

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: ${}^A X$ alebo ${}^A_Z X$, napríklad ${}^{197}_{79} \text{Au}$

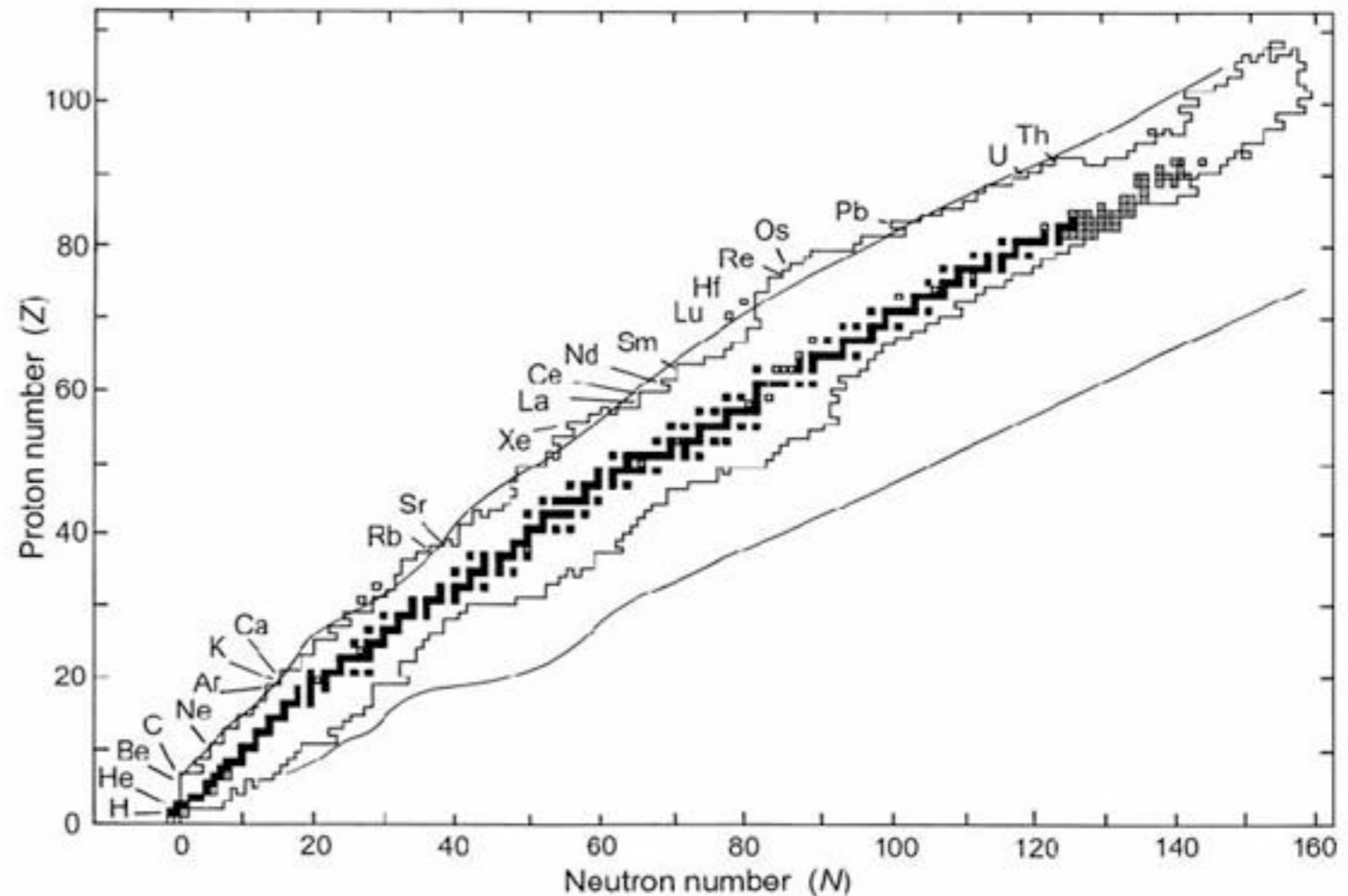
Nuklidový diagram

- 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/relnd/vcharthtml/VChartHTML.html>

