

РАДИОАКТИВНОСТ

СТАБИЛНОСТ НА ЯДРАТА- РАДИОАКТИВНИ ПРЕВРЪЩАНИЯ

Стабилни ядра са тези, чието време на живот е сравнимо с възрастта на Вселената (10^9 години). Те са около 280, а заедно с радиоактивните ядра общо са над 3000.

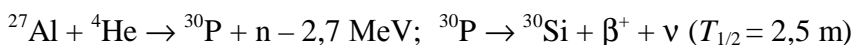
Ако върху диаграмата на нуклидите се въведе трета ос, перпендикулярна на равнината (N,Z) , по която се нанесат масите $M(Z,N)$ (или пропорционални на тях отсечки), краищата на тези отсечки ще лежат върху повърхност, наречена *масова повърхност*. Тя образува долина по линията на стабилните нуклиди, а от двете и страни - по склоновете около долината, са разположени нестабилните нуклиди, при това колкото по-високо по склона е една маса, толкова по-късоживущ е съответният нуклид. Сечението на тази повърхност с равнина, минаваща по линията $A = \text{const}$, дава сечението на изобарите. Точките по това сечение за различни стойности на Z дават масите на ядрата-изобари в зависимост от атомния номер. Може да се види, че само ядрото с минимална маса е стабилно за разлика от всички останали, които могат да се разпаднат чрез радиоактивен процес.

Радиоактивно разпадане. Естествена и изкуствена радиоактивност

Естествената радиоактивност е открита през 1896 г. от Бекерел, а след него Мария и Пиер Кюри откриват елементите радий и полоний.

Изкуствената радиоактивност е открита през 1934 г. от Ирен Кюри и Фредерик Жолио-Кюри, когато те бомбардират алуминий с α -частици от полония и получават ^{30}P , който се разпада с излъчване на позитрони и е с период 2,5 минути.

Наблюдаваната от тях реакция е



Главните открития, свързани с радиоактивността:

- 1896 г. Бекерел открива естествената радиоактивност
- 1898 г. Пиер Кюри и Шмид откриват тория, а Пиер и Мария Кюри откриват полония и радия
- 1899 г. Дебьорн открива актиния, а Ръдърфорд идентифицира α - и β -лъчите
- 1900 г. Вилард установява електромагнитната природа на γ -лъчите
- 1902 г. Ръдърфорд и Соди установяват закона за радиоактивното разпадане и опитно доказват, че α -частиците са хелиеви ядра
- 1917 г. Ото Хан открива ядрената изомерия
- 1928 г. Гамов, Гърни и Кондън създават теорията на α -разпада
- 1932 г. Розенблум открива фината структура на α -спектрите
- 1934 г. Ирен Кюри и Фредерик Жолио-Кюри откриват изкуствената радиоактивност и позитронното излъчване
- 1935 г. Ферми създава теорията на β -разпадането, а Алварес открива К-захващането
- 1938 г. Ото Хан и Щрасман идентифицират индуцираното с неутрони делене, обяснено теоретично от Лиза Майтнер

Закон за радиоактивното разпадане

Спонтанно превръщане в други ядра с излъчване на частици или фотони

Разпадането е случайно явление - не зависи от причината, предизвикваща разпадането на едно ядро, не зависи нито от температурата, нито от каквито и да било други физически или химически условия

Константа на разпадане λ - вероятност за разпадане на едно ядро в единица време

предположения за константата на разпадане:

n тя е еднаква за всички ядра от даден вид

n не зависи от възрастта на разглежданите атоми

Δt - малък интервал от време (спрямо $1/\lambda$)

$\lambda\Delta t$ - вероятност един атом да се разпадне в интервала Δt

$(1 - \lambda\Delta t)$ - вероятност да се не разпадне в интервала Δt

$(1 - \lambda\Delta t)^2$ - да не се разпадне в интервала $2\Delta t$ (сложна вероятност)

