

## 36 RADIOAKTIVITA

Rozpadový zákon

Teorie radioaktivního rozpadu

Umělá radioaktivita

Radioaktivita je jev, při kterém se jádra jednoho prvku samovolně mění na jádra jiného prvku emisí částic alfa, neutronů, elektronů a pozitronů. Všechny prvky s protonovým číslem větším jak 82 se samovolně mění tak, že vysílají alfa částice (alfa záření) nebo elektrony (beta záření), přičemž tento rozpad zpravidla doprovází i emise gama záření, tj. elektromagnetického záření s velmi krátkou vlnovou délkou. Tento jev objevil Becquerel v roce 1896 a o jeho prozkoumání se zasloužili zejména manželé Curierovi. Manželé Joliotovi objevili v roce 1934 jev, při kterém následkem jaderné reakce vznikl prvek, který samovolně měnil na jiný prvek, i když měl protonové číslo menší jak 82. Tento jev, který jsme připomněli již při jaderných reakcích, se nazývá umělá radioaktivita. Oba jevy jsou velmi užitečné při zkoumání vlastností jader a mají velmi široké praktické využití.

Záření vznikající při radioaktivních přeměnách může být zdraví škodlivé, na druhé straně však může ke zdraví dopomoci, kromě toho se může využít při řešení celé řady technických problémů. Všimneme si dvou veličin z této oblasti a jejich jednotek a to aktivity dávky.

### 36.1 Rozpadový zákon

Samovolná přeměna nestabilních jader na stabilní emisí elementárních částic, resp. alfa částic, je statistický jev. Každé jádro se přemění v jiný časový okamžik, avšak při velkém počtu atomů nestabilního prvku jeví tato přeměna určitou zákonitost, kterou vyjadřuje tzv. rozpadový zákon (věta 36.3). Jeho kvantitativní vyjádření umožňuje řešit vážné fyzikální a často i nefyzikální problémy (věty 36.4 a 36.5).

36.1

Aktivita  $A$  radioaktivního zářiče je četnost radioaktivních přeměn atomů zářiče. Aktivitu zářiče definujeme výrazem

$$A = \frac{-\Delta N}{\Delta t}, \quad (36.1)$$

kde  $\Delta N$  je počet radioaktivních přeměn za časový interval  $\Delta t$ . Jednotka aktivity je  $[A] = s^{-1} = Bq$  (becquerel). Aktivitu 1 becquerelu má radioaktivní zářič, ve kterém vzniká jeden radioaktivní rozpad za 1s.

Rozpadový zákon (36.3) odvodíme na základě ověřeného a víceméně samozřejmého předpokladu, že počet jader  $dN$ , které se v průběhu časového intervalu  $dt$  rozpadnou, je přímo úměrný počtu v čase  $t$  ještě nerozpadlých jader  $N$  a tomuto intervalu, tj.

$$dN \sim -N dt \quad (36.7)$$

Jestliže konstantu úměrnosti označíme  $\lambda$  a uvážíme, že  $dN = N(t+dt) - N(t)$  je záporná veličina, můžeme vztah (36.7) napsat ve tvaru

$$dN = -\lambda N dt. \quad (36.8)$$

## 36.2

Absorbovaná dávka vyjadřuje energii absorbovanou tělesem. Dávku  $D$  definujeme jako podíl střední energie  $\Delta W$  ionizujícího záření absorbované objemovým elementem látky a hmotnosti  $\Delta m$  látky

$$D = \frac{\Delta W}{\Delta m}. \quad (36.2)$$

Jednotka dávky je  $[D]=[W]/[m]=J \text{ kg}^{-1} = \text{Gy}$  (gray). Dávku 1 graye pohltí těleso 1 kg, jestliže pohltí energii ionizujícího záření rovnou 1 J.

## 36.3

Matematické vyjádření rozpadového zákona:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (36.3)$$

kde  $N_0$  je počet jader v čase  $t=0$ ,  $N$  je počet ještě nepřeměnných jader v čase  $t$  a  $\lambda$  je rozpadová konstanta, která charakterizuje radioaktivní látku. Poločas rozpadu  $T$  je čas, za který se rozpadne polovina všech jader. S rozpadovou

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}. \quad (36.4)$$

konstantou souvisí podle vztahu

## 36.4

Radioaktivní řada je řada prvků, která vzniká postupným rozpadem základního prvku. Všechny známé přirozené radioaktivní prvky můžeme seřadit do čtyř radioaktivních řad (tabulka). Rovnováha v radioaktivní řadě vzniká tehdy, když platí rovnice

Z tohoto vyjádření vyplývá, že veličina  $-dN/dt=A$ , neboli tzv. aktivita určující rychlost rozpadu radioaktivního zářiče je vyjádřena součinem

$$A = \frac{-dN}{dt} = N\lambda. \quad (36.9)$$

Jestliže rovnici (36.8) přepíšeme do tvaru

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

a integrujeme v mezích od  $t=0$  do  $t$ , resp. od  $N=N_0$  do  $N$ , dostaneme vztah (36.3). Je to exponenciální zákon, podle kterého rozpad libovolného výchozího množství každého radioaktivního prvku trvá (teoreticky) nekonečně dlouho. Nemá proto smysl určovat čas, za který se daný prvek úplně přemění na prvek jiný. Jako míru časové délky rozpadu radioaktivního prvku zavádíme tzv. poločas rozpadu  $T$ . Definujeme ho jako čas, za který se rozpadne polovina počátečního množství radioaktivní látky. Dosadíme-li do vztahu (36.3) za  $t=T$  a  $N=N_0/2$  dostaneme rovnici

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T}, \quad (36.10)$$

ze které již lehce dostaneme hledaný vztah (36.4).

