

Радиоактивност. Закон за радиоактивния разпад. α -, β -, и γ -разпад – особености и условия за протичане

Радиоактивност. Закон за радиоактивния разпад

Явлението радиоактивност се състои в самопроизволно разпадане на ядра с изпускане на една или няколко частици. Ядра, при които се наблюдава явлението радиоактивност, се наричат **радиоактивни**. В процеса на разпад може да се променя както атомният номер Z , така и масовото число A .

Радиоактивният разпад се характеризира със:

- средно време на живот на ядрото;
- вида на изпусканите частици;
- енергията на изпусканите частици;
- при изпускане на повече частици – относителни ъгли между направленията на излитането им;
- ориентации на спините на началното и крайното ядро, а също и на излитащите частици.

Всяко радиоактивно ядро може да бъде получено чрез обстрелване със стабилни ядра и частици. Удивителното в радиоактивността са колосалните времена на живот на радиоактивните ядра. Характерното ядрено време е 10^{-21} s, а времената на радиоактивните ядра са от 10^{-9} s до 10^{22} години.

Вида на радиоактивния разпад се определя от вида на изпусканите частици:

- α -разпад
- β -разпад
- γ -разпад
- спонтанно деление на ядрата.

Според произхода си радиоактивността се дели на:

- естествена – среща се в природата
- изкуствена – синтезирани ядра.

Радиоактивният разпад е по принцип статистическо явление. Естествена статистическа величина, описваща радиоактивния разпад е вероятността λ за разпадане на дадено ядро за единица време. Величината λ се нарича **константа на разпадането** и смисълът ѝ е в това, че ако се вземе голям брой N еднакви нестабилни ядра, то за единица време ще се разпаднат λN ядра. Величината $A = \lambda N$ се нарича **активност**. Активността характеризира интензивността на излъчване на радиоактивното вещество като цяло. В система SI единицата за активност е Бекерел (1 Bq = 1 разпад/s). Понякога се използва и извънсистемната единица за активност Кюри (1 Ci = $3,7 \cdot 10^{10}$ разпада/s).

Нека в момент t имаме N радиоактивни ядра. Ако за време dt се разпаднат средно dN ядра, то:

$$dN = -\lambda N dt \quad N = N_0 e^{-\lambda t},$$

където с N_0 са означени броя на ядрата в произволно избран момент, който приемаме за нулев.

Тъй като активността е $A = \lambda N$, се вижда, че тя е:

$$A = \lambda N = -\frac{dN}{dt}.$$

Период на полуразпадане $T_{\frac{1}{2}}$ се нарича времето, за което броят на радиоактивните ядра намалява два пъти.

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{\frac{1}{2}}},$$

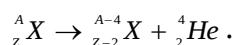
откъдето

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda}.$$

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**.

Характерни експериментални особености на α – разпада:

- α -разпад има само при тежки 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. α -разпад се наблюдава и при ядра с масово число в интервала $140 \div 160$ – това са ядра, чиято форма доста се отличава от сферичната;

- 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 изпусканияте α -частици е в доволно тесен интервал – $4 - 9 \text{ MeV}$ за тежките ядра и $2 - 4,5 \text{ MeV}$ 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 изпусканияте 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 изпусканияте частици има тънка структура – няколко близко разположени енергетични нива;
- за да съществува α -разпад е необходимо, но недостатъчно, той да е енергетично възможен

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

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 -разпадът 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 -разпадът 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

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

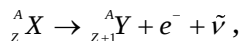
Енергията, отдадена при β -разпада е

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

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

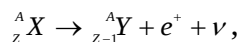
Видове β – разпад

- **електронен**



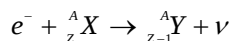
където $\bar{\nu}$ е антинеутрино (електрически неутрална частица). При електронния β -разпад един от неутроните в ядрото се превръща в протон.

- **позитронен**



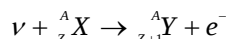
където ν е неутрино (електрически неутрална частица). При позитронния β -разпад един от протоните в ядрото се превръща в неутрон.

- **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**



$$\tilde{\nu} + {}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + e^+$$

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:

$$n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}.$$

При позитронния β -разпад реакцията, която протича е

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu.$$

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 -разпадът е възможен енергетично, ако:

$${}_Z^A M > {}_{Z+1}^A M + m \text{ (електронен } \beta\text{-разпад),}$$

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

$${}_Z^A M > {}_{Z-1}^A M + m \text{ (позитронен } \beta\text{-разпад);}$$

$${}_Z^A M + m > {}_{Z-1}^A M \text{ (К-захват).}$$

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)

$$M_i = {}_Z^A M + Zm \quad M_f = {}_{Z+1}^A M + (Z+1)m,$$

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

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

$$M_i = {}_Z^A M + Zm \quad M_f = {}_{Z-1}^A M + (Z-1)m,$$

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

- **за К – захват**

$$M_i = {}_Z^A M + Zm \quad M_f = {}_{Z-1}^A M + (Z-1)m.$$

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

γ – разпад

γ -разпадът (γ -излъчването) се състои в това, че ядрото изпуска γ -квант без изменение на A и Z . γ -разпадът е вътрешноядрен процес (β -разпадът 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 е аналогично на излъчването на фотони от възбудени атоми (електронната обвивка на ядрото) при преминаване в по-ниско енергетично ниво или основно състояние. Разликата между енергетичните нива в ядрото е 10^3 до 10^6 eV, докато в атома той е от порядъка на електронволти. Затова атомите излъчват фотон с много по малка енергия – най-често във видимата област. 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 конверсияният 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^- .