

# Fenomenologické vlastnosti jader

1) Úvod - nukleonová struktura jader

2) Rozměry jader

3) Hmotnosti jader a vazbové energie

4) Energetické stavy jader

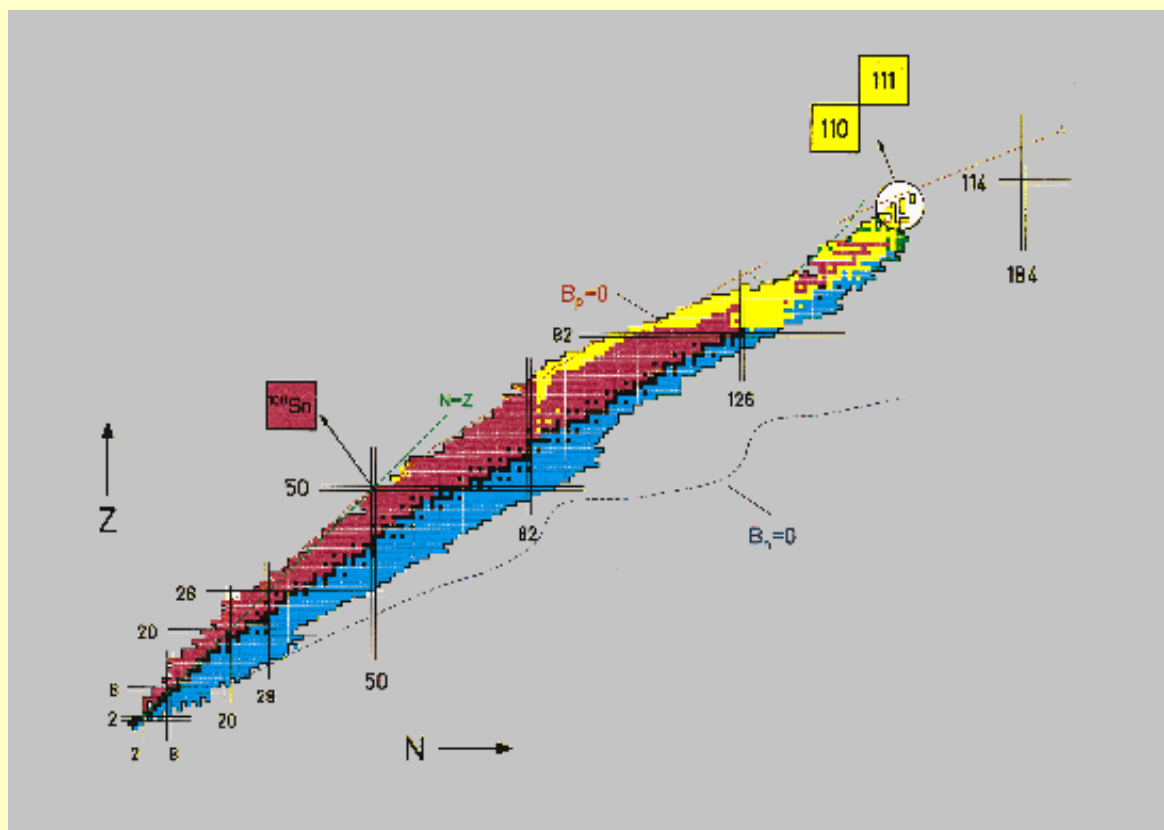
5) Spiny

6) Magnetické a elektrické momenty

7) Stabilita a nestabilita jader

8) Exotická jádra

9) Podstata jaderných sil



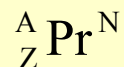
## Úvod – nukleonová struktura jader.

Atomové jádro se skládá z nukleonů (protonů a neutronů).

Počet protonů (atomové číslo) –  $Z$ .

Celkový počet nukleonů (nukleonové číslo) –  $A$ .

Počet neutronů –  $N = A - Z$ .



Různá jádra se stejným počtem protonů – **izotopy**. Různá jádra – **nuklidy**.

Různá jádra se stejným počtem neutronů – **izotony**. Jádra s  $N_1 = Z_2$  a  $N_2 = Z_1$  – **zrcadlová jádra**

Různá jádra se stejným počtem nukleonů – **izobary**.

Neutrální atomy mají stejný počet elektronů v atomovém obalu jako protonů v jádře.

Protonové číslo udává i náboj jádra:  $Q_j = Z \cdot e$

(Přímé potvrzení hodnoty náboje v rozptylových experimentech – z Ruthefordova vzorce pro rozptyl  $(d\sigma/d\Omega)_\theta = f(Z^2)$ )

Atomové jádro může být relativně stabilní v základním stavu nebo ve stavu vzbuze­ném s vyšší energií – **izomery** ( $\tau > 10^{-9}\text{s}$ ).

Stabilní jádra mají  $A$  a  $Z$  splňující přibližně empirickou formuli: 
$$Z = \frac{A}{1,98 + 0,0155A^{2/3}}$$

V současné době jsou spolehlivě známa a pojmenovaná jádra až po  $Z=112$  (objevy jader se  $Z=114, 116$  (Dubna) potvrzeny, objevy  $Z=113, 115, 117$  a  $118$  potřebují potvrdit).

**Aspoň jeden stabilní izotop** mají jádra až po  $Z=83$  (Bi) - ( $T_{1/2}(^{209}\text{Bi})=1,9 \cdot 10^{19}$  let).

Po ( $Z=84$ ) stabilní izotop nemá. Th, U a Pu mají  $T_{1/2}$  srovnatelné s věkem Země.

**Maximální počet stabilních izotopů má Sn ( $Z=50$ ) - 10 ( $A=112, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 122, 124$ ).**

**Celkový počet známých izotopů jednoho prvku až 38. Počet známých nuklidů: 3104 (r. 2011).**

# Rozměry jader

Určuje se vlastně **rozložení hmoty nebo náboje** v jádře.

Zkoumáme hlavně rozptylem nabitých nebo neutrálních částic na jádrech

Uvnitř jádra je hustota  $\rho$  hmoty a náboje konstantní a na okraji se pozoruje rychlý úbytek hustoty. Ve sférických jádrech můžeme toto rozložení dobře popsat vztahem (Woodsův-Saxonův):

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + e^{\alpha(r-R)}}$$

kde  $\alpha$  je koeficient difuze. Poloměrem jádra  $R$  se myslí vzdálenost od centra, kde hustota klesne na polovinu. Z měření pro  $R = f(A)$  platí přibližný vztah:  $R = r_0 A^{1/3}$

kde z měření vychází  $r_0 = 1,2(1) \cdot 10^{-15} \text{ m} = 1,2(2) \text{ fm}$  ( $\alpha = 1,8 \text{ fm}^{-1}$ ). To ukazuje na **konstantnost jaderné hustoty**. Z Avogádovy konstanty

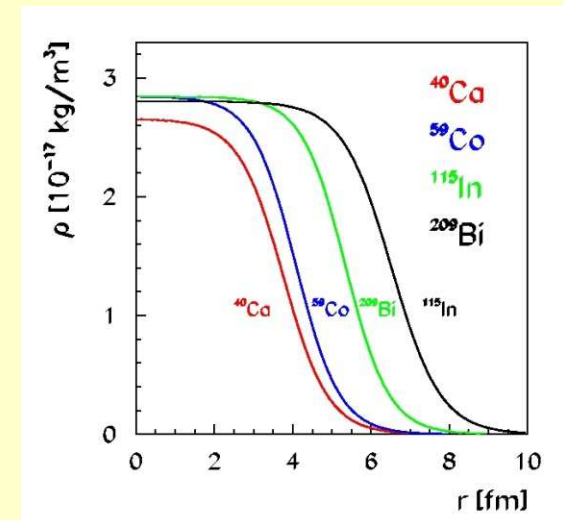
nebo hmotnosti protonu:  $\rho = \frac{Am_p}{\frac{4}{3}\pi \cdot R^3} = \frac{m_p}{\frac{4}{3}\pi \cdot r_0^3} = \frac{1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}{\frac{4}{3}\pi \cdot (1,2 \cdot 10^{-15} \text{ m})^3}$  dostaneme  $\rho \approx 10^{17} \text{ kg/m}^3$ .

Rozptyl rychlých elektronů (**rozložení náboje**) → **menší  $r_0$** .

Rozptyl neutronů (**rozložení hmoty**) → **větší  $r_0$** .

Větší objem neutronové hmoty způsoben větším počtem neutronů v jádrech (jinak by byl objem zaujímaný protony díky coulombovskému odpuzování větší).

Rozložení hustoty hmoty spojené s nábojem  $\rho = f(r)$  měřené v rozptyle elektronů s energií 1 GeV



# Hmotnosti jader

Jádro obsahuje  $Z$  protonů a  $N=A-Z$  neutronů. Naivní představa hmotnosti jádra:

$$M(A,Z) = Zm_p + (A-Z)m_n$$

Kde  $m_p$  je hmotnost proton ( $m_p \cong 938,27 \text{ MeV}/c^2$ ) a  $m_n$  je hmotnost neutronu ( $m_n \cong 939,56 \text{ MeV}/c^2$ )

kde  $\text{MeV}/c^2 = 1,782 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$ , používá se i hmotnostní jednotka:  $m_u = u = 931,49 \text{ MeV}/c^2 = 1,660 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ . Hmotnost jádra se pak udává pomocí **relativní atomové hmotnosti**  $A_r = M(A,Z)/m_u$ .

Skutečné hmotnosti jsou menší – jádro se díky zákonu zachování energie nerozpadá na své složky.

**Hmotnostní úbytek  $\Delta M$ :** 
$$\Delta M(A,Z) = M(A,Z) - (Zm_p + (A-Z)m_n)$$

Je ekvivalentní energii, která se uvolní při spojení jednotlivých nukleonů do jádra - **vazbové energii**

$$B(A,Z) = - \Delta M(A,Z) c^2$$

Vazbová energie vztažená na jeden nukleon  $B/A$ :

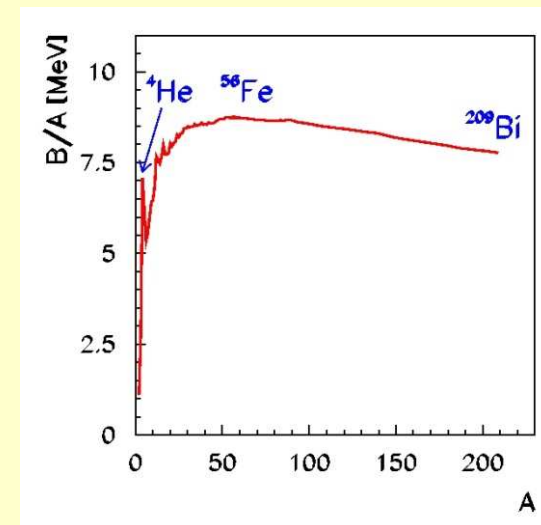
Maximum je pro jádro  $^{56}\text{Fe}$  ( $Z=26$ ,  $B/A=8,79 \text{ MeV}$ ).

Pro získání energie:

- 1) Slučovat lehká jádra
- 2) Štěpit těžká jádra

$$8,79 \text{ MeV/nukleon} \rightarrow 1,4 \cdot 10^{-13} \text{ J}/1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 8,7 \cdot 10^{13} \text{ J/kg}$$

(spalování benzínu:  $4,7 \cdot 10^7 \text{ J/kg}$ )



Vazbová energie na jeden nukleon pro stabilní jádra

**Deformovaná jádra** – všechna jádra nejsou kulově symetrická, kromě menších hodnot deformace u některých jader v základním stavu byla u vysoce vzbuzených stavů jader pozorována **superdeformace (2:1 ÷ 3:1)**. Měřeno pomocí elektrických kvadrupólových momentů a elektromagnetických přechodů mezi vzbuzenými stavy jader.

**Neutronová a protonová halo** – lehčí jádra s relativně velkým přebytkem neutronů či protonů → slabě vázané neutrony a protony vytvářejí halo okolo centrální části jádra.

