

## 2 Stavba atómu

Objavenie atómového jadra (E. Rutherford 1911) bolo jedným z kľúčových poznatkov o stavbe atómu. V pôvodnom experimente Rutherford a jeho žiaci zisťovali prechod tenkého lúča žiarenia  $\alpha$  (kladne nabitých jadier hélia vyžarovaných z rádia pri jeho rádioaktívnom rozpade) cez veľmi tenkú fóliu zo zlata. Zistili, že prevažná väčšina častíc žiarenia  $\alpha$  ( $\alpha$  častíc) prenikla cez fóliu bez odchylenia sa od pôvodného smeru. Niektoré častice sa však od pôvodného smeru odchyľili pod veľkým uhlom, alebo dokonca odrážali naspäť. Túto nepredpokladanú zmenu smeru Rutherford vysvetlil tým, že kladne nabitý  $\alpha$  častice sa odchyľujú pri prelete okolo veľkého kladného náboja sústredeného vo veľmi malom objeme v strede atómu - jadre. Výpočty umožnili zistiť ďalšie podrobnosti o vlastnostiach atómového jadra. Vznikla predstava o atóme ako analógii Slnecnej sústavy (tzv. planetárny model) podľa ktorej záporne nabitý elektróny vykonávajú kruhový pohyb okolo kladne nabitého jadra atómu. Poznatky o stavbe atómu a samotného jadra sa postupne rozširovali. Protón a neutrón boli objavené až neskôr.

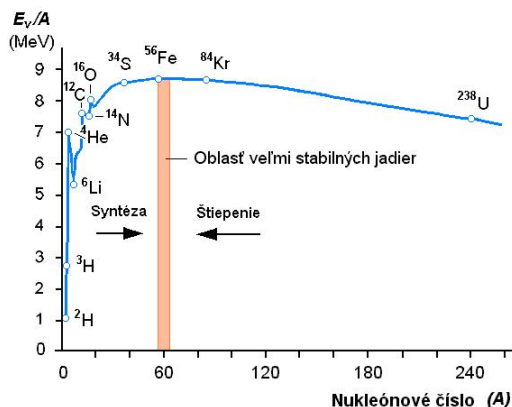
### 2.1 Jadro atómu

Ďalší výskum ukázal, že atómové jadro, je tvorené protónmi a neutrónmi (nukleónmi). Opísané sú v kap. 1. Počet protónov v jadre vyjadruje protónové číslo  $Z$ , počet neutrónov neutrónové číslo  $N$  a počet protónov a neutrónov spolu vyjadruje nukleónové číslo  $A$  ( $A = Z + N$ ). Polomer atómového jadra, stanovený na základe Rutherfordových pokusov, je asi  $10^{-14}$  m až  $10^{-15}$  m a vzrastá s počtom nukleónov. Hustota jadra je približne  $10^{17}$  kg.m<sup>-3</sup>.

#### 2.1.1 Energia atómového jadra a jadrové reakcie

Protóny a neutróny v jadre sú v tesnej blízkosti. Medzi kladne nabitými protónmi pôsobia veľké odpudivé elektrostatické (coulombovské) sily. Obrovské sily, ktoré pútajú nukleóny v jadre a prekonávajú pôsobenie odpudivých elektrostatických síl sú **jadrové sily** (patria medzi silné interakcie). Jadrové sily pôsobia medzi protónmi a neutrónmi bez ohľadu na ich elektrický náboj, však len na krátke vzdialenosti. Pri malých vzdialenostiach v rámci rozmerov atómového jadra sú jadrové sily výrazne väčšie ako odpudivé elektrostatické sily. S narastajúcou veľkosťou jadra a vzdialenosťou medzi nukleónmi význam odpudivých elektrostatických síl vzrastá, pretože elektrostatická sila klesá so vzdialenosťou pomalšie ako jadrové sily. (Elektrostatické sily klesajú s druhou mocninou vzdialenosti a majú teoreticky nekonečný dosah). **Tým možno vysvetliť aj postupný pokles väzbovej energie a nestálosť ťažkých jadier.**

Energia, akou sú protóny a neutróny spolu viazané jadrovými silami v jadre nazývame **väzbová energia**, označujeme ju  $E_v$ , jednotkou je elektrónvolt (eV). Väzbová energia je energia ktorú musíme jadru dodať, aby sme ho úplne rozložili na protóny a neutróny, alebo naopak, ktorá sa hypoteticky uvoľní pri vytvorení atómového jadra zo samostatných protónov a neutrónov. Väzbovú energiu rôznych nuklidov je výhodné vyjadrovať pomocou hodnoty **väzbovej energie pripadajúcej na jeden nukleón**, ktorú označujeme symbolom  $\epsilon_v$ . Hodnota  $\epsilon_v$  sa výrazne mení s počtom nukleónov v jadre (obr. 2.1). Najväčšie hodnoty dosahuje pre nuklidy s nukleónovým číslom okolo 60; maximálnu hodnotu má pre nuklid železa  ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ .



Obr. 2.1

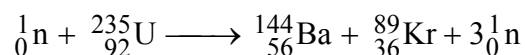
Závislosť väzbovej energie na jeden nukleón ( $\epsilon_v = E_v/A$ ) od nukleónového čísla  $A$ .

Jadrá atómov, ktoré sú ľahšie, alebo ťažšie ako jadrá na vrchole krivky ( $^{56}\text{Fe}$ ) majú nižšiu väzbovú energiu  $\epsilon_v$ . Z krivky väzbovej energie na obr. 2.1 vyplýva, že pri zmene počtu nukleónov v jadrách dochádza aj k zmene energie.