$N > Z$ pretože:

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



	$A = 198$						
82	¹⁹⁷ Pb 43 min	¹⁹⁸ Pb 2,4 h	¹⁹⁹ Pb 1,5 h	²⁰⁰ Pb 21,5 h	²⁰¹ Pb 9,33 h	²⁰² Pb 53 000 y	²⁰³ Pb 2,16 d
81	¹⁹⁶ Tl 1,84 h	¹⁹⁷ Tl 2,83 h	¹⁹⁸ Tl 5,3 h	¹⁹⁹ Tl 7,4 h	²⁰⁰ Tl 26,1 h	²⁰¹ Tl 72,9 h	²⁰² Tl 12,2 d
80	¹⁹⁵ Hg 9,5 h	¹⁹⁶ Hg 0,15 %	¹⁹⁷ Hg 64,1 h	¹⁹⁸ Hg 10,0 %	¹⁹⁹ Hg 16,9 %	²⁰⁰ Hg 23,1 %	²⁰¹ Hg 13,2 %
79	¹⁹⁴ Au 39,4 h	¹⁹⁵ Au 186 d	¹⁹⁶ Au 6,18 d	¹⁹⁷ Au 100 %	¹⁹⁸ Au 2,69 d	¹⁹⁹ Au 3,14 d	²⁰⁰ Au 48,4 min
78	¹⁹³ Pt 60 y	¹⁹⁴ Pt 32,9 %	¹⁹⁵ Pt 33,8 %	¹⁹⁶ Pt 25,3 %	¹⁹⁷ Pt 18,3 h	¹⁹⁸ Pt 7,2 %	¹⁹⁹ Pt 30,8 min
77	¹⁹² Ir 73,8 d	¹⁹³ Ir 62,7 %	¹⁹⁴ Ir 19,2 h	¹⁹⁵ Ir 2,8 h	¹⁹⁶ Ir 52 s	¹⁹⁷ Ir 5,8 min	¹⁹⁸ Ir ≈ 8 s
76	¹⁹¹ Os 15,4 d	¹⁹² Os 41,0 %	¹⁹³ Os 30,5 h	¹⁹⁴ Os 6,0 y	¹⁹⁵ Os 6,5 min	¹⁹⁶ Os 35 min	—
	115	116	117	118	119	120	121
	neutronové číslo N						

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 dvanástina hmotnosti atómu uhlíka ^{12}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**.