**Experimentální určování rozměru jádra:**

**1) Rozptyl různých částic na jádře:** Nutná dostatečná energie nalétávajících částic pro zkoumání rozměru  $10^{-14}\text{m}$  ( $10^{-15}\text{m}$ ). De Broglieho vlnová délka  $\lambda = h/p < r$ :

**Neutrony:**  $m_n c^2 \gg E_{\text{KIN}} \rightarrow \lambda = h/\sqrt{2mE_{\text{KIN}}} = 2\pi\hbar c/\sqrt{2mc^2 E_{\text{KIN}}} \Rightarrow E_{\text{KIN}} = \frac{2(\pi\hbar c)^2}{\lambda^2 \cdot mc^2} = 8\text{MeV}(800\text{MeV}) \Rightarrow E_{\text{KIN}} > 8\text{MeV}(800\text{MeV})$

**Elektrony:**  $m_e c^2 \ll E_{\text{KIN}} \rightarrow \lambda = hc/E_{\text{KIN}} \rightarrow E_{\text{KIN}} = 2\pi\hbar c/\lambda = 124 \text{ MeV} (1240 \text{ MeV}) E_{\text{KIN}} > 100 \text{ MeV} (1000\text{MeV})$

**2) Měření rentgenových spekter mionových atomů obsahujících místo elektronů miony ( $m_\mu = 207 m_e$ ):**  $\mu, e$  – interagují s jádrem pouze elektromagneticky. Miony jsou  $\sim 200\times$  blíže jádra → „cítí“ rozměr jádra (pro mion je poloměr slupky K v Pb 3 fm  $\sim$  rozměr jádra)

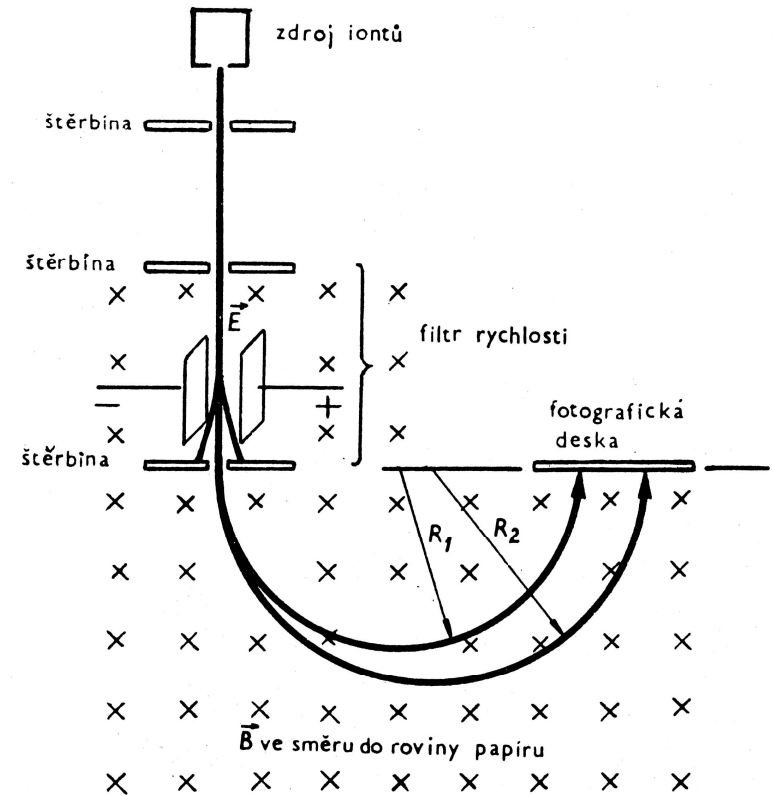
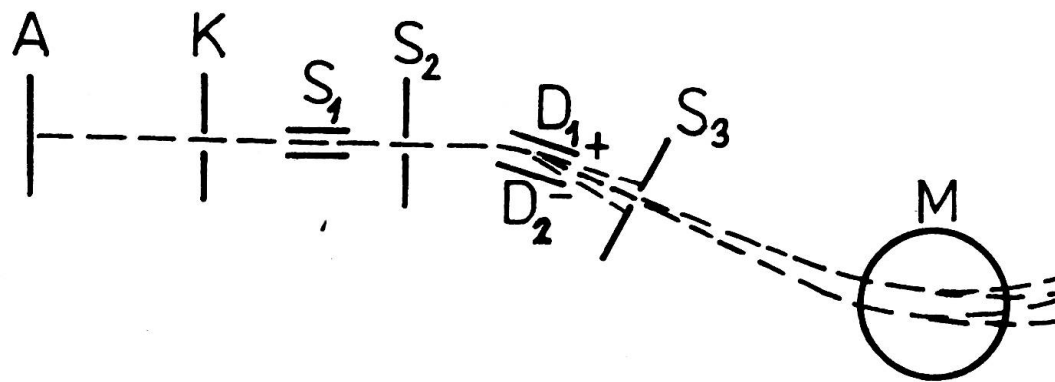
**3) Izotopový posun spektrálních čar:** v hyperjemné struktuře spekter atomů s různými izotopy pozorujeme rozštěpení spektrálních čar – závisí na rozložení náboje – poloměru jádra.

**4) Velikost coulombovské energie jádra:** Zmenšení vazbové energie jádra o coulombovskou energii  $E_C$  (energie rovnoměrně nabitě koule)  $E_C = \frac{3}{5} \frac{e^2}{R_C} Z^2$

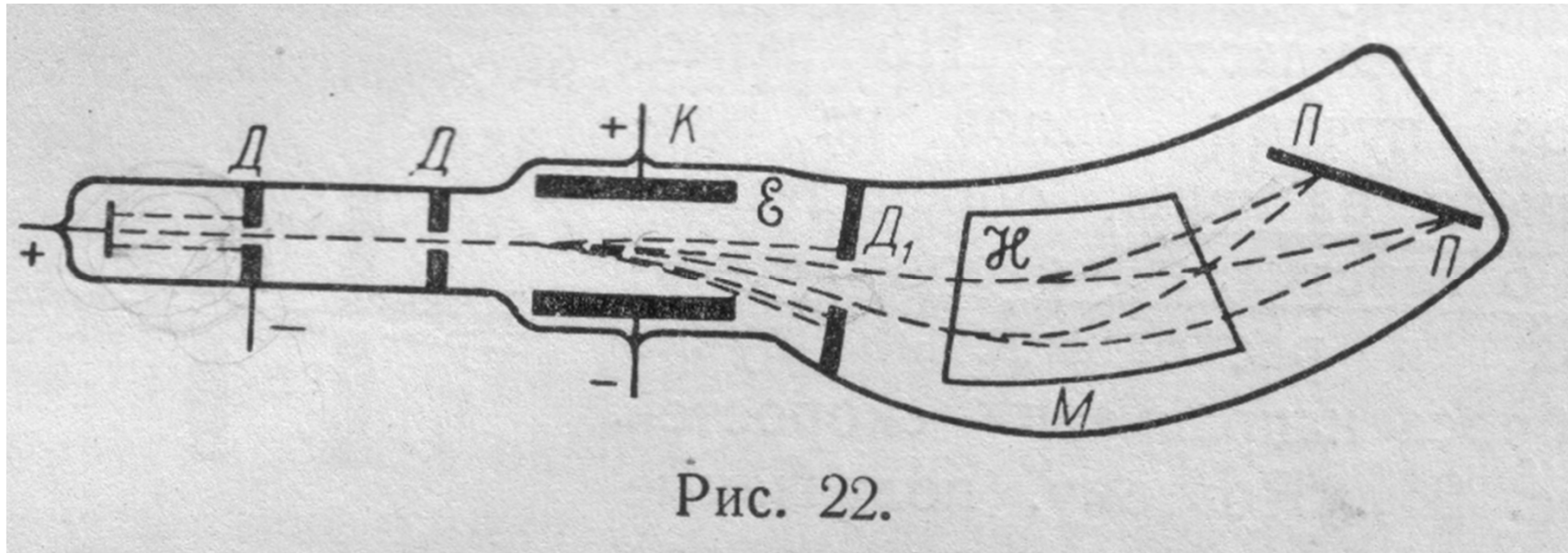
Zrcadlová jádra – stejná jaderná vazebná energie, rozdílná coulombovská. Rozdíl vazebné energie je dán rozdílem  $E_C$ .

**5) Studium rozpadu  $\alpha$ :** ze závislosti mezi pravděpodobností produkce částice  $\alpha$  a její kinetickou energií lze určit poloměr jádra

# Měření hmotnosti jader



# Aston rychlostní fokusace



Na rozdělení iontů --- obě pole

$$B \perp E$$

Částice se stejnou hmotností, ale různou rychlostí se sfokusuji  
do jednoho bodu



## Měření hmotností a vazbových energií:

### Hmotnostní spektroskopie:

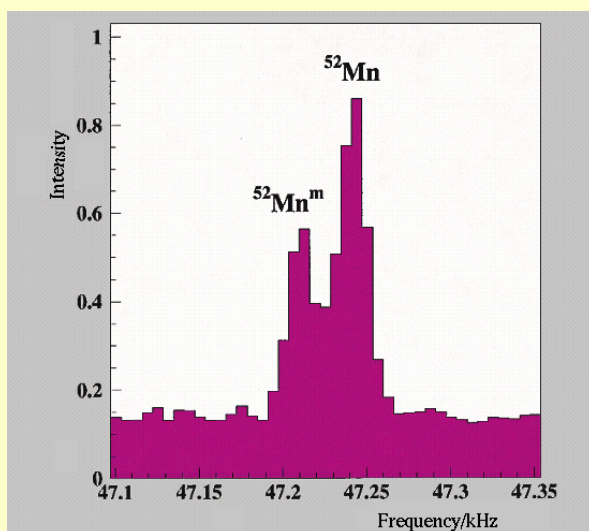
Hmotnostní spektrografy a spektrometry využívají pohyb částice v elektrickém a magnetickém poli:

Hmotnost  $m = p^2 / 2E_{\text{KIN}}$  lze určit z porovnání hybnosti a kinetické energie. Provádí se průchodem iontu s nábojem  $Q$  “filtrem energie” a “filtrem hybnosti”, které se realizují elektrickým a magnetickým polem:

$$\vec{F}_E = Q\vec{E} \quad \text{a tedy } \mathbf{F} = Q\mathbf{E} \quad \vec{F}_B = Q\vec{v} \times \vec{B} \quad \text{pro } \vec{B} \perp \vec{v} \text{ platí } \mathbf{F}_B = Q\mathbf{v}B$$

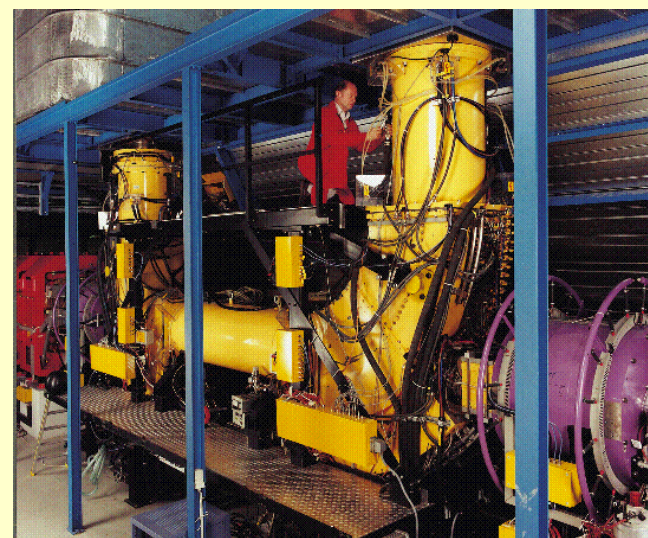
Ve studii Audiho a Wapstry z roku 1993, která se zabývala systematikou hmotnosti jader je jmenováno 2650 různých izotopů. Z nich jen 1825 má určenou hmotnost.

Využití frekvence oběhu v magnetickém poli prstence shromažďujícího ionty. Pomocí elektronového chlazení se vyrovnají hybnosti → pro různou hmotnost → různá rychlost a frekvence.