$(1 - \lambda\Delta t)^n = (1 - \lambda t/n)^n$ - вер. да не се разпадне за време $t = n\Delta t$

границата на този ред при $n \rightarrow \infty$ е

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 - \lambda \frac{t}{n}\right)^n = e^{-\lambda t},$$

вероятността едно ядро да не се разпадне за време t е $e^{-\lambda t}$

Активност е броят разпадания за единица време

Нека имаме източник, който в момент t съдържа N ядра

$N(t)$ е броят неразпаднали се ядра в момент t

в интервал от време от t до $t + dt$ ($dt \ll 1/I$) се разпадат dN ядра като

$$dN = -N\lambda dt.$$

законът за радиоактивното разпадане ще бъде

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

за активността се получава

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = (\lambda N_0) e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t} \quad \text{като} \quad A_0 = \lambda N_0.$$

Единици за активност

- *бекерел* (Bq) е единицата в СИ - 1 разпад за секунда (производни - kBq (10^3 Bq) , MBq (10^6 Bq), GBq (10^9 Bq) и TBq (10^{12} Bq).

- *кюри* (Ci) = $3,7 \cdot 10^{10}$ разп/s е извънсистемна единица, която дава броя на разпадите от 1 g ^{226}Ra за секунда ($T_{1/2} = 1620$ у). Използват се също mCi (10^{-3} Ci) и μCi (10^{-6} Ci).

Период на полуразпадане - интервал от време, за който първоначалният брой ядра се разпадат наполовина. От условието $N = N_0/2$

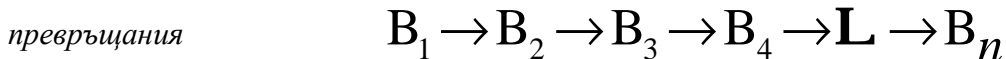
$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

Средно време на живот τ (дефиницията за средна стойност)

$$\tau = \bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} t dN(t)}{\int_0^{\infty} dN(t)} = \frac{-N_0 \int_0^{\infty} t \lambda e^{-\lambda t} dt}{-\lambda N_0 \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt} = \frac{\int_0^{\infty} t d e^{-\lambda t}}{\int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt} = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{0,693}$$

$T_{1/2}$ представлява 70% от средното време на живот τ .

Радиоактивни семейства - *верига от последователни*



Всеки радионуклид се характеризира със своя константа на разпадане λ_i , а стабилно е едва ядрото B_n

- Две последователни разпадания

B_3 - стабилно. В началния момент има N_{01} ядра от елемента B_1 и нито едно ядро от дъщерния ($N_{02} = 0$)

Броят ядра B_1 се изменя според $N_1 = N_{01} \exp(-\lambda_1 t)$. Колко е N_2 ?

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2,$$

$\lambda_1 N_1$ - брой на образуващите се дъщерни ядра от разпадането на матерното, а $\lambda_2 N_2$ са разпаданията на самото дъщерно ядро. Замества N_1 и се получава

$$\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_{01} e^{-\lambda_1 t}.$$

Частно решение на това уравнение

$$N_2 = N_{01} [C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t}]$$

За общото решение към това трябва да се прибави и общото решение на хомогенното уравнение, т.е. $N_{02} e^{-\lambda_2 t}$. Търсеното решение е

$$N_2(t) = N_{02} e^{-\lambda_2 t} + N_{01} [C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t}].$$

В началния момент броят на ядрата от дъщерния елемент е равен на нула, $N_2(0) = N_{02} = 0$, интересува ни само частното решение. Заместваме го в уравнението

$$\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_{01} e^{-\lambda_1 t}$$

и за константата C_1 се получава

$$C_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

тогава

$$N_2(t) = N_{01} \left[\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t} \right]$$

от условието в момента $t = 0$ $N_{02} = 0$ се получава

$$C_2 = -\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

и окончателно

$$N_2(t) = N_{01} \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} [e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}]$$