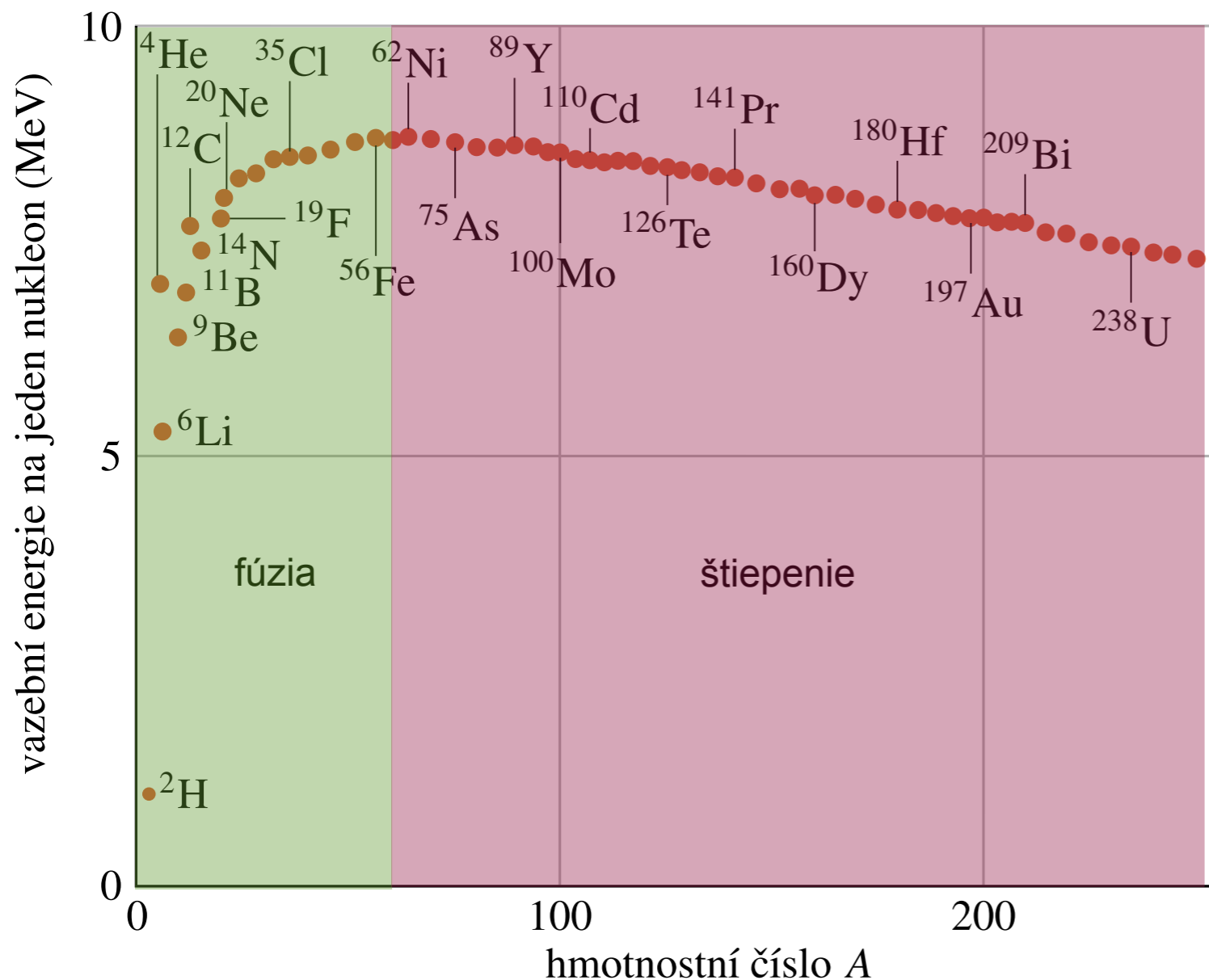
Jadrová sila drží pohromade nukleóny. Musí prekonať elektrostatické odpudzovanie protónov. Je krátkodosahová (to sa dá nahliadnuť z väzbovej energie) s dosahom asi jednej protónovej vrstvy (1 fm). Je prejavom **silnej interakcie** ktorá viaže kvarky v nukleónoch.

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

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

Rádioaktívny rozpad

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

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

λ 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) τ je čas, za ktorý sa premení polovica jadier zo vzorky

