

# Atomová a jaderná fyzika

*Fyzika elektronové obalu atomů a interakce atomů*

*Fyzika atomového jádra a fyzika elementárních částic*

# Obsah

## TÉMA 3 (jaderná fyzika)

- Jaderná fyzika – úvod
- Struktura a vlastnosti atomového jádra
- Radioaktivita
- Jaderné reakce
- Fyzika elementárních částic

# Téma 3

- **Jaderná fyzika ..... 7**
- **Struktura a vlastnosti atomového jádra ..... 9**
- **Protonový model atomového jádra ..... 10**
- **Proton-elektronový model atomového jádra ..... 12**
- **Heisenbergův-Ivaněnkův model atomového jádra .... 13**
- **Klasifikace atomových jader a jejich základní charakteristiky ..... 16**
- **Vlastnosti a podstata jaderných sil ..... 22**

# Téma 3

- **Radioaktivita ..... 29**
- **Druhy radioaktivního záření ..... 30**
- **Typy radioaktivních přeměn ..... 31**
- **Deexcitace jader ..... 33**
- **Zákon radioaktivní přeměny ..... 34**
- **Řady radioaktivních přeměn ..... 37**
- **Stabilita jader ..... 39**



# Téma 3

- **Jaderné reakce ..... 47**
- **Zákony zachování v jaderných reakcích ..... 48**
- **Typy jaderných reakcí ..... 52**
- **Reakce štěpná ..... 55**
- **Reakce termojaderná ..... 60**
- **Modely jader ..... 61**

# Téma 3

- **Fyzika elementárních částic ..... 69**
- **Třídění elementárních částic a jejich charakteristiky ... 70**
- **Antičástice ..... 82**
- **Kvarkový model hadronů ..... 83**
- **Současný systém základních částic a základních fyzikálních interakcí ..... 87**

# Jaderná fyzika

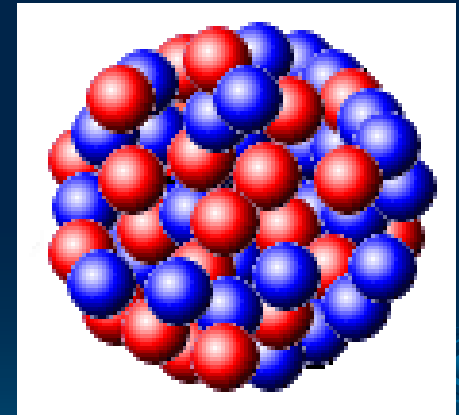
## ➤ **Jaderná fyzika**

(nukleonika, fyzika atomového jádra)  
je obor fyziky, který se zabývá popisem a studiem **atomových jader**, včetně jejich **vnitřní struktury a přeměnami těchto jader.**

➤ Jaderná fyzika úzce souvisí s **fyzikou elementárních částic.**

# Atomové jádro

- **centrální oblast atomu** zaujímající prostor o lineárním rozměru řádově  $10^{-15}$  m.
- V této oblasti je soustředěna skoro celá hmotnost atomu. Na elektronový obal zbývá řádově jedna tisícina celkové hmotnosti atomu (**Rutherfordův experiment**).
- Atomové jádro má kladný elektrický náboj.
- Z hlediska **vnitřní struktury** představuje atomové jádro systém sestávající nejméně z jednoho **protonu** a libovolného počtu dalších **protonů a neutronů** vázaných **jadernými silami**.

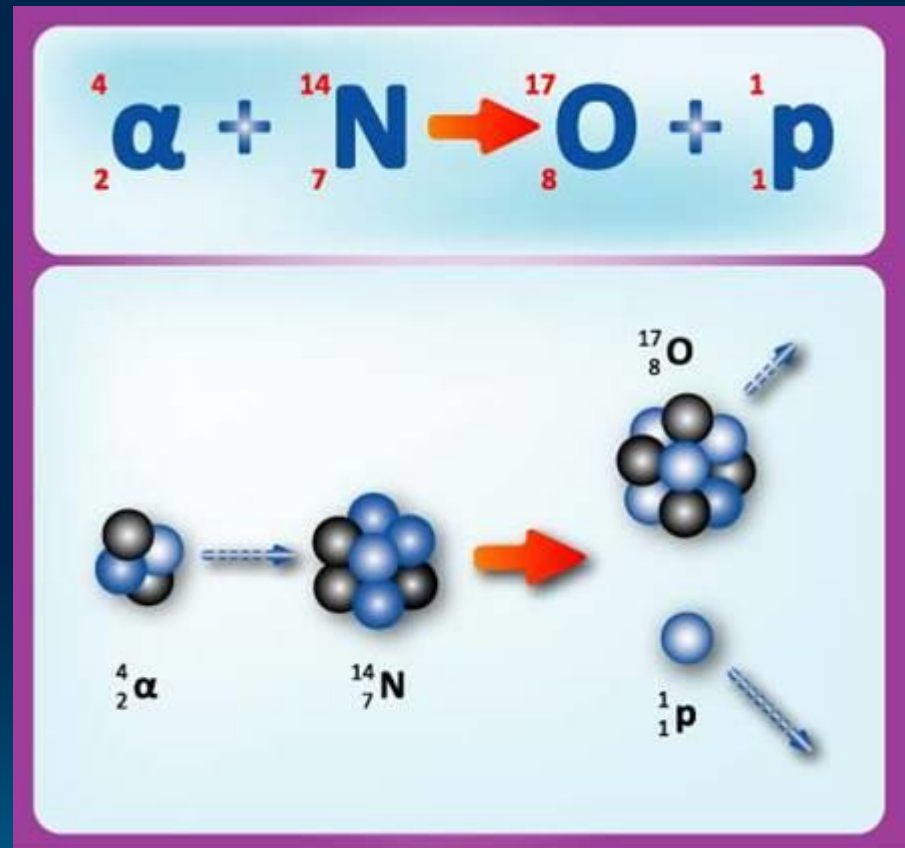


# Historie modelů

- **Objev protonu – protonový model**
- **Nesoulad hmotnosti a náboje** protonového modelu – **model s jaderným elektrony**
- **Objev neutronu**
  - **Heisenbergův – Ivaněnkův model.**

# Objev protonu

- Rutherford (1919)
- Zdroj částic alfa – radioaktivní látka
- Detekce stop nabitých částic – Wilsonova mlžná komora



# Wilsonova mlžná komora

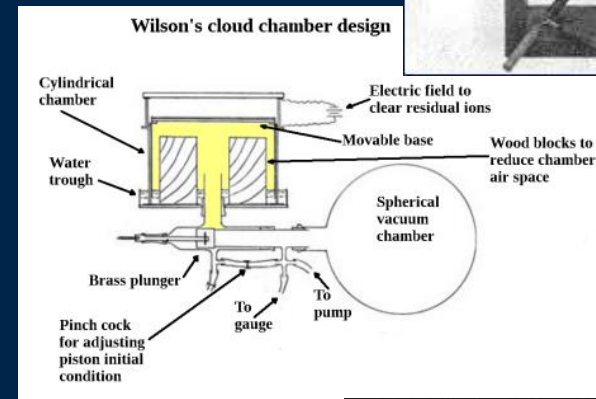
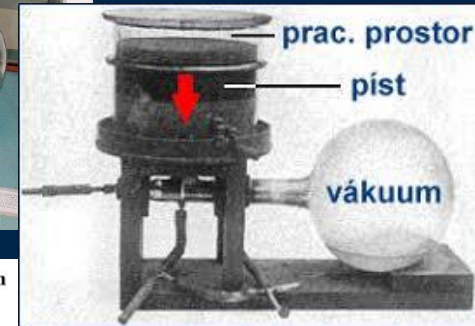
➤ Slouží k detekci elektricky nabitých částic

➤ V komoře se nachází **nasycené páry** vody nebo alkoholu ve vzduchu (páry v termod. rovnováze kapalinou, jejich maximální množství ve vzduchu roste s jeho teplotou), které se **rychlou expanzí** podchladí pod teplotu kondenzace (**rosný bod** – závisí na tlaku  $p$ , teplota rosného bodu klesá s  $p$ )

➤ V případě čistého prostředí v komoře **neexistují** kondenzační centra (např. prachové částice) na kterých by páry kondenzovaly v podobě kapiček – **podchlazené (též přesycené) páry**

➤ Rychlé nabité částice (**ionizující částice**, částice ionizujícího záření) jsou během svého průletu schopny **ionizovat atomy prostředí**, vzniklé ionty pak hrají roli **kondenzačních center** v čistém prostředí.

➤ Podél dráhy průletu nabitě částice vzniká **stopa** ve formě **kondenzovaných kapiček**. Stopu lze při vhodném osvětlení dobře pozorovat a vyfotit – okem vidíme úzké čáry (nepřesně interpretované jako „dráhy“, proto se hovoří o **dráhových komorách**). **Kondenzační stopa** je však mnohonásobně větší šířky než je rozměr prolétávající částice)



Stopy částic



Detail kondenzační stopy



# Vlastnosti protonu

- Elementární částice ze skupiny **nukleonů**.
- **Spinové kvantové číslo**  $s = 1/2$  ( $m_s = \pm 1/2$ ), proto se řadí mezi částice označované jako **fermiony** (částice s poločíselnými hodnotami  $s$ , liché násobky  $1/2$ ).
- Má **kladný elektrický náboj**, jehož velikost je rovna (stejně jako u elektronu) **elementárnímu elektrickému náboji**  $e = 1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$  C (od r. 2019 přesně).
- **Klidová hmotnost protonu**  $m_p = (1,672\ 648\ 5 \pm 0,000\ 008\ 6) \cdot 10^{-27}$  kg.  
Srovnej  $m_e = (0,91093837015 \pm 0,000\ 000\ 000\ 28) \cdot 10^{-30}$  kg
- **Landého faktor protonu (spinový)**  $g_{s,p} = 2 \times (+2,792\ 845\ 6)$ .  
Srovnej  $g_{s,e} = -2,00231930436256(\pm 35) \approx 2 \times (-1)$
- Podle standardních teorií je proton **stabilní částicí s neomezenou střední dobou života**, podle některých nových teorií by měl mít konečnou střední dobu života, která **ale není menší než asi  $10^{32}$  let**.
- Na první pohled se zdá, že proton představuje jakousi těžší obdobu elektronu, což naznačuje stejná velikost náboje, i když s opačným znaménkem, a stejná hodnota spinového čísla. **Proton je zhruba 1836 krát těžší než elektron a navíc má i odlišnou hodnotu Landého faktoru**. Později se ukázalo, že tato odlišná hodnota je způsobena **vnitřní strukturou protonu**, náboj není rozdělen uvnitř částice rovnoměrně.

Projekce vlastního magnetického momentu

$$\mu_{s,p,z} = g_{s,p} \cdot m_s \cdot \mu_N$$

Jaderný magneton  $\mu_N = e \hbar / (2m_p)$

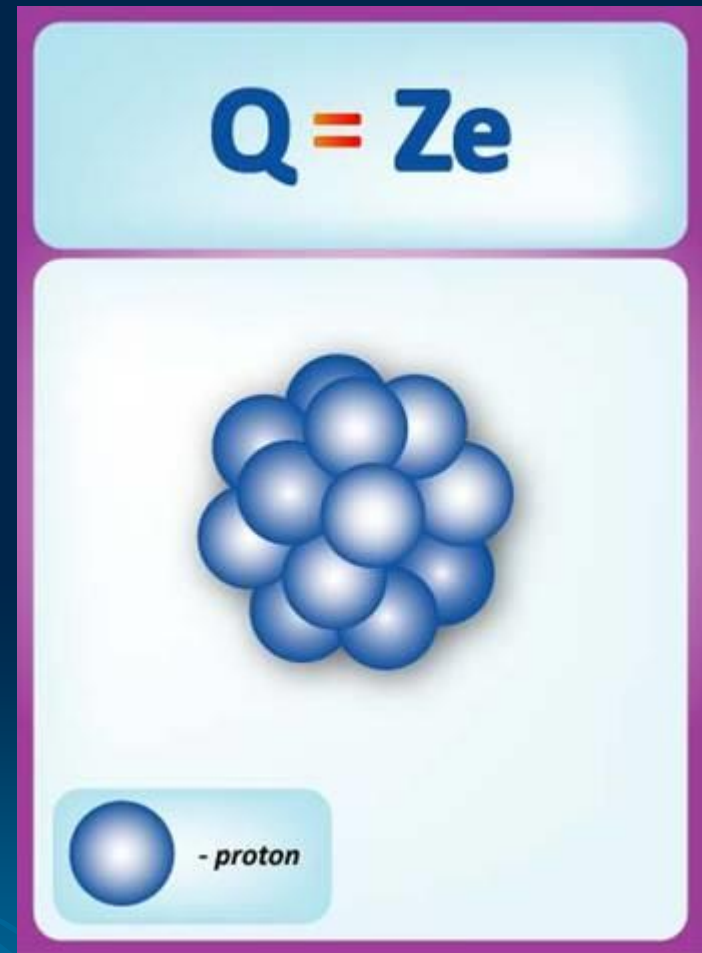


# Protonový model

- Jádru sestává pouze z protonů.
- Počet protonů  $Z$  v jádře je možno určit z náboje jádra  $Q$  pomocí vztahu  $Q = Z \cdot e$  (náboj protonu je  $e$ ).

## NEDOSTATEK

- Experimentálně zjištěná hmotnost jádra  $M$  není ani přibližně rovna  $Z \cdot m_p$ .

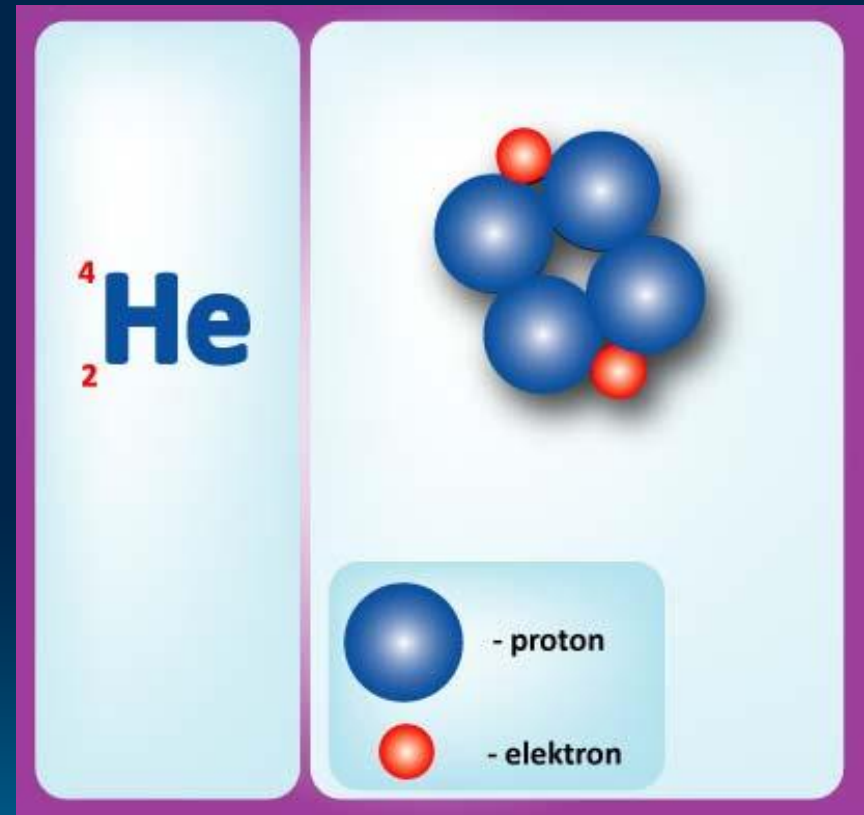


# Jaderné elektrony ?

- Při některých **radioaktivních přeměnách vyletují z jádra elektrony.**
- Zdálo se tedy rozumné předpokládat, že **v jádře je určitý počet elektronů, které kompenzují náboj jádra.**

# Proton – elektronový model

- **Hmotnosti jader** (zejména ale těch lehčích) jsou přibližně **celistvým násobkem hmotnosti protonu**,  
 $M = a m_p$ .
- **Jádro** podle modelu tedy **obsahuje  $a$  protonů**.
- **Náboj jádra** je ale  $Z.e$ , v jádře tedy **musíme předpokládat i existenci  $a-Z$  elektronů**.



# Nedostatky modelu

**Měření magnetického momentu jádra je v rozporu s předchozím modelem.**

- Model dává totiž **příliš velké hodnoty magnetických momentů jádra** (součet malých mag. momentů protonů a podstatně větších mag. momentů elektronu).

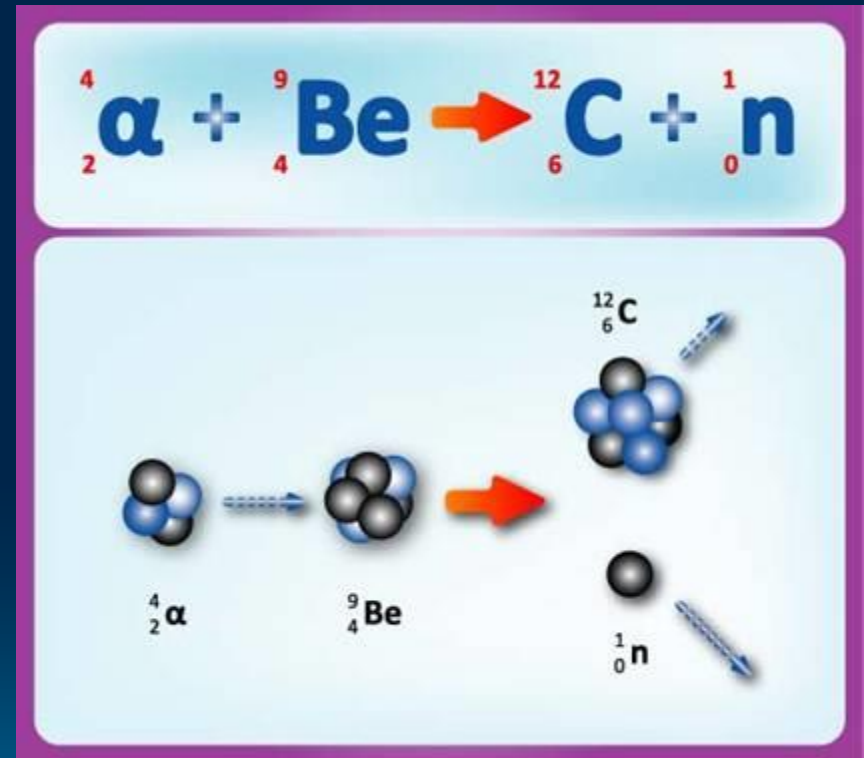
**Nesoulad experimentálních a předpovídaných hmotností jader**

- **Proton-elektronový model** struktury jádra dává přibližně **správné hodnoty hmotností zejména lehčích jader**, přesto zůstává **určitá nepřesnost ve srovnání s experimentem** (hmotnosti jader vždy nejsou přesně celistvými násobky hmotnosti protonů).
- Tento **nesoulad teoretické a skutečné hmotnosti jádra** je ještě více patrný **v případě těžkých jader**.

**Stále také není jasné jaké síly drží jádro pohromadě (elektrostatické síly jsou převážně odpudivé).**

# Objev neutronu

- **Chadwick** (1932)
- Experiment analogický jako v případě objevu protonu.
- **MIžná komora** detekuje pouze **stopy nabitých částic**.
- V procesu přeměny po srážce by měly platit **zákony zachování**.
- Po srážce ale **zdánlivě chybí část energie a hybnosti**.
- **Odnáší ji neutrální částice**, ta nezanechá stopu – **neutron**.





# Detekce nabitých a identifikace neutrálních částic

- **Nabité částice** se detekují na základě své schopnosti ionizovat atomy prostředí – lze zobrazit stopy jejich průletu (dříve hlavně v mlžné komoře, dnes i jiné typy tzv. dráhových komor – např. bublinová)

- **Neutrální částice** je možné identifikovat pouze nepřímo ze stop nabitých částic v procesu přeměny, a to na základě bilance zákona zachování energie a hybnosti

## Bublinová (bublinková) komora

- Typ „dráhové komory“ jejíž princip je v jistém smyslu opačný k či podobný mlžné komoře
- V komoře vytvoříme přehřátou kapalinu (typicky vodík zahřejeme těsně pod bod varu a pak v čistém prostředí snížíme tlak).
- Podél dráhy částice dochází k ionizaci – v blízkosti iontů se začnou vytvářet bublinky – po jejich nasvícení pozorujeme opět ionizační stopu.



- Aplikací magnetického pole dojde k zakřivení dráhy částic.
- Z poloměru zakřivení dráhy lze určit rychlost (kin. energii částice, po určení směru letu známe i hybnost částice)

- Některé typy detektorů jen zaznamenávají jednotlivé průlety částic
- Pokud se jich víc sdruží do „pole“ (matice detektorů) v prostoru, mohou též zaznamenat stopu částice
- V současnosti se používají také např. polovodičové detektory

# Vlastnosti neutronu

- **Spinové kvantové číslo**  $s = 1/2$  ( $m_s = \pm 1/2$ ), proto se řadí mezi částice označované jako **fermiony** (částice s poločíselnými hodnotami  $s$ , liché násobky  $1/2$ ).
- Neutron je **elektricky neutrální** částice.
- **Klidová hmotnost**  $m_n = (1,674\ 954\ 3 \pm 0,000\ 008\ 6) 10^{-27}$  kg. O něco **těžší než proton**.  
Srovnej  $m_p = (1,672\ 648\ 5 \pm 0,000\ 008\ 6) 10^{-27}$  kg
- **Landého faktor neutronu**  $g_n = 2 \times (-1,913\ 042\ 11)$ .  
Srovnej  $g_p = 2 \times (+2,792\ 845\ 6)$ .

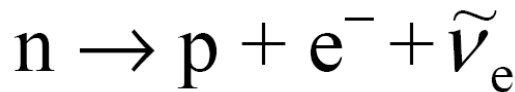
Projekce vlastního magnetického momentu

$$\mu_{s,n,z} = g_{s,n} \cdot m_s \cdot \mu_N \neq 0$$

Jaderný magneton  $\mu_N = e \hbar / (2m_p)$

Tzn., že i když se jedná o částici **bez elektrického náboje**, má **nenulový magnetický moment**, což je dáno **další vnitřní strukturou neutronu**.

- Jako volná částice je **neutron nestabilní** a má **střední dobu života**  $(896 \pm 10)$  s. Rozpad vlivem slabé interakce probíhá podle schématu“.  
tj. cca 15 min



- Pokud je ovšem **neutron vázán v jádře, stává se stabilním** (přesněji řečeno dochází ke vzájemným přeměnám neutronů a protonů, mezi těmito přeměnami se **ustaví rovnováha**, takže **počet protonů a neutronů v jádře se zachovává**).

# Heisenbergův – Ivaněnkův model

- **Atomové jádro se skládá** ze dvou typů částic: **protonů a neutronů**.
- Protony a neutrony jsou v jádrech drženy **novým typem sil** – tzv. **jadernými silami**.
- **Vazebná energie jádra**  $E_v$ , která je důsledkem těchto sil, **způsobuje** pozorovatelný **hmotnostní úbytek**

$Q = Ze = (A - N)e$   
 $\Delta m = E_v/c^2$

- neutron  
- proton



# Hmotnostní úbytek

- Rozdíl mezi klidovou hmotností jádra  $M$  a součtem klidových hmotností nukleonů:

$$\Delta m = M - (Z m_p + N m_n).$$

Hmotnost jádra nuklidu  ${}^A_Z X$

$$M(Z,A) = A_r(Z,A) m_u$$

$$m_p = A_r(1,1) m_u$$

$$m_n = A_r(0,1) m_u$$

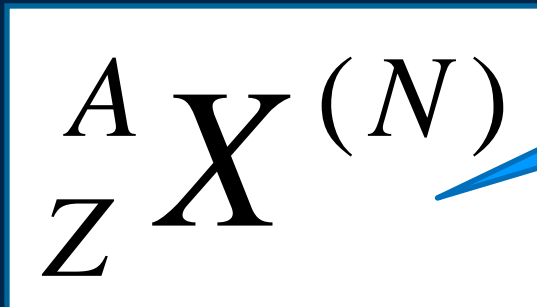
V jaderné fyzice je obvyklé pracovat s relativní atomovou hmotností nuklidu  $A_r$

# I. Základní charakteristiky jader

- **protonové číslo  $Z$**  (dříve **atomové číslo**) určující počet protonů v jádře
- **nukleonové číslo  $A$**  (dříve **hmotnostní číslo**), určující počet nukleonů (protonů a neutronů) v jádře
- někdy se navíc uvádí i **neutronové číslo  $N = A - Z$** , které udává počet neutronů v jádře.

# Nuklid

- Látka, jejíž všechny atomy mají jádra se **stejným protonovým** a také **stejným nukleonovým** číslem, se označuje **nuklid**.
- Značí se symbolem



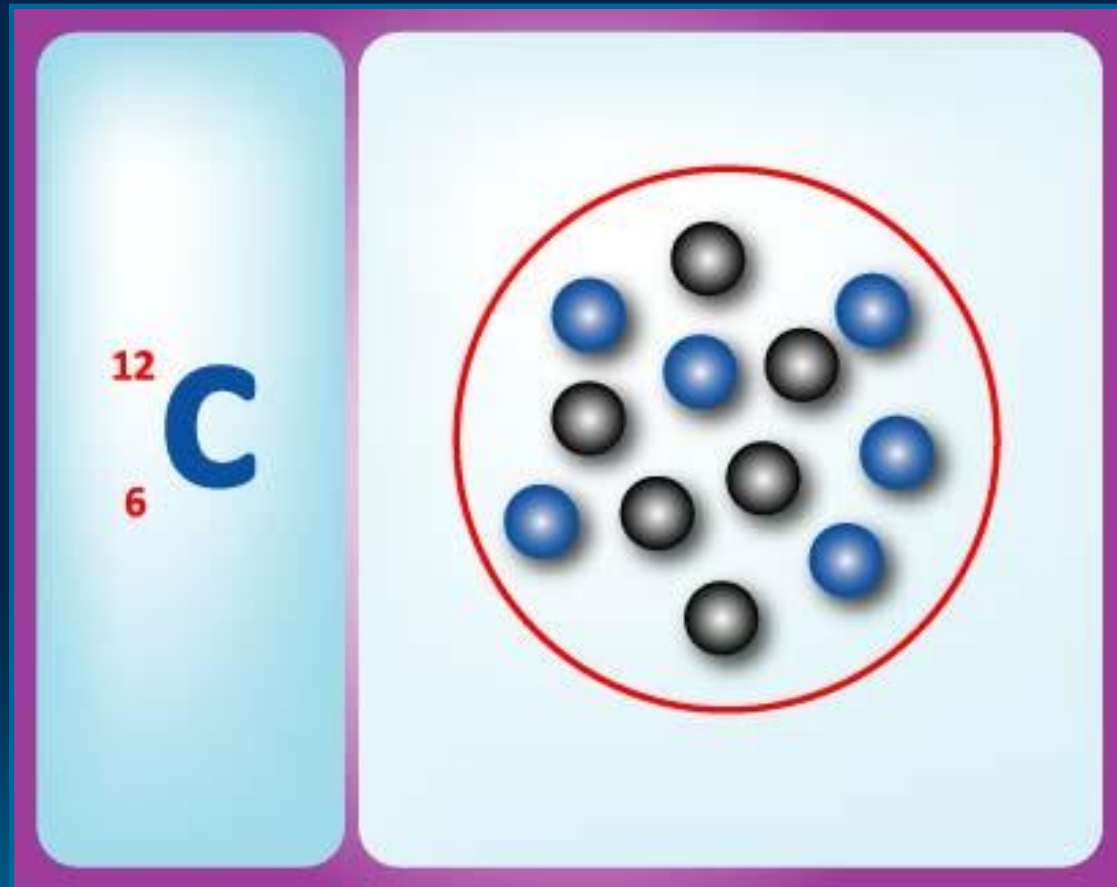
,kde

**Prvek** je určen jen danou hodnotou **Z**.  
**Nuklid** je určen danou hodnotou **Z** a navíc danou hodnotou **A**.

Vzhledem ke vztahu  
 $A = Z + N$ ,  
stačí k určení nuklidu  
libovolná dvojice  
z trojice čísel Z, N a A.