Reakcie, pri ktorých sa **mení počet** protónov a neutrónov v jadre nuklidu označujeme ako **jadrové reakcie**. Jadrová reakcia prebieha napríklad vtedy, ak odstreľujeme jadrá atómov  $\alpha$ -časticami, protónmi alebo neutrónmi s veľkou energiou. Zdrojom týchto elementárnych častíc môžu byť rádioaktívne žiariče alebo urýchľovače častíc. V ožarovaných materiáloch sa pôvodné jadrá môžu zmeniť na iné a tak môžu vznikať nové nuklidy. V prípade, ak vzniknuté nuklidy sú rádioaktívne, ožiarenie materiálov vedie k zvýšeniu ich rádioaktivity.

Dva typy jadrových reakcií sú zvlášť významné z hľadiska uvoľňovania energie. Prvou z nich je **termojadrová** (termonukleárna) **syntéza** pri ktorej sa spájajú ľahšie jadrá (na obr. 2.1 vľavo od  $^{56}\text{Fe}$ ) a vznikajú jadrá ťažšie. Takéto procesy prebiehajú napríklad na Slnku a iných hviezdach (zlučovanie jadier vodíka  $^1_1\text{H}$ ), alebo pri výbuchu termojadrových zbraní (vodíkovej bomby). Výbuch termojadrových zbraní je dôsledkom reakcie pri ktorej sa spája **jadro deutéria**  $^2_1\text{H}$  a **trícia**  $^3_1\text{H}$  a vzniká hélium  $^4_2\text{He}$ , protón a energia. Ľahké jadrá sa môžu spájať len vtedy, ak prekonajú odpudivé elektrostatické sily a priblížia sa na jadrovú vzdialenosť. Potrebnú kinetickú energiu získajú napríklad po zohratí na veľmi vysokú teplotu (až  $10^8\text{K}$ ). V súčasnosti prebieha dlhodobý experimentálny výskum, ktorého cieľom je využiť riadenú termojadrovú syntézu na získavanie využiteľnej energie na Zemi. Problémom je zvládnutie extrémnych teplotných podmienok potrebných na kontrolovaný priebeh reakcie.

Druhá z jadrových reakcií spojených s uvoľňovaním energie nastáva vtedy, ak sa ťažšie jadrá (napravo od  $^{56}\text{Fe}$ ) delia na dve menšie jadrá s približne rovnakou hmotnosťou. Takýto druh reakcií nazývame **štiepne reakcie**. Štiepeniu podliehajú jadrá s veľkým počtom nukleónov ako sú napríklad jadrá uránu a plutónia. Štiepenie je obvykle zahájené absorpciou neutrónu s vhodnou, relatívne malou rýchlosťou. Spomalený neutrón tak môže rozštiepiť jadro uránu 235 napríklad na jadrá bária a kryptónu.



Pri takomto štiepení jadier sa uvoľnia približne dva až tri neutróny a energia. Ak sa vznikajúce neutróny vhodným spôsobom spomalia, môžu štiepiť ďalšie jadrá uránu. Pretože počet neutrónov vznikajúcich pri reakcii je väčší ako do reakcie vstupujúcich, môže pri vhodných podmienkach prebehnúť tzv. **ret'azová reakcia**, pri ktorej sa lavínovito štiepi stále väčší počet jadier. Štiepne reakcie sú využívané na získavanie energie v jadrových reaktoroch, ale aj v jadrových zbraniach.

## 2.1.2 Stabilita atómového jadra

Atómové jadrá môžeme z hľadiska ich stability rozdeliť na stabilné a nestabilné. **Stabilné jadrá** môžu existovať neobmedzene dlhý čas. Naproti tomu **nestabilné jadrá** sa po dlhšej alebo kratšej dobe samovoľne premieňajú na iné jadrá. V prírode sa nachádza viac ako **300 rôznych nuklidov zodpovedajúcich prvkom s atómovými číslami od 1 do 92. Z nich viac ako 80 % je stabilných**, zvyšok tvoria nestabilné - **rádioaktívne nuklidy** (rádionuklidy). Okrem prírodných nuklidov existujú aj nuklidy pripravené umelo jadrovými reakciami.

Stabilita jadier súvisí s počtom protónov a neutrónov. Jadrá s párnym počtom protónov sú obvykle stabilnejšie. Zvlášť stabilné sú jadrá s tzv. magickým počtom protónov a neutrónov. „**Magické čísla**“ sú 2, 8, 20, 28, 50, 82 a 126. Jadrá, ktoré majú súčasne Z aj N rovné magickému číslu majú výnimočnú stabilitu. Sú to napríklad jadrá nuklidov  ${}_2^4\text{He}$ ,  ${}_8^{16}\text{O}$ ,  ${}_{20}^{40}\text{Ca}$  a  ${}_{82}^{208}\text{Pb}$ . Stabilita jadier hélia  ${}_2^4\text{He}$  je taká veľká, že pri rádioaktívnom rozpade niektorých veľkých jadier sa z nich uvoľňujú ako samostatné častice (žiarenie  $\alpha$ ).

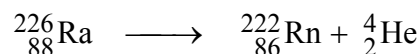
Jadrá ľahších prvkov obsahujú približne rovnaký počet protónov a neutrónov. Sú to napríklad nuklidy  ${}_2^4\text{He}$  a  ${}_8^{16}\text{O}$ . Vo väčších jadrách je však počet neutrónov vždy väčší ako počet protónov a to tým viac, čím sú jadrá ťažšie. Napríklad v nuklide  ${}_{92}^{235}\text{U}$  je pomer neutrónov a protónov väčší ako 1,5. Atómy s vyššími atómovými číslami sú obvykle nestabilné a jadrá s atómovým číslom  $Z > 83$  sú nestabilné všetky.