Některé radioaktivní prvky se rozpadají neuvěřitelně rychle (např. polonium  $\text{Po}^{212}_{86}$  má poločas rozpadu jen  $1 \cdot 10^{-7}$  s), jiné zase velmi pomalu (uran  $\text{U}^{238}_{92}$  má poločas rozpadu  $4,5 \cdot 10^9$  roků).

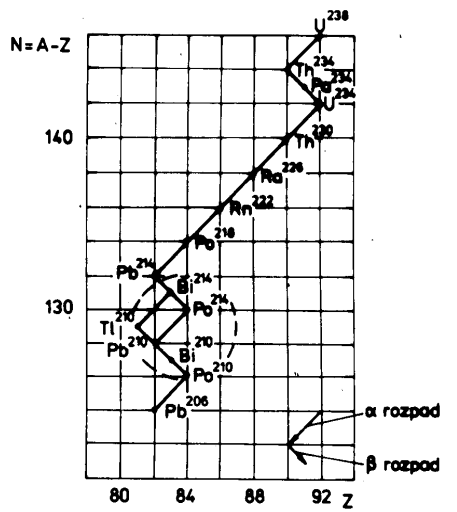
Emisí alfa částice, případně elektronu se jádro daného prvku změní na jádro jiného prvku, které je rovněž nestabilní, pokud je jeho atomové číslo větší než 82. Nový prvek se proto rovněž rozpadá a mění na jiný prvek. Tak

$$\dots \lambda_{n-1} N_{n-1} = X_n N_n = \lambda_{n+1} N_{n+1} \dots \quad (36.5)$$

36.5

Pomocí množství atomů konečného produktu rozpadu  $N_k$  a počtu atomů výchozího materiálu  $N_v$ , můžeme určit čas vzniku výchozí látky podle vztahu

$$t = \frac{1}{\lambda_v} \ln \frac{N_k + N_v}{N_v}. \quad (36.6)$$



Obr. 36.1 Uranová radioaktivní rozpadová řada

vznikají radioaktivní řady. Jelikož alfa částice představuje čtyři nukleony, navzájem odlišné členy radioaktivních řad dostaneme jen tehdy, jestliže vyjdeme z prvků odlišujících se nukleonovým číslem o 1, 2, 3 resp. 4 jednotky. Existují proto jen čtyři radioaktivní řady. Jsou uvedeny v tabulce. Pro ilustraci členů řady a způsobu jejich rozpadu je na obr. 36.1 znázorněna uranová řada.

Zajímavou otázkou je, jaké je množství určitého prvku radioaktivní řady v určitém čase  $t$ . Množství např.  $n$ -tého prvku  $N_n$  je ovlivněno tím, že přibývá rozpadem  $(n-1)$ -tého prvku a současně ubývá vlastním rozpadem. Podle rovnice (36.9) můžeme změnu počtu jeho jader za jednotku času vyjádřit rovnicí

$$\frac{dN_n}{dt} = \lambda_{n-1} N_{n-1} - \lambda_n N_n. \quad (36.11)$$

Je-li  $dN_n/dt=0$ , vznikne ustálený stav, ve kterém množství daného radioaktivního prvku se s časem nemění. Podle rovnice (36.11) podmínku takové radioaktivní rovnováhy můžeme skutečně vyjádřit rovnicemi (36.5).

Diferenciální rovnice (36.11) je základem tzv. radiační chronologie, tj. určování časových úseků pomocí radioaktivních látek. Představme si, že prvek  $P_{n-1}$  je výchozím prvkem radioaktivního rozpadu. Označme ho symbolem  $P_v$  a jeho množství na začátku, resp. v čase  $t$  symboly  $N_{v0}$  a  $N_v$ . Podle rovnice (36.3) můžeme psát

$$N_v = N_{v0} e^{-\lambda_v t}.$$

Počet jader sousedního prvku v řadě  $N$  splňuje proto podle (36.11) rovnici

$$\frac{dN}{dt} = \lambda_v N_{v0} e^{-\lambda_v t} - \lambda N.$$

Poslední člen přeneseme na levou stranu a celou rovnici vynásobíme výrazem  $e^{+\lambda t} dt$ . Dostaneme rovnici

$$dNe^{\lambda t} + \lambda Ne^{\lambda t} dt = d(Ne^{\lambda t}) = \lambda_v N_{ov} e^{(\lambda - \lambda_v)t} dt.$$