За активността на дъщерния препарат

$$A_2 = \lambda_2 N_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} A_{01} [e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}],$$

тъй като $\lambda_1 N_{01} = A_{01}$

особености в общия и в частни случаи

максималната активност на дъщерния препарат в момент t_{\max} се получава от условието $dA_2/dt = 0$

$$t_{\max} = \frac{\ln(\lambda_2/\lambda_1)}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{1}{0,693} \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \ln \frac{T_1}{T_2}$$

в момента на максимална активност на дъщерния препарат имаме $dN_2/dt = 0$, което $\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2$, т.е. активностите на матерния и на дъщерния препарати са равни - *идеално равновесие* - само в момента t_{\max} . В момент $t < t_{\max}$ активността на матерния препарат е по-голяма от тази на дъщерния, а в момент $t > t_{\max}$ дъщерната активност е по-голяма. Отношението на активностите е

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} [1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}]$$

отношението расте с времето при $\lambda_2 < \lambda_1$ и също при $\lambda_1 < \lambda_2$

$$T_2 > T_1 \text{ (или } \lambda_2 < \lambda_1)$$

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} [e^{(\lambda_1 - \lambda_2)t} - 1]$$

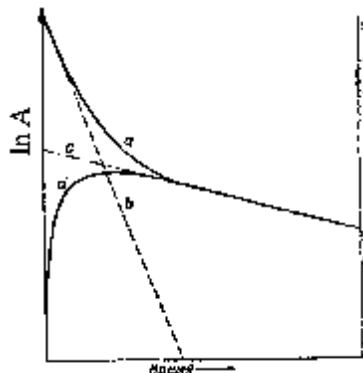
отношението расте с времето. След достатъчно голямо време t , напр.

$$t \geq 10T_1 \quad e^{-\lambda_2 t} \gg e^{-\lambda_1 t} \text{ и тогава}$$

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} N_{01} e^{-\lambda_2 t}$$

$$A_2(t) = \lambda_2 N_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} A_{01} e^{-\lambda_2 t}$$

активността на дъщерните ядра ще намалява с периода на дъщерното



$$T_1 > T_2 \text{ (или } \lambda_1 < \lambda_2 \text{)}$$

След достатъчно дълго време $e^{-\lambda_1 t} \gg e^{-\lambda_2 t}$

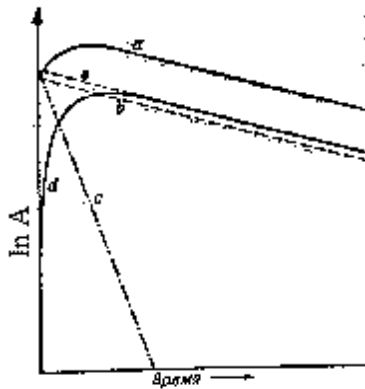
$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{01} e^{-\lambda_1 t}$$

$$A_2(t) = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} A_{01} e^{-\lambda_1 t},$$

активността на дъщерното вещество ще намалява с периода на матерното

$$\frac{N_2(t)}{N_1(t)} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} = \text{const.}$$

преходно равновесие - настъпва след време $t \geq 10T_2$



$$T_1 \gg T_2 \text{ (или } \lambda_1 \ll 1, \text{ а също } \lambda_2 \gg \lambda_1 \text{)}$$

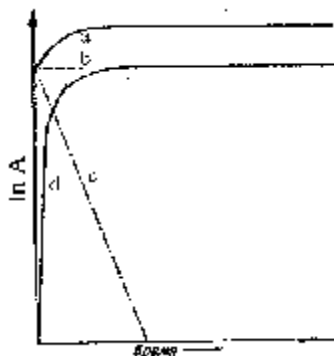
$$N_2(t) = \frac{N_{01} \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} \left[e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} - 1 \right] = \frac{N_{01} \lambda_1}{\lambda_2} e^{-\lambda_2 t} \left[e^{-\lambda_2 t} - 1 \right] = N_{01} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \left[1 - e^{-\lambda_2 t} \right]$$

След време $t \geq 10T_2$ експонентата в горния израз става пренебрежимо малка в сравнение с единица. Тогава

$$N_2 = N_{01} \frac{\lambda_1}{\lambda_2},$$

$$\frac{N_2(t)}{N_{01}} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{T_2}{T_1} = \text{const} .$$

$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2$ – активностите на матерното и на дъщерното вещества са равни помежду си – *веково равновесие*..