**X** je značka chemického prvku  
s **protonovým číslem Z** (není nutné uvádět pro prvek je Z jednoznačné)  
a **A** je **nukleonové číslo jádra** (popř. uvedeme i neutronové číslo N).

# Příklad jádra nuklidu



# Izotopy

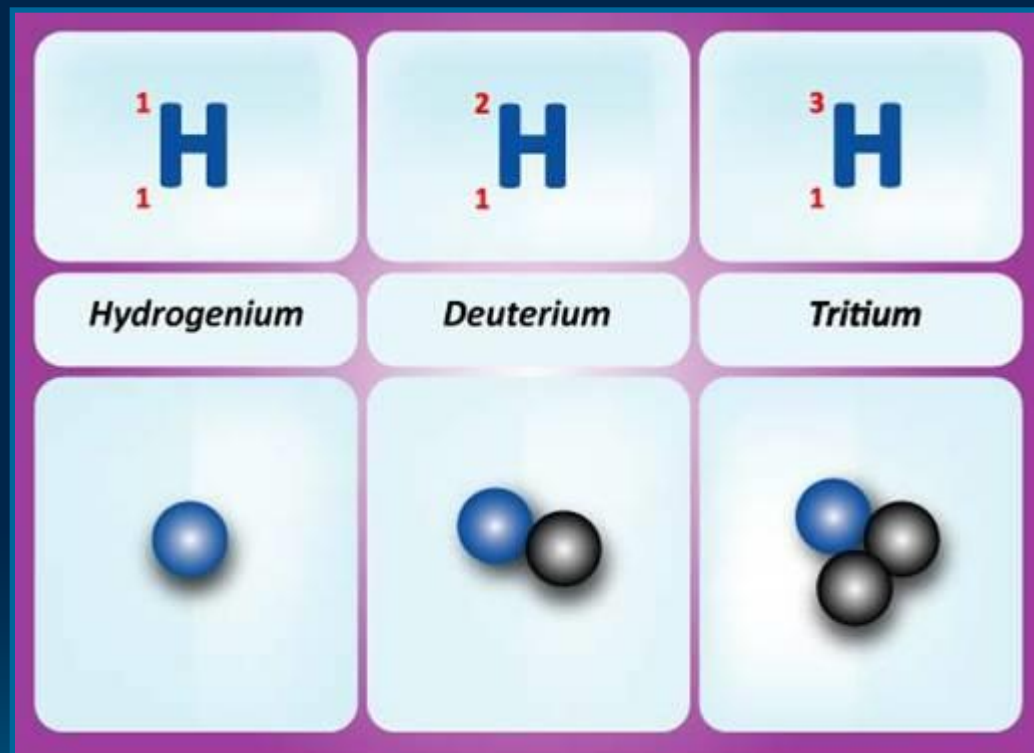
## ➤ Stejné Z

Dvě jádra (skupinu jader) označíme jako **izotopy** daného **konkrétního prvku** (dané Z), pokud se liší v nukleonovém čísle A (tedy i v neutronovém čísle  $N = A - Z$ ).

Látka obsahující jeden konkrétní prvek, jehož atomy mají jádra s různým A (resp. N) představuje **směs izotopů** (tohoto prvku).

**Atomy různých izotopů téhož prvku mají různé hmotnosti.**

## Příklad – izotopy vodíku



# Izotony

## ➤ Stejně N

Dvě jádra (skupinu jader) označíme jako **izotony**, pokud mají stejné **neutronové číslo N** a liší se v **nukleonovém čísle A** (tedy i v protonovém čísle  $Z = A - N$ ).

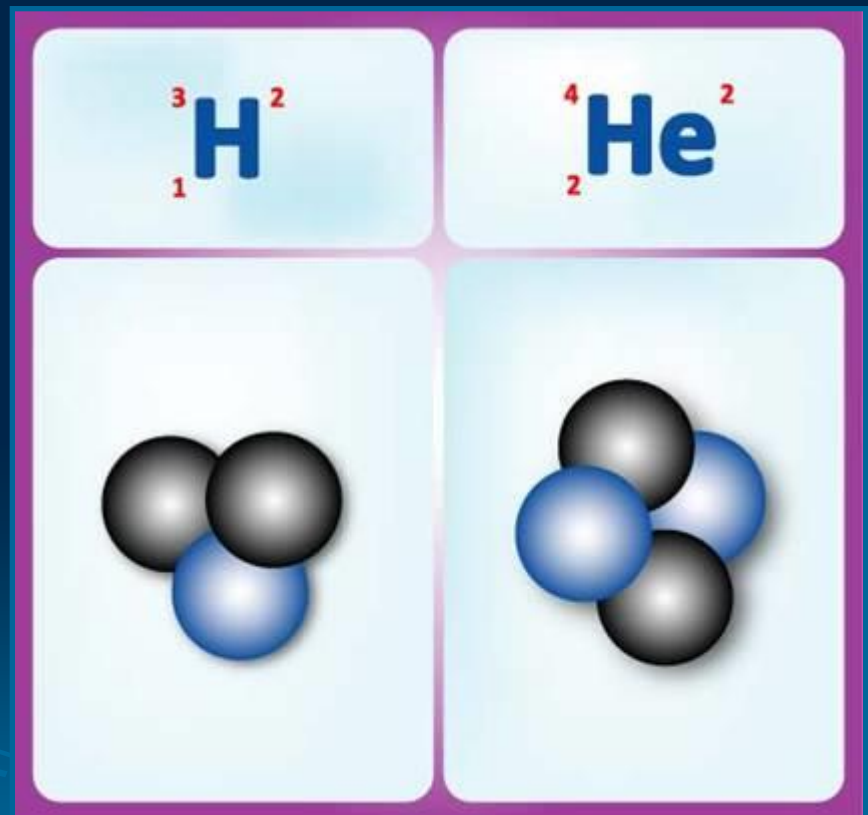
Jinak:

**Jádro „A“ je izotonem jádra „B“**, pokud jádro „A“ má neutronové číslo shodné s jádrem „B“.

Tedy to platí i naopak:

**Jádro „B“ je izotonem jádra „A“.**

## Příklad dvou izotonů



# Izobary

## ➤ Stejně A

Dvě jádra (skupinu jader) označíme jako **izobary**, pokud mají stejné **nukleonové číslo A** a liší se v **protonovém čísle Z** (tedy i v neutronovém čísle  $N = A - Z$ ).

Jinak:

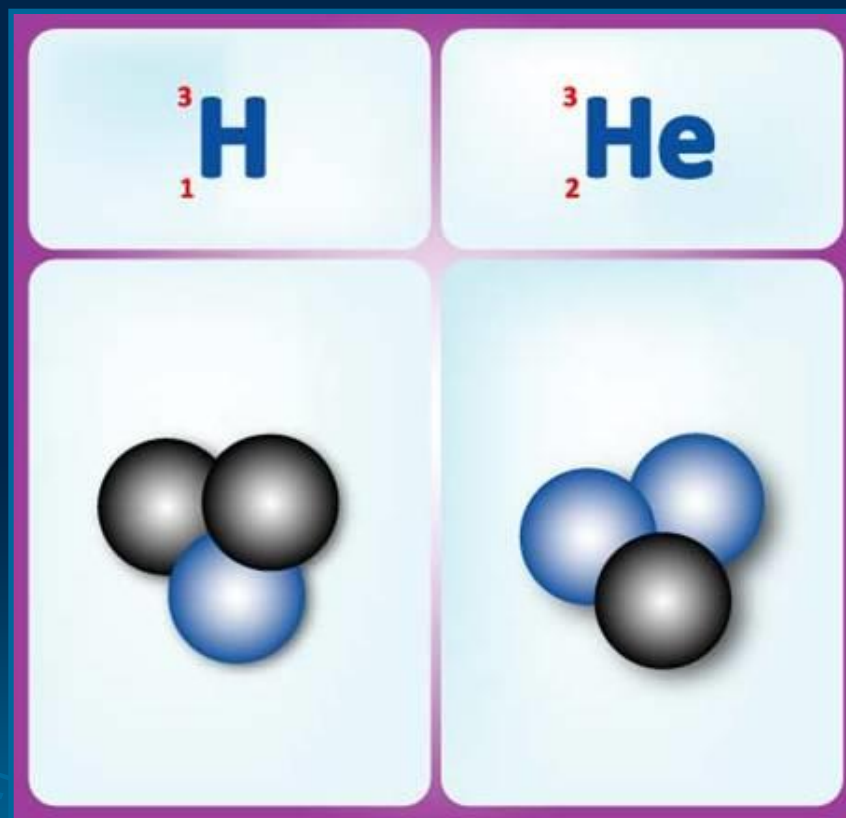
Jádro „A“ je izobarem jádra „B“, pokud jádro „A“ má nukleonové číslo shodné s jádrem „B“.

Tedy to platí i naopak:

Jádro „B“ je izobarem jádra „A“.

**Atomy či jádra dané skupiny izobarů (určené konkrétním A) mají přibližně stejné hmotnosti.**

## Příklad dvou izobarů



Hmotnosti se budou lišit zejména v důsledku **hmotnostního úbytku** (rozdíl v hmotnostech neutronu a protonu jsou malé)

# Další klasifikace jader

- **Izomer** (stabilního jádra) – jádro téhož nuklidu v metastabilním stavu (dlouho žijící excitovaný stav).

První jaderný izomer objevil Otto Hahn v r. 1921.

Protaktinium  $^{234}_{91}\text{Pa}$

Jeho izomerem je  $^{234\text{m}}\text{Pa}$

V obou případech probíhá přeměna beta minus

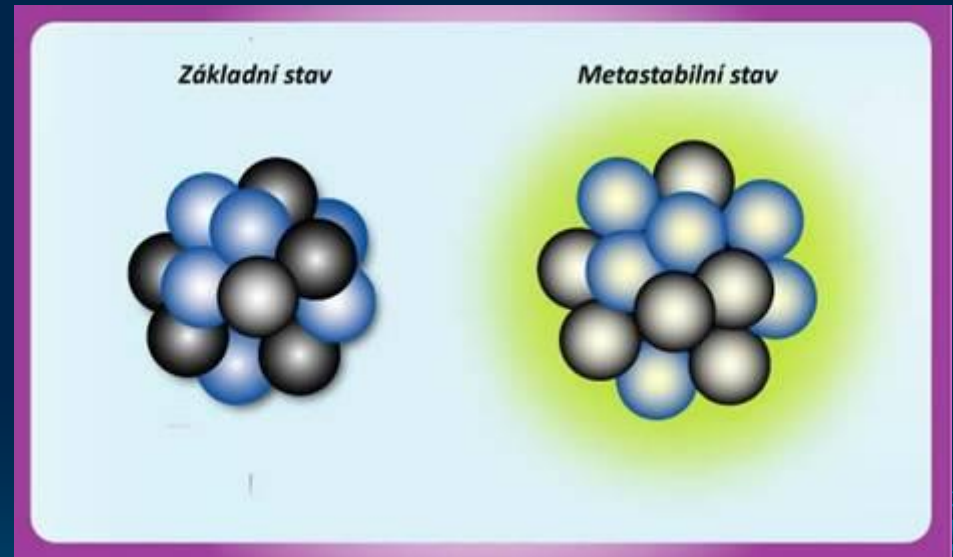
**Základní stav**  
(nestabilního) jádra

Poločas přeměny  
**6,75 hodin**

**Metastabilní excitovaný stav**  
jádra

-existuje dostatečně dlouho, ale kratší dobu než jádro v základním stavu.

Poločas přeměny  
**1,17 min**



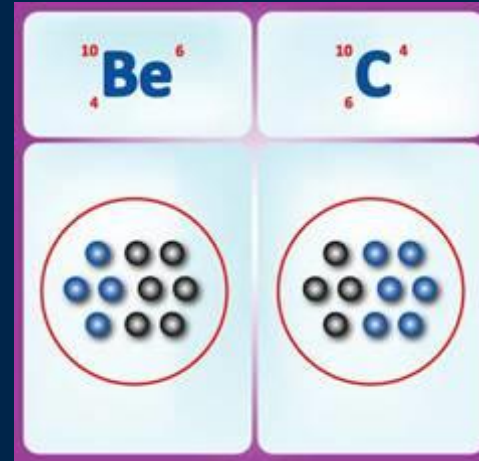
Nestabilní jádro nuklidu se přemění některým typem radioaktivní přeměny

- **Radionuklid** – radioaktivní nuklid

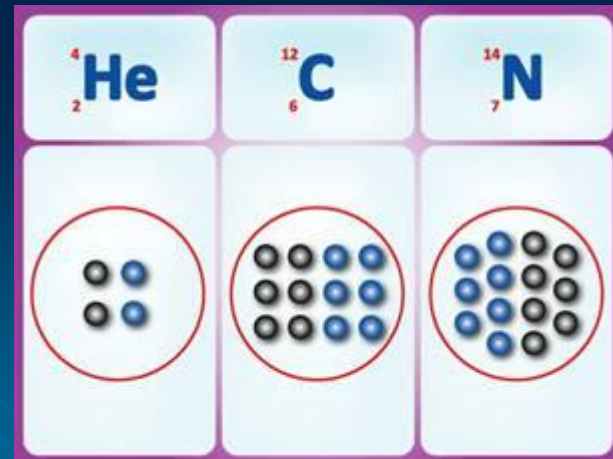


# Další klasifikace jader

- **Zrcadlové jádro** –  
prohození Z a N



- **Symetrické jádro** -  
stejný počet protonů  
as neutronů.



- Podle sudosti či  
lichosti Z a N, např.  
**sudo-liché jádro** atp.

# II. Další charakteristiky jader

- Hmotnost
- Vazebná energie
- Elektrický náboj
- Izospin
- Jaderný spin
- Magnetický moment jádra
- Poloměr jádra

# Hmotnost a vazebná energie atomového jádra

## Hmotnost atomového jádra $M$

je rovna součtu hmotností protonů a neutronů v jádře, který je zmenšen o velikost hmotnostního úbytku  $|\Delta m|$  ( $\Delta m < 0$ ):

$$M = (Z m_p + N m_n) + \Delta m.$$

Upravený vztah pro hmotnostní úbytek – ten souvisí s vazebnou energií  $E_V$

V jaderné fyzice se udává v násobcích atomové hmotnostní konstanty  $m_u$  nebo se místo ní uvádí odpovídající hodnota klidové energie  $Mc^2$  v MeV.

## Vazebná energie jádra $E_V$

je energie která by se uvolnila při hypotetickém vzniku jádra z volných nukleonů. Pro jádro o klidové hmotnosti  $M$  ji tedy můžeme definovat jako rozdíl mezi klidovou energií jádra  $E = Mc^2$  (interagující nukleony) a celkovou klidovou energií volných (tj. neinteragujících) nukleonů, která je dána součtem klidových energií jednotlivých nukleonů. Pro vazebnou energii jádra tak platí

$$E_V = Mc^2 - (Z m_p c^2 + N m_n c^2).$$

Vazebnou energii lze spočítat z hmotnostního úbytku  $\Delta m$

V jaderné fyzice se vazebná energie udává v MeV.

**Úkol:**  
spočítejte kolik činí hodnota  $m_u/c^2$  v MeV

**931.5 MeV**

$$E_V(Z,A) = [ A_r(Z,A) - Z \cdot A_r(1,1) + (A-Z) \cdot A_r(0,1) ] \cdot m_u/c^2$$

# Elektrický náboj a elektrický kvadrupólový moment jádra<sup>0</sup>

## Elektrický náboj jádra $Q$

se v jaderné fyzice uvádí v  $Z$  násobcích elementárního el. náboje, tj.  $Q = Ze$ , kde  $Z$  je protonové číslo. Místo  $Q$  se tedy užívá  $Z$ .

Obdobného postupu se používá i u jiných částic než jsou jádra a tak číslo  $Z$  je **zobecněné protonové číslo** (určuje pouze náboj částice v násobcích  $e$  a ne počet protonů v částici).

Například náboj elektronu vyznačíme podobně jako u jádra

$-1e^-$

## Elektrický kvadrupólový moment

jádra se uvádí jako charakteristika jádra, protože dipólový elektrický moment jádra je nulový.

Zjednodušené vysvětlení – v jádře náboj rozdělen symetricky vzhledem k těžišti jádra

# Jaderný spin a magnetický moment jádra

## Jaderný spin $J$ (též $I$ )

je celkový moment hybnosti atomového jádra, které nevykonává žádný translační pohyb v prostoru. Tzn. jádro jako celek má orbitální moment hybnosti roven nule.

Z tohoto pohledu celkový moment hybnosti představuje „vlastní“ moment hybnosti jádra, tedy spin jádra. Hodnota jaderného spinu se získá součtem vlastních momentů hybnosti, tj. spinů, a orbitálních momentů hybnosti všech nukleonů v jádře. Odtud plyne, že jaderný spin není celkovým vlastním momentem hybnosti, tj. celkovým spinem, jednotlivých nukleonů v jádře.

## Magnetický moment jádra $\mu_J$

je celkový magnetický moment atomového jádra, které nevykonává žádný translační pohyb v prostoru.

Udává se v násobcích **jaderného magnetonu**  $\mu_N = \frac{e \hbar}{2 m_p}$  kde  $m_p$  je klidová hmotnost protonu,  $e$  elementární el. náboj a  $\hbar$  Planckova konstanta..

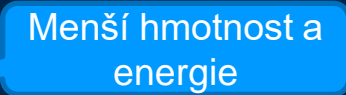
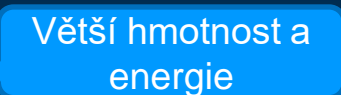
**Magnetický moment jádra** je roven součtu magnetických momentů (vlastních i orbitálních) všech nukleonů.

Vlastní moment hybnosti složené částice - jádra

Vlastní magnetický moment složené částice – jádra. Při skládání je třeba vzít odlišné hodnoty Landého faktoru pro vlastní momenty protonu a neutronu a jejich orbitálních momentů.

**Jaderný magneton** se používá jako mimosoustavová jednotka mag. momentu v jaderné fyzice

# Izospin

- **Nukleon** můžeme chápat jako **jedinou částici**,
- která má **dva stavy s různou hodnotou el. náboje, klidové energie a hmotnosti**
- Tyto dva nábojové stavy odpovídají **dvěma hodnotám z-tové komponenty** nově zavedené veličiny **izotopického spinu**, stručně **izospinu**.
- **Izospin se zavádí pro skupiny částic („multiplety částic“)** s blízkou klidovou energií jako **analogie spinu**. Určují jej **kvantová čísla T a Tz**.  
Počet částic v multipletu (resp. energetických stavů jedné částice) odpovídá počtu různých hodnot z-ové komponenty izospinu.
- Protože na rozdíl od spinu **nemá izospin fyzikální rozměr**, je Tz je zároveň hodnotou z-tové komponenty.
- **Izospinová čísla pro nukleon** jsou  $T = 1/2$  ,  $T_z = \pm 1/2$ .
- **Protonový stav** nukleonu s klidovou energií  $m_p c^2$  odpovídá **izospinu  $T_z = 1/2$** .  

- **Neutronový stav** nukleonu s klidovou energií  $m_n c^2$  odpovídá **izospinu  $T_z = -1/2$** .  


**Analogie se spinem (viz Zeemanův jev u atomu).** V případě zapnutí mag. pole se původní energetická hladina rozštěpí na  $2S+1$  hladin podle rostoucího/klesajícího  $S_z$  (záporný náboj => opačný směr mag. momentu a spinu => nejnižší energie pro  $S_z = -S$  odpovídající mag. Momentu souhlasně orientovanému se směrem mag. pole). Např. pro jeden volný elektron v poli B vzniknou dvě hladiny. Spodní  $S_z = -1/2$ , horní  $S_z = +1/2$ . Pro kladně nabitý proton bude opačné pořadí hladin.



# Izospin jádra a poloměr jádra

## Izospin jádra

dostaneme složením izospinů jednotlivých nukleonů.

Pro jádra se sudým, resp. lichým  $A$  dostáváme celočíselnou, resp. poločíselnou (liché násobky  $1/2$ ) hodnotu izospinu.

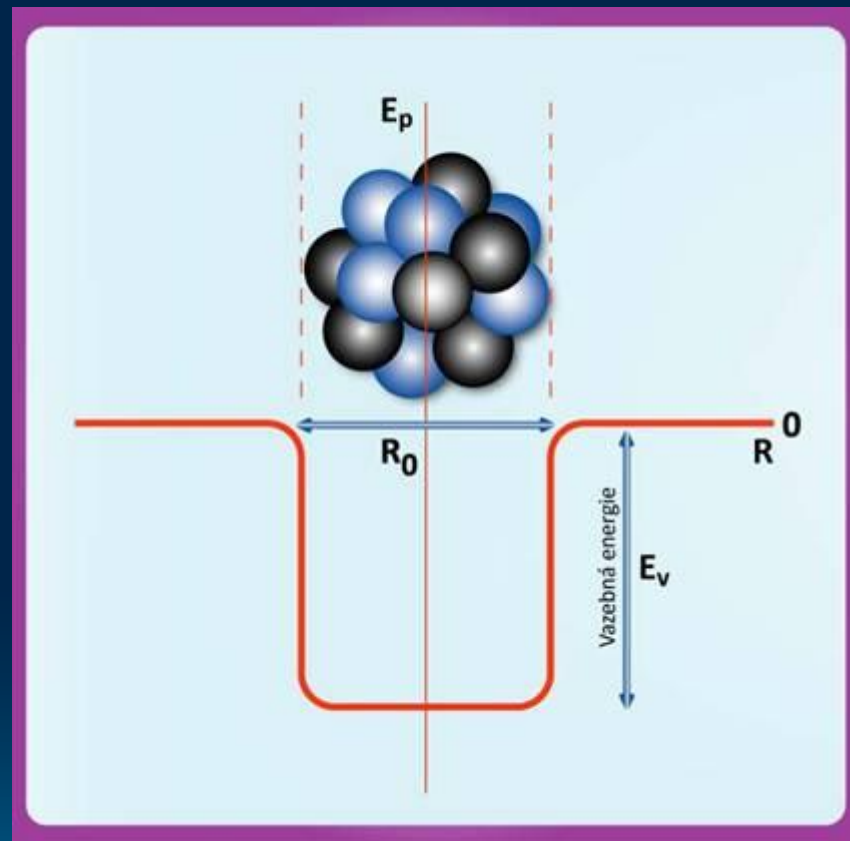
## Poloměr jádra

je fyzikální charakteristika jádra vycházející ze zjednodušené klasické představy atomového jádra jako ostře ohraničené koule. Poloměr jádra je poloměr této koule.

Jako charakteristika má pouze orientační význam, protože jádro není obecně sféricky symetrické a z hlediska kvantové mechaniky není ani ostře ohraničeno. V jakékoli vzdálenosti od jádra existuje nenulová pravděpodobnost nalezení nukleonu jádra. Poloměr jádra je tedy poloměr koule, uvnitř které je vysoká pravděpodobnost nalezení nukleonů. V závislosti na hodnotě této pravděpodobnosti se pak mění poloměr jádra, proto se pracuje většinou jen s řádovou hodnotou, která odpovídá řádovému dosahu jaderných sil ( $10^{-15}$  m).

# Vlastnosti jaderných sil

- Síly působící mezi nukleony v jádře atomu.
- Jsou velké ve srovnání se silami jiných typů fyzikálních interakcí – **silná interakce – velké vazebné energie**
- Jsou silami **krátkého dosahu**, který zhruba odpovídá lineárnímu rozměru jádra (řádově  $10^{-15}$  m).
- Působí vždy jen mezi nejbližšími nukleony. Daný nukleon se tedy váže jen s omezeným počtem nukleonů, což označujeme jako **nasycení jaderných sil**.
- Nepůsobí na částice označované jako leptony, mezi něž patří i **elektron**.





# Fyzikální pole a jejich kvanta

## Fyzikální pole a interakce

Vzájemné působení objektů např. částic

- Každý typ **interakce** v přírodě může být popsán ve formě **fyzikálního pole**.

Má silové účinky na částice, je popsáno rozložením sil nebo potenciálu v čase a prostoru

Je generováno jinými částicemi – typ interakce dle druhu a vlastností částic (např. hmotnost, náboj atp.), může se i šířit ve formě vln

## Kvantování pole

- **Energie pole se mění skokově** po daných (ale velmi malých) množstvích tj. po **kvantech (energie)**.
- Každé **fyzikální pole** je v principu možné v rámci kvantové teorie popsat jako excitace **částic pole** – tzv. **kvant pole**.

Zde se **kvantem pole** rozumí **částice pole** s daným **kvantem energie**

- Příslušná **kvanta tohoto pole** pak hrají roli **zprostředkujících částic** (ve formě **virtuálních č.**) interakce
- **Silové účinky pole (interakce mezi reálnými částicemi)** vysvětlujeme jako **výměnu virtuálních částic pole**

Někdy se označují jako **výměnné částice**

- O popisu pole pomocí kvant hovoříme jako o **kvantování pole**.

Příklad - **Kvantem elektromagnetického pole** jsou částice **fotony**.

## Virtuální částice

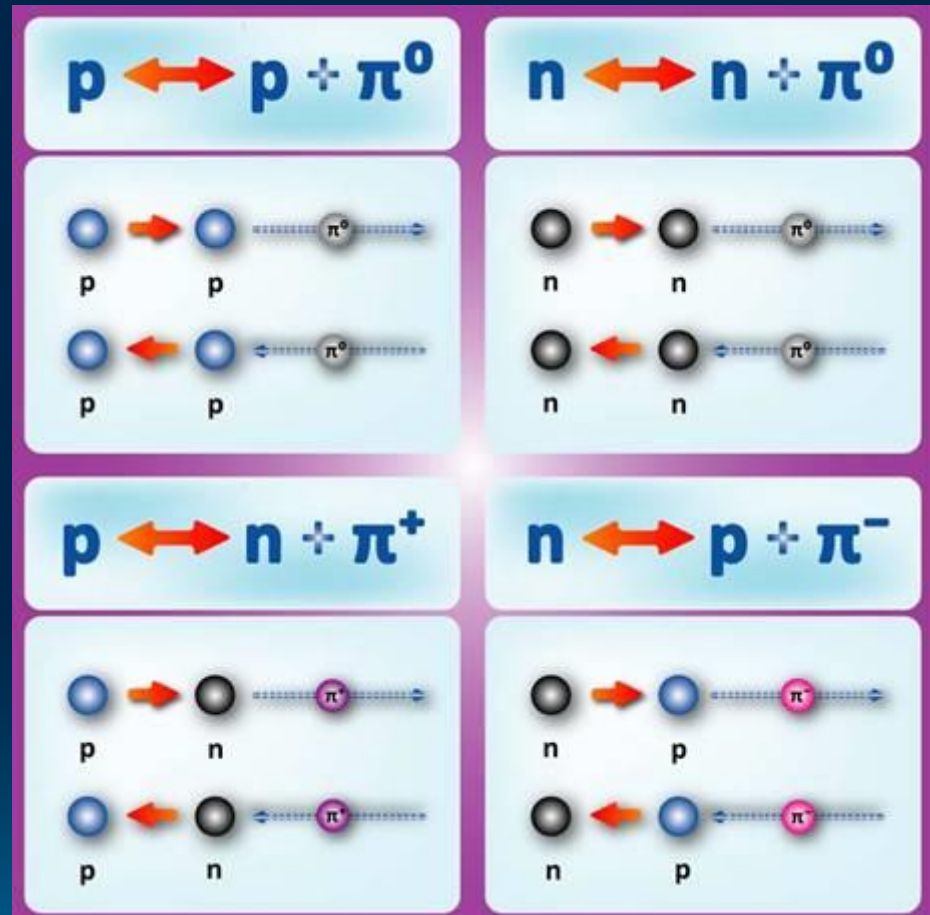
- Jsou to částice, které na rozdíl od tzv. skutečných **nelze přímo pozorovat**, aniž bychom je v procesu měření změnili na skutečné.
- Virtuální částice existují pouze po dobu, která je kratší než čas nutný ke změření jejich energie (podle relací neurčitosti  $\Delta E \Delta t \approx h$ ).