## 2.1.3 Rádioaktivita

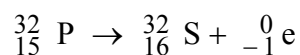
**Rádioaktivita** je samovoľná premena (rozpad) jadier spojená s emisiou niektorých elementárnych častíc, alebo skupín častíc z priestoru jadra. Rádioaktivitu objavil v roku 1896 H. Becquerel, ktorý zistil, že urán a jeho soli vyžarujú samovoľne, bez vonkajšieho zásahu žiarenie, ktoré môže exponovať fotografickú emulziu. Žiarenie dostalo názov rádioaktívne žiarenie. Postupne sa zistilo, že existuje niekoľko druhov rádioaktívneho žiarenia. Rádioaktívne žiarenie z prírodných rádionuklidov bolo podľa svojich charakteristických vlastností rozdelené na žiarenie  $\alpha$ ,  $\beta$  a  $\gamma$ . Žiarenie  $\alpha$  a  $\beta$  sa v elektrickom a magnetickom poli odchyľovalo od pôvodného smeru, ale každé na opačnú stranu. Bolo to dôkazom toho, že žiarenie  $\alpha$  a  $\beta$  tvorí prúd kladne alebo záporne nabitých častíc. Smer gama žiarenia sa v elektrickom poli nezmenil čo dokazovalo, že ho tvorí prúd častíc bez náboja. Rádioaktivitu

uvažovaného nuklidu možno charakterizovať druhom žiarenia, energiou žiarenia a rýchlosťou rádioaktívnej premeny (polčasom rozpadu). Žiarenie  $\alpha$ ,  $\beta$  a  $\gamma$  možno charakterizovať takto:

**Žiarenie  $\alpha$**  je prúd rýchlo letiacich jadier hélia  ${}^4_2\text{He}$  (označuje sa aj  ${}^4_2\text{He}^{2+}$ ). Vzniká pri rozpade nestabilných ťažkých jadier. Častice alfa sú teda tvorené dvoma protónmi a dvoma neutrónmi a majú kladný náboj (2+). Rýchlosť  $\alpha$  častíc vyletujúcich z jadra dosahuje asi 10 % rýchlosti svetla. Vo vzduchu prenikajú len do niekoľko cm, pretože sú brzdené zrážkami s jadrami atómov v molekulách plynov. V tkanivách ľudského tela preniká asi do hĺbky 0,05 mm, pokožkou alebo listom papiera prakticky nepreniká. Žiarenie  $\alpha$  má veľkú ionizačné účinky (pozri ionizujúce žiarenie). Hmotnosť a náboj pôvodného jadra po rozpade  $\alpha$  poklesne. Príkladom je rozpad jadra rádia 226 na radón 222 a  $\alpha$  časticu.



**Žiarenie  $\beta$**  je prúdom rýchlo letiacich elektrónov. Tieto elektróny vznikajú v jadrách atómov z neutrónov. Neutrón v jadre sa v tomto prípade premieňa na protón, elektrón a antineutrino  $\bar{\nu}$  ( $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}$ ). Rýchlosť  $\beta$  častíc môže dosahovať 40 až 99 % rýchlosti svetla. Žiarenie  $\beta$  vo vzduchu preniká do vzdialenosti 6 až 300 cm, v tkanivách asi od 0,06 do 4 mm. Má menšiu ionizačnú schopnosť ako žiarenie  $\alpha$ . Príkladom je  $\beta$  rozpad jadra fosforu



**Žiarenie  $\gamma$**  je elektromagnetické žiarenie s vlnovou dĺžkou približne pod 0,1 nm (viditeľné svetlo má vlnovú dĺžku 400 až 700 nm). Žiarenie  $\gamma$  uvoľňujú nestabilné jadrá s prebytkom energie, ktoré vznikli po rozpade  $\alpha$  alebo  $\beta$ . Fotóny elektromagnetického žiarenia majú nulovú hmotnosť a pohybujú sa rýchlosťou svetla. Žiarenie gama má veľkú prenikavosť látkami ktorá vzrastá s rastúcou energiou žiarenia (klesajúcou vlnovou dĺžkou). Ionizačná schopnosť žiarenia gama je však relatívne malá. Žiarenia  $\gamma$  možno zoslabiť hrubou vrstvou materiálov ktoré majú vysokú hustotu a obsahujú prvky s vysokými atómovými číslami (napr. Ba a Pb). Na tienenie osôb pred žiarením gama sa preto používa napríklad kovové olovo. Na zvýšenie tzv. **tieniaceho účinku betónu** proti prenikaniu žiarenia gama sa do betónu môže pridávať ako kamenivo baryt ( $\text{BaSO}_4$ ). Tieniaci účinok materiálu vzrastá s jeho hrúbkou.

**Umelo pripravené rádionuklidy** môžu produkovať, na rozdiel od prírodných rádionuklidov, aj iné druhy žiarenia. Napríklad pri rozpade beta plus ( $\beta^+$ ) jadrá vyžarujú pozitrony (antičastice elektrónu s kladným nábojom); pri protónovej rádioaktivite sú vyžarované protóny. Neutrónové žiarenie môže vznikáť pri niektorých typoch jadrových reakcií, najmä v jadrových reaktoroch. Neutrónové žiarenie má veľkú prenikavosť, pretože neutróny majú relatívne veľkú hmotnosť a sú bez náboja. Neutróny sú účinne spomaľované látkami, ktoré obsahujú atómy s ľahkými jadrami, napríklad atómy vodíka. Pri pružnej zrážke protónu s ľahkým jadrom neutrón odovzdá jadrú väčšinu svojej kinetickej energie a sám sa výrazne spomalí. Pri zrážke s ťažkým jadrom sa neutrón odrazí bez podstatnej straty svojej energie. Ochranu pred neutrónovým žiarením preto zabezpečuje napríklad voda, parafín a podobne.

