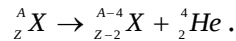


α -, β -, и γ -разпад – особености и условия за протичане. Модели на ядрото. Ядрени реакции

α -, β -, и γ -разпад – особености и условия за протичане

α – разпад

Самопроизволното изпускане на α -частици (хелиеви ядра ${}^4_2\text{He}$) се нарича α -разпад.



Исходното ядро ${}_Z^AX$ се нарича **матерно**, а крайното ${}_{Z-2}^{A-4}X$ - **дъщерно**. Превръщането на един елемент в друг се нарича **трансмутация**.

Характерни експериментални особености на α – разпада:

- α -разпад има само при тежките ядра. Почти всички α -активни ядра имат **$Z > 83$** , т.е. не по-малко от 2 протона след завършения протонен слой, съответстващ на магическото число 82. За ядра със **$Z > 83$** , за които не се наблюдава α -разпад, се предполага, че той съществува, но е трудно да се открие на фона на другите механизми на разпад;
- периода на полуразпад на α -активните ядра варира в широки граници. Например за ${}^{204}_{82}\text{Pb}$, $T_{1/2} = 1,4 \cdot 10^{17}$ години, а за ${}^{215}_{86}\text{Rn}$ е $T_{1/2} = 10^{-6} \text{ s}$;
- енергията на изпусканите α -частици е в доволно тесен интервал – 4 – 9 MeV за тежките ядра и 2 – 4,5 MeV за ядра с A от 140 до 160;
- ярко изразено свойство на α -разпада е силната зависимост на периода на полуразпад от енергията на изпусканата частица, която се описва от емпиричния закон на Гайгер-Нътъл

$$\log \lambda = C + \frac{D}{\sqrt{E}},$$

където C и D са константи, зависещи от A и слабо зависещи от Z , и се подбират експериментално. Като пример за силната зависимост на периода на полуразпад от енергията на изпусканите частици може да се посочи, че намаляването на енергията с 1% може да увеличи периода на полуразпад 10 пъти, а 10% намаление на енергията изменя периода на полуразпад с 2 – 3 порядъка;

- α -частиците, изпускани от даден вид ядра, имат като правило една и съща енергия. По-прецизни измервания показват, че спектъра на изпусканите частици има тънка структура – няколко близко разположени енергетични нива;
- за да съществува α -разпада е необходимо, но недостатъчно, той да е енергетично възможен

$$M(A, Z) > M(A-4, Z-2) + M({}_2^4\text{He}).$$

Разликата в масите, изразена в енергетични единици, се реализира като енергия на α - разпада

$$\Delta E = E_{A-4, Z-2} + E_{\alpha} - E_{A, Z}.$$

α -разпада е експериментално възможен, ако **$\Delta E > 0$** .

Значителна част от енергията **ΔE** отива като кинетична енергия на α -частицата, а останалата – като енергия на откат на дъщерното ядро. Тъй като кинетичната енергия е положителна **$\Delta E > 0$** то реакцията е **екзотермична**.

Енергията на връзката на α -частиците е 28 MeV, т.е. 7 MeV на нуклон, α -разпада е енергетично допустим, ако енергията на връзката на нуклона е по-малка от 7 MeV.

β – разпад

β -разпада е процес, при който нестабилното ядро изпуска електрон или позитрон, при което Z се променя с ± 1 . Необходимо условие за протичане на β -разпада е

$$M(A, Z) = M(A, Z \pm 1) + m_e.$$

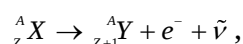
Енергията, отдадена при β -разпада е

$$\Delta E = E_{A, Z} - E_{A, Z \pm 1} - E_1,$$

където E_1 е енергията на продуктите от разпада. Тази енергия се разпределя като енергия на всички продукти на разпада.

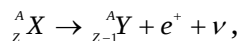
Видове β – разпад

- **електронен**



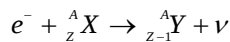
където $\bar{\nu}$ е антинейтрино (електрически неутрална частица). При електронния β -разпад един от нейтроните в ядрото се превръща в протон.

- **позитронен**



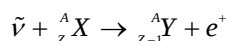
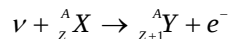
където ν е нейтрино (електрически неутрална частица). При позитронния β -разпад един от протоните в ядрото се превръща в неутрон.

