

# Kvantová, atómová a subatómová fyzika

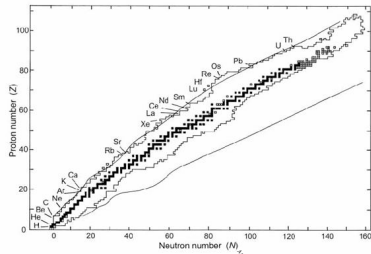
## Jadrová fyzika

### Jadrá: slovník

- jadrá z hľadiska jadrovej fyziky: **nuklidy**
- protóny + neutróny = **nukleóny**
- počet protónov: protónové (atómové) číslo  $Z$   
počet neutrónov: neutrónové číslo  $N$   
počet nukleónov: hmotnostné číslo  $A$  ( $= Z + N$ )
- nuklidy s rovnakým  $Z$  a odlišným  $N$ : **izotopy**
- nuklidy s rovnakým  $A$  a odlišným  $Z$ : **izobary**
- nuklidy s rovnakým  $N$  a odlišným  $Z$ : **izotony**
- izotopy, ktoré sa rozpadajú sú **rádionuklidy**
- nuklidový diagram (Mendelejevova tabuľka pre nuklidy)
- značenie nuklidov:  ${}^A_ZX$  alebo  ${}^A_ZX$ , napríklad  ${}^{197}_{79}\text{Au}$

## Nuklidový diagram

- stabilné nuklidy na páse stability
- ťažké stabilné nuklidy majú spravidla  $N > Z$
- okolo pásu stability sú rádionuklidy
- rádionuklidy siahajú od protónovej po neutrónovú čiaru nasýtenia (drip line)
- izobary: nuklidy s rovnakým  $A$
- aktuálnejší diagram je on-line  
<https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>



$N > Z$  pretože:

- príliš veľa protónov by sa veľmi silno elektrostaticky odpudzovalo
- príliš veľa neutrónov by však veľmi zvyšovalo Fermiho energiu
- obe možnosti sú energeticky nevýhodné

3

## Vlastnosti nuklidov

Typický polomer sú rádovo femtometre (alebo fermi):  $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$   
niektoré nuklidy sú elipsoidy  
približný polomer jadra:  $R = 1,12 A^{1/3} \text{ fm}$

Hmotnosti sa merajú v (unifikovaných) atómových hmotnostných jednotkách  $u$   
 $1u$  je jedna dvanásťtina hmotnosti atómu uhlíka  $^{12}\text{C}$ .

$$1u \approx 1,661 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$$

Mnoho nuklidov má **vnútorný jadrový moment hybnosti** a s ním spojený **jadrový magnetický moment**.

**Jadrová sila** drží pohromade nukleóny. Musí prekonať elektrostatické odpudzovanie protónov. Je krátkodosahová (to sa dá nahliadnúť z väzbovej energie) s dosahom asi jednej protónovej vrstvy (1 fm). Je prejavom **silnej interakcie** ktorá viaže kvarky v nukleónoch.

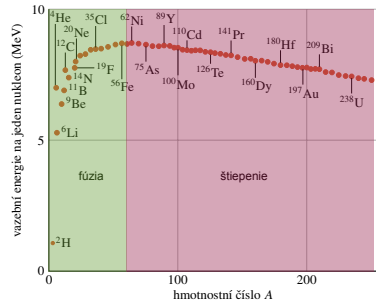
Jadro môže byť v excitovaných stavoch. Typické energie excitácií sú rádovo MeV. Pri prechodoch sú emitované tvrdé (veľmi energetické) fotóny, takzvané  $\gamma$  žiarenie.

4

## Jadrová väzbová energia

Hmotnosť jadra je menšia ako súčet hmotností protónov a neutrónov. Je zmenšená o **väzbovú energiu Q**. Q je energia, ktorú treba jadrú dodať, aby sme ho rozobrali na protóny a neutróny.

$$Q = \Delta mc^2 = (Zm_p + Nm_n - m_j)c^2$$



Podľa polohy v diagrame sa energia uvoľňuje pri reakciách:

- **fúzia** (zlučovanie) pre nízke A po Fe procesy prebiehajúce vo hviezdach a produkujúce prvky po Fe
- **štiepenie** pre vysoké A nad Fe proces využívaný v jadrovej elektrárni tieto nuklidy nemohli vzniknúť horením vo hviezdach, ale sú produkované vo veľmi rýchlych procesoch pri výbuchoch supernov

5

## Rádioaktívny rozpad

počet rozpadnutých (premenených) jadier (alebo úbytok jadier) za infinitesimálny čas je úmerný celkovému počtu jadier

