВ}$$

$$\text{Ca}^{48} - E_n(48,20) = 418,4 \text{ МэВ} - 410,3 \text{ МэВ} = 18,1 \text{ МэВ}$$

### 11 есеп

Айна ядроларының байланыс энергияларының айырмашылығы тек осы кулондық итеру энергияларының айырмашылығымен анықталады деп есептей отырып ядролар, айна ядроларының радиустарын есептеңіз  $\text{Na}^{23}$ ,  $\text{Mg}^{23}$ .  
 $E_{\text{св}}(\text{Na}^{23}) = 186,56 \text{ МэВ}$ ,  $E_{\text{св}}(\text{Mg}^{23}) = 181,72 \text{ МэВ}$ .

Шешуі:

Радиусы  $R$  біркелкі зарядталған шардың кулондық энергиясы қатынаспен анықталады

$$E_c = \frac{3 Z(Z-1)e^2}{5 R}$$

Ядро зарядын белгілейік  $\text{Na}^{23}$  мен сияқты  $Z$ , ал ядролар  $\text{Mg}^{23}$  мен сияқты  $Z+1$ . Содан кейін ядролардың байланыс энергиясының айырмашылығы  $\text{Na}^{23}$  және  $\text{Mg}^{23}$  болады:

$$\Delta E_{\text{св}} = E_{\text{св}}(A, Z) - E_{\text{св}}(A, Z+1) = -\Delta E_{\text{св}} = \frac{3 Z e^2}{5 R} = \frac{6 Z e^2}{5 R}$$

Ядролардың радиусы үшін аламыз:

$$R = \frac{6 Z e^2}{5 \Delta E_{\text{св}}} = \frac{6 \cdot 11 \cdot 1,44 \text{ МэВ} \cdot \Phi_m}{5 \cdot (186,56 - 181,72) \text{ МэВ}} \approx 3,9 \Phi_m.$$

Эмпирикалық тәуелділік негізінде  $R = 1,23 A^{1/3} \Phi_m$  аламыз

$$R(\text{Mg}^{23}) = R(\text{Na}^{23}) 1,23 \cdot 23^{1/3} = 3,5 \Phi_m.$$

## 12 есеп

Ядро  $Si^{27}$  салдарынан  $\beta^+$ -ыдырау  $Si^{27} \rightarrow Al^{27} + e^+ + \nu_e$  ауысады «айнала» ядро  $Al^{27}$ . Позитрондардың максималды энергиясы 3,48 МэВ. Осы ядролардың радиусын бағалаңыз.

Шешуі:

Екі айна ядросының байланыс энергиясының айырмашылығы

$$\Delta E_{\text{св}} = \frac{6 Z e^2}{5 \Delta E_{\text{св}}}$$

$\beta^+$ -ыдырауындағы позитрондар спектрінің максималды энергиясы

$$E_{\beta^+}^{\text{max}} \cong Q_{\beta^+} = E_{\text{св}}(A, Z - 1) - E_{\text{св}}(A, Z) - (m_n - m_p) - m_e = \\ = E_{\text{св}}(A, Z - 1) - E_{\text{св}}(A, Z) - 1,80 \text{ МэВ} = \Delta E_{\text{св}} - 1,80 \text{ МэВ}.$$

Содан кейін ядро радиусы үшін келесі қатынасты жазуға болады:

$$R = \frac{6 Z e^2}{5(E_{\beta^+}^{\text{max}} + 1,80 \text{ МэВ})} = \frac{6 \cdot 13 \cdot 1,44 \text{ МэВ} \cdot \text{Фм}}{5(3,48 + 1,80) \text{ МэВ}} \approx 4,3 \text{ Фм}.$$

## Тақырыбы: Атом ядросының модельдері

### 13 есеп

$Lu^{175}$  ядросының  $Q_0$  ішкі электрлік квадруполь моменті +5,9 Фм<sup>2</sup> екені белгілі. Бұл ядроның деформация параметрі қандай пішінге ие?

Шешуі:

Заряды бар біркелкі зарядталған осьтік симметриялы эллипсоид үшін

$$ZeQ_0 = \frac{2Z(b^2 - a^2)}{5}$$

мұндағы  $b$  –  $Z$  симметрия осі бойынша бағытталған эллипсоидтың жартылай осі;  
 $a$  –  $X$  және  $Y$  осьтеріне бағытталған эллипсоидтың жартылай осі.

Ядро деформациясы параметрі

$$\beta = \frac{1}{2} \frac{b^2 - a^2}{R^2}$$

Мұндағы  $\bar{R} = \frac{(b+a)}{2}$  – ядроның орташа радиусы.

Содан кейін

$$\beta = \frac{5}{4} \frac{Q_0}{Z(r_0 A^{1/3})^2} = \frac{5 \cdot 5,9}{4 \cdot 71 (1,2 \cdot 175^{1/3})^2} = 0,002$$

Мұнда  $\bar{R} \approx R = r_0 A^{1/3}$  кіші деформацияларда ескеріледі. Бастап  $Q_0 > 0$ , онда  $b > a$ , және ядро болып табылады эллипсоид  $Z$  симметриясының осі бойымен созылған.

**14 есеп.**

$Rb^{85}Q=0,7$  б ядросының сыртқы бақыланатын квадрупольдік моменті  $Q_0$ , ядросының меншікті квадрупольдік моментін анықтаңыз, егер  $Rb^{85}$  ядросының спині  $J = 5/2$  болса.

Шешуі:

Қзертханалық координаталар жүйесіндегі ядроның сыртқы бақыланатын электрлік квадрупольдік моменті  $Q_0$  меншікті квадрупольдік моментімен байланысты:

$$Q = \frac{J(2J-1)}{(J+1)(2J+3)} Q_0,$$

мұндағы  $J$  – ядро спині.

Осы жерден квадрупольдік моменті анықталады

$$Q_0 = \frac{7 \cdot 8}{\frac{2}{5} \cdot 4} Q = 1,96 \text{ б.}$$

**15 есеп**

$C^{10}, C^{11}, C^{12}, C^{13}, C^{14}$  көмертегі изотоптары ядроларының негізгі күйлерінің изоспиндерінің  $I$  мәндерін анықтаңыз.

Шешуі:

Негізгі күйде  $I$  изоспин ядролары  $I = |I_z|$  изоспин проекция модулімен сәйкес келеді.  $Z$  протондарымен  $N$  нейтрондарынан тұратын ядроның  $I_z$  изоспинінің проекциясы

$$I_z = \sum_{j=1}^A (I_z)_j = \frac{Z - N}{2}$$

Яғни,  $I = \frac{|Z-N|}{2}$  ядроларының негізгі күйлері үшін.

Көрсетілген ядролар үшін изоспин мәні болады:

$$\begin{aligned} \text{үшін } C^{10} - 1 &= \frac{6-4}{2} = 1; \\ \text{үшін } C^{11} - 1 &= \frac{6-5}{2} = \frac{1}{2}; \\ \text{үшін } C^{12} - 1 &= \frac{6-6}{2} = 0; \\ \text{үшін } C^{13} - 1 &= \frac{7-6}{2} = \frac{1}{2}; \\ \text{үшін } C^{14} - 1 &= \frac{8-6}{2} = 1. \end{aligned}$$

### 16 есеп

Шексіз тереңдіктегі тікбұрышты потенциалды шұңқыр мен гармоникалық осциллятор шұңқыры үшін  $Zr^{90}$  ядросының  $1s$ ,  $2s$  және  $3s$  деңгейлері арасындағы қашықтықты есептеңіз.

Шешуі:

$l = 0$  деңгейіндегі энергияның тікбұрышты шұңқырында

$$E_n = \frac{(n\hbar\pi)^2}{2mR^2}$$

мұндағы  $n$  – бас кванттық сан;

$m$  – нуклон массасы;

$1s$ ,  $2s$  және  $3s$  деңгейлері арасындағы қашықтық шамасы болады

$$\Delta E_{1s \rightarrow 2s} = 3 \frac{(\pi\hbar)^2}{2mR^2} = 3 \frac{(\pi\hbar c)^2}{2mc^2(r_0 A^{1/3})^2} \approx$$

$$\Delta E_{1s \rightarrow 2s} \approx \frac{3 (3,14 \cdot 200)^2 \text{ МэВ}^2 \cdot \Phi \text{М}^2}{2 \cdot 931,5 \text{ МэВ} \left(1,2 \cdot 90^{\frac{1}{3}}\right)^2 \Phi \text{М}^2} = 3 \cdot 7,3 \text{ МэВ} = 22 \text{ МэВ}$$

$$\Delta E_{2s \rightarrow 3s} = 5 \frac{(\pi\hbar)^2}{2mR^2} = 5 \frac{(\pi\hbar c)^2}{2mc^2(r_0 A^{1/3})^2} \approx 5 \cdot 7,3 \text{ МэВ} = 36,5 \text{ МэВ}$$

Гармоникалық осциллятор шұңқырында  $l = 0$  деңгейлерінің энергиясы үшін өрнек қатынаспен анықталады

$$E_n = \hbar\omega \left(2n + \frac{3}{2}\right)$$

мұндағы  $\hbar\omega = 41 A^{1/3} = 41 \cdot 90^{\frac{1}{3}} = 9,1 \text{ МэВ}$  үшін  $Zr^{90}$ .

Қашықтық болады

$$\Delta E_{1s \rightarrow 2s} = \Delta E_{2s \rightarrow 3s} = 2\hbar\omega = 18,2 \text{ МэВ.}$$

### 17 есеп

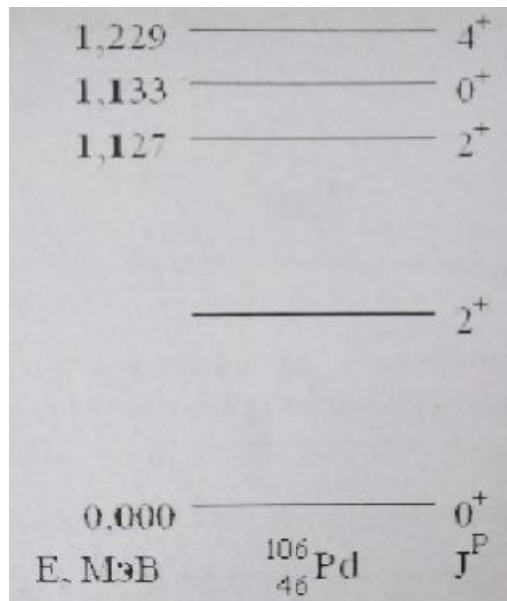
Бір бөлшекті қабық моделінің негізінде оттегі изотоптарының негізгі күйлерінің спиндері мен паритетінің  $J^P$  мәндерін анықтаңыз -  $O^{15}$ ,  $O^{16}$ ,  $O^{17}$ ,  $O^{18}$ .

Шешуі:

$O^{16}$  және  $O^{18}$  изотоптары жұп-жұп, яғни олардың негізгі айналу күйі және  $J^P = 0^+$  паритеті бар.  $O^{15}$  ядросының спині мен паритеті  $1p_{1/2}$  күйдегі «нейтрондық тесікпен» (жұп-жұп  $O^{16}$  ядросына қатысты) анықталады. Ядросының спині осы күйдегі «нейтрондық тесіктің» толық моментіне тең  $J = 1/2$ , ал паритет берілген күйдегі нуклонның орбиталық моментімен анықталады  $P = (-l)^1 = (-1)^1 = -1$ , яғни  $J^P = 1/2^-$ .  $O^{17}$  ядросының спині мен паритеті  $1d_{5/2}$  күйіндегі бір нейтронмен жұп-жұптан жоғары ядросының негізгі  $O^{16}$  анықталады.  $O^{17}$   $J^P = 5/2^+$  ядросы үшін.

### 18 есеп

Бірінші қозған күйдің энергиясын бағалау  $2^+$ .



14 сурет – Ядроның қозған күйлерінің спектрі  $Pd^{106}$

Бұл негізгі күйінде  $J^P = 0^+$  болатын сфералық симметриялы ядроның квадрупольді тербелістерінің типтік спектрі. Атом ядроларының квадрупольді тербелістері  $J^P = 2^+$  фононымен сипатталады. Энергетикалық деңгейлердің орны  $N$  фонон санымен анықталады:

$$E_N = (N + 5/2)\hbar\omega$$

мұндағы  $\hbar\omega$  – квадруполды фонон энергиясы.

Суретте  $J^P = 2^+$  бар екі деңгей ғана бар, төменгі (ізделетін) деңгей  $N = 1$ , ал екінші  $N = 2$ .

Содан кейін

$$E_0 = 5/2\hbar\omega,$$

$$E_1 = 7/2\hbar\omega,$$

$$E_2 = 9/2\hbar\omega.$$

Екінші энергия  $2^+$  - күй

$$E_2 - E_0 = \left(\frac{9}{2} - \frac{5}{2}\right)\hbar\omega = 2\hbar\omega = 1,127 \text{ МэВ}.$$

Бірінші (ізделетін) энергиясы  $2^+$  -күй

$$E_1 - E_0 = \left(\frac{7}{2} - \frac{5}{2}\right)\hbar\omega = \hbar\omega = 0,564 \text{ МэВ}.$$

Негізгі күйдегі жұп-жұп ядролардың квадруполды тербелістерінің спектрі үшін мыналар тән белгілер болып табылады:

1. Бірінші қозған күйде  $J^P = 2^+$  болады.
2. Бірінші қозған күйдің энергиясынан екі есе көп қозу энергиясында шамамен бірдей энергиясы бар жәнекванттық сипаттамалары бар үш күй болуы керек  $J^P = 0^+, 2^+, 4^+$ , бұл екі  $2^+$  квадруполды фононның қосындысына сәйкес келеді.

## Тақырып: Радиоактивті ыдырау заңы

### 19 есеп

$\text{P}^{32}$  препаратының белсенділігі 2 мкКи-ға тең. Мұндай препараттың салмағы қанша?

Шешуі:

Радиоактивті ыдырау заңы:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

мұндағы  $N_0$  – радиоактивті ядролардың саны ерікті түрде таңдалған уақыттың бастапқы нүктесі  $t = 0$ ;



$N(t)$  –  $t$  уақытында дейін ыдырамаған радиоактивті ядролардың ядролардың саны;

$\lambda$  – ыдырау константасы (уақыт бірлігінде ыдырау ықтималдығы).

$\lambda N$  – радиоактивті препараттың белсенділігі (сәулелену қарқындылығы), Ки-де өлшенеді.

1 Ки =  $3,7 \cdot 10^{10}$  ыдырау/с.

$T_{1/2}$  – бұл ядроның жартылай ыдырау кезеңі (радиоактивті ядролардың саны екі есе азаятын уақыт)  $P^{32}$  үшін 14,5 сәулікке тең. Жартылай шығарылу кезеңі  $T_{1/2}$  тұрақты ыдырау қатынасымен байланысты қатынасы

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$

Массасы  $m$  грамм үлгідегі ядролардың саны

$$N = \frac{m N_A}{A}$$

мұндағы  $N_A$  – Авогадро саны;

$A$  – массалық саны.

Препараттың белсенділігі

$$I_0 = N_0 \lambda = \frac{m N_A \ln 2}{T_{1/2} A}$$

Сонда оның массасы болады

$$m = \frac{I_0 T_{1/2} A}{N_A \ln 2}$$

$$m = \frac{2 \cdot 10^{-6} \text{ Ки} \cdot 3,7 \cdot 10^{10} \frac{\text{ыдырау}}{\text{с}} \cdot \text{Ки} \cdot 14,5 \text{ тәулік} \cdot 86400 \text{ с/тәулік} \cdot 32}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \cdot 0,693} =$$

$$= 7,1 \cdot 10^{-12} \text{ г.}$$

## 20 есеп

Бірінші тәулікте  $I^{131}$  радиоактивті йод ядроларының ыдырау саны екінші тәуліктегі ыдырау санынан қанша есе көп?  $I^{131}$  изотопының жартылай шығарылу кезеңі 193 сағатқа тең.