- **К – захват** (електронен захват)



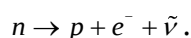
Ядрото поглъща един от електроните на електронната атомна обвивка (обикновено от **К**-слоя)

- **взаимодействие на ν и $\bar{\nu}$ с ядрата**

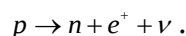


Главната особеност на β -разпада е, че той се осъществява под действие на слабите взаимодействия (четвъртият вид взаимодействие в природата), които са 24 пъти по-слаби от ядрените. β -разпадът не е вътрешно ядрен, а вътрешно нуклонен. В ядрото се разпада 1 нуклон.

При електронния β -разпад реакцията, която протича е:



При позитронния β -разпад реакцията, която протича е

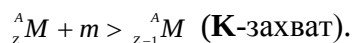


След β -разпада изходното ядро е преустроено. Затова периода на полуразпад, както и другите характеристики на β -разпада, силно зависят от това колко сложно е това преустройство.

- При β -разпада полупериодите, както и при α -разпада, варират в широки граници.
- Отделящата се енергия при единичен β -разпад варира от 0,02 MeV до 13,4 MeV.
- β -разпада е възможен енергетично, ако:

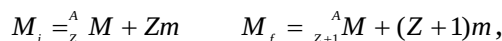


където m е масата на електрона, а ${}_Z^AM$ и ${}_{Z+1}^AM$ са масите на изходното и дъщерното ядро;



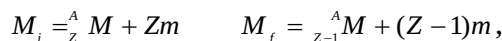
Експериментално се определят не масите на ядрата, а атомите M_i и M_f съответно на изходния и дъщерния атом. Връзката е:

- **за електронен β -разпад** (β^- -разпад)



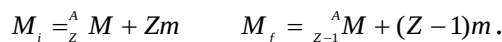
следователно условието за β^- -разпад е $M_i > M_f$;

- **за позитронен β -разпад** (β^+ -разпад)



съответно условието за β -разпад е $M_i > M_f + 2m$;

- **за К – захват**



Тук е пренебрегната енергията на връзка между електроните в атома, тъй като тази енергия е на границата на точността на измерването.

γ – разпад

γ -разпада (γ -излъчване) се състои в това, че ядрото изпуска γ -квант без изменение на **A** и **Z**. γ -разпада е вътрешноядрен процес (β -разпада е вътрешнонуклонен процес). γ -излъчването става за сметка на енергията на възбудените ядра, т.е. възбуденото ядро излъчва γ -квант при прехода си в основно състояние. γ -излъчването на ядрата напомня излъчването на фотони от възбудени атоми (електронната обвивка на ядрото) при преминаване в по-ниско енергетично ниво или основно състояние. Разстоянието между енергетичните ядра в ядрото е 10^3 до 10^6 eV, докато в атома той е от порядъка на електронволти. Ядрата могат да преминават във възбудено състояние в процеса на нееластичен удар с друга частица, в резултат на β -, α -разпад или спонтанно деление. Дъщерното ядро е често във възбудено състояние в

резултат на разпада. Времето на живот на γ - активните ядра е от порядъка на 10^{-7} - 10^{-11} s. Понякога ядрото остава продължително време във възбудено състояние, преди да излъчи γ -кванта. Такова възбудено състояние се нарича **метастабилно**, а ядрото се нарича **изомер**. Възбуденото ядро може да премине в основно състояние и без да излъчи γ -квант. Освободената от прехода енергия отива за възбуждане на електрон от обвивката на атома. Такъв процес се нарича **вътрешна конверсия**. Ако конверсираният електрон е от **K**- или **L**- слоя, на тяхното място може да “слезе” електрон от външните слоеве, при което излъчва фотон от рентгеновата област. Ако енергията на възбуденото ниво /спрямо основното/ е по-голяма от енергията, съответстваща на удвоената маса на електрона $E > 2mc^2 = 1,02 \text{ MeV}$, то е възможен процес на двойна конверсия, при което се излъчват e^+ и e^- .

Модели на ядрото

Въпросите, обхващащи теорията на ядрото, могат формално да се разделят на две групи:

- структура на ядрото;
- механизъм на ядрените реакции.