### 2.1.4 Ionizujúce žiarenie

Žiarenie, ktoré má schopnosť spôsobovať ionizáciu prostredia (plynov, kvapalín, tuhých látok, tkanív) označujeme ako ionizujúce žiarenie. Ionizáciu prostredia môžu spôsobovať všetky typy žiarenia vysokou energiou, napríklad častice  $\alpha$ ,  $\beta$ , protóny, neutróny, ale aj fotóny elektromagnetického žiarenia s dostatočne vysokou energiou ( $\gamma$  žiarenie, röntgenové žiarenie a kozmické žiarenie). Pri nárazoch častíc žiarenia dochádza k odtrhnutiu elektrónov z neutrálnych atómov alebo molekúl a súčasne vznikajú kladne nabitú častice - katióny. Odtrhnuté elektróny sa môžu pripojiť k iným molekulám a vytvárať anióny. Prechodom ionizujúceho žiarenia látkovým prostredím v ňom preto vznikajú páry elektricky nabitých častíc. Ionizačné účinky žiarenia  $\alpha$ ,  $\beta$  a  $\gamma$  sú v pomere asi  $10^4 : 10^2 : 1$ . Najväčší z nich je teda ionizujúci účinok častíc  $\alpha$ . Pri prelete takejto častice cez vrstvu vzduchu až do jej úplného zabrzdenia sa vytvoria pozdĺž dráhy jej letu až desiatky tisíc iónov. Je to vyvolané veľkou hmotnosťou a nábojom týchto častíc. Častice žiarenia  $\alpha$  sú však zabrzdené na pomerne veľmi krátkej dráhe.

### 2.1.5 Rýchlosť rádioaktívnej premeny

Rádioaktívne jadrá sa v dôsledku rádioaktivity premieňajú na iné a preto ich pôvodný počet, aj pôvodná hmotnosť, s časom postupne klesá (obr. 2.2). Rádioaktívna premena jadra pritom nie je závislá od toho, či atóm je vo forme prvku alebo zlúčeniny. Nezávisí ani od teploty, tlaku a skupenstva látky.

Časový priebeh procesu samovoľnej premeny rádioaktívnych jadier vyjadruje exponenciálny vzťah (2.1) v ktorom  $N_0$  je pôvodný počet rádioaktívnych atómov,  $N$  je počet rádioaktívnych atómov v čase  $t$ ,  $t$  je čas a  $\lambda$  je konštanta úmernosti - **premenová konštanta** [ $s^{-1}$ ].

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.1)$$

Rádioaktívna premena má štatistický charakter. Nemožno určiť kedy sa rozpadne jedno vybrané jadro, ale len pravdepodobnosť tohto javu.

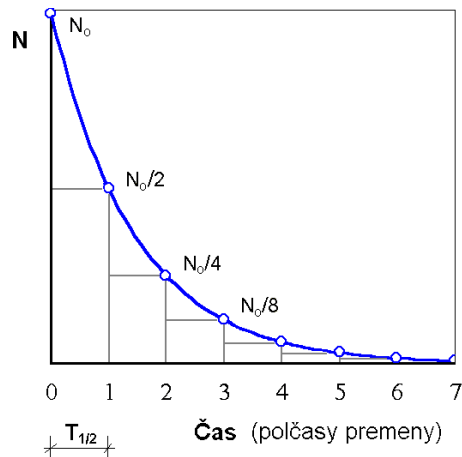
Počet jadrových premien ktoré nastanú vo vzorke rádioaktívnej látky za časovú jednotku označujeme ako **aktivita**  $A$  (pozri kap. 2.1.7). Jednotkou aktivity je **becquerel** (Bq), ktorý zodpovedá jednej premene za sekundu ( $Bq = s^{-1}$ ). Aktivita žiariča s časom postupne klesá. Časový priebeh tohto procesu vyjadruje vzťah (2.2)

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

kde:  $A_0$  je počiatková aktivita žiariča a  $A$  je aktivita v čase  $t$ . Vzťahy (2.1) a (2.2) vyjadrujú časový priebeh rovnakého procesu (aktivita je úmerná počtu nepremených rádioaktívnych jadier) a ich časové priebehy sú preto zhodné.

Počet rádioaktívnych jadier (a aktivita žiariča) sa zníži na polovicu vždy za rovnaký čas. Tento čas za ktorý sa premení polovica prítomných rádioaktívnych jadier atómov nazývame **polčas premeny** alebo **polčas rozpadu** a označujeme ho symbolom  $T_{1/2}$ . Polčasy premeny

rádionuklidov môžu mať hodnoty od zlomkov sekundy až po miliardy rokov. Napríklad polčasy rozpadu  $^{212}\text{Po}$ ,  $^{14}\text{C}$  a  $^{232}\text{Th}$  sú  $3 \cdot 10^{-7}$  s, 5730 rokov a  $1,4 \cdot 10^{10}$  roka.



Obr. 2.2 Znižovanie počtu rádioaktívnych jadier ( $N$ ) v závislosti na čase ( $t$ ).