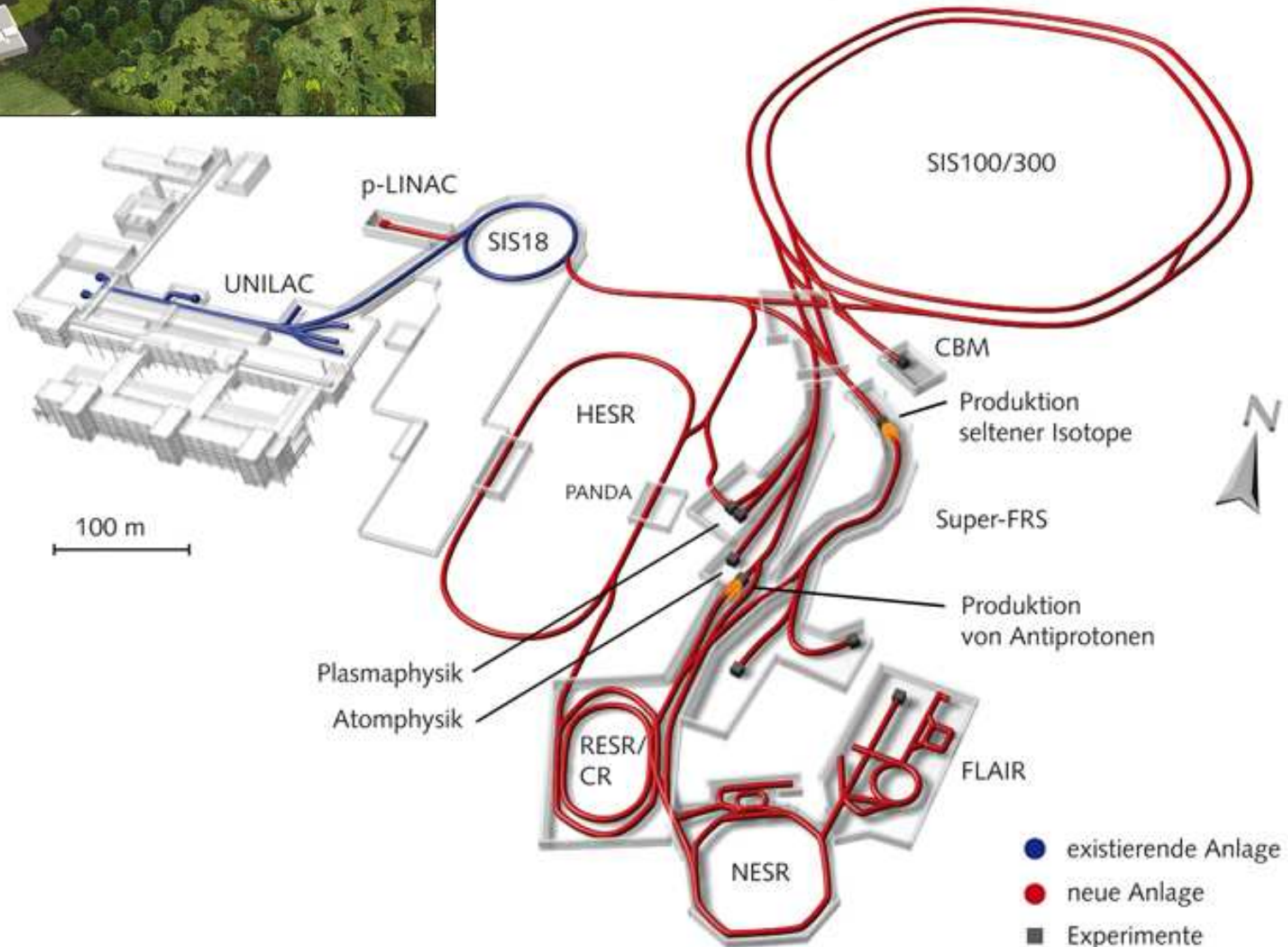
Srovnání frekvence (hmotnosti) základního a izomérního stavu  $^{52}\text{Mn}$ . Měřeno v GSI Darmstadt

Elektronové chlazení shromažďovacího prstence ESR v GSI Darmstadt





# FAIR (GSI Darmstadt)



# Atomová hmotnost

$$1u = 1.6604 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$1uc^2 = 931,49432 \text{ MeV}$$

**Z=30 (izotop zinku)**

**Střední hmotnost 65,38 u**

Hnotnostné číslo	Atómová hmotnosť (u)	Relatívne zastúpenie %
64	63.92914	48.89
66	66.92605	27.81
67	66.92715	4.11
68	67.92486	18.56
70	69.92535	0.62

**1. Hypotéza: Jádra jsou složena z vodíkových jader**

$$m_H = 1.007825u$$

**Realita** : Hmotnost jader je větší než hmotnost vodíkových atomů v počtu odpovídajícím protonovému číslu Z daného nuklidu

# Stavba atomového jádra

Jádro se skládá ze  $Z$  protonů a  $N$  neutronů

Protony a neutrony - nukleony,

nukleonové číslo  $A=Z+N$

Protony a neutrony - baryony = těžké fermiony  
(částice s poločíselným spinem)

**Značení**



Prvek X je dán protonovým číslem  $Z$



U-235

$A = 235 \Rightarrow 235$  nukleonů

$Z = 92 \Rightarrow 92$  protonů

$\Rightarrow 235-92 = 143$  neutronů

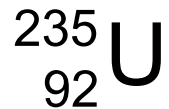
# Izotopy

Atomy, jejichž jádra mají stejný počet protonů ( $\Rightarrow$  jádra jednoho prvku), odlišují se však počtem neutronů

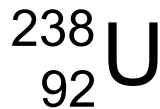
Velmi podobné fyzikální a chemické vlastnosti

Rozdílná hmotnost jádra  $\Rightarrow$  rozdílná hustota  $\Rightarrow$  možnost separace izotopů

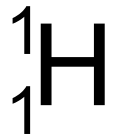
**Radioaktivita odlišných izotopů je výrazně odlišná!**



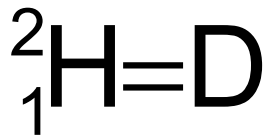
$7 \cdot 10^8$ let



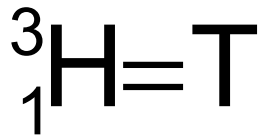
$4,5 \cdot 10^9$ let



lehký vodík (obyčejný stabilní izotop)



těžký vodík (deuterium stabilní izotop)



supertěžký vodík (tritium [poločas rozpadu](#) 12,33 roku)



# Izobary

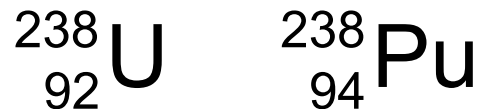
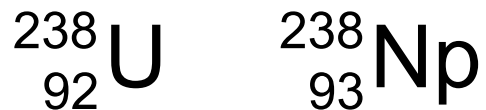
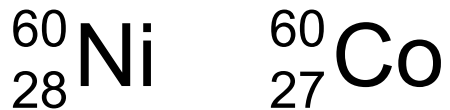
Atomy, jejichž jádra mají stejný počet nukleonů, ale odlišují se počtem protonů ( $\Rightarrow$  jádra odlišných prvků)

Přibližně stejná hmotnost jádra

Odlišné chemické vlastnosti (jádra odlišných prvků)

Přechod mezi sousedními izobary zprostředkovává rozpad  $\beta$  ( $\beta^-$ ,  $\beta^+$ )

**Příklady**



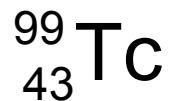
# Izomery

Atomy (jádra) o stejném protonovém i neutronovém čísle, které se však liší energetickým stavem jádra

Obdobně jako elektrony atomového obalu mohou obsazovat různé energetické hladiny, mohou i protony a neutrony obsazovat různé jaderné energetické hladiny

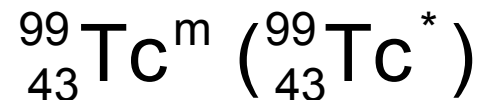
Přechod mezi izomery (z excitovaného stavu do nižšího nebo přímo nejnižšího = základního stavu) zprostředkovává rozpad  $\gamma$ , tj. vyslání vysokoenergetického fotonu

## Příklad



stabilní

technecium



metastabilní (excitované) technecium

# Hmotnostní deficit (defekt) $\Delta m$

Při vytvoření jádra ze  $Z$  protonů a  $N$  neutronů se uvolní vazebná energie, tj. sníží se energie vzniklého jádra  $\Rightarrow$  výsledné jádro je lehčí než součet hmotností nukleonů

Snížení je úměrné uvolněné vazebné energii  $\Rightarrow$  stabilní jádra jsou výrazněji lehčí, než součet hmotností nukleonů

$$m_J = Zm_p + Nm_n - \Delta m$$

**Hmotnosti izotopů se standardně udávají včetně hmotností elektronů  $\Rightarrow$**

$$m_{atom} = Z(m_p + m_e) + Nm_n - \Delta m \qquad \Delta m = \frac{\Delta E_J}{c^2}$$



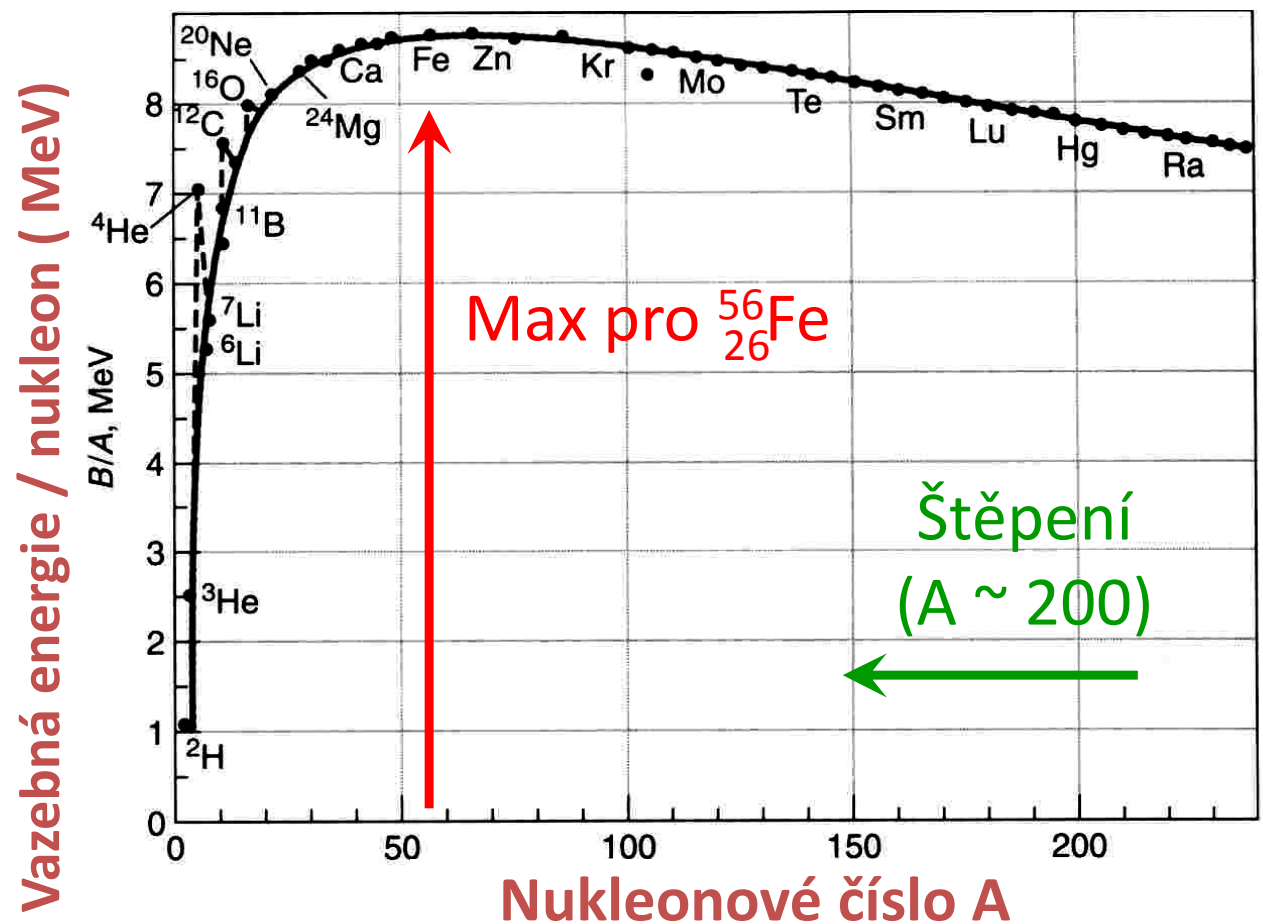
# Vazebná energie jádra na jeden nukleon