Její integrací dostaneme funkci

$$Ne^{\lambda t} = N_{ov} \frac{\lambda_v}{\lambda - \lambda_v} e^{(\lambda - \lambda_v)t} + C \quad (36.12)$$

Konstantu  $C$  určíme z podmínky  $N(t=0)=0$ . Dostaneme vyjádření  $C = -N_{ov} \lambda_v / (\lambda - \lambda_v)$ , takže po dosazení do rovnice (36.12) vychází

$$N = N_{ov} \frac{\lambda_v}{\lambda - \lambda_v} (e^{-\lambda_v t} - e^{\lambda t}). \quad (36.13)$$

Tento vztah se značně zjednoduší, jestliže prvek, vznikající rozpadem výchozího, je stabilní. Taková je situace, jestliže zkoumáme, např. množství olova vyskytujícího se v uranové rudě. Vzhledem k velmi dlouhému poločasu rozpadu uranu ( $4,5 \cdot 10^9$  roků) v porovnání s poločasy všech členů jeho řady s výjimkou konečného produktu - olova, které se již nerozpadá, můžeme celý proces zkoumat jako přímý rozpad uranu na olovo. Jestliže tedy označíme ve vztahu (36.13)  $N = N_k$  a  $\lambda = \lambda_k 0$ , dostaneme vztah

$$N_k = N_{vo} (1 - e^{-\lambda_v t}).$$

Tento vztah spolu s rovnicí  $N_{vo} = N_v + N_k$  vedou ke vztahu (36.6), který jsme měli najít. Jeho použitím můžeme např. odhadnout čas vzniku uranových ložisek, tj. čas ztvrdnutí zemské kůry. Vychází hodnota kolem 4 miliard roků.

BECQUEREL Henri André (bekrel), 1852-1908, francouzský fyzik pocházející z rodiny, kde fyzika měla tradici několik generací. Zpočátku se zabýval fyzikální optikou a podrobně zkoumal zejména jevy fosforescence a fluorescence. Při svých výzkumech r. 1896 objevil radioaktivní záření uranové soli a popsal jeho základní vlastnosti. Za tento významný objev dostal roku 1903 Nobelovu cenu (společně s manželi Curiovými). Na jeho počest byla pojmenována jednotka dávky.

GRAY Stephan (grej), 1666-1736, anglický fyzik. Objevil r. 1729 jev elektrické vodivosti. Prvým rozdělil tělesa na vodiče a nevodiče. Na jeho počest byla pojmenována jednotka aktivity.

CURIEOVÁ - SKLODOWSKÁ Marie (küriová) 1867-1934, původem z Polska, jedna z nejslavnějších

postav francouzské fyziky a chemie. Celý svůj život zasvětila výzkumu radioaktivních látek. Vypracovala chemickou metodu na získávání čistých radioaktivních prvků, pomocí které spolu se svým manželem objevili radium a polonium. Zdokonalovala i metody měření radioaktivity a její práce tvoří základ radiochemie. Má zásluhy i na zavedení rentgenové a radiové diagnostiky v lékařství. Byla první ženou, která získala profesorské místo na pařížské universitě, první ženou, které udělili Nobelovu cenu. Toto největší vědecké uznání dostala dvakrát: roku 1903 za fyziku (spolu s manželem P.Curie a H.Becquerelem) a r. 1911 za chemii (za objev radia a polonia a podrobný výzkum vlastností a chemických sloučenin radia).

CURIE Pierre (küri), 1859-1906, francouzský fyzik a chemik. Na začátku své vědecké dráhy se zabýval vlastnostmi krystalů, zkoumal magnetické vlastnosti látek, objevil piezoelektrický jev. Později se přeorientoval na novou zajímavou problematiku, kterou se zabývala jeho manželka Marie Curie-Sklodovská, na zkoumání radioaktivity. R. 1898 společně objevili dva radioaktivní prvky (radium a polonium). P.Curie se zabýval i fyziologickými účinky radioaktivního záření a výsledky jeho prací se staly základem radioterapie. Za mimořádné úsilí a výsledky dosažené ve výzkumu radioaktivity byla manželům Curieovým udělena Nobelova cena za fyziku (spolu s H.A.Becquerelem).

Tabulka

Radioaktivní rozpadové řady

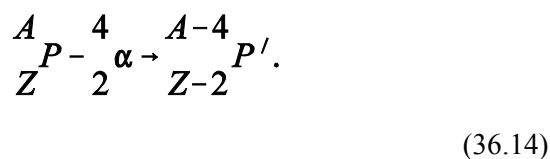
radioaktivní řada	začátek	konec
thoriová	232 Th 90	208 Pb 82
neptuniová	237 Np 93	209 Pb 82
uranová	238 U 92	206 Pb 82
aktiniová	235 U 92	207 Pb 82

### 36.2 Teorie radioaktivního rozpadu

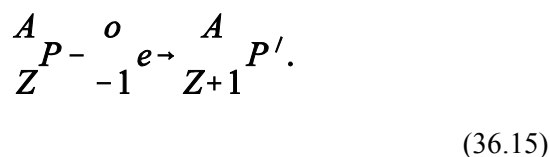
Adekvátní teorie radioaktivního rozpadu jádra na jiné jádro emisí alfa částice a elektronů musí vysvětlit nejen otázku jak se může z jádra uvolnit alfa částice resp. elektron, jestliže se v něm nenacházejí, ale zejména otázku, proč je energetické spektrum alfa částic čarové a elektronů spojité a proč změně energie vyletujících částic přibližně jen o 100% odpovídá změna rozpadové konstanty až o 24 řádů. Současná teorie radioaktivního rozpadu dokáže uspokojivě odpovědět na všechny tyto (a další) otázky (věty 36.6 až 36.9).