Пример $^{226}\text{Ra} \rightarrow ^{222}\text{Rn}$

Константите на разпадане и периодите са съответно:

$$^{226}\text{Ra} \rightarrow \lambda = 1,38 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1} (T_{1/2} = 1620 \text{ y})$$

$$^{222}\text{Rn} \rightarrow \lambda = 2,1 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1} (T_{1/2} = 3,82 \text{ d})$$

над 1g ^{226}Ra има винаги $6,5 \times 10^{-6}$ g радиева еманация (^{222}Rn). В конкретния случай вековото равновесие настъпва след около 40 дена.

Радиоактивни семейства се наричат повече от два генетично свързани радионуклида. Когато първият радионуклид (родоначалникът на семейството) има много по-голям период от периодите на всички останали, се получават условията за осъществяване на веково равновесие – равенство на активностите на всички последователни елементи.

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \dots = \lambda_{n-1} N_{n-1}$$

като N_1, N_2, \dots, N_n са броят ядра на съответните елементи в даден момент t

име на реда	Ф-ла	крайно ядро (стабилен) нуклид	дългоживущ член	период (години)
Ториев	$4n$	^{208}Pb	^{232}Th	$1,41 \cdot 10^{10}$
Нептуниев	$4n+1$	^{209}Bi	^{237}Np	$2,14 \cdot 10^6$
Ураново-радиев	$4n+2$	^{206}Pb	^{238}U	$4,47 \cdot 10^9$
Актиниев	$4n+3$	^{207}Pb	^{235}U	$7,04 \cdot 10^8$

Други природни радионуклиди със забележимо присъствие в околната среда и

достатъчно дълги периоди, като например ^{40}K с период $1,28 \cdot 10^9$ години. Този естествен радионуклид се намира често в пясъка, използван в строителството, и тогава ^{40}K попада в жилищни помещения, лаборатории и пр. Неговата характерна гама-линия с енергия 1461 keV се наблюдава почти винаги при измерване на гама-фона с достатъчно чувствителен детектор.

Съществуват също и радиоактивни елементи с достатъчно дълги периоди, които се образуват непрекъснато в атмосферата под действие на космичното лъчение. Такава са например ^3H и ^{14}C , които се образуват в атмосферата под действие на неутроните от космичното лъчение. Естественният радионуклид ^{14}C с период ~ 5100 години се използва за датиране на археологични находки, съдържащи въглерод, напр. дървени предмети.

Таблица 2.2

Z = 92	^{238}U 4,5.10 ⁹ y	^{234}U 2,5.10 ⁵ y			
Z = 91	↓ ↓	^{234}Pa 12 m	↓		
Z = 90	^{234}Th 24 d	↗	^{230}Th 8.10 ⁴ y		
Z = 89			↓		
Z = 88			^{226}Ra 1620 y		
Z = 87			↓		
Z = 86			^{222}Rn 3,8 d	^{218}Rn 0,019 s	
Z = 85			↓	↓	
Z = 84			^{218}Po 3,05 s	^{214}Po 1,6.10 ⁻⁴ s	^{210}Po 138 d
Z = 83			↓	↓	↓
Z = 82			^{214}Bi 5 d	^{210}Bi 5 d	^{206}Bi стаб.
Z = 81			^{210}Pb 27 m	^{210}Pb 19 y	^{206}Pb стаб.
			↓	↓	↓
			^{210}Tl 1,3 m	^{206}Tl 4,19 m	