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N(t)$$

$\lambda$  je rozpadová konštanta, alebo konštanta premeny; charakterizuje daný nuklid

počet jadier vzorky ako funkcia času

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

rýchlosť rozpadu (premeny)

$$R(t) = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = R_0 e^{-\lambda t}$$

**aktivita** = počet rozpadov za sekundu pri danej rýchlosti

- jednotka: 1 becquerel = 1 Bq = 1 rozpad za sekundu (staršia jednotka 1 Curie = 1 Ci =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Bq)

**Doba polpremeny (premeny)  $\tau$**  je čas, za ktorý sa premení polovica jadier zo vzorky

$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda \tau} \Rightarrow \tau = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

6

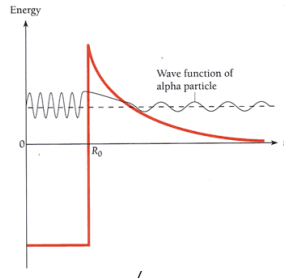
## Rozpad $\alpha$

Je jav, pri ktorom jadro emituje časticu  $\alpha$ , čiže jadro  ${}^4\text{He}$ , napríklad



Pri rozpade sa hmotnostné číslo znižuje o 4 a atómové číslo o 2.

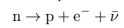
Pri  $\alpha$  rozpade, emitovaná častica musí pretunelovať popod potenciálovú bariéru



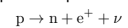
## Premena $\beta$

Je jav, pri ktorom: jadro emituje elektrón alebo pozitron (jeho antičasticu). Príbuzným javom je K-záchyt, pri ktorom jadro anihiluje elektrón na najnižšej energetickej hladine.

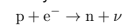
premena  $\beta^-$



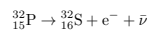
premena  $\beta^+$



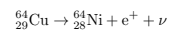
K-záchyt



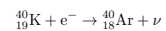
napríklad



napríklad



napríklad



Počet nukleónov sa vždy zachováva.

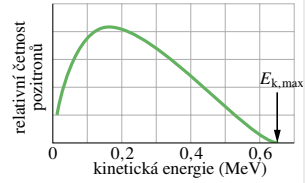
Počet protónov a/alebo neutrónov sa mení o 1.

Väčšinu uvoľnenej energie si rozdelia elektrón (pozitron) a antineutrino (neutrino).

## Neutrino

Pri  $\beta$ -premene sa energia rozdelí medzi premenený atóm, elektrón a ...

Ak by sme mali len dve častice v koncovom stave, energia elektrónu by sa dala presne určiť a bola by  $E_{k,max}$ . Elektrón ale nadobúda celé spektrum energií...



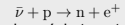
Wolfgang Pauli (1930):

Pri  $\beta$ -premene je produkovaná ešte jedna, elektricky neutrálna a prakticky nedetegovateľná častica s veľmi malou alebo nulovou hmotnosťou.

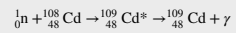
Objav 1953:

Frederick Reines a Clyde L. Cowan, Jr. záchyt neutrín vo veľkej nádrži s  $H_2O$  a  $CdCl_2$ .

Napred reakcia



a následne záchyt neutrónu



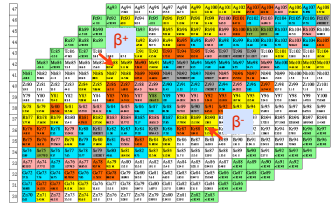
Experimentálny signál: dva fotóny z anihilácie pozitrónu a jeden fotón o trochu neskôr z deexcitácie Cd.

(Nobelova cena 1995)

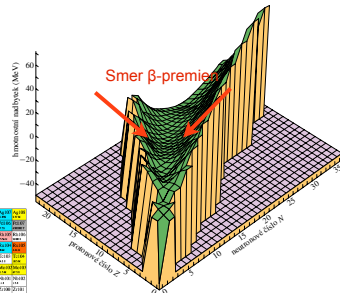
9

## Rádioaktivita a nuklidový diagram

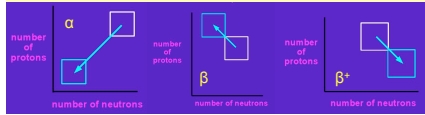
Samovoľné premeny vedú vždy k jadrú s menšou energiou



10



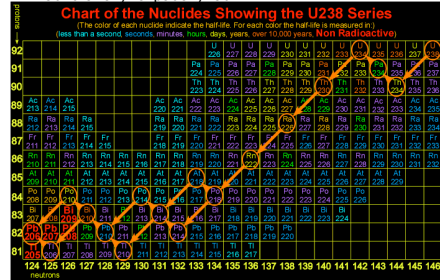
## Rozpadové rady



Rozpadové rady:

- thóriový ( $A = 4n$ )
- neptúniový ( $A = 4n+1$ )
- uránový ( $A = 4n+2$ )
- aktíniový ( $A = 4n+3$ )

Příklad: uránový rozpadový rad

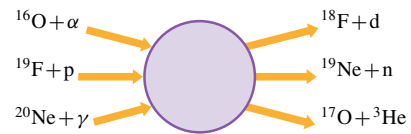
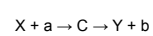


## Kvapkový (kolektívny) model jadra

Predstavuje si jadro ako kvapku, ktorá má objemovú energiu, povrchovú energiu (a ďalšie korekčné členy)

Kvapka nemá pamäť.

Jadrová reakcia beží cez zložené jadro (compound nucleus), pričom zložené jadro si nepamätá, ako vzniklo. Preto sa môže rozpadnúť (rôznymi spôsobmi) nezávisle od toho, z akej reakcie pochádza.



tři způsoby  
utváření

tři způsoby  
rozpadu

## Vázbová energia: Weizsäckerova formula

$$E_v = a_1 A - a_2 A^{2/3} - a_3 \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_4 \frac{(N-Z)^2}{A} \pm a_5 A^{-1/2}$$

↑ objemový člen  
 ↑ povrchový člen  
 ↑ Coulombovský člen  
 $a_3 = \frac{3}{5} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_0}$   
 ↑ energia symetrie  
 ↑ párovací člen  
 + pámo-párne  
 - nepárno-nepárne  
 0 pámo-nepárne

$a_1$	15,5 MeV
$a_2$	16,8 MeV
$a_3$	0,715 MeV
$a_4$	23 MeV
$a_5$	11,3 MeV

z formuly pre vázbovú energiu môžeme nájsť jadro s najmenšou hmotnosťou pre dané A - najstabilnejší izobar

$$m(Z, A)c^2 = Zm_p c^2 + (A - Z)m_n c^2 - E_v(Z, A)$$

$$\frac{dm(Z, A)}{dZ} = 0$$

$$Z = \frac{(m_p c^2 - m_n c^2 - 2a_4)A}{4a_4 + a_3 A^{2/3}}$$

$$Z = \frac{A}{1,972 + 0,0150 A^{2/3}}$$



Carl Friedrich  
Freiherr von Weizsäcker

13

## Model nezávislých častíc (vrstvý, šupkový, shell)

Predstavuje si jadro ako súhrn nukleónov, ktoré sa všetky nachádzajú v nejakom (strednom) potenciáli. Ak máme potenciál, môžeme počítať energetické hladiny a obsadzovať ich, ako sme to robili pri atóme vodíka a výstavbe väčších atómov. Nukleóny sú fermióny.

Pri zaplňaní stavov máme počty nukleónov, ktoré kompletne obsadia nejakú energetickú hladinu. Podobne, ako boli vzácne plyny pri stavbe atómov, v tomto prípade dostávame veľmi stabilné nuklidy. Tieto počty sú známe ako **magické čísla**:

2, 8, 20, 28, 50, 82, 126

niektoré magické nuklidy:

$^{18}\text{O}(Z=8)$ ,  $^{40}\text{Ca}(Z=20, N=20)$ ,  $^{92}\text{Mo}(N=50)$ ,  $^{208}\text{Pb}(Z=82, N=126)$

14

## Rádioaktívne datovanie

Uhlíková metóda:  $^{14}\text{C}$

Izotop uhlíka  $^{14}\text{C}$  je rádioaktívny a vzniká pôsobením kozmického žiarenia v horných vrstvách atmosféry. Má  $\tau = 5730$  y (rokov) a prirodzená koncentrácia je  $10^{-13}$  relatívne k stabilnému  $^{12}\text{C}$ . Takáto koncentrácia je vo všetkých živých tkanivách. Po odumretí tkaniva sa už uhlík nevymieňa a  $^{14}\text{C}$  sa rozpadá  $\beta$  premenou na  $^{14}\text{N}$ . Určením aktuálnej koncentrácie vieme určiť čas, kedy sa uhlík prestal v organizme obnovovať.