### 2.1.6 Zdroje prírodnej rádioaktivity

Zdroje žiarenia môžeme z hľadiska ich pôvodu rozdeliť na prírodné a vytvárané činnosťou človeka (antropogénne). V prírode sa nachádza asi 50 rádionuklidov. Vyskytujú sa vo vzduchu, vo vode, v horninách aj pôde. Niektoré sú prítomné aj v živých organizmoch, ako aj v tkanivách a kostiach človeka. V prírode sa nachádza aj malé množstvo rádionuklidov vytvorených ľudskou činnosťou. Prírodné rádionuklidy pochádzajú z troch zdrojov. Sú to:

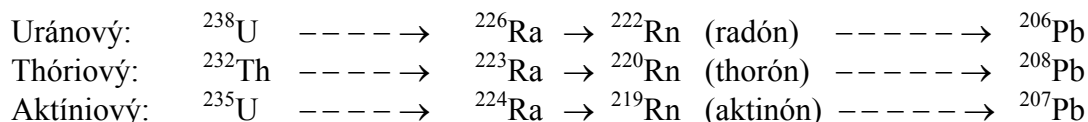
- Primárne** rádionuklidy, ktoré sú zachované na Zemi od čias jej vzniku a majú veľmi dlhý polčas premeny, rádovo v miliardách rokov. Ich množstvo na Zemi je z hľadiska kratšieho časového rozpätia približne konštantné. Medzi primárne rádionuklidy patrí  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  a  $^{232}\text{Th}$  (thorium), ktoré tvoria prírodné premenové rady prvkov (pozri ďalej). Medzi ďalšie patrí draslík ( $^{40}\text{K}$ ) a rubídium ( $^{87}\text{Rb}$ ), ktoré premenové rady netvoria.
- Sekundárne** rádionuklidy, ktoré v prírode stále vznikajú premenou primárnych rádionuklidov. Označujeme ich ako rádionuklidy premenových radov.
- Rádionuklidy, ktoré **vznikajú v horných vrstvách atmosféry** jadrovými reakciami vyvolaných kozmickým žiarením. Medzi ne patrí trícium ( $^3\text{H}$ ) a uhlík ( $^{14}\text{C}$ ). Prevažnú väčšinu atómov vodíka a uhlíka viazaných v zlúčeninách na Zemi tvoria stabilné nuklidy  $^1\text{H}$  a  $^{12}\text{C}$ .

### 2.1.7 Rádioaktívne premenové rady

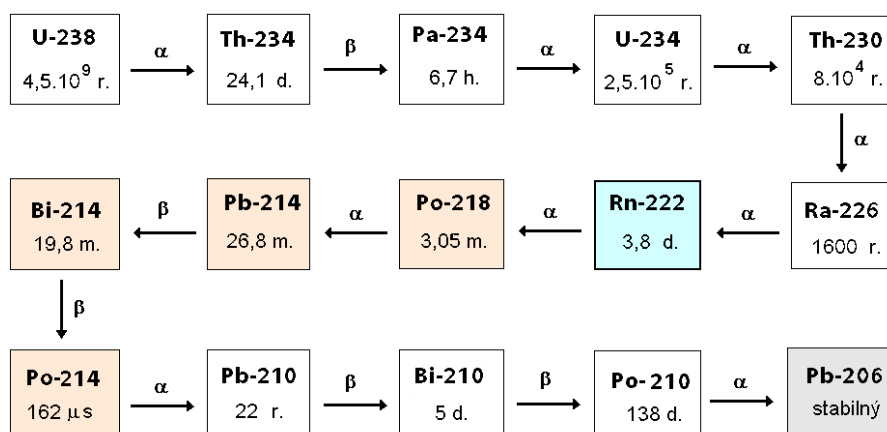
Primárne prírodné rádionuklidy  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  a  $^{232}\text{Th}$  sa pri rádioaktívnej premene menia na produkty, ktoré sú tiež rádioaktívne. Vzniknuté produkty sa preto premieňajú ďalej - na ďalšie rádioaktívne produkty. **Dôsledkom série po sebe prebiehajúcich** rozpadov vzniká reťazec rádioaktívnych prvkov, ktorý sa nazýva **rádioaktívny premenový, alebo rozpadový rad**.

Každý z troch premenových radov prírodných rádionuklidov<sup>1</sup> je zakončený stabilným produktom (obr. 2.3). Je ním vždy niektorý z nerádioaktívnych izotopov olova. Prvok, z ktorého priamo vzniká iný sa nazýva materský prvok, jeho produkt premeny sa nazýva dcérsky produkt. V uzatvorenej vzorke rádioaktívneho materiálu ktorá obsahuje primárny rádionuklid, napríklad v hornine, sú súčasne prítomné aj rádioaktívne dcérske produkty.

Tri prírodné premenové rady sú pomenované v zásade podľa prvého člena. V stručnej schéme uvádzame vždy východiskový primárny nuklid, potom vzdialenejšiu časť reťazca vyznačujúcu vznik radónu z rádia a koniec reťazca zakončený stabilným izotopom olova. Izotopy radónu sa niekedy označujú zvláštnym názvom podľa názvu primárneho nuklidu.



V uránovom rozpadovom rade je prvým prvkom urán ( $^{238}\text{U}$ ), posledným, nerádioaktívnym prvkom je olovo ( $^{206}\text{Pb}$ ). Schéma tohto radu je na obr. 2.3. Uránový rozpadový rad je významný z hľadiska ožiarenia človeka rozpadovými produktami  $^{222}\text{Rn}$  (pozri kap. 2.1.9).