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

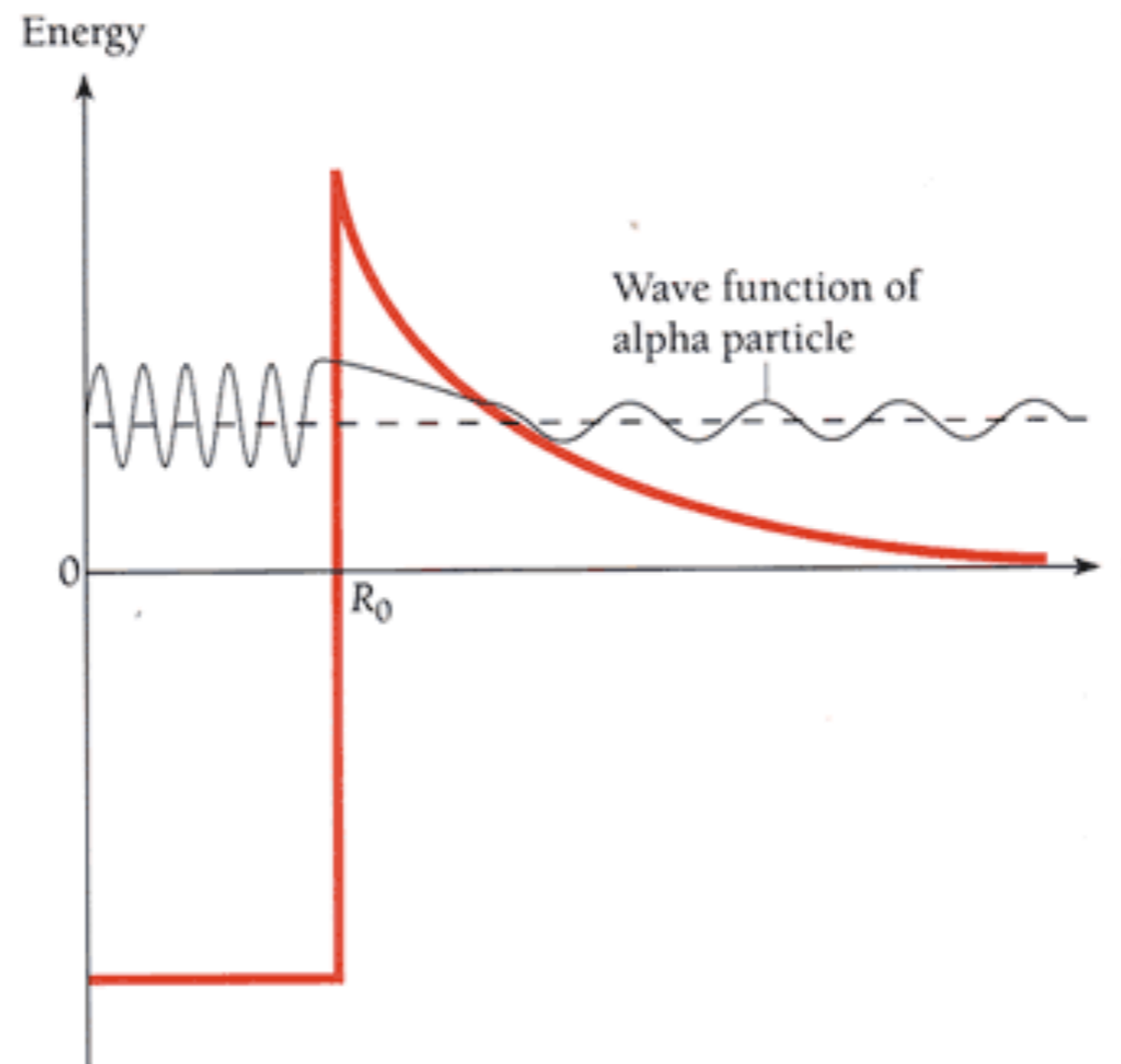
Rozpad α

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



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

Pri α rozpade, emitovaná častica musí pretunelovať popod potenciálovú bariéru



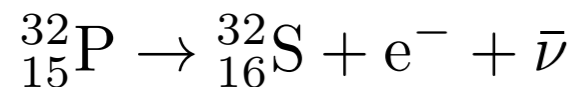
Premena β

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.