#### 36.6

Soddyho-Fajansova pravidla (posunovací pravidla) radioaktivních rozpadů: Jestliže v jádře prvku  ${}^A_Z P$  proběhne alfa rozpad, změní se na jádro prvku stojícího o dvě místa vlevo v Mendělejevově soustavě prvků a jeho nukleonové číslo se zmenší o čtyři



Jestliže se jádro rozpadá tak, že vysílá elektron, posune se o jedno místo vpravo v Mendělejevově soustavě prvků a jeho nukleonové číslo se nezmění



#### 36.7

Energetické spektrum alfa a gama záření je čarové energetické spektrum, beta záření je spojité.

#### 36.8

Alfa částice se uvolňuje z jádra tunelovým mechanismem. Platí, že logaritmus rozpadové konstanty souvisí s kinetickou energií vyletujících částic a s protonovým číslem

Platnost Soddyho-Fajansových pravidel dostatečně znázorňují vztahy (36.14) a (36.15). Jejich význam byl velký (a záhadný) v době, kdy ještě nebylo známo složení jader a podstata radioaktivních záření.

Otázka, kde se vzala alfa částice resp. elektron při radioaktivním rozpadu, není již v současnosti vážná. Jádro je "kouzelný klobouk", z kterého schopný kouzelník může vytáhnout prakticky to, co chce. Nové částice vznikají při energetické přestavbě jádra, přičemž nejvýznamnějším limitujícím činitelem je energetická bilance využívající Einsteinovy rovnice  $W=mc^2$ . Nestabilní jádro se snaží dosáhnout stabilního stavu tím, že část své energie uvolní. Podle slupkového modelu jádra je energie jader kvantovaná, proto jestliže přechází jádro P ze základní energetické hladiny  $W_0$  na obecně vzbuzenou hladinu nového jádra, např.  $W'_1$  (obr. 36.2), uvolní se energie  $\Delta W = W_0 - W'_1$ . Při beta rozpadu se mění tato energie na energii odpovídající klidové hmotnosti elektronu  $m_{oe} c^2$ , kinetické energii elektronu  $W_{ke}$  a neutrina  $W_{kv}$ , takže platí rovnice

$$\Delta W = W_0 - W'_1 = m_{oe} c^2 + W_{ke} + W_{kv}. \quad (36.17)$$

Elektron a neutrina si rozdělují zbytek energie nahodile, proto je jejich energetické spektrum spojité. Podle rovnice (36.17) je podmínkou

nového jádra přibližně podle vztahu

$$\ln \lambda = A - B Z W_{k\alpha}^{-\frac{1}{2}}, \quad (36.16)$$

kde  $A$  a  $B$  jsou konstanty.

### 36.9

Při beta rozpadu se současně s elektronem uvolňuje i (elektronové) neutrino, které odnáší část energie.

SODDY Frederick, 1877-1956, anglický fyzik a chemik, spolupracoval s Rutherfordem a významně se zúčastňoval na experimentálním ověření rozpadových zákonů. R. 1910 popsal izotopii prvků, později spolupracoval (spolu s A.S. Russellem a K. Fajansem) na stanovení tzv. posuvného pravidla, které určuje výsledek radioaktivního  $\alpha$  a  $\beta$  rozpadu. Nobelovu cenu za chemii získal roku 1921.

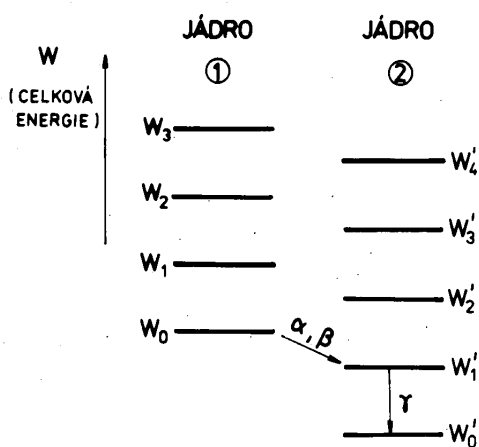
FAJANS Kazimír, nar. 1887, fyzikální chemik pocházející z Polska, zabýval se radiochemií, resp. fyzikální chemií. Objevil více radioaktivních prvků a současně se F. Soddym r. 1913 zformuloval zákon posuvu při radioaktivním rozpadu prvků.

vzniku beta rozpadu splnění nerovnosti  $\Delta W \geq m_{0e} c^2$ . Uvedenou energetickou bilanci s přihlédnutím na změnu protonového čísla  $o + 1$  můžeme interpretovat i tak, že jeden neutron původního jádra se rozpadl na proton, který v něm zůstal a na elektron a neutrino, které se z jádra emitovaly.

