

ZÁKLADNÉ POJMY Z JADROVEJ FYZIKY

Pôvodná predstava atómu, ako najmenšej, ďalej nedeliteľnej časti látky, sa začala meniť objavením elektrónu – nositeľa záporného náboja. Avšak atóm sa prejavoval ako elektricky neutrálny, preto bolo zrejmé, že atóm musí obsahovať rovnako veľký kladný náboj. Táto kapitola nás oboznámi so súčasnými názormi o zložení atómu – a to najmä o zložení jeho **jadra**. Dozvieme sa o základných vlastnostiach atómových jadier, o väzbovej energii jadra a jeho stabilite, o rádioaktivite a zákonitostiach jadrových premien, povieme si o niektorých jadrových reakciách a na záver sa oboznámime s rádioaktívnym datovaním.

1 ZÁKLADNÉ VLASTNOSTI ATÓMOVÝCH JADIER

UČEBNÉ CIELE

Študent by mal vedieť popísať zloženie jadra a jeho základné parametre, mal by vedieť používať atómovú hmotnostnú jednotku, určiť či daný izotop je stabilný, mal by vedieť vypočítať väzbovú energiu jadra.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Elektrón, protón, neutrón, nukleón, nuklid, izotop, polomer jadra, atómová hmotnostná jednotka, hmotnostný schodok, väzbová energia, stabilita jadier, magické čísla, jadrové sily, modely jadier

1.1 Objav a zloženie jadra

Na začiatku 20. st. vznikali prvé predstavy o zložení atómu. Keďže atóm sa prejavoval ako elektricky neutrálny, prvá hypotéza zloženia atómu vychádzala z rovnováhy kladného a záporného náboja, rovnomerne rozloženého v atóme (**Thomsonov** pudingový model ►Príloha 1) Táto hypotéza bola však čoskoro prekonaná na základe experimentov. V r. 1911 navrhol Ernest Rutherford model atómu, pozostávajúci z jadra atómu, obsahujúceho kladný náboj a takmer celú hmotnosť atómu a z tzv. elektrónového obalu atómu. Existencia jadra atómu bola experimentálne dokázaná spolupracovníkmi Rutherforda – Hansom Geigerom a Ernestom Marsdenom. Ide o historicky známy pokus s ostreľovaním zlatej tenkej fólie produktmi samovoľnej premeny radónu. Pozorovalo sa, že tieto ostreľujúce častice (dnes nazývané α -častice, ktoré sú vlastne jadrá héliových atómov, nesúce kladný náboj $+2e$) sa rozptyľujú od fólie o rôzne uhly, dokonca aj o uhol 180° . Na odchylenie takejto častice do spätného smeru je potrebná veľká sila medzi α -časticou a kladným nábojom atómu Au sústredeným v „hmotnom bodovom“ jadre.

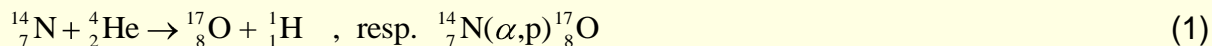
K ďalšej predstave o „zložení“ jadra prispeli objavy **protónu** (v r.1919 – prvá jadrová reakcia uskutočnená Rutherfordom ►Príloha 2) a neutrónu (v r. 1932 Chadwickom). Podľa tejto **protónovo-neutrónovej** hypotézy sa jadro skladá z **protónov** a **neutrónov**. Protón je kladne nabitá častica, veľkosť jej náboja je $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C, pokojová hmotnosť protónu je $m_p = 1,67262158 \cdot 10^{-27}$ kg (ide o jadro atómu vodíka). Celkový počet protónov v jadre sa nazýva **protónové (tiež atómové) číslo Z**, ktoré v neutrálnom atóme súčasne udáva aj počet elektrónov v elektrónovom obale atómu a určuje aj poradie prvku v Mendelejevovej periodickej tabuľke. Pomocou atómového čísla môžeme vyjadriť aj celkový elektrický náboj jadra $Q = Z e$. Neutrón je elektricky neutrálna častica s približne rovnakou hmotnosťou ako protón $m_n = 1,67492716 \cdot 10^{-27}$ kg. Celkový počet neutrónov v jadre udáva **neutrónové číslo N**. Neutróny a protóny nazývame spoločným názvom **nukleóny**. **Hmotnostné (tiež nukleónové) číslo A** vyjadruje celkový počet nukleónov v jadre, platí:

$$A = Z + N.$$

Symbolicky môžeme potom každé jadro - **nuklid X** - zapísať v tvare: A_ZX .

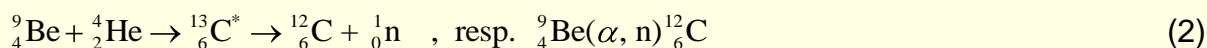
Nuklidy podľa počtu protónov a počtu neutrónov nachádzajúcich sa v atómových jadrách môžeme rozdeliť do štyroch základných skupín. Nuklidy s rovnakým atómovým číslom Z , ale rôznym hmotnostným číslom A , sa líšia počtom neutrónov a nazývajú sa **izotopy**. Nuklidy s rovnakým A a rôznym Z sú **izobary** a nuklidy s rovnakým počtom neutrónov N a rôznym počtom protónov Z sú **izotóny**.

Rutherfordovu jadrovú reakciu (ostreľovanie jadier dusíka α -časticami, vznik jadier kyslíka a vodíka), pri ktorej došlo k objavu protónu môžeme potom zapísať v tvare:



Protón je jadrom najľahšieho prvku, vodíka a α -častica je jadrom hélia.

Chadwickov objav neutrónu **v symbolickom zápise** (►Príloha 3) je:



V periodickej tabuľke prvkov sú izotopy toho istého prvku umiestnené na rovnakom mieste, danom atómovým číslom Z a majú rovnaké chemické vlastnosti, odlišujú sa však niektorými fyzikálnymi vlastnosťami. Jadrové vlastnosti rôznych izotopov toho istého prvku sú taktiež veľmi rozdielne. Niektoré izotopy sú **stabilné**, iné sú nestabilné, tzv. **rádioaktívne**, ktoré sa časom premieňajú.

Pri rádioaktívnej premene je emitovaná nejaká častica a pôvodný **rádionuklid** sa mení na iný nuklid. Nuklidy môžeme klasifikovať pomocou **nuklidového diagramu** (**Segrého diagram** ►Príloha 4), t.j. závislosti $Z(N)$, kde sa dajú rozmiestniť všetky známe - stabilné aj rádioaktívne nuklidy, ako aj nuklidy doteraz ešte experimentálne nepozorované. Ľahké stabilné nuklidy sa nachádzajú blízko priamky $Z = N$. S rastúcou hmotnosťou u stabilných nuklidov vzrastá nadbytok neutrónov ($N \cong 1,5 Z$). Pre $Z > 83$ už stabilné nuklidy neexistujú.

Príklad 1

Časticami α ostreľujeme jadrá atómu medi. Vypočítajte najmenšiu vzdialenosť (vzhľadom na stred jadra), do ktorej sa dostane α - častica s energiou 5,3 MeV pri takejto čelnej zrážke.

Riešenie

Riešenie vychádza zo zákona zachovania energie. Na začiatku ostreľovania je celková energia rovná kinetickej energii α - častice $E_{k,0} = 5,3$ MeV, $E_{p,0} = 0$. Pri približovaní sa k jadru medi postupne klesá kinetická energia α - častice a mení sa na elektrickú potenciálnu energiu α - častice v elektrickom poli jadra Cu. V mieste x , kde sa α - častica zastaví ($E_k(x) = 0$) bude platiť:

$$E_{k,0} + E_{p,0} = E_k(x) + E_p(x) \quad ,$$

$$E_{k,0} = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi \epsilon_0 x} \quad ,$$

kde $Q_1 = 2e$ je náboj α - častice, $Q_2 = Ze = 29e$ je náboj jadra atómu medi.

Odtiaľ vyjadríme hľadanú vzdialenosť x :

$$x = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi \epsilon_0 E_{k,0}} = \frac{2 \cdot 29 \cdot (1,602 \cdot 10^{-19})^2}{4\pi (8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 5,3 \cdot 10^6 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19})} = 1,58 \cdot 10^{-14} \text{ m} = 15,8 \text{ fm}.$$

1.2 Polomer a hmotnosť jadra

Atómové jadro nie je tuhé teleso s presne definovaným tvarom. Na získanie poznatkov o štruktúre a veľkosti jadier sa využívajú rôzne experimentálne metódy (napr. štúdium rozptylu α -častic, protónov alebo rýchlych neutrónov na jadrách, ostreľovanie jadra vysokoenergetickými

elektrónmi). V prvom priblížení si predstavujeme jadrá ako guľové objekty, pričom pre efektívny polomer jadier platí:

$$R = R_0 A^{1/3} \quad (3)$$

kde R_0 je \approx polomeru nukleónu, A je celkový počet nukleónov. Z jednotlivých experimentov dostávame hodnotu $R_0 \cong (1,1 - 1,5) \cdot 10^{-15}$ m (môžeme používať podielovú jednotku femtometer: 1 fm = 10^{-15} m). Najčastejšie používaná hodnota je $R_0 = 1,2$ fm. Objem jadra V je úmerný celkovému počtu nukleónov A , z ktorých je jadro zložené ($V \sim \frac{4}{3}\pi R^3 \sim A \frac{4}{3}\pi R_0^3 \sim A$) a nezávisí od jednotlivých počtov protónov Z a neutrónov N . Objem pripadajúci na jeden nukleón V/A je konštantný, z čoho vyplýva, že hmotnosť jadra je rozdelená v jeho objeme s konštantnou hustotou.

V atómovej a jadrovej fyzike môžeme vyjadrovať hmotnosť pomocou **atómovej hmotnostnej jednotky** - u , ktorá je definovaná ako 1/12 pokojovej hmotnosti atómu izotopu ^{12}C , platí: $1 u \cong 1,66 \cdot 10^{-27}$ kg. Ak potom vyjadríme pomer hmotnosti atómu k atómovej hmotnostnej jednotke, dostaneme bezrozmerné číslo, tzv. **relatívnu atómovú hmotnosť** - A_r

$$A_r = \frac{m_a}{u} \quad (4)$$

Relatívna atómová hmotnosť atómu izotopu uhlíka ^{12}C je presne rovná 12. Hmotnostné číslo ľubovoľného nuklidu A vyjadruje potom hmotnosť nuklidu v jednotkách atómovej hmotnostnej jednotky, zaokrúhlenú na celé číslo (napr. atómová hmotnosť ^{208}Pb je 207,9767 u \cong 208 u, z čoho vyplýva hmotnostné číslo ^{208}Pb $A = 208$, relatívna atómová hmotnosť $A_r = 208$).

Príklad 2

Ukážte, že môžeme uvažovať rovnakú hustotu jadra pre všetky nuklidy a odhadnite ju!

Riešenie:

Ak predpokladáme sférický tvar jadra, bude pre hustotu platiť:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{\frac{4}{3}\pi R^3} \cong \frac{3m}{4\pi R_0^3 A},$$

pretože pre polomer jadra platí: $R \cong R_0 A^{1/3}$.

Pre hmotnosť nuklidu môžeme približne odhadnúť: $m \cong A m_{nu}$, kde m_{nu} je hmotnosť nukleónu, $m_{nu} \cong m_p \cong m_n \cong 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg. Potom:

$$\rho \cong \frac{A m_{nu}}{\frac{4}{3}\pi R_0^3 A} \cong \frac{3m_p}{4\pi R_0^3} \cong \frac{3 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27}}{4\pi (1,2 \cdot 10^{-15})^3} \cong 2,3 \cdot 10^{17} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}.$$

Z výsledku vidieť, že hustota nezávisí od nukleónového čísla A a môžeme ju považovať za rovnakú pre všetky nuklidy.

Presné merania hmotností jadier ukázali, že **hmotnosť jadier** je menšia ako súčet hmotností voľných nukleónov, z ktorých je jadro zložené:

$$m = Zm_p + (A - Z)m_n - \Delta m \quad (5)$$

kde m_p , m_n sú hmotnosti protónu a neutrónu, Δm je **hmotnostný schodok**, ktorý súvisí s energiou väzby nukleónov v jadre.

Hmotnosť celého atómu včítane obalových elektrónov potom je:

$$m_a = Zm_H + (A - Z)m_n - \Delta m \quad (6)$$

kde m_H je hmotnosť atómu vodíka.