# Yukawova teorie

- jadernou interakci zprostředkovávají takzvané **piony**

$\pi^-$ ,  $\pi^0$ ,  $\pi^+$  .

- nukleony si vyměňují **virtuální piony**, může přitom docházet k přeměnám nukleonů

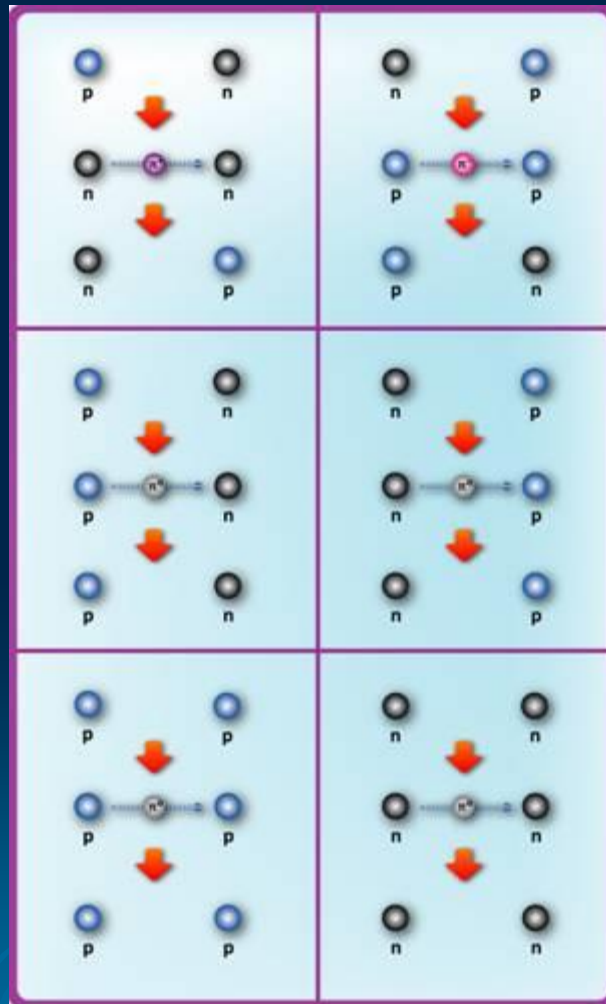


# Výměna pionů

Probíhají neustálé přeměny nukleonů.

Platí ale

- Zachovává se elektrický náboj jádra, tedy protonové číslo
- Počet nukleonů v jádře, tedy nukleonové číslo



## Poznámka:

Hmotnost zprostředkujících částic odhadnutá na základě dosahu jaderné interakce ležela mezi hmotnostmi nukleonů (těžké částice) a elektronu (lehké částice) označeny jako **mezony** (středně těžké částice).

Částice o takové byla hmotnosti objevená v kosmickém záření a byla nazvána „**mezon**“  $\mu$ , ukázala se ovšem k jaderným silám netečná a nepatří tak do skupiny mezonů v rámci klasifikace elementárních částic.

Je pro ni tak lépe používat označení **mion**.

# Radioaktivita

- Jev samovolné (spontánní) jaderné přeměny radionuklidu (tzv. **radioaktivní přeměny**), která je doprovázena
- emisí **radioaktivního záření** jako je  $\alpha$ ,  $\beta^+$  nebo  $\beta^-$ ,  $\gamma$ , popř.
- záchytem elektronů,  
či
- emisí protonů či neutronů  
nebo
- emisí fragmentů jader.

Radioaktivitu objevil v roce 1895 A. H. Becquerel při výzkumu fosforescence látek.

Zjistil, že některé látky vyzařovaly záření, které obdobně jako světlo způsobovalo zčernání fotografické emulze.

# Radioaktivní záření

proud částic, které vznikají v jádře při jeho **radioaktivní přeměně**.

rozlišujeme zejména záření

- **alfa,**
- **beta plus,**
- **beta minus a**
- **gama,**



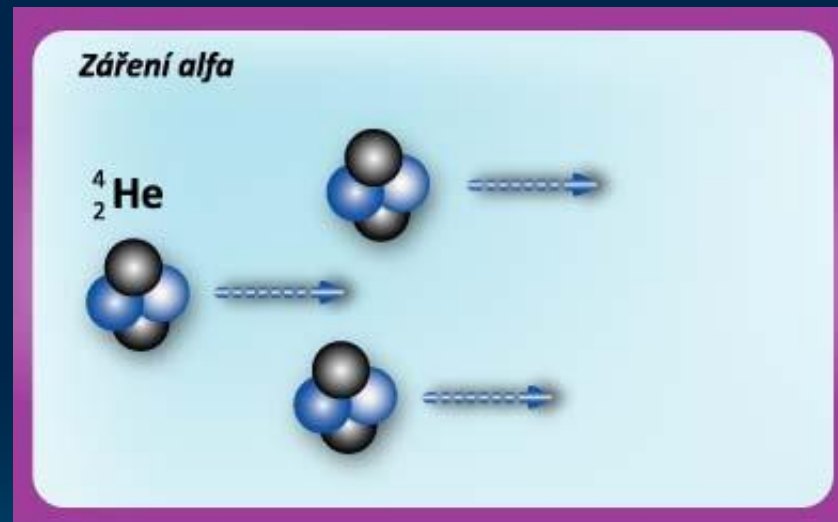
## JADERNÉ ZÁŘENÍ

Tyto druhy záření mohou vznikat třeba i při jiných jaderných přeměnách, než jsou radioaktivní, nebo jako důsledek srážek a přeměn dalších částic.

ale za **radioaktivní záření** můžeme považovat i proud jiných částic (např. protonů, pokud vznikají při radioaktivní přeměně)

# Záření alfa

- je tok jader  ${}^4_2\text{He}$  (označují se též jako **částice  $\alpha$** ) emitovaných jádrem při jaderných přeměnách.

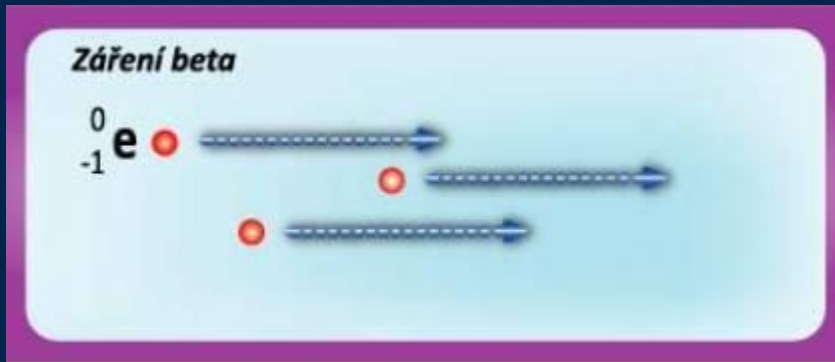


- Rychlost částic alfa emitovaných při radioaktivních přeměnách se pohybuje okolo 20 000 km/s.



# Záření beta minus a beta plus

- záření beta minus je tok elektronů  ${}_{-1}^0\text{e}$  (neboli částic  $\beta^-$ ),



Antičástice elektronu –  
má stejnou hmotnost  
jako elektron ale opačný  
náboj

- záření beta plus je tok pozitronů  ${}_{+1}^0\text{e}$  (neboli částic  $\beta^+$ )

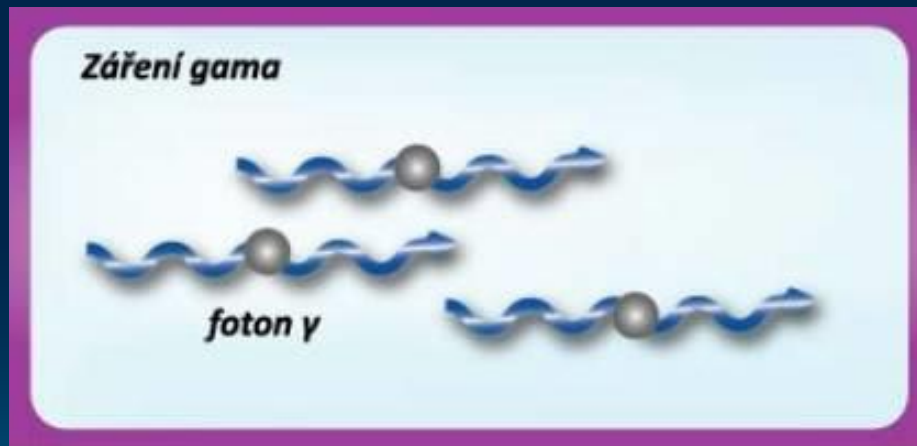
emitovaných jádrem při jaderných přeměnách.

- Částice beta emitované při radioaktivních přeměnách mají rychlosti asi 280 000 km/s.



# Záření gama

- je **elektromagnetické záření** krátkých vlnových délek  $\lambda = 10^{-10}$  m (fotonů s vysokou energií) emitované při jaderných přeměnách.



Jde tedy o **fotony emitované jádrem**, nikoliv z elektronového obalu atomu

- Jedná se o **pronikavé záření**.

Málo se pohlcuje látkou (o nízké tloušťce)

# Typy radioaktivních přeměn

➤ **přeměna alfa,**

Hlavně těžká jádra v rámci přeměnových řad

➤ **přeměna beta minus,**

➤ **přeměna beta plus,**

➤ **elektronový záchyt,**

Nejčastější, jádra se zbavují nadbytku protonů či neutronů jejich přeměnou beta plus nebo EZ resp. beta minus

➤ **přeměna s emisí protonů, či neutronů**

Hlavně lehká velmi nestabilní jádra se zbavují nadbytku protonů či neutronů jejich přímou emisí

➤ **přeměna s emisí fragmentů jader.**

Velmi těžká nestabilní jádra podléhají spontánnímu štěpení

## Podmínky uskutečnění přeměn

1. platnost zákonů zachování

- elektrického náboje
- počtu nukleonů
- aj.

2. samovolnost jad. přeměny vyžaduje

- snížení celkové klidové energie po přeměně (tzv. **separační energie** je záporná)

**Separační energie radioaktivní přeměny S** je **rozdíl** celkové klidové energie částic **po** radioaktivní přeměně a **před** ní.

Tedy součet klidových energií dceřiného jádra (či jader) a emitované částice (či částic) rad. záření

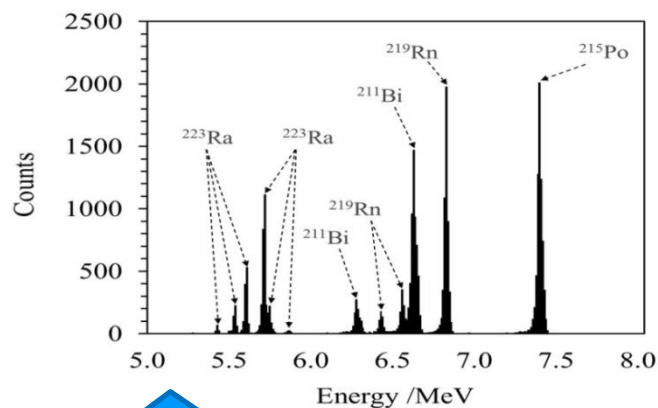
**minus**

klidová energie mateřského (rodičovského) jádra (případně součtu klidových energií zahrnující částici zachycenou jádrem před přeměnou).

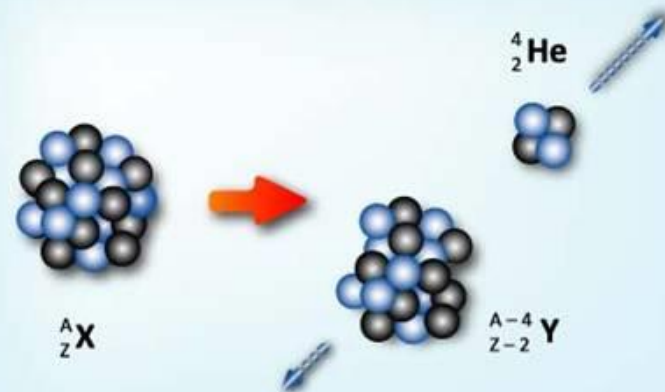
# Přeměna alfa

- energetické spektrum emitovaného záření **alfa** je **diskrétní**

Alpha decay spectrum of  $^{223}\text{Ra}$  and daughters (courtesy Sean Collins, NPL).



Podle zákona zachování energie a hybnosti se energie uvolněná přeměnou rodičovského jádra jednoznačně rozdělí mezi obě vzniklé částice (alfa částici a dceřiné jádro) ve formě jejich kinetické energie. Energetické hladiny v jádrech jsou diskrétní, tedy i uvolněná energie je jednoznačně dána jejich rozdílem. Spektrum částic alfa tak bude **diskrétní**

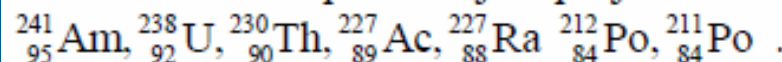


## Separáční energie přeměny alfa

$$S_\alpha(A, Z) = c^2 [M(A-4, Z-2) + M(4, 2) - M(A, Z)] < 0$$

## Příklad

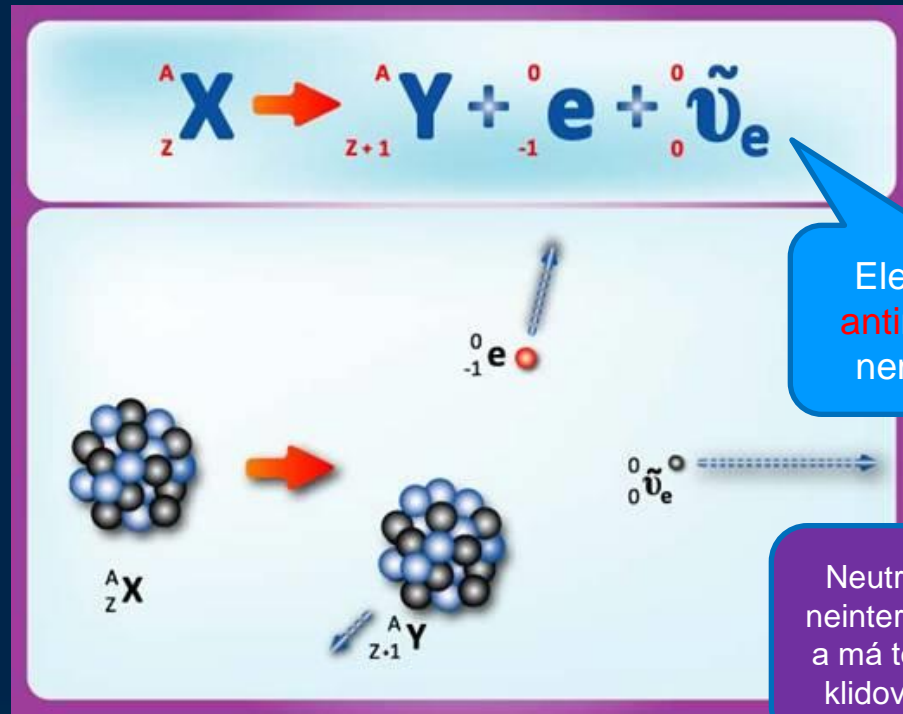
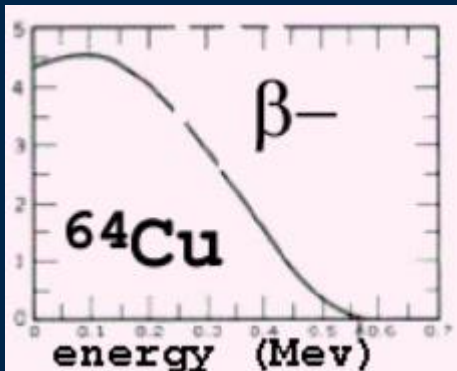
Přeměnou alfa se přeměňují např. jádra:



Po přeměně se celková klidová energie sniží

# Přeměna beta minus

- energetické spektrum vzniklého záření **beta minus** je **spojité**



Elektronové **anti**neutrino – nemá náboj

Neutrino prakticky neinteraguje s látkou a má téměř nulovou klidovou hmotnost

Při přeměně na tři částice (dceřiné jádro, částice beta a neutrino) již rozdělení energie na základě zákona zachování energie a hybnosti není jednoznačné, kin. energie každé z částic se tak mění **spojitě**.

## Separační energie přeměny beta minus

$$S_{\beta^-}(A, Z) = c^2 [M(A, Z+1) + m_e - M(A, Z)] < 0$$

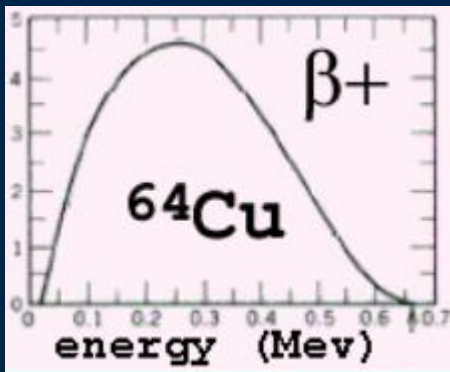
### Příklad

Přeměnou  $\beta^-$  se přeměňuje např. tritium  ${}^3_1\text{H}$  na  ${}^3_2\text{He}$ .

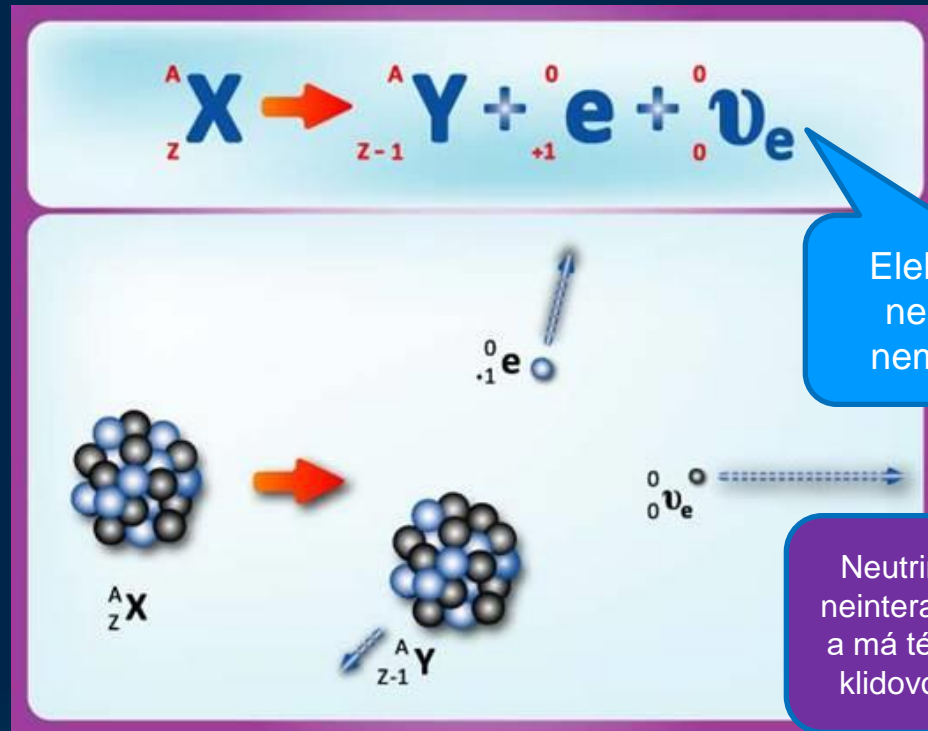
V bilanci klidové energie tak neutrino nefiguruje

# Přeměna beta plus

- energetické spektrum vzniklého záření **beta plus** je **spojité**



Při přeměně na tři částice (dceřiné jádro, částice beta a neutrino) již rozdělení energie na základě zákona zachování energie a hybnosti není jednoznačné, kin. energie každé z částic se tak mění **spojitě**.



## Separační energie přeměny beta plus

$$S_{\beta^+}(A, Z) = c^2 [M(A, Z-1) + m_e - M(A, Z)] < 0$$

## Příklad

Přeměnou  $\beta^+$  se přeměňuje

nuklid  ${}^{30}_{15}\text{P}$ , který je uměle připraven reakcí  $\alpha + {}^{27}_{13}\text{Al} \rightarrow {}^{30}_{15}\text{P} + \text{n}$ , na  ${}^{30}_{14}\text{Si}$ .

V bilanci klidové energie tak neutrino nefiguruje

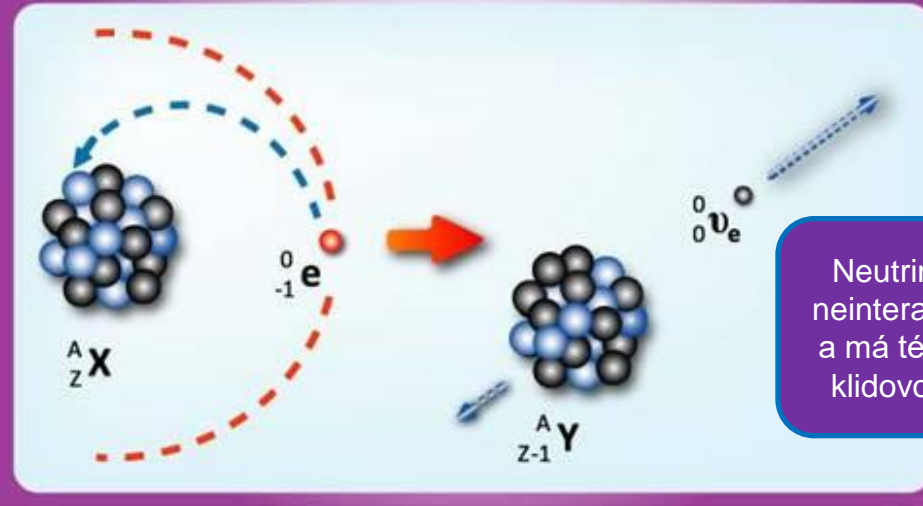


# Elektronový záchyt

- dochází k zachycení elektronu z vnitřní slupky elektronového obalu
- konkurenční proces k přeměně beta plus



Elektronové neutrino – nemá náboj



Neutrino prakticky neinteraguje s látkou a má téměř nulovou klidovou hmotnost

**Separační energie přeměny elektronového záchytu**

$$S_e(A, Z) = c^2 [M(A, Z-1) - m_e - M(A, Z)] < 0$$

V bilanci klidové energie tak neutrino nefiguruje

## Příklad

Jádro  ${}^{80}_{35}\text{Br}$  se může přeměňovat přeměnou beta plus, beta minus a navíc i záchytem elektronu.

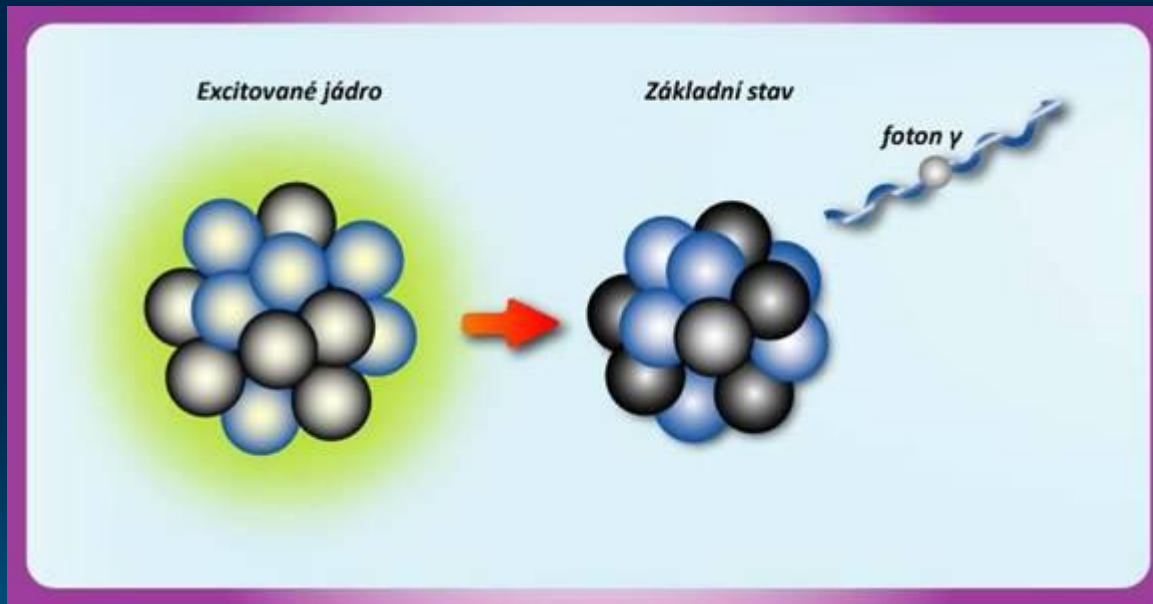
# Deexcitace jader

- obecně se po radioaktivní přeměně nachází **jádro v excitovaném stavu**.
- **jádro se snaží dostat do stavu základního**, přičemž se zbavuje energie
  - buď **přechodem gama**
  - nebo **vnitřní konverzí**



# Přechod gama

- (též **emise gama**) je proces **deexcitace** atomového jádra emisí fotonu záření gama.

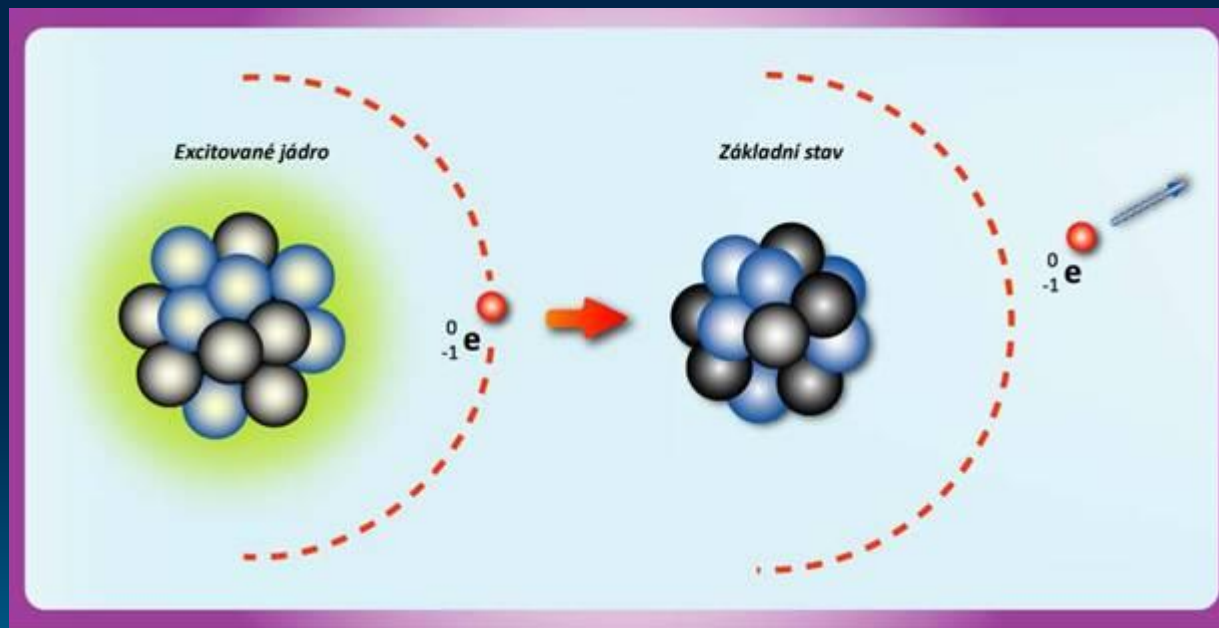


Energie fotonu je dána rozdílem diskretních energetických hladin jádra.

- Energetické spektrum záření gama je **diskrétní**.

# Vnitřní konverze

- proces **deexcitace atomového jádra**, při kterém se energie excitovaného jádra předá prostřednictvím přímé **elektromagnetické interakce** některému z **elektronů atomového obalu** a ten z atomu vylétá.