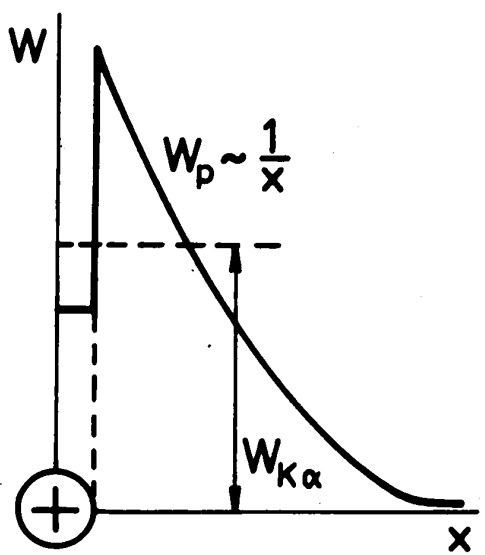
Jestliže je rozdíl energií  $W_0 - W_1$  dostatečně velký, může dojít k emisi alfa částice podle rovnice

$$\Delta W = W_0 - W_1' = m_{0\alpha} c^2 + W_{k\alpha}. \quad (36.18)$$

Jelikož při alfa rozpadu se neuvolňuje žádná další částice, musí mít i energie  $W_{k\alpha}$  jen diskrétní hodnoty. Energetické spektrum alfa záření je proto čarové. Podmínkou vzniku alfa rozpadu je splnění podmínky  $\Delta W \geq m_{0\alpha} c^2$ . Můžeme se však ptát, proč jádro vysílá celé alfa částice a ne oddělené protony a neutrony. I to vyplývá z energetické bilance. Emise oddělených nukleonů vyžaduje dodání energie zvenku. V procesu tvorby alfa částic ze čtyř nukleonů v daném jádře se uvolní vazebná energie, která je u těžkých jader kolem  $8 \text{ MeV}$  na jeden nukleon, zatímco v alfa částici je asi  $7 \text{ MeV}$  na nukleon. I když si představíme, že alfa částice disponuje při svém zrodu v jádře nestabilního atomu energií kolem  $4 \text{ MeV}$ , nedokážeme pochopit (na základě klasické fyziky), jak může s touto energií překonat potenciálovou bariéru jádra o hodnotě  $25 \text{ MeV}$ . Tato bariéra souvisí s elektrostatickou interakcí alfa částice s nábojem  $+2e$  a zbytku jádra s nábojem  $Ze$ . Na hranici jádra určené jeho poloměrem  $R_0 \doteq 10^{-14} \text{ m}$  má tato bariéra hodnotu  $W_{p0} = 2Ze^2/4\pi\epsilon_0 R_0$ , tj. při  $Z=90$  asi  $25 \text{ MeV}$  a ve větších vzdálenostech klesá podle známého zákona (obr. 36.3)



Obr. 36.2 Energetické schéma radioaktivního rozpadu atomu



Obr. 36.3 Potenciálová bariéra v okolí jádra

$$W_{po} = \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 x}. \quad (36.19)$$

Jak již víme, mikročástice může překonat energetickou bariéru výšky  $W_{po}$  i s energií  $W_k < W_{po}$  tzv. tunelovým mechanismem, je-li tato bariéra dostatečně úzká. Můžeme se proto pokusit aplikovat zákony tunelového jevu na případ alfa rozpadu. To nám umožní objasnit souvislost rozpadové konstanty  $\lambda$  s kinetickou energií vyletujících alfa částic  $W_{k\alpha}$ . Představme si, že alfa částice se pohybuje v jádře podél jeho průměru rychlostí  $v = (2W_k/m)^{1/2} \doteq 10^7 \text{ ms}^{-1}$  a odráží se od potenciálové stěny do té doby, než touto stěnou tunelovým efektem projde. Podle vztahu (36.9) značí součin  $P = \lambda dt = dN/N$  pravděpodobnost  $P$ , že dojde k rozpadu jádra za čas  $dt$ . Jestliže si uvědomíme, že čas mezi dvěma nárazy na potenciálovou bariéru je  $dt = 2R_0/v$ , můžeme pro rozpadovou konstantu vztah  $\lambda = (v/2R_0)P$  a nebo

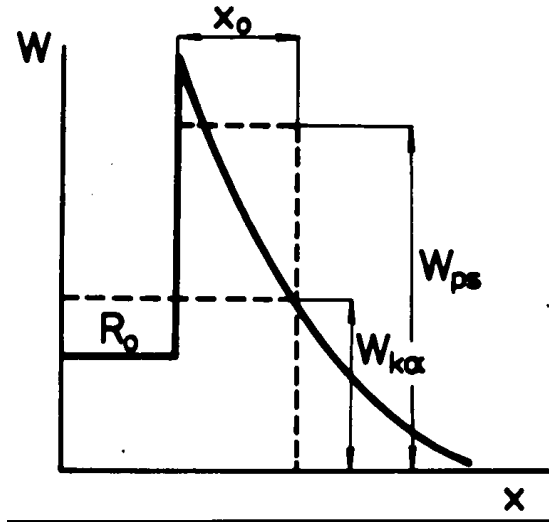
$$\ln \lambda = \ln \left( \frac{v}{2R_0} \right) + \ln P = A + \ln P. \quad (36.20)$$