Шешуі:

Радиоактивті ыдырау заңынан

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

Бұл алғашқы тәулікте (алғашқы 24 сағат) ыдыраған болуы керек

$$N_1 = N_0(1 - e^{-24\lambda}) \text{ ядролар.}$$

Екінші күн ішінде ол ыдырады

$$N_2 = N_0(1 - e^{-24\lambda})e^{-24\lambda} \text{ ядролар.}$$

Бірінші тәуліктегі ыдырау санының екінші тәуліктегі ыдырау санына қатынасы

$$\frac{N_1}{N_2} = e^{24\lambda} = e^{24 \ln 2 / T_{1/2}}$$

мұндағы  $T_{1/2}$  – сағатты  $^{131}\text{I}$  жыртылай шығарылу кезеңі.  
Жартылай шығарылу кезеңі  $\lambda$  қатынасымен байланысты

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

Түпкілікті

$$\frac{N_1}{N_2} = e^{24 \cdot \frac{0,693}{T_{1/2}}} = e^{24 \cdot \frac{0,693}{193}} = 1,09$$

## 21 есеп

Егер бір ыдырау әрекеті  $E = 5,4 \text{ МэВ}$  энергия бөлсе, орташа өмір сүру уақытына тең уақыт ішінде препарат  $\text{Po}^{210}$ . Препаратының 1 мг-нан бөлінетін  $W$  энергиясын анықтаңыз.

Шешуі:

Орташа өмір сүру кезеңінде радиоактивті препарат ядроларының саны  $e = 2,718$  есе азаяды. Содан кейін осы уақыт ішінде ыдыраған ядролардың саны олардың бастапқы санынан  $D = -\frac{1}{2,718} = 0,632$  болады.

Массасы  $m$  үлгісіндегі  $N$  ядроларының бастапқы саны грамм қатынасынан анықталады

$$N = \frac{mN_A}{A}$$

мұндағы  $N_A$  – Авогадро саны;  
 $A$  – массалық саны.

Изотоптың орташа өмір сүру уақытында тең уақыт ішінде бөлінетін энергия мөлшері  $^{210}\text{Po}$

$$W = \frac{DmN_A E}{A}$$

$$W = \frac{0,632 \cdot 10^{-3} \text{ г} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \cdot 5,4 \text{ МэВ} \cdot 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ эрг/МэВ}}{210 \text{ г/моль}} =$$

$$= 1,6 \cdot 10^{13} \text{ эрг.}$$

## 22 есеп

Жер бетіндегі барлық  $\text{Ar}^{40}$  е-түсіру нәтижесінде  $\text{K}^{40}$ -тан пайда болды деп есептей отырып, жер жасының жоғарғы шекарасын анықтаңыз. Қазіргі уақытта әрбір 300 атом  $\text{Ar}^{40}$  атомы үшін бір  $\text{K}^{40}$  атомы бар.

Шешуі:

Осы уақытқа дейін ыдырамаған  $\text{K}^{40}$  ядроларының саны

$$N_K = \frac{N_{Ar}}{300} = N_0 e^{-t \ln 2 / T_{1/2}}$$

мұндағы  $N_0$  – Жер пайда болған кездегі  $\text{K}^{40}$  ядроларының бастапқы саны;

$t$  – Жердің жасы;

$T_{1/2}$  –  $\text{K}^{40}$  жартылай шығарылу кезеңі, ол  $1,277 \cdot 10^9$  жыл.

Радиоактивті ыдырау кезінде  $\text{K}^{40}$  е-түсіру арқылы ядролардың тек 10,67% ыдырайды, сондықтан аргон ядроларының саны осы уақытқа дейін болады

$$N_{Ar} = 0,1067 N_0 (1 - e^{-t \ln 2 / T_{1/2}})$$

Теңдеуді аламыз

$$300 N_0 e^{-t \ln 2 / T_{1/2}} = 0,1067 N_0 (1 - e^{-t \ln 2 / T_{1/2}})$$

Қайдан

$$t = -\ln \left( \frac{0,1067}{300 + 0,1067} \right) \frac{1,277 \cdot 10^9 \text{ лет}}{\ln 2} \approx 1,5 \cdot 10^{10} \text{ лет.}$$

### 23 есеп

$\alpha$ - ыдырау нәтижесінде радий  $Ra^{226}$  радонға айналады  $Rn^{222}$ . Қалыпты жағдайда радонның көлемі 1 г радиймен тепе-теңдікте болады? Жартылай шығарылу кезеңі  $T_{1/2}(Ra) = 1600$  жыл,  $T_{1/2}(Rn) = 3,82$  күн.

Шешуі:

Ғасырлық тепе теңдік орнаған кезде екі изотоптың радиоактивті ядроларының саны және олардың ыдырау тұрақтылары теңдеу арқылы байланысады

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2,$$

қайдан

$$N_{Rn} = N_{Ra} \lambda_{Ra} / \lambda_{Rn} = N_{Ra} T_{1/2}(Rn) / T_{1/2}(Ra)$$

Ядро саны  $Ra^{226}$

$$N_{Ra} = \frac{m N_A}{A},$$

мұндағы  $m$  – радийдің массасы;  
 $A$  – радийдің массалық саны;  
 $N_A$  – Авогадро саны.

Қажетті көлем

$$V = V_M N_{Rn} / N_A,$$

мұндағы  $V_M$  – газдың молярлық көлемі (22,4 л/моль).  
Радонның көлемін аламыз

$$V = V_M m T_{1/2}(Rn) / A T_{1/2}(Ra)$$

$$V = \frac{22,4 \frac{\text{л}}{\text{моль}} \cdot 1 \text{ г} \cdot 3,82 \text{ күн}}{226 \frac{\text{г}}{\text{моль}} \cdot 1600 \text{ жыл} \cdot 365 \text{ күн/жыл}} = 6,5 \cdot 10^{-7} \text{ л.}$$

### 24 есеп

Реакциялар  $P^{31}(n, p)Si^{31}$  қимасы  $\sigma$  анықтау, егер белгілі болса, кейін сәулелену нысана  $P^{31}$  қалыңдығы  $d = 1$  г/см<sup>2</sup> толқынында нейтрондар  $J = 2 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$  уақыт ішінде  $t_{\text{обл}} = 4$  сағ оны  $\beta$ -белсенділік  $I$ , өлшенген уақыт арқылы  $t_{\text{охл}} = 1$  сағаяқталғаннан кейін сәулелену болып  $I(t_{\text{охл}}) = 3,9 \cdot 10^6$  ыдырау/с. Жартылай ыдырау кезеңі  $T_{1/2}(Si^{31}) = 157,3$  мин.

Шешуі:

Берілген реакцияда 1 с-та түзілген  $Si^{31}$  ядроларының саны

$$N(t) = \sigma J n = \sigma J \frac{dN_A}{A}$$

мұндағы  $n$  – мишені аудан бірлігіне шаққандағы ядролар саны;

$N_A$  – Авогадро саны;

$A$  –  $Si^{31}$  массалық сан.

1 с ядролық ыдырау саны

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = 60 \cdot \frac{0,693}{157,3} = 0,264 \text{ ч}^{-1}$$

мұндағы  $\lambda$  –  $Si^{31}$  ыдырау тұрақтысы.

Содан кейін

$$\frac{dN(t)}{dt} = \sigma J \frac{dN_A}{A} - \lambda N(t)$$

Бұл жағдайда  $N(0) = 0$ .  $t_{\text{обл}}$  уақытына қарай  $Si^{31}$  ядролары пайда болды.

$$N(t_{\text{обл}}) = \frac{\sigma J dN_A}{\lambda A} (1 - e^{-\lambda t_{\text{обл}}})$$

Уақыт өткеннен кейін  $t_{\text{охл}}$  сәулелену аяқталғаннан кейін ядролардың саны  $Si^{31}$ .

$$N(t_{\text{охл}}) = N(t_{\text{обл}}) e^{-\lambda t_{\text{охл}}} = \frac{\sigma J dN_A}{\lambda A} (1 - e^{-\lambda t_{\text{обл}}}) e^{-\lambda t_{\text{охл}}}$$

Препараттың белсенділігі

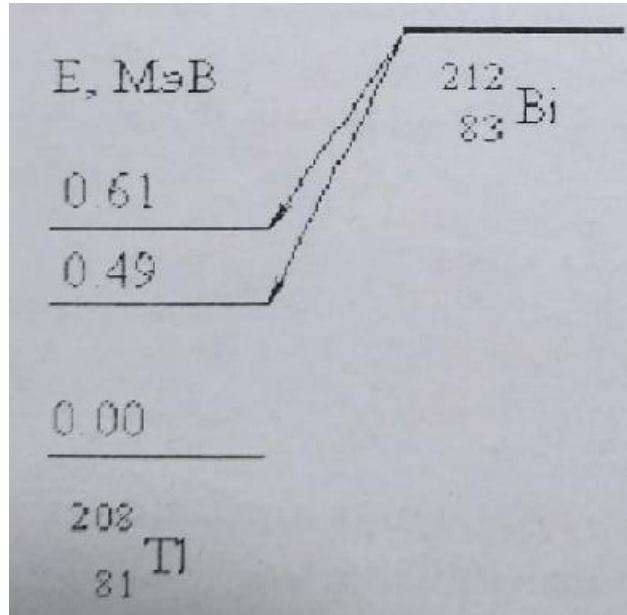
$$I(t_{\text{охл}}) = \frac{\sigma J dN_A}{A} (1 - e^{-\lambda t_{\text{обл}}}) e^{-\lambda t_{\text{охл}}}$$

Реакция бөлімі үшін аламыз

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{I(t_{\text{охл}}) A}{J dN_A (1 - e^{-\lambda t_{\text{обл}}}) e^{-\lambda t_{\text{охл}}}} = \\ &= \frac{3,9 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1} \cdot 31 \text{ г} \cdot \text{моль}}{2 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1} \cdot 1 \text{ г} \cdot \text{см}^2 \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} (1 - e^{-0,264 \text{ ч}^{-1} \cdot 4 \text{ ч}}) e^{-0,264 \text{ ч}^{-1} \cdot 1 \text{ ч}}} \cong \\ &\cong 2 \cdot 10^{-26} \text{ см}^2 = 20 \text{ мб} \end{aligned}$$

## 25 есеп

$\alpha$ -ыдырау кезінде  $Bi^{212}Tl^{208}$  ядросының қозған күйлеріне 0,49 және 0,61 МэВ энергияларымен түзетін  $\alpha$ -бөлшектер  $T_\alpha$  бөлшектерінің кинетикалық энергиясын анықтаңыз (15 сурет).  $E_{байл}(A, Z)Bi^{212} - 1654,32$  МэВ ядролары,  $Tl^{208} - 1632,23$  МэВ ядролары және  $\alpha$ -бөлшектері – 28,30 МэВ.



15 сурет – Элементтің  $\alpha$ -бөлшектерінің  $T_\alpha$  кинетикалық энергия  $Bi^{212}$

Шешуі:

Бастапқы ядроның негізгі күйінен  $Q_0$  соңғы ядросының негізгі күйіне  $\alpha$ -ыдырау энергиясы қатынастан анықталады

$$Q_0 = [M(A, Z) - M(A - 4, Z - 2) - M(\alpha)]c^2 = \\ = E_{байл}(A - 4, Z - 2) + E_{байл}(\alpha) - E_{байл}(A, Z)$$

мұндағы  $M(A, Z)$  – бастапқы ядроның массасы;  
 $M(A - 4, Z - 2)$  – соңғы ядроның массасы;  
 $M(\alpha)$  –  $\alpha$ -бөлшектің массасы;  
 $E_{байл}(A, Z)$  – бастапқы ядроның байланыс энергиясы;  
 $E_{байл}(A - 4, Z - 2)$  – соңғы ядроның байланыс энергиясы;  
 $E_{байл}(\alpha)$  – байланыс энергиясы  $\alpha$ -бөлшектер.

Жалпы жағдайда, ыдырау бастапқы ядроның қозған күйінен соңғы ядроның қозған күйіне ауысқанда,  $\alpha$ -ыдырау энергиясы қатынаспен анықталады

$$Q = Q_0 + E_i - E_f$$

мұндағы  $E_i$  – бастапқы ядроның қозу энергиясы;  
 $E_f$  – соңғы ядроның қозу энергиясы.

Соңғы ядроның кері янергиясын ескере отырып,  $\alpha$ -бөлшектердің кинетикалық энергиясы

$$T_{\alpha} = (Q_0 + E_i - E_f) \frac{M(A - 4, Z - 2)}{M(A - 4, Z - 2) + M(\alpha)} \approx (Q_0 + E_i - E_f) \frac{A - 4}{A}$$

Бірінші қозған күйге (0,49 МэВ) ыдырағанда  $Tl^{208}$  ядролары

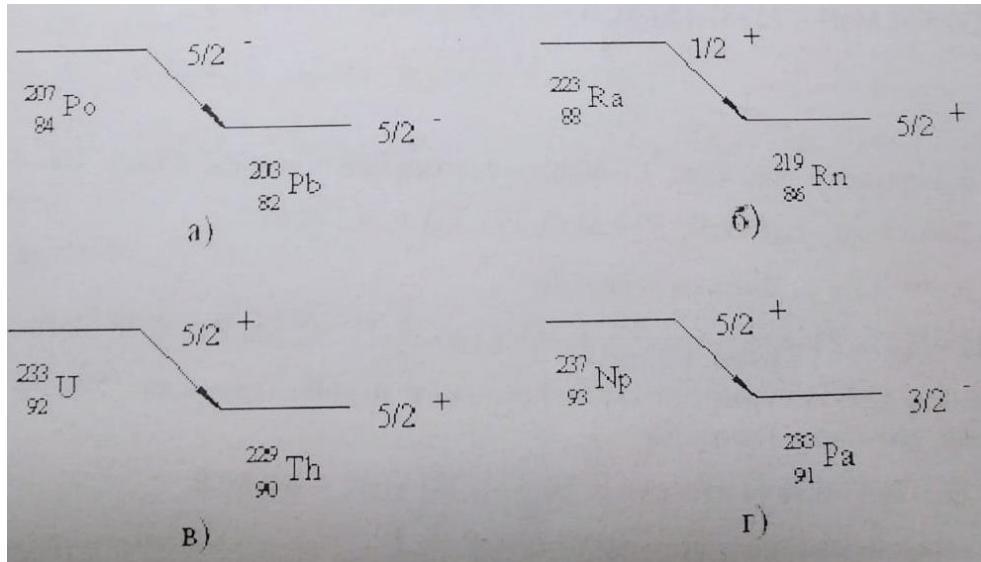
$$T_{\alpha} = (1632,23 + 28,30 - 1654,32 - 0,49) \text{МэВ} \frac{208 \text{ а. е. м.}}{212 \text{ а. е. м.}} = 5,61 \text{ МэВ}$$

Екінші қозған күйге (0,61 МэВ) ыдыраған кезде энергия  $\alpha$ -бөлшектердің энергиясы болады

$$T_{\alpha} = (1632,23 + 28,30 - 1654,32 - 0,61) \text{МэВ} \frac{208 \text{ а. е. м.}}{212 \text{ а. е. м.}} = 5,49 \text{ МэВ}$$

## 26 есеп

Келесі ыдырауларда  $\alpha$ -бөлшегі алып жүретін  $l$  орбиталық моментін анықтаңыз (16 сурет):



16 сурет – Альфа-бөлшектерінің орбиталық моменттері

Шешуі:

$A \rightarrow B + b$  ыдырауы үшін момент пен паритетің сақталу заңларын жазамыз

$$\vec{J}_A = \vec{J}_B + \vec{s}_b + \vec{l}$$

мұндағы  $\vec{J}_A, \vec{J}_B, \vec{s}_b$  – сәкесінше бсәйкесінше А, В және бөлшектерінің  $\vec{l}$  – ббөлшегінің орбиталық моменті.

$$P_A = P_B P_b (-1)^1$$

мұндағы  $P_A, P_B, P_b$  – сәйкесінше А, В және ббөлшектердің ішкі паритеттері.

Спин  $\alpha$ -бөлшектер 0, паритет оң.  $\alpha$ -ыдырау үшін момент пен паритеттің сақталу заңдарын келесідей жазуға болады

$$\vec{J}_i = \vec{J}_f + \vec{l}$$

немесе

$$|J_i - J_f| \leq l \leq J_i + J_f$$

мұндағы  $\vec{J}_i$  – бастапқы ядро;  
 $\vec{J}_f$  – соңғы ядро.

$$P_i = P_f (-1)^l$$

мұндағы  $P_i$  – бастапқы ядроның паритеті;  
 $P_f$  – соңғы ядро паритеттері.

Осылайша жағдайда

а)  $0 \leq l \leq 5$ , паритет өзгермейді, сондықтан  $l=0, 2, 4$ ;  
жағдайда

б)  $2 \leq l \leq 3$ , паритет өзгермейді және  $l=2$ ;  
жағдайда

в)  $0 \leq l \leq 5$ , паритет өзгермейді және  $l=0, 2, 4$ ;  
және жағдайда

г)  $1 \leq l \leq 4$ , паритет өзгереді және  $l=1, 3$ .