- Energetické spektrum konverzních elektronů je **diskrétní**

# Druhy záření emitovaného během radioaktivní přeměny

- **Přeměna alfa** – radioaktivní záření alfa
- **Přeměna beta minus** – radioaktivní záření beta minus
- **Přeměna beta plus** – radioaktivní záření beta plus
- **Elektronový záchyt**

**Deexcitace** vzniklého nestabilního atomového jádra

**emisí (resp. přechodem) gama**  
- radioaktivní záření gama

Po **el. záchytu** či **vyražení (emise) elektronu vnitřní slupky**

do ní přechází elektron nějaké vyšší slupky a poté dochází k

**deexcitaci atomového obalu**

(předání získané kinetické energie tohoto elektronu) prostřednictvím

- **emise (fotonů)** charakteristického **rentgenového záření** z atomového obalu
- **emise (Augerových) elektronů** z atomového obalu (tzv. **Augerův jev**)

**vnitřní (resp. elektronovou) konverzí**

- **přímá emise (konverzních) elektronů** z atomového obalu

**alternativní proces (à la jaderný fotoefekt)**

- **nepřímá emise elektronů** z atomového obalu následující po dopadu reálného fotonu z gama konverze je méně pravděpodobná

**Záření**  
(emise fotonů či elektronů) z atomového obalu není radioaktivním (či jaderným) zářením

# Aktivita

- úbytek počtu dosud nepřeměněných jader za časovou jednotku.
- Jednotkou aktivity je **becquerel**, značka **Bq**, rozměr jednotky je  $s^{-1}$ .
- Stará jednotka aktivity **curie** ( $1\text{Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{Bq}$ ),

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

Přibližně aktivita  
1 gramu izotopu  
 $^{226}\text{Ra}$ .

# Zákon radioaktivní přeměny

Aktivita  $A$  v čase  $t$  (počet přeměn za sekundu, resp. rychlost přeměny) je přímo úměrná počtu dosud nepřeměněných jader  $N$  daného radionuklidu v čase  $t$ , tedy

$$A(t) = \lambda N(t)$$

kde  $\lambda$  je *přeměnová konstanta* pro daný radionuklid.

Po dosazení za aktivitu máme **diferenciální tvar zákona**

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

Řešení této diferenciální rovnice získáme vydělením  $N(t)$ , integrací podle  $dt$  a působením exponenciální funkce.

Vyřešením dostaneme **exponenciální tvar zákona**

$$\begin{aligned} -\frac{dN}{N} &= \lambda dt \\ -\int_{N_o}^{N_t} \frac{dN}{N} &= \lambda \int_0^t dt \\ \ln N_t - \ln N_o &= -\lambda(t - 0) \\ \ln \frac{N_t}{N_o} &= -\lambda t \\ \frac{N_t}{N_o} &= e^{-\lambda t} \end{aligned}$$

Řešením je exponenciální závislost

$$N_t = N_o e^{-\lambda t}$$

# Poločas přeměny

- je doba, za níž se přemění polovina počátečního počtu  $N(0)$  dosud nepřeměněných jader,
- značka  $T$  (resp.  $T_{1/2}$ ),
- přesněji *čas polopřeměny*, dříve též *poločas rozpadu*,
- Platí přitom, že  $\lambda T = \ln(2)$ .

Vztah dostaneme z definice  $T$  aplikací exponenciálního tvaru zákona

$$N(T) = N(0) e^{-\lambda T} = N(0) / 2$$

$$e^{\lambda T} = 2$$

Aplikujeme na obě strany rovnice přirozený logaritmus

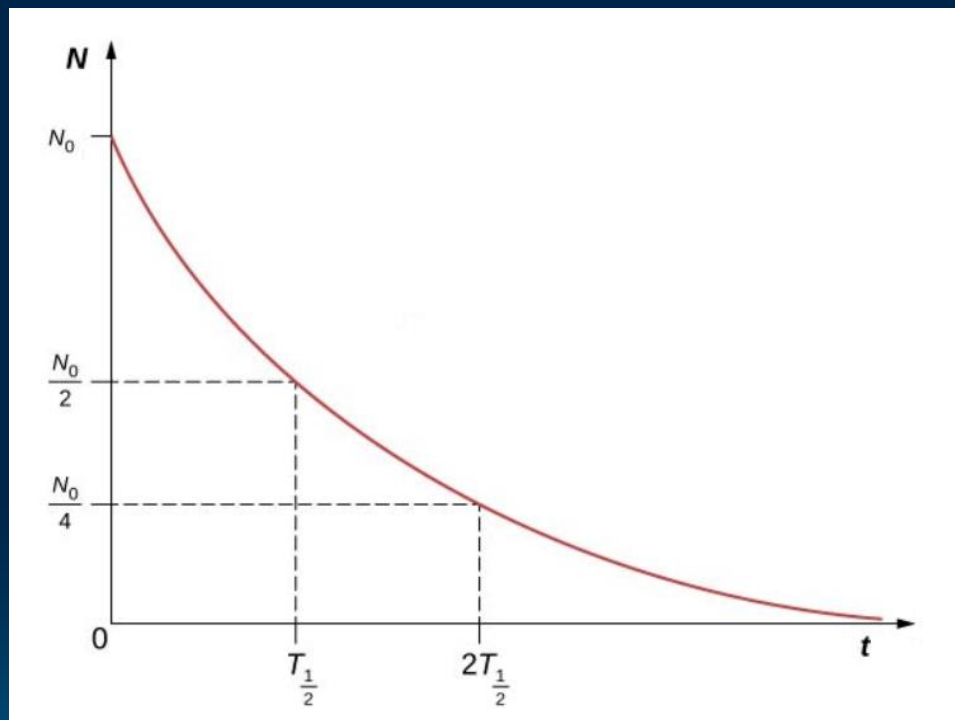
Přeměnila se polovina jader, polovina zůstává nepřeměněna

# Exponenciální tvar zákona

Důsledkem zákona radioaktivní přeměny je exponenciální úbytek počtu mateřských radioaktivních jader s časem

$$N(t) = N(0) e^{-\lambda t}$$

Představuje řešení rovnice diferenciálního tvaru zákona radioaktivní přeměny





# Řady radioaktivních přeměn

## Řady radioaktivních přeměn

*Uranová (urano-rádiová)*



*Aktiniová (urano-aktiniová)*



*Thoriová (urano-thoriová)*



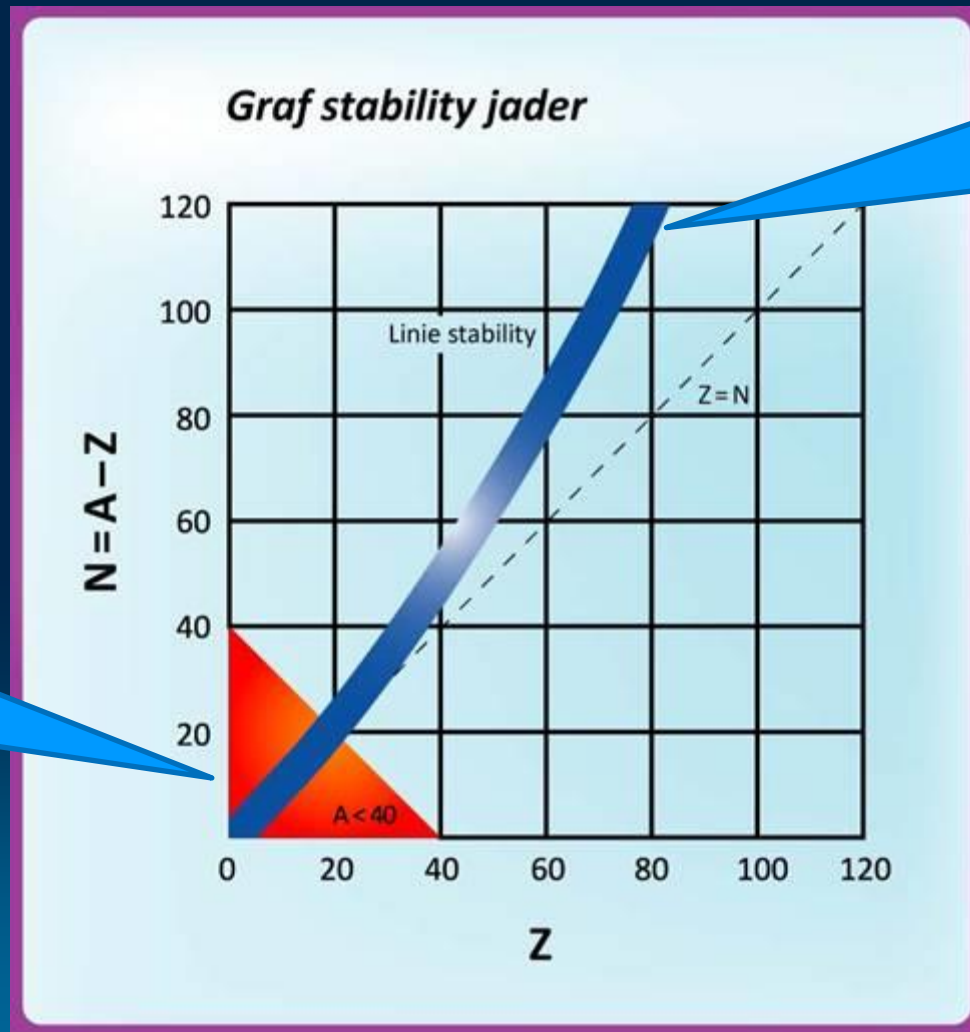
*Neptuniová*



$\rightarrow$  Přeměna  $\alpha$

$\downarrow$  Přeměna  $\beta$

# Graf stability jader



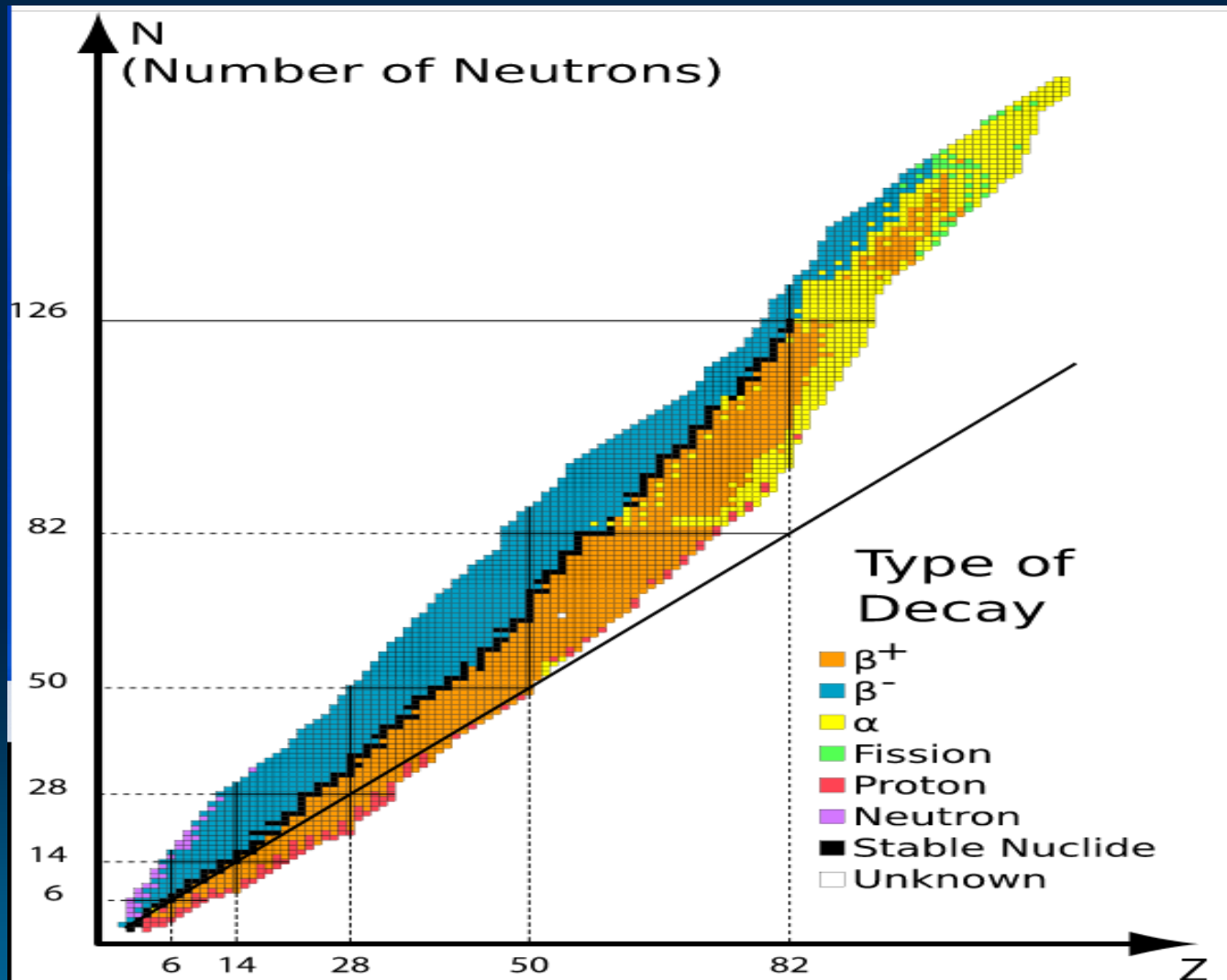
Stabilní  
lehká jádra  
jsou  
symetrická

Stabilní těžká  
jádra mají  
nadbytek  
neutronů nad  
protony

**Stabilní  
jádra**  
se  
spontánně  
nepřeměňují  
(nejsou  
radioaktivní)

# Graf stability jader

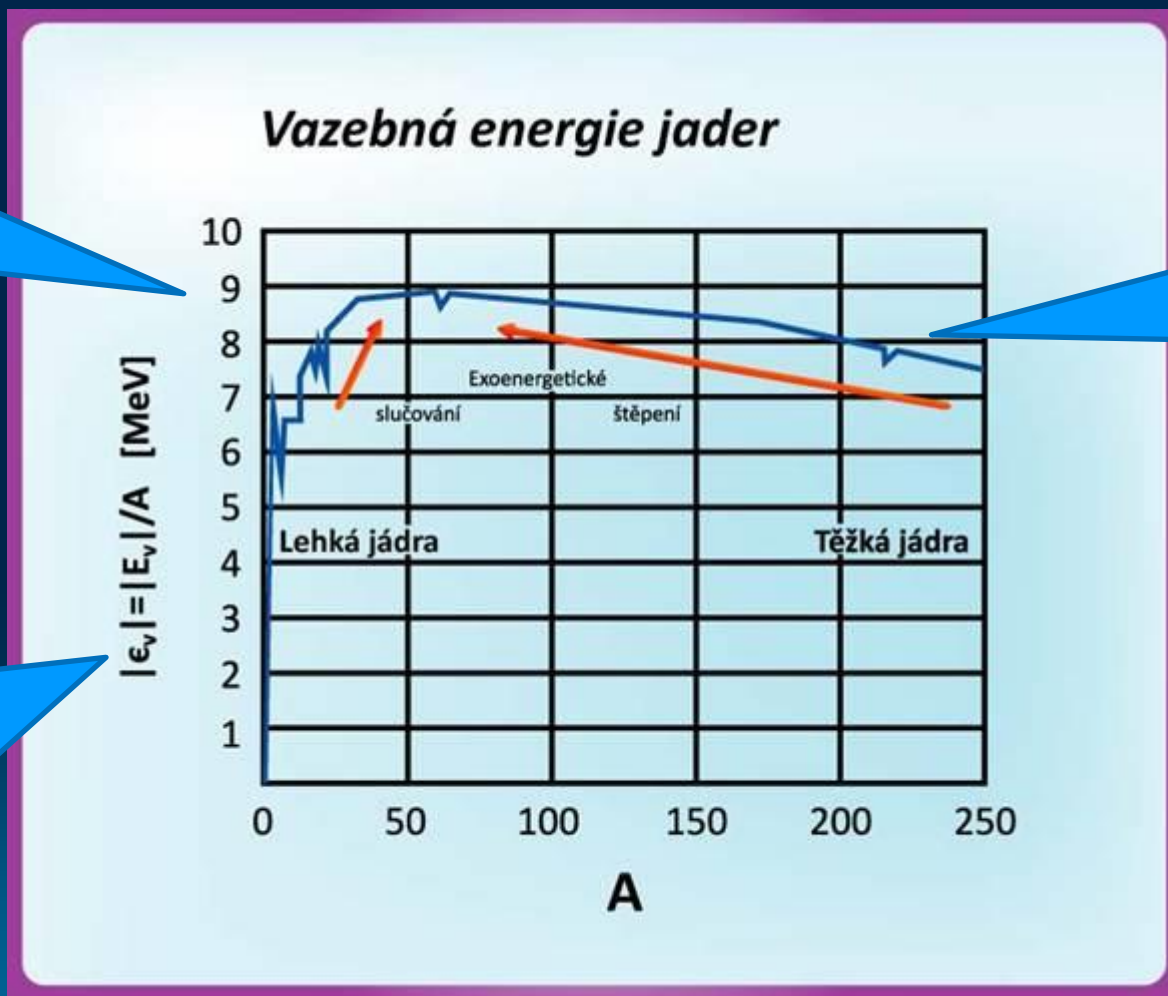
(přehled jader podle typu rad. přeměny)



# Vazebná energie jádra

Energie se uvolňuje slučováním lehčích jader

Absolutní hodnota záporné vazebné energie je zde vztažena na jeden nukleon.



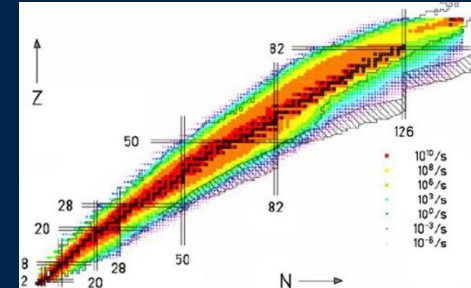
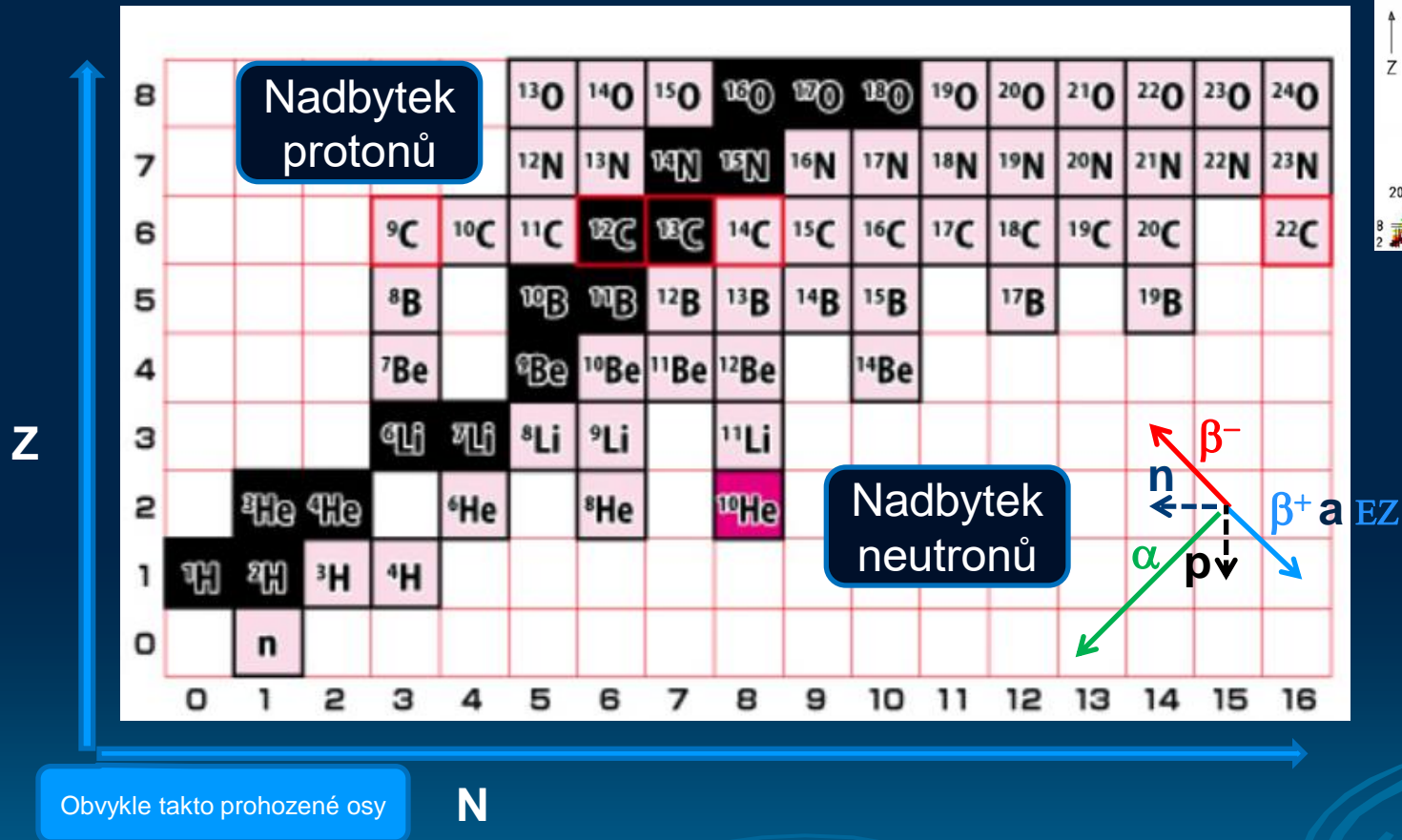
Energie se uvolňuje štěpením těžkých jader

# Magická čísla

- Pro určité hodnoty čísel  $Z$ ,  $N$  nebo  $A$  existují **lokální minima vazebné energie  $E_V$**  (resp. maxima  $|E_V|$ ).
- **Jádra jsou stabilnější než okolní v mapě nuklidů** (tj. zcela stabilní – nepodléhají radioaktivní přeměně, případně i radioaktivní, ale s výrazně delším poločasem přeměny).
- Tato čísla se označují jako **magická čísla**.
- **Jádra odpovídající magickým číslům jsou tak stabilnější, než okolní s trochu jinými hodnotami čísel  $Z$ ,  $N$  nebo  $A$ .**
- **Hodnoty magických čísel jsou 2, 8, 20, 28, 50, 82 v případě protonových a neutronových čísel** (u těch též 126) a
- **4, 12, 16, 20, 24 v případě nukleonových čísel.**
- Tuto skutečnost je možno objasnit s pomocí propracovanějších **slupkových modelů jádra.**

# Mapa nuklidů

- neboli „periodická tabulka“ nuklidů (příklad – výsek jejího začátku) - celá mapa např. [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b5/NuclideMap\\_stitched.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b5/NuclideMap_stitched.png)



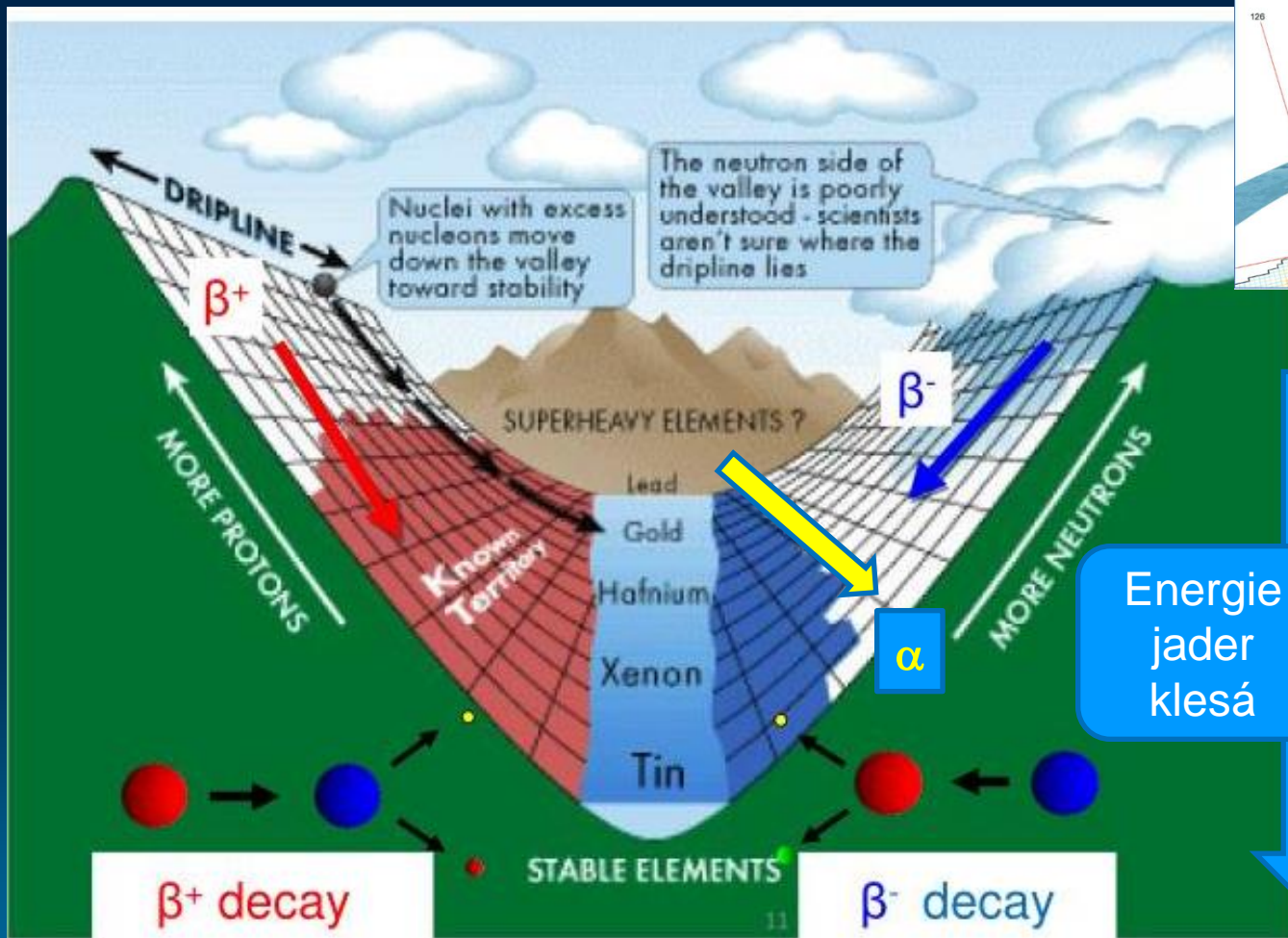
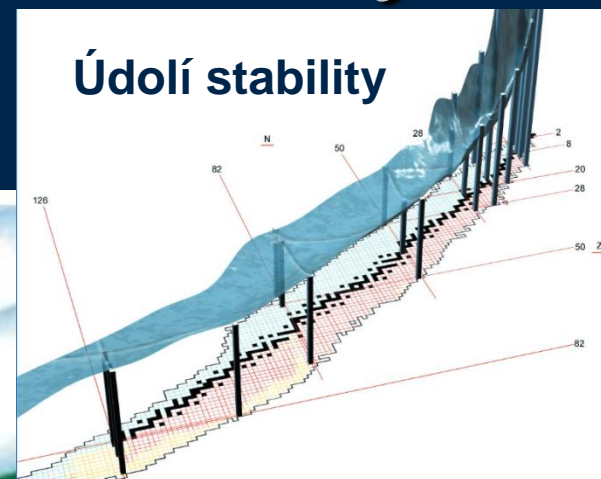
Radioaktivní přeměny určují dovolené cesty samovolných procesů na mapě nuklidů

Nadbytku **neutronů** se nestabilní jádro zbavuje **emisí elektronů nebo přímo neutronů**.  
 Nadbytku **protonů** se nestabilní jádro zbavuje **emisí pozitronu, záchytem elektronu nebo přímou emisí protonů** (těžká jádra pak podléhají **spontánnímu štěpení s emisí fragmentů**)