Трудностите, които съществуват за създаване на последователна теория на ядрото са:

- не е известен точният вид на силите, действащи между нуклоните в ядрото;
- уравненията, описващи движенията на нуклоните в ядрото са твърде обемисти и сложни;
- ядрото не може да се разглежда като непрекъсната среда.

Липсата на цялостна теория на ядрото води до създаване на множество модели, описващи едни или други негови свойства. В основата на всеки ядрен модел стои допускането на някакво приближение спрямо набора от степени на свобода на ядрото. Счита се, че отчитаните степени на свобода слабо взаимодействат с останалите степени на свобода.

Степените на свобода на ядрото е естествено да се разделят на едночастични, описващи движението на индивидуалните частици, и колективни, съответстващи на корелираното движение на голям брой частици. В съответствие с това, използваните в ядрената физика модели, могат да се разделят на:

- едночастични;
- колективни;
- обобщени, в които се използват както едночастичните, така и колективните степени на свобода.

Колективни модели

Моделите, основани на колективните степени на свобода, е прието да се наричат модели със силно взаимодействие между частиците. Колективните ефекти се проявяват в такива състояния на веществото, когато свободният пробег на всяка частица е малък в сравнение с размерите на системата, т.е. главна роля играят честите и интензивни взаимодействия на частицата с най-близките ѝ съседи. В тези модели ядрото се третира като течност или твърдо тяло. Към колективните модели се отнасят:

- капков модел на ядрото;
- модел на несферичното ядро.

Капков модел на ядрото

Ядрото се третира като заредена капка течност. За този модел е получена формулата на Вайцекер в първоначалния ѝ вид (първите три члена). Като независими степени на свобода се считат обемното свиване на ядрото и колебанието на повърхността. В енергията на връзка на ядрото се отчитат обемната, повърхностната и кулоновата енергии. Освен това се отчитат и излизащите извън рамките на капковите представи енергия на симетрия и енергията на сдвояване, т.е. отчитат се всички членове на формулата на Вайцекер:

$$\Delta E = a_1 A - a_2 A^{\frac{2}{3}} - a_3 Z^2 A^{-\frac{1}{3}} - a_4 \frac{(A - 2Z)^2}{A} + \delta E,$$

където коефициентите a_i са определени по експериментални данни, а петият член се определя като $\delta E = \pm \Delta$. Стойността на Δ е определена емпирично (от експериментални данни) $\Delta = \frac{12}{A^{1/3}} \text{ MeV}$. Знакът е положителен за четно-четни и отрицателен за нечетно-нечетни ядра. Четно-четни са ядрата с четен брой на протоните и неутроните, а нечетно-нечетни – с нечетен брой протони и неутрони. За четно-нечетни или нечетно-четни ядра $\Delta = 0$.

В формулата първият член отразява постоянството на плътността на ядрото, вторият член е свързан с повърхностното напрежение на ядрото, третият член е свързан с кулоновото отблъскване между протоните в ядрото, четвъртият член отразява приблизително равния брой протони и неутрони в ядрото (най-силно изразено при леките ядра), петият член е свързан с поправка в енергията на свързване, отразяваща ефекта на сдвояване на два еднакви нуклона.

Област на използване на модела

- Описване на усреднената енергия на връзка на ядрото като функция на **A** и **Z**.
- Разглеждане на повърхностните колебания на сферичните ядра.
- Качествено обяснение на процеса на делене на ядрото.

Модел на несферичното ядро

Ядрото се третира като сгъстена материя, която има несферична форма в равновесно състояние.

Област на използване на модела

- Описва ред нисколежащи възбудени нива на някои несферични ядра.

Едночастични модели

Моделите, основани на едночастичните степени на свобода, е прието да се наричат модели на независимите частици. Едночастичните степени на свобода се проявяват, когато свободният пробег на частиците е по-голям, така, че всяка частица се движи независимо в някакво усреднено самосъгласувано поле.

Слоист модел без остатъчно взаимодействие

Нуклоните се движат независимо един от друг в самосъгласуваното поле на общия за всички нуклони силов център. Реалното взаимодействие може да се представи като сума от самосъгласуваното и някакво остатъчно взаимодействие. Счита се, че остатъчното взаимодействие е малко и може да се пренебрегне.