- Vazebná energie celého atomu roste s nukleonovým číslem,  
 $E_A = E_J \approx A$
- Vazebná energie na jeden nukleon není přesně konstantní

Maximum pro železo

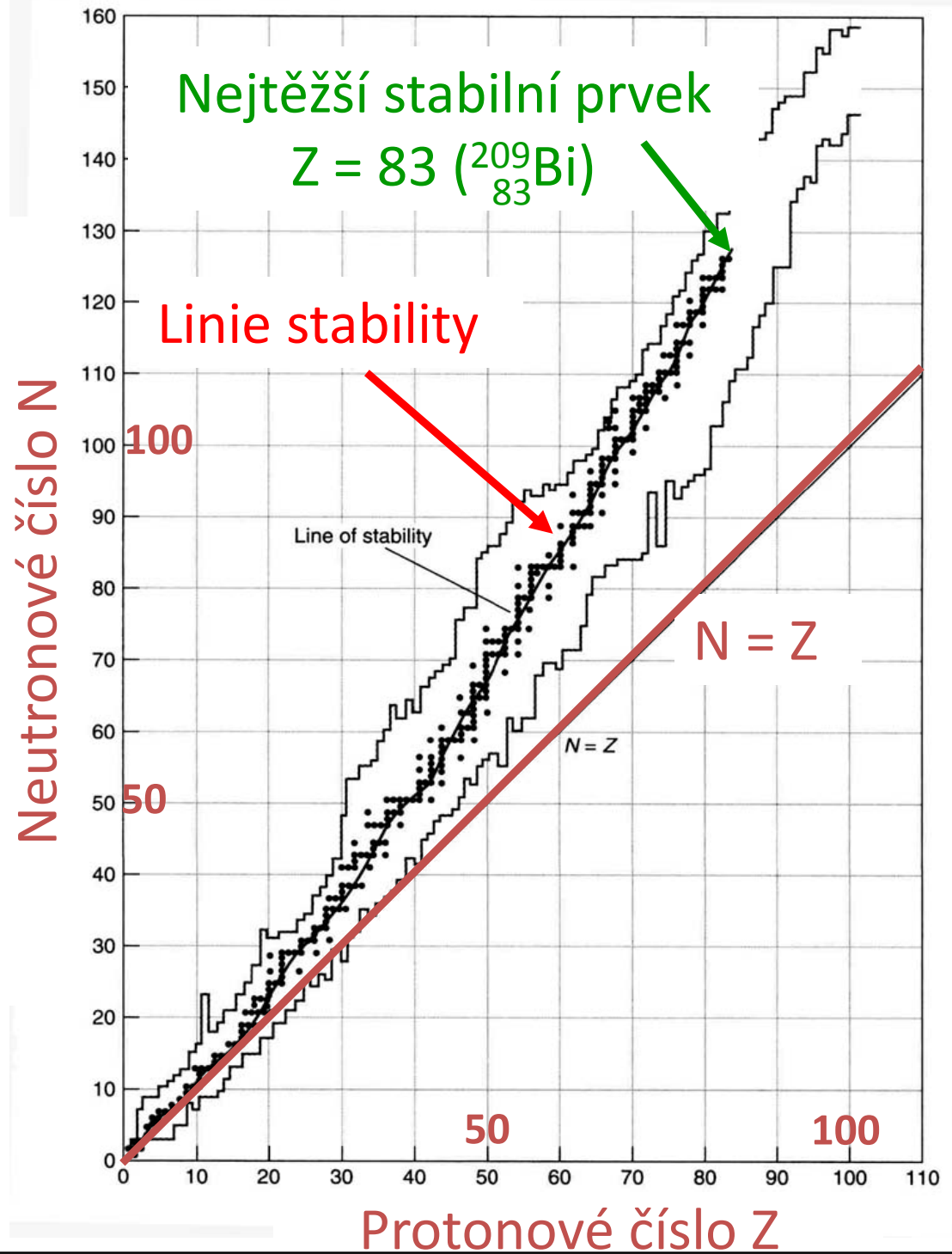
Nejnižší pro nejlehčí a nejtěžší prvky

Výjimečně stabilní  ${}^4\text{He}$



# Stabilita izotopů

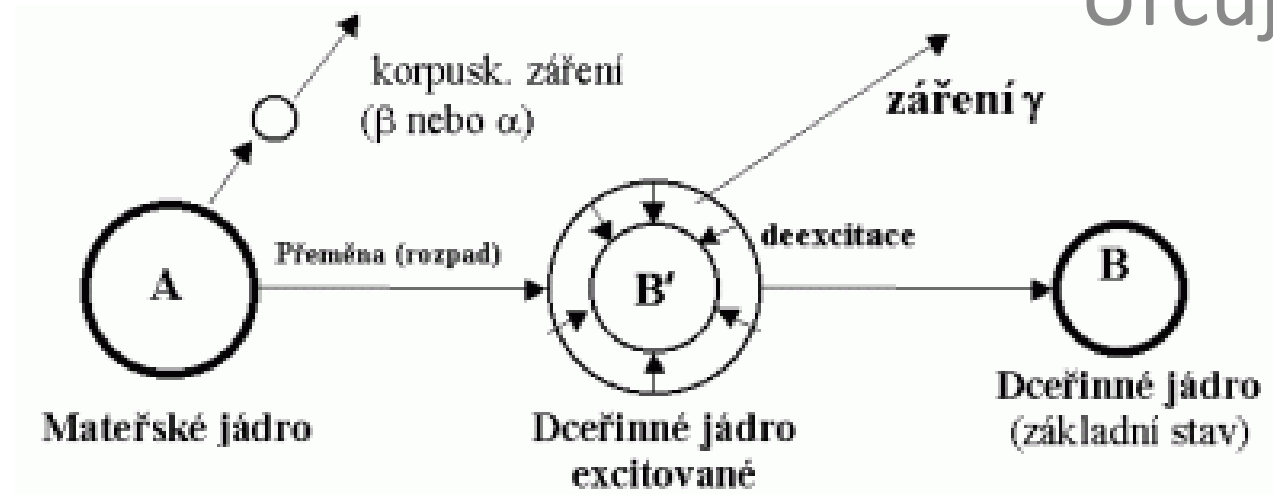
- **3000** známých jader,  
pouze  
**266** stabilních  
 $Z > 83 \Rightarrow$  nestabilní izotop
- Linie stability  $N \approx Z$  pro  
lehčí jádra,  
 $N > Z$  pro těžší jádra  
(elst. repulze protonů)



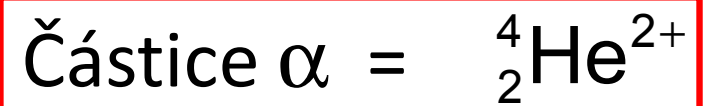


# Základní typy jaderných přeměn

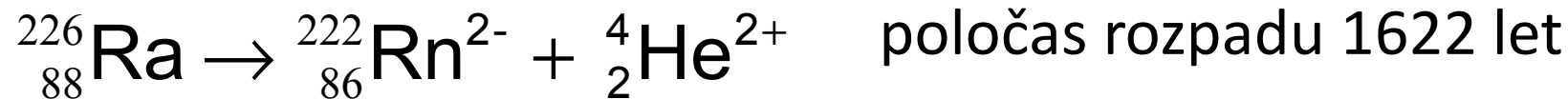
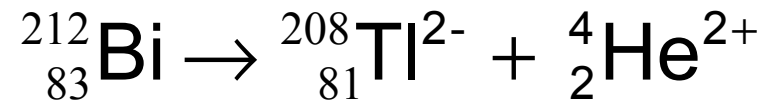
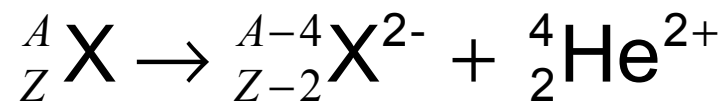
Určují druhy IZ



# Radioaktivní rozpad $\alpha$



Emitování jádra hélia z jádra **těžkého atomu** ( $A > 150$ )  
a jeho transmutace = přeměna na jiný prvek



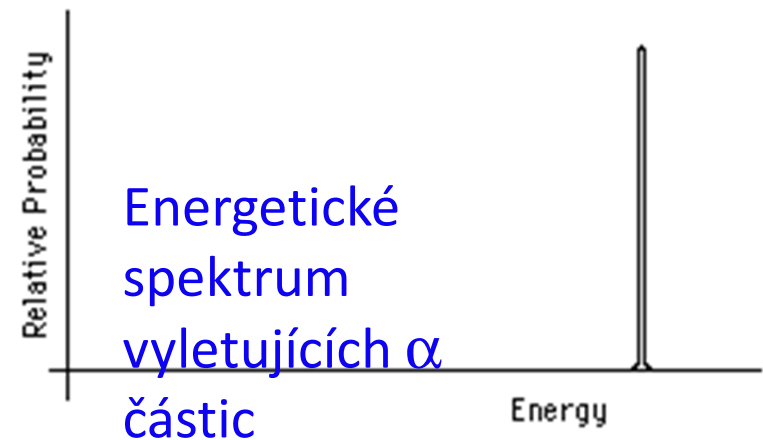
Při  $\alpha$  rozpadu se zachovává nukleonové a protonové číslo

Vzniklý těžký aniont má  $Z$  elektronů

a  $Z-2$  protonů  $\Rightarrow$  náboj  $2-$

Za zákona zachování energie a hybnosti  
je jednoznačně určena energie částice  $\alpha$   
i dceřinného jádra

Díky vysoké hmotnosti částice  $\alpha$  dochází  
ke zpětnému rázu, jádro získává dostatečnou energii k ionizaci



# Částice a antičástice

Ke každé částici existuje antičástice (někdy je identická s částicí), která má stejnou hmotnost, ale opačné hodnoty elektrického náboje a dalších „nábojů“ a čísel

Proton  $p^+$ , antiproton  $p^-$

Elektron  $e^-$ , pozitron  $e^+$

Elektronové neutrino  $\nu_e$ , elektronové antineutrino  $\bar{\nu}_e$

(obojí elektricky neutrální)

Při srážce částice se svou antičásticí dochází k **anihilaci**, částice a antičástice zaniknou a uvolněná energie se vyzáří ve formě dvou fotonů  $\gamma$  letících opačnými směry

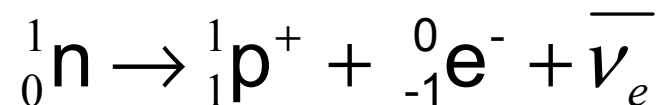
$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma \quad E_\gamma \geq m_e c^2 = 0,511 \text{ MeV}$$

Využito v PET (pozitronová emisní tomografie)

# Radioaktivní rozpad $\beta^-$

$$\text{Částice } \beta \ (\beta^-) = e^-$$

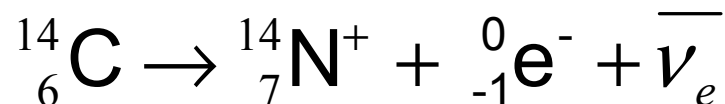
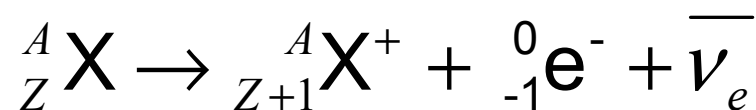
Rozpadu  $\beta^-$  předchází přeměna neutronu na proton, elektron a elektronové antineutrino