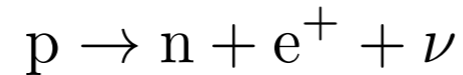
premena β^-



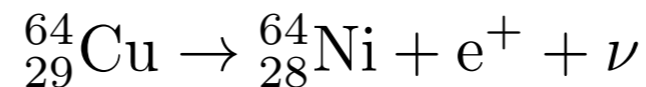
napríklad



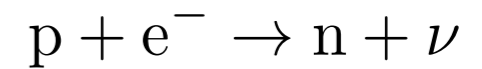
premena β^+



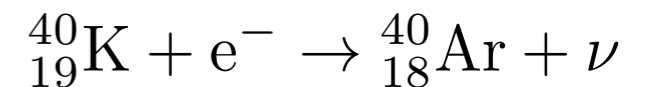
napríklad



K-záchyt



napríklad



Počet nukleónov sa vždy zachováva.

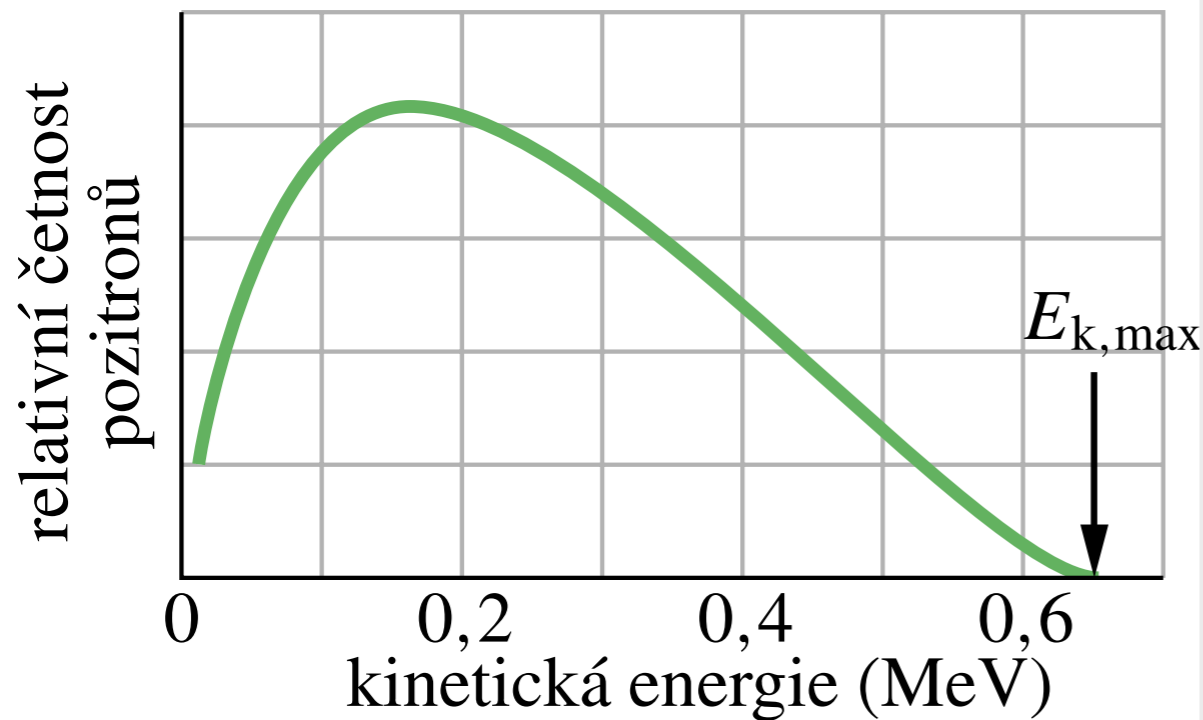
Počet protónov a/alebo neutrónov sa mení o 1.

Väčšinu uvoľnenej energie si rozdelia elektrón (pozitron) a antineutríno (neutríno).

Neutríno

Pri β -premene sa energia rozdelí medzi premenený atóm, elektrón a ...

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



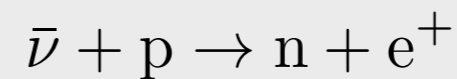
Wolfgang Pauli (1930):

Pri β -premene je produkovaná ešte jedna, elektricky neutrálna a prakticky nedetegovatelná 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 pozitronu a jeden fotón o trochu neskôr z deexcitácie Cd.