Област на приложимост на модела

- Получаване на магическите числа.
- Обяснение на спиновете и четността на основните състояния на двойно магическите ядра.
- Обяснение на спиновете, четността и магнитните моменти на основните и някои възбудени състояния на ядра, отличаващи се от магическите с един нуклон (+ или -).

Слоист модел с феноменологично вдвояване

Остатъчното взаимодействие се отчита с допускането за вдвояване на еднакви нуклони. Допускането се състои в това, че нуклони от един тип се обединяват в двойки, така, че във всяка двойка моментът е равен на нула, а четността е положителна.

Област на приложение на модела

- Обяснява стойността на спина и четността на основните състояния на всички четно-четни ядра и почти всички ядра с нечетно **A**.
- Приближено обяснява големината на магнитния момент за почти всички ядра с нечетно **A**.

Обобщени модели

Обобщен модел със слабо взаимодействие

В нулево приближение се счита, че ядрото се състои от непрекъсната сферична сърцевина и един или няколко външни нуклона. За описване на сърцевината се приема един от колективните модели, а за описване на външните нуклони – самосъгласувано поле. Въвежда се и слабо взаимодействие между степените на свобода на сърцевината и външните нуклони.

Област на приложимост на модела

- Обяснява разположението и характеристиките на някои нисколежащи възбудени нива на неголям брой ядра с нечетно **A**.

Обобщен модел със силно взаимодействие

Всички нуклони се движат независимо в самосъгласувано поле. За разлика от слоистия модел, силовият център има сферически несиметрична форма, и освен това може да се върти като цяло. При въртенето му се увеличават напълно или частично всички нуклони.

Област на приложимост на модела

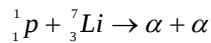
- Обяснява разположението и характеристиките на голям брой нисколежащи нива на много ядра.

Характерно за всички разгледани модели е, че се подбират параметри, съгласувани с експерименталните данни. Разбира се, въвеждайки достатъчно много параметри, могат да се обяснят много данни на основата на който да е модел. Но такива модели са бедни на физични идеи и като правило обясняват вече известни факти, но не са способни да предскажат нови явления. Ценният модел има минимален брой параметри и позволява да се предскажат, макар и качествено, нови явления.

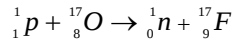
Ядрени реакции

В най-широк смисъл на думата, ядрена реакция се нарича процес на сблъсък между две или повече частици, протичащи с участието на силно взаимодействие. Ядрените реакции са основен метод за изучаване на ядрата и елементарните частици.

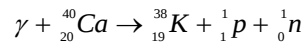
Най-нагледен и универсален начин е записът, приет в химията. Например:



отразява сблъсък на протон с ядрото на **Li**, при което се образуват две частици;



отразява сблъсък на протон с ядрото на кислорода, при което се образуват неутрон и ядро на флуора;



отразява сблъсък на γ -квант с ядрото на калция, при което се образуват неутрон ,протон и ядро на калия.

Последните две реакции могат да се запишат като:



Често се използва и много по-краткия запис:



които показват избиване на неутрон при обстрелване с протон и обстрелване с γ -квант, при което се избиват протон и неутрон.

За количествено изучаване на свойствата на ядрените реакции са необходими величини или характеристики, с които се описват реакциите.

При всяка ядрена реакция се стремим да определим:

- вероятността за протичането ѝ при различни енергии на бомбардиращите частици;
- ъгловото и енергетично разпределение на продуктите от дадена реакция.

За количественото изучаване на свойствата на ядрените реакции са необходими някакви числени величини, описващи интензивността и други характеристики на реакциите.

Реакцията $a + A \rightarrow b + B$, в която в началното и крайното състояние има по две частици, напълно се характеризира с **диференциалното ефективно сечение** $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ на разсейване в област с пространствен ъгъл $d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$, където θ и φ са азимуталния и полярния ъгъл на излитане на една от частиците, като θ се отчита от направлението на падащата частица. Ако частиците нямат спин или спиновете в началното състояние на снаряда и мишената са ориентирани хаотично, процесът има цилиндрична симетрия и тогава диференциалното ефективно сечение ще зависи само от ъгъла θ и може да се запише във вида:

$$\frac{d\sigma}{\sin\theta d\theta} = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\varphi = 2\pi \frac{d\sigma}{d\Omega}.$$

Зависимостта на диференциалното сечение от ъгъла се нарича **ъглово разпределение**.