Poločas rozpadu **volného neutronu** je 10,3 minuty (stř. doba života je 14,7 minut)

**Hmotnost neutronu je vyšší než součet hmotnosti protonu a elektronu (a antineutrina)**  $\Rightarrow$  může docházet k samovolnému rozpadu

Při  $\beta^-$  rozpadu se jeden neutron v jádře přemění na proton, elektron a antineutrino se vyzáří



(Anti)neutrino jsou téměř nedetekovatelná

Zeslabení intenzity na polovinu  $\approx 10^{16}$  m olova

Hmotnost neutrino max. řádově milióntina hmotnosti elektronu

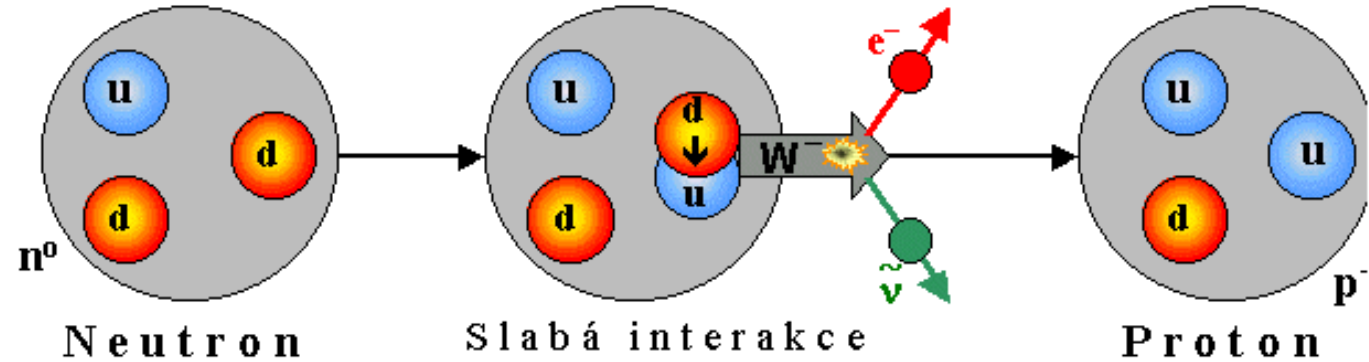
# Radioaktivní rozpad $\beta^-$

Energetické spektrum  $\beta$  elektronů je spojité od 0 až po maximum

Tříčásticový rozpad

ZZE a ZZH

Beta<sup>-</sup> - rozpad neutronu:  $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}$



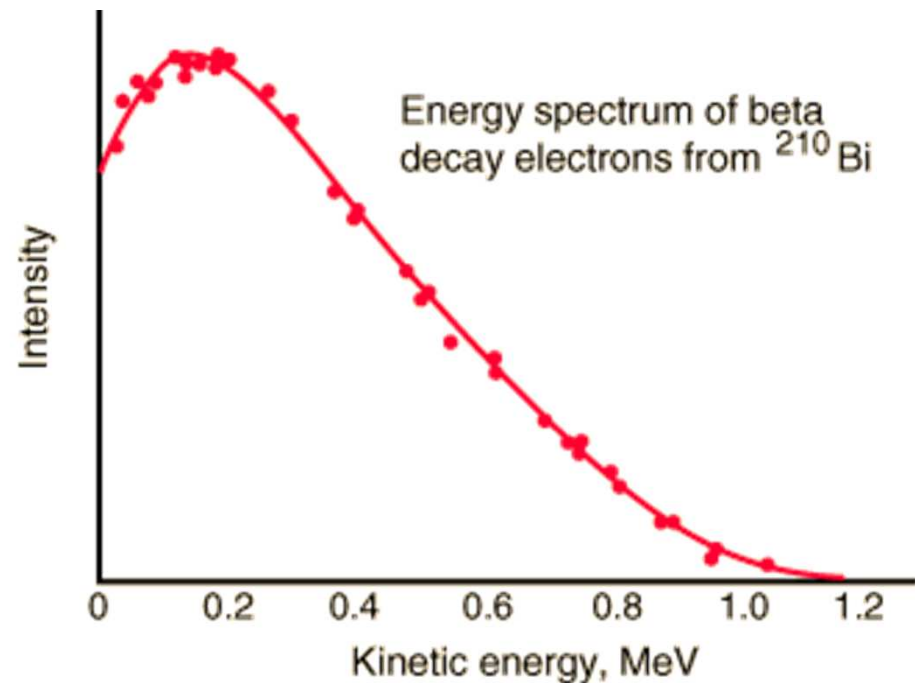
Maximální energie

0,02 MeV u tritia  ${}^3_1\text{H}$

13,4 MeV u boru  ${}^{12}_5\text{B}$

Nejtěžší izotop podléhající  
 $\beta^-$  rozpadu  
konkurencí  $\alpha$  rozpad

${}^{255}_{99}\text{Es}$

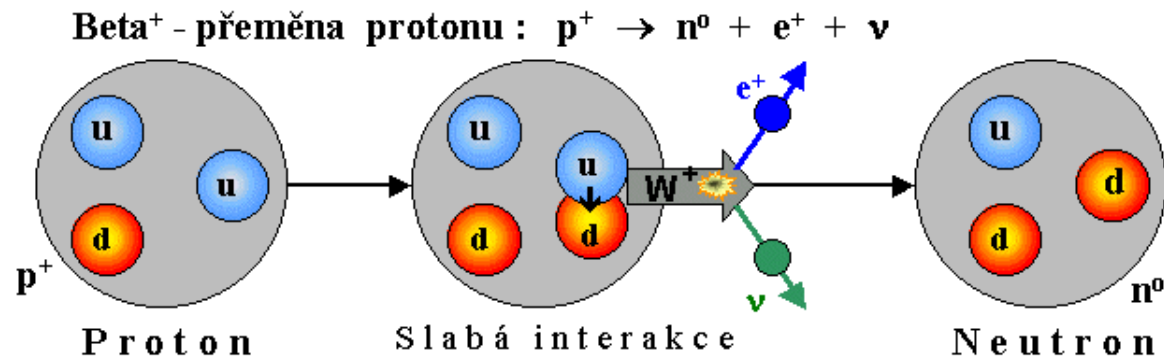
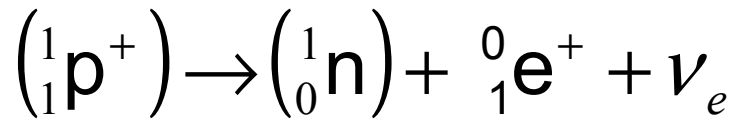




# Radioaktivní rozpad $\beta^+$

$$\text{Částice } \beta^+ = e^+$$

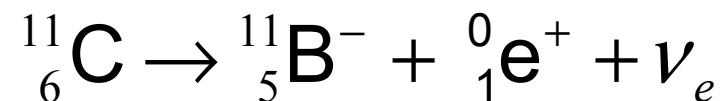
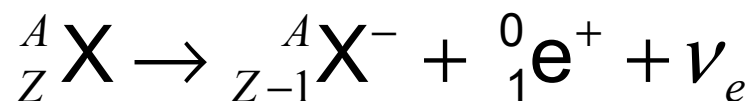
Podstatou rozpadu  $\beta^+$  je přeměna protonu na neutron, pozitron a elektronové neutrino



Hmotnost protonu je nižší než hmotnost neutronu  $\Rightarrow$  nemůže docházet k samovolnému rozpadu volného protonu, ale může k této přeměně docházet v jádře atomu

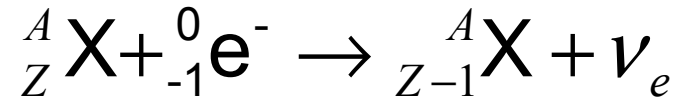
Při  $\beta^+$  rozpadu se jeden proton v jádře přemění na neutron, pozitron a neutrino se vyzáří

Všechny  $\beta^+$  radionuklidy jsou umělé (využití: např. PET)

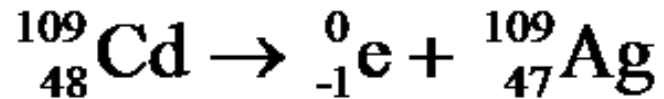
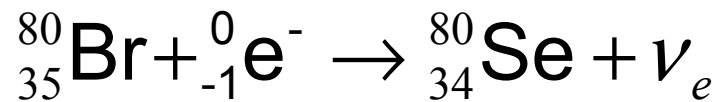


# Radioaktivní rozpad $\beta^-$ - záchyt K

Zachycení elektronu z první slupky obalu (slupka K)  
jádro a následná jaderná reakce



Přeměna atomu, změna protonového čísla jako při  
rozpadu  $\beta^+$



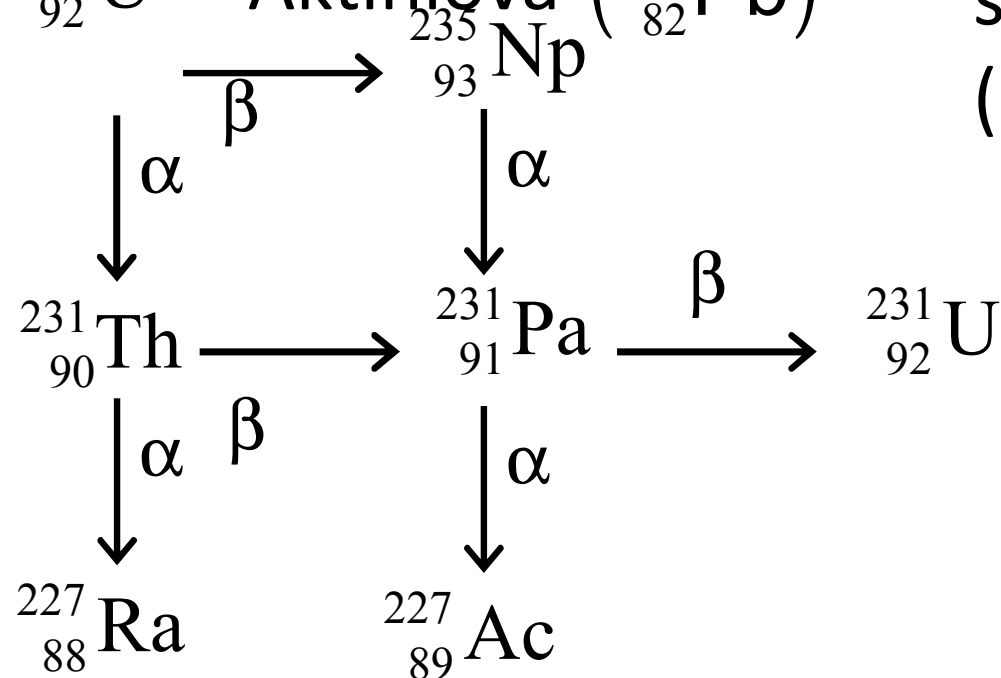
# Rozpadové řady

$^{238}_{92}\text{U}$  Uranová ( $^{206}_{82}\text{Pb}$ )

$^{237}_{93}\text{Np}$  Neptuniová ( $^{209}_{83}\text{Bi}$ )