# Mapa nuklidů – údolí stability

Např. [http://www.nupec.org/pans/Data/CHAPT\\_6.PDF](http://www.nupec.org/pans/Data/CHAPT_6.PDF)  
<https://ns.ph.liv.ac.uk/~ajb/radiometrics/neutrons/default.htm>



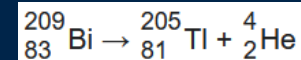
Energie jader klesá

Pokud budeme energii vynášet jako kladnou hodnotu, můžeme místo údolí hovořit o **pevnině stability** v moři nestability

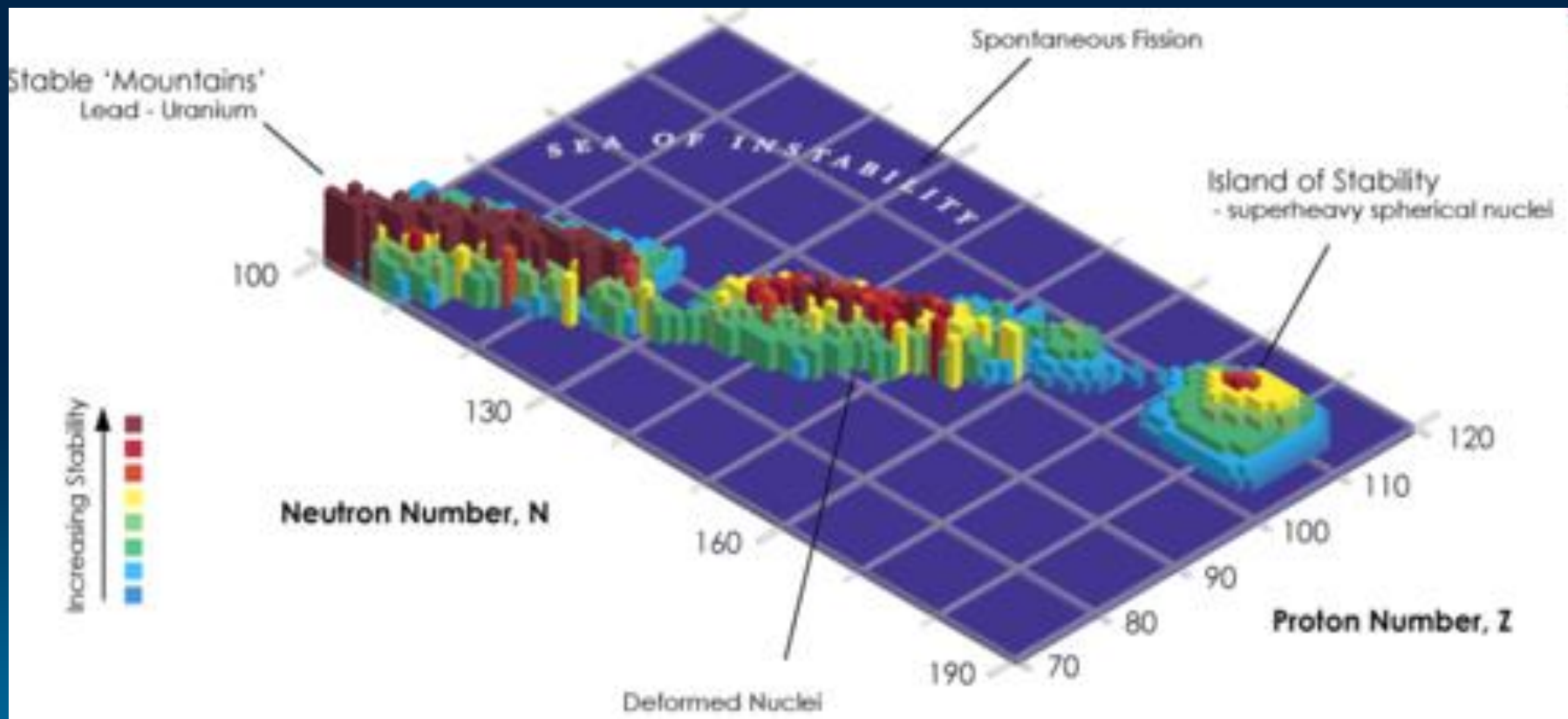


# Pevnina a ostrov stability

$^{209}_{83}\text{Bi}$  - **nejtěžší stabilní nuklid** (2003 - objev jeho přeměny alfa s  $T=1,9 \cdot 10^{19}$  let).



$^{294}_{118}\text{Og}$  – Oganesson - **poslední objevený prvek (2015)**, nestabilní jádro, nejstabilnější izotop (přeměna alfa s poločasem 0.89 ms).



# Jaderná reakce

- je jadernou přeměnou, která je vyvolána vnějším zásahem - zpravidla interakcí s další částicí (např. lehké jádro, proton, neutron, foton).

Může docházet jak

- Ke **změně struktury** zúčastněných jader (změna nukleonového či protonového čísla),  
tak
- ke **změně pohybového stavu** zúčastněných částic (změna klidových a kinetických energií).

# Zákony zachování

- zákon zachování počtu nukleonů ( $A$ )
- zákon zachování náboje (zobecněné  $Z$ )
- zákon zachování hmotnosti a energie
- zákon zachování hybnosti
- zákon zachování momentu hybnosti
- zákon zachování izospinu
- zákon zachování parity

**Parita** charakterizuje chování vícesložkové vlnové funkce, tzv. **spinoru** fyzikálních systémů (tedy i soustav elementárních částic včetně nukleonů) při **inverzi souřadnic** (viz též dále – charakteristiky elementárních částic). Ve stavu s určitou paritou spinor změní nebo nezmění znaménko.

$P = \pm 1$  (dvě dovolené, neboli vlastní hodnoty).

# Zákon zachování počtu nukleonů a elektrického náboje

Obecné schéma jaderné reakce



ZZ počtu nukleonů

$$\sum_{i=1}^m A_i = \sum_{j=1}^m A_j$$

ZZ elektrického náboje

$$\sum_{i=1}^m Z_i = \sum_{j=1}^m Z'_j$$

Elektrický náboj

$$Q = Ze$$

Elementární elektrický náboj

Zobecněné protonové číslo

# Zákony zachování z mechaniky

## ZZ energie

$$\sum_{i=1}^m E_i = \sum_{j=1}^m E'_j$$

## ZZ hybnosti

$$\sum_{i=1}^m \vec{p}_i = \sum_{j=1}^m \vec{p}'_j$$

## ZZ momentu hybnosti

$$J = J' \quad \text{a} \quad \sum_{i=1}^m M_i = \sum_{j=1}^m M'_j$$

$$J_z = \sum_{i=1}^m J_{z,i}$$

Celková energie i-té částice (jádra)  
jako součet její klidové a kinetické energie

$$E_i = m_{0,i} c^2 + E_{k,i}$$

Celková energie i-té částice (jádra)  
jako funkce její hybnosti

$$E_i = \sqrt{p_i^2 c^2 + m_{0,i}^2 c^4}$$

V kvantové mechanice určíme jen velikost a  
z-tovou komponentu momentu hybnosti  
částice (jádra)

$$|\vec{J}| = \sqrt{J(J+1)}\hbar \quad \text{a} \quad J_z = M\hbar$$

# Další zákony zachování z kvantové mechaniky a fyziky elementárních částic

## ZZ izospinu

$$T = T' \quad \text{a} \quad \sum_{i=1}^M T_{z,i} = \sum_{j=1}^M T'_{z,j}$$

Zachovává se v silných interakcích,  
při tzv. slabých se zachovat nemusí,  
při elektromagnetické interakci se nezachovává jen  $T$

**ZZ parity** – viz elementární částice.



# Energie reakce

- je přebytek celkové kinetické energie částic po jaderné reakci nad celkovou kinetickou energií částic před reakcí

Po reakci

Před reakcí

$$E_R = \sum_{j=1}^n E'_{k,j} - \sum_{i=1}^m E_{k,i}$$

- Ze ZZE

$$E_R = \left[ \sum_{i=1}^m m_{0,i} - \sum_{j=1}^n m'_{0,j} \right] c^2$$

Před reakcí

Po reakci

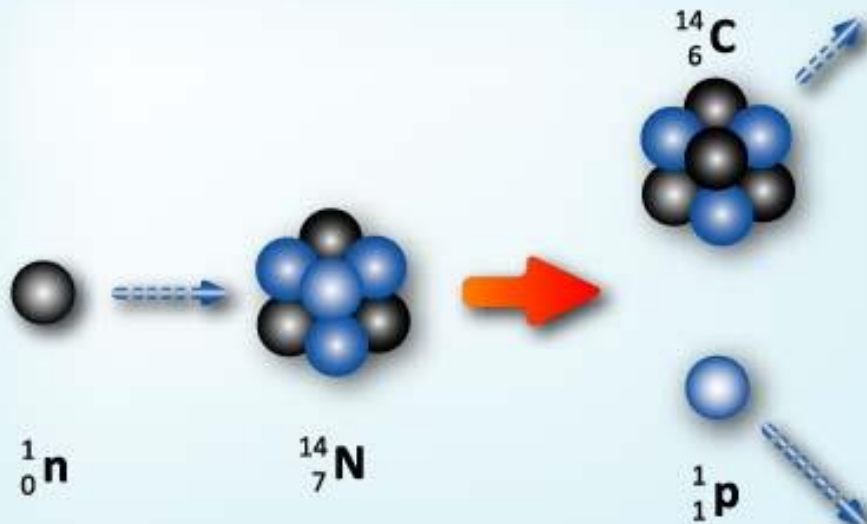
$$E_R > 0$$

**reakce exoenergetické**  
(exotermické, exoergické).

$$E_R < 0$$

**reakce endoenergetické**  
(endotermické, endoergické).

# Binární srážky



Zkrácený zápis binární srážky



**a** – nalétávající lehká částice ostřeluje jádro **X**

**b** – odlétající lehká částice emitovaná jádrem **X**, které se tak mění na jádro **Y**.

Zdrojem nalétávajících částic může být např. radioaktivní přeměna alfa radionuklidu, ostřelovaný nuklid tak může být zdrojem dalších typů lehkých částic (proton **p**, deuteron **d**, triton **t**, neutron **n** apod.)

# Rozptyl

## Rozptyl

- je binární srážka částic (jádra s jádrem či jinou částicí), při níž se nemění typ zúčastněných částic (nedochází tedy k jaderné přeměně).

Binární srážka, která není jadernou reakcí

## Pružný (elastický) rozptyl

- je rozptyl, během něhož se **nemění vnitřní pohybový stav zúčastněných částic**, tj. nedochází k excitaci či deexcitaci částic ani k jejich přeměně.

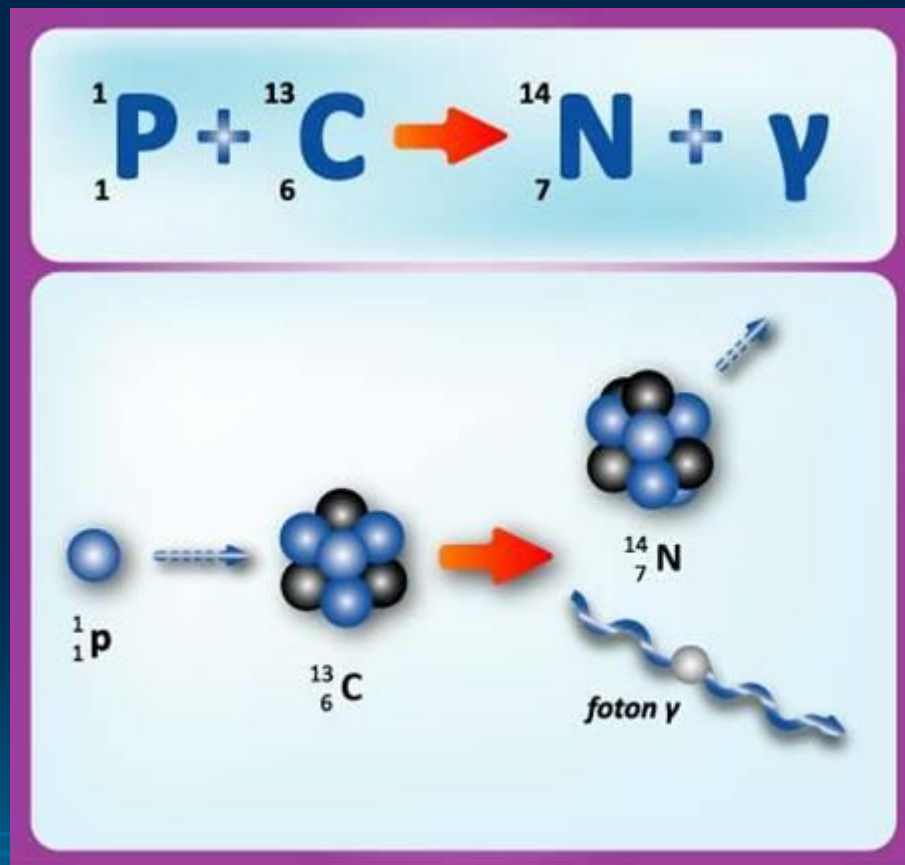
Binární srážka, která se někdy řadí mezi jaderné reakce s ohledem na změnu stavu jádra,

## Nepružný rozptyl

- je rozptyl, v jehož průběhu **dochází ke změně vnitřního pohybového stavu částic** (tj. k excitaci či deexcitaci), nedochází však k přeměně částic (na jiné typy částic).

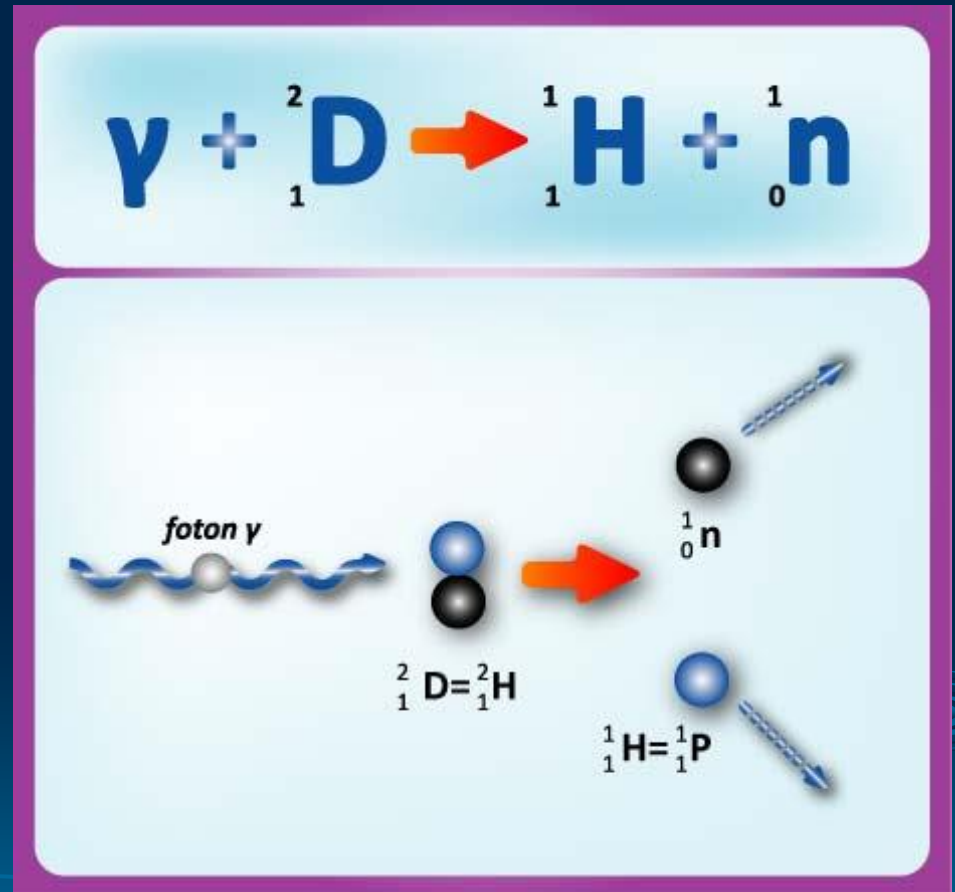
# Radiační záchyt

- je jaderná reakce (binární srážka), při níž dochází k **pohlcení lehké částice a jádrem a následnému uvolnění energie ve formě kinetické energie záření gama**



# Jaderný fotoefekt

- (též fotojaderná reakce) je jaderná reakce, při níž dochází k **pohlcení kvanta záření gama** (fotonu) a následnému **uvolnění lehké částice** (např. p, n, α aj.)



# Reakce štěpná a slučovací

## Štěpná jaderná reakce

- je jadernou reakcí, při níž dochází k **rozdělení** (tj. **rozštěpení**) **původního atomového jádra** na nejméně dvě částice či nová lehčí jádra, tzv. fragmenty.

## Jaderná syntéza (též fúze)

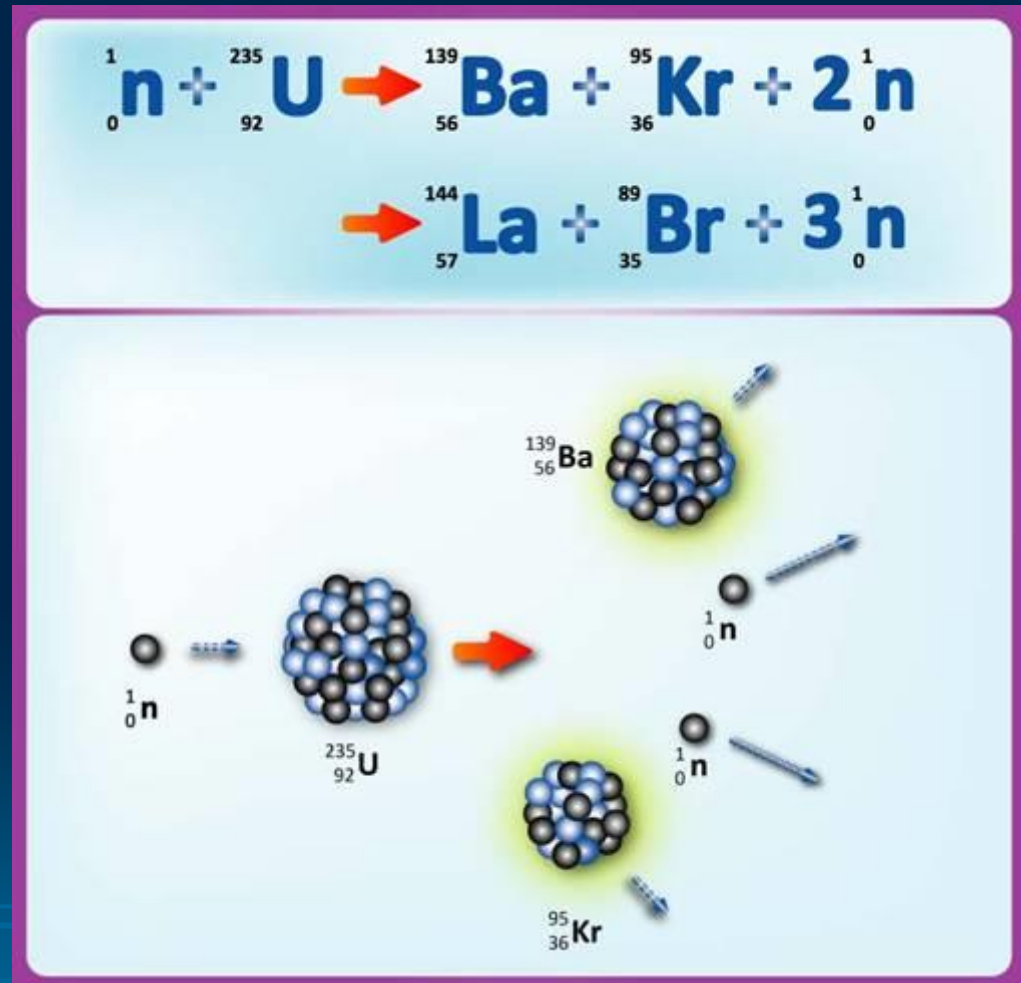
- neboli **slučovací jaderná reakce** je jaderná reakce, při níž dochází ke **slučování lehčích jader na jádra těžší**.



# Příklad štěpné jaderné reakce

## Štěpení uranu

- Štěpení uranu  $^{235}\text{U}$  může být vyvoláno **pohlcením pomalého neutronu**
- ( $E_k < 0,3 \text{ eV}$ ).
- Při této reakci **vznikají dva fragmenty a dva až tři rychlé neutrony**
- ( $E_k \approx 2 \text{ MeV}$ ).
- Uvedme příklad dvou kanálů (viz obrázek).
- Kromě neutronů **vznikají i fotony gama záření**.



# Podmínky štěpení uranu

- Pro štěpení jádra musí být dodána **aktivační energie**.

Minimální energie nutná pro realizaci jaderné reakce

- Na druhou stranu **štěpení uranu** se uskuteční pouze tehdy, zachytí-li se neutron v jádře. To je nejefektivnější pro tzv. **pomalé (tepelné) neutrony**, které mají **kinetické energie nižší než 0,3 eV**.

Zvýší se pravděpodobnost zachytu neutronu jádrem uranu.

- Při reakci jsou **splněny** příslušné **zákony zachování**, např. z.z. energie. Jelikož po reakci se sníží celková klidová energie, musí se uvolnit ve formě kinetické energie produktů reakce.

- **Energie reakce** (uvolněná kinetická energie zmenšená o dodanou kinetickou energii) v případě štěpení uranu je průměrně **200 MeV**.

# Obohacování uranu

- **U 235** se na rozdíl od **U 238** dobře štěpí pomalými neutrony (má **velký účinný průřez pro záchyt neutronu**)

Další dobře štěpitelný nuklid je **plutonium 239** ( ${}_{94}\text{Pu}$ ), který je ale nutno vyrobit uměle např. z **U 238**, nebo **uran 233** ( ${}_{92}\text{U}$ ), který může být připraven opět uměle z **thoria 232** ( ${}_{90}\text{Th}$ ).

„Umělá výroba“:  
po radiačním záchytu  
rychlého neutronu  
výchozím jádrem  
proběhnou dvě přeměny  $\beta^+$

- V přírodě je tento izotop uranu má zastoupení jen asi **0,7 %**, zbytek tvoří téměř výhradně U 238 (zanedbatelně U 234).
- Chemickými a fyzikálními postupy (uran je součástí kysličníku tj. oxidu uraničitého, tzv. **smolinec**,  $\text{UO}_2$  – chem. a fyz. vlastnosti obou izotopů jsou podobné – obtížná separace) se podíl U 235 zvyšuje tzv. **obohacování uranu**
- **Uran obohacený** na **3-7%** se používá v běžných **jaderných reaktorech** (nezbytné pro zahájení a udržení štěpné reakce).
- **Uran vysoce obohacený** nad **85%** slouží k výrobě **jaderných zbraní** (jaderná puma).
- **Uran ochuzený** pod **0,7% (na cca 0.2 %)** vzniká jako odpad při výrobě palivových článků a také během jejich provozu v reaktoru (klesá podíl U 235 v důsledku jeho štěpení). Aplikace: **Jaderné zbraně** (rad. zamoření), **výroba plutonia** (jad. zbraně a palivo pro speciální jad. reaktory).

# Řetězová reakce

- **Sled navazujících jaderných reakcí stejného typu** (stejně schéma), který vzniká pokud se produkty jaderné reakce mohou účastnit další jaderné reakce s jinými jádry, tzv. „**jaderným palivem**“.
- Při dostatku tohoto jaderného paliva může reakce probíhat dále, pokud jsou zajištěny podmínky pro průběh reakce.
- Reakce s uvolněním energie (**exoenergetické**) pak mohou probíhat **samovolně** (pokud jsou splněny podmínky průběhu reakce) do vyčerpání paliva.
- Nemusí se opakovat jen jedna jaderná reakce, **může jít i sled různých navazujících reakcí**, který se opakuje (formálně lze zapsat pomocí sumárního schématu jako jednu reakci).

# Příklady řetězové reakce

- **Slučování jader – termojaderná syntéza** ve hvězdách včetně Slunce je příkladem **slučovací řetězové reakce**.
- **Štěpení uranu** může probíhat jako řetězová reakce, pokud **rychlé neutrony vzniklé při reakci jsou zpomaleny, tak aby mohly štěpit další dostupná jádra uranu**, hovoříme pak o **štěpné řetězové reakci**.



# Moderace neutronů

- Podmínkou vzniku štěpné řetězové reakce uranu je proto zpomalení - tzv. **moderace neutronů** (sníží se jejich kinetická energie).

Rychlé (horké) neutrony vzniklé při štěpení uranu mají kinetické energie i několik MeV

- Ke **zpomalení neutronů** se používá jejich průchodu vhodnou látkou, tzv. **moderátorem**.

## Příklady moderátorů

- Ke zpomalování neutronů se používá například **grafit, (lehká) voda  $H_2O$**  nebo **těžká voda  $D_2O$** .



# Lavinovitá řetězová reakce

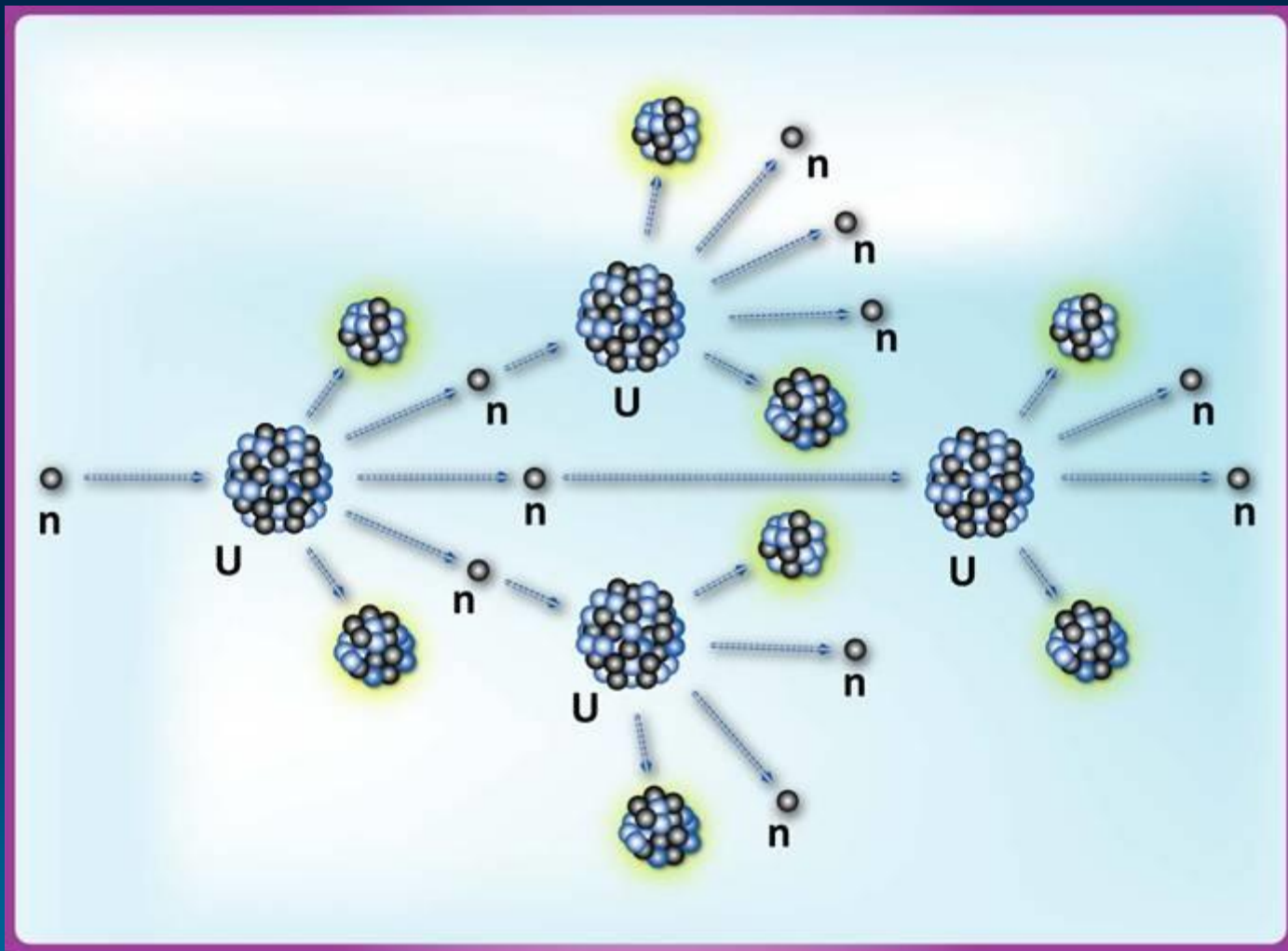
- Předpokládejme, že jsou **splněny podmínky vzniku řetězové reakce**.
- Pokud v jedné reakci vznikne více produktů (jader, částic), z nichž každý je schopen reagovat opět s jádrem paliva, bude se počet jaderných reakcí (tedy i jaderných přeměn) s časem zvětšovat stále více a více – **tzv. lavinovitě** (přesněji geometrickou řadou).