## 27 есеп

Атомдардың массалық мәндерін қолдана отырып  $Si^{27}$  ядросының  $\beta^+$ -ыдырау кезінде шығарылатын позитрондардың жоғарғы шекарасын анықтаңыз.

Шешуі:

$\beta^+$ -ыдырау энергиясы

$$Q = M_{\text{ат}}(A, Z) - M_{\text{ат}}(A, Z - 1) - 2m_e$$



мұндағы  $M_{\text{ат}}(A, Z)$  – бастапқы ядро атомының массасы;  
 $M_{\text{ат}}(A, Z - 1)$  – ядро-өнім атомының массасы (энергия бірлігіндегі массалар).

$Si^{27}$  атомының массасы 25137,961 МэВ, ал  $Al^{27}$  – 25133,150 МэВ.

Позитрондар спектрінің жоғарғы шегі ыдырау энергиясына тең.

$$T^{\text{max}} = Q = 25137.961 \text{ МэВ} - 25133,150 \text{ мэВ} - 2 \cdot 0,511 \text{ мэВ} = 3,789 \text{ МэВ}$$

## 28 есеп

$Be^7$  ядросында е-түсіру кезінде пайда болатын  $Li^7$  ядросының кері энергиясын анықталыңыз. Ядролық байланыс энергиясы берілген -  $E_{\text{байл}}(Be^7) = 37,6 \text{ МэВ}$ ,  $E_{\text{байл}}(Li^7) = 39,3 \text{ МэВ}$ .

Шешуі:

Процесс  $Be^7 + e^- \rightarrow Li^7 + \nu_e$ . е-түсіру энергиясы

$$\begin{aligned} Q_e &= E_{\text{байл}}(A, Z - 1) - E_{\text{байл}}(A, Z) - (m_n - m_p)c^2 + m_e c^2 = \\ &= E_{\text{байл}}(A, Z - 1) - E_{\text{байл}}(A, Z) - 0,78 \text{ МэВ} \end{aligned}$$

мұндағы  $E_{\text{байл}}(A, Z)$  – бастапқы ядросының байланыс энергиясы;  
 $E_{\text{байл}}(A, Z - 1)$  – соңғы ядросының байланыс энергиясы;  
 $m_n$  – нейтронның массасы;  
 $m_p$  – протонның массасы;  
 $m_e$  – электронның массасы.

$$Q_e = E_{\text{св}}(Li^7) - E_{\text{св}}(Be^7) - 0,78 \text{ МэВ}$$

$$Q_e = (39,3 - 37,6 - 0,78) \text{ МэВ} = 0,9 \text{ МэВ}$$

Энергия мен импульстің сақталу заңдарынан мыналар шығады

$$\begin{cases} T_{Li} + T_{\nu} = Q_e \\ |p_{Li}| = |p_{\nu}| \end{cases}$$

мұндағы  $T_{Li}$  – ядроның кинетикалық қайтару энергиясы;  
 $T_{\nu}$  – нейтрино қайтару кинетикалық энергиясы.

Түсініктеме: Нейтрино-релятивистік бөлшек, ал ядро релятивистік емес.

$$p_{Li} = \frac{\sqrt{2m_{Li}c^2T_{Li}}}{c}$$

$$p_{\nu} = \frac{T_{\nu}}{c}$$

соңында бізде бар:

$$T_{Li} = \frac{T_{\nu}^2}{2m_{Li}c^2} \approx \frac{Q_e^2}{2A_{Li} \cdot 931} = \frac{(0,9 \text{ МэВ})^2}{2 \cdot 7 \cdot 931 \text{ МэВ}} \approx 6 \cdot 10^{-5} \text{ МэВ} = 60 \text{ эВ}$$

## 29 есеп

$\beta^-$ - ядросының ыдырауындағы кинетикалық ядро энергиясын  $Cu^{64}$  анықтаңыз.  $Cu^{64} \rightarrow Zn^{64} + e + \bar{\nu}_e$  қашан

1) антинейтрино энергиясы  $T_{\bar{\nu}} = 0$ ,

2) электрон энергиясы  $T_e = 0$ .

Ядролық байланыс энергиясы  $Cu^{64}$ -559,32 МэВ және  $Zn^{64}$ -559,12 МэВ.

Шешуі:

$\beta^-$ - ыдырау энергиясы

$$Q_{\beta^-} = E_{\text{байл}}(A, Z + 1) - E_{\text{байл}}(A, Z) + (m_n - m_p)c^2 - m_e c^2 =$$

мұндағы  $E_{\text{байл}}(A, Z)$  – бастапқы ядросының байланыс энергиясы;

$E_{\text{байл}}(A, Z + 1)$  – соңғы ядросының байланыс энергиясы;

$m_n$  – нейтронның массасы;

$m_p$  – протонның массасы;

$m_e$  – электронның массасы.

$\beta^-$  ыдырау кезіндегі ядроның қайтарушы энергиясы болады:

1)  $T_{\bar{\nu}} = 0$ . Энергия және импульстік сақталу заңдарын жазайық

$$\begin{cases} Q_{\beta^-} = T_{Zn} + T_{\bar{\nu}} + T_e = T_{Zn} + T_e \\ |p_{Zn}| = |p_e| \end{cases}$$

Импульстар үшін  $p_{Zn}$  – релятивистік емес,  $p_e$  – релятивистік импульс екенін ескере отырып, жазуға болады

$$p_{Zn} = \frac{1}{c} \sqrt{2m_{Zn}c^2T_{Zn}},$$

$$p_e = \frac{1}{c} \sqrt{T_e^2 + 2T_e m_e c^2}$$

мұндағы  $m_{Zn} - Zn^{64}$  ядроның массасы.  
Сақталу заңдарынан болады

$$2m_{Zn}c^2T_{Zn} = T_e^2 + 2T_em_e c^2 = T_e(T_e + 2m_e c^2) = \\ = (Q_{\beta^-} - T_{Zn})(Q_{\beta^-} - T_{Zn} + 2m_e)$$

Келесі, өйткені  $m_e \ll m_{Zn}$ , то  $T_{Zn} \ll Q_{\beta^-}$

$$T_{Zn} \approx \frac{Q_{\beta^-}(Q_{\beta^-} + 2m_e)}{2m_{Zn}c^2} \approx \frac{Q_{\beta^-}(Q_{\beta^-} + 2m_e)}{2A_{Zn} \cdot 931} = \frac{0,58(0,58 + 2 \cdot 0,511 \text{ МэВ}^2)}{2 \cdot 64 \cdot 931 \text{ МэВ}} \approx \\ \approx 7,8 \text{ эВ}$$

2)  $T_e = 0$ .

Сол сияқты бірінші жағдайдағыдай

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{\beta^-} = T_{Zn} + T_{\bar{\nu}} \\ |p_{Zn}| = |p_{\nu}| \end{array} \right\}$$

Антинейтрино импульсі ультрарелятивистік  $p_{\nu} = \frac{T_{\bar{\nu}}}{c}$

Окончательно получим

Антинейтрино импульсі ультрарелятивистік  $p_{\nu} = T_{\bar{\nu}} / c$

Түпкілікті аламыз

$$T_{Zn} = \frac{T_{\bar{\nu}}^2}{2m_{Zn}c^2} = \frac{Q_{\beta^-}^2}{2A_{Zn} \cdot 931} = \frac{0,58^2}{2 \cdot 64 \cdot 931} \approx 2,8 \text{ эВ}$$

### 30 есеп

Атомдардың артық массалары берілген:

- 1)  $\Delta(Cd^{114}) = -90,021 \text{ МэВ}$ ,
- 2)  $\Delta(In^{114}) = -88,379 \text{ МэВ}$ ,
- 3)  $\Delta(Sn^{114}) = -90,558 \text{ МэВ}$ .

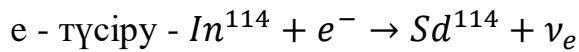
$In^{114}$  ядроның  $\beta^-$  ыдырауының мүмкін түрлерін анықтаңыз.

Шешуі:

$In^{114}$  ядросы үшін  $\beta^-$  ыдырау келесідей:

$\beta^-$  ыдырау -  $In^{114} \rightarrow Sn^{114} + e^- + \bar{\nu}_e$

$\beta^+$  ыдырау -  $In^{114} \rightarrow Cd^{114} + e^+ + \nu_e$



Егер ыдырау энергиясының мөлшері оң болса, онда ядро осы түрдің ыдырауына тұрақсыз болады.

Ыдырау энергиялары:

$$\beta^{-} \text{ ыдырау} - Q_{\beta^{-}} = \Delta(A, Z) - \Delta(A, Z + 1);$$

$$\beta^{+} \text{ ыдырау} - Q_{\beta^{+}} = \Delta(A, Z) - \Delta(A, Z - 1) - 2m_e c^2;$$

$$e \text{ түсіру} - Q_e = \Delta(A, Z) - \Delta(A, Z - 1).$$

мұндағы  $\Delta(A, Z)$  – бастапқы ядроның артық массасы;  
 $\Delta(A, Z + 1)$  – бета минус ыдырау үшін соңғы ядролардың артық массалары;  
 $\Delta(A, Z - 1)$  – бета плюс ыдырау үшін соңғы ядролардың артық массалары;  
 $m_e$  – электронның массасы.

Міндерді ауыстырайық:

$$\beta^{-} \text{ ыдырау} - Q_{\beta^{-}} = 90,558 - 88,379 = 2,179 \text{ МэВ} > 0;$$

$$\beta^{+} \text{ ыдырау} - Q_{\beta^{+}} = 90,021 - 88,379 - 1,022 = 0,62 \text{ МэВ} > 0;$$

$$e \text{ түсіру} - Q_e = 90,021 - 88,379 = 1,642 \text{ МэВ} > 0.$$

Осылайша,  $In^{114}$  ядросы  $\beta^{-}$  ыдыраудың барлық үш түрін бастап кешіреді.

### 31 есеп

$Ne^{17}$  ядросы үшін  $Ne^{17}$  ядросы е-түсіру нәтижесінде пайда болған  $F^{17}$  ядросынан шығатын арта протондардың максималды энергиясын анықтаңыз.

Байланыс энергиялар:

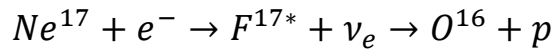
$$E_{\text{байл}}(Ne^{17}) = 112,91 \text{ МэВ};$$

$$E_{\text{байл}}(F^{17}) = 128,23 \text{ МэВ};$$

$$E_{\text{байл}}(O^{16}) = 126,63 \text{ МэВ}.$$

Шешуі:

Қарастырылып отырған процесс



$F^{17*}$  ядросының максималды қозу энергиясы е-түсіру энергиясына тең

$$\begin{aligned} E_{max}(F^{17*}) &= Q_e = E_{байл}(F^{17}) - E_{байл}(Ne^{17}) - 0,78 \text{ МэВ} = \\ &= 128,33 \text{ МэВ} - 112,91 \text{ МэВ} - 0,78 \text{ МэВ} = 14,54 \text{ МэВ} \end{aligned}$$

мұндағы  $0,78 = [m(n) - m(H^1)]c^2$ .

$F^{17}$  ядросы үшін протонның бөліну энергиясы

$$\begin{aligned} \varepsilon_p &= E_{байл}(A, Z) - E_{байл}(A - 1, Z - 1) = E_{байл}(F^{17}) - E_{байл}(O^{16}) = \\ &= 128,33 \text{ МэВ} - 126,63 \text{ МэВ} = 1,6 \text{ МэВ} \end{aligned}$$

Кешігу қалған протондардың максималды энергиясы  $T_p^{max}$

$$\begin{aligned} T_p^{max} &= (E_{max}(F^{17}) - \varepsilon_p) \frac{M(O^{16})}{M(O^{16}) + m_p} \approx (E_{max}(F^{17}) - \varepsilon_p) \frac{16}{17} \approx \\ &\approx (14,54 \text{ МэВ} - 1,6 \text{ МэВ}) \frac{16}{17} \approx 12,2 \text{ МэВ}. \end{aligned}$$

Мәселені шешу үшін  $F^{17}$  байланыс энергиясы қажет емес. Шынында да

$$\begin{aligned} E_{max}(F^{17*}) - \varepsilon_p &= E_{св}(F^{17}) - E_{св}(Ne^{17}) - 0,78 \text{ МэВ} - E_{св}(F^{17}) + E_{св}(O^{16}) = \\ &= E_{св}(O^{16}) - E_{св}(Ne^{17}) - 0,78 \text{ МэВ} = 12,94 \text{ МэВ}. \end{aligned}$$

### 32 есеп

Классикалық электродинамикаға сәйкес уақыт бірлігіндегі өлшемді электрлік диполь қатынаспен анықталған энергияны шығарады

$$I = \frac{dE}{dt} = \frac{\omega^4 (Ze)^2}{3c^3}$$

мұндағы  $\omega$  – диполь тербелістерінің циклдік жиілігі;

$Ze$  – диполь заряды;

$l$  – диполь мөлшері.

Арақатынасты қоладана отырып, ядродағы 1 МэВ энергиясы бар  $\gamma$ -кванттардың электрлік диполдік ауысуларының орташа уақытын бағалаңыз  $A \approx 70$ .

Массалық сан бар ядро үшін делік  $A=70$  зарядтау саны  $Z=30$  және радиусына тең диполь радиусын  $R = r_0 A^{1/3}$  анықтайық.

мұндағы  $r_0 = 1,2 \text{ Фм}$ .

Уақыт бірлігіндегі  $\gamma$ -кванттар саны  $N$ ,  $E_\gamma = \hbar\omega$  екенін ескере отырып:

$$N = \frac{I}{E_\gamma} = \frac{(ZeR)^2 \omega^3}{3c^3 \hbar}$$

Орташа өмір сүру уақытын бағалайық:

$$\tau = \frac{1}{N} = \frac{3c^3 \hbar^4}{(ZeR)^2 E_\gamma^3} = \frac{3(c\hbar)^4}{(Zr_0 A^{1/3})^2 e^2 E_\gamma^3 c} \cong$$

$$\cong \frac{3(197 \text{ МэВ} \cdot \text{Фм})^4}{\left(30 \cdot 1,2 \text{ Фм} \cdot 70^{\frac{1}{3}}\right)^2 \cdot 1,44 \text{ МэВ} \cdot \text{Фм} (1 \text{ МэВ})^3 \cdot 3 \cdot 10^{23} \text{ Фм} \cdot \text{с}^{-1}} \approx 5 \cdot 10^{-19} \text{ с}$$

### Тақырып: Ядролық реакциялар

#### 33 есеп

$\text{Be}^8$  изотопы пайда болуы мүмкін бірнеше ядролық реакцияларды тізімдеңіз.

Шешуі:

Зарядтың сақталу заңын және нуклондар санының сақталу заңын қолдана отырып, аламыз

- 1)  $\alpha + \alpha \rightarrow \text{Be}^8 + \gamma$ ,
- 2)  $d + \text{Li}^6 \rightarrow \text{Be}^8 + \gamma$ ,
- 3)  $p + \text{Li}^7 \rightarrow \text{Be}^8 + \gamma$ ,
- 4)  $\gamma + \text{Be}^9 \rightarrow \text{Be}^8 + n$ ,
- 5)  $\gamma + \text{Be}^{10} \rightarrow \text{Be}^8 + d$ ,
- 6)  $p + \text{Be}^{10} \rightarrow \text{Be}^8 + \text{He}^3$ ,
- 7)  $p + \text{B}^{11} \rightarrow \text{Be}^8 + \alpha$ ,
- 8)  $p + \text{Be}^{10} \rightarrow \text{Be}^8 + \alpha$ .

#### 34 есеп

$\text{Li}^6(d, \alpha)\text{He}^4$  реакциясы эндотермиялық немесе экзотермиялық па? МэВ-да ядролардың меншікті байланыс энергиялары берілген:  $E(d) = 1,11$ ;  $E(\alpha) = 7,08$ ;  $E(\text{Li}^6) = 5,33$ .

Атомның массасы арқылы көрсетілген ядроның толық байланыс энергиясы:

$$E_{\text{байл}}(A, Z) = (Zm_H + (A - Z)m_n - M_{\text{ат}}(A, Z) - Zm_e)c^2$$

Ядроның меншікті байланыс энергиясы  $E(A, Z)$  бұл бір нуклонға келетін байланыс энергиясы

$$E(A, Z) = \frac{E_{\text{байл}}(A, Z)}{A}$$

мұндағы  $A$  – массалық сан.