1.3 Väzbová energia jadra a jeho stabilita

Energia, potrebná na to, aby sme jadro rozložili na jednotlivé voľné nukleóny s nulovou kinetickou energiou sa nazýva **väzbová energia jadra**. Pri vytvorení jadier spojením nukleónov sa táto energia uvoľní. Na základe Einsteinovho vzťahu medzi energiou a hmotnosťou môžeme väzbovú energiu vyjadriť:

$$\Delta E = \Delta m c^2 = Zm_H + (A - Z)m_n - m_a c^2 \quad (7)$$

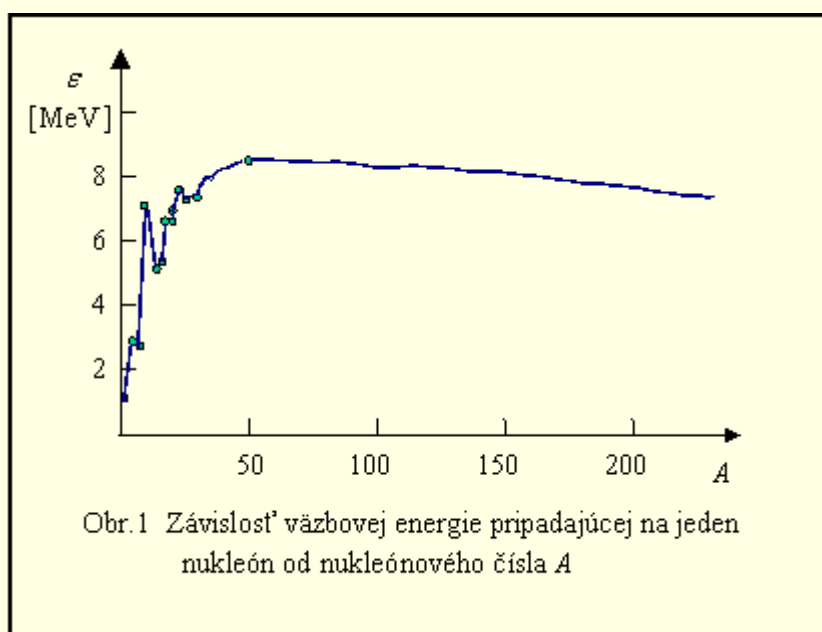
Energia odpovedajúca hmotnosti atómovej hmotnostnej jednotky 1 u je: $E_u = u c^2 \cong 1,66043 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot (2,99792 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1})^2 = 1,4923 \cdot 10^{-10} \text{ J} \cong 931,5 \text{ MeV}$. (V príkladoch môžeme potom výhodne použiť namiesto c^2 ekvivalent: 931,5 MeV/u). Ak v predošlej rovnici (7) vyjadríme hmotnostný schodok v jednotkách u, dostaneme pre väzbovú energiu jadra, vyjadrenú v jednotkách MeV vzťah:

$$\Delta E = \Delta m c^2 = Zm_H + (A - Z)m_n - m_a u \cdot \frac{931,5}{u} \quad [\text{MeV}] \quad (8)$$

Pre porovnanie: väzbové energie elektrónov v elektrónovom obale atómu sú rádovo eV, zatiaľ čo väzbové energie jadier sú MeV.

Uvedeným spôsobom možno vypočítať väzbovú energiu ľubovoľného jadra, ak je dostatočne presne známa jeho hmotnosť. Vidíme, že väzbová energia jadier závisí hlavne od počtu nukleónov a menej od pomeru počtu protónov a neutrónov. Pri porovnávaní **stability jadier** je vhodné používať energiu pripadajúcu na jeden nukleón:

$$\varepsilon = \frac{\Delta E}{A} = \frac{\Delta m c^2}{A} = \frac{Zm_H + (A - Z)m_n - m_a c^2}{A} \quad (9)$$



V závislosti väzbovej energie vztiahnutej na jeden nukleón $\varepsilon(A)$ od nukleónového čísla A (obr. 1) pozorujeme lokálne maximá v prípadoch, keď počet protónov alebo neutrónov sa rovná **magickému číslu** 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, 152 a takéto jadrá vykazujú výnimočnú stabilitu. Ak sa magickému číslu rovná ako počet protónov, tak aj počet neutrónov, hovoríme o dvojnásobne magických jadrách (napr. $^{16}_8\text{O}$, $^{40}_{20}\text{Ca}$). Väzbová energia jadra závisí aj od toho, či nuklid obsahuje párnny alebo nepárny počet nukleónov. Najstabilnejšie sú

tzv. párnopárne jadrá s párnym počtom protónov aj neutrónov, najmenšiu energiu ε majú nuklidy s nepárnym počtom protónov aj neutrónov. Táto skutočnosť sa prejavuje **v počte stabilných nuklidov** v prírode (tab.1 ► Príloha 5). Maximum hodnoty $\varepsilon_{\max} = 8,5 \text{ MeV}$ sa pozoruje pre jadro s

nukleónovým číslom $A = 50$. V oblasti jadier s nukleónovým číslom $A \in (50, 150)$ ostáva hodnota ε takmer konštantná, pre $A > 150$ hodnota ε postupne klesá. Z uvedeného vyplýva, že sily, ktoré viažu nukleóny do jadier sa nasycujú. Pokles krivky pri veľkých hodnotách A znamená, že nukleóny sú pevnejšie viazané v dvoch stredne hmotných nuklidoch ako v jednom nuklide s veľkým hmotnostným číslom. Teda energia sa môže uvoľniť pri **jadrovom štiepení**, keď sa nuklid s veľkým hmotnostným číslom po zasiahnutí ostreľujúcou časticou rozštiepi na dve stredne ťažké jadrá. Pokles krivky väzbovej energie ε pre malé A zasa vypovedá o tom, že zlúčením dvoch nuklidov s malým hmotnostným číslom do stredne hmotného sa tiež uvoľní energia – ide o **jadrovú syntézu**, ktorá napr. prebieha vnútri Slnka a iných hviezd. Hodnoty energie jadra sú podobne ako energie atómu kvantované. Jadro sa môže nachádzať len v istých diskretných energetických stavoch, pri prechode jadra z vyššej na nižšiu energetickú hladinu je emitovaný foton v oblasti γ - žiarenia elektromagnetického spektra.

Príklad 3

Vypočítajte koľko energie je treba na oddelenie všetkých nukleónov tvoriacich jadro izotopu zlata ^{197}Au , hmotnosť neutrálneho atómu Au vyjadrená v atómových hmotnostných jednotkách je $m_a = 196,966543$ u. Vypočítajte väzbovú energiu pripadajúcu na jeden nukleón v tomto nuklide!

Riešenie:

Väzbovú energiu, teda energiu potrebnú na oddelenie všetkých nukleónov, vypočítame zo vzťahu:

$$\Delta E = \Delta m c^2 = [Zm_H + (A - Z)m_n - m_a] c^2,$$

kde hmotnosti atómu vodíka a neutrónu vyjadrené v atómových hmotnostných jednotkách sú:

$m_H = 1,007825$ u, $m_n = 1,008665$ u a pre nuklid Au je atómové číslo $Z = 79$, a počet neutrónov je: $N = A - Z = 197 - 79 = 118$. Po dosadení dostaneme:

$$\Delta E \cong [79 \cdot 1,007825 + 118 \cdot 1,008665 - 196,966543] \text{ u} \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{\text{u}} \cong 1559,4 \text{ MeV}.$$

Väzbová energia na jeden nukleón je:

$$\varepsilon = \frac{\Delta E}{A} \cong \frac{1559,4 \text{ MeV}}{197} \cong 7,91 \text{ MeV}.$$

1.4 Jadrové sily a modely jadier

Sila určujúca pohyb elektrónov v atóme je známa Coulombova sila, ktorá má jednoduchý tvar, pretože v atóme môžeme pri popise zaviesť nabitú jadro ako stredový bod. Situácia v popise jadrových síl je zložitejšia. Jadrá sú viazané príťažlivou silou medzi nukleónmi. Sila udržiavajúca jadro pokope musí mať iný ako elektromagnetický charakter – je nezávislá od elektrického náboja, musí byť väčšia ako odpudivá elektrická sila medzi protónmi, musí byť veľká aj z dôvodu udržania protónov a neutrónov v maličkom objeme a musí byť krátkodosahová – pôsobí len vnútri jadra. Ako sme uviedli v predošlej kapitole väzbové sily sú nasýtené – pôsobia len na obmedzený počet častíc. Predpokladá sa, že ide o sekundárny prejav **silnej sily**, ktorá viaže **kvarky** (► Príloha 6) do neutrónov a protónov.

Existujúce kvantovomechanické teórie štruktúry jadier sú zložité a presahujú rámec tohto učebného textu. Mnohé experimentálne pozorované vlastnosti jadier vysvetľujeme pomocou rôznych **modelov jadier**. V súčasnosti sa najviac používajú dva modely kvôli ich jednoduchosti a názornosti.

Kvapkový model jadra, podľa ktorého sa nukleóny pohybujú v jadre chaoticky a silne spolu interagujú. Nukleóny sú usporiadané tak, že vytvárajú najtesnejšie usporiadanie, pričom ide o analógiu molekúl v kvapke tekutiny a ich tepelný pohyb. Odtiaľ aj pochádza názov modelu – kvapkový model. Tento model dobre vyjadruje krátkodosahovosť jadrových síl, ako aj skutočnosť, že ako objem jadra, aj jeho celková väzbová energia, sú priamo úmerné počtu nukleónov v jadre. V tomto modeli sa predpokladá, že vznik jadra a jeho prípadná premena na iné jadro sú navzájom úplne nezávislé javy. Pomocou tohto modelu sa vysvetľuje napr. štiepenie jadier.

Druhý – **orbitálny model** – predpokladá, že každý nukleón v jadre sa nachádza v jednoznačne definovanom kvantovom stave (pomocou súboru kvantových čísel) a že len zriedkakedy dochádza k zrážkam nukleónov. Pre nukleóny platí podobne ako pre elektróny Pauliho vylučovací princíp, teda v jednom kvantovom stave sa nemôžu súčasne nachádzať dva nukleóny. Podľa tohto modelu sa dá dobre vysvetliť existencia magických čísel. Z analógie s elektrónovým obalom – najstabilnejšie sú jadrá s úplne obsadenými nukleárnymi orbitálmi. Pomocou tohto modelu môžeme popisovať základné a vzбудené stavy jadier, kvantovanie energií nukleónov v jadre.

Každý nukleón má okrem orbitálneho momentu aj vnútorný moment hybnosti – spin, orbitálny a spinový moment hybnosti sa vektorovo skladajú do celkového momentu hybnosti nukleónu. Celkový moment hybnosti jadra je potom vektorovým súčtom celkových momentov hybnosti nukleónov - tzv. *J.J* väzba. Spolu s vlastným mechanickým momentom majú jadrá aj vlastné magnetické momenty, zložené z magnetických momentov nukleónov. Jednotkou magnetického momentu jadier je jadrový magnetón: $\mu \cong 5,05 \cdot 10^{-27} \text{ A m}^2$. Experimentálnym dôkazom existencie magnetického momentu jadier je hyperjemná štruktúra atómových spektier, ktorá vzniká interakciou magnetického momentu atómového jadra s magnetickým poľom vytvoreným elektrónmi atómového obalu.

KONTROLNÉ OTÁZKY

1. Z akých základných častíc pozostáva atómové jadro?
2. Čo vyjadruje atómové číslo?
3. Čo sú to nukleóny?
4. Ako sa nazýva číslo, vyjadrujúce počet nukleónov v jadre?
5. Ako súvisí elektrický náboj jadra s atómovým číslom?
6. Čo vyjadruje názov nuklid a čo rádionuklid?
7. Čo sú to izotopy, izobary a izotóny?
8. Čo vyjadruje nuklidový diagram?
9. Koľko nukleónov, protónov a neutrónov obsahuje nuklid uhlíka ^{14}C ?
10. Od čoho závisí efektívny polomer nuklidu?
11. Ako je definovaná atómová hmotnostná jednotka?
12. Čo je to hmotnostný schodok?
13. Čo vyjadruje väzbová energia jadra?
14. Vymenujte magické čísla a vysvetlite s čím súvisia!
15. Čo viete o jadrových silách?
16. Aké modely jadra poznáte?



Návrat z acrobat readera -  (zatvorením okna)

2 JADROVÉ PREMENY A ICH KINETIKA

UČEBNÉ CIELE

Študent by mal vedieť definovať základné veličiny jadrovej fyziky, matematicky formulovať zákon premeny, zapísať schémy premeny jadier pri α - premene, β - premene, pri záchyte elektrónu. Po preštudovaní kapitoly by mal vedieť urobiť energetickú bilanciu týchto premien a určiť vek organických látok.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Rádioaktivita, energia premeny, aktivita, konštanta premeny, stredná doba života, doba polpremeny, zákon rádioaktívnej premeny, α - premena, β - premena, záchyt elektrónu, emisia γ - žiarenia.