## Příklad – štěpení uranu

**může probíhat lavinovitě**, protože při něm vznikají **2 až 3 neutrony**, které pokud jsou zpomaleny mohou způsobit štěpení dalších **2 až 3 jader uranu**.

**K takovému lavinovitému štěpení dochází při explozi jaderné bomby (a také při „najíždění“ reaktoru na potřebný výkon).**

# Štěpení uranu jako řetězová lavinovitá reakce



# Řízení řetězové reakce

- Za vhodných podmínek může probíhat řetězová reakce jako **lavinovitá reakce**.
- V případě, že vhodným způsobem zajistíme, aby **počet reakcí za časovou jednotku byl v čase konstantní**, případně jej ovlivňujeme žádaným směrem, hovoříme o **řízení řetězové reakce**.

# Řízení štěpení uranu

- V případě **štěpení uranu** máme vždy **dva až tři rychlé neutrony**. Pokud budou všechny moderovány, bude **řetězová reakce** lavinovitě narůstat.
- V takovém případě postačí započít u lavinovitě narůstající řetězové reakce pohlcovat nadbytečné **neutrony** vzniklé štěpením pomocí vhodných látek
  - **absorbátorů neutronů**.

# Příklady absorbátorů neutronů

- Neutrony jsou **pohlcovány** například jádry **bóru** a **kadmia**.
- V případě bóru se **řízení** provádí změnou koncentrace **kyseliny borité**,
- **kadmium** se používá ve formě tyčí a řízení se provádí tak, že měníme počet zasunutých tyčí nebo hloubku jejich zasunutí do **jaderného reaktoru**.

# Součásti jaderné elektrárny

## Jaderná elektrárna

- je elektrárna, ve které se jako zdroj energie používá **jaderný reaktor**.
- Teplo vzniklé při štěpení jader v reaktoru je využíváno k výrobě páry pro parní turbíny pohánějící generátor elektrické energie.



Dukovany



Temelín

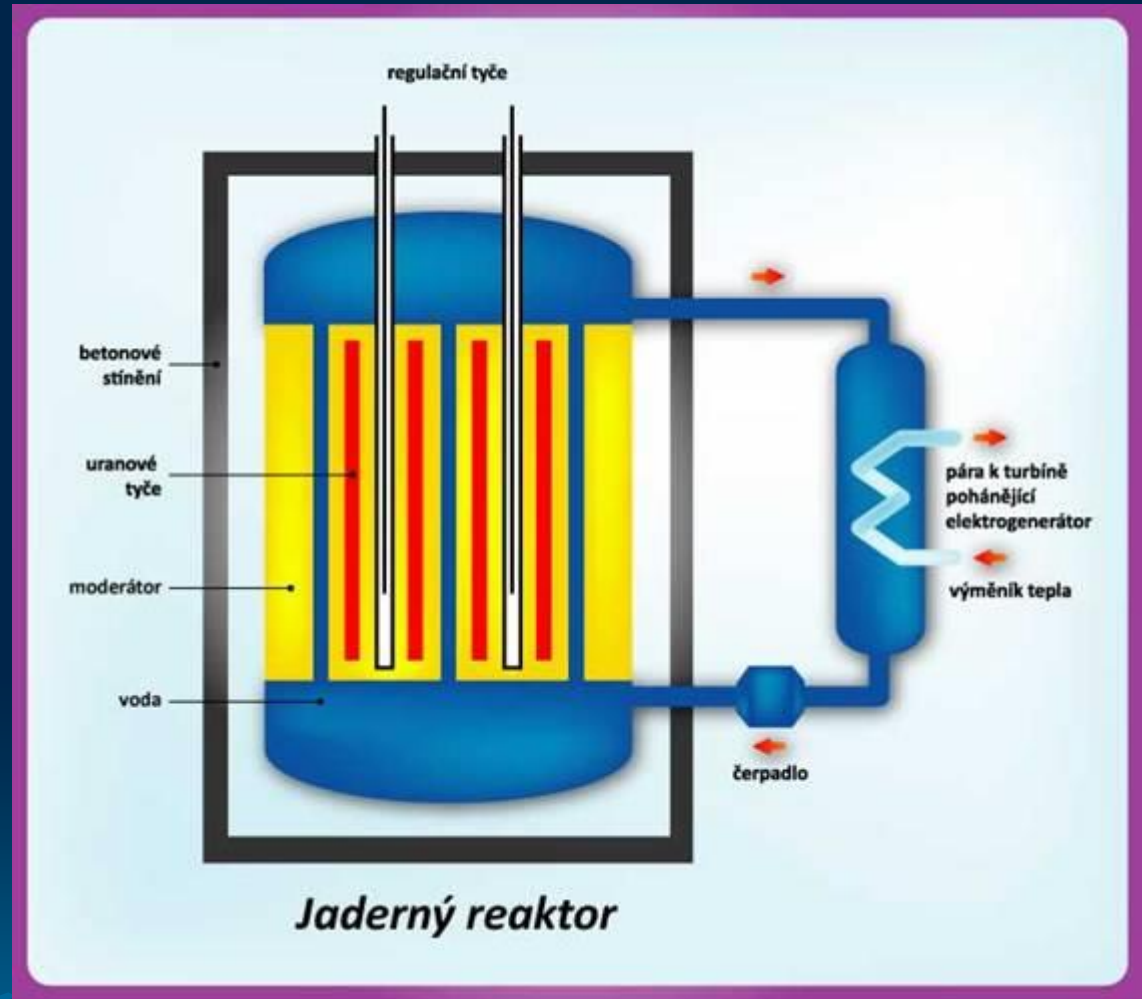


# Jaderný reaktor

- je zařízení, ve kterém se uskutečňuje řízená **štěpná řetězová reakce**.
- Využívá se jako **zdroj tepelné a zprostředkovaně elektrické energie**.

# Jaderný reaktor

- **Jaderný reaktor** musí být **chlazen**,
- prochází jím **chladio** (nejčastěji voda) **primárního okruhu**,
- získané teplo se ve **výměníku tepla** využije k výrobě páry pro **parní turbínu**,
- ta pohání **elektrický generátor**.



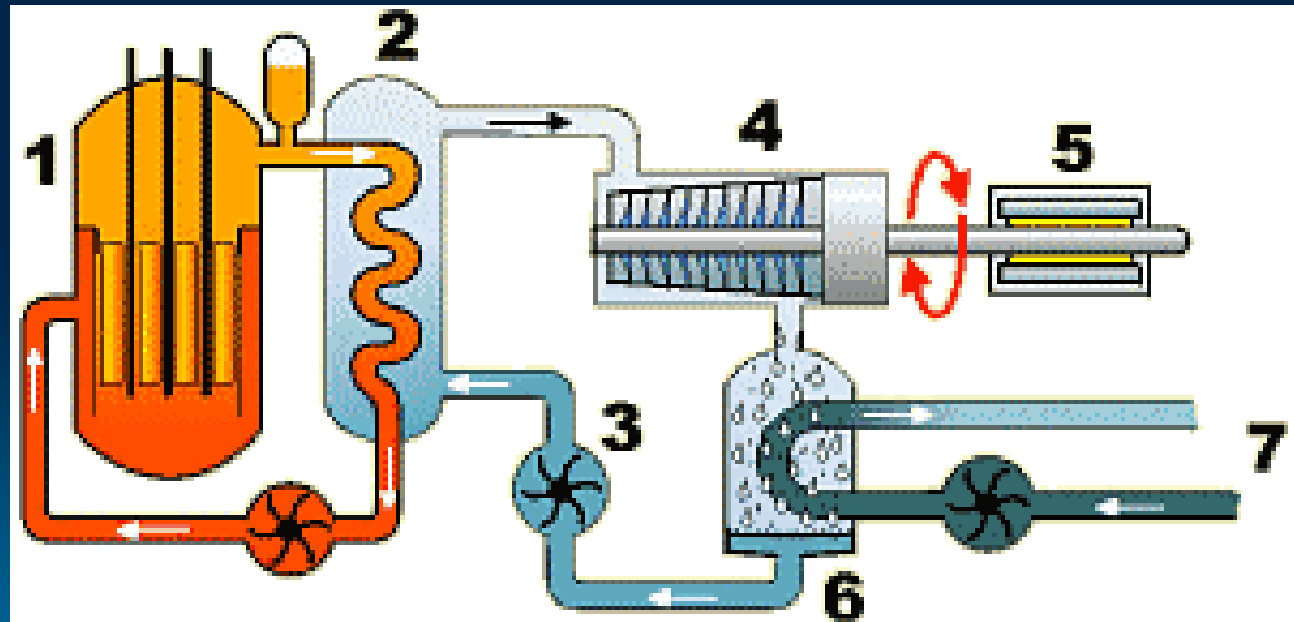
# Princip elektrárny

- Všechny typy elektráren (s výjimkou solárních s přímou přeměnou energie slunečního záření na elektrické napětí) mají **stejný princip**.
- Elektrická energie se vyrábí v **generátoru**, který může být roztáčen různým způsobem.
- V případě **větrné elektrárny** to je obvykle **vrtule**, u **vodních elektráren** jsou to **vodní turbíny** různých typů.
- V **tepelné** a v **jaderné elektrárně** se využívá **parní turbíny**.

# Schéma jaderné elektrárny

V jaderné elektrárně se využívá teplo **jaderného reaktoru** (1) k výrobě páry ve výměníku, tzv. **parogenerátoru** (2), ta pohání **parní turbínu** (4), která otáčí **generátorem** (5) elektrické energie. Pára se pak ochlazuje v **kondenzátoru** (6) pomocí **chladicího okruhu** kondenzátoru (7).

1. Jaderný reaktor
2. Parogenerátor
3. Čerpadlo
4. Parní turbína
5. Generátor
6. Kondenzátor
7. Chladicí okruh



# Srovnání výhod a nevýhod tepelné a jaderné elektrárny (z hlediska efektivity)

## Srovnání spotřeby paliva

- Energie získaná z 1 kg uranu odpovídá přibližně energii, kterou bychom dostali spálením 3 000 000 kg uhlí.
- Z výše uvedeného příkladu lze odhadnout, že využití jaderného paliva je efektivnější než využití fosilních paliv.

# Perspektivní řešení energetiky založené na jaderném štěpení

**Rychlé množivé reaktory** (palivo  $^{235}\text{U}$  a štěpitelné  $^{239}\text{Pu}$  či též  $^{233}\text{U}$  z transmutací)

$^{235}\text{U}$  je obohacený až na 90 % z důvodu **nižší** pravděpodobnosti zachytu **rychlého** neutronu

- **reakce s rychlými neutrony**
- výroba nového paliva (tzv. **množivé články** jsou naopak s ochuzeným uranem a thoriem vzniká více štěpitelného materiálu, než je dodáno)
  - **transmutace** (zachyt rychlého neutronu a 2 x přeměna  $\beta^-$ ):  
 $^{238}\text{U}(n, \gamma) ^{239}\text{U} (-, e^-) ^{239}\text{Np} (-, e^-) ^{239}\text{Pu}$ , nebo  
 $^{232}\text{Th} (n, \gamma) ^{233}\text{Th} (-, e^-) ^{233}\text{Pa}(-, e^-) ^{233}\text{U}$ .
- nutné **chlazení sodíkem** (malá aktivní zóna, v níž probíhá jaderná reakce)
- různé varianty, obecně **řeší problém nedostatku uranu 235**, protože uranu 238 a thoria 232 jsou větší zásoby
- navíc **možnost přepracovat i staré palivo** z klasických jaderných elektráren (méně jaderného odpadu)
- několik pilotních projektů – technické problémy (ale i ekonomické a politické)

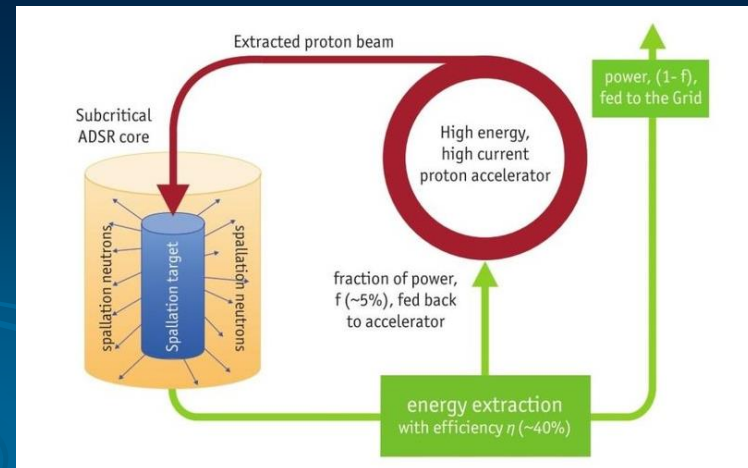
Vyrobené palivo lze použít i v klasickém reaktoru



# Perspektivní řešení energetiky založené na jaderném štěpení

**Urychlovačem řízený reaktor** (využívá jaderné reakce vyvolané protony),  
ADTT (Accelerator-Driven Transmutation Technology)

- **protony z urychlovače** ostřelují terčik (např. thorium, olovo), ten je zdrojem **neutronů pro štěpnou reakci**
- regulace toku neutronů (řízení reakce) se tak provádí urychlovačem
- při vypnutí urychlovače se štěpné reakce zastaví - bezpečné
- existuje možnost **transmutovat i nebezpečné vysoce aktivní jaderné odpady** (přidané do aktivní zóny reaktoru) na izotopy, které tak nezatíží životní prostředí (stabilní nebo nízkoaktivní)
- příprava projektu v Los Alamos, USA
- problémy – zatím nízká účinnost dodávky neutronů



# Jaderná fúze

- Při **slučování (fúzi, syntéze)** lehkých atomových jader se **uvolňuje také velké množství energie**. Ve srovnání na jednotku hmotnosti paliva je to ještě více než v případě štěpení jader.
- **Fúze probíhá v nitrech hvězd (včetně Slunce),** nebo jako lavinovitá neřízená reakce (exploze – **jaderný výbuch**) ve **vodíkové pumě**

# Podmínky jaderné fúze

- K průběhu fúze jsou **nezbytné obrovské teploty  $10^8\text{K}$** , což je jedna z obtíží kterou je nutno překonat při konstrukci technického zařízení, které by využívalo fúzi k výrobě energie.
- Další podmínkou využití je **technologické zvládnutí řízené řetězové reakce** po dlouhou dobu (podobně jako ve štěpných reaktorech).

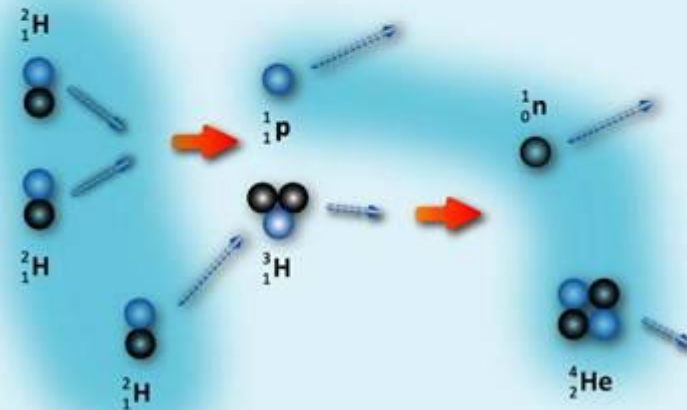
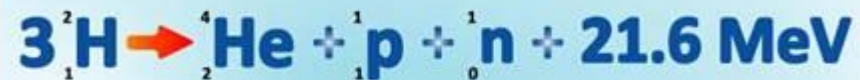
# Příklad jaderné fúze

- Jedním z příkladů jaderné fúze je **syntéza tří jader deuteria na jádro helia**.
- Vzniká při ní proton, neutron a záření gama,
- **uvolňuje se přitom velká energie** (kinetická energie produktů reakce),
- makroskopicky se tato energie projeví jako **vznik tepla**.

# Syntéza deuteria

probíhá ve 2 fázích:

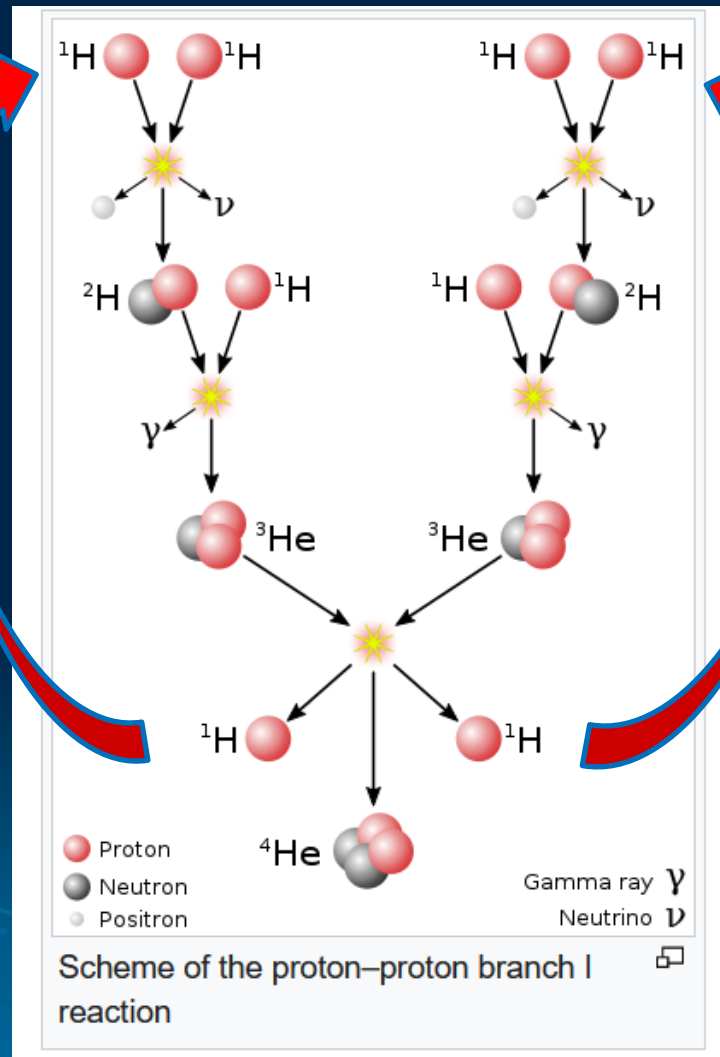
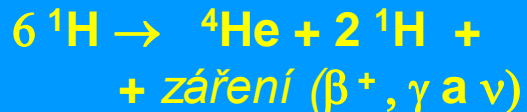
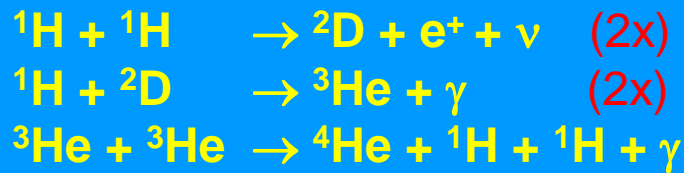
- první je sloučení dvou jader deuteria na jádro tritia,
- které se ve druhé fázi sloučí s dalším jádrem deuteria



# Jaderná fúze ve Slunci

## Proton protonový cyklus

„Spaluje se“ vodík na helium





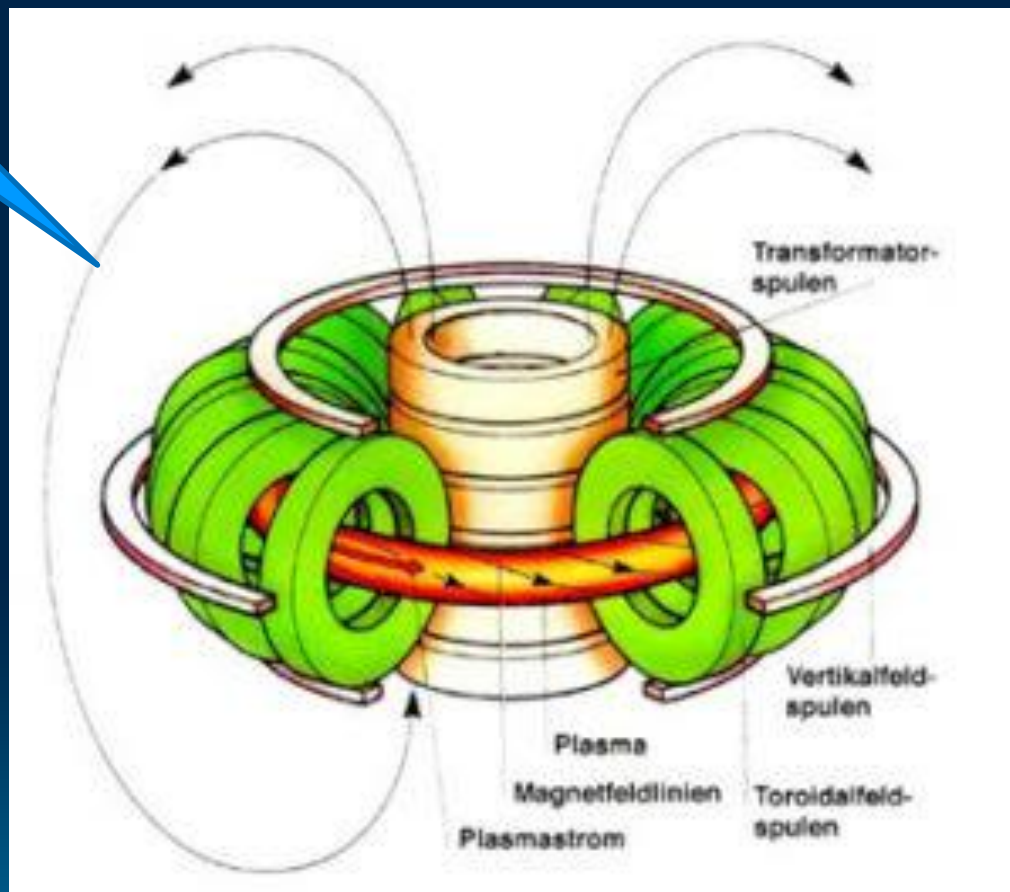


# Umělá jaderná fúze

**Tokamak** - тороидальная камера в магнитных катушках  
(toroidní komora v magnetických cívkách)

Magnetické pole toroidu udržuje horké plazma (proudový nebo mikrovlnný ohřev) bez styku se stěnami

**ITER** – („cesta“ - *Thermonuclear Experimental Reactor*) – EU, USA, Rusko, Čína, Japonsko, Jižní Korea, Indie - umístění Francie, myšlenka od r.1985, bude se



Empiricky vypočítaná „zákonitost“:  
od zvládnutí a využití jaderné fúze nás  
vždy dělí třicet let .



# Současné modely jader

- Protože přesný analytický popis **jaderných sil** není znám, je nutné vytvářet speciální **modely jader**, které vycházejí

- buď z fenomenologického popisu na základě určitých analogií jako je

***kapkový model jádra,***

- nebo z empirického tvaru efektivního potenciálu jaderných sil, jako je tomu v případě

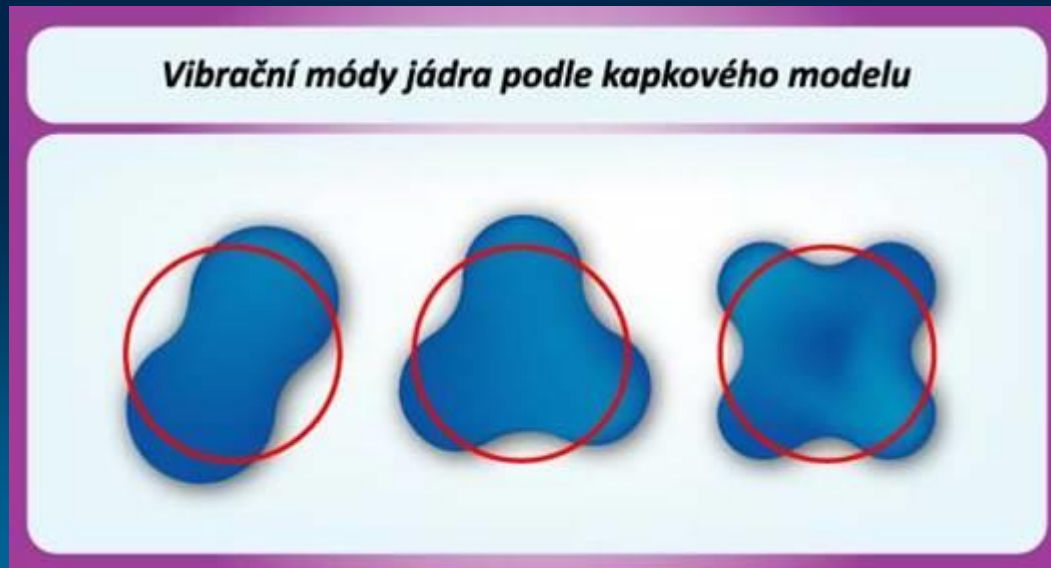
***slupkových modelů jader.***

- Spojením a rozšířením obou modelů vzniká

***model zobecněný.***

# Kapkový model

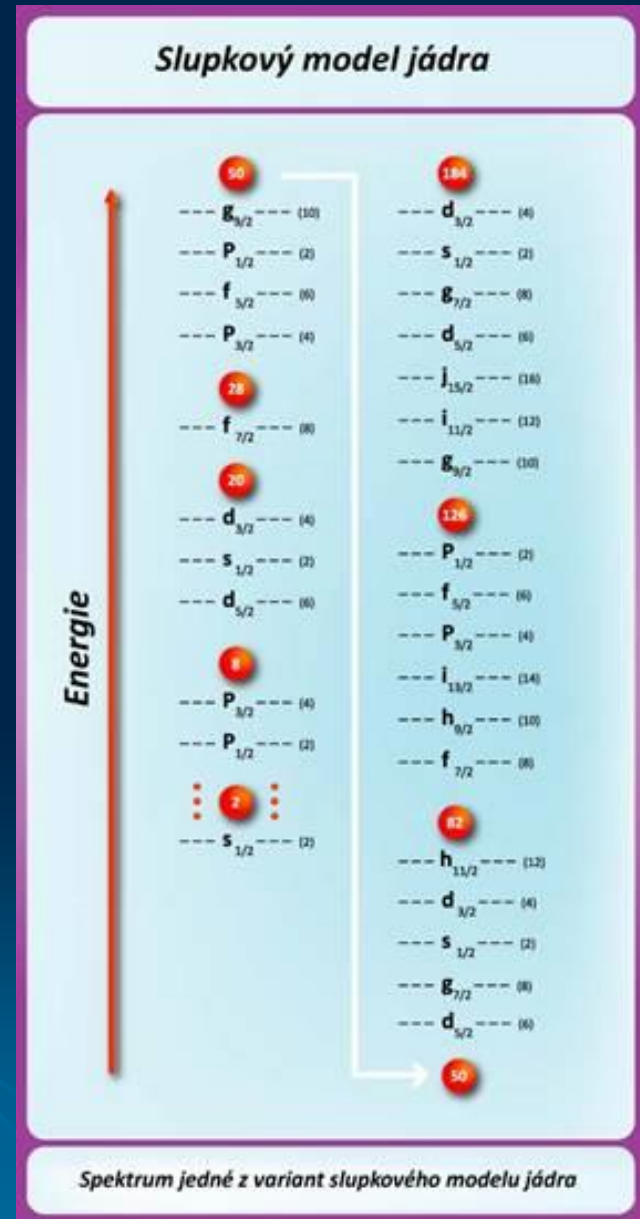
- bývá označován také jako **Bohrův (hydrodynamický) model**.
- Vychází z analogií mezi kapkou kapaliny a atomovým jádrem.
- Jádro je chápáno jako **kapka nukleonové kapaliny** (hustoty všech jader jsou přibližně stejné), ve které se projevují objemové i povrchové síly





# Slupkový model

- vychází z analogií mezi vlastnostmi elektronového obalu atomu a pozorovanými vlastnostmi atomového jádra.
- Podle tohoto modelu obsazují jednotlivé nukleony **diskrétní energetické hladiny** (slupky) obdobně jako elektrony v atomovém obalu.
- Hodnoty a pořadí energetických hladin protonů a neutronů jsou ale jiné než v případě elektronů.
- Přibližné **energetické spektrum nukleonů** lze získat z kvantově mechanických výpočtů. Základem těchto výpočtů je Schrödingerova rovnice (SR) pro nukleony, ve které je **jaderná interakce** přibližně popsána modelovým **efektivním potenciálem**



# Souvislost obsazení hladin ve slupkách a magických čísel

Odovídá dané slupce

**Řešením SR** s efektivním potenciálem jaderných sil získáme **nezávislé systémy hladin pro protony a neutrony.**

**Degenerace stavu** (max. počet nukleonů ve slupce) z modelu

**Celkový počet nukleonů** při plně obsazené poslední slupce

Hlavní kv.č. $n$	1	2	3	4	5	6
$G_n$ – bez SO interakce	2	6	12	20	30	42
$G_n$ – započtena SO int.	6	8	14	22	32	44
$\sum_{i=1}^n G_i$ – bez SO interakce	2	8	20	40	70	112
$\sum_{i=1}^n G_i$ – započtena SO int.	6	14	28	50	82	126
Magická čísla z experimentu	2	8	20/28	50	82	126

Jednotlivé stavy ve slupkách jsou obsazovány **nukleony (protony či neutrony nezávisle)** ve shodě s Pauliho vylučovacím principem a principem minima energie.