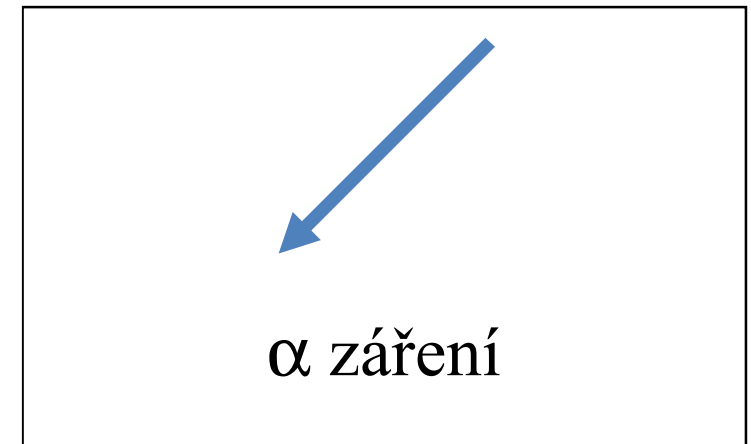
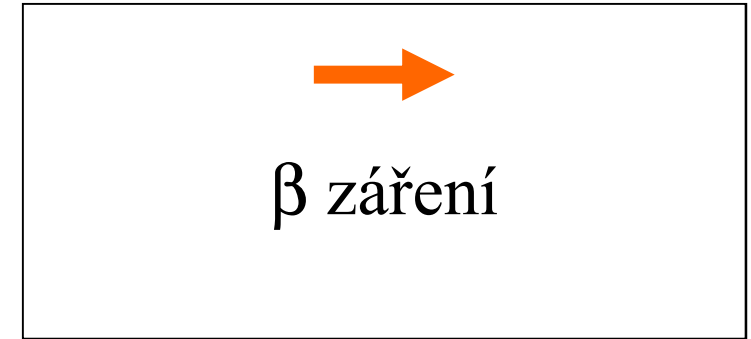
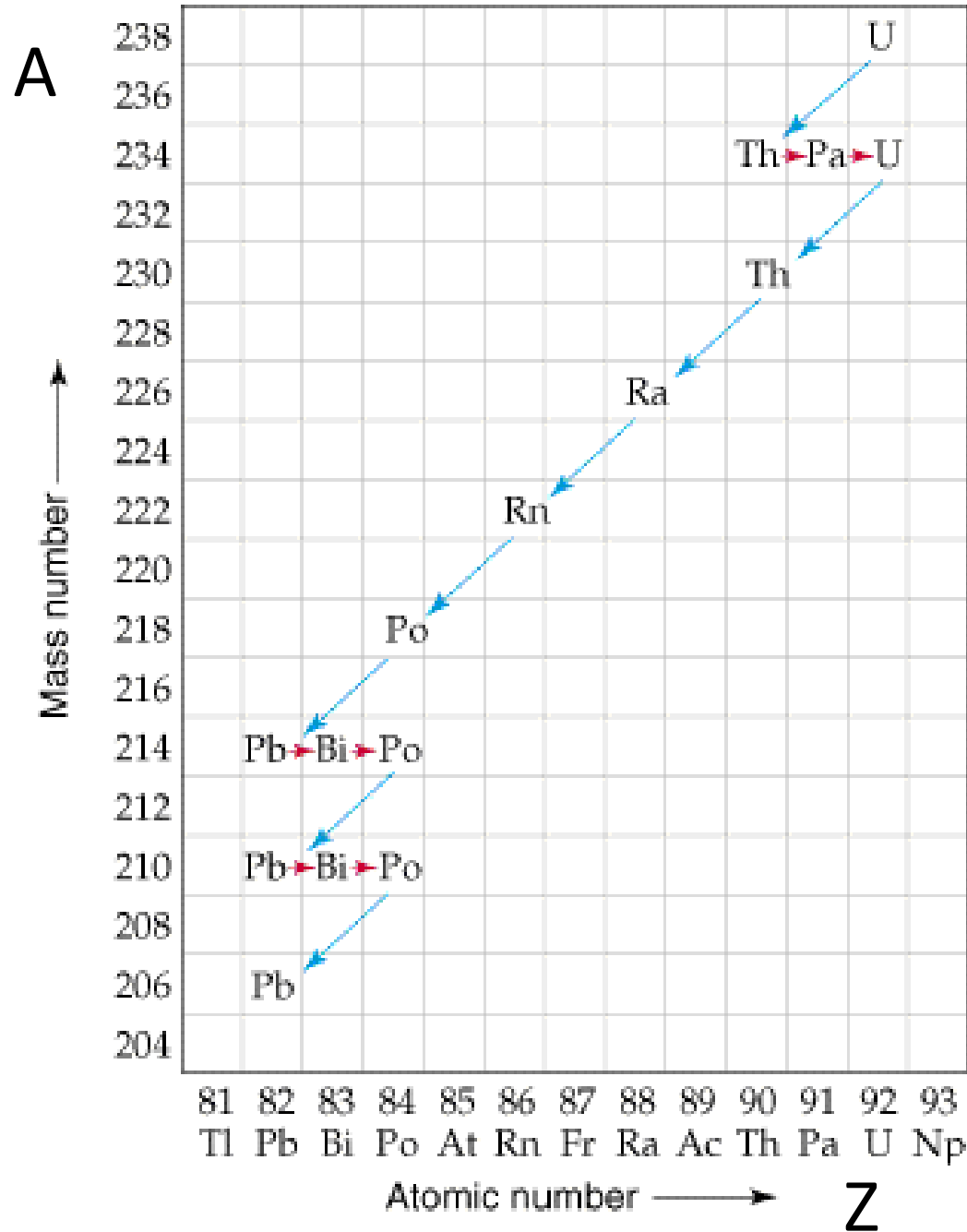
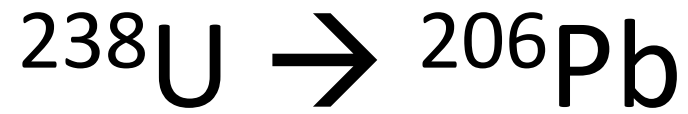
$^{232}_{90}\text{Th}$  Thóriová ( $^{208}_{82}\text{Pb}$ )

$^{235}_{92}\text{U}$  Aktiniová ( $^{207}_{82}\text{Pb}$ )



Čtyři rozpadové řady dány snížením počtu nukleonů o 4 při rozpadu  $\alpha$  a zachováním počtu nukleonů při rozpadu  $\beta$

Rozpadové řady končí stabilními izotopy olova  $^{82}\text{Pb}$  (bizmutu  $^{83}\text{Bi}$ )



# Radioaktivní záření $\gamma$

Vzniká v jádře atomů při změně energetického stavu jádra – následek emise či absorpce částice

Vlnová délka  $\lambda < 300 \text{ pm}$

Energie 100 keV až 10 MeV

Silně ionizující

Fotoelektrický jev (dominantní do 0,5 MeV)

Comptonův rozptyl (dominantní 0,5 – 5 MeV)

Tvorba elektron – pozitronových párů ( $e^-$ ,  $e^+$ )

Opačný proces k anihilaci páru částice – antičástice

Pouze u fotonů s energií větší než  $2m_e c^2 \cong 1 \text{ MeV}$

Pouze za účasti interakce s další částicí (atomem)

$\Rightarrow$  nenastává ve vakuu



# Vnitřní konverze záření $\gamma$

Foton emitovaný jádrem vyrazí elektron z vnitřní vrstvy atomového obalu

Těžký atom  $\Rightarrow$  vysoké protonové číslo  $\Rightarrow$  velká elektrostatická energie vnitřních elektronů

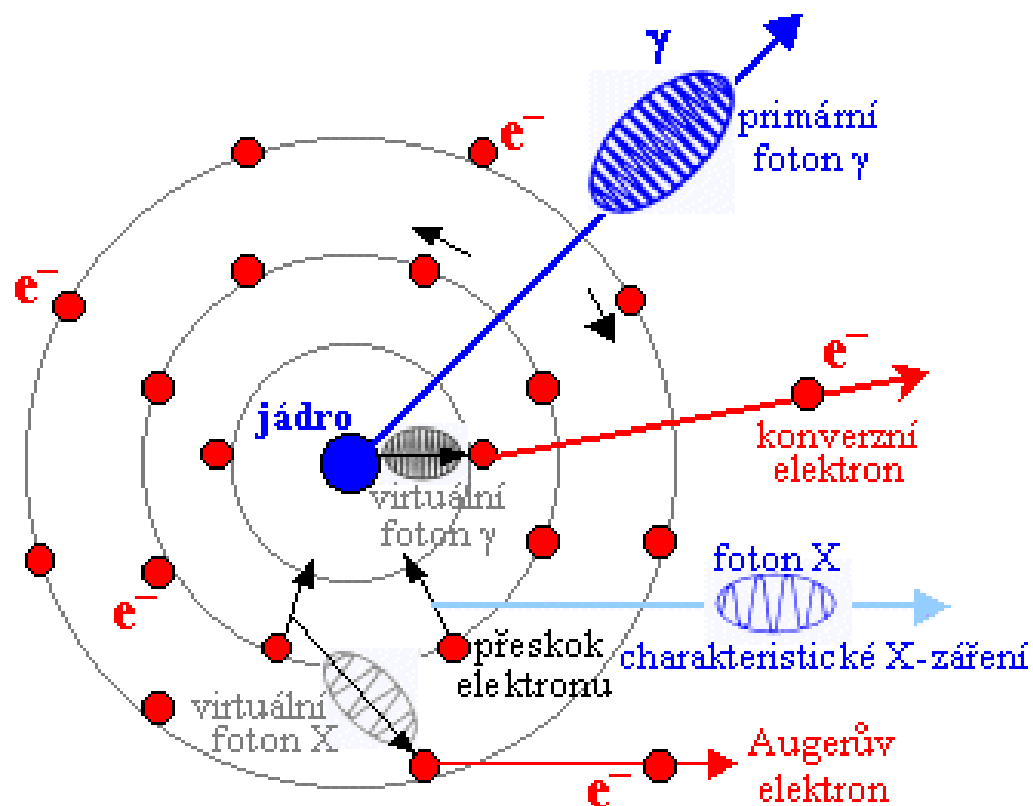
Vyražený elektron s velkou energií a ionizační schopností ionizuje prostředí

Konverzní elektron

Přeskok elektronu z vyšší vrstvy na uvolněné místo vnitřní vrstvy  $\Rightarrow$  vznik RTG záření s možností další konverze

Augerův elektron

$\Rightarrow$   $\gamma$  zářič může být zdrojem sekundárního záření  $\beta$  a RTG záření



# Vnitřní konverze záření $\gamma$

Relativní pravděpodobnost vnitřní konverze vůči rozpadu gama se nazývá konverzní koeficient (koeficient vnitřní konverze)

Konverzní koeficienty rostou s  $E_\gamma$  a rostou se  $Z$  jádra

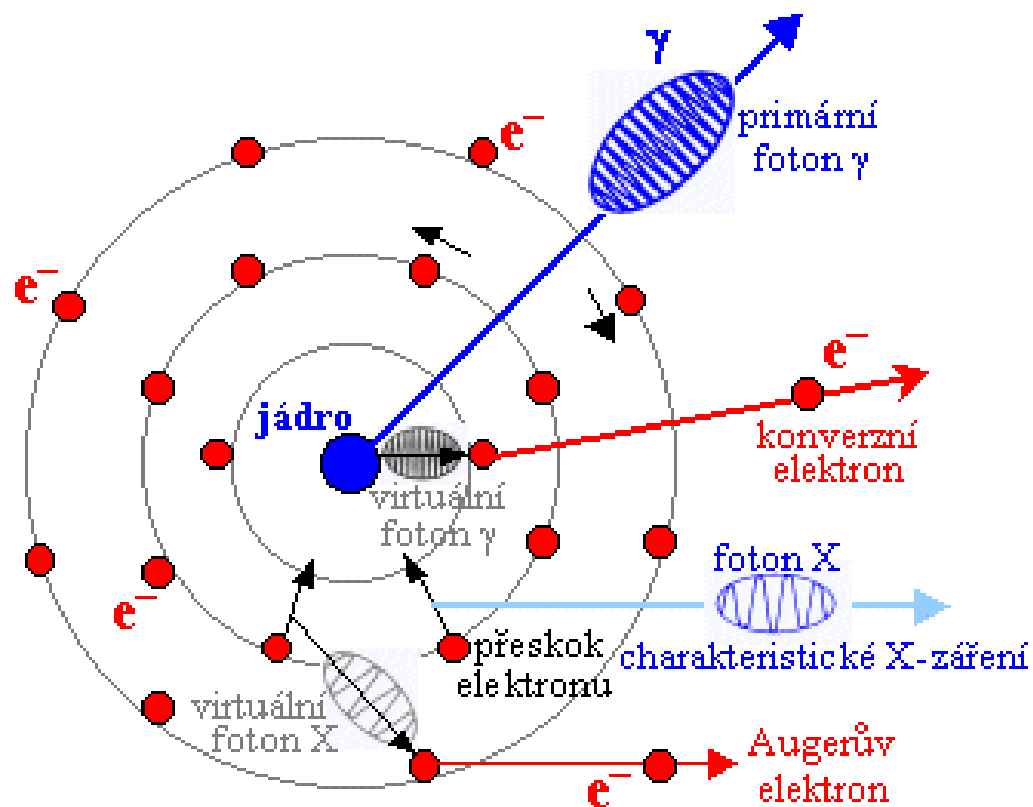
Vnitřní konverze dominuje pro přeměny, kdy spin obou izomerů je shodný