2 1 Základné veličiny jadrovej fyziky

Rádioaktivita je jav, pri ktorom sa jadrá jedného prvku samovoľne menia na jadrá iného prvku emisiou napr. α -častíc, elektrónov alebo pozitronov. Vo väčšine prípadov je premena jadra sprevádzaná súčasnou emisiou γ - žiarenia - elektromagnetického žiarenia malej vlnovej dĺžky. Jadro sa pri tom stabilizuje - prechádza do stavu s minimálnou energiou. Z historického pohľadu delíme rádioaktivitu na **prirodzenú (prírodnú)** a **umelú**. Výskumy spontánnej premeny jadier atómov zhrnula Mária **Curie** (►Príloha 7) r. 1910 v „Štúdiu o rádioaktivite“ na základe experimentov s jáchymovským smolincom. Spolu s manželom Pierrom Curie zistili, že táto uránová ruda obsahuje „neznámy“ prvok rádium, ktorý sa samovoľne premieňa na ďalšie prvky a táto premena je sprevádzaná „rádioaktívnym žiarením“, ktoré sa prejavuje fluorescenčnými, ionizačnými, chemickými a biologickými účinkami. Tento jav, pozorovaný u izotopov existujúcich v prírode ($Z > 82$), sa označuje ako prirodzená rádioaktivita. V r. 1934 Irena a Joliot Curie pozorovali podobnú premenu pri umelo vytvorených, bežne v prírode sa nevyskytujúcich nestabilných izotopoch. Stabilné jadrá ostreľovali α -časticami alebo neutrónmi a tým vytvorili prebytok buď protónov alebo neutrónov v jadre. Takto vzniknuté nestabilné jadrá sa ďalej samovoľne premieňajú - tento jav bol nazvaný umelá rádioaktivita. Podľa súčasných poznatkov neexistuje zásadný rozdiel medzi prirodzenou a umelou rádioaktivitou, pretože vlastnosti izotopov nezávisia od spôsobu, akým izotop vznikol.

Rádioaktívne procesy sú náhodné procesy a riadia sa štatistickými zákonmi. Preto na popis rádioaktívnej premeny potrebujeme zaviesť aj niektoré štatistické veličiny.

Energia premeny je energia emitovaných častíc pri jadrovej premene.

Aktivita A je podiel stredného počtu dN rádioaktívnych premien z daného energetického stavu v určitom množstve rádionuklidu za časový interval dt a tohto intervalu:

$$A = -\frac{dN}{dt}, \quad \text{Bq} \quad (10)$$

aktivita predstavuje rýchlosť rádioaktívnej premeny nuklidu. Súčasne aktivita A odpovedá počtu jadier, ktoré sa premieňajú za jednu sekundu. Jednotkou aktivity je **becquerel** [Bq], pričom platí $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$. Ak má rádioaktívna látka aktivitu 1 Bq, dochádza v nej v priemere k jednej premene za sekundu. Aktivita je charakteristikou látky, žiariča ako celku, a nie jednotlivého atómového jadra.

Hmotnostná aktivita a_m je podiel aktivity a celkovej hmotnosti rádioaktívnej látky, resp. pri nerovnomernom rozložení rádionuklidu v látke:

$$a_m = \frac{dA}{dm}, \quad [\text{Bq kg}^{-1}]. \quad (11)$$

Objemová aktivita a_v je podiel aktivity a celkového objemu rádioaktívnej látky, resp. pri nerovnomernom rozložení rádionuklidu v látke:

$$a_v = \frac{dA}{dV}, \quad [\text{Bq m}^{-3}]. \quad (12)$$

Konštanta premeny λ vyjadruje pravdepodobnosť premeny rádioaktívnej látky v malom časovom intervale, delená týmto intervalom. Konštanta premeny λ je charakteristickou vlastnosťou príslušnej látky a nemôžeme ju zmenou fyzikálnych podmienok (napr. zmenou tlaku, teploty) zmeniť. Konštanta premeny λ predstavuje pravdepodobnosť premeny za jednotku času:

$$\lambda = \frac{dP}{dt}, \quad [\text{s}^{-1}]. \quad (13)$$

Stredná doba života τ je čas, za ktorý sa pôvodný počet rádioaktívnych jadier N_0 zníži na hodnotu N_0/e (e - základ prirodzených logaritmov). Medzi strednou dobou života a konštantou premeny platí:

$$\tau = \frac{1}{\lambda}, \quad \text{s} . \quad (14)$$

Doba polpremeny $T_{1/2}$ je priemerný časový interval potrebný na premenu polovice počiatočného množstva atómových jadier rádioaktívneho izotopu.

2.2 Zákonitosti rádioaktívnej premeny

Počet jadier dN , ktoré sa v priebehu času dt premienia závisí od počtu ešte nepremenených jadier N v čase t , od časového intervalu dt a od pravdepodobnosti premeny λ :

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

Po separovaní premenných a integrovaní:

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = - \int_0^t \lambda dt \quad \Rightarrow \quad \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t ,$$

dostaneme **zákon rádioaktívnej premeny**, udávajúci závislosť počtu ešte nepremenených rádioaktívnych jadier po uplynutí času t v tvare:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} , \quad (15)$$

kde N_0 je počiatočný počet rádioaktívnych jadier nestabilného izotopu v čase $t = 0$ s. Tento zákon premeny má štatistický charakter a preto platí presne len pre veľký počet jadier N_0 . Ak vezmeme do úvahy definíciu doby polpremeny $T_{1/2}$, môžeme zákon (15) ďalej upravovať, pre čas $t = T_{1/2}$ bude platiť:

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

odkiaľ dostávame súvis medzi dobou polpremeny a konštantou premeny:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{T_{1/2}} . \quad (16)$$

Zákon rádioaktívnej premeny $N(t)$ môžeme potom písať v tvare:

$$N = N_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t} \quad (17)$$

Strednú dobu života rádioaktívneho prvku môžeme vypočítať ako strednú hodnotu výrazu:

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} N_0 e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (18)$$

Výpočtom integrálu sme dostali súvis medzi strednou dobou života a konštantou premeny (vzťah (14)). Keď dosadíme za konštantu premeny vzťah (16), dostaneme vzájomnú reláciu medzi strednou dobou života τ a dobou polpremeny v tvare:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} = 1,443 T_{1/2} \quad (19)$$

Vyjadriť ešte zo zákona rádioaktívnej premeny (15) počet ešte nepremených jadier po uplynutí strednej doby života rádioaktívneho prvku:

$$N(\tau) = N_0 e^{-\lambda \tau} = N_0 e^{-1} = \frac{N_0}{e} \approx 0,37 N_0 \quad (20)$$

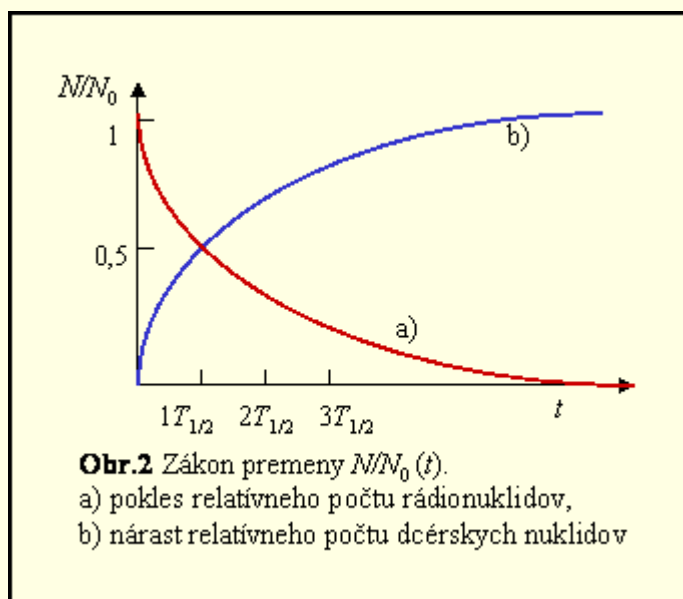
Z rovnice (20) dostávame už zmienenú definíciu strednej doby života rádioaktívneho prvku ako doby, za ktorú klesne pôvodný počet nuklidov na hodnotu N_0/e , čo je približne na 37%.

Na obr.2 je znázornený pokles relatívneho počtu rádionuklidu (krivka a) a súčasne nárast relatívneho počtu dcérskeho nuklidu (krivka b), vznikajúceho rádioaktívnou premenou pôvodného rádionuklidu.

Pre aktivitu, rýchlosť premeny v ľubovoľnom čase t , dostaneme:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N = A_0 e^{-\lambda t} \quad (21)$$

kde A_0 je aktivita, teda rýchlosť premeny, v čase $t = 0$ s.



Niektoré rádioaktívne nuklidy prechádzajú jadrovou premenou na stabilný nuklid. V mnohých prípadoch však vzniknutý nuklid je opäť rádioaktívny a dochádza k ďalšej premene.

Označme si pôvodný rádioaktívny prvok – tzv. **materský prvok**, charakterizovaný konštantou premeny λ_1 , symbolom X_1 . Nech máme v čase $t = 0$ s pôvodný počet nuklidov tohto prvku N_{10} . Pre jeho rádioaktívnu premenu platí zákon (15) v tvare: $N_1 = N_{10} e^{-\lambda_1 t}$. Deriváciou podľa

času dostaneme pre časovú zmenu tohto počtu nuklidov upravený vzťah (21): $\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1$. Tento

výraz nám charakterizuje rýchlosť úbytku materských nuklidov. V dôsledku tejto premeny však narastá počet nuklidov N_2 **dcérskeho prvku** X_2 , ktorý je opäť rádioaktívny s konštantou premeny λ_2 . Časovú závislosť zmeny počtu rádioaktívnych nuklidov dcérskeho prvku X_2 vyjadruje vzťah:

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2. \quad (22)$$

Prvý člen pravej strany rovnice charakterizuje rýchlosť vzniku dcérskeho prvku, pričom sa musí rovnať rýchlosti úbytku materských nuklidov. Druhý člen predstavuje rýchlosť úbytku dcérskeho prvku v dôsledku vlastnej rádioaktívnej premeny dcérskeho prvku. Počet dcérskeho prvku N_2 narastá dovtedy, dokiaľ platí nerovnosť: $\lambda_1 N_1 > \lambda_2 N_2$. V prípade, keď bude platiť podmienka:

$$\frac{dN_2}{dt} = 0, \Rightarrow \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 = 0 \quad (23)$$

nastáva **rádioaktívna rovnováha** medzi materskými a dcérskeho prvku nuklidmi. Za tejto podmienky sa premieňa práve toľko nuklidov dcérskeho prvku, koľko ich vzniká v rovnakom čase z materskeho prvku.

Pri rádioaktívnej rovnováhe je pomer medzi počtom dcérskeho a materskeho nuklidov konštantný, nezávislý od času:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \text{konšt.} \quad (24)$$

Tento vzťah môžeme zovšeobecniť aj pre ďalší proces premeny dcérskeho prvku, až pokiaľ nevznikne stabilný nuklid:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \dots = \text{konšt.} \quad (25)$$

Príklad 4

Rádioaktívny jód ^{128}I sa používa v medicíne pri vyšetreniach štítnej žľazy. Pri meraniach rýchlosti premeny tohto rádionuklidu sme namerali aktivitu $A_1 = 390 \text{ Bq}$ po 4 minútach od jeho aplikácie a aktivitu $A_2 = 27 \text{ Bq}$ po 100 minútach. Aká je počiatočná aktivita, konštanta premeny, doba polpremeny a stredná doba života tohto rádionuklidu?

Riešenie:

Pre aktivitu platí vzťah (21), v našom prípade pre aktivitu A_1 v čase t_1 a aktivitu A_2 v čase t_2 môžeme písať:

$$A_1 = A_0 e^{-\lambda t_1}, \quad A_2 = A_0 e^{-\lambda t_2}.$$

Predelením týchto rovníc dostaneme:

$$\frac{A_1}{A_2} = e^{\lambda(t_2 - t_1)}.$$

Po logaritmovaní rovnice a úprave dostaneme konštantu premeny:

$$\lambda = \frac{\ln \frac{A_1}{A_2}}{t_2 - t_1} = \frac{\ln \frac{390}{27}}{96 \cdot 60} = 4,6 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}.$$

Stredná doba života tohto rádionuklidu je:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = 36 \text{ min.}$$

Doba polpremeny:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = 25 \text{ min.}$$

Počiatočnú aktivitu môžeme vyjadriť z pôvodnej rovnice:

$$A_0 = A_1 e^{\lambda t_1} = A_2 e^{\lambda t_2} = 436 \text{ Bq.}$$

Príklad 5

Za aký čas klesne aktivita rádioaktívneho ^{24}Na na jednu desatinu počiatočnej hodnoty, ak doba polpremeny sodíka je $T_{1/2} = 15,0 \text{ h}$?