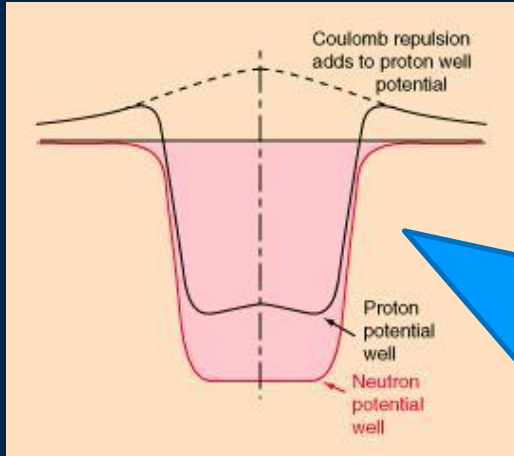
Při **neuvážení elektrostatického odpuzování** protonů (lze zanedbat jen pro lehká jádra) jsou oba **systémy hladin (pro protony a neutrony) identické**

**LEHKÁ JÁDRA**  
SO interakce slabá  
Přiblížení slabé vazby  
resp. vazba LS

**TĚŽKÁ JÁDRA**  
SO interakce silná  
Přiblížení silné vazby  
resp. vazba jj



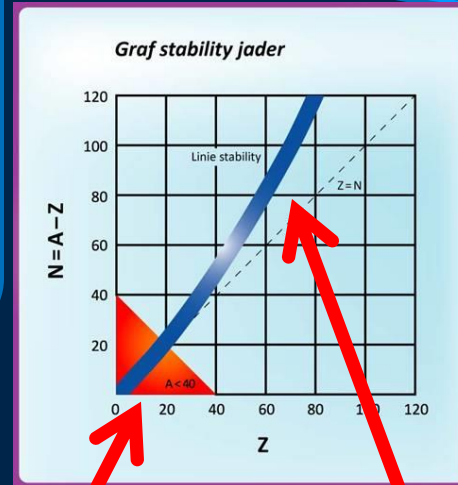
# Role elektrostatického odpuzování v jádře – objasnění průběhu linie stability



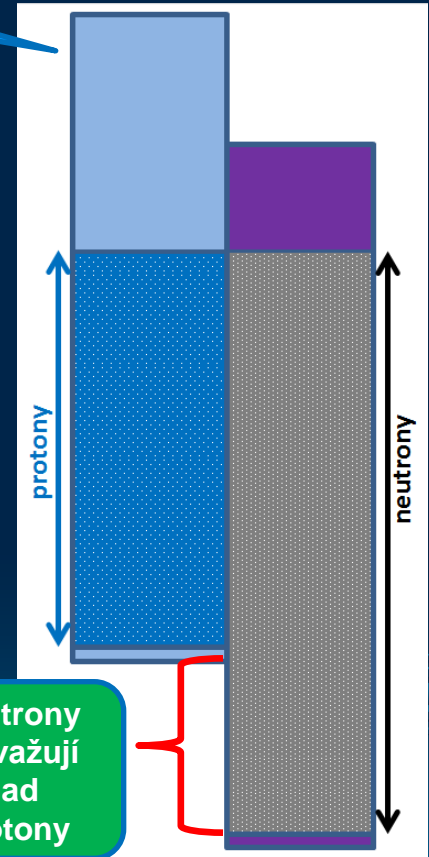
Dle <https://universe-review.ca/F14-nucleus02.htm>

Elektrostatické odpuzování zvyšuje s rostoucím počtem protonů v jádře stále více jejich potenciální energii oproti energii neutronů

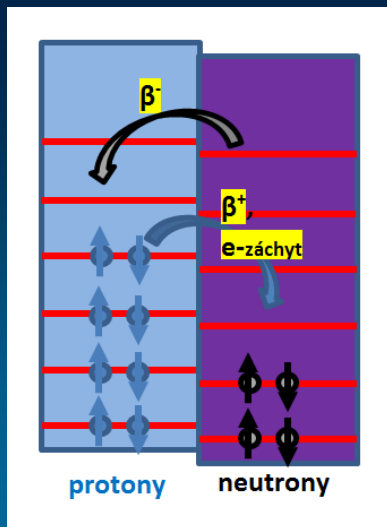
Velký rozdíl hladin pro p a n



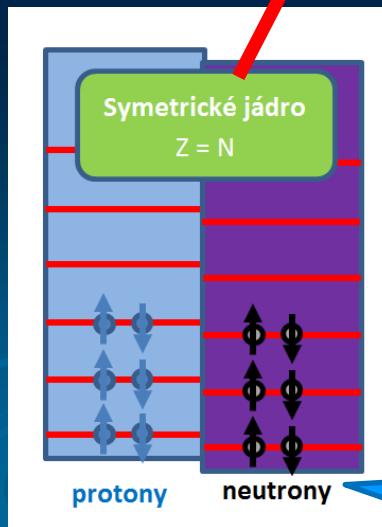
**Těžká jádra**



**Lehká jádra**



$p/n$  po přeměně na  $n/p$ , přejde na dostupnou nižší hladinu energie



Neutrony převažují nad protony

nízký rozdíl hladin pro p a n

# Zobecněný model

- V rámci tohoto modelu je jádro popisováno jako systém skládající se ze dvou podsystémů nukleonů. Jsou to **kolektivní podsystém** a **jednočásticový podsystém**.
- **Kolektivní podsystém** zahrnuje nukleony, jejichž počet nejčastěji odpovídá **magickému číslu**, které je nižší než příslušný počet nukleonů daného jádra a je mu nejbližší.
  - Tento podsystém odpovídající stabilnímu subjádro se popisuje jako **kapka kvantové kapaliny** (kvantové vibrační a rotační stavy).
- **Jednočásticový podsystém** je tvořen zbývajícími nukleony v jádře.
  - Tyto nukleony se popisují analogicky jako ve **slupkovém modelu**.
  - Na vybraný nukleon jednočásticového podsystému, který reprezentuje „valenční slupky“, působí **efektivní potenciál**, který nahrazuje působení ostatních nukleonů tohoto podsystému a také nukleonů kolektivního podsystému.

# Weizsäckerova – Fermiho formule

Jádro jako nabitá koule s nábojem  $Q = Ze$ , objemem  $V \sim A$  a tedy poloměrem  $R \sim A^{1/3}$

Člen ve formuli (závislost na  $Z$  a  $A$ )

objemový

Objem koule  
 $V = 4/3\pi R^3 \sim A$

povrchový

Povrch koule  
 $S = 4\pi R^2 \sim A^{2/3}$

coulombický

Energie nabité koule  
 $E_C = Q^2/(4\pi\epsilon_0 R) \sim Z^2 / A^{1/3}$

asymetrie

Odchylna od symetrického jádra  $N-Z = (A-Z) - Z = A-2Z$

dodatečný (sudost - lichost)

## Weizsäckerova-Fermiho formule

$$|E_V(A, Z)| = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C Z^2 / A^{1/3} - a_A (A - 2Z)^2 / A + \delta(A, Z) / A^{3/4}$$

$a_V$	$a_S$	$a_C$	$a_A$	$\delta(A, Z)$		
15,75	17,80	0,71	23,70	34	0	-34

Hodnoty koeficientů jsou uvedeny v MeV a výsledná energie je tedy rovněž v MeV. Hodnoty  $\delta(A, Z)$  jsou uvedeny postupně pro *sudo-sudá jádra*, jádra s lichým počtem nukleonů a *lichá-lichá jádra*.

# Fyzika elementárních částic

- je obor fyziky zabývající se studiem **elementárních částic**.
- Zkoumá jejich **vzájemné působení** (interakce) a studuje **zákonitosti přeměn částic**.
- Fyzika elementárních částic se zejména dříve označovala též jako **fyzika vysokých energií**, **subnukleární fyzika** nebo **subjaderná fyzika**.

# Třídění elementárních částic

## Bosony a fermiony

### Bosony

- mají „celočíselné hodnoty spinu“  
(spinové číslo je celočíselné).

### Fermiony

- mají „poločíselné hodnoty spinu“  
(spinové číslo je lichým násobkem  $1/2$ ).

Spinové číslo se ve fyzice elementárních značí většinou **J**,  
místo **S** používaného ve fyzice atomové.

# Třídění elementárních částic

LEPTONY	<b>LEPTONY</b>	Elektricky nabité leptony <b>e, μ, τ</b>  Neutrina el. nabitých leptonů <b><math>\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau</math></b>  Vlastnosti: 1) částice bez další vnitřní struktury 2) neinteragují silně 3) fermiony se spinovým číslem 1/2
	<b>MEZONY</b>	Někteří zástupci: <b><math>\pi, K, D, B, \rho, \omega, \eta, J/\psi, \Upsilon...</math></b>  (Silně interagují, bosony, složeny z páru kvark – antikvark)
	<b>BARYONY</b>	Nukleony <b>p, n</b>  Hyperony <b><math>\Delta, \Xi, \Sigma, \Omega...</math></b>  (Silně interagují fermiony, složeny ze tří kvarků)
HADRONY		

Nepůsobí na ně **silná interakce**

Základní (bodové) částice

**Jaderné síly** reprezentují jeden z projevů obecnější **silné interakce** působící mezi hadrony

Podléhají i **silné interakci**

Složené částice

Fermiony  
 $S=1/2$

Bosony

Fermiony

Později přibývají další typy hadronů v souvislosti s rozvojem tzv. kvarkové teorie



# Poznámka k tabulce

**Hyperony** – historické označení pro další objevené baryony mimo nukleony, spolu s kaony (mezony K) se tehdy jednalo o nový typ tzv. **podivných částic** (nenulová hodnota podivnosti), z dnešního pohledu víme, že obsahují oproti nukleonům (složeny z kvarků **u** a **d**) navíc podivný kvark **s**.

Další typy mezonů a baryonů byly předpovězeny rozpracovávanou **kvarkovou teorií** (další tři kvarky **c**, **b**, **t**) a postupně experimentálně potvrzovány.

# Charakteristiky částic

- klidová hmotnost nebo klidová energie
- elektrický náboj
- spin
- izospin
- parita
- střední doba života
- leptonová čísla
- baryonové číslo
- hypernáboj
- podivnost
- půvab
- krása
- pravda
- vůně
- barva

## Teorém Noetherové

Každé **operaci symetrie** vůči níž jsou rovnice (např. pohybové) popisující systém **invariantní** (rovnice nezmění tvar) odpovídá **zákon zachování nějaké fyzikální veličiny**.

Původně z teoretické mechaniky. Příklady:

### Symetrie:

homogenita prostoru (translační s.)

izotropie prostoru (rotační s.)

homogenita času

### Zákon zachování:

hybnosti

momentu hybnosti

energie

Teorém má obecnější platnost. Pokud některé procesy dovolené dříve známými zákony nejsou dovoleny, **zavádíme nové fyzikální veličiny ve formě kvantových čísel, které se zachovávají** – ty můžeme chápat jako důsledek **dalších nových symetrií**.

Příklady:

Zákon zachování pro:

elektrický náboj  
izospin  
hypernáboj  
parita nebo reflexe  
baryonové číslo  
leptonová čísla  
podivnost, půvab, krása  
a pravda

➔ Symetrie:

nábojová (kalibrační invariance)  
unitární symetrie SU(2)  
unitární symetrie SU(3)  
symetrie vůči inverzi nebo zrcadlení prostoru  
nábojová - baryonová (baryon - antibaryon)  
nábojová - leptonová (lepton - antilepton)  
symetrie v teorii kvarků

Řada zákonů platí pouze za speciálních podmínek. Například zákon zachování izospinu a parity se narušuje v procesech s uplatněním slabé interakce.

Hovoří se o **narušení** příslušné **symetrie**

# Charakteristiky částic

## Klidová hmotnost částice $m_0$

je hmotnost částice, měřená v souřadném systému vůči němuž je částice v klidu. Představuje jednu ze základních vlastností částice.

Ve fyzice elementárních částic se hovoří o **klidové hmotnosti**, ale udává se místo ní **klidová energie v MeV**.

## Klidová energie částice $E_0$

je energie volné částice v klidu  $E_0$ .

Je vázána s klidovou hmotností  $m_0$  částice Einsteinovým vztahem

$$E_0 = m_0 c^2,$$

## Elektrický náboj $Q$

se ve fyzice elementárních částic většinou vyjadřuje v násobcích elementárního elektrického náboje  $e$ .

Celočíselné hodnoty násobků  $e$ .

Jen kvarky mají náboj rovný zlomkům  $e$ .

## Spin $\vec{J}$

je vlastní moment hybnosti částice.

$$|\vec{J}| = \sqrt{J(J+1)}\hbar$$

$J = 0, 1/2, 1, 3/2, 2, 5/2, \dots$  - jedna konkrétní hodnota pro danou částici

$$J_z = M_J \hbar$$

$M_J = -J, -J+1, -J+2, \dots, J-2, J-1, J$  - celkem  $2J+1$  možných projekcí spinu

# Charakteristiky částic

## Izospin

Zde pro konzistenci s jadernou fyzikou  $T$ , ve fyz.el.č. bývá častěji symbol  $I$

Přepokládalo se, že malé rozdíly v hmotnostech částic izomultipletu způsobuje **elektromagnetická interakce**, bez ní by byly hmotnosti stejné

### Izotopický spin (izospin) $\vec{T}$

je abstraktní vektor, který je v kvantové fyzice definován analogicky jako *spin*. Jeho z-tová složka se používá k označení částic s blízkou *klidovou hmotností* které patří do stejné skupiny, tzv. *izomultipletu*.

$$|\vec{T}| = \sqrt{T(T+1)}$$

$T = 0, 1/2, 1, 3/2, 2, 5/2 \dots$  - jedna konkrétní hodnota pro daný izomultiplet

$T_z$

$T_z = -T, -T+1, -T+2, \dots, T-2, T-1, T$  - celkem  $2T+1$  možných projekcí izospinu  
Přiřazují se částicím v izomultipletu podle rostoucího náboje

### Příklady izospinových multiplétů

Nukleonový dublet

singlet

*lambda*

triplet

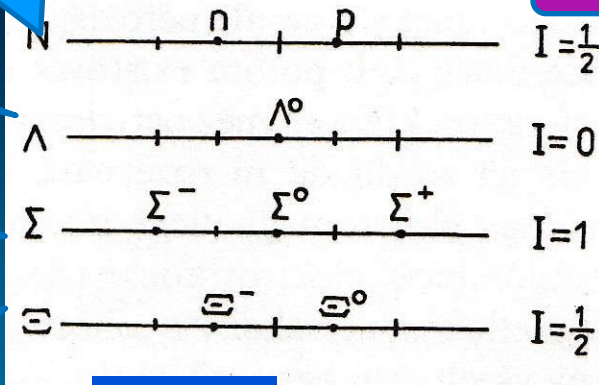
*sigma*

dublet

*xi*

baryony

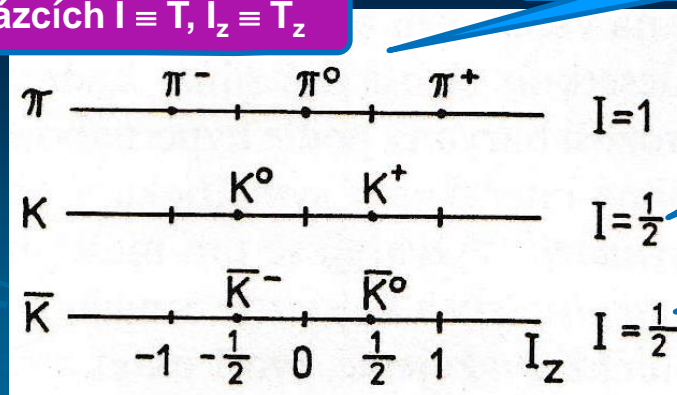
V obrázcích  $I \equiv T, I_z \equiv T_z$



Pionový triplet

Kaonový dublet

Anti-Kaonový dublet



mezony

# Charakteristiky částic

## Parita

- **Parita** charakterizuje chování vícesložkové vlnové funkce, tzv. **spinoru**, fyzikálních systémů (tedy i elementárních částic) při **inverzi souřadnic**.

### Spinor elektronu

Elektron musíme popisovat dvěma skalárními funkcemi - dvěma složkami **spinoru**  $\begin{pmatrix} \Psi_{+1/2}(\vec{r}) \\ \Psi_{-1/2}(\vec{r}) \end{pmatrix}$ , z nichž každá odpovídá stavu jedné ze dvou dovolených hodnot **magnetického spinového čísla** ( $m_s = \pm 1/2$ ).

Příklad

- Parita nabývá dvou hodnot
  - **+1** - spinor po inverzi nemění znaménko – **sudá parita**
  - **-1** - spinor po inverzi změní znaménko – **lichá parita**

Pokud lze psát spinor jako součin níže, lze zavést dvě různé parity.

$$\{\Psi(m_s, x, y, z)\} = \{\Psi(m_s)\} \cdot \Psi(x, y, z)$$

Diskrétní proměnná

Spojité proměnné

Spinor konstantní v prostoru, se při inverzi souřadnic transformuje speciálním způsobem

### Orbitální parita

Část spinoru – skalární funkce závislá na souřadnicích ( $P_o = +1$  resp.  $-1$ ) – analogie **sudé** a **liché** funkce

### Vnitřní parita

Základní charakteristika částice daného typu (např. nukleonu, elektronu).

souvisí se způsobem vzájemné transformace složek spinoru po inverzi souřadnic ( $P = +1$  resp.  $-1$ ) – analogie transformace **polárních a axiálních vektorů**, resp. **pravých skalárů, vektorů či tenzorů a pseudoskalárů, pseudovektorů nebo pseudotenzorů**.

# Charakteristiky částic

## Doba života

### Střední doba života $\tau$

(stručně jen „doba života“) je doba, za kterou se rozpadne  $1/e$  ( $e$  - Eulerovo číslo) původního množství daného druhu částic. Určuje se v soustavě, v níž je částice v klidu.

Dnes se místo staršího termínu **rozpad** preferuje výstižnější pojem **přeměna částice (popř. jádra)**

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

Analogie poločasu radioaktivní přeměny

**Srovnej**

$$\tau = 1/\lambda = T/\ln 2$$

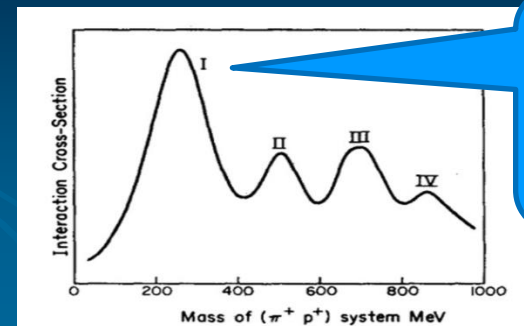
**Stabilní částice** – nedochází k jejich přeměně (případně za velmi dlouhou dobu), mezi leptony *elektron* a jeho *neutrino*, u baryonů pak *proton*, (popř. *neutron*). Stabilní jsou i příslušné antičástice těchto částic.

**Slabá interakce** – další typ interakce vedoucí k přeměnám reprezentujícím výhradně dezintegraci el. částic

**Metastabilní částice** – přeměňují se pomalu vlivem slabé ( $10^{-10} \text{ s} < \tau$ ), někdy i elektromagnetické interakce (která je silnější a tak je přeměna částice rychlejší,  $10^{-16} \text{ s} < \tau < 10^{-14} \text{ s}$ ).

**Rezonance** - obvykle se tak označují velmi krátce žijící částice ( $10^{-23} \text{ s} < \tau \leq 10^{-21} \text{ s}$ ) či excitované stavy metastabilních či stabilních částic, které se přeměňují vlivem silné interakce

Název pochází od **rezonančního charakteru rozptylu částic**. Částicové rezonance vznikají pro úzce vymezené energie interagujících rozptylovaných částic, v spektru energií se pozoruje výrazné maximum. To bývá pozorováno i u vzniku (meta)stabilních částic, které na rozdíl od rezonancí však lze díky dostatečně dlouhé době života detekovat prostřednictvím dráhových komor.



Maxima účinného průřezu pro konkrétní energii systému částic ve srážce



# Charakteristiky částic

## leptonová čísla a baryonové číslo

### Leptonové číslo (leptonový náboj) $L$

je kvantové číslo, které charakterizuje elementární částice. Je definováno tak, že nabývá hodnoty +1 pro leptony, -1 pro antileptony (viz antičástice) a 0 pro ostatní částice.

Pro tři generace leptonů: **1.  $e, \nu_e$ , 2.  $\mu, \nu_\mu$  a 3.  $\tau, \nu_\tau$**  (+ antileptony), je nutno zavést nezávislá leptonová čísla:  $L_e, L_\mu$  a  $L_\tau$ .

Pokud daný lepton (antilepton) nepatří do některé generace je odpovídající leptonové číslo 0, např. elektron má  $L_e = +1$ , ale  $L_\mu = 0$  a  $L_\tau = 0$ .

Důsledek nezávislých zákonů zachování leptonových čísel pro jednotlivé generace leptonů

$$L = L_e + L_\mu + L_\tau.$$

### Baryonové číslo (baryonový náboj) $B$

je další kvantové číslo, které charakterizuje elementární částice. Je definováno tak, že nabývá hodnoty +1 pro *baryony*, -1 pro *antibaryony* (viz *antičástice*) a 0 pro ostatní částice.

Z něj plyne zákon zachování nukleonového čísla  $A$  v jaderných reakcích (nejsou zde antinukleony).

# Charakteristiky částic

## Hypernáboj – unitární supermultiplety

### Hypernáboj Y

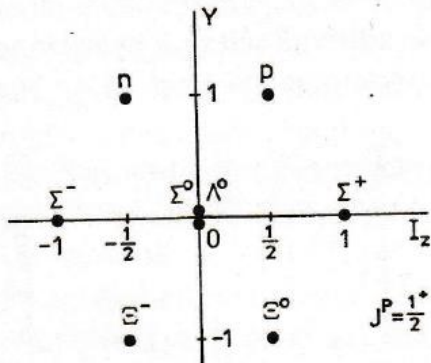
je pro danou částici definován jako dvojnásobek střední hodnoty el. náboje izospinového multipletu, do něž částice náleží.

### Unitární supermultiplet

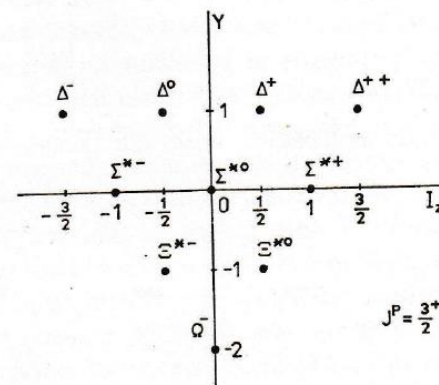
- Je to vlastně multiplet *izomultiplétů*. Částice různých *izomultiplétů* v *supermultipletu* se jen málo liší ve svých klidových hmotnostech, i když podstatně více než v rámci jednotlivých *izomultiplétů*
- Částice v daném supermultipletu mají stejný *spin* a *paritu*.
- Jednotlivé *izomultipléty* v *supermultipletu* lze odlišit hodnotou *hypernáboje*, který je pro částice v daném *izomultiplétu* stejný.

Unitární teorie předpokládá, že **izomultipléty částic** s blízkými hmotnostmi ale různým hypernábojem lze zahrnout do jednoho **supermultipletu**.  
**Rozdíl v hmotnostech částic jednotlivých izomultiplétů způsobuje „středně silná“ složka silné interakce**

### Příklady unitárních supermultiplétů



Oktet baryonů s  $J^P = 1/2^+$ .



Dekaplet baryonů s  $J^P = 3/2^+$ .

# Charakteristiky částic

## další „exotické“ veličiny

- Tyto veličiny se zavádí podle stejného přístupu jako baryonové číslo či leptonová čísla
- Pokud nějaký proces je zakázán a jiný dovolen, přiřadí se zúčastněným částicím nová fyz. veličina (kvantové číslo) spolu s jejím zákonem zachování

### Podivnost $S$

kvantové číslo, které charakterizuje elementární částice. *Podivnost* se zachovává ve všech základních interakcích mimo slabé, kde dochází ke změně  $S$  o  $\pm 1$ .

Původně podivné chování mezonů  $K$  bylo vysvětleno s využitím podivnosti  $S$ .

**Podivné částice  $S \neq 0$**   
(např. mezony  $K$ ).  
Obsahují podivný kvark  $s$

- Další charakteristiky se začaly používat ve spojení s **kvarkovou teorií**

### Půvab $C$

je kvantové číslo, které charakterizuje elementární částice. *Půvab* se zachovává ve všech základních interakcích mimo slabé, kde dochází ke změně  $C$  o  $\pm 1$ .

**Půvabné částice  $C \neq 0$**   
(např. mezony  $D$ ).  
Obsahují půvabný kvark  $c$ .

S jeho pomocí vysvětlena existence částice (mezonu)  $J/\psi$  (složen z  $c$  a anti- $c$ )

### Krása $B$

je kvantové číslo, které charakterizuje elementární částice. *Krása* se zachovává ve všech základních interakcích mimo slabé, kde dochází ke změně  $B$  o  $\pm 1$ .

**Krásné částice  $B \neq 0$**   
(např. mezony  $B$ ).  
Obsahují půvabný kvark  $b$ .

S jeho pomocí vysvětlena existence částice (mezonu)  $Y$  (složen z  $b$  a anti- $b$ )

### Pravda $T$

je kvantové číslo, které charakterizuje elementární částice. *Pravda* se zachovává ve všech základních interakcích mimo slabé, kde má docházet ke změně  $T$  o  $\pm 1$ .