Реакция энергиямы жүйенің бастапқы және соңғы күйлерінің массалық айырмашылығы деп аталады.

$$Q = c^2 \sum_i m_i - c^2 \sum_f m_f$$

Толық ядроның энергиясының формуларын, ядро байланысының меншікті энергиясын және реакция энергиясын қолдана отырып, реакция энергиясының шамасын есептеуге болады:

$$\begin{aligned} Q &= 2E_{\alpha}(He^4) - E_{\alpha}(Li^6) - E_{\alpha}(H^2) = \\ &= 2A(He^4)E(He^4) - A(Li^6)E(Li^6) - A(H^2)E(H^2) = \\ &= 247,08 - 65,33 - 21,11 = 22,44 \text{ МэВ} \end{aligned}$$

Реакция эндотермиялық болып табылады.

### 35 есеп

Табылдықтар реакциялар анықтау:  $Li^7(p, \alpha)He^4$  и  $Li^7(p, \gamma)Be^8$ .

Шешуі:

Реакциялардың энергиясын есептеңіз:

Реакция энергиясы жүйенің бастапқы және соңғы күйлерінің массалық айырмашылығы деп аталады.

$$Q = c^2 \sum_i m_i - c^2 \sum_f m_f$$

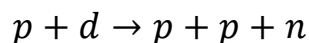
$$1) Li^7(p, \alpha)He^4 Q = +17,348 \text{ МэВ}$$

$$2) Li^7(p, \gamma)Be^8 Q = +17,26$$

Реакцилар 1) – 2) экзотермиялық, олар кез-келген протон энергиясымен жүреді.

### 36 есеп

Реакция мүмкін болуы үшін протон қандай минималды энергияға ие болуы керек екенін анықтаңыз



Шешуі:

Реакция энергиясы:

$$\begin{aligned} Q &= \Delta(H^1) + \Delta(H^2) - 2\Delta(H^1) - \Delta(n) = 13,136 - 7,289 - 8,071 = \\ &= -2,224 \text{ МэВ} \end{aligned}$$

Сияқты  $|Q| \ll 2m_p c^2$ , өрнекті қолдану

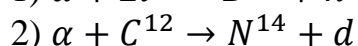
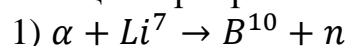
$$T_{\text{пор}} = |Q| \left(1 + \frac{m_a}{m_A}\right)$$

Аламыз

$$E_{\text{min}} = T_{\text{пор}} = 2,224(1 + 0,5) = 3,34 \text{ МэВ.}$$

### 37 есеп

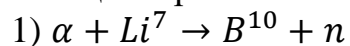
Реакциялар мүмкін бе?



Кинетикалық энергиясы бар  $\alpha$ -бөлшектердің әсерінен  $T = 10$  МэВ?

Шешуі:

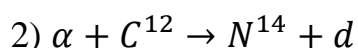
Реакциялар шегі:



$$Q = 2,424 + 14,907 - 12,05 - 8,071 = -2,79 \text{ МэВ}$$

$$T_{\text{пор}} = 2,79 \left(1 + \frac{4}{7}\right) = 4,38 \text{ МэВ}$$

Реакция мүмкін, өйткені  $T = 10 \text{ МэВ} > T_{\text{пор}}$





$$Q = 2,424 + 0 - 2,863 - 13,136 = -13,575 \text{ МэВ}$$

$$T_{\text{пор}} = 18,1 \text{ МэВ}$$

Реакция мүмкін емес, өйткені  $T < T_{\text{пор}}$ .

### 38 есеп

$B^{10}$  ядросындағы серпімді емес шашырау нәтижесінде  $E_{\text{возб}} = 1,75 \text{ МэВ}$  энергиясымен күйді қоздыру үшін дейтронның ең аз энергиясы  $T_{\text{min}}$  қандай болуы керек?

Шешуі:

Серпімді емес шашырау кезінде реакция энергиясы  $Q = -E_{\text{возб}}$ , ал дейтронның минималды энергиясы реакция шегіне тең:  $T_{\text{min}} = T_{\text{пор}}$ .

Реакция шегі формуласын қолдану

$$T_{\text{пор}} = |Q| \left( 1 + \frac{m_a}{m_A} + \frac{|Q|}{2m_A c^2} \right) \text{ (т.к. } Q \ll m_d c^2 \text{) аламыз:}$$

$$T_{\text{min}} \cong E_{\text{возб}} \left( 1 + \frac{m_1}{m_2} \right) \cong 1,75 \left( 1 + \frac{2}{10} \right) = 2,1 \text{ МэВ.}$$

### 39 есеп

$Li^7$  ядросы баяу нейтронды ұстап,  $\gamma$ -квант шығарады.  $\gamma$ -кванттық энергия неге тең?

Шешуі:

$$Li^7(n, \gamma) Li^8, Q = 2,034 \text{ МэВ}$$

$$\text{сияқты } |p_{\text{я}}| \cong |p_{\gamma}|, p_{\gamma} = \frac{E_{\gamma}}{c}, p_{\text{я}} = (2M_{\text{я}} E_{\text{я}})^{1/2} \text{ және } E_{\text{я}} + E_{\gamma} = Q$$

мұндағы  $p_{\text{я}}$  – ядро импульсі;  
 $p_{\gamma}$  –  $\gamma$ -квант импульсі;  
 $E_{\text{я}}$  – ядро энергиясы;  
 $E_{\gamma}$  –  $\gamma$ -кванттық энергия.

$$E_{\text{я}} = \frac{E_{\gamma}^2}{2M_{\text{я}} c^2} \cong \frac{Q^2}{2M_{\text{я}} c^2} \cong \frac{2,034^2}{2 \cdot 7 \cdot 931,5} \cong 3 \cdot 10^{-4} \text{ МэВ}$$

γ-кванттық энергия:

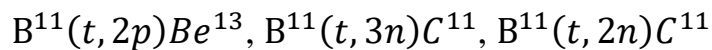
$$E = Q - E_{Li} \cong Q = 2,034 \text{ МэВ}$$

#### 40 есеп

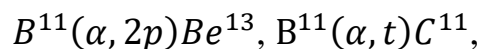
Табиғи бор нысанасын сәулелендіру кезінде жартылай шығарылу кезеңдері 20,4 мин және 0,024 с болатын радиоактивті изотоптардың пайда болуы байқалды. Қандай реакциялар осы изотоптардың пайда болуына әкелді?

Шешуі:

20,4 мин және 0,024 с жартылай шығарылу кезеңдері  $C^{11}$ ,  $Be^{12}$  ядроларына сәйкес келеді. Олар бірдей сәуле бөлшектерінің әсерінен пайда болуы үшін бұл бөлшектер тритий ядролары немесе α-бөлшектері болуы керек:



немесе



#### 41 есеп

Табиғи бор нысанасы протондармен бомбаланады. Сәулелену аяқталғаннан кейін β-бөлшектре детекторы 100 Бк белсенділігін тіркеді. 40 минуттан кейін үлгінің белсенділігі ~25 Бк дейін төмендеді. Белсенділіктің көзі қандай? Қандай ядролық реакция жүреді?

Шешуі:

Белсенділік уақыт өте келе  $A = A_0 e^{-\lambda t}$  заңы бойынша өзгереді  
Осы жерден жартылай ыдырау кезеңін табамыз

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{t \ln 2}{\ln(A_0/A_1)} = \frac{40 \ln 2}{\ln(100/25)} = 20 \text{ мин}$$

Мұндай жартылай шығарылу кезеңі бар  $C^{11}$ , ол реакция түзіледі  $B^{11}(p, n)C^{11}$ .

#### 42 есеп

$\gamma$ -квант ядросының жұтылуы нәтижесінде орбиталық моменті  $I_n = 2$  болатын нейтрон шығады. Егер соңғы ядро негізгі күйде пайда болса,  $\gamma$ -кванттың мультипольділігін анықтаңыз

Шешуі:

Реакция  $He^4(\gamma, n)He^3$ .

Соңғы күйдегі жиынтық момент

$$\bar{J}_f = \bar{J}_{He} + \bar{s}_n + \bar{l}_n = \frac{\bar{l}}{2} + \frac{\bar{l}}{2} + \bar{2} = \bar{1}, \bar{2}, \bar{3}.$$

Соңғы күйдегі паритет

$$P_f = P_{He}P_n(-1)^1 = (+1)(+1)(-1)^2 = +1.$$

Бастапқы күйдегі жиынтық момент және паритет

$$\bar{J}_i = \bar{J}_\gamma + \bar{s}_\alpha = \bar{l}_\gamma,$$

$$P_i = P_\gamma P_\alpha = P_\gamma = +1.$$

Яғни, фотондардың мультипольділігі 1, 2, 3, ал олардың паритеті оң болуы керек, яғни олар M1, E2, M3 фотондары.

#### 43 есеп

$t_{\text{акт}} = 15$  мин кезінде қалыңдығы  $d = 0,1$  см  $Mn^{55}$  пластинкасын сәулелендірген  $J$  нейтрондар шоғырының қарқындылығын есептеңіз, егер сәулелену аяқталғаннан кейін  $t_{\text{охл}} = 150$  мин болса, оның 1 белсенділігі 2100 Бк болды. Жартылай шығарылу кезеңі  $Mn^{55}$  2,58 сағ, активтендіру қимасы  $\sigma = 0,48$  б, пластинаның зат тығыздығы  $\rho = 7,42$  г/см<sup>3</sup>.

Шешуі:

Пластинаның белсенділігі үшін жазуға болады

$$I = Jn\sigma(1 - e^{-\lambda t_{\text{обл}}})e^{-\lambda t_{\text{охл}}},$$

мұндағы  $n$  – мишен ауданы бірлігіне шаққандағы ядролар саны

$$n = \frac{\rho d N_A}{A}$$

Осы жерден

$$J = \frac{IAe^{\lambda t_{\text{охл}}}}{\rho d \sigma (1 - e^{-\lambda t_{\text{обл}}})} = \frac{2100 \cdot 55 e^{151n2/154.8}}{7,42 \cdot 0,1 \cdot 6 \cdot 10^{23} \cdot 0,48 \cdot 10^{-24} (1 - e^{-151n2/154,8})} =$$

$$= 1,62 \cdot 10^7 \text{нейтр./с.}$$

#### 44 есеп

$\alpha$ -бөлшекті  $T = 7$  МэВ энергиясымен  $B^{10}$  стационарлық ядромен ұстап алған кезде пайда болатын құрама ядроның қозу энергиясын анықтаңыз.

Шешуі:

$\alpha$ -бөлшектің  $B^{10}$  ядросымен әрекеттесуі кезінде  $N^{14}$  құрама ядро түзіледі. Энергияны сақтау заңын жазыңыз.

$$m_N c^2 = m_N c^2 + E_{\text{возб}} = (m_B + m_\alpha) c^2 + \frac{m_B}{m_\alpha + m_B} T_\infty$$

қайдан  $E_{\text{возб}}$  үшін аламыз

$$E_{\text{возб}} = (\Delta m_B + \Delta m_\alpha) c^2 + \frac{m_B}{m_\alpha + m_B} T_\infty =$$

$$= (12,05 + 2,425 - 2,863) + \frac{10}{4+10} 7 = 16,61 \text{ МэВ.}$$

#### Тақырып: Элементар бөлшектер

#### 45 есеп

$\pi$ -мезондардың жалпы кинетикалық энергиясының шамасын  $T_{\Sigma\pi}$  анықтаңыз, демалу кезінде пайда болады  $K^+$ -мезон:  $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$ . Энергетикалық бірліктердегі бөлшектердің тыныштық массалары:  $m_{K^+} = 493,646$  МэВ,  $m_{\pi^{+-}} = 139,658$  МэВ.

Шешуі:

$K^+$ -мезон  $E_{K^+}$  толық энергиясы оның тыныштық энергиясына тең  $E_{K^+} = m_{K^+}$ . Үш пионның толық энергиясы  $E_{\Sigma\pi}$  олардың кинетикалық және тыныштық энергияларының қосындысына тең.

$$E_{\Sigma\pi} = T_{\Sigma\pi} + M_{\Sigma\pi} = T_{\Sigma\pi} + 3m_{\pi^{+-}}$$

Энергияның сақталу заңынан  $E_{K^+} = E_{\Sigma\pi}$

$$T_{\Sigma\pi} = m_{K^+} + 3m_{\pi^{+-}}$$

Мәндерді ауыстыру

$$T_{\Sigma\pi} = 493,646 \text{ МэВ} - 3 \cdot 139,658 \text{ МэВ} = 74,672 \text{ МэВ}$$

#### 46 есеп

Күшті өзара әрекеттесу реакцияларында түзілетін X бөлшектерін анықтаңыз:

- 1)  $\pi^- + p \rightarrow K^- + p + X$ ;
- 2)  $K^- + p \rightarrow \Omega^- + K^0 + X$ ;
- 3)  $p + \bar{p} \rightarrow \Xi^- + \pi^+ + X$ .

Шешуі:

Q зарядының сақталу заңдарына, B барион зарядына, S ғаштығына және осы реакциялардағы изоспин  $I_3$  проекциясына сүйене отырып, X бөлшектерінің сипаттамаларын анықтаймыз:

- 1)  $\pi^- + p \rightarrow K^- + p + X$

$$Q: \quad -1 + 1 \rightarrow -1 + 1 + Q_x \qquad Q_x = 0$$

$$B: \quad 0 + 1 \rightarrow 0 + 1 + B_x \qquad B_x = 0$$

$$S: \quad 0 + 0 \rightarrow -1 + 0 + S_x \qquad S_x = 0$$

$$I_3: \quad -1 + \frac{1}{2} \rightarrow -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + (I_3)_x \qquad (I_3)_x = -\frac{1}{2}$$

Бұл кванттық сандар жиынтығы  $K^0$ –мезонға сәйкес келеді.

- 2)  $K^- + p \rightarrow \Omega^- + K^0 + X$

$$Q: \quad -1 + 1 \rightarrow -1 + 0 + Q_x \qquad Q_x = 1$$

$$B: \quad 0 + 1 \rightarrow 1 + 0 + B_x \qquad B_x = 0$$

$$S: \quad -1 + 0 \rightarrow -3 + 1 + S_x \qquad S_x = 1$$

$$I_3: \quad -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \rightarrow 0 - \frac{1}{2} + (I_3)_x \qquad (I_3)_x = \frac{1}{2}$$

Бұл кванттық сандар жиынтығы  $K^+$ –мезонға сәйкес келеді

- 3)  $p + \bar{p} \rightarrow \Xi^- + \pi^+ + X$

$$Q: \quad 1 - 1 \rightarrow -1 + 1 + Q_x \qquad Q_x = 0$$

$$B: \quad 1 - 1 \rightarrow 1 + 0 + B_x \qquad B_x = -1$$

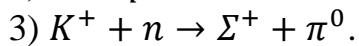
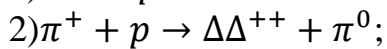
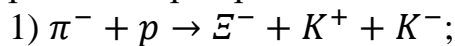
$$S: \quad 0 + 0 \rightarrow -2 + 0 + S_x \qquad S_x = 2$$

$$I_3: \quad \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \rightarrow -\frac{1}{2} + 1 + (I_3)_x \qquad (I_3)_x = -\frac{1}{2}$$

Бұл кванттық сандар жиынтығы  $\Xi^0$ -гиперонға сәйкес келеді.