Metódy pre geologické datovanie

Potrebujeme rozpady s typickým časom miliardy rokov.  
Napríklad  $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$ , alebo  $^{238}\text{U} \rightarrow \dots \rightarrow ^{206}\text{Pb}$ .

uránová metóda

$$N_U(t) = N_0 e^{-0.693t/\tau}$$

$$N_{Pb} = N_0 - N_U(t) = N_U(t) (e^{0.693t/\tau} - 1)$$

$$t = \frac{\tau}{0.693} \ln \frac{N_{Pb} + N_U}{N_U}$$

zodpovedať musí aj počet  $^4\text{He}$  jadier, ktoré vznikajú pri rozpadoch

Literatúra k tejto časti:  
Krajčo, Fyzika atómu, kap. 10.11

15

## Meranie radiačnej dávky

**Absorbovaná dávka  $D$ :** energia pohltená jednotkou hmotnosti, jednotka 1 J/kg = 1gray (Gy)  
staršia jednotka  
1 rad = 1 rem = 0,01 Gy (rad = radiation absorbed dose, rem = Roentgen equivalent man)

Radiácia rôznych druhov nepôsobí tkanivá rovnako. Niektoré žiarenie má pri rovnakej dodanej energii väčší a niektoré menší biologický účinok. Toto je vyjadrené faktorom RBE (relative biological effectiveness), značeným tiež ako  $w_R$ .  
Rovnaké biologické účinky majú dávky s rovnakým **dávkovým ekvivalentom  $H$** .

$$H = w_R \cdot D$$

Jednotka: 1 sievert (Sv)

Radiation weighting factors		
Type	Energy range	Radiation weighting factor, $w_R$
Photons	all	1
Electrons/muons	all	1
Neutrons	< 10 keV	5
	10 keV to 100 keV	10
	100 keV to 2 MeV	20
	2 MeV to 20 MeV	10
	> 20 MeV	5
Protons (fast neutrons)	> 2 MeV	5
Alpha particles	all	20
Fission fragments	all	20
Heavy nuclei	all	20

16



## Účinnok ionizujúceho žiarenia na živú hmotu/organizmus

Absorpcia energie: excitácia a ionizácia molekúl a atómov

Rádiolýza vody:

vznik  $H^+$ , hydroxilový radikál  $OH\cdot$ , voľný elektrón, radikál vody  $H_2O^+$ , peroxid vodíka  $H_2O_2$

Radikály sa môžu pohybovať po organizme a preto sa ochorenie môže prejavíť inde ako v mieste ožiarenia.

Poškodenie molekuly DNA ionizujúcim žiarením

- môže byť reparabilné
- môže viesť k zmene správania bunky - nekontrolovateľné delenie (karcinóm)
- môže viesť k usmrteniu bunky

Účinky sú rôzne na rôzne tkanivá. Najcitlivejšie:

- strata krvných buniek (znížená obranyschopnosť - biele krvinky, anémia - červené krvinky)
- strata buniek v čreve (zvracanie, imunita, perforácia čreva)
- lymfatické tkanivo
- pohlavné orgány
- očná šošovka

17

## Ochorenia spôsobené ionizujúcim žiarením

Okamžité	Oneskorené		
	Somatické		Genetické
akútna choroba z ožiarenia	nenádorové oneskorené ochorenia	zhubné nádory	genetické poruchy u potomstva
akútne lokálne zmeny (popáleniny)	chronický zápal kože		
poškodenie plodnosti	zákal očnej šošovky		
poškodenie vývoja plodu			
deterministické, nestochastické, prahové		stochastické, neprahové	

18

## Ochrana pred žiarením

Ochrana: časom, odstupom, tienením

Ožiarenie:

- vonkajšie - zabrániť kontaktu žiariča kožou, zabezpečiť tienenie - ochranné oblečenie
- vnútorné - najčastejšie inhaláciou alebo ingesciou (zjedeníím, vypitím) - respirátor

Žiarenie  $\alpha$ :

- najslabšie prenikavé, ochráni aj list papiera

Žiarenie  $\beta$ :

- tienenie z materiálu s nízkym Z
- vysoké Z môže viesť k brzdnému žiareniu a tým k tvorbe  $\gamma$  žiarenia

Žiarenie  $\gamma$ :

- prenikavé! - tienenie z materiálu s vysokým Z

neutróny:

- prenikavé!
- spôsobujú indukovanú rádioaktivitu
- nepoužívať materiály s vysokým neutrónovým aktivačným účinným prierezom

19

## Obvyklé zdroje žiarenia (na priemerného obyvateľa)

- radón v stavebných materiáloch (v domoch): 44%
- rádioaktivita v potrave: 21%
- medicínske aplikácie: 16%
- rádioaktivita Zeme: 10%
- kozmické žiarenie: 8%
- priemyselné aplikácie: 1%
- jadrové elektrárne: 0,01%

Celková ročná efektívna dávka: 2-5 mSv/rok

20