**Pravdivé částice  $T \neq 0$**   
Obsahují pravdivý kvark  $t$ .

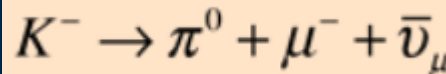
# Podivnost

- Prvním z „exotických“ čísel byla podivnost
- Byla poprvé definována pro částice dnes označované jako **kaony** (K) **první objevené podivné částice**
- Byly známy tři kaony **K<sup>+</sup>**, **K<sup>-</sup>** (nabité) a **K<sup>0</sup>** (neutrální)
- Mají blízké hmotnosti
- **Nabité K** se samovolně přeměňovaly dle schémat ( $\tau = 1,24 \times 10^{-8} \text{ s}$ )

Vlivem slabé interakce

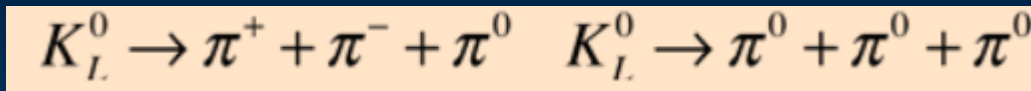


První podivnost: **narušení** tehdy známé **symetrie CP**



**S** se nezachovává ve slabých interakcích

- **Neutrální K** se choval podivně, někdy se rozpadal „pomalu“ ( $\tau = 5,2 \times 10^{-8} \text{ s}$ ) dle schémat

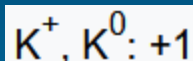


jindy „rychle“ ( $\tau = 0,89 \times 10^{-10} \text{ s}$ )



- Existují **dvě skupiny kaonů** s opačnou přesnou hodnotou **podivnosti S**

**Kaony:**



symetrická a



antisymetrická

kombinace  $K^0$  a  $\bar{K}^0$

**reprezentují smíšené stavy, které nemají přesnou hodnotu S**

Samy sobě antičásticí

**Antikaony:**  $K^-, \bar{K}^0: -1$

# Charakteristiky částic

## další charakteristiky v rámci kvarkové hypotézy

### Vůně

označení pro jednotlivé typy *kvarků*, tj. u, d, s, c, b, t. (tj. celkem 6 vůní).

### Poznámka

- Jelikož poslední čtyři typy (*vůně*) lze rozlišit od ostatních nenulovou hodnotou postupně podivnosti, půvabu, krásy a pravdy, hovoří se někdy alternativně o těchto kvantových číslech rovněž jako o *vůních* (kvarky u a d mají všechna tato kvantová čísla rovna nule a liší se opačnou hodnotou *z-tové komponenty izospinu*).

### Barva (barevný náboj)

kvantové „číslo“ (hodnotu barvy nebývá zvykem určovat číslem), které charakterizuje elementární částice. *Barva* může nabývat tyto hodnoty: červená, žlutá (resp. zelená), modrá pro *kvarky*, dále tři odpovídající *antibarvy* pro *antikvarky* a bílá (resp. bez barvy) pro ostatní částice.

Barvu kvarků bylo původně nutno zavést z toho důvodu, že některé *hadrony* se v rámci *kvarkové teorie* skládají ze stejných typů *kvarků*, tj. *vůní kvarků*. Jelikož *kvarky* jsou *fermiony* znamená to vzhledem k platnosti *Pauliho vylučovacího principu*, že kromě vůně musí existovat ještě další kvantová charakteristika, která odliší stavy jinak identických kvarků.

Pro silnou interakci (kvarků) hrají barvy stejnou roli jako elektrický náboj pro elektromagnetické interakce

**Kvantová chromodynamika** je tak analogií **kvantové elektrodynamiky**



# Antičástice

má stejnou

- **klidovou hmotnost,**
- **klidovou energii,**
- absolutní **velikost elektrického náboje,**
- hodnotu **spinového kvantového čísla  $s$ ,**
- hodnotu izospinu  **$T$  ( $I$ ),**
- **střední dobu života,**
- **vnitřní paritu  $P$  (bosony),**

jako jí příslušející částice.

má opačnou

- hodnotu **elektrického náboje,**
- směr **vlastního magnetického momentu** vzhledem k **vlastnímu momentu hybnosti,**
- hodnotu  **$z$ -tové komponenty (projekce) izospinu  $T_z$  ( $I_z$ )**
- hodnoty **leptonových čísel a baryonového čísla,**
- **hodnotu podivnosti  $S$  a dalších čísel (půvab, krása, pravda).**
- **vnitřní paritu  $P$  (fermiony),**

jako jí příslušející částice.

Původně se předpokládalo, že fyzikální děje probíhají stejně pro částice i antičástice.

**C – Symetrie k nábojová konjugace (sdružení)** - výměnou částic za antičástice dostaneme opět dovolený fyzikální děj – neplatí vždy.

Stejně se to předpokládalo o inverzi procesu v prostoru.

**P – Parita (symetrie vůči inverzi souřadnic – sestává z tří zrcadlení)** - taky neplatí vždy

**CP – kombinovaná symetrie** – rovněž neplatí za všech okolností

Musí se doplnit o **symetrii času  $T$  (symetrie vůči časové inverzi)**, pak dostáváme univerzální zákon.

## CPT teorém

„Probíhá-li v přírodě nějaký (reálný) děj, pak současným zrcadlením tohoto děje v prostoru, obrácením jeho chodu v čase a záměnou částic za antičástice dostaneme opět reálný (tj. dovolený) děj.“



# Příkladu párů částice antičástice

## Částice

elektron  $e^-$

proton  $p^+$

neutron  $n$

el. neutrino  $\nu_e$

foton  $\gamma$

## Antičástice

pozitron  $e^+$

antiproton  $p^-$

antineutron  $\bar{n}$

el. antineutrino  $\bar{\nu}_e$

„antifoton“  $\gamma$

Výjimka – historický a  
zažitý název pro  
**antielektron** tj. elektron s  
pozitivním nábojem

## Antičástice elektricky neutrální částice

- se může lišit např. u neutronu směrem mag. momentu k momentu hybnosti
- v zápisu ji od její částice odlišíme **vlnkou** nebo **pruhem** nad symbolem částice
- u nabitých částic lze vlnku či pruh vynechat pokud uvedeme náboj vpravo nahoře

Příklad **skutečně neutrální částice**, která je tak **totožná se svou antičásticí**.

Vyznačení antičástice pruhem či vlnkou tak ztrácí smysl.

# Kvarkový model hadronů

**Na základě rozptylu leptonů na hadronech** bylo zjištěno, že **hadrony mají další vnitřní strukturu**.

## Kvarková hypotéza

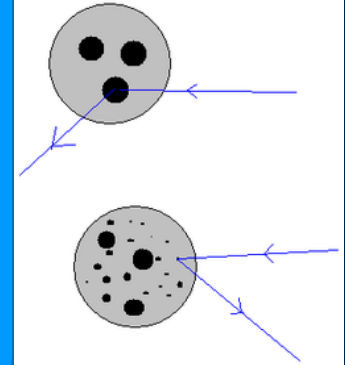
- **Hadrony se skládají z částic – kvarků**, jejichž náboj je zlomkem ( $1/3$  nebo  $2/3$ ) **elementárního elektrického náboje  $e$** .

Předpověď nezávisle - M. Gell-Mann a G. Zweig (1964)

**Kvarky nelze přímo pozorovat** (tj. najít např. stopu v mlžné komoře), dnes se je ale podařilo již prokázat nepřímo (ověření předpovědí teorie o přeměnách detekovaných částic)

V hadronech byla objevena rozptylová centra. **Rozptyl leptonů probíhal jako by se odrazily od volných částic.**

Předpokládalo se, že tyto částice představují stavební části hadronu. Používalo se označení **partony**.



Kvarková hypotéza dávala konzistentní popis hadronů, ale kvarky se zlomkovým nábojem nebyly pozorovány v experimentech jako volné částice. Předpokládala se tedy jejich **silná vazba v hadronech**, což se zdálo být v rozporu s rozptylem na volných částicích (partonech).

# Vlastnosti kvarků

- Podle současných znalostí se jedná o **bezstrukturní (bodové) částice**, z nichž jsou složeny hadrony.
- Jejich elektrický náboj je roven zlomkovým hodnotám elementárního elektrického náboje  $e$ :  
 $-1/3 e$  u kvarků  $d, s, b$ ;  
 $2/3 e$  u kvarků  $u, c, t$ .
- Jsou to fermiony se spinovým kvantovým číslem  $1/2$ .
- **Kvarky** jsou v **hadronech** vázány velmi pevně prostřednictvím silné interakce. Odhad **vazebné energie** je  $10^{12}$  GeV (**kvarky** nelze uvolnit). Síla interakce mezi **kvarky** je však velmi malá při jejich bezprostřední blízkosti (**asymptotická volnost**) a teprve s jejich rostoucí vzdáleností prudce stoupá.
- V rámci moderního systému částic představují **kvarky** spolu s leptony **základní částice**, z nichž je složena **látka**.

**Koncept asymptotické volnosti** řeší rozpor silně vázaných kvarků chovajících se uvnitř hadronů jakožto volné částice

Dnes jsou všechny kvarky nepřímo experimentálně prokázány na základě přeměn vybraných hadronů

# Přehled kvarků, jejich názvosloví a základní vlastnosti

## Typy (vůně) kvarků

Dnes známe celkem 6 kvarků:

- u (*up*, „nahoru“, protonový),
- d (*down*, „dolů“, neutronový),
- s (*strange*, podivný),
- c (*charm*, „působný“),
- b (*bottom*, beautiful, „krasný“),
- t (*top*, truthfull, „pravdivý“).

Symbol	Vůně	Klidová hmotnost (MeV/c <sup>2</sup> )	Elektrický náboj	Projekce Izospinu do 3 osy	Podivnost	Působ	Krása	Pravda	Antičástice
d	dolů (angl. <i>down</i> )	3,5 – 6 <sup>[3]</sup>	- $\frac{1}{3}$	- $\frac{1}{2}$	0	0	0	0	$\bar{d}$
u	nahoru (angl. <i>up</i> )	1,5 – 3,3 <sup>[3]</sup>	+ $\frac{2}{3}$	+ $\frac{1}{2}$	0	0	0	0	$\bar{u}$
s	podivný (angl. <i>strange</i> )	92,4 ± 1,5 <sup>[4]</sup>	- $\frac{1}{3}$	0	-1	0	0	0	$\bar{s}$
c	působný (angl. <i>charm</i> )	1270 <sup>+70</sup> <sub>-110</sub> <sup>[3]</sup>	+ $\frac{2}{3}$	0	0	+1	0	0	$\bar{c}$
b	spodní ( <i>bottom</i> ), popř. krásný (angl. <i>beauty</i> )	4200 <sup>+170</sup> <sub>-70</sub> <sup>[3]</sup>	- $\frac{1}{3}$	0	0	0	-1	0	$\bar{b}$
t	svrchní ( <i>top</i> ), popř. pravdivý (angl. <i>truth</i> )	174 980 ± 750 <sup>[5]</sup> <sup>[6]</sup> [pozn. 1]	+ $\frac{2}{3}$	0	0	0	0	+1	$\bar{t}$

Elektrický náboj, izospin, podivnost, působ, krása a pravda představují kvantová čísla kvarku.

Kvarky řadíme do generací neboli rodin (podobně jako leptony). První generaci tvoří kvarky u a d (tj. nahoru a dolů), druhou generaci tvoří kvarky s a c (tj. podivný a působný) a třetí generaci tvoří kvarky b a t (tj. spodní a svrchní).

Tabulka Dle <https://cs.wikipedia.org/wiki/Kvark>

# Příklady kvarkového složení hadronů

V modelech nukleonů vystačíme jen se dvěma kvarky (původní teorie uvažovala pouze tři kvarky u, d, s)  
V modelu pionů potřebujeme i jejich antikvarky.

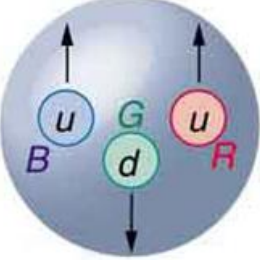
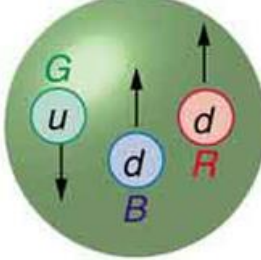
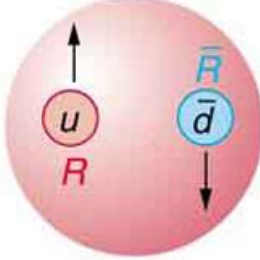
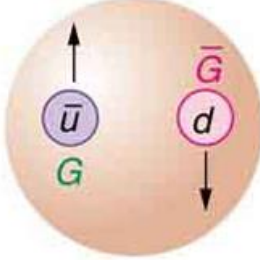
Pozor je to jen abstraktní analogie se spektrálními barvami v optice

Kvarky jsou „barevné“ a hadrony „bílé“  
RGB nebo pár barva-antibarva dává „bílou“ částici

V protonu převažuje protonový kvark u

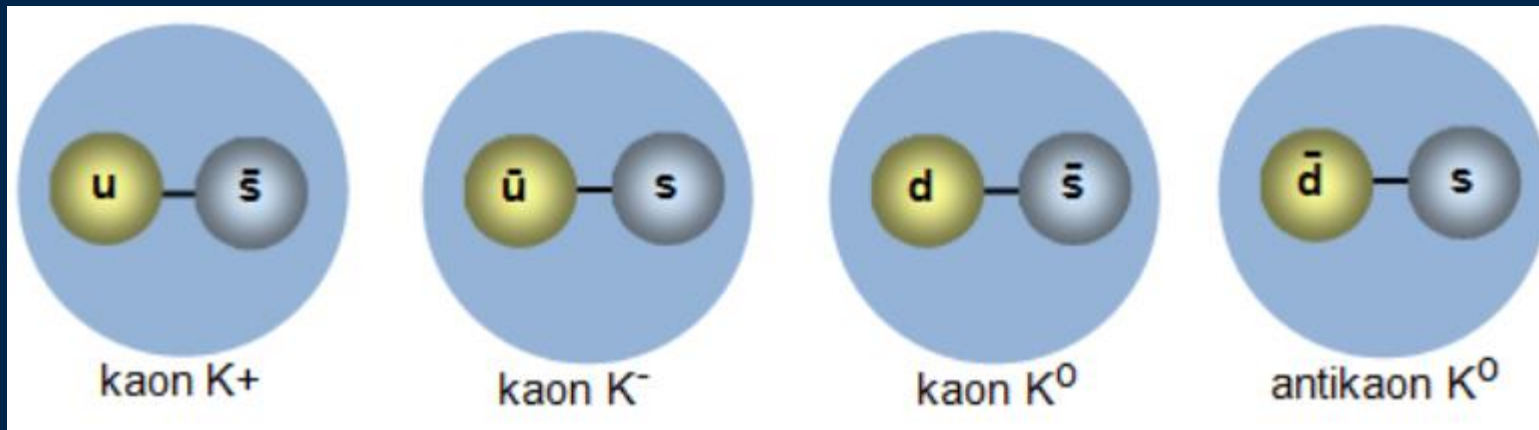
V neutronu převažuje neutronový kvark d

V pionech je pár kvark-antikvark

				
	Proton	Neutron	$\pi^+$	$\pi^-$
Spin	$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0$	$+\frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0$
Charge	$+\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$	$+\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$	$+\frac{2}{3} + \frac{1}{3} = +1$	$-\frac{2}{3} - \frac{1}{3} = -1$

Náboje hadronů nejsou zlomkové

# Kvarkové složení kaonů



$$K_S^0 = \frac{\Psi(d\bar{s}) + \Psi(\bar{d}s)}{\sqrt{2}} \quad \text{Lifetime } 9 \times 10^{-11} \text{ sec}$$
$$K_L^0 = \frac{\Psi(d\bar{s}) - \Psi(\bar{d}s)}{\sqrt{2}} \quad \text{Lifetime } 5 \times 10^{-8} \text{ sec}$$



# Základní fyzikální interakce

## Základní fyzikální interakce

Typ interakce	Relativní síla	Dosah (m)
elektromagnetická	$10^{-2}$	$\infty$
gravitační	$10^{-38}$	$\infty$
slabá	$10^{-13}$	$10^{-18}$
silná	1	$10^{-15}$ (hadrony) $\infty$ (kvarky)

Projev interakce

...  
elektronika,  
chemická  
vazba ...

... pád  
těles,  
sluneční  
soustava,  
galaxie,  
kosmologie  
...

... rozpady  
el. částic,  
např.  
přeměna  
beta ...

... soudržnost  
jader a  
hadronů ...

... **zbytkový projev silné interakce**  
kvarků v hadronech = interakce  
hadronů (např. **jaderné síly** mezi  
nukleony v jádře) ...

Silná interakce mezi kvarky

Analogie u elstat. Interakce - slabé  
mezimolekulové interakce jsou  
zbytkový projev silné mezimolekulové  
interakce (tj. chem vazby.- ta je pak  
kvantovým projevem elektrostatické  
interakce, jež je částí elmg. interakce)

# Základní částice polí

- Interakce částic lze popsat **fyzikálním polem**, které je v **kvantové teorii pole** popsáno pomocí částic – **kvant pole**.
- Silové působení interakce je pak možno vysvětlit jako výměnu tzv. **virtuálních kvant pole – zprostředkujících částic**.
- V případě **základních fyzikálních interakcí** to jsou tzv. **základní částice pole**:

- gravitony pro gravitační interakci,
- foton pro elektromagnetickou interakci,
- intermediální bosony pro slabou interakci,
- gluony pro silnou interakci
- Higgsův boson – nezprostředkuje interakci, ale vysvětluje hmotnost částic

zatím neobjeveny

potvrzeny

# Dosah interakce a hmotnost kvanta pole

➤ Fyzikální interakce je zprostředkována výměnou **virtuální částice** pole této interakce mezi reálnými částicemi (mluvíme stručně o výměně **kvanta pole**, někdy též **výměnné či zprostředkující částici**).

➤ Virtuální znamená, že existuje jen po dobu  $\Delta t$  na níž si může „půjčit“ **klidovou energii** pro svou existenci - ostatní ZZ musí být splněny

Po tuto dobu může být narušen zákon zachování energie

$$\Delta E = m_0 c^2$$

$m_0$  - klidová hmotnost virtuální částice

Ve vakuu tedy musí vzniknout **virtuální pár částice-antičástice**, při výměně virtuální částice musí být neměnná bilance zachovávících se kvantových čísel

➤ Za čas  $\Delta t$  změříme energii s nejmenší chybou  $\Delta E$  dle **relace neurčitosti**  $\Delta E \Delta t \approx h$

Planckova konstanta

➤ Pro dobu života částice tak platí  $\Delta t \approx h / m_0 c^2$

➤ Podle teorie relativity se částice může pohybovat nejvýše **rychlostí světla  $c$** , za dobu své existence doletí maximálně do vzdálenosti  $\Delta s = c \Delta t$ .

**Pro dosah interakce tedy platí**

Z dosahu lze odhadnout hmotnost kvant pole, a naopak

$$\Delta s \approx h / m_0 c$$

$$m_0 \gg 0$$



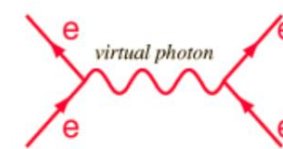
$\Delta s$  - krátký dosah

$$m_0 = 0$$

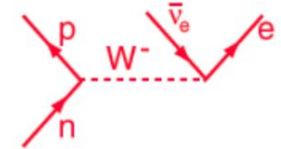


$\Delta s \rightarrow \infty$

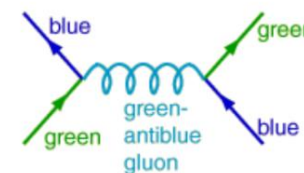
## Feynmanovy diagramy



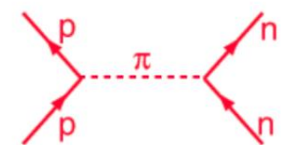
Electromagnetic



Weak



between quarks



between nucleons

Strong Interaction

Dle <https://physics.stackexchange.com/questions/68940/virtual-photons-what-makes-them-virtual>

# System základních částic

Zde J (S v atomové fyzice) je spinové číslo

Nepůsobí na ně silná interakce

Nábojem se rozumí elektrický náboj

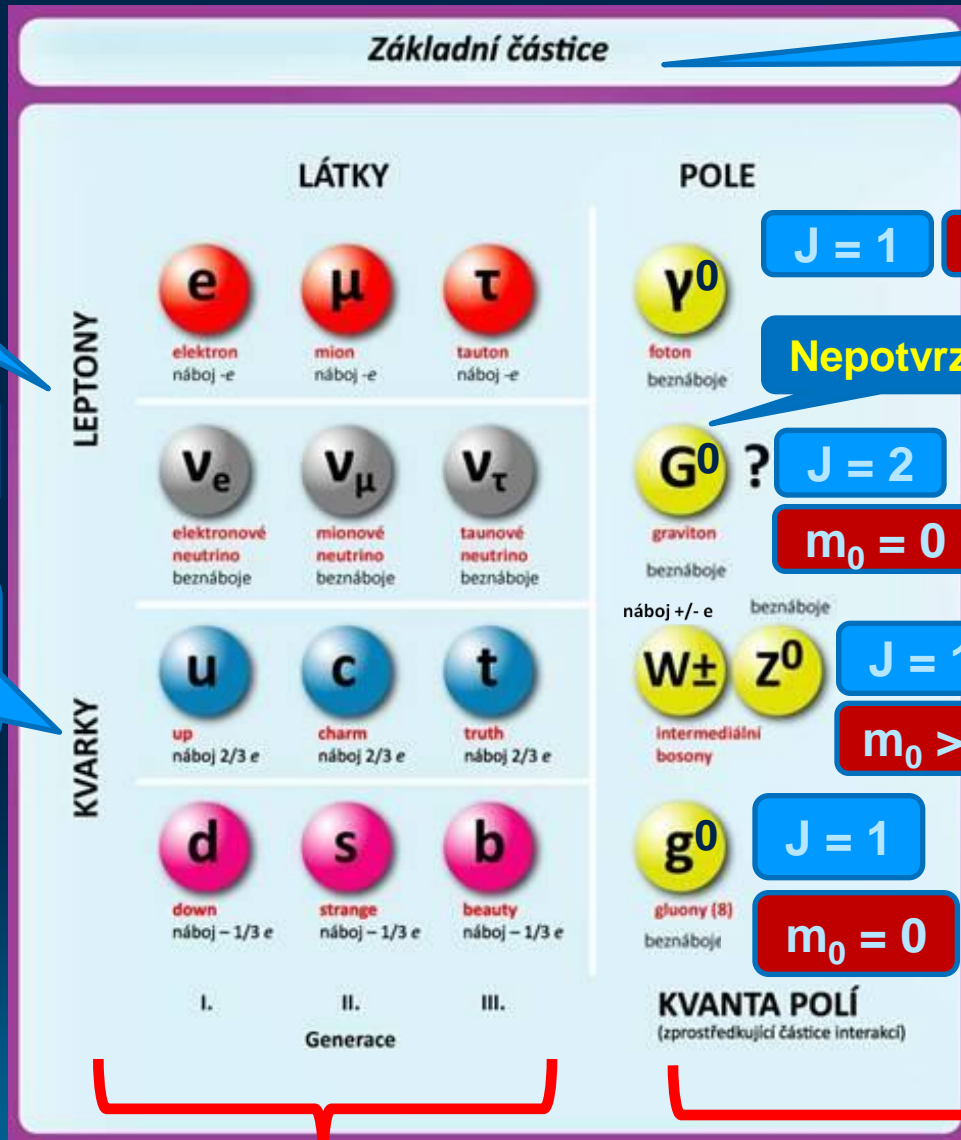
Působí na ně **i silná interakce**

Roste s generací

$m_0 > 0$

**Fermiony** s  $J = 1/2$

**Bosony** s hodnotami J výše



Elementární částice které **nejso** složeny (nemají další vnitřní strukturu)

Ještě je tu **Higgsův boson**

**Nepotvrzen**

**J = 0** **m<sub>0</sub> > 0**

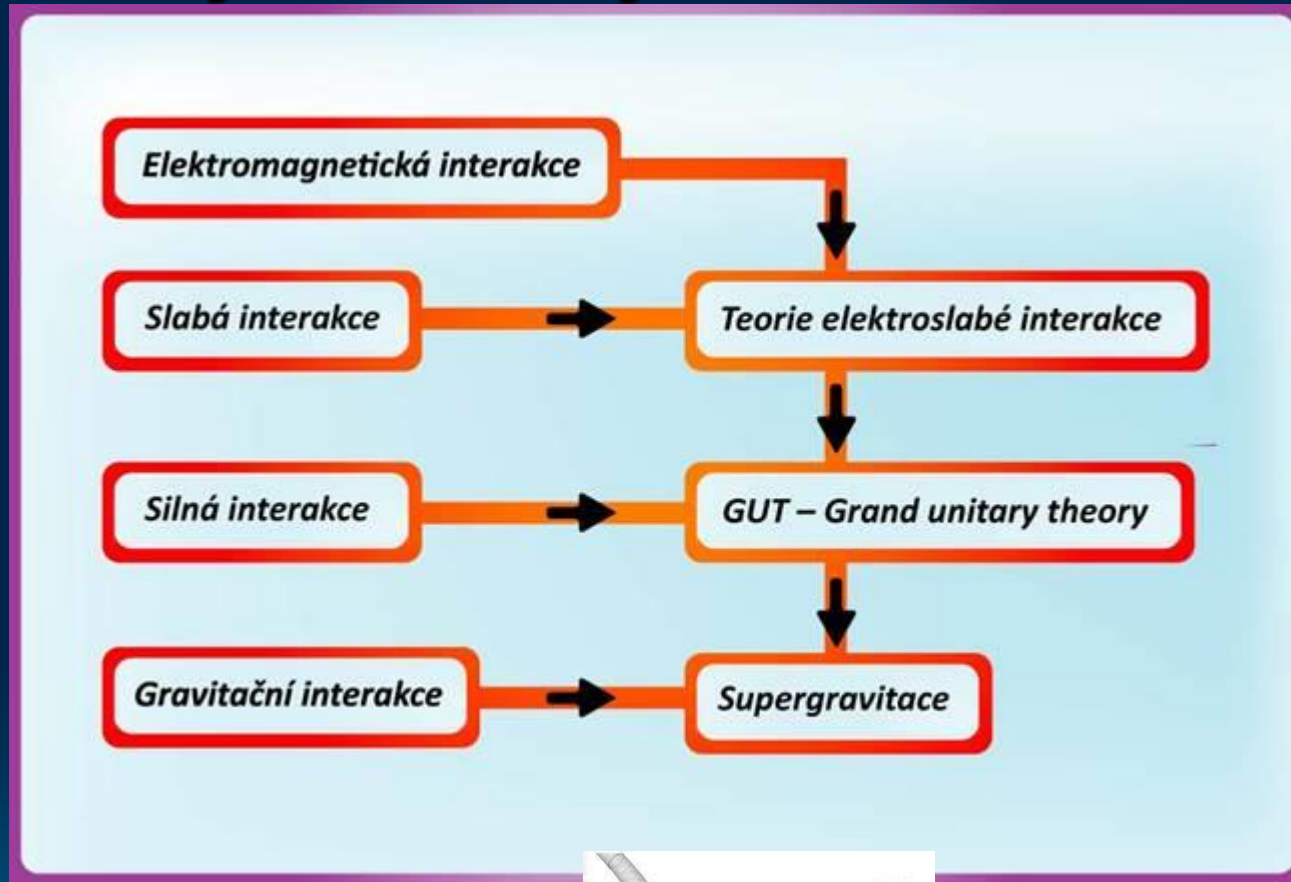


**Vysvětluje m<sub>0</sub> > 0**

Základní částice jsou experimentálně prokázány s výjimkou gravitonu. Buď přímo ze stop nabitých částic, častěji nepřímo z analýzy produktů rozpadu. Neutrino - nemají náboj  
Kvarky a gluony – nelze pozorovat jako volné  
Higgsův boson má klidovou energii 125-126GeV, žije velmi krátce 10<sup>-22</sup> s



# Sjednocující teorie



➤ teorie strun ??????