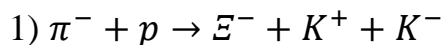
#### 47 есеп

Күшті өзара әрекеттесу нәтижесінде реакциялар өтуі мүмкін бе? Төменде осы реакциялар берілген:



Шешуі:

Осы реакциядағы Q электр зарядының, B барион зарядының, S ғаштығының және  $I_3$  изоспинінің проекциясының өзгеруін анықтайық:



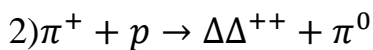
$$Q: \quad -1 + 1 \rightarrow -1 + 1 - 1 \qquad \Delta Q = -1$$

$$B: \quad 0 + 1 \rightarrow 1 + 0 + 0 \qquad \Delta B = 0$$

$$S: \quad 0 + 0 \rightarrow -2 + 1 - 1 \qquad \Delta S = -2$$

$$I_3: \quad -1 + \frac{1}{2} \rightarrow -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \qquad \Delta I_3 = 0$$

Реакция мүмкін емес, өйткені электр заряды мен ғаштық сақталмайды.



$$Q: \quad 1 + 1 \rightarrow 2 + 0 \qquad \Delta Q = 0$$

$$B: \quad 0 + 1 \rightarrow 1 + 0 \qquad \Delta B = 0$$

$$S: \quad 0 + 0 \rightarrow 0 + 0 \qquad \Delta S = 0$$

$$I_3: \quad 1 + \frac{1}{2} \rightarrow \frac{3}{2} + 0 \qquad \Delta I_3 = 0$$

Реакция мүмкін, өйткені барлық сақталу заңдары орындалды.

$$3) K^+ + n \rightarrow \Sigma^+ + \pi^0$$

$$Q: \quad 1 + 0 \rightarrow 1 + 0 \quad \Delta Q = 0$$

$$B: \quad 0 + 1 \rightarrow 1 + 0 \quad \Delta B = 0$$

$$S: \quad 1 + 0 \rightarrow -1 + 0 \quad \Delta S = -2$$

$$I_3: \quad \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \rightarrow 1 + 0 \quad \Delta I_3 = 1$$

Реакция мүмкін емес, өйткені изоспиннің оғаштығы мен проекциясы сақталмайды.

#### 48 есеп

Төмендегі әлсіз адрондардың қайсысына тыйым салынады және қайсысына рұқсат етіледі?

$$1) K^0 \rightarrow \pi^- + e^+ + \nu_e;$$

$$2) \Sigma^- \rightarrow n + e^- + \bar{\nu}_e;$$

$$3) \Xi^0 \rightarrow \Sigma^- + e^+ + \nu_e.$$

Рұқсат етілген ыдырау диаграммаларын салыңыз.

Шешуі:

Адрондардың лептондық әлсіз ыдырауы оғаштықтың өзгеруімен келесі ережелерге бағынады:

$$|\Delta S| = 1 \text{ и } \Delta Q = \Delta S$$

мұндағы  $\Delta Q$  – электр зарядының өзгеруі;

$\Delta S$  – адрондардың оғаштығының өзгеруі.

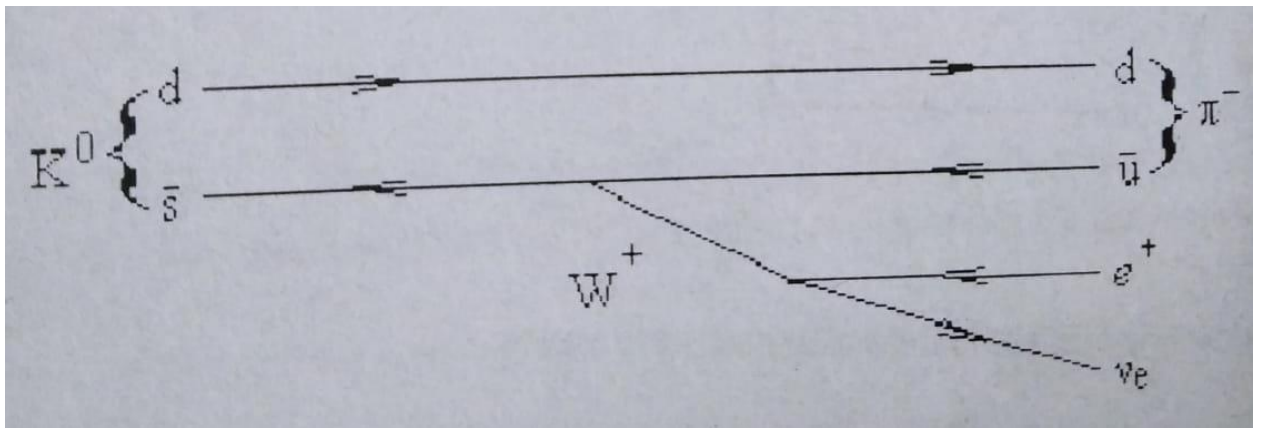
Осы ыдыраудағы  $Q_{\text{адр}}$  адрондарының электр зарядының өзгеруін және  $S$  оғаштығын анықтайық:

$$1) K^0 \rightarrow \pi^- + e^+ + \nu_e;$$

$$Q_{\text{адр}}: \quad 0 \rightarrow -1 \quad \Delta Q_{\text{адр}} = -1$$

$$S: \quad 1 \rightarrow 0 \quad \Delta S = -1$$

Ыдырауға рұқсат етілген  $\Delta Q = \Delta S$ .



$$2) \Sigma^- \rightarrow n + e^- + \bar{\nu}_e$$

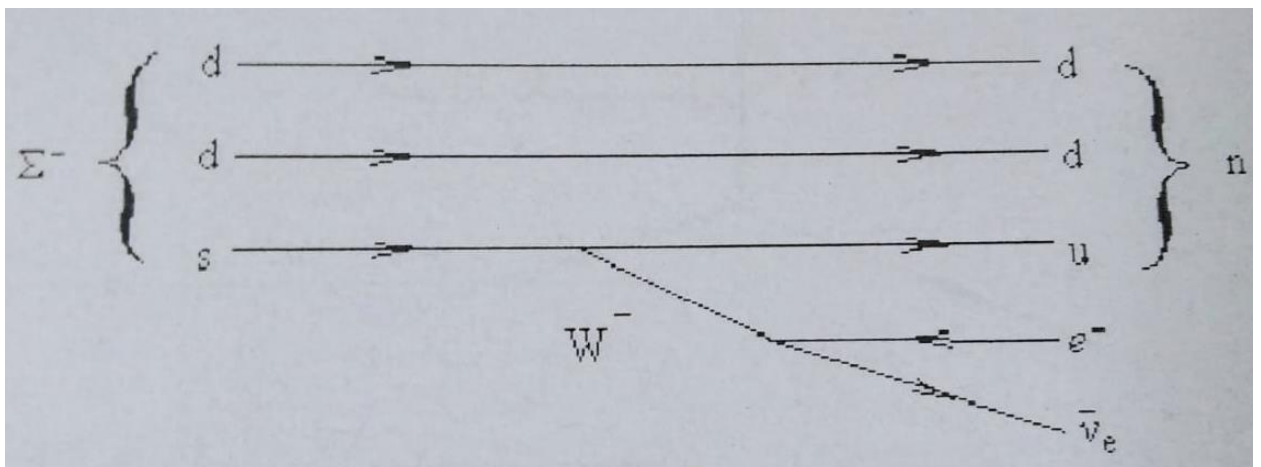
$$Q_{\text{адр}}: -1 \rightarrow 0$$

$$\Delta Q_{\text{адр}} = 1$$

$$S: -1 \rightarrow 0$$

$$\Delta S = 1$$

Ыдырауға рұқсат етілген  $\Delta Q = \Delta S$ .



$$3) E^0 \rightarrow \Sigma^- + e^+ + \nu_e$$

$$Q_{\text{адр}}: 0 \rightarrow -1$$

$$\Delta Q_{\text{адр}} = -1$$

$$S: -2 \rightarrow -1$$

$$\Delta S = 1$$

Ыдырауға тыйым салынады  $\Delta Q \neq \Delta S$ .

#### 49 есеп

Ыдыраудың кварктық диаграммаларын салыңыз

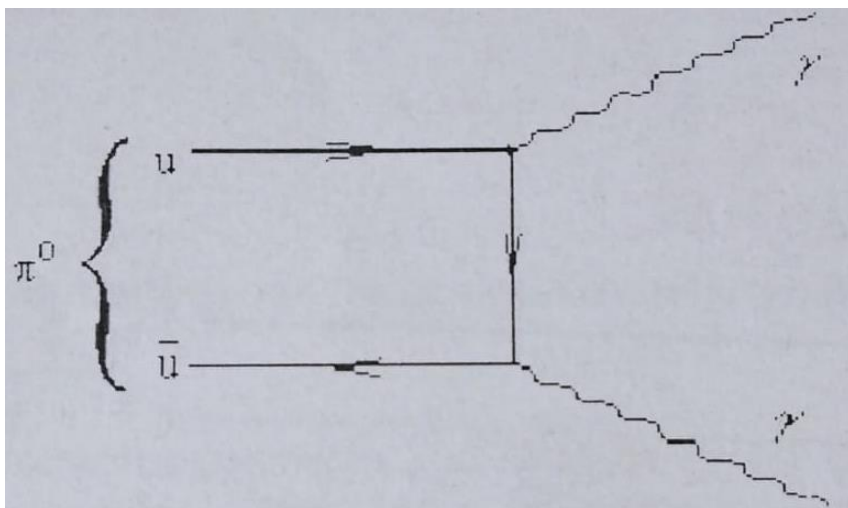


- 1)  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ ;
- 2)  $\pi^0 \rightarrow e^+ + e^-$ ;
- 3)  $\rho^0(770) \rightarrow e^+ + e^-$ ;
- 4)  $\eta'(958) \rightarrow 3\pi^0$ .

Бұл ыдырауға қандай өзара әрекеттесулер жауап береді?

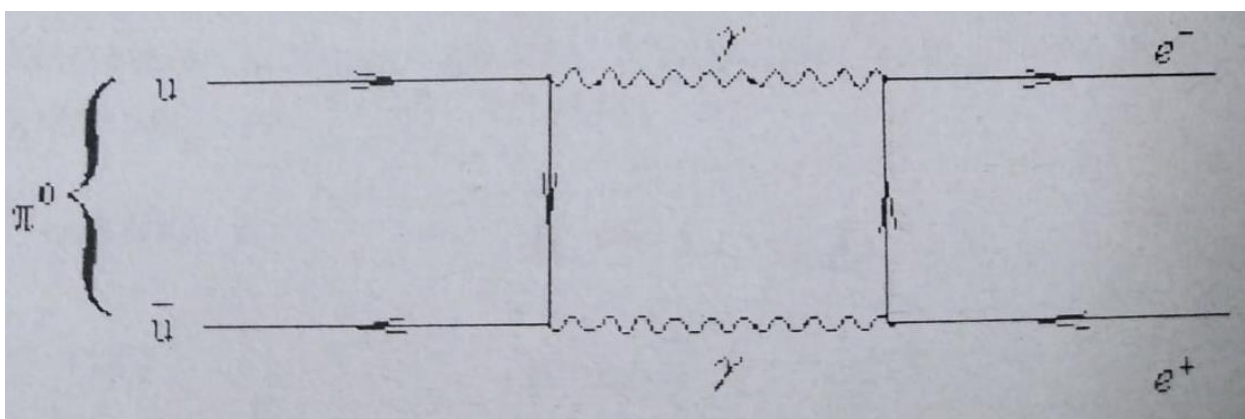
Шешуі:

- 1)  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$



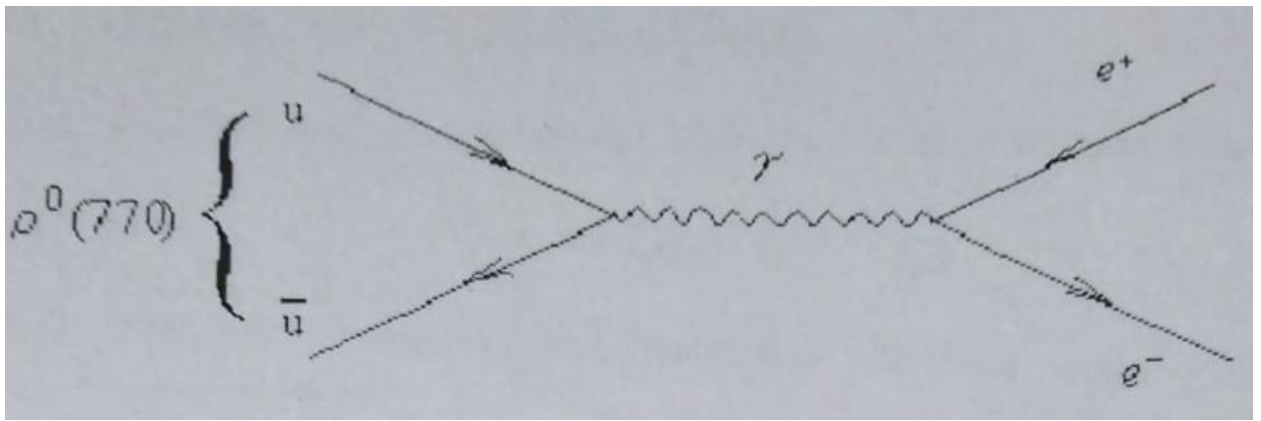
Бұл ыдырау электромагниттің өзара әрекеттесу нәтижесінде пайда болады.

- 2)  $\pi^0 \rightarrow e^+ + e^-$



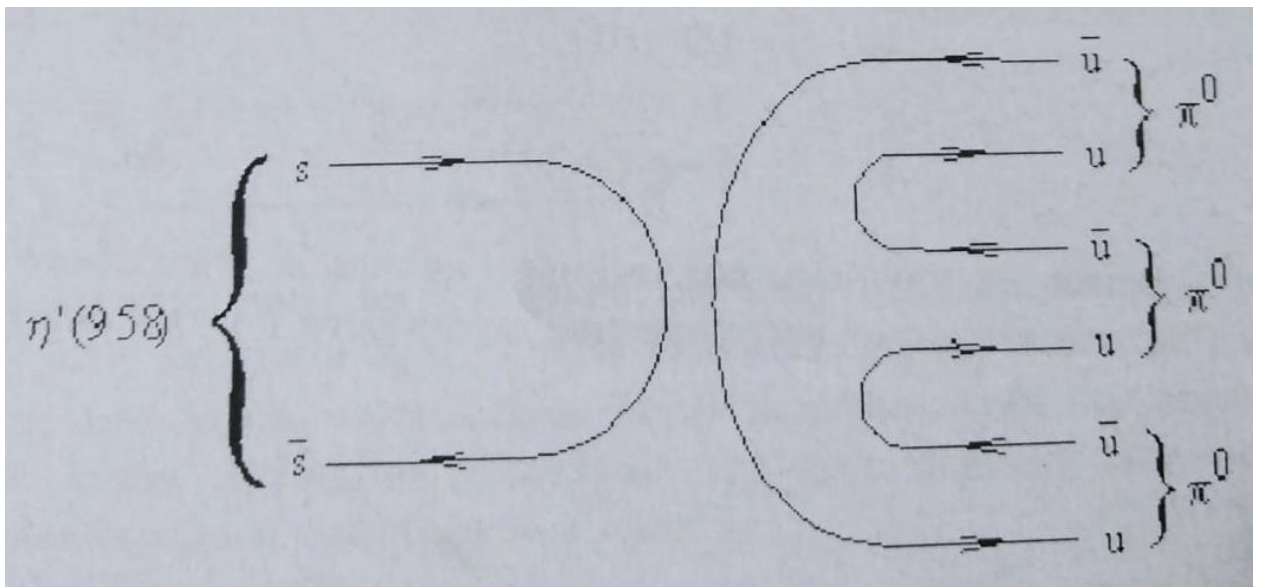
Бұл ыдырау электромагниттің өзара әрекеттесу нәтижесінде пайда болады

- 3)  $\rho^0(770) \rightarrow e^+ + e^-$



Бұл ыдырау электромагниттің өзара әрекеттесу нәтижесінде пайда болады  
 2) және 3) ыдырау диаграммаларындағы айырмашылық  $\pi^0$  – мезонның  $C_{\pi^0}=+1$  и  $\rho^0$ -мезонна  $C_{\rho^0}=-1$ . Заряд паритетінің айырмашылығымен байланысты.  $\gamma$ -кванттың заряд паритеті  $C_{\gamma}=-1$  болғандықтан,  $\pi^0$  – мезонның ыдырау екі  $\gamma$ -кванттың қатысуымен ғана мүмкін болады -  $C_{\pi^0} = C_{\gamma}C_{\gamma} = (-1) \cdot (-1) = +1$ .  $\rho^0$ -мезон үшін ыдырау тек бір  $\gamma$ -кванттың қатысуымен мүмкін  $C_{\rho^0} = C_{\gamma} = -1$

4)  $\eta'(958) \rightarrow 3\pi^0$



Бұл ыдырау электромагниттің өзара әрекеттесу нәтижесінде пайда болады.

**50 есеп**

Ядролық магнетондардағы  $u$  және  $d$ -кварктардың магниттік моменттерін анықтаңыз, олардың массасы нуклон массасының  $1/3$  бөлігін құрайды.