Jelikož potenciálová bariéra není obdélníková, musíme pro pravděpodobnost  $P$  použít obecný vztah (33.20). Výpočet je však v tomto případě dosti zdlouhavý, proto nahradíme obecnou bariéru určenou vztahem (36.19) obdélníkovou bariérou z obr. 36.4. Při této náhradě je  $W_{ps} = CW_k$ , kde  $C$  je konstanta a šířka bariéry  $x_0$  vyplývá z rovnice

$$\frac{Ze^2}{2\pi\epsilon_0 x_0} = W_{k\alpha}.$$



Výraz  $\ln P$  můžeme potom s ohledem na vajíždění (33.19) upravit na tvar

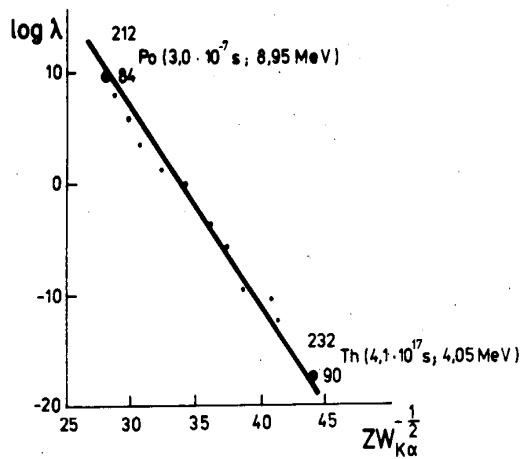


$$\begin{aligned} \ln P &= -\frac{2}{\hbar} \left\{ 2m [W_p(x) - W_{k\alpha}] \right\}^{\frac{1}{2}} x_0 = \\ &= -\frac{2}{\hbar} \left[ 2m (W_{ps} - W_{k\alpha}) \right]^{\frac{1}{2}} x_0 = \\ &= -\frac{2}{\hbar} (2m)^{\frac{1}{2}} \cdot (C-1)^{\frac{1}{2}} \cdot W_{k\alpha}^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{Ze^2}{2\alpha \epsilon_0 W_{k\alpha}} = \\ &= -B \frac{Z}{W_{k\alpha}^{\frac{1}{2}}}, \end{aligned}$$

(36.21)

Obr. 36.4 K průchodu alfa částice bariérou tunelovým jevem

kde  $B$  je konstanta.



Obr. 36.5 Závislost rozpadové konstanty na energii částic alfa

Dosažením tohoto vyjádření do rovnice (36.20) dostaneme výraz (36.16), který jsme měli odvodit. Podle něho je závislost  $\ln P$  na argumentu  $ZW_{k\alpha}^{-2}$  přímka. Údaje uvedené na obr. 36.5 to velmi dobře potvrzují. Z tohoto obrázku současně vyplývá, že rozpadová konstanta  $\lambda$  se při změně kinetické energie alfa částice z hodnoty  $4,05 \text{ MeV}$  (pro  $^{232}_{90}\text{Th}$ ) na hodnotu  $8,95 \text{ MeV}$  (pro  $^{212}_{84}\text{Po}$ ) změní skutečně až o 24 řádů.

Jestliže se nově vzniklé jádro (po emisi alfa nebo beta částice) octne ve vzbuzeném energetickém stavu přechází do základního stavu zpravidla tak, že emituje foton elektromagnetického záření (obr. 36.2)

$$W_1' - W_0' = h\nu.$$

(36.22)

Vzhledem k tomu, že energetické rozdíly v jádrech jsou velmi velké (řádově  $\text{MeV}$ ), vzniká kvantum o velmi velké energii, které nazýváme gama kvantum. Jeho spektrum musí být rovněž čarové.

Jiná možnost přechodu do základního stavu je tzv. vnitřní konverze. Při ní se energie  $W_1' - W_0'$  odevzdá jednomu z orbitálních elektronů, který potom uniká z atomu podobně jako při fotoelektrickém jevu.

### 36.3 Umělá radioaktivita

Příčinou přirozené radioaktivity prvků je přechod jader z méně stabilních stavů do stavů stabilnějších. Nestabilita těžkých prvků je způsobena nadbytkem neutronů. Logicky můžeme očekávat, že umělým vytvořením nadbytku neutronů (resp. i protonů) můžeme i v jinak stabilních prvcích vyvolat rozpad, tj. radioaktivitu. Tyto jevy byly skutečně pozorovány a dostaly název umělá radioaktivita (věta 36.9 až 36.11).

#### 36.9

Umělou radioaktivitu můžeme vyvolat především ostřelováním stabilních jader alfa částicemi a neutrony.