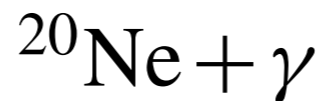
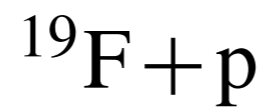
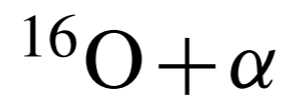
(Nobelova cena 1995)

Kvapkový (kolektívny) model jadra

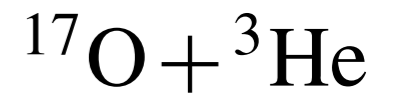
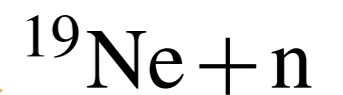
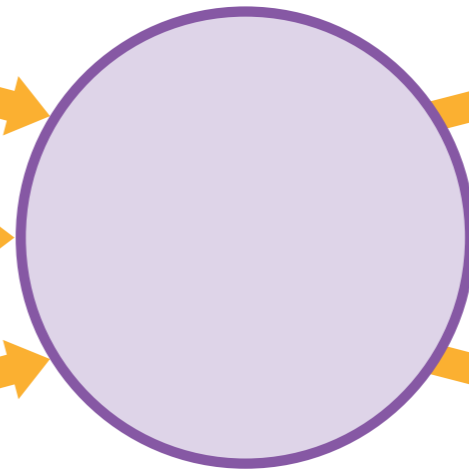
Predstavuje si jadro ako kvapku, ktorá má objemovú energiu, povrchovú energiu (a ďalšie korekčné členy)

Kvapka nemá pamäť.

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



tři způsoby
utváření



tři způsoby
rozpadu

Väzbová 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
 + páрно-párne
 - nepárno-nepárne
 0 páрно-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 väzbovú 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

Model nezávislých částic (vrstvý, šupkový, shell)

Představuje si jádro jako súhrn nukleónov, ktoré sa všetky nachádzajú v nejakom (strednom) potenciály. 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:

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

Rádioaktívne datovanie

Uhlíková metóda: ^{14}C

Izotop uhlíka ^{14}C je rádioaktívny a vzniká pôsobením kozmického žiarenia v horných vrstvách atmosféry. Má $\tau = 5\,730$ y (rokov) a prirodzená koncentrácia je 10^{-13} relatívne k stabilnému ^{12}C . Takáto koncentrácia je vo všetkých živých tkanivách. Po odumretí tkaniva sa už uhlík nevymieňa a ^{14}C sa rozpadá β premenou na ^{14}N . Určením aktuálnej koncentrácie vieme určiť čas, kedy sa uhlík prestal v organizme obnovovať.

Metódy pre geologické datovanie

Potrebuje 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

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

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

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

zodpovedať musí aj počet ^4He jadier, ktoré vznikajú pri rozpadoch

Literatúra k tejto časti:

Krajčo, Fyzika atómu, kap. 10.11

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 (not recoil protons)	> 2 MeV	5
Alpha particles	all	20
Fission fragments	all	20
Heavy nuclei	all	20

Účinok ionizujúceho žiarenia na živú hmotu/organizmus

Absorpcia energie: excitácia a ionizácia molekúl a atómov

Rádiolýza vody:

vznik H^+ , hydroxilový radikál OH^- , 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 reparable
- 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

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	

Ochrana pred žiarením

Ochrana: časom, odstupom, tienením

Ožiarenie:

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

žiarenie α :

- najslabšie prenikavé, ochráni aj list papiera

žiarenie β :

- tienenie z matariálu s nízkym Z
- vysoké Z môže viesť k brzdnému žiareniu a tým k tvorbe γ žiarenia

žiarenie γ :

- prenikavé! - tienenie z materiálu s vysokým Z

neutróny:

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

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