Riešenie:

Aktivita v čase t je A a keďže $A = 0,1 A_0$, dostaneme:

$$0,1 A_0 = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t}$$

Odtiaľ vyjadríme čas:

$$t = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \ln 10 = 49,8 \text{ h.}$$

Príklad 6

Vypočítajte počet nuklidov, ktoré sa premienia za sekundu, ak žiaričom je 1 gram čistého rádioaktívneho kobaltu ^{60}Co , ktorého doba polpremeny je $T_{1/2} = 5,3$ rokov?

Riešenie:

Počet nuklidov, ktoré sa premienia za sekundu udáva aktivita žiariča. Súvis medzi aktivitou a celkovým počtom nuklidov vyjadruje vzťah (21) v tvare:

$$A = \lambda N,$$

kde konštanta premeny súvisí s dobou polpremeny:

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

a počet nuklidov N je rovný počtu atómov v množstve látky hmotnosti $m = 0,001 \text{ kg}$, ktorej molárna hmotnosť je M :

$$N = \frac{m}{M} N_A,$$

kde N_A je Avogadrova konštanta. Potom:

$$A = \lambda N = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} N = \frac{m N_A}{M T_{1/2}} \ln 2 = 4,2 \cdot 10^{13} \text{ Bq.}$$

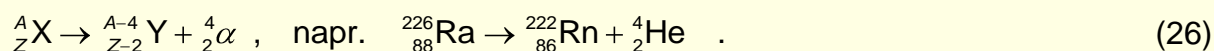
Počet nuklidov, ktoré sa premienia za sekundu je $4,2 \cdot 10^{13}$.

Pri jadrovej premene sa zmení nuklid prvku X na nuklid iného prvku Y. Pre jadrové premeny platia zákony zachovania elektrického náboja a počtu nukleónov, z ktorých vychádza Soddyho-Fajansovo posuvné pravidlo. Použitím tohto pravidla vieme dopredu povedať pre tú ktorú rádioaktívnu premenu, aký nuklid vznikne, a aké bude mať daný prvok chemické vlastnosti.

Soddyho-Fajansove posuvné pravidlá pre jednotlivé druhy rádioaktívnych premien majú nasledovný tvar:

α - premena

Pri tejto samovoľnej premene jadra sa emituje α -častica, t.j. jadro hélia, dcérsky nuklid má atómové číslo o 2 jednotky a hmotnostné číslo o 4 jednotky menšie ako materský nuklid:

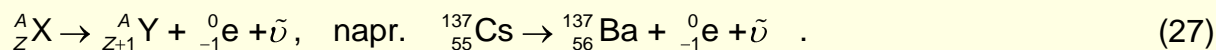


β - premena

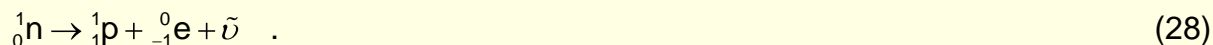
β - premena je najrozšírenejší proces jadrovej premeny. Pojem β - premena zahŕňa tri možné druhy premeny, pričom pri každej z nich sa mení elektrický náboj jadra a teda atómové

číslo Z o jednotku. Hmotnostné číslo A sa nemení (je rovnaké pre materské aj dcérske jadro). Ide tu o elektrónovú β^- - premenu, pozitronovú β^+ - premenu a K – záchyt elektrónu.

Symbolický zápis β^- - premeny má tvar:

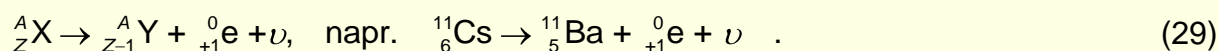


Pri β^- - premene sa z jadra emitujú elektróny (ktoré nie sú súčasťou jadra!) vznikajúce vo vnútri jadra tým, že sa premieňa neutrón na protón podľa rovnice:

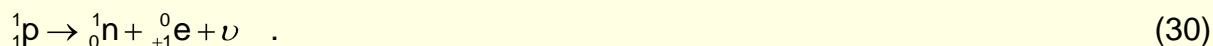


Pri β^- - premene vznikne z pôvodného prvku jeho izobar, posunutý v Mendelejevovej tabuľke vzhľadom na pôvodný prvok o jedno miesto doprava.

β^+ - premenu môžeme vyjadriť:



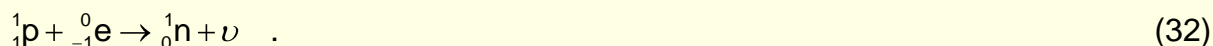
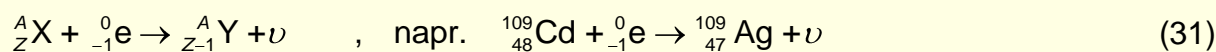
Pri pozitronovej β^+ - premene nastáva emitovanie pozitronu (pozitron je antičastica k elektrónu, má rovnakú hmotnosť, ale kladný náboj), ktorý vzniká v jadre v dôsledku premeny protónu na neutrón podľa vzťahu:



Symbole $\bar{\nu}$ a ν v rovniciach (27) až (30) sú elektrónové antineutrino a neutrino – subnukleárne častice s takmer nulovou hmotnosťou, odnášajúce časť energie, uvoľnenej pri premene jadra.

Premene β^- podlieha aj voľný neutrón, zatiaľ čo premene β^+ len protón viazaný v jadre.

Záchyt orbitálneho elektrónu nastáva, keď jadro obsahuje o jeden protón viac ako pripúšťa jeho stabilita, vtedy zachytí jeden orbitálny elektrón. Najčastejšie ide o K -záchyt (z K – orbitálu), pretože pravdepodobnosť záchytu elektrónu je úmerná pravdepodobnosti, s ktorou sa nachádza elektrón v blízkosti jadra. Protón v jadre sa premení na neutrón a uvoľní sa neutrino, uvoľnené miesto elektrónu sa zaplní elektrónom z vyššej hladiny a prebytok energie sa vyžiarí vo forme fotónu. Schéma orbitálneho záchytu:



Na základe týchto pravidiel môžeme zoskupiť rádioaktívne izotopy do tzv. **rádioaktívnych premenových radov**. Ide o rad prvkov, ktorý vzniká postupne premenou základného prvku. Každý rádioaktívny rad začína dlhožijúcim izotopom najťažšieho prvku radu – materským rádioaktívnym izotopom, potom nasledujú dcérske produkty a rad končí stabilným izotopom najľahšieho z nich (ide o izotopy olova, resp. bizmutu). Sú možné **4 rady**: uránový ${}^{238}\text{U}$, tóriový ${}^{232}\text{Th}$, aktíniový ${}^{235}\text{U}$ a neptúniový ${}^{241}\text{Pu}$ (►Príloha 8). Podrobnejšia schéma **uránového** (►Príloha 9) premenového radu je znázornená aj s dobami polpremeny.

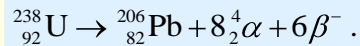
Charakteristická vlastnosť spomenutých premenových radov je, že hmotnostné čísla všetkých členov daného radu sa dajú vyjadriť matematickým vzťahom. Hmotnostné čísla všetkých členov uránového radu udáva vzťah $A = (4n+2)$, kde n je celé číslo. Pre tóriový rad platí $A = 4n$, pre aktíniový rad $A = (4n+3)$ a pre neptúniový rad $A = (4n+1)$.

Príklad 7

Koľko častíc alfa a beta sa emituje pri úplnej premene $2 \cdot 10^{-5} \mu\text{g}$ ^{238}U na stabilné ^{206}Pb ?

Riešenie:

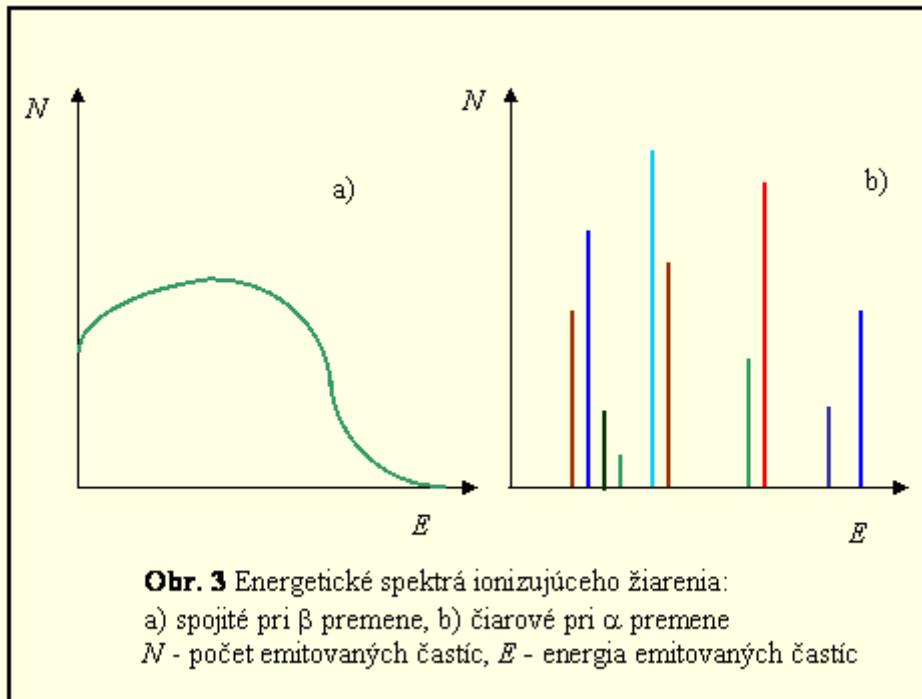
Na základe zákonov zachovania náboja a počtu nukleónov platí sumárna schéma premeny:



Vypočítame počet atómov v danej vzorke:

$$N = \frac{m}{M} N_A = \frac{2 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{-9} \text{kg}}{238 \text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}} 6,022 \cdot 10^{26} \text{kmol}^{-1} = 5,05 \cdot 10^{10}.$$

Počet emitovaných častíc α je $n_\alpha = 8N = 4,04 \cdot 10^{11}$ a počet emitovaných častíc β je $n_\beta = 6N = 3,03 \cdot 10^{11}$.



2.3 Energetická schéma rádioaktívnej premeny

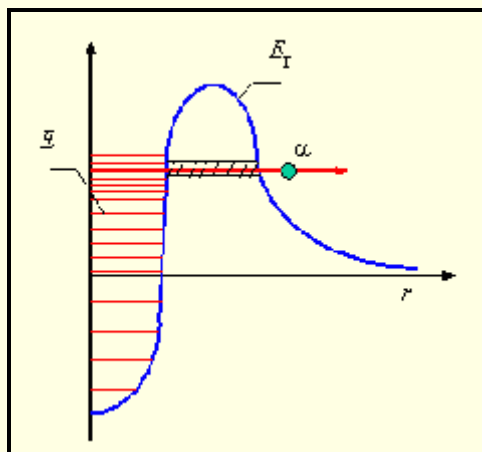
Jadro X prechádza pri rádioaktívnej premene zo základného energetického stavu s hladinou energie E_0 na všeobecne vzbudenú energetickú hladinu E_1^* , prípadne do základného stavu nového jadra Y, pričom sa uvoľní **energia premeny**:

$$\Delta E = E_0 - E_1^*. \quad (33)$$

Pre energiu α - premeny platí:

$$\Delta E = E_0 - E_1^* = m_{\alpha 0} c^2 + E_{\alpha k} \quad (34)$$

kde 1. člen predstavuje pokojovú energiu α - častice, 2. člen je jej kinetická energia. Pri alfa premene sa neuvolňuje ďalšia častica, kinetická energia α - častice môže mať len diskkrétne hodnoty, preto energetické **spektrum α - premeny je čiarové** (obr. 3 b). Kinetická energia α - častíc je prevažne z intervalu $\in(4; 9)$ MeV. Prechod α - častice potenciálovou bariérou jadra (obr. 4) sa vysvetľuje tunelovým javom (ide o kvantovomechanický jav). Pri interakcii α - častice s prostredím nastáva ionizácia vyrazením elektrónu z obalu atómu prostredia. Pretože hustota ionizácie je veľká a na jeden iónový pár sa spotrebuje niekoľko eV, (resp. niekoľko desiatok eV) je dolet α - častíc malý, v plynch rádovo cm, v kondenzovaných látkach zlomky mm. Tienenie dosiahneme už tenkým papierom.



Obr.4.

Únik α častice cez potenciálový val jadra tunelovým efektom

Energia častice β závisí nielen od energie vyplývajúcej z hmotnostného schodku reakcie, ale je ovplyvnená (zmenšená) aj emisiou neutróna, resp. antineutróna z výsledného jadra. Preto energetické spektrum emitovaných častíc β je spojité. Môže nadobúdať všetky hodnoty energie v intervale od 0 do maximálnej energie rovnej Δmc^2 (Δm je zo vzťahu (6)).