Jak jsme již uvedli, I.Joliotová-Curieová a F.Joliot-Curie objevili tři reakce, při kterých po ozáření alfa částicemi vznikly umělé radioaktivní prvky. Můžeme je popsat pomocí těchto schémat:

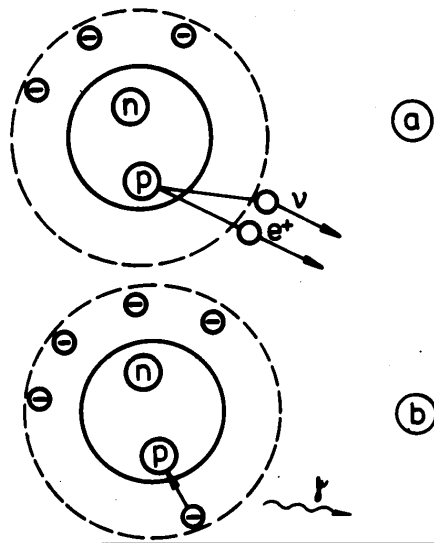
#### 36.10

Při nadbytku neutronů se nejčastěji neutron rozpadne na proton, elektron a antineutrino,

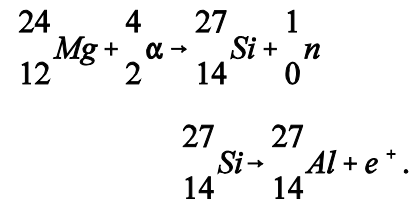
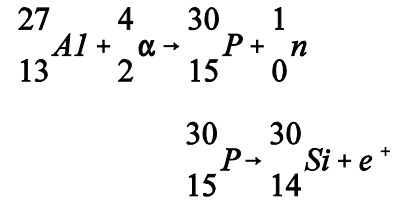
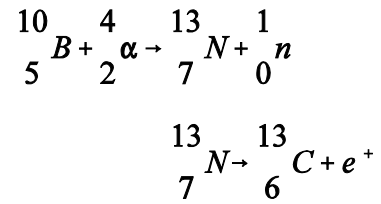
takže příslušné prvky jsou beta radioaktivní (emitují elektrony). Při nadbytku protonů se proton zpravidla rozpadá na neutron, pozitron a neutrino, takže takové prvky jsou beta<sup>+</sup> radioaktivní (emitují pozitrony).

36.11

K záchyt je jev, při kterém jádro při přebytku protonů zachycuje jeden elektron z K sféry, v důsledku čeho se proton v jádře změní na neutron.



Obr. 36.6 Dva možné způsoby rozpadu protonu v jádře a) vyzářením pozitronu a neutrina, b) záchytem

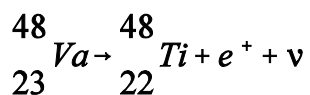


samovolném rozpadu uměle připravených radioaktivních prvků emitují pozitrony. To je v souladu s tvrzením, že při absorpci alfa částice vznikne v jádře nadbytek protonů, proto se protony rozpadají na neutrony, pozitrony a neutrina. Tyto procesy se z izolovanými protony nedají uskutečnit, protože neutron má větší hmotnost než proton. Při energetické přestavbě jádra, když je energie "dostatek" takové procesy zřejmě mohou probíhat.

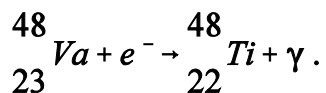
Vznik umělé radioaktivity ostřelováním prvků elektricky nabitými částicemi je proces, který je z hlediska výroby většího množství izotopů nevhodný, protože střely musí mít velkou energii, aby mohly vniknout do jádra. Podstatně jednodušší možnost vyvolání umělé radioaktivity je pomocí neutronů, které nejsou jádru odpuzovány, naopak, od určité vzdálenosti jsou jimi přitahovány. Takto získané radioaktivní izotopy jsou zpravidla beta zářiče (emitují elektrony), protože z neutronů, které vnikají do jádra vznikají protony, elektrony a

neutrína, z nichž poslední dvě částice unikají z jádra.

Podle obr. 36.6 by se mohl nadbytečný proton v jádře změnit na neutron i bez emise pozitronu. Stačilo by, aby jádro pohltilo jeden elektron z elektronového obalu. V úvahu přicházejí elektrony z první K sféry. Takový přechod by pak musel být doprovázen emisí kvanta rentgenového záření, protože na místo zachyceného elektronu přejde potom jeden z elektronů z dalších sfér za současné emise kvanta  $h\nu$  v oblasti velmi krátkých vlnových délek. Takový jev byl skutečně experimentálně pozorován. Ukázalo se, že může být velmi častý, např. přibližně polovina jader vanadu  ${}^{48}_{23}\text{Va}$  se rozpadá beta<sup>+</sup> rozpadem podle schématu (obr. 36.6a)



a druhá polovina K - záchytem podle schématu (obr. 36.6b)



Jsou dokonce známy případy, kde se přeměna jader uskutečňuje jen K - záchytem. Patří k nim např. jádro  ${}^7_4\text{Be}$ , které se K - záchytem mění na jádro  ${}^7_3\text{Li}$ , které je stabilní. Tato přeměna se využívá k ověření emise neutrína. S energií neutrína  $W$  souvisí jeho hybnost  $p=W/c$ , proto v důsledku zákona o zachování hybnosti musí jádro litia vykazovat určitý "odraz". Takový jev byl skutečně pozorován.