Често се използва понятието **интегрално сечение**, което се получава като диференциалното ефективно сечение се интегрира по ъгъла:

$$\sigma = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega.$$

Интегралното сечение характеризира интензивността на реакцията. Например, ако в реакцията се получава нов изотоп, то неговото количество е пропорционално на интегралното сечение.

Диференциалното сечение, за разлика от интегралното сечение, зависи от избора на координатна система. Обикновено експерименталните изследвания се провеждат в лабораторна координатна система /ЛС/, в която мишената е в покой. Теоретичните изследвания е по-удобно да се провеждат в система на центъра на инерцията /СЦИ/, в която в покой е центъра на инерцията на взаимодействащите частици. В ядрените реакции обикновено масата на снаряда е много по-малка от масата на ядрата на мишената, така че при високи енергии центърът на инерцията почти съвпада с координатната система на ядрата, т.е. ЛС и СЦИ почти съвпадат. В реалните физични експерименти не винаги е възможно да се измерват непосредствено диференциалното или интегралното сечение. Непосредствено измеряема величина е **изходът от реакцията** – броят на частиците, регистрирани в експерименталната установка.

Закони за запазване при ядрените реакции

Всеки закон за запазване се състои в това, че определена величина трябва да остава постоянна преди и след взаимодействието. Тези закони винаги налагат някакви ограничения, които се наричат забрани, върху продуктите, получавани при реакциите.

Закон за запазване на електричния заряд

Сумарния електричен заряд на входните частици трябва да е равен на сумарния електричен заряд на продуктите от дадена реакция.

Аналогичен закон е **закона за запазване на барионния заряд**

Закон за запазване на енергията

$$E_1 + E_2 = E'_1 + E'_2 + \dots + E'_n \quad (3.1)$$

Тук са посочени пълните енергии на частиците, като кинетичните им енергии са:

$$T = E_i - mc^2.$$

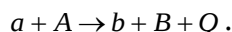
Ако в (3.1) се поставят кинетичните енергии, определени в (3.4), законът за запазване на енергията ще добие вида:

$$T_1 + T_2 = T'_1 + T'_2 + \dots + T'_n - Q,$$

където:

$$Q = (m_1 + m_2 - (m'_1 + m'_2 + \dots + m'_n))c^2.$$

Величината Q е отделената при реакцията енергия. Реакцията може да се означава като:



Както беше споменато по-горе ако $Q > 0$, реакцията се нарича **екзотермична** - става с отделяне на енергия. Ако $Q < 0$, реакцията се нарича **ендотермична** - става с поглъщане на енергия. Екзотермичните реакции могат да протичат при произволно малка енергия на снаряда. При ендотермичните реакции има **праг** – минимална енергия на снаряда, при която реакцията е енергетично възможна.

Закон за запазване на импулса

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 \rightarrow \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2 + \dots + \vec{p}'_n$$

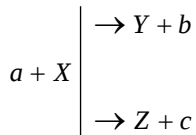
Законът за запазване на импулса е валиден във всяка затворена система, независимо какви са частиците.

Закон за запазване на момента на импулса

Той има голямо значение за описанието на реакциите, протичащи при ниски енергии. Същественото в този закон е, че орбиталният момент на относителното движение на частиците може да приема само дискретни стойности /в единици $\hbar$ / $l = 0, 1, 2, \dots$. Съществуват още закони за запазване, например на четността, които се спазват с висока точност за ядрените реакции.

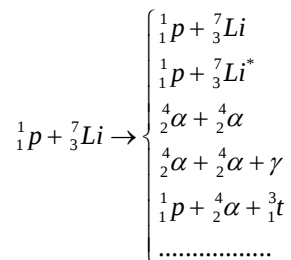
Общи свойства на ядрените реакции

При едни и същи начални условия ядрената реакция може да протече при различни начини. Получените при това крайни състояния се наричат **канали** на реакцията.