Pre energiu β^- - premeny teda platí:

$$\Delta E = E_0 - E_1^* = m_{e0} c^2 + E_{ek} + E_{\bar{\nu}k} \geq m_{e0} c^2 \quad , \quad (35)$$

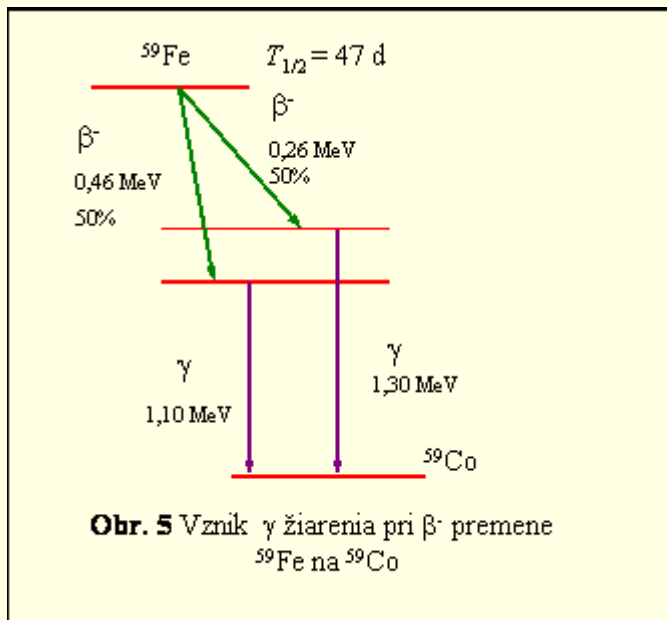
kde 1. člen predstavuje pokojovú energiu elektrónu, 2. a 3. člen sú kinetické energie elektrónu a antineutróna. Kinetické energie si elektrón a antineutróno rozdeľujú náhodne, preto energetické **spektrum β^- - premeny je spojité** (obr. 3 a). Kinetická energia elektrónu je ovplyvnená aj smerom jeho emisie a emisie antineutróna z výsledného jadra, preto môže nadobúdať všetky hodnoty energie v intervale od 0 až po určitú maximálnu, pre daný nuklid charakteristickú energiu. Emitované elektróny môžu mať energiu desiatky keV až jednotky MeV. Nuklid ^{12}N emituje elektróny s maximálnou energiou až 16,6 MeV. Dolet, teda dráha, na ktorej stratí emitovaná častica všetku svoju energiu, je napr. pre beta žiarenie s maximálnou energiou 2 MeV vo vzduchu okolo 8 cm, vo vode 1 cm a v hliníku 4 mm. Ako tieniace materiály sa používajú materiály s nízkym atómovým číslom Z .

Žiarenie γ

je sprievodným znakom obidvoch premien, keďže nové jadro je väčšinou vo vzbuđenom energetickom stave, pri prechode do nižšieho energetického stavu, ako aj pri prechode do základného stavu, sa dcérske jadrá dostávajú vyžiarovaním **fotónu elektromagnetického žiarenia**:

$$E_1^* - E_0^* = hf = h \frac{c}{\lambda} \quad . \quad (36)$$

kde h je Planckova konštanta, c – rýchlosť svetla vo vákuu a λ a f – sú vlnová dĺžka a frekvencia elektromagnetického žiarenia (fotónu).



Energetický interval emitovaných γ -kvánt je veľmi široký, od niekoľkých desiatok keV po niekoľko MeV. Mnohokrát vzniká kvantum veľmi prenikavého žiarenia γ s malou vlnovou dĺžkou λ ($10^{-11} - 10^{-13}$ m). Do základného stavu sa dcérske jadrá môžu dostať aj vyžiarením viacerých γ -kvánt príslušných energií. Meraním energetického spektra takéhoto žiarenia γ sa získavajú cenné informácie o energetických hladinách a štruktúre jadier, ktoré ho vysielajú.

Na obr. 5 je ilustrovaný vznik γ kvánt dvoch rôznych energií žiarenia ako sprievodný jav pri β^- - premene izotopu železa na izotop kobaltu.

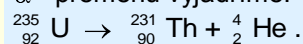
Gama žiarenie má čiarové spektrum, pretože daný nuklid emituje len fotóny s určitými energiami, ktoré sú pre jeho premenu charakteristické. Interakcia gama žiarenia s hmotou sa podstatne odlišuje od interakcie elektricky nabitých častíc a dolet je oveľa väčší – vo vzduchu rádovo kilometre, v olove niekoľko centimetrov v závislosti od energie. Interakcia gama žiarenia s prostredím prebieha tromi možnými spôsobmi: fotoefektom, Comptonovým rozptylom a tvorbou párov častica - antičastica (najčastejšie párov elektrón-pozitrón).

Príklad 8

Aká je energia α - premeny rádionuklidu ^{235}U ? Atómové hmotnosti sú: $m_{\text{U}} = 235,0439$ u, $m_{\text{Th}} = 231,0363$ u, $m_{\text{He}} = 4,0026$ u.

Riešenie:

α - premenu vyjadríme:



Súčet hmotností atómov, ktoré vzniknú premenu je menší ako hmotnosť atómu uránu, platí:

$$\Delta m = m_{\text{U}} - (m_{\text{Th}} + m_{\text{He}}) = (m_{\text{U}} + 92m_e) - (m_{\text{Th}} + 90m_e + m_{\text{He}} + 2m_e) = m_{\text{U}} - (m_{\text{Th}} + m_{\text{He}}),$$

kde m_{U} , m_{Th} , m_{He} sú hmotnosti jadier. Ako vidieť keď zahrnieme aj hmotnosti elektrónov, tieto sa vyrušia a rozdiel hmotností jadier je rovnaký ako rozdiel hmotností atómov.

Energia α - premeny bude:

$$\Delta E = \Delta mc^2 = 235,0439 - (231,0363 + 4,0026) \text{ u} \cdot \frac{931,5 \text{ MeV}}{\text{u}} = 4,65 \text{ MeV}.$$

Táto energia sa prejaví ako kinetická energia vyletujúcej α - častice a odrazeného atómu Th.

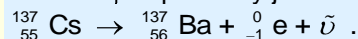
Príklad 9

Izotop cézia ^{137}Cs sa premieňa β^- - premenou na izotop bária Ba a uvoľňuje sa veľké množstvo energie. Napíšte schému premeny a vypočítajte celkové množstvo uvoľnenej energie pri tejto premene. Aká je maximálna kinetická energia emitovaného elektrónu? Atómové hmotnosti sú:

$$m_{\text{Cs}} = 136,9071 \text{ u}, m_{\text{Ba}} = 136,9058 \text{ u}.$$

Riešenie:

Schéma β^- - premeny je:



Rozdiel hmotností vstupného nuklidu a hmotností produktov premeny je:

$$\Delta m = m_{\text{Cs}} - (m_{\text{Ba}} + m_{\text{e}}) = (m_{\text{Cs}} + 55 m_{\text{e}}) - (m_{\text{Ba}} + 56 m_{\text{e}}) = m_{\text{Cs}} - m_{\text{Ba}},$$

kde m_{Cs} , m_{Ba} sú hmotnosti jadier odpovedajúcich izotopov. V rovnici sme pripočítali (a odpočítali) hmotnosť 55 elektrónov a dostali sme tak rozdiel atómových hmotností týchto izotopov.

Energetický ekvivalent tohto hmotnostného rozdielu je:

$$\Delta E = \Delta m c^2 = (m_{\text{Cs}} - m_{\text{Ba}}) c^2 = (136,9071 - 136,9058) \text{ u} \cdot \frac{931,5 \text{ MeV}}{\text{u}} = 1,21 \text{ MeV}.$$

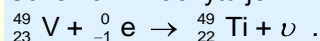
Táto energia premeny sa uvoľní a rozdeľuje sa medzi elektrón a antineutríno. Ak antineutríno neodnáša žiadnu energiu, potom táto uvoľnená energia pri premene je maximálnou kinetickou energiou emitovaného elektrónu: $E_{\text{ekmax}} = 1,21 \text{ MeV}$.

Príklad 10

Napíšte schému pre záchyt K – elektrónu vanádu ^{49}V a vypočítajte energiu E , uvoľnenú pri tejto premene. Atómové hmotnosti sú: $m_{\text{V}} = 48,94852 \text{ u}$, $m_{\text{Ti}} = 48,94787 \text{ u}$, väzbová energia K-elektrónu je $E_{\text{K}} = 5,47 \text{ keV}$.

Riešenie:

Schéma K- záchytu je:



Pre rozdiel hmotností pred a po záchyte platí:

$$\Delta m = (m_{\text{V}} + m_{\text{e}}) - m_{\text{Ti}} = (m_{\text{V}} + 23 m_{\text{e}}) - (m_{\text{Ti}} + 22 m_{\text{e}}) = m_{\text{V}} - m_{\text{Ti}},$$

kde m_{V} , m_{Ti} sú hmotnosti jadier odpovedajúcich izotopov. Rovnicu sme opäť upravili (pričítaním a odčítaním hmotností 22 elektrónov) tak, aby sme mohli použiť známe atómové hmotnosti týchto izotopov namiesto hmotností jadier. Energia, odpovedajúca tomuto hmotnostnému rozdielu:

$$\Delta E = \Delta m c^2 = (m_{\text{V}} - m_{\text{Ti}}) c^2$$

sa spotrebuje jednak na uvoľnenie K - elektrónu a jednak sa jej časť E uvoľní pri reakcii:

$$\begin{aligned} \Delta E = E + E_{\text{K}} &\Rightarrow E = \Delta m c^2 - E_{\text{K}} = (m_{\text{V}} - m_{\text{Ti}}) c^2 - E_{\text{K}} = \\ &= (48,94852 - 48,94787) \text{ u} \cdot \frac{931,5 \cdot 10^3 \text{ keV}}{\text{u}} - 5,47 \text{ keV} = 600 \text{ keV}. \end{aligned}$$

Príklad 11

Stanovte množstvo tepla, ktoré sa uvoľní z 0,001 mg izotopu polónia ^{210}Po za dobu, ktorá sa rovná strednej dobe života tohto izotopu, ak energia častíc α , ktoré sa uvoľňujú pri premene je $E_{\alpha} = 5,3 \text{ MeV}$.

Predpokladajte, že všetky emitované α častice sa v látke absorbujú a ich energia sa premení na tepelnú energiu látky.

Riešenie:

Počet premien za strednú dobu života $\tau = 1/\lambda$ sa vypočíta tak, že sa vyjadrí počet jadier N , ktoré sa v čase $t = \tau$ ešte nepremenili:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-\frac{\lambda}{\lambda}} = N_0 e^{-1}$$

a potom počet premien N_{τ} za čas τ bude:

$$N_{\tau} = N_0 - N = N_0 (1 - e^{-1}).$$

Vo vzorke polónia hmotnosti m je N_0 jadier

$$N_0 = \frac{m}{M} N_{\text{A}}$$

a množstvo tepla Q , ktoré uvoľní preparát je $Q = E_{\alpha\text{celk}}$:

$$Q = N_{\tau} E_{\alpha} = \frac{m}{M} N_{\text{A}} \left(1 - \frac{1}{e}\right) E_{\alpha}$$

Po dosadení číselných hodnôt bude uvoľnené teplo $Q = 1,54 \cdot 10^3 \text{ J}$.

2.4 Rádioaktívne datovanie

Rádioaktívna premena nuklidu s veľmi dlhou dobou polpremeny môže byť využitá pri určovaní veku hornín, teda doby, ktorá uplynula od jej vzniku, ako aj určenia doby, v ktorej nejaký živočích žil, resp. rastlina rástla.

Rádionuklid ^{40}K sa premieňa na stabilný izotop vzácneho plynu argónu ^{40}Ar s dobou polpremeny $1,25 \cdot 10^9$ r. Meraním pomeru ^{40}K a ^{40}Ar v skúmanej hornine môžeme vypočítať jej vek. Maximálna hodnota veku hornín, či už zo Zeme, Mesiaca, či meteoritov je $\sim 4,5 \cdot 10^9$ r.

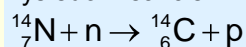
Rádiouhlíkové datovanie pomocou rádionuklidu ^{14}C sa používa na určovanie veku organických látok, meraním jeho obsahu v danej látke sa dá zistiť čas, ktorý uplynul od smrti organizmu. Rádionuklid ^{14}C ($T_{1/2} = 5730$ r) vzniká v atmosfére pri ostreľovaní atmosférického dusíka kozmickým žiarením, mieša sa s atmosférickým dusíkom tak, že sa vyskytuje približne 1 atóm ^{14}C na každých 10^{13} atómov stabilného ^{12}C . Pri dýchaní a ďalších biologických procesoch dochádza k náhodnej výmene atómov atmosférického uhlíka s atómami uhlíka v živom organizme a za istý čas sa dosiahne rovnováha tak, že každý žijúci organizmus obsahuje aj rádioaktívny ^{14}C . Po smrti organizmu sa výmena s atmosférou zastaví a rádionuklid ^{14}C sa z organizmu „vytráca“ s dobou polpremeny $T_{1/2} = 5730$ r. Z porušenia rovnováhy pomeru ^{14}C a ^{12}C môžeme teda určiť čas, ktorý uplynul od smrti organizmu.