Шешуі:

Спині  $1/2$ , массасы және заряды болатын кез-келген нүктелік зарядталған бөлшек өзінің магниттік моментінің шамасына ие.

$$\mu_s = \frac{q\hbar}{2mc}$$

Осыдан сүйене отырып, сәйкесінше  $u$  және  $d$ -кварктары үшін бізде:

$$\mu_u = \frac{+2/3e\hbar}{2m_u c} = \frac{e\hbar}{3m_u c} = \frac{e\hbar}{m_p c} = 2\mu_N,$$

$$\mu_d = \frac{-1/3e\hbar}{2m_d c} = -\frac{e\hbar}{6m_u c} = -\frac{e\hbar}{2m_p c} = -1\mu_N,$$

мұндағы  $\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p c}$  — ядролық магнетон

## Өз бетінше шешуге арналған есептер

### Тақырып: Атом ядроларының қасиеттері

1. Ядролық заттың тығыздығын, нуклон концентрациясын және ядродағы электр зарядының көлемдік тығыздығын анықтаңыз.
2. Протондардың жұқа қорғасын фольгамен шашырауы Резерфорд формуласына 450 кГс·см-тан аспайтын протондардың  $B_p$  мәндерінде сәйкес келеді.
3.  $C^{12}$  және  $C^{13}$  изотоптарынан тұратын табиғи көміртектегі  $C^{13}$  изотопының пайызын (атомдық және массалық) табыңыз. Табиғи көміртектің атомдық массасы және екі изотоптың атомдарының массалары белгілі деп саналады.
4.  $H^1, H^2$  және  $O^{16}$  нуклондардың массаларын табыңыз, егер массалық айырмашылықтар белгілі болса, м.а.ө. үш негізгі дублет:  $H_2^1 - H^2 = 0,001548$ ;  $H_3^2 - \frac{1}{2C^{12}} = 0,042306$ ;  $C_1^{12}H_4 - O^{16} = 0,036386$ .
5. (17) формуласын пайдаланып табыңыз:
  - 1) протондар мен нейтрондардың саны бірдей және радиусы  $Al^{27}$  ядросының радиусынан бір жарым есе кіші ядроның байланыс энергиясы;
  - 2) энергия байланыс бір нуклон да ядроларындағы  $Li^6, Ar^{40}, Ag^{107}$  және  $Pb^{208}$ .
6. Нуклид массаларының кестелік мәндерін пайдаланып анықтаңыз:
  - 1) ядродағы нейтрон мен  $\alpha$ -бөлшектің байланыс энергиясы  $Ne^{21}$ ;
  - 2)  $O^{16}$  ядросын төрт бірдей бөлшекке бөлуге қажетті энергия.
7.  $Pb^{207}$  ядросының қозу энергиясын табыңыз,  $Pb^{206}$  ядросы елеусіз аз кинетикалық энергиямен нейтронды басып алған кезде пайда болады.
8.  $N^{14}$  және  $N^{13}$  ядроларының байланыс энергиясы 104,66 және 94,10 МэВ болатыны белгілі болса,  $N^{14}$  ядросындағы нейтрондық байланыс энергиясын есептеңіз.
9.  $O^{16}$  ядросына  $\alpha$ -бөлшекке және  $C^{12}$  ядросына бөлуге қажетті энергияны табыңыз, егер  $O^{16}, C^{12}$  және  $He^4$  ядроларының байланыс энергиялары 127,62-ге тең; 92,16 және 28,30 МэВ.
10.  $H^2$  және  $Li^6$  ядроларының синтезі нәжижесінде екі  $\alpha$ -бөлшектің түзілуінен бөлінетін энергияны анықтаңыз. Егер белгілі байланыс энергиясының бір нуклон да ядроларындағы  $H^2, He^4$  және  $Li^6$  тең тиісінше 1,11; 7,08 және 5,33 МэВ.

**11.** Зарядтың ядро көлеміне біркелкі таралуы кезінде протондардың кулондық итерілу энергиясы  $U_{кул} = 0,6Z^2 e^2/R$  болатынын көрсетіңіз, мұндағы  $Z$  мен  $R$  – ядроның заряды мен радиусы.

**12.** Жартылай эмпирикалық формула арқылы есептеңіз:

- 1)  $Ca^{40}$  мен  $Ag^{107}$  ядролық байланыс энергиясы;
- 2)  $V^{50}$  және  $Hg^{200}$  ядролардағы бір нуклонға байланыс энергиясы;
- 3) массы атомов  $Sc^{45}$  мен  $Zn^{70}$  атомдық массасы.

**13.** Анықтау ядро заряды бар, ең кіші үлесті салмағы арасында ядролардың бірдей тақ мәні, массалық саны  $A$ . Болжау көмегімен алынған формулалар сипаты белсенділігін (электрондық немесе позитрондық) мынадай  $\beta$ -активті ядролардың:  $Ag^{103}$ ,  $Sc^{127}$  және  $Sc^{141}$ .

**14.** Өте жұқа құрылымның қанша компонентінде келесі атомдардың негізгі терминдері бар:  $H^3(S_{1/2}^2)$ ;  $Li^6(S_{1/2}^2)$ ;  $Be^9(S_0^1)$ ;  $N^{15}(S_{3/2}^4)$  және  $Cl^{35}(P_{1/2}^2)$ . Жақшада атомның электронды қабығының негізгі термині көрсетілген.

**15.** Күшті магнит өрісінде термиялық ішкі деңгейлердің әрқайсысы  $S_{1/2}^2 K^{42}$  және  $Rb^{85}$  атомдарының ішкі деңгейлерінің әрқайсысы сәйкесінше бес және алты компоненттерге бөлінеді. Осы атомдардың ядроларының спинін табыңыз.

**16.** Магнит өрісіндегі  $B = 1,00$  кГс электронның, протонның және нейтронның прецессиясының бұрыштық жылдамдығын есептеңіз.

**17.**  $S_0^2$  негізгі күйіндегі  $Mg^{25}$  атомдарының магниттік қасиеттерін магниттік резонанстық әдіспен зерттеу тәжірибелерінде тұрақты магнит өрісінің кернеулігі  $B = 5,4$  кГс және айнымалы магнит өрісінің жиілігі  $\nu_0 = 1,40$  МГц кезінде энергияның резонанстық сіңірілуі анықталды. Гирромагниттік мультипликаторды және спинді біле отырып, ядроның магниттік моментін анықтаңыз.

**18.** Магниттік резонанстық әдіспен  $Li^7 F^{19}$  молекуларының магниттік қасиеттері зерттелді, оларда электронды қабықтың импульс моменті нөлге тең. Тұрақты магнит өрісінің кернеулігі  $B = 5,00$  кГс айнымалы магнит өрісінің жиіліктерінде  $\nu_1 = 8,30$  МГц мен  $\nu_2 = 2,00$  МГц екі резонанстық шындар анықталды, олар бақылау тәжіриделері көрсеткендей, сәйкесінше литий мен фтор ядроларына жатады. Осы ядролардың магниттік моменттерін табыңыз. Спиндер белгілі деп саналады.

**19.** Ядролық қабық моделінің көмегімен  $Li^7$ ,  $C^{13}$  және  $Mg^{25}$  ядроларының негізгі күйлерінің конфигурацияларын жазыңыз.

20. Ядролық қабық моделінің көмегімен  $C^{13}$  және  $N^{13}$  ядроларының негізгі күйлерінің спині және паритетін анықтау.

21. Ядролық қабық моделінің көмегімен спин және жұптық негізгі жайкүйінің мынадай ядролардың табу:  $O^{17}$ ;  $Si^{29}$ ;  $K^{39}$ ;  $Sc^{45}$  и  $Cu^{63}$ .

22. Кинетикалық энергиясымен  $T=2$  МэВ протон қозғалмайтын  $Au^{197}$  ядросына ұшады.  $\frac{d\sigma}{d\Omega}$  дифференциалды шащырау қимасын  $\theta=60^\circ$  бұрышына анықтаңыз. Егер диффузиялық ядро ретінде  $Al^{27}$  таңдалса, дифференциалды шащырау қимасының шамасы қалай өзгереді?

23. Алтын  $Au^{197}$  ядроларындағы протондардың серпімді шащырауының  $\frac{d\sigma}{d\Omega}$  дифференциалды қимасын  $15^\circ$  бұрышта есептеңіз. Егер мақсатты сәулелендіру сеансы үшін қалыңдығы  $d = 7$  мг/см<sup>2</sup> протон жалпы заряды  $Q=1$  нКл,  $S=0,5$  см<sup>2</sup> детекторына  $l=30$  см қашықтықта, серпімді шащыраңқы протондардың  $\Delta N = 1,97 \cdot 10^5$  болды. Эксперименттік өлшенген қиманы резерфордпен салыстырыңыз.

24. Хлор салыстырмалы атомдық массалары  $A_{r,1} = 34,969$  және  $A_{r,2} = 36,966$  болатын екі изотоптың қоспасы. Егер бірінші және екінші изотоптардың  $\omega_1$  және  $\omega_2$  массалық үлестері сәйкесінше  $0,754$  және  $0,246$  болса, хлордың  $A_r$  салыстырмалы атомдық массасын есептеңіз.

25. Бейтарап плутоний атомының массасының қанша бөлігі оның электронды орбитасының массасы?

### Тақырып: Радиоактивті сәулелену және оның түрлері

26. Радиоактивті ядроның ыдырау ықтималдығын  $t$  уақыт аралығында табыңыз. Егер оның ыдырау константасы  $\lambda$  болса.

27. Радиоактивті ядролардың орташа өмір сүру уақыты  $\tau = 1/\lambda$  көрсету, мұндағы  $\lambda$  – иолардың ыдырау константасы.

28.  $Sr^{90}$  ядроларының бастапқы санының үлесі қандай:

- 1) 10 және 100 жылдан кейін қалады;
- 2) бір күнде ыдырайды; 15 жылда?

2. Таза активтілік  $Po^{239}$  нақты белсенділігін есептеңіз.

**30.** 1 мг белсенді емес  $Sr^{89}$  стронцийге қанша миллиграмм  $\beta$ -белсенді қосу керек, осылайша препараттың меншікті белсенділігі  $5,06 \cdot 10^{13}$  Бк/г (1370 Ки/г) болады.

**31.**  $Ra^{226}$ , ыдырау өнімі бола отырып, соңғысында әр  $2,8 \cdot 10^6$ -ге бір атом мөлшерінде болады  $U^{238}$  уран атомы. Жартылай шығарылу кезеңін  $U^{238}$  табыңыз, егер ол жартылап шығарылу кезеңінен едәуір үлкен екені белгілі болса  $Ra^{226}$ , бұл 1620 жылға тең.

**32.**  $\beta$ -ыдырау кезінде  $Pd^{112}$   $\beta$ -белсенді нуклид  $Ag^{112}$  пайда болады. Олардың жартылай шығарылу кезеңдері сәйкесінше 21 және 3,2 сағ. Егер бастапқы сәтте препаратта тек  $Pd^{112}$  нуклиді болса,  $Ag^{112}$  нуклидінің максималды белсенділігінің препараттың бастапқы белсенділігіне қатынасын табыңыз.

**33.** Қорғасынның массасын анықтаңыз. Ол 1,0 кг  $U^{238}$ -ден жердің жасына тең кезеңге ( $2,5 \cdot 10^9$ ) жыл.

**34.** Препараттың құрамында 10 мкг мөлшерінде  $Ra^{226}$  және оның өтпелі тепе-теңдік күйінде болатын ыдырау өнімдері бар. Қолданба кестелерін пайдаланып анықтаңыз:

- 1)  $\alpha$ -белсенділігі  $Rn^{222}$  және  $\beta$ -активтілігі  $Pb^{210}$  осы препараттың белсенділігі;
- 2) препараттың жиынтық  $\alpha$ -белсенділігі.

**35.** Радиоактивті изотопта  $t = 15$  с уақытында ыдырайтын атомдардың  $N$  санын анықтаңыз, егер оның белсенділігі  $A = 0,1$  МБк болса. Көрсетілген уақыт ішінде белсенділікті тұрақты деп санаңыз.

**36.**  $Po^{210}$  ядролары  $T = 5,30$  МэВ кинетикалық энергиясы бар  $\alpha$ -бөлшектерін шығарады, іс жүзінде барлық еншілес ядролар тікелей негізгі күйде түзіледі. Анықтау:

- 1) осы ядролардың орташа өмір сүру уақытына тең кезең ішінде  $Po^{210}$  препаратының 10,0 мг бөлетін жылу мөлшері;
- 2)  $Po^{210}$  препаратының бастапқы белсенділігі, егер оның жартылай шығарылу кезеңіне тең уақыт ішінде препарат 2,2 кДж жылу бөлсе.

**37.**  $Po^{210}$  ядроларының ыдырауы негізгі күйден туындайды және  $\alpha$ -бөлшектердің екі тобының шығарылуымен бірге жүреді: негізгі энергиясы 5,30 МэВ және әлсіз (қарқындылығы бойынша) энергиясы 4,50 МэВ. Осы ядролардың  $\alpha$ -ыдырау энергиясын және еншілес ядролар шығаратын  $\gamma$ -кванттардың энергиясын табыңыз.

**38.** Тыныштықтағы нейтронның  $\beta$ -ыдырауынан пайда болатын бөлшектердің жалпы кинетикалық энергиясын есептеңіз.

39. Егер аналық және еншілес атомдардың массалары мен электронның массасы белгілі болса,  $\beta^-$ -ыдырау,  $\beta^+$ -ыдырау және К-ұстау кезінде бөлінетін энергиялар қалай анықталады?

40. Егер еншілес ядролар тікелей негізгі күйде болатыны белгілі болса,  $\text{Be}^{10}$  ядролары шығаратын электрондар импульсінің максималды мәнін есептеңіз.

41.  $\text{C}^{11}$  ядросы позитронды ыдырауды бастан кешіреді, нәтижесінде еншілес ядро тікелей негізгі күйде болады. Есептеу:

1) позитронды максималды кинетикалық энергиясы және еншілес ядроның тиісті кинетикалық энергиясы;

2) еншілес ядро кері қайтарылмайтын жағдайда. Позитрон мен нейтронның энергия мәні.

42. Қозу энергиясы 103 кэВ болатын  $\text{Se}^{81m}$  изомерлік ядросы негізгі күйге  $\gamma$ -квантты немесе конверсиялық электронды шығару арқылы өтеді. К-атом қабықшалары (К-электронның байланыс энергиясы 12,7 кэВ). Екі жағдайда да қайтару ядросының жылдамдығын табыңыз.

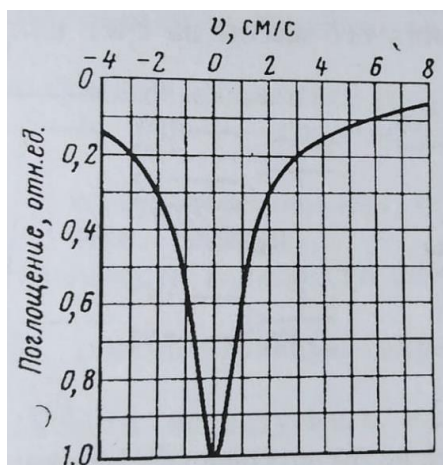
43.  $\text{In}^{117}$   $\beta^-$ -ыдырауында пайда болатын қазған  $\text{Sn}^{117}$  ядролары екі  $\gamma$ -квантты дәйекті түрде шығару арқылы негізгі күйге өтеді. Бұл процесс конверсиялық К-электрондардың шығарылуымен бірге жүреді, олар үшін  $\nu_{\beta\beta}$  және 1300-ге тең - см. К-электрондардың байланыс энергиясы 29 кэВ құрайды.  $\gamma$ -кванттардың энергиясын анықтаңыз.

44. Қозу энергиясы  $E = 129$  кэВ болатын  $\text{In}^{191}$  бос ядросы  $\gamma$ -квантты шығару арқылы негізгі күйге өтті. Ядроның кері қайтарылуынан туындайтын берілген  $\gamma$ -кванттың энергиясының салыстырмалы өзгеруін табыңыз.

45. 13 суретте 129 кэВ энергиясы бар Мёссбауэр  $\gamma$ -сызығының жұтылуының көзбен раковинаның салыстырмалы жылдамдығына тәуелділігі келтірілген ( $\text{In}^{191}$ ). Бұл сызықтың шығарылуы қозған ядролардың тікелей негізгі күйге өтуімен байланысты екенін ескере отырып, тиісті қозған деңгейдің ені мен өмір сүру уақытын табыңыз.