Obr. 2.3 Uránový premenový rad (zjednodušené schéma). Emisia žiarenia  $\gamma$  nie je vyznačená. Polčasy premeny sú vyjadrené v rokoch, dňoch, minútach alebo sekundách (najbližšie produkty rozpadu radónu majú krátke polčasy premeny).

Rádioaktivita  $\alpha$ ,  $\beta$  a  $\gamma$  dcérskych rádionuklidov rozpadových radov  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  a  $^{232}\text{Th}$  tvorí významnú zložku prirodzenej rádioaktivity hornín (Tab. 2.1). V horninách kontinentálnej zemskej kôry je priemerný obsah  $^{238}\text{U}$  približne  $3 \mu\text{g.kg}^{-1}$  a  $^{232}\text{Th}$  asi  $11 \mu\text{g.kg}^{-1}$ . Rádioaktivita hornín však určuje najmä aktivita rádioaktívneho draslíka  $^{40}\text{K}$  ( $T_{1/2} = 1,3 \cdot 10^9$  roka), ktorý patrí k najrozšírenejším rádionuklidom v prírode. Jeho dcérske produkty premeny sú stabilné, teda netvoria premenový rad. Rádioaktívny izotop  $^{40}\text{K}$  tvorí len asi 0,012 % z celkového

<sup>1</sup> Okrem troch prírodných poznáme aj štvrtý premenový rad, ktorého prvý člen je umelo pripravený nuklid neptúnia.

obsahu draslíka vyskytujúceho sa v prírode, alebo v tkanivách ľudského tela. Ostatné izotopy draslíka sú stabilné. Rádioaktivita Zeme sa postupne znižuje.

Tab. 2.1 Vlastnosti primárnych prírodných rádionuklidov tvoriacich rádioaktívne rozpadové rady a vlastnosti sekundárne vznikajúcich izotopov radónu.

Primárne nuklidy	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$	$^{235}\text{U}$
Pomer obsahu izotopov $^{238}\text{U}$ a $^{235}\text{U}$ *	-	99,27 (%)	0,72 (%)
Polčas premeny	$14,1 \cdot 10^9$ roka	$4,5 \cdot 10^9$ roka	$0,70 \cdot 10^9$ roka
Vybrané sekundárne nuklidy	$^{220}\text{Rn}$ (thorón)	$^{222}\text{Rn}$ (radón)	$^{219}\text{Rn}$ (aktinón)
Polčas premeny	55 sek.	3,8 dňa	4 sek.

\* Poznámka: Prírodný urán obsahuje okrem primárnych izotopov  $^{238}\text{U}$  a  $^{235}\text{U}$  aj 0,006 % izotopu  $^{234}\text{U}$  - ktorý vzniká ako člen premenového radu uránu  $^{238}\text{U}$ .

### 2.1.8 Vybrané dozimetrické veličiny a jednotky

Meraním charakteristík zdrojov ionizujúceho žiarenia, dávok žiarenia a skúmaním jeho účinkov na biologické objekty sa zaoberá **dozimetria**. Získané poznatky sú nutné z hľadiska ochrany zdravia človeka. Medzi základné veličiny a jednotky v dozimetrii patrí:

- Aktivita  $A$**  rádionuklidu (kap. 2.1.4): Táto veličina charakterizuje zdroj žiarenia. Udáva počet rozpadov rádioaktívnych jadier v materiáli za 1 sekundu. Jednotkou aktivity je **becquerel Bq** ( $\text{Bq} = \text{s}^{-1}$ ). Aktivita charakterizuje zdroje ionizujúceho žiarenia. Aktivita vzťahovaná na jednotku hmotnosti látky je **hmotnostná aktivita** [ $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]. Aktivita vzťahovaná na jednotku objemu kvapalín, alebo plynov je **objemová aktivita** [ $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ ]. **Plošná aktivita** charakterizuje rádioaktívnu látku rozloženú na ploche [ $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ ].
- Dávka  $D$**  (absorbovaná dávka). Táto veličina charakterizuje pôsobenie žiarenia na látku. Udáva množstvo energie odovzdané uvažovanej látke ionizujúcim žiarením; je vzťahované na jednotku hmotnosti (koľko energie absorboval 1 kg látky, tkaniva, alebo orgánu). Jednotkou dávky žiarenia je **gray Gy** ( $\text{Gy} = \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). Touto jednotkou možno vyjadriť aj celkovú dávku žiarenia absorbovanú telom človeka. Určitú dávku môže človek získať jednorázovo, alebo v priebehu dlhšieho časového obdobia.
- Dávkový ekvivalent  $H$** . Vyjadruje mieru biologického účinku rôznych druhov ionizujúceho žiarenia na živé tkanivo. Je teda biofyzikálnou veličinou zohľadňujúcou rozdiely v pôsobení rôznych druhov ionizujúceho žiarenia na bunky ľudských tkanív. Jednotkou pre dávkový ekvivalent je **sievert (Sv)**.

Biologický účinok žiarenia závisí od druhu žiarenia, dávky žiarenia (Gy), rýchlosti ožiarovania ( $\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}$ ) a rozdelenia dávky v biologickom objekte. Účinky rôznych druhov žiarenia sa líšia. Napríklad žiarenie  $\alpha$  spôsobuje pri rovnakej dávke asi 20 krát väčšie biologické poškodenie ako  $\gamma$ -žiarenie pri rovnakom množstve absorbovanej energie. Dávkový ekvivalent  $H$  v Sv sa vypočíta podľa vzťahu (2.2)

$$H = D \cdot Q \quad (2.2)$$

kde  $D$  je absorbovaná dávka ionizujúceho žiarenia (v uvažovanom tkanive) a  $Q$  je **akostný faktor**.