Příklady (pokud se jádro rozpadá několika možnými  $\gamma$  rozpady, stanovuje se hodnota ICC = internal conversion coefficient pro každou energii  $\gamma$  záření zvlášť

$$\text{ICC}({}^{57}\text{Fe})=8,5 \%$$

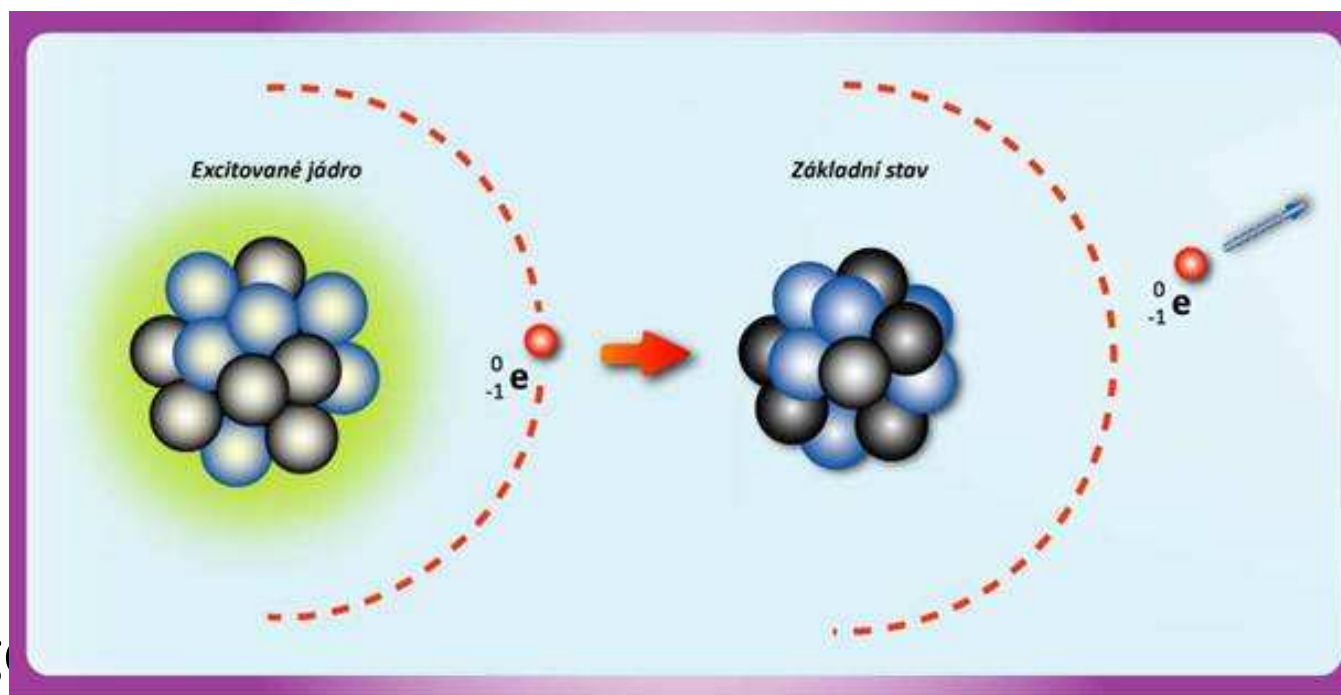
$$\text{ICC}({}^{109}\text{Ag})=26 \%$$

$$\text{ICC}({}^{60}\text{Ni})=1,7 \cdot 10^{-2} \%$$



# 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.



- Energo

etní



# Zákon radioaktivního rozpadu

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

**Aktivita (radioaktivita) A:**

kde **N** je počet jader v daném okamžiku ve vzorku [**Bq** = s<sup>-1</sup>, **Ci** = 3,7 · 10<sup>10</sup>Bq].

Předpokládejme konstantní pravděpodobnost **λ** rozpadu každého jádra za jednotku času.

Počet **dN** jader rozpadlých za dobu **dt**:

$$dN = -N\lambda dt \longrightarrow \frac{dN}{N} = -\lambda \cdot dt$$

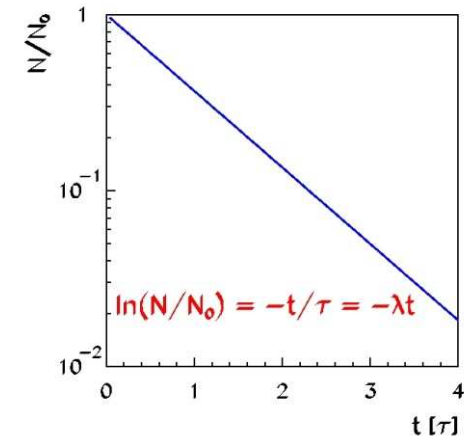
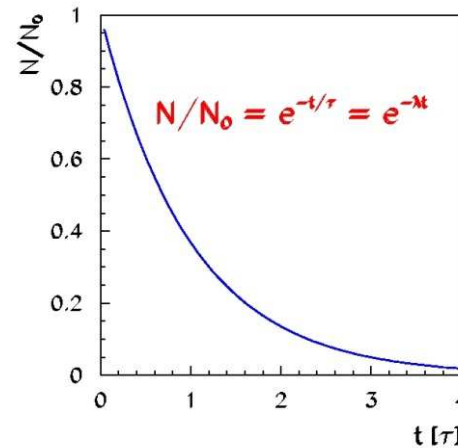
Obě strany integrujeme:  $\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt$

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda t \longrightarrow N = N_0 e^{-\lambda t}$$

pro radioaktivitu dostaneme:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}$$

kde  $A_0 \equiv -\lambda N_0$



Pravděpodobnost rozpadu **λ** se nazývá rozpadovou konstantou. →

Čas, za který poklesne **N** na **N/2** je poločas rozpadu **T<sub>1/2</sub>**.

Dosadíme **N = N<sub>0</sub>/2**:

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

**Střední doba života τ:**

Pro **t = τ** klesne aktivita na **1/e = 0,36788**.  $\tau = \frac{1}{\lambda}$

**Celková pravděpodobnost  $\lambda$  při různých alternativních možnostech s rozpadovými**

**konstantami  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \dots \lambda_M$ :  $\lambda = \sum_{k=1}^M \lambda_k \longrightarrow \Gamma = \sum_{k=1}^M \Gamma_k$**

**U rozpadových řad máme posloupnost rozpadů  $\lambda_1 N_1 \rightarrow \lambda_2 N_2 \rightarrow \lambda_3 N_3 \rightarrow \dots \rightarrow \lambda_i N_i \rightarrow \dots \rightarrow \lambda_M N_M$   
časová změna  $N_i$  pro  $i$ -tý izotop v řadě:**

$$dN_i/dt = \lambda_{i-1} N_{i-1} - \lambda_i N_i$$

**řešíme soustavu diferenciálních rovnic  
a předpokládáme:**

$$N_1 = C_{11} e^{-\lambda_1 t}$$

$$N_2 = C_{21} e^{-\lambda_1 t} + C_{22} e^{-\lambda_2 t}$$

...

$$N_M = C_{M1} e^{-\lambda_1 t} + \dots + C_{MM} e^{-\lambda_M t}$$

**Pro koeficienty  $C_{ij}$  platí:  $i \neq j$   $C_{ij} = C_{i-1,j} \frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i - \lambda_j}$**

**Koeficienty s  $i = j$  dostaneme z okrajových podmínek v čase  $t = 0$ :  $N(0) = C_{i1} + C_{i2} + C_{i3} + \dots + C_{ii}$**

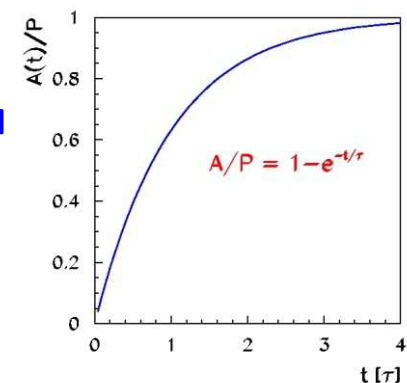
**Zvláštní případ pro  $\tau_1 \gg \tau_2, \tau_3 \dots \tau_M$ : každý následující člen má stejný počet rozpadů za sekundu jako první. Počet existujících atomů je nepřímo úměrný jeho  $\lambda$ .  $\rightarrow$  Rozpadová řada je v radioaktivní rovnováze.**

**Vznik radioaktivních jader konstantní rychlostí – ozářením v reaktoru a na urychlovači. Rychlost vzniku radioaktivních jader je  $P$ :**

$$dN/dt = -\lambda N + P$$

**Řešení rovnice ( $N_0 = 0$ ):  $\lambda N(t) = A(t) = P(1 - e^{-\lambda t})$**

**Je sice účelné ozařovat několik poločasů ale ne moc dlouho –  
dochází k nasycení.**



**Vývoj aktivity při  
rovnoměrném ozařování**

# Aktivita

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

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

# Zákon radioaktivní přeměny

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

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

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

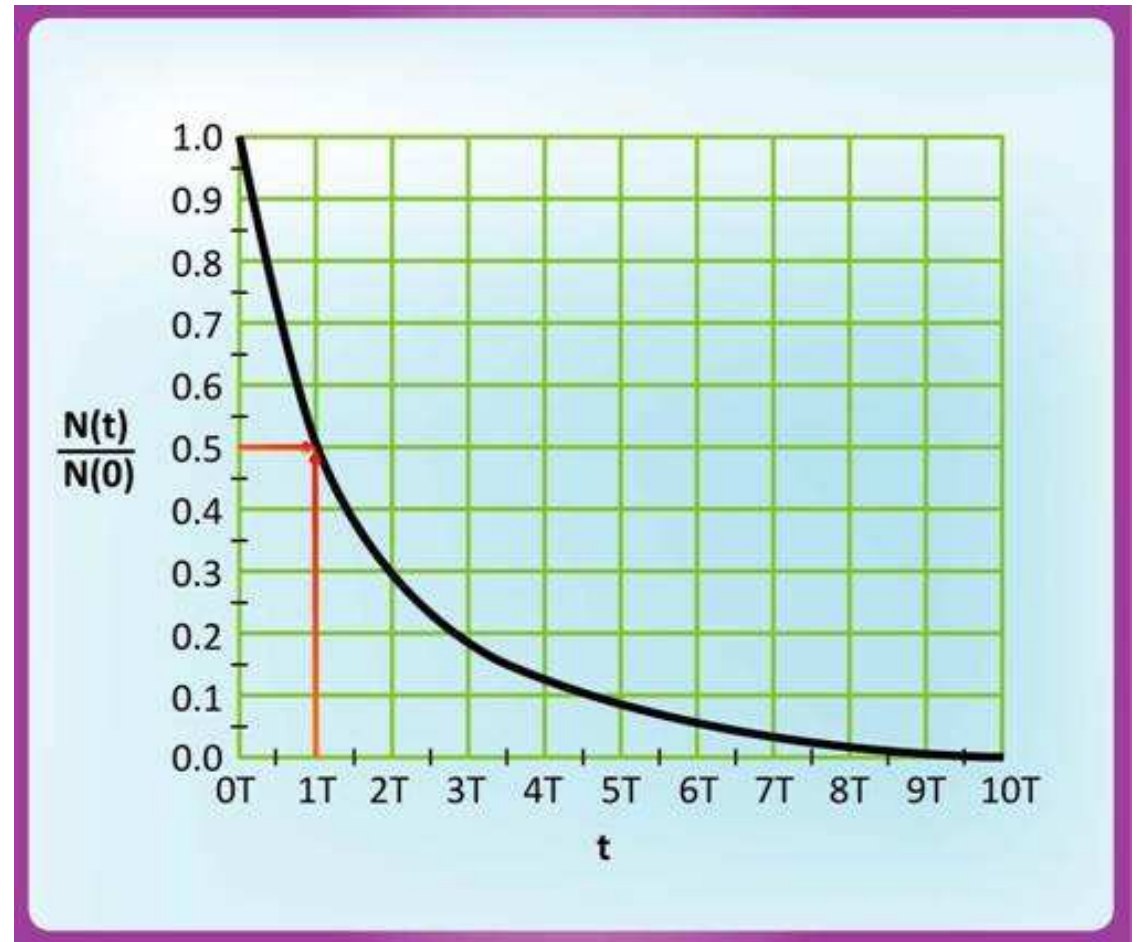
# Poločas přeměny

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

# Exponenciální tvar zákona

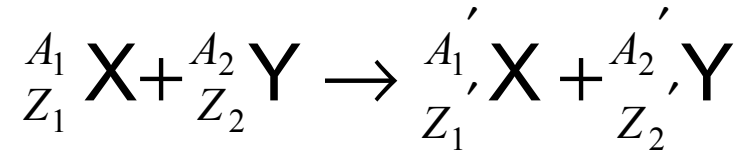
Důsledkem zákona radioaktivní přeměny je exponenciální úbytek počtu mateřských radioaktivních jader s časem