46. Салыстырмалы маңызы бар енінің  $\gamma$ -сызығы Мёссбауэр үшін  $\text{Fe}^{57}$  және  $\text{Zn}^{67}$  тең тиісінше  $3,0 \cdot 10^{-13}$  және  $5,0 \cdot 10^{-16}$ . Жер бетінде тіркелген кезде Мёссбауэр сызығының гравитациялық орын ауыстыруы осы сызықтардың енінен асып тұсуі үшін көзді ( $\text{Fe}^{57}$  және  $\text{Zn}^{67}$ ), жер бетінен қандай биіктікке көтеру керек?





13 сурет –Мессбауэрдің  $\gamma$ -сызығының сіңіру тәуелділігі

**Тақырып: Радиоактивті сәулелену мен бөлшектерді тіркеуге арналған аспаптар**

**47.** Зерттелетін сәулелену өрісіндегі есептегіш 10 минут ішінде 3600 импульсті тіркеді. Табу:

- 1) есептегіштердің жылдамдығындағы орташа квадраттық қателік, имп./мин;
- 2) қателік шегі 1,00% болатын санау жылдамдығын анықтауды қамтамасыз ететін өлшеу ұзақтығы.

**48.** Зерттелетін сәулеленудің қарқындылығын өлшеу кезінде (фонмен бірге) есептегіш 10,0 минут ішінде 1700 импульсті тіркеді. жеке фондық өлшеу 15,0 минут ішінде 1800 импульс берді. Санау жылдамдығын табу, имп./мин, зерттелетін сәулеленуге байланысты және оның орташа квадраттық қателігі.

**49.** Рұқсат етілген уақыты бар Гейгер-Мюллер есептегіші  $\tau = 0,20$  мс уақыты  $n = 3,0 \cdot 10^4$  имп./мин тіркелді. Есептегіш арқылы 1 мин өткен бөлшектердің нақты N санын анықтаңыз.

**50.** Кейбір препараттың белсенділігін фонмен өлшегенде, уақыты 0,20 мс болатын Гейгер-Мюллер есептегіші 1000 имп./с. тіркелді. Сол есептегіштің жеке фондық өлшемі 600 имп./с. берді. 1 с. есептегіш арқылы өтетін зерттелетін препараттың бөлшектерінің санын анықтаңыз.

**51.** Есептегіш арқылы уақыт бірлігінде өтетін бөлшектердің саны N. Егер есептегіш  $\tau_1$  пен  $\tau_2$  тіркеуші құрылғының рұқсат етілген уақыты белгілі болса, есептегіштің тіркеуші құрылғысының шығысындағы уақыты белгілі болса, есептегіштің тіркеуші құрылғысының шығысындағы уақыт бірлігіндегі импульсатардың санын анықтаңыз. Істерді қарастыру:

- 1)  $\tau_1 > \tau_2$ ;
- 2)  $\tau_1 < \tau_2$ .

52. Күшейтуден кейін Гейгер-Мюллер есептегіштерінің импульстары тікелей электромагниттік есептегішке беріледі. Электромагниттік есептегіштің рұқсат етілген уақытын анықтаңыз. Егер радиоактивті препарат Гейгер-Мюллер есептегішіне жақындаған кезде тіркелген импульстар саны максимумнан өтетіні белгілі болса  $n_{\text{макс}} = 46$  имп./с.

### Ядролық реакциялар

53. Реакция шегі есептеңіз:  $N^{14} + \alpha \rightarrow O^{17} + p$ , егер ұшатын бөлшек болса, екі жағдайда:

- 1)  $\alpha$ -бөлшек;
- 2)  $N^{14}$  ядросы.  $Q = 1,18$  МэВ реакцияның энергиясы. Нәтижесін түсіндіру.

54. Келесі реакциялардың энергиялары мен шектерін есептеңіз:

- 1)  $d(p, \gamma)He^3$ ;
- 2)  $d(d, He^3)n$ ;
- 3)  $Li^7(p, n)Be^7$ ;
- 4)  $He^3(\alpha, \gamma)Be^7$ ;
- 5)  $S^{32}(\gamma, p)P^{31}$ ;
- 6)  $S^{32}(\gamma, n)S^{31}$ ;
- 7)  $S^{32}(\gamma, \alpha)Si^{28}$ ;
- 8)  $He^4(\alpha, p)Li^7$ .

55. Зертханалық жүйеде  $C^{12}(n, \alpha)Be^9$  реакциясындағы нейтрон энергиясының шекті мәні кезінде түзілетін  $B^9$  ядросының кинетикалық энергиясын анықтаңыз.

56.  $C^{12}$  ядросы  $\gamma$ -квантты сіңіреді, нәтижесінде  $l=1$  орбиталық моменті бар протон шығады. Егер соңғы ядро негізгі күйде пайда болса, сіңірілген  $\gamma$ -кванттың мультипольділігін анықтаңыз?

57.  $Al^{27}(\alpha, p)Si^{30}$  реакциясының қимасында  $\alpha$ -бөлшектердің энергиясында максимумдар байқалады  $T = 3,95$ ;  $4,84$  және  $6,57$  МэВ. О қимадағы максимумдарға сәйкес келетін құрама ядроның қозу энергиясын анықтаңыз. Қимадағы максимумдарға сәйкес келетін құрама ядроның қозу энергиясын анықтаңыз.

5.  $T_0 = 1,0$  МэВ кинетикалық энергиясы бар  $\alpha$ -бөлшек  $Li^6$  тыныштық ядросында серпімді түрде тарайды.  $\alpha$ -бөлшектің бастапқы қозғалыс бағытына  $\vartheta = 30^\circ$  бұрышымен ұшқан кері ядроның кинетикалық энергиясын анықтаңыз.

59. Келесі реакциялардың энергиясын анықтаңыз:

- 1)  $H^3(p, \gamma)He^4$ ;

- 2)  $N^{14}(\alpha, d)O^{16}$ ;
- 3)  $C^{12}(\alpha, d)N^{14}$ ;
- 4)  $Li^6(d, n\alpha)He^3$ .

**60.**  $Be^9(\gamma, n)Be^8$ ,  $Q = -1,65$  МэВ,  $\hbar\omega = 1,78$  МэВ энергиясы бар  $\gamma$ -кванттармен реакция арқылы бериллийдің фото бөлінуінен пайда болатын нейтрондардың энергиясын табыңыз.

**61.** Дейтерий нысанасын  $\hbar\omega = 2,52$  МэВ энергиясы бар  $\gamma$ -кванттармен сәулелендіру кезінде фотопротондар шығарылады, оларда  $B\rho = 63,7$  кГс · см. Нейтрон мен протон массаларының айырмашылығын елемей, дейтеронның байланыс энергиясын табыңыз.

**62.** Келесі реакциялардың энергиясын есептеңіз:

- 1)  $H^2(d, p)H^3$ , егер ұшатын дейтерондардың энергиясы  $T_d = 1,20$  МэВ және дейтеронның қозғалыс бағытына тік бұрышта ұшатын протонның энергиясы болса  $T_p = 3,30$  МэВ;
- 2)  $N^{14}(\alpha, p)O^{17}$ , егер ұшатын  $\alpha$ -бөлшектердің энергиясы  $T_\alpha = 4,00$  МэВ және  $\alpha$ -бөлшектердің қозғалыс бағытына  $\vartheta = 60^\circ$  бұрышында ұшқан протонның энергиясы болса  $T_p = 2,08$  МэВ.

**63.**  $Be^9(p, \alpha)Li^6 + 2,13$  МэВ реакциясын тудыратын протондардың кинетикалық энергиясын анықтаңыз, егер протондардың қозғалыс бағытына тік бұрышпен ұшатын  $\alpha$ -бөлшектердің жүгірісі қалыпты жағдайда ауада 2,5 см болса.

**64.** Кинетикалық энергиясы  $T_d = 10,0$  МэВ болатын дейтерондар көміртегі ядроларымен әрекеттесіп,  $C^{13}(d, \alpha)B^{11}$ ,  $Q = +5,16$  МэВ реакциясын қоздырады. Реакция өнімдерінің ұшу бағыттары аррасындағы бұрышты анықтаңыз, егер:

- 1) пайда болған ядролар симметриялы түрле ұшады;
- 2)  $\alpha$ -бөлшек дейтерондар шоғырына тік бұрышпен ұшады.

**65.** Келесі реакцияларды  $\alpha$ -бөлшектер мен нейтрондардың шекті энергиясын есептеңіз:

- 1)  $\alpha + Li^7 \rightarrow B^{10} + n$ ;
- 2)  $\alpha + C^{12} \rightarrow N^{14} + d$ ;
- 3)  $n + C^{12} \rightarrow B^9 + \alpha$ ;
- 4)  $n + O^{17} \rightarrow C^{14} + \alpha$ .

**66.**  $p + H^3 \rightarrow He^3 + n$  реакциясындағы ұшатын бөлшектің шекті кинетикалық энергиясын есептеңіз, егер ұшатын бөлшек болса:

- 1) протон;
- 2) тритий ядросы.

67. Массасы  $M$  болатын тыныштық ядросының қозу энергиясын табыңыз, ол  $\hbar\omega$  энергиясымен  $\gamma$ -квантты ұстағанда алады.

68. Ядроның қозу энергиясын анықтаңыз  $\text{He}^4$ , кинетикалық энергиясы 2,0 МэВ болатын протонды тыныштық ядросы  $\text{H}^3$  басып алу нәтижесінде пайда болды.

69.  $\text{Be}^9$  ядросындағы серпімді емес шашырау нәтижесінде 2,40 МэВ қозу энергиясын соңғы хабарлау үшін нейтрон қандай минималды кинетикалық энергияға ие болуы керек?

70. Реакцияның шығымы ( $\gamma, n$ ) мыс пластинасының қалыңдығы  $d = 1,0$  мм  $\gamma$ -кванттармен 17 МэВ энергиямен сәулеленуі кезінде,  $\omega = 4,2 \cdot 10^{-4}$ . Берілген реакцияның қимасын табыңыз.

71. Қалыпты жағдайда азот газы орналасқан камера арқылы моноэнергетикалық нейтрондардың тар шоғыры (0,025эВ) өтеді. Нейтрондар ағыны  $2,0 \cdot 10^8 \text{ с}^{-4}$ . Реакция қимасын табыңыз ( $n, p$ ), егер сәуленің ұзындығы 1,0 см-ге 5,0 мс уақыт ішінде 95 протон пайда болатыны белгілі болса.

72. Жұқа пластинка бірі  $\text{Cd}^{113}$  жылу нейтрондарымен сәулелендіреді, аңының тығыздығы  $1,0 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ . Егер алты күндік сәулеленудің кейін  $\text{Cd}^{113}$  изотоптық ядроларының мөлшері 1,0% төмендегені белгілі болса, реакция қимасын табыңыз ( $n, \gamma$ ).

73. Табиғи изотоптық құрамның жұқа бор пластинасы бір жыл ішінде жылу нейтрондарының ағынымен сәулеленеді  $J = 2,00 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ .  $\text{B}^{10}$  ядроланыдағы реакция нәтижесінде сәулеленудің соңына қарай соңғысының мазмұны 16,4% болды. Берілген реакцияның қимасын анықтаңыз.

74. Табиғи изотоптың құрамдағы литийден тұратын қалыңдығы 0,50 см болатын нысанаға жылу нейтрондарының сәулесімен сәулелену кезінде реакцияның шығуын ( $n, \alpha$ ) анықтаңыз.

75. Бериллийдің қалың нысанасы 7,0 МэВ кинетикалық энергиямен  $\alpha$ -бөлшектермен бомбаланады. Реакцияның орташа қимасын ( $\alpha, n$ ) анықтаңыз, егер оның өнімділігі болса  $2,50 \cdot 10^{-4}$ .

76. Егжей-тегжейлі тепе-теңдік принципі арқылы реакция  $\alpha + \text{Li}^6 \rightarrow \text{Be}^9 + p - 2,13 \text{ МэВ}$  реакциясының бомбалаушы  $\alpha$ -бөлшектерінің энергиясында  $T = 3,70 \text{ МэВ}$  көлденең қимасын  $\sigma_1$  табыңыз, егер протондардың сәйкес энергиясындағы кері реакция қимасы  $\sigma_2 = 0,050 \text{ мб}$  болса.

77. Кинетикалық энергиясы 1,0 ГэВ болатын болса, импульстарды, ГэВ/спротонды, мюонды және электронды есептеңіз.

78. Олардың салыстырмалы қозғалысының кинетикалық энергиясы  $T=30$  ГэВ, кинетикалық энергияларымен бір-біріне қарай қозғалатын екі протонның соқтығысуымен бірдей болуы үшін бекітілген протонға ұшатын протонға қандай кинетикалық энергияны айту керек?

79. Бомбалаушы бөлшектердің шекті кинетикалық энергиясын келесі реакцияларда есептеңіз (ұшатын бөлшек бірінші болып табылады):

- 1)  $p + H^2 \rightarrow He^3 + \pi^0$ ;
- 2)  $p + B^{10} \rightarrow B^{11} + \pi^+$ ;
- 3)  $p + p \rightarrow \tilde{L} + L$ ;
- 4)  $\pi^- + p \rightarrow \Sigma^- + K^+$ ;
- 5)  $\pi^- + p \rightarrow n + K^0 + \tilde{K}^0$ ;
- 6)  $\tilde{p} + p \rightarrow p + \tilde{\Sigma}^0 + \tilde{K}^+$ ;
- 7)  $p + p \rightarrow p + p + p + \tilde{p}$ .
- 8)  $p + p \rightarrow p + p + \Sigma^- + \tilde{\Sigma}^-$ .

80. Ұшатын бөлшектің шекті энергиясымен сутегі нысанасында пайда болатын мезондардың кинетикалық энергиясын табыңыз:

- 1)  $\gamma + p \rightarrow n + \pi^+$ ;
- 2)  $p + p \rightarrow p + \Sigma^0 + K^+$ .

81. Протондар кинетикалық энергиясымен  $T=500$  МэВсутегі нысанасын бомбалап,  $p + p \rightarrow d + \pi^+$  реакциясын қоздырады. Дейтрондардың ең жоғары ұшу бұрышын табыңыз.

82. Тоқтаған  $\Sigma$ -бөлшек нейтрон мен  $\pi$ -мезонға ыдырады. Нейтронның кинетикалық энергиясы мен импульсін табыңыз.

83. Тоқтаған мюон ыдыраған кезде пайда болатын электронның кинетикалық энергиясы мен импульсінің максималды мәндерін есептеңіз.

84.  $\pi^0$ -мезон кинетикалық энергиясымен  $T_\pi=50$  МэВ мюон мен нейтриноға ұшып кетті. Нейтриноның ұшу бұрышы  $90^\circ$  болса, мюон қандай бұрышпен ұшты?

85.  $\pi^0$ -мезон кинетикалық энергиясы оның тыныштық энергиясына тең,  $\pi^0$ -мезон ұшып бара жатқанда екі  $\gamma$ -квантқа бөлінеді. Табу:

- 1)  $\gamma$ -кванттардың ұшу бағыттары арасындағы мүмкін болатын ең аз бұрыш;
- 2) әрбір кванттың энергиясы қандай шектерде болуы мүмкін.

86. Кинетикалық энергиясы  $T$  бар релятивистік  $K^0$ -мезон ұшып бара жатқанда екі  $\pi^0$ -мезонға ыдырайды. Табыңыз:

- 1) қандай мәнде  $T$  пайда болатын  $\pi$ -мезондардың бірі тыныштықта болуы мүмкін;
- 2) симметриялы түрде ұшатын  $\pi$ -мезондардың бағыттарды арасындағы бұрыш, егер  $T=100$  МэВ.

**87.**  $\Sigma^+$ -гиперон импульспен  $p_\Sigma = 900$  МэВ/с оң  $\pi$ -мезонға және бейтарап бөлшекке тез ыдырайды. Мезон импульспен ұшады  $p_\pi = 200$  МэВ/с бұрышпен  $\vartheta = 60^\circ$  гиперонның бастапқы қозғалыс бағытына. Бейтарап бөлшектің массасын және берілген ыдырау энергиясын табыңыз.

**88.** Кейбір бейтарап бөлшектердің ыдырауы нәтижесінде протон мен  $\pi^-$ -мезон, табылды, олардың таралу бағыттары арасындағы бұрыш  $\theta = 60^\circ$ . Анықталған бөлшектердің импульстары сәйкесінше 450 және 135 МэВ/с құрайды. Басқа ыдырау өнімдері жоқ деп есептей отырып, ыдырайтын бөлшектің массасын есептеңіз.