Akostný faktor je číselne vyjadrený odhad poškodenia tkanív pri pôsobení žiarenia daného typu a energie. Vyjadruje teda mieru vplyvu daného druhu (akosti) žiarenia vzhľadom na jeho biologický účinok. Hodnoty akostného faktora  $Q$  pre rôzne druhy žiarenia sú uvedené v tabuľke 2.2. Z tabuľky vyplýva, že dávke 1 Gy žiarenia  $\gamma$  zodpovedá dávkový ekvivalent 1 Sv, ale rovnakej dávke žiarenia  $\alpha$  zodpovedá dávkový ekvivalent 20 Sv.

Tab. 2.2 Hodnoty akostného faktora  $Q$  rôznych druhov ionizačného žiarenia.

Druh žiarenia	$Q$
Žiarenie $\gamma$ , röntgenové žiarenie, elektróny	1
Žiarenie $\alpha$	20
Neutróny s energiou 10 keV; 0,1-2 MeV; 2-20 MeV	5, 10, 20
Protóny	10

### 2.1.9 Zdroje ožiarenia človeka

Človek môže byť ožiarený ionizujúcim žiarením zo zdrojov nachádzajúcich sa mimo ľudského tela (**vonkajšie zdroje ožiarenia**), alebo zo zdrojov žiarenia prítomných v ľudskom tele, či prijatých do organizmu vdychovaním, jedlom a vodou (**vnútorné zdroje ožiarenia**).

Vonkajšie žiarenie z prírodných zdrojov spôsobuje predovšetkým kozmické žiarenie a žiarenie  $\gamma$  z prírodných rádionuklidov nachádzajúcich sa v životnom prostredí (v horninách, pôde, stavebných materiáloch, vode a pod.). **Stavebné materiály** vyrobené z anorganických nekovových surovín, ako napr. stavebný kameň, kamenivo, štrk, piesok, íly, cement, vápno a popolček, vždy obsahujú určité množstvo rádioaktívnych nuklidov. Sú to hlavne nuklidy  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$  a  $^{226}\text{Ra}$  - ktoré vzniká rádioaktívnou premenou uránu  $^{238}\text{U}$ . Hmotnostné aktivity  $^{232}\text{Th}$  a  $^{226}\text{Ra}$  v stavebných materiáloch sú obvykle na úrovni desiatok  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; v prípade nuklidu  $^{40}\text{K}$  až stoviek  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Prítomnosť rádioaktívnych prvkov v stavebných materiáloch zabudovaných v budovách spôsobuje ožiarenie osôb dvojakým spôsobom:

- Vonkajším ožiarением** prenikavým žiarením gama - ktoré vzniká v stavebných materiáloch ako dôsledok rádioaktívneho rozpadu prírodných rádionuklidov.
- Vnútorným ožiarением** dýchacích orgánov po vdýchnutí rádioaktívnych nuklidov - vznikajúcich vo vzduchu z radónu, ktorý sa vytvára v stavebných materiáloch z rádia.

Aktivita stavebných materiálov a surovín na ich výrobu je preto limitovaná.

### 2.1.10 Radón v budovách

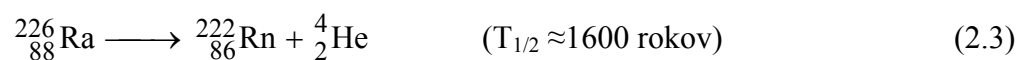
**Radón** patrí medzi vzácne plyny (He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn). Vzácne plyny sa vyskytujú vo forme voľných atómov. Radón je chemicky nereaktívny (inertný), je bezfarebný a bez

zápachu. V atmosfére je prítomný v minimálnom množstve. Vo významnej koncentrácii sa však môže vyskytovať v pôdnom a horninovom vzduchu a v uzatvorených budovách. Radón a jeho dcérske produkty rozpadu majú najväčší podiel na ožiarení človeka ionizujúcim žiarením. K ožiareniu človeka radónom a jeho produktami premeny dochádza najmä v interiéroch budov. Z celkovej efektívnej dávky žiarenia, ktorú priemerný človek získa, je to asi 45 až 50 %.

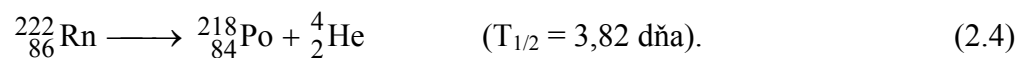
### Vznik a pôvod radónu:

Rádioaktívne izotopy radónu ( $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  a  $^{219}\text{Rn}$ ) vznikajú v horninách a stavebných materiáloch z primárnych nuklidov prírodných rozpadových radov ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  a  $^{232}\text{Th}$ ). Ich vznik je opísaný v kap. 2.1.6. Z hľadiska radiačného nebezpečenstva v budovách je významný najmä radón  $^{222}\text{Rn}$ . Tento izotop radónu najdlhší polčas premeny (tab. 2.1) a môže byť prúdením alebo difúziou premiestnený do najväčšej vzdialenosti z miesta svojho vzniku. Ďalej sa preto budeme zaoberať len týmto izotopom.