Umělá radioaktivita poskytuje současné vědě široké možnosti využití, protože umožňuje přípravu zářičů s požadovanými vlastnostmi, tj. s vhodným poločasem a vhodnou energií emitovaného záření. V současné době umíme vyrobit izotopy všech prvků. Nejčastěji využívané zářiče jsou uvedeny v tabulce.

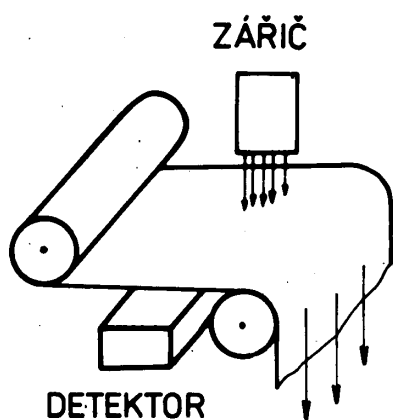
Vyvoláním umělé radioaktivity získáme možnost sledování atomů v rozličných chemických reakcích, v procesech probíhajících v živých organismech, atd. ..., protože tyto atomy můžeme identifikovat prostřednictvím záření, které emitují. Stačí přimísit do látky vstupující do zkoumané reakce určité množství radioaktivních atomů tohoto prvku a pomocí přístrojů detekujících radioaktivní záření můžeme zkoumat, co se s nimi děje. Tato metoda tzv. značkových atomů se v současnosti velmi široce využívá nejen v samotné chemii, ale i v biologii (umožňuje např. zjišťovat rychlost vstřebávání vody, hnojiv a jiných látek rostlinami), v medicíně (umožňuje zkoumat činnost důležitých orgánů, např. štítné žlázy atd.).

Umělá radioaktivita je základem velmi citlivé metody zkoumání složení látek nazývané aktivační analýza, která se v současnosti velmi intenzivně využívá. Spočívá v tom, že látka s neznámým složením

se ozáří neutrony (aktivuje se), tím se část jejich atomů přemění na radioizotopy. Analýzou energetického spektra jejich záření můžeme zjistit chemické složení látky. Tato metoda umožňuje zjistit příměsy s koncentracemi až do  $10^{-6}$  %.

Význam radioizotopů v současné době stoupl i v souvislosti s řešením biologických problémů: ničení rakovinových buněk a zárodků podmiňujících kažení potravin. Radioaktivní záření se stává ideálním konzervačním prostředkem pro zachování potravin v čerstvém stavu i na relativně dlouhý čas.

Poklesu intenzity záření s tloušťkou absorbující vrstvy se využívá v průmyslu při automatické kontrole výrobních procesů a výrobků. Na obr. 36.7 je schématicky znázorněné zařízení na automatickou kontrolu tloušťky a kvality vyráběných folií využívající radioaktivního záření.



Obr. 36.7 Schéma zařízení pro kontrolu kvality folie

JOLIOT-CURIE Frédéric (žoljo-küri), 1900-1958, francouzský fyzik a chemik, asistent Marie Curie-Sklodowské. Na výzkumu radioaktivního záření pracoval společně s manželkou Irenou J.-C. Významné výsledky, které v této oblasti společně dosáhli jim přinesly Nobelovu cenu za chemii v r. 1935. Nezávisle na E.Fermim objevil Joliot-Curie se svými spolupracovníky uvolňování neutronů při štěpení uranu a vypracoval projekt jaderného reaktoru. Dlouhá léta byl předsedou Světové federace vědeckých pracovníků a Světové rady míru a neúnavným bojovníkem proti zneužívání výsledků vědy.

JOLIOT-CURIEOVÁ (žoljo-küri) 1897-1956, francouzská chemička a fyzička, dcera Marie Curie-Sklodowské. Spolu s manželem F.Joliot-Curie se zabývala studiem radioaktivních prvků.

Roku 1934 objevili umělou radioaktivitu a určili hmotnost neutronu. Ve spolupráci s P.Savičem popsala nový druh jaderné reakce, objevila rovněž jednu z radioaktivních rozpadových řad (neptuniovou) aj. Za společné dílo ve výzkumu radioaktivity dostali manželé Joliot-Curie roku 1935 Nobelovu cenu za chemii.

Tabulka

Zářič	Poločas rozpadu		Zářič	Poločas rozpadu
Uhlík	5 720 roků		Zinek	250 dní
Sodík	15 hodin		Stříbro $^{110}_{47}\text{Ag}$	282 dní
Fosfor	14,3 dnů		Antimon	2,7 roku
Síra	87,1 dne		Jód	8 dní
Chlór	$4 \cdot 10^5$ let		Zlato $^{198}_{79}\text{Au}$	2,7 dní
Vápník	152 dní		Rtuť	5,5 minut
Chrom	26,5 dní		Železo $^{55}_{26}\text{Fe}$	4 roky
Kobalt	5,3 roky			