Príklad 12

Pri archeologických vykopávkach starých hrobov sa našli zvyšky ľanovej tkaniny s hmotnosťou 20 g. Po zmeraní hmotnostnej aktivity ^{14}C tejto vzorky sa zistilo, že odpovedá 1/3 hmotnostnej aktivity zrovnateľnej súčasnej tkaniny. Určte vek tkaniny z vykopávky!

Riešenie:

Uhlík ^{14}C vzniká nepretržite v ovzduší z atmosférického dusíka pôsobením neutrónov kozmického žiarenia ako výsledok reakcie:



a vo forme $^{14}\text{CO}_2$ je stálou zložkou ovzdušia. Živé organizmy vždy obsahujú a obsahovali konštantné množstvo rádioaktívneho uhlíka. Keď živý organizmus odumrie, rovnováha sa poruší a organizmus už neprijíma ďalej rádioaktívny uhlík. Rádioaktívny uhlík sa neustále premieňa s dobou polpremeny $T_{1/2}$, vykopávky preto obsahujú menej ^{14}C ako žijúce organizmy. Keď sa označí hmotnostná aktivita súčasnej tkaniny ako a_0 , potom aktivita v čase t bude:

$$a = \frac{a_0}{3} = a_0 e^{-\lambda t} = a_0 e^{-\frac{0,693}{T_{1/2}} t} \Rightarrow \frac{1}{3} = e^{-\frac{0,693}{T_{1/2}} t}$$

Logaritmovaním dostaneme:

$$-1,098 = \frac{-0,693}{T_{1/2}} t$$

Keď sa vyjadrí čas t a dosadí sa doba polpremeny ^{14}C , dostaneme:

$$t = \frac{1,098}{0,693} 5730 = 9082 \text{ rokov.}$$

KONTROLNÉ OTÁZKY

17. Ktorému javu hovoríme prirodzená rádioaktivita a ktorému umelá rádioaktivita?
18. Čomu sa rovná energia premeny?
19. Ktorá veličina vyjadruje rýchlosť rádioaktívnej premeny nuklidu?
20. Kedy má látka aktivitu 1 Bq?
21. Ako sú definované hmotnostná a objemová aktivita a aké sú ich jednotky?
22. Čo vyjadruje konštanta premeny λ ?
23. Ako súvisí konštanta premeny so strednou dobou života rádionuklidu?

24. Čo je doba polpremeny?
25. Napíšte zákon premeny a vysvetlite, čo vyjadruje!
26. Aký je súvis medzi konštantou premeny a dobou polpremeny?
27. Aký je symbolický zápis α - premeny?
28. Aký je symbolický zápis β^- - premeny?
29. Ako vzniká uvoľnený elektrón pri β^- - premene?
30. Aký je symbolický zápis β^+ - premeny?
31. Akou reakciou vzniká uvoľnený pozitron pri β^+ - premene?
32. Čo je to záchyt orbitálneho elektrónu?
33. Prečo je energetické spektrum β - premeny spojité?
34. Aké je energetické spektrum α - premeny?
35. Ktoré rádionuklidy sa využívajú pri rádioaktívnom datovaní?
36. Aký je dolet α - žiarenia a aká látka zabráni šíreniu tohto žiarenia?
37. Aký je dolet β - žiarenia a aká látka zabráni šíreniu tohto žiarenia?
38. Aký je dolet γ - žiarenia a aká látka zabráni šíreniu tohto žiarenia?
39. Napíšte krátkožijúce produkty premeny radónu, ak postupne nasledujú dve α premeny, dve β premeny a nakoniec jedna α premena. Aký je výsledný stabilný produkt týchto premien?

ÚLOHY

Jadro atómu zlata ostreľujeme najprv α - časticami, v druhom prípade protónmi. Nech počiatočná kinetická energia ako α - častice, tak protónu je rovnaká. Porovnajte vzdialenosť d_p , na ktorej sa vzhľadom na stred jadra zastaví protón so vzdialenosťou d_α , na ktorej sa zastaví α - častica – pri ich čelnej zrážke s jadrom Au. ($d_\alpha = 2 d_p$)

Experimentom sme zistili polomer jadra $R = 6 \cdot 10^{-15}$ m. Aké hmotnostné číslo má toto jadro? Ak ide o izotop telúru, koľko má tento nuklid neutrónov? Posúďte, či môže ísť o stabilný nuklid. ($A=125$, $N=73$)

Vypočítajte hustotu jadier a hustotu elektrického náboja jadier pre nuklidy: ^{64}Cu , ^{235}U !
 ($\rho_{\text{Cu}} = 1 \cdot 10^{25} \text{ C m}^{-3}$, $\rho_{\text{U}} = 8,7 \cdot 10^{24} \text{ C m}^{-3}$, $\rho_m = 2,3 \cdot 10^{17} \text{ kg m}^{-3}$)

Vypočítajte čas (tzv. *charakteristický jadrový čas*) potrebný nato, aby neutrón s energiou rádovo MeV prekonal vzdialenosť rovnú priemeru jadra. Číselne vyjadrite pri energii neutrónu 2 MeV a uvažujte nuklid ^{120}Sn ! ($t = 6 \cdot 10^{-22} \text{ s}$)

Medaila z čistej medi ^{63}Cu ($m_a = 62,9296 \text{ u}$) váži 5 g. Vypočítajte väzbovú energiu, teda energiu na uvoľnenie všetkých nukleónov! ($2,6 \cdot 10^{25} \text{ MeV}$)

Zistite, ktoré z nuklidov sú magické a ktoré sú dvojnásobne magické: ^1H , ^7Li , ^{84}Kr , ^{120}Sn , ^{122}Sn , ^{132}Sn , ^{98}Cd , ^{198}Au , ^{208}Pb , ^{239}Pu .

Doba polpremeny rádioaktívneho izotopu ^{24}Na je $T_{1/2} = 15 \text{ h}$. Ak žiarič obsahoval na začiatku $4 \cdot 10^{20}$ atómov tohto izotopu, koľko ostane nepremených jadier za 24 hodín? ($1,3 \cdot 10^{20}$)

Doba polpremeny rádionuklidu ^{210}Po je $T_{1/2} = 138,4 \text{ d}$. Za aký čas klesne rýchlosť premeny tohto nuklidu na tretinu pôvodnej hodnoty? (219,4 d)

Pri meraní rádioaktivity čistého ^{131}J boli pomocou GM detektora namerané nasledovné aktivity: na začiatku merania, t.j. v čase $t = 0$ s $A_1 = 24,5$ Bq a v čase $t = 30$ h bola nameraná aktivita $A_2 = 22$ Bq. Určte konštantu premeny a dobu polpremeny rádionuklidu ^{131}J !

Vypočítajte počiatočnú aktivitu 3 g vzorky rádioizotopu ^{67}Ga a jeho aktivitu po uplynutí 50 hodín, keď doba polpremeny tohto nuklidu je $T_{1/2} = 78$ h. ($6 \cdot 10^{16} \text{ s}^{-1}$, $2,67 \cdot 10^{16} \text{ s}^{-1}$)

Meraním aktivity 1 mg uránu ^{238}U sme zistili, že sa v tejto vzorke premení každú sekundu len 12 jadier. Vypočítajte dobu polpremeny, konštantu premeny a strednú dobu života izotopu uránu ^{238}U . ($4,6 \cdot 10^9$ r, $4,7 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}$, $6,6 \cdot 10^9$ r)

Pre rádionuklid fosforu ^{32}P s dobou polpremeny $T_{1/2} = 14,3$ d sme zistili meraním počiatočnú aktivitu 3500 Bq, ktorá klesla za istý čas na hodnotu 200 Bq. Aký čas uplynul medzi týmito meraniami? (59 d)

Pôvodne mala vzorka čistého izotopu ^{64}Cu ($T_{1/2} = 12,7$ h) hmotnosť 6 g. Vypočítajte koľko mg vzorky sa premení v priebehu 3 hodín, ak sa naše trojhodinové meranie začalo po uplynutí 10 hodín od naváženia vzorky. (526 mg)

Vypočítajte hmotnosť hélia, ktoré vznikne zo vzorky 10 g čistého ^{237}Pu po uplynutí 20000 rokov, keď doba polpremeny pri α - premene plutónia je 24 360 rokov. (Uvažujte len to množstvo hélia, ktoré vzniká priamo pri premene ^{237}Pu a nie pri následných premenách dcérskych produktov). (73,2 mg)

Izotop ^{40}K s dobou polpremeny $1,28 \cdot 10^9$ rokov mal počiatočnú rýchlosť premeny $1,7 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$. Aká bola hmotnosť vzorky? (16,5 g)

Rádionuklid ^{238}U sa α - premenou mení na nuklid ^{234}Th . Napíšte schému α - premeny a vypočítajte energiu α - premeny. Atómové hmotnosti sú: $m_{\text{U}} = 238,05079$ u, $m_{\text{Th}} = 234,04363$ u, $m_{\text{He}} = 4,00260$ u. (4,25 MeV)

Rádionuklid ^{11}C prechádza β^+ - premenou na nuklid ^{11}B . Vypočítajte energiu β^+ - premeny. Atómové hmotnosti sú: $m_{\text{C}} = 11,011434$ u, $m_{\text{B}} = 11,009305$ u, hmotnosť pozitronu $m_e = 0,0005486$ u. (0,96 MeV)

Určte vek starých drevených predmetov, ak hmotnostná aktivita izotopu ^{14}C v týchto predmetoch má hodnotu $3/5$ hmotnostnej aktivity v čerstvo zo'atých stromoch. (4223 r)

Vo vzorke horniny získanej pri hĺbkovom vrte sa analyzovali nasledovné množstvá izotopov: 0,86 g ^{238}U ($T_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9$ r), 0,15 mg ^{206}Pb a 1,6 mg ^{40}Ar . Koľko mg izotopu ^{40}K ($T_{1/2} = 1,26 \cdot 10^9$ r) bude hornina obsahovať? (1,7 mg)

SÚHRN

Atómové (tiež protónové) **číslo** Z - udáva celkový počet protónov v jadre.

Neutrónové číslo N - udáva celkový počet neutrónov v jadre.

Nukleóny - spoločný názov pre neutróny a protóny.

Hmotnostné (nukleónové) **číslo** A - vyjadruje celkový počet nukleónov v jadre $A = Z + N$.

Nuklid X (jadro)- symbolicky zapisujeme v tvare:

${}^A_Z X$.

Izotopy - nuklidy s rovnakým atómovým číslom Z , a rôznym hmotnostným číslom A , líšia sa počtom neutrónov.

Izobary sú nuklidy s rovnakým A a rôznym Z .

Izotóny sú nuklidy s rovnakým počtom neutrónov N a rôznym počtom protónov Z .

Efektívny polomer jadra -

$$R = R_0 A^{1/3}, \quad R_0 \cong 1,2 \text{ fm.}$$

Atómová hmotnostná jednotka - je rovná 1/12 pokojovej hmotnosti atómu izotopu ^{12}C ,
 $1 \text{ u} \cong 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

Hmotnosť jadier je menšia ako súčet hmotností voľných nukleónov, z ktorých je jadro zložené:

$$m = Zm_p + (A - Z)m_n - \Delta m,$$

m_p, m_n sú hmotnosti protónu a neutrónu, Δm je **hmotnostný schodok**.

Väzbová energia jadra ΔE je energia, potrebná na to, aby sme jadro rozložili na jednotlivé voľné nukleóny s nulovou kinetickou energiou. Pri vytvorení jadier spojením nukleónov sa táto energia uvoľní.

$$\Delta E = \Delta m c^2 = Zm_H + (A - Z)m_n - m_a c^2.$$

Magické čísla: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, 152 - jadrá, v ktorých počet protónov alebo neutrónov sa rovná magickému číslu, vykazujú výnimočnú stabilitu.

Modely jadier:

Kvapkový model jadra - nukleóny sa pohybujú chaoticky a silne spolu interagujú a sú v jadre usporiadané tak, že vytvárajú najtesnejšie usporiadanie.

Orbitálový model - predpokladá, že každý nukleón v jadre sa nachádza v jednoznačne definovanom kvantovom stave a že len zriedkakedy dochádza k zrážkam nukleónov.