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



# Jaderné reakce

Zákony zachování



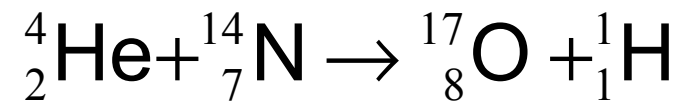
Počtu nukleonů

$$A_1 + A_2 = A_1' + A_2'$$

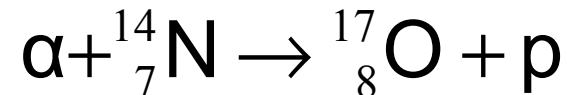
Elektrického náboje

$$Z_1 + Z_2 = Z_1' + Z_2'$$

Energie



Hybnosti



Momentu hybnosti



# Zákony zachování

Při všech radioaktivních přeměnách se zachovává:

Celková energie  $\Rightarrow$  celková relativistická hmotnost

Celková hybnost

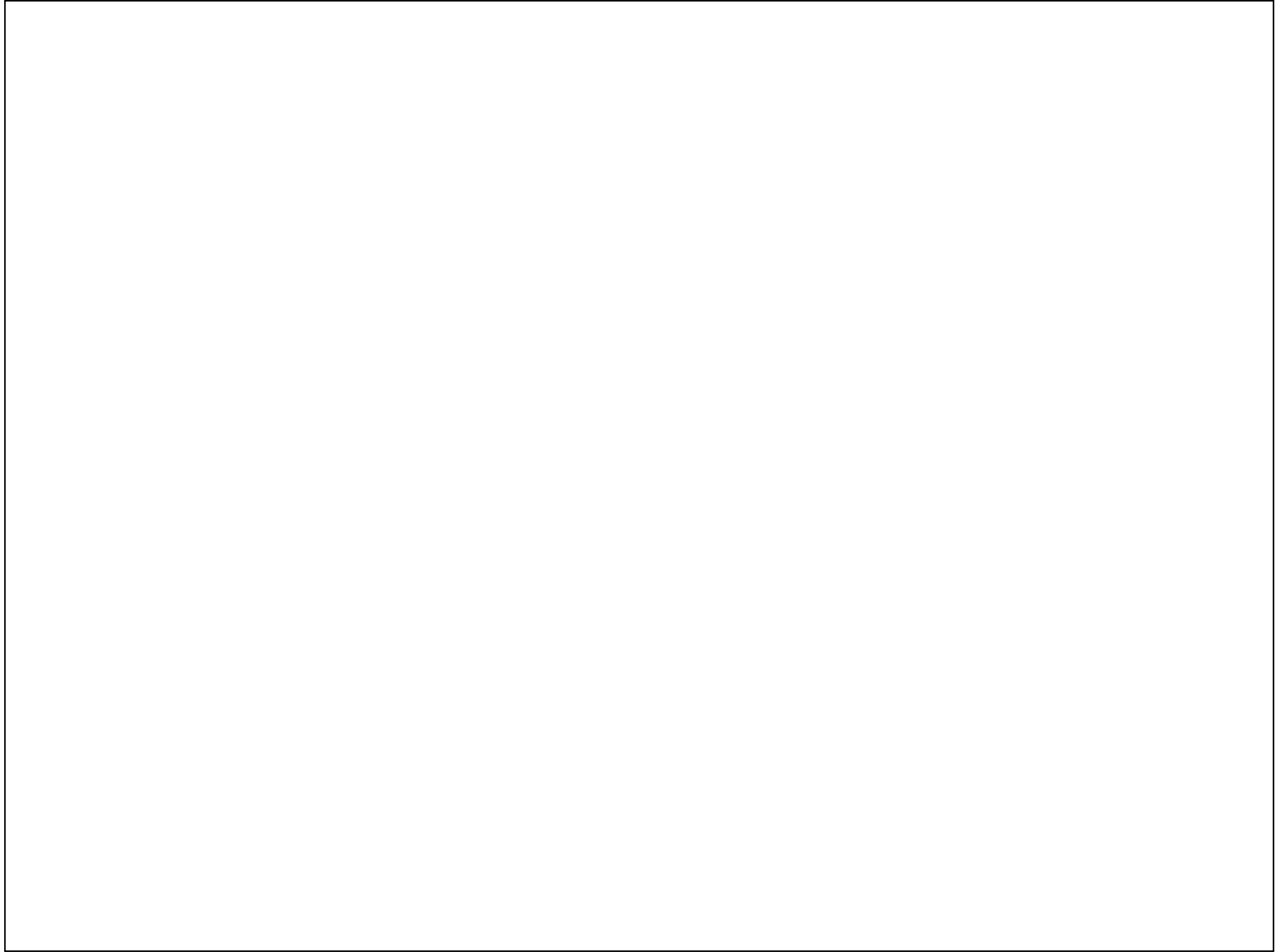
Elektrický náboj

Nukleonové číslo

Protonové číslo se nezachovává pokud dochází k přeměně mezi protonem a neutronem, jinak ano

Zachovává se pseudoprotonové číslo, které vychází z náboje elementárních částic  $\Rightarrow$  zachování náboje





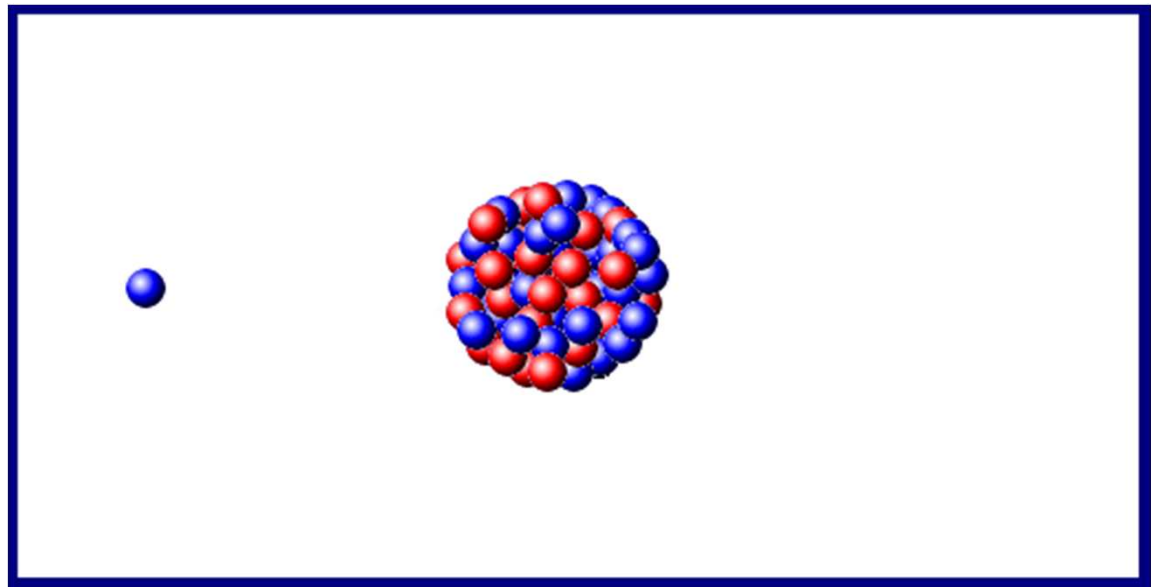
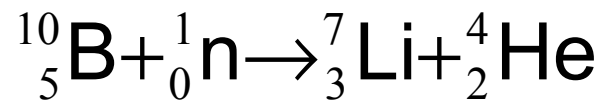
# Jaderné reakce

Přirozená radioaktivita

Umělá radioaktivita – zásah člověka

Ostřelování jader částicemi  $\Rightarrow$  umělé izotopy

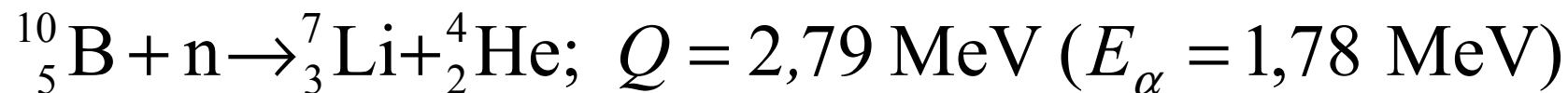
Urychlovače částic



# Detekce neutronů

Detekce založena ve většině případů na reakci za vzniku nabitých částic (přímo ionizujících) a jejich následné detekci

Pomalé neutrony: do 0,3 eV



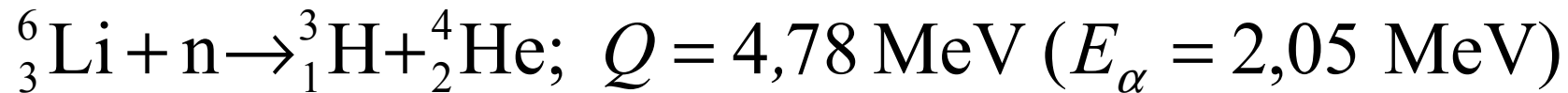
Odlišení vysokoenergetických produktů od registrace pozadí  $\gamma$

Přírodní B: 19,8 %  $\Rightarrow$  přímé použití  ${}^{10}_5\text{B}$

Proporcionální detektor plněný  $\text{BF}_3$

# Detekce neutronů

Pomalé neutrony: do 0,3 eV

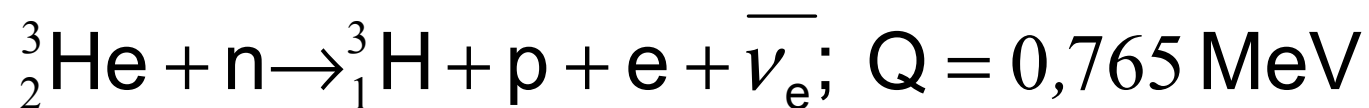


Přírodní Li: 7 %  $\Rightarrow$  použít separovaný izotop  ${}^6_3\text{Li}$

Lithium netvoří plynné směsi

Pevný scintilační detektor LiI (Eu)

---

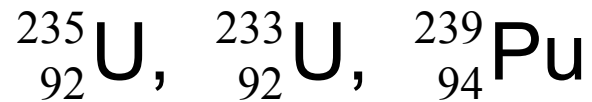


Snadná dostupnost  ${}^3_2\text{He}$

Plynné detektory

# Detekce pomalých neutronů

## Štěpení jader neutrony



Uvolněná energie  $\sim 200$  MeV

## Jaderné indikátory

Záchyt neutronu atomovým jádrem

Vzniklé jádro se rozpadá rozpadem  $\beta$  s dlouhým poločasem rozpadu

Změření aktivity  $\beta$  vzorku ozářeného neutrony  $\Rightarrow$  absorbovaná dávka

Měření aktivity v laboratoři, expozice v terénu