Ако енергията на налитащата частица е под прага на някаква ендотермична реакция, съответстващият канал се нарича **закрит**. При голям брой на откритите канали е удобно в експеримента да се измерва сечението на реакцията, наречено **инклузивно**. Например реакцията $a + A \rightarrow b +$ произволна частица, се нарича инклузивна и в нея се измерва (регистрира) само частицата b .

Като илюстрация на казаното може да се разгледа ударът на протон с ядрото на лития ${}^7_3\text{Li}$, при което могат да протекат следните процеси:

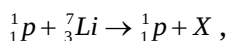


Каналът ${}^1_1p + {}^7_3\text{Li}$ съответства на еластично разсейване.

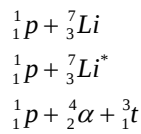
Каналът ${}^1_1p + {}^7_3\text{Li}^*$ съответства на нееластично разсейване, с преход на ядрото на лития ${}^7_3\text{Li}$ във възбудено състояние ${}^7_3\text{Li}^*$.

От показаните канали се виждат две инклузивните сечения, които имат по три канала

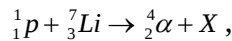
Първото инклузивно сечение може да се запише като:



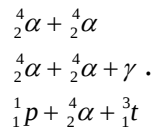
където с X са означени останалите частици от реакциите в трите канала:



Второто инклузивно сечение може да се запише като:



където с X са означени останалите частици от реакциите в трите канала:

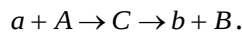


Механизъм на ядрените реакции

Ядрената реакция представлява сложен процес на престрояване на атомното ядро. Както при описание на структурата на ядрото, така и тук се използват различни механизми на ядрените реакции.

Механизъм на съставното ядро

Реакцията протича в два етапа с образуване на промездутьчно ядро – **компаунд ядро**. Например:



Бомбардиращата частица a се захваща от ядрото-мишена и се образува съставното ядро C . Енергията на частицата се разпределя равномерно между всички частици на съставното ядро, в резултат на което съставното ядро се оказва във възбудено състояние. При това, енергията на възбуждане на съставното ядро се оказва равна на енергията на частицата-снаряд E_a . Вторият етап от ядрената реакция е съставното ядро да премине в основно (невъзбудено) състояние, като при това от него излитат една или няколко частици с обща енергия E_a .

Понятието за съставно ядро е приложимо, само когато времето на живот на съставното ядро е достатъчно голямо $\tau > 10^{-21}$ s. Реакциите, протичащи при съставно ядро, се разделят на **резонансни** и **нерезонансни**. Ядрото може да взема точно определени енергии – да се намира на точно определени енергетични нива. От съотношенията за неопределеност следва, че тези нива имат определена ширина:

$$\Delta E = \frac{\hbar}{2\tau}.$$

Ако ширината на тези нива е по-малка от разстоянията между тях, реакцията може да протече само през едно ниво. Зависимостта на сечението от енергията ще има резонансен характер. Такава реакция се нарича резонансна. Ако нивата са толкова гъсто разположени, че се препокриват, реакцията ще протича при произволна енергия. Такива реакции се наричат нерезонансни.

Преки реакции

Времето за преминаване на частицата-снаряд през ядрото се нарича **ядрено време**.

Пример:

Ако частицата-снаряд има енергия **1 MeV** и скорост **10^7 m/s**, то ядреното време е $\tau_N = \frac{d_N}{V} = \frac{10^{-15}}{10^7} = 10^{-22}$ s, където d_N е диаметърът на ядрото.

Ако времето на взаимодействие на снаряда с мишената е много по-малко от ядреното, реакцията се нарича **пряка**. Снаряда ефективно взаимодейства с един или два нуклона от ядрото.

Междинно положение заемат **предравновесните реакции**

Съществуват още различни механизми:

- **оптичен модел** – ядрото се разглежда като непрекъсната среда, способна да пречупва и поглъща дебройлевската вълна на снаряда.
- **Кулоновско възбуждане** – ако налитащата частица има сравнително голяма маса и има електричен заряд (протони, α -частици и особено многократно йонизирани тежки атоми) тя може да не успее да се доближи достатъчно до ядрото и да се осъществи само Кулоновско взаимодействие.
- **фотоядрени реакции** – възникват при сблъсък на ядрото с високоенергетични γ -кванти и др.