### Тақырып: Элементар бөлшектер

**89.** Өзіңіздің орташа өмір сүру уақытыңызды анықтаңыз:

- 1) мюондар, егер кинетикалық жнергиясы болса  $T = 7m_\mu$  олардың орташа өмір сүру уақыты  $\tau = 17,6$  мкс;
- 2)  $\pi^+$ -мезондар, егер импульс болса  $p = 55$  МэВ/с, олар орташа қашықтықты ұшады  $l = 3,0$  м ыдырауға дейін.

**90.** Мезонның кинетикалық энергиясы 100 МэВ болса,  $\pi^+$ -мезонның туған жерінен ұшу кезінде ыдырау ықтималдығын табыңыз (қашықтық 6,00 м).

**91.**  $\gamma$ -кванттардың сутегі нысанасымен әрекеттесуінде  $\gamma + p \rightarrow \pi^0 + p$  реакциясы жүреді. Реакцияның толық қимасы  $\sigma_{\gamma p} = 0,20$  мб  $\gamma$ -квант энергиясында  $E_\gamma = 250$  МэВ. Егжей-теглейлі тепе-теңдік принципі арқылы мезонның тиісті кинетикалық энергиясымен кері процестің қимасын ( $\pi^0$  – мезондар сутегі нысанасын бомбалайды) анықтаңыз. Бұл энергияны табыңыз.

**92.** Лептондық және бариондық зарядтардың сақталу заңдары арқылы келесі процестердің мүмкін екендігін анықтаңыз:

- 1)  $n \rightarrow p + e^- + \nu_e$ ;
- 2)  $\tilde{\nu}_\mu + p \rightarrow n + \mu^+$ ;
- 3)  $\mu^+ \rightarrow e^+ + \tilde{\nu}_e + \nu_\mu$ ;
- 4)  $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu + \pi^0$ ;
- 5)  $\pi^- + n \rightarrow K^- + K^0$ ;
- 6)  $K^- + p \rightarrow \Sigma^+ + \pi^-$ .

**93.** Төмендегі реакциялардың қайсысына оғаштықты сақтау заңы тыйым салады:

- 1)  $\pi^- + p \rightarrow \Lambda + K^0$ ;
- 2)  $\pi^- + p \rightarrow K^- + \Sigma^+$ ;
- 3)  $\tilde{p} + p \rightarrow \tilde{\Sigma}^0 + \tilde{K}^0 + n$ ;
- 4)  $\tilde{p} + n \rightarrow \Lambda + \tilde{\Sigma}^+$ ;
- 5)  $\Sigma^- + p \rightarrow \Lambda + n$ ;
- 6)  $\pi^- + n \rightarrow \Xi^- + K^+ + K^-$ ?

**94.**  $K^+$ - мезонның ыдырау реакциялары  $\mu^+ + \nu_\mu$  және  $\pi^+ + \pi^0$  әлсіз өзара әрекеттесу реакциялары ма?

**95.** Жүйелер үшін T изоспинінің және оның  $T_z$  проекциясының мүмкін мәндерін табыңыз: нуклон – нуклон;  $\pi$ -мезон – нуклон.

**100.** Келесі процессерде изоспин T мен оның проекциясының өзгеруін  $T_z$  табыңыз:

- 1)  $\pi^- + p \rightarrow K^+ + \Sigma^-$ ;
- 2)  $\pi^- + p \rightarrow K^+ + K^0 + \Xi^-$ ;
- 3)  $K^- \rightarrow \pi^0 + \pi^+$ ;
- 4)  $K_S^0 \rightarrow 2\pi^0$ .

**101.** Мезон-нуклон резонанстары үшін изоспин T, оғаштық S, барион заряд B, сондай-ақ толық момент J және паритет P мәндерін анықтаңыз. Егер салыстырмалы орбиталық момент  $l=1$  болса.

**102.** Эксперименталды түрде орнатылды, изоспин дегеніміз екі  $\pi$ -мезонның байланысқан күйін білдіретін бөлшектер.  $\rho$ -бөлшектер 1 тең.

- 1)  $\rho \rightarrow 2\pi$  ыдырауы күшті өзара әрекеттесуді білдіретін ескере отырып, спин қозғалысының моментінің сақталу заңы және  $\rho$ -бөлшектердің паритеті арқылы болдау;  $\pi$ -мезондардың ішкі паритеттері бірдей;
- 2) екі пионға бөлшектердің ықтимал ыдырауын  $\rho^+$ ,  $\rho^0$  және  $\rho^-$  част жазыңыз.

**103.** Кварк кестесін пайдаланып, жобалау:

- 1) кварк пен антикварктан  $C=+1$  және  $-1$  бар сүйкімді мезондар;
- 2) үш кварктан 1, 2 және 3 сүйкімділігі бар сүйкімді бариондар.

**104.** Төменде келтірілген  $K^+$  -мезонның ыдырауының төрт әдісінің қайсысы мүмкін? Рұқсат етілген диаграммалар сурет салыңыз, тыйым салынған себебін көрсетіңіз.

- 1)  $K^+ \rightarrow \pi^0 + e^+ + e^-$ ;
- 2)  $K^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$ ;
- 3)  $K^+ \rightarrow \pi^0 + e^+ + \bar{\nu}_e$ ;
- 4)  $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$ .

**105.** Кинетикалық энергия тыныштық энергиясына тең.  $\pi^0$ -мезон екі  $\gamma$ -квантқа бөлінеді. Бұл энергиялар бір-біріне тең.  $\gamma$ -кванттардың қозғалыс бағыттары арасындағы бұрыш қандай?

**106.** Нейтрино мен антинейтрино әсерінен төмендегі реакциялардың қайсысы мүмкін, қайсысы тыйым салынады және неге:

1)  $\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow n + \mu^+$ ;

2)  $\nu_e + n \rightarrow p + \mu^-$ ;

3)  $\bar{\nu}_\mu + n \rightarrow p + \mu^-$ .

**107.** Егер  $p\bar{p}$  салыстырмалы орбиталық моменті  $L$  болса,  $p\bar{p} \rightarrow 2\pi^0$  реакциясында түзілетін екі  $\pi^0$ -мезонның салыстырмалы орбиталық моменті қандай мәндерге ие болуы мүмкін?

**108.** Нөлдік массасы бар нейтрино үшін  $\pi^0 \rightarrow \nu_e + \bar{\nu}_e$  ыдырауы мүмкін бе?



## Қосымша

Кест 1 - Элементар бөлшектердің жиынтық кестесі

Топ	Бөлшектің атауы	Белгісі		Заряд, e	Тыныштық масса, $m_e$	Спин, $\hbar$	Изотоп спин I	Лептон саны L	Баригон саны B	Оғаштық, S	Шамамен өмір сүру уақыты, c
		бөлшектер	антибөлшектер								
Фотондар	Фотон	$\gamma$		0	0	1	-	0	0	0	тұрақты
Лептондар	Электрон	$e^-$	$e^+$	1	1	1/2	-	+1	0	0	тұрақты
	Электрондық нейтрино	$\nu_e$	$\bar{\nu}_e$	0	0	1/2	-	+1	0	0	тұрақты
	Мюон	$\mu^-$	$\mu^+$	1	206,8	1/2	-	+1	0	0	$\approx 10^{-6}$
	Мюондық нейтрино	$\nu_\mu$	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	1/2	-	+1	0	0	тұрақты
	Тау-лептон (Таон)	$\tau^-$	$\tau^+$	1	3487	1/2	-	+1	0	0	$\approx 10^{-12}$
	Таондық нейтрино	$\nu_\tau$	$\bar{\nu}_\tau$	0	0	1/2	-	+1	0	0	тұрақты
Адрондар	Мезондар	Пиондар	$\pi^0$		0	264,1	0	1	0	0	$\approx 10^{-16}$
			$\pi^+$	$\pi^-$	1	273,1	0	1	0	0	$\approx 10^{-8}$
	Каондар	$K^0$	$\bar{K}^0$	0	974,0	0	1/2	0	0	+1	$\approx 10^{-10} - 10^{-8}$
		$K^+$	$K^-$	1	966,2	0	1/2	0	0	+1	$\approx 10^{-8}$
	Эта-мезон	$\eta^0$		0	1074	0	-	0	0	0	$\approx 10^{-19}$

1 - кестенің жалғасы

Бариондар	Протон	p	$\bar{p}$	1	1836,2	1/2	1/2	0	+1	0	тұрақты
	Нейтрон	n	$\bar{n}$	0	1838,7	1/2	1/2	0	+1	0	$\approx 10^3$
	Гиперондар:										
	лямбда	$\Lambda^0$	$\bar{\Lambda}^0$	0	2183	1/2	0	0	+1	-1	$\approx 10^{-10}$
	Сигма	$\Sigma^0$	$\bar{\Sigma}^0$	0	2334	1/2	1	0	+1	-1	$\approx 10^{-20}$
		$\Sigma^+$	$\bar{\Sigma}^+$	1	2328	1/2	1	0	+1	-1	$\approx 10^{-10}$
		$\Sigma^-$	$\bar{\Sigma}^-$	1	2343	1/2	1	0	+1	-1	$\approx 10^{-10}$
	Кси	$\Xi^0$	$\bar{\Xi}^0$	0	2573	1/2	1/2	0	+1	-2	$\approx 10^{-10}$
		$\Xi^-$	$\bar{\Xi}^-$	1	2586	1/2	1/2	0	+1	-2	$\approx 10^{-10}$
	омега	$\Omega^-$	$\bar{\Omega}^-$	1	3273	3/2	0	0	+1	-3	$\approx 10^{-10}$

2 Кесте – Бейтарап атомдардың массалары

Элемент	Реттік нөмері	Изотоп	Массасы, м.а.ө.
(Нейтрон)	0	n	1,00867
Сутегі	1	H <sup>1</sup>	1,00783
		H <sup>2</sup>	2,01410
Гелий	2	H <sup>3</sup>	3,01605
		He <sup>3</sup>	3,01603
		He <sup>4</sup>	4,00260
Литий	3	Li <sup>6</sup>	6,01513
		Li <sup>7</sup>	7,01601
Бериллий	4	Be <sup>7</sup>	7,01693
		Be <sup>9</sup>	9,01219
		Be <sup>10</sup>	10,01354
Бор	5	B <sup>9</sup>	9,01333
		B <sup>10</sup>	10,01294
		B <sup>11</sup>	11,00931
Көміртегі	6	C <sup>10</sup>	10,00168
		C <sup>12</sup>	12,00000
		C <sup>13</sup>	13,00335
		C <sup>14</sup>	14,00324
Азот	7	N <sup>13</sup>	13,00574
		N <sup>14</sup>	14,00307
		N <sup>15</sup>	15,00011
Оттегі	8	O <sup>16</sup>	15,99491
		O <sup>17</sup>	16,99913
		O <sup>18</sup>	17,99916
Фтор	9	F <sup>19</sup>	18,99840
Натрий	11	Na <sup>22</sup>	21,99441
		Na <sup>23</sup>	22,98977
Магний	12	Mg <sup>23</sup>	22,99414
Алюминий	13	Al <sup>30</sup>	29,99817
Кремний	14	Si <sup>31</sup>	30,97535
Фосфор	15	P <sup>31</sup>	30,97376
Калий	19	K <sup>41</sup>	40,96184
Кальций	20	Ca <sup>44</sup>	43,95549
Қорғасын	82	Pb <sup>206</sup>	205,97446
Полоний	84	Po <sup>210</sup>	209,98297

3 Кесте – Кейбір элементар және жеңіл ядролардың тыныштық массасымен энергиясы

Бөлшек	Массасы		Энергиясы	
	$m_0$ , кг	$m_0$ , м.а.ө.	$E_0$ , Дж	$E_0$ , МэВ
Электрон	$9,11 \cdot 10^{-31}$	0,00055	$8,16 \cdot 10^{-10}$	0,511
Бейтарап мезон	$2,41 \cdot 10^{-28}$	0,14526	-	135
Протон	$1,67 \cdot 10^{-27}$	1,00728	$1,50 \cdot 10^{-10}$	938
Нейтрон	$1,68 \cdot 10^{-27}$	1,00867	$1,51 \cdot 10^{-10}$	939
Дейтон	$3,35 \cdot 10^{-27}$	2,01355	$3,00 \cdot 10^{-10}$	1876
$\alpha$ -бөлшек	$6,64 \cdot 10^{-27}$	4,00149	$5,96 \cdot 10^{-10}$	3733

4Кесте – Радиоактивті изотоптардың жартылай ыдырау периоды

Изотоп	Изотоптың символы	Ыдыраудың түрі	Жартылай ыдырау периоды
Актиний	$Ac_{89}^{225}$	$\alpha$	10 тәулік
Йод	$I_{53}^{131}$	$\beta^-$ , $\gamma$	8 тәулік
Иридий	$Ir_{77}^{192}$	$\beta^-$ , $\gamma$	75 тәулік
Кобальт	$Co_{27}^{60}$	$\beta^-$ , $\gamma$	5,3 жыл
Магний	$Mg_{12}^{27}$	$\beta^-$	10 мин
Радий	$Ra_{88}^{219}$	$\alpha$	$10^{-3}$ с
	$Ra_{88}^{226}$	$\alpha$ , $\gamma$	$1,62 \cdot 10^3$ жыл
Радон	$Rn_{86}^{222}$	$\alpha$	3,8 тәулік
Стронций	$Sr_{38}^{90}$	$\beta^-$	28 жыл
Торий	$Th_{90}^{229}$	$\alpha$ , $\gamma$	$7 \cdot 10^3$ жыл
Уран	$U_{92}^{238}$	$\alpha$ , $\gamma$	$4,5 \cdot 10^9$ жыл
Фосфор	$P_{15}^{32}$	$\beta^-$	14,3 тәулік
Натрий	$Na_{11}^{22}$	$\gamma$	2,6 жыл

## Қорытынды

Оқу-әдістемелік құралда «Ядролық физика» пәнінің негізгі бөлімдері қарастырылған. Ядро спині және оның магниттік моменті сияқты физикалық құбылыстар мен ұғымдарды, атом ядросының модельдерін,  $\gamma$ -сәулеленудің резонанстық жұтылуын (Мёссбауэр эффектісі), альфа-ыдырауды, бета-ыдырауды, электронды ыдырауды, радиоактивті сәулелер мен бөлшектерді бақылау және тіркеу әдістерін, нейтрондардың әсерінен ядролық реакцияларды, элементар заттардың қасиеттерін түсіндіруге көп көңіл бөлінеді.

Типтік есептерді шешудің мысалдары, сондай-ақ өз бетінше шешуге арналған есептер келтірілген. Нұсқаулықтың соңында периодтық жүйенің негізгі элементтерінің, бейтарап атомдардың массаларының және есептерді шешуде қолданылатын кейбір қарапайым және жеңіл ядролардың массасы мен тыныштық энергиясының қосымшалары келтірілген.

Оқу құралының мақсаты - студенттерді физикалық құбылыстарды талдауға, негізгі факторларды бөліп көрсетуге және физикалық есепті шешу әдісін таңдауға үйренетін өзіндік шығармашылық жұмысқа тарту.

## Пайдаланылған әдебиеттер тізімі

1. Трофимова Т.И. Физика курсы: ЖОО-лар үшін оқу құралы:-15-ші басылымы, стереор. – М.: «Академия» баспа орталығы, 2007. – 482-б.
- 2.<http://sites.google.com/site/anogurtsov/lectures/phys/http://www.ilt.kharkov.ua/bvi/ogurtsov/ln.htm>
3. Абдулаев Ж. Физика курсы. – Алматы: Кітап, 1994. - 352-бет.
4. Кислов А.Н. Атомная и ядерная физика: уч.пособие/ А.Н. Кислов. – Екатеринбург: Изд-во Урал.ун-та, 2017, - 271-б.
5. Гончарова Н.Г., Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Кэбин Э.И., Степанов М.Е. Физика ядра и частиц. Задачи с решениями. – Москва, Из-во УНЦДО, 2003 г. – 114 б.
6. Иродов И.Е. Сборник задач по атомной и ядерной физике: Учеб. Пособие для вузов. – 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 216 б., ил.
7. Чертов А.Г., Воробьев А.А. Задачник по физике: Учеб. Пособие. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш.школа, 1981. – 496 с., ил.