Aktivita A - je rýchlosť rádioaktívnej premeny nuklidu. Aktivita A odpovedá počtu nuklidov, ktoré sa premienia za jednu sekundu. Jednotkou aktivity je *becquerel*, pričom platí $1 \text{ Bq} = \text{s}^{-1}$.

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

Hmotnostná aktivita a_m - je podiel aktivity a celkovej hmotnosti rádioaktívnej látky:

$$a_m = \frac{dA}{dm}, \quad [\text{Bq kg}^{-1}].$$

Objemová aktivita a_v - je podiel aktivity a celkového objemu rádioaktívnej látky:

$$a_v = \frac{dA}{dV}, \quad [\text{Bq m}^{-3}].$$

Konštanta premeny λ - predstavuje pravdepodobnosť premeny za jednotku času:

$$\lambda = \frac{dP}{dt}, \quad [\text{s}^{-1}].$$

Stredná doba života τ je čas, za ktorý sa pôvodný počet rádioaktívnych jadier N_0 zníži na hodnotu N_0 / e (e - základ prirodzených logaritmov). Medzi strednou dobou života a konštantou premeny platí:

$$\tau = \frac{1}{\lambda}, \quad \text{s}.$$

Doba polpremeny $T_{1/2}$ je priemerný časový interval potrebný na premenu polovice počiatočného množstva atómových jadier rádioaktívneho izotopu.

Zákon premeny - udáva závislosť počtu ešte nepremených rádionuklidov po uplynutí času t v tvare:

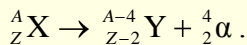
$$N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t}.$$

kde N_0 je počiatočný počet nuklidov nestabilného izotopu v čase $t = 0 \text{ s}$.

Podmienka **rádioaktívnej rovnováhy** medzi materskými a dcérskymi nuklidmi:

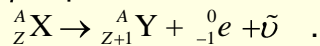
$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \dots = \text{konšt.}$$

α - premena - pri tejto samovoľnej premene jadra sa emituje α -častica, dcérsky nuklid má atómové číslo o 2 jednotky a hmotnostné číslo o 4 jednotky menšie ako materský nuklid:



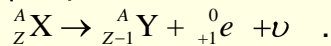
β - premena - zahŕňa tri možné druhy premeny, pričom pri každej z nich sa mení elektrický náboj jadra a teda atómové číslo Z o jednotku. Ide o elektrónovú β^- - premenu, pozitronovú β^+ - premenu a K – záchyt elektrónu.

β^- - premena:



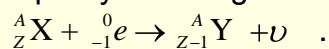
Pri β^- - premene sa z jadra emitujú elektróny, vznikajúce vnútri jadra tým, že sa premieňa neutrón na protón, elektrón a antineutríno.

β^+ - premena -



Nastáva emitovanie pozitronu, ktorý vzniká v jadre v dôsledku premeny protónu na neutrón, pozitron a neutríno.

Záchyt orbitálneho elektrónu - jadro zachytí jeden orbitálny elektrón. Protón v jadre sa premení na neutrón a uvoľní sa neutríno. Uvoľnené miesto elektrónu sa zaplní elektrónom z vyššej hladiny a prebytok energie sa vyžiarí vo forme fotónu.



Energia premeny - energia, ktorá sa uvoľní pri rádioaktívnej premene

$$\Delta E = E_0 - E_1^* .$$

E_0 - energia základného energetického stavu jadra X, E_1^* - vzбудená energetická hladina nového jadra Y.

Žiarenie γ - vyžiarenie fotónu elektromagnetického žiarenia pri prechode nového jadra (vzniknutého po jadrovej premene) zo vzbudného energetického stavu do nižšieho energetického stavu:

$$E_1^* - E_0 = hf = h \frac{c}{\lambda} .$$

Rádioaktívne datovanie

- pomocou rádionuklidu ${}^{40}\text{K}$ - metóda na určovanie veku hornín, využívajúca rádioaktívnu premenu nuklidu ${}^{40}\text{K}$ s veľmi dlhou dobou polpremeny.

- pomocou rádionuklidu ${}^{14}\text{C}$ - na určovanie veku organických látok, meraním obsahu ${}^{14}\text{C}$ v danej látke sa dá zistiť čas, ktorý uplynul od smrti organizmu.



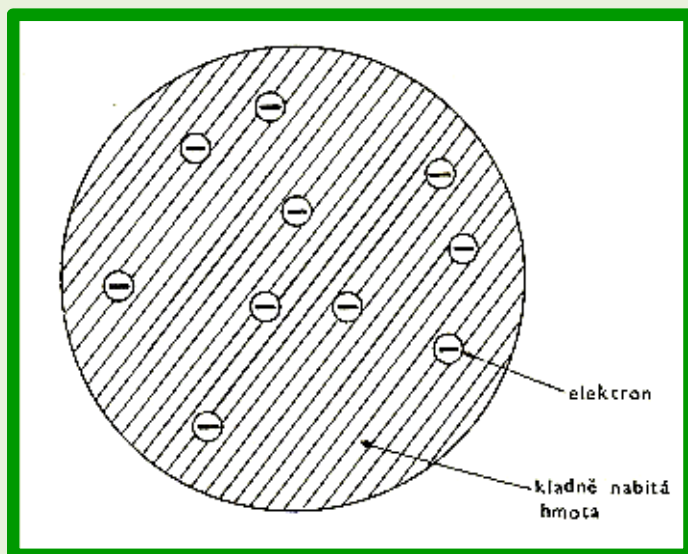
Návrat z acrobat readera -  (zatvorením okna)

THOMSONOV MODEL ATÓMU

THOMSON, sir Joseph John (1856-1940)

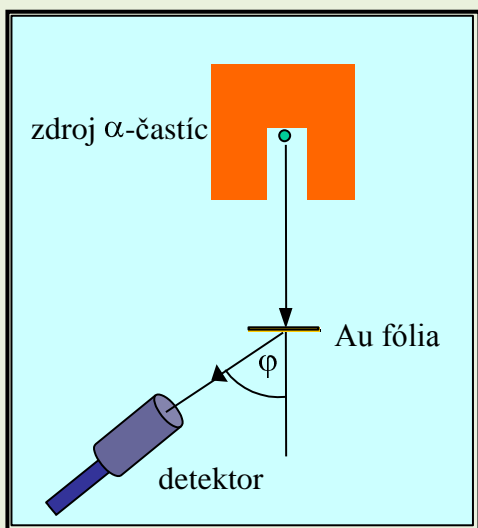
Kvôli vysvetleniu vodivosti kovov a emisných spektier žiarenia atómov vytvoril Thomson jeden z prvých modelov štruktúry atómu. Thomsonov alebo "pudingový model" atómu vychádzal z predstavy spojito rozloženého kladného náboja v objeme guľôčky, pričom elektróny boli rozmiestnené v kladnom náboji ako bodové náboje - hrozienka. Frekvencie ich kmitov určovali frekvencie spektrálnych čiar atómov.

J.J.Thomson sa stal nositeľom Nobelovej ceny za fyziku v roku 1906.

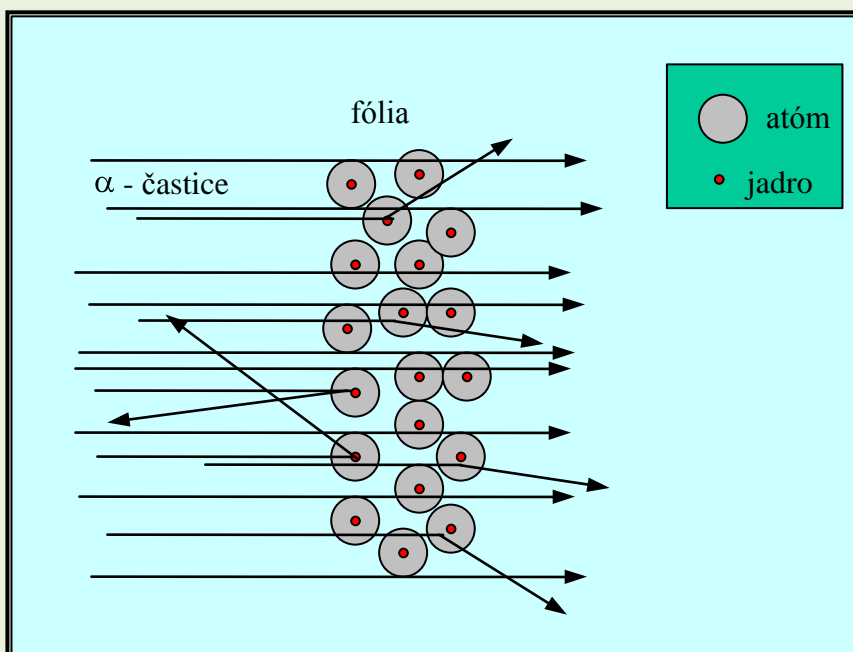


OBJAV PROTÓNU

Niekedy sa za objav protónu považujú už výsledky Rutherfordovho experimentu z r. 1911-1913. Experimentálne zariadenie, ktorým Rutherford študoval rozptyl α - častíc (v tom čase sa vedelo, že niektoré prvky sa samovoľne premieňajú a emitujú pritom energetické častice - neskôr nazvané α - časticami) na tenkej zlatej fólii, je znázornené schématicky na obrázku:



Zdrojom α - častíc bol radón vznikajúci premenou rádia. Detektor sa mohol otáčať do rôznych uhlov rozptylu.



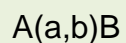
Výsledky experimentu ukázali, že síce väčšina častíc sa rozptýlila pod malým uhlom, ale niektoré častice sa odchyľili o veľké uhly, dokonca až o 180° - teda do spätného smeru. Na takéto "odrazenie" častice je treba veľmi veľkú silu. Vysvetlenie tohto javu viedlo k prekonaniu Thomsonovho modelu spojito rozloženého kladného náboja v celom objeme atómu. Naopak experiment viedol k vytvoreniu predstavy "**jadra**" atómu - sústredeniu kladného náboja v strede atómu, pričom polomer takéhoto jadra bol 10 000 krát menší ako polomer atómu. Keď sa α - častica priblíži tesne k takto kladne nabitému bodovému jadru môžu vzniknúť dostatočne veľké sily, ktoré môžu α - časticu "odraziť".



Návrat z přílohy pomocí: Alt + ←

SYMBOLICKÝ ZÁPIS JADROVÝCH REAKCIÍ

V *symbolickom zápise* jadrovej reakcie:



znamená: A – terčové ostreľované jadro, B – vzniknuté jadro po jadrovej reakcii, a – ostreľujúca častica, b – emitovaná častica.

Napríklad: ostreľujeme alfa časticou jadro dusíka, vzniknuté jadro po reakcii je kyslík a emitovaná častica protón: ${}^{14}_7\text{N}(\alpha,p){}^{17}_8\text{O}$.