**Radón  $^{222}\text{Rn}$**  je jedným z členov premenového radu uránu  $^{238}\text{U}$  (obr. 2.3). Urán 238 ( $T_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9$  roka) sa cez niekoľko medzistupňov pomaly premieňa na rádium  $^{226}\text{Ra}$ , ktorého jadrá sa potom priamo premieňajú na plyný radón



Vznikajúce jadrá plyného radónu sa pomerne rýchlo premieňajú na rádioaktívne dcérske produkty. Prvým z nich je polónium  $^{218}\text{Po}$ , ktoré vzniká podľa rovnice (2.4)



Dcérske produkty rozpadu radónu sú atómami tuhých látok (kovov). Najbližšie z nich ( $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  a  $^{214}\text{Po}$ ) majú relatívne veľmi krátke polčasy premeny a sú silnými žiaričmi  $\alpha$ ,  $\beta$  alebo  $\gamma$ . Vo vzduchu sa adsorbujú na čistočky aerosólov, ktoré sa tak stávajú rádioaktívnymi.

### Pôsobenie na ľudský organizmus.

Čistočky rádioaktívnych aerosólov sa pri dýchaní zachytávajú v prieduškách a pľúcnych komôrkach. V blízkom okolí týchto zachytených rádioaktívnych čistočiek môže nastať ožiarenie a poškodenia tých buniek ktoré sú v dosahu uvoľňovaných  $\alpha$  (prípadne  $\beta$ ) častíc. Zdravotným rizikom je vznik karcinómu pľúc. Radón sám je menej škodlivý ako jeho dcérske produkty rozpadu, pretože sa v dýchacej sústave prakticky nezachytáva a je vydychovaný prevažne v nezmenenej podobe. Vonkajšie časti ľudského tela sú chránené pokožkou a preto nie sú radónom ani jeho dcérskymi produktami ohrozované.

### Zdroje radónu v budovách

Budovy predstavujú čiastočne uzatvorené priestory s vlastnou vnútornou klímou. Radón v budovách môže pochádzať z troch zdrojov. Sú to:

1. **Geologické podložie stavieb:** Hlavným zdrojom radónu sú horniny a pôda pod stavebným objektom. Primárne rádionuklidy  $^{226}\text{Ra}$  ( $^{238}\text{U}$ ), z ktorých radón vzniká sa nachádzajú v stopovom množstve vo všetkých horninách. Zvýšené množstvo uránu je hlavne vo vyvretých horninách. Menšie množstvo je obvykle v premenených a najmenšie

v sedimentárnych horninách, napr. v pieskoch. Vznikajúci radón môže vďaka svojmu relatívne dlhému polčasu premeny (3,8 dňa) prenikať aj z relatívne veľkých hĺbok a vzdialeností. Jeho transport je však časovo ohraničený. Šírenie radónu z miesta svojho vzniku umožňujú tektonické poruchy, trhliny a pórovitosť hornín a sedimentov. Naopak, horniny s nízkou priepustnosťou, napríklad íly, môžu vytvárať bariéry pod ktorými sa radón hromadí. Množstvo radónu v budovách preto závisí od:

- rádioaktivity materskej horniny (koncentrácie uránu, resp. rádia);
- koncentrácie radónu v pôdnom vzduchu;
- priepustnosti hornín a pôdy;
- typu a kvality stavby, ktoré ovplyvňujú prienik radónu z podlažia do budovy.

2. **Stavebné materiály.** Množstvo radónu, ktoré sa môže uvoľniť zo stavebného materiálu závisí od jeho zloženia a teda od geologického pôvodu surovín použitých na jeho výrobu. Príkladom surovín a materiálov ktoré môžu byť aj zdrojom radónu je stavebný kameň, horniny z rudných baní, štrk, piesok, popolček, škvara, betóny z kameniva z vyvretých hornín, tehly, pórobetón na báze popolčekov, dlažby, obkladačky, vápno a iné. Naopak, plasty na báze makromolekulových látok prakticky neobsahujú prírodné rádioaktívne látky.
3. **Voda.** Podzemné vody skoro vždy obsahujú určité množstvo rozpusteného radónu. Platí to najmä v tom prípade keď je voda v kontakte s rádioaktívnou horninou. Rozpustnosť radónu vo vode je malá, ale s rastúcou koncentráciou a tlakom vzrastá. V povrchových vodách je koncentrácia radónu zanedbateľná. Pri používaní vody v budovách sa radón z vody uvoľňuje a to najmä pri zvýšení teploty vody (sprchovanie, pranie, varenie).

### **Znižovanie úrovne objemovej aktivity radónu v budovách.**

Najväčší príspevok k objemovej aktivite radónu v budovách má obvykle geologické podlažie. Príspevok zo stavebných materiálov je obvykle menší a z vody obvykle len malý.

Nízkou objemovou aktivitu radónu a jeho dcérskych produktov v budovách možno zabezpečiť rôznymi spôsobmi. Je to napríklad:

- **Voľba stavebného miesta.** Vhodné sú miesta s nízkym radónovým rizikom;
- **Zabránenie prieniku Rn do budovy.** Na územiach s vyšším radónovým rizikom musia byť budovy chránené proti prenikaniu Rn z podlažia do budovy. Je preto potrebné zamedziť vznik trhlín, netesných stykov a otvorov v základoch a suteréne budovy. Podlahy a steny majú byť z materiálu ktorý neumožňuje prienik radónu (betón). V niektorých prípadoch je možné použiť protiradónové izolácie a tesnenia, odvetrávanie (odsávanie) pôdneho vzduchu z podlažia stavby, alebo zvýšenie atmosférického tlaku v suterénnych priestoroch.
- **Obmedzenie šírenia radónu v budove.** Komínový efekt stavby v prípade výškových budov môže podporiť nasávanie pôdneho vzduchu.
- **Vetrание.** Dostatočná výmena vzduchu zabezpečuje zníženie koncentrácie radónu.
- **Voľba vhodných stavebných materiálov.**