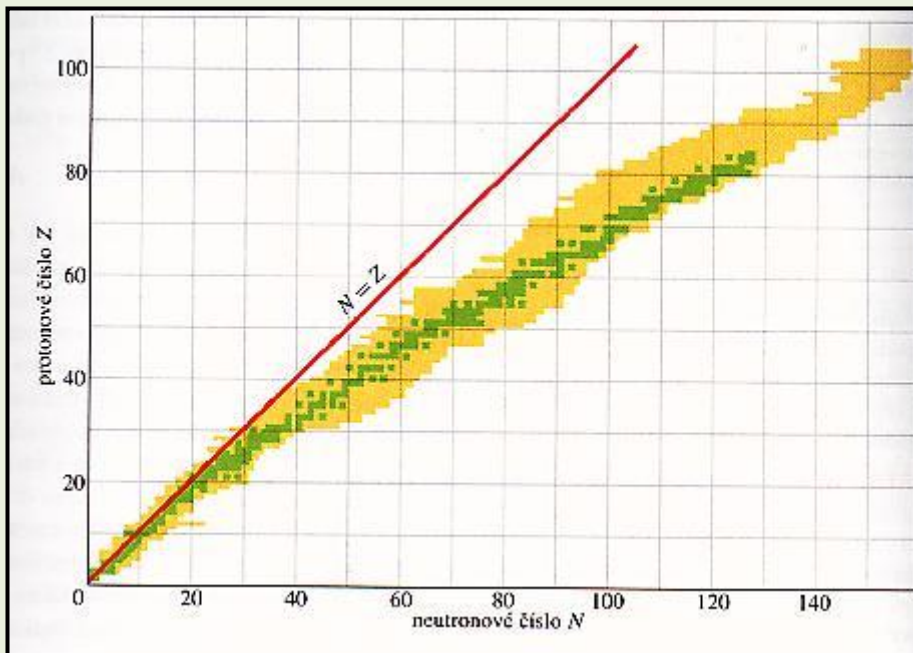


Návrat z prílohy pomocou: Alt + ←

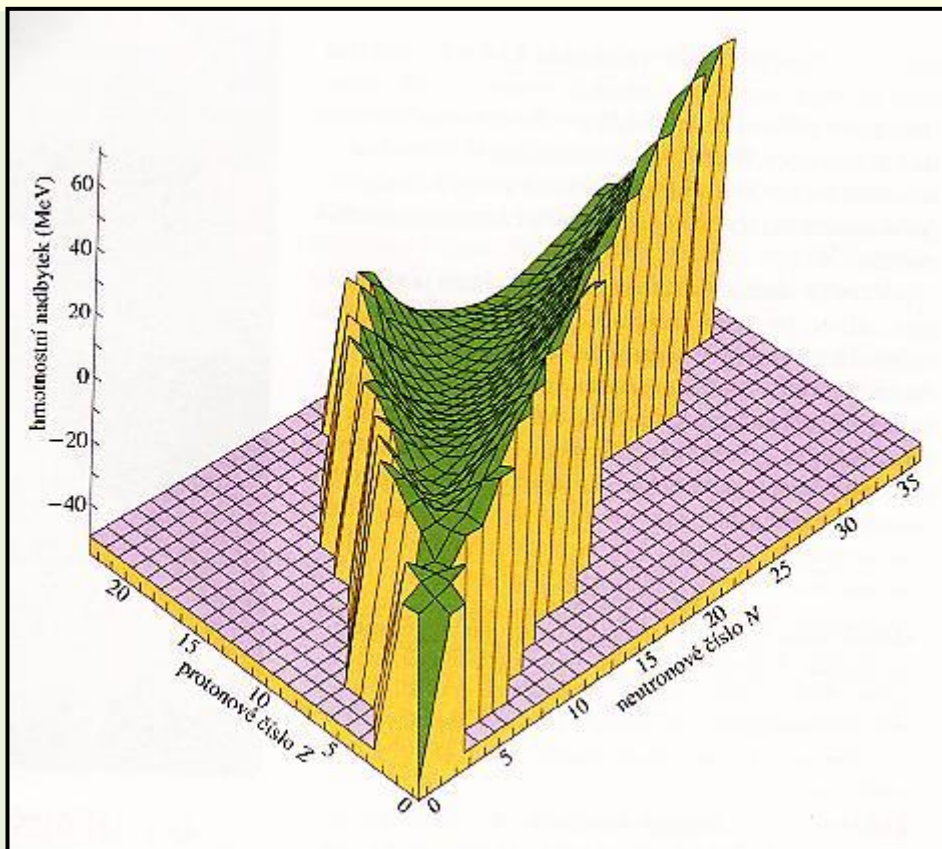
SEGRÉHO DIAGRAM STABILITY NUKLIDOV [1]

Na osi x je neutrónové číslo N , na osi y protónové číslo Z . Zelený pás označuje **stabilné nuklidy**, žltý pás predstavuje oblasť rádionuklidov. Červená priamka predstavuje rovnosť počtu protónov a neutrónov.

Stabilné nuklidy s malou hmotnosťou majú približne rovnaký počet protónov a neutrónov, pri ťažších stabilných nuklidoch vzrastá nadbytok neutrónov. Pre protónové čísla $Z > 83$ (bizmut) už neexistujú stabilné nuklidy.



Ak pridáme v diagrame tretí rozmer a na os z budeme nanášať väzbovú energiu nuklidu v MeV (hmotnostný prebytok príslušného nuklidu $\Delta m c^2 = (m_a - A) c^2$, kde atómová hmotnosť nuklidu m_a a jeho hmotnostné číslo A sú dané v atómových hmotnostných jednotkách) dostaneme trojrozmernú predstavu o stabilite jadra [1]. Pás stability z predošlého grafu sa tiahne dnom "údolia" nuklidov. V najnižšom cípe grafu sa nachádza deutérium, trícium a hélium. Nuklidy s veľkou hodnotou hmotnostného čísla A , ležiace ďaleko od údolia sa môžu doňho dostať opakovanou α premenou alebo štiepením. Nuklidy na stene údolia s prevahou protónov sa do údolia "premiestňujú" emisiou pozitronov, nuklidy na stene bohatej na neutróny emisiou elektrónov.



Emilio Gino **Segré** (1905 - 1989)

sa celý život venoval atómovej a jadrovej fyzike. Bol profesorom na mnohých popredných univerzitách a bol aj v skupine fyzikov podieľajúcich sa na vývoji jadrovej bomby. Zaoberal sa spontánnym štiepením jadier a interakciou neutrónov s jadrami a ich vplyvom na jadrové reakcie. V roku 1959 mu bola udelená Nobelova cena spolu s O. Chamberlainom za objav antiprotónu.

[1] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker: Fyzika, 2003, VUT Brno, VUTIUM ISBN 80-214-1868-0

[←](#) **Návrat z prílohy pomocou: Alt + ←**

► **Príloha 5:**

Počet stabilných nuklidov pre rôzne typy jadier

A	N	Z	Počet stabilných nuklidov
p	p	p	166
p	n	n	8
n	p	n	57
n	n	p	53

Tab.1. Počet stabilných nuklidov s (p-p), (n-n), (p-n) a (n-p) jadrami

← **Návrat z prílohy pomocou: Alt + ←**

ELEMENTÁRNE ČASTICE

Elementárne častice sú najjednoduchšie častice, z ktorých je vytvorená ľubovoľná látka alebo pole. Jednotlivé elementárne častice sú charakterizované hodnotami niektorých fyzikálnych veličín a kvantovými číslami. K ľubovoľnej elementárnej častici existuje tzv. **antičastica**, ktorá má niektoré hodnoty fyzikálnych veličín rovnaké s danou elementárnou časticou (napr. pokojovú hmotnosť, pokojovú energiu, spinové kvantové číslo), a určité charakteristiky majú opačné znamienko (napr. elektrický náboj). Ak má častica s antičasticou všetky fyzikálne charakteristiky rovnaké nie je možné ich rozlíšiť, elementárna častica a antičastica sú totožné, vtedy hovoríme o **neutrálnej častici** (napr. fotón). Častica neutrón je napríklad len elektricky neutrálnou časticou ale existuje fyzikálne rozlíšiteľný antineutrón.

V modernom systéme základných elementárnych častíc sú základnými časticami látky tzv. leptóny a kvarky.

Pre **leptóny** je charakteristické, že neinteragujú silne a nemajú vnútornú štruktúru. Sú fermióny, t.j. častice so spinovým kvantovým číslom $s = 1/2$. V súčasnosti poznáme 6 leptónov (a súčasne 6 antileptónov): elektrón, mión, tauón a im odpovedajúce neutrína - (elektrónové, miónové, tauónové neutrína).

Kvarky sú tiež bezštruktúrne elementárne častice, fermióny ($s = 1/2$), ktorých elektrický náboj je rovný zlomkovým hodnotám elementárneho náboja e ($1/3$ a $2/3$).

Aj keď kvarky boli zavedené ako hypotetické častice bez priameho experimentálneho dôkazu ich existencie, kvarková teória, zjednodušujúca systém elementárnych častíc, je v súčasnej fyzike akceptovaná a podporená nepriamymi dôkazmi existencie kvarkov.

Medzi elementárnymi časticami existujú štyri základné fyzikálne interakcie: gravitačná, elektromagnetická, silná a slabá.

Slabá interakcia sa prejavuje takmer pri všetkých typoch elementárnych častíc. Má veľmi malý dosah, rádovo 10^{-18} m. Slabou interakciou nevznikajú žiadne viazané stabilné sústavy častíc, ale uplatňuje sa napr. pri jadrových premenách (β - premeny).

Silná interakcia je najsilnejšie známe vzájomné silové pôsobenie medzi časticami, jej dosah je približne 10^{-15} m. Predstavuje základnú interakciu medzi kvarkami. Jadrové sily sú sekundárnym prejavom silnej interakcie medzi kvarkami.

Typ interakcie	Relatívna sila	Dosah [m]
gravitačná	10^{-38}	∞
elektromagnetická	10^{-2}	∞
slabá	10^{-13}	10^{-18}
silná	1	10^{-15}

OBJAV RÁDIOAKTIVITY

Mária Curie - Skłodowska (1867 - 1934)

bola prvou ženou, ktorá získala Nobelovu cenu za fyziku a neskôr aj za chémiu. V roku 1898 objavili spolu s manželom Pierrom Curie nový prvok, ktorý nazvali po krajine pôvodu Márie Curie - polónium, neskôr objavili rádium.

Stala sa prvou ženou - profesorkou na Sorbone. Celý život sa venovala výskumu rádioaktívnych látok. Založila vedný odbor "rádiochémia". Rádioaktívne žiarenie bolo aj príčinou vzniku anémie a v konečnom dôsledku jej smrti.

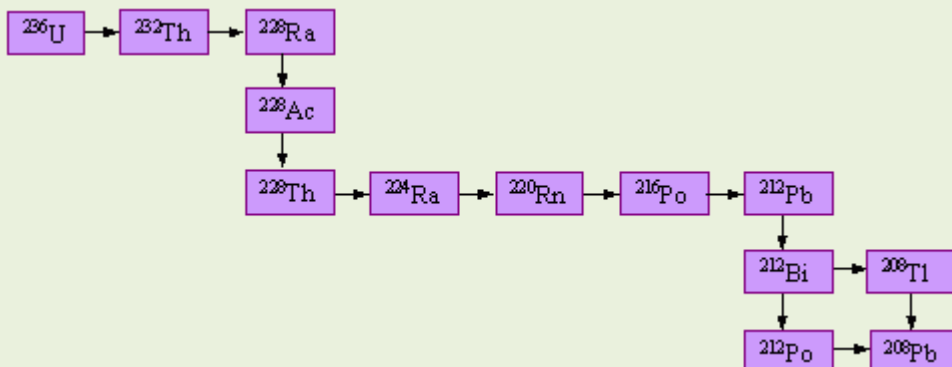
Za objav rádioaktivity dostala Mária Curie Nobelovu cenu spoločne s manželom Pierrom Curie a s A. H. Becquerelom v roku 1903.



Mária Curie- Skłodowska s Pierrom Curie

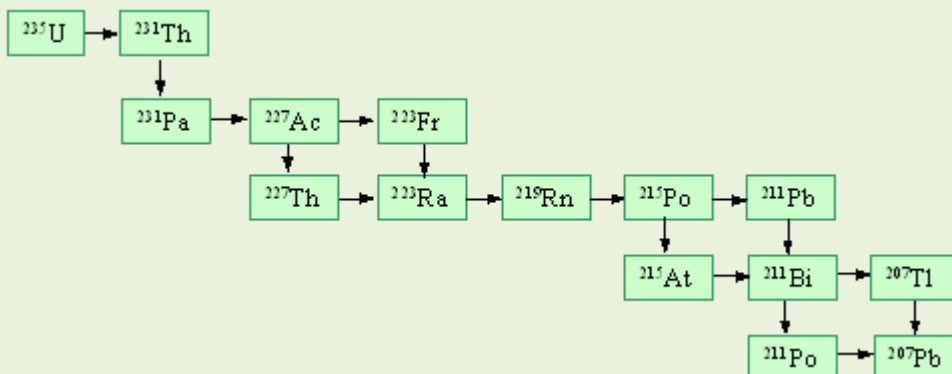
PREMENOVÉ RADY

Premenový rad thóriový

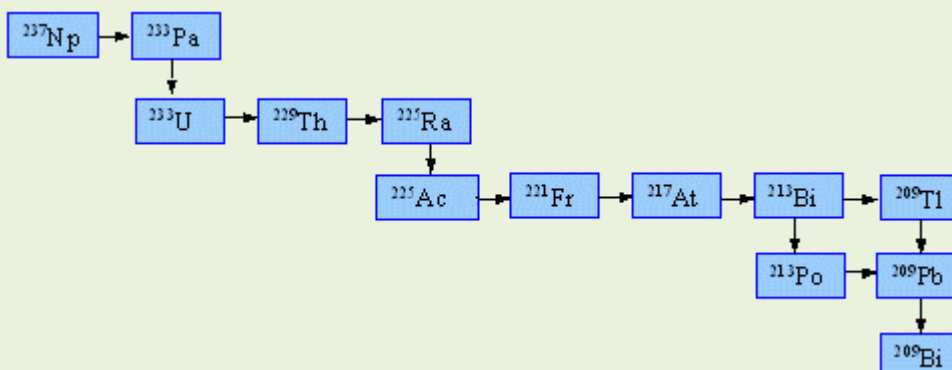


Označenie: vodorovná šípka predstavuje α premenu
zvislá šípka - β - premenu

Premenový rad aktíniový



Premenový rad neptúniový



PREMENOVÝ RAD URÁNOVÝ

