

# Radiační biofyzika

Přednáška 5 2021

**(Ne)stabilita atomového  
jádra, radioaktivní přeměny**

Martin Falk



# MODELY ATOMOVÉHO JÁDRA

# MODELY JÁDRA

- **MODEL** = nezobrazuje věrně realitu v celé její komplexnosti, ale zdůrazňuje a snaží se uchopitelně popsat určité aspekty objektu, jež jsou podstatné z určitého hlediska
- Př. **REALITA** = nadzvukové letadlo Concorde (= stroj samotný, posádka, cestující, bagáž...)



**MODELY** – jsou to jen „modely“, nikoli věrný obraz reality  
- umožňují nám popsat vždy některé aspekty „reality“



Pro děti na hraní



Vizuální model  
(co nejvěrnější zevní vzhled)

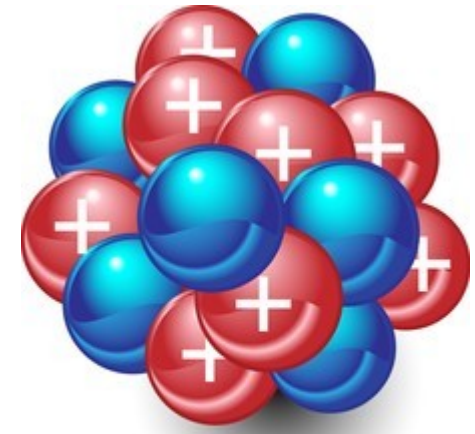


Funkční model  
(co nejvěrnější funkce)  
Na hraní pro tatínky,  
Prototypy...

## Tvar a poloměr jádra:

Problematické určit vzhledem k relaci neurčitosti

- Koule,
- Zploštělý elipsoid (např. uhlík)
- Protáhlý elipsoid
- Tvar složitějších těles



shutterstock.com · 1170924397

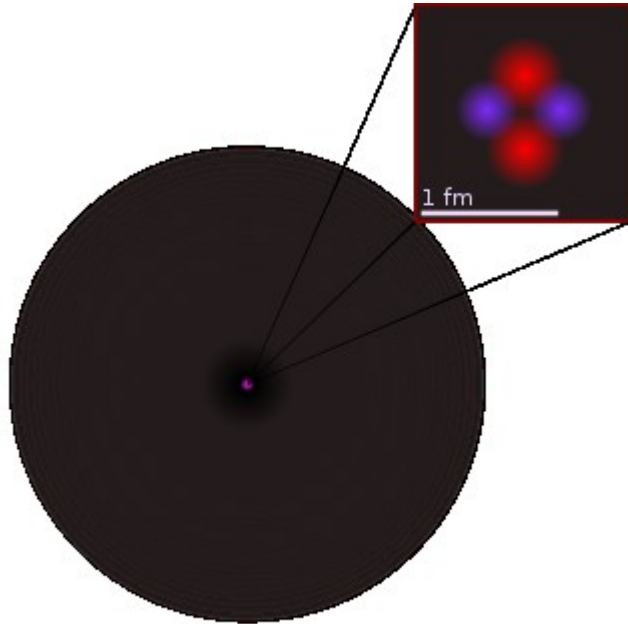
## 1. Kapkový model jádra

je založen na představě krátkého dosahu jaderných sil, kdy nukleony v jádře interagují pouze se svými sousedy v jádře podobně jako tomu je v kapce kapaliny. Pomocí tohoto modelu lze odvodit vztah pro např. pro **hmotnost jádra** (viz Hála str. 28).



## POLOMĚR JÁDRA

- působnost jaderných sil je omezen na oblast jádra – síly mají krátký dosah (cca  $10^{-15}$  m). Hovoříme o **p** **poloměru** **jádra**



**1 Å = 100 pm**

Rozměry jádra řádově  $10^{-15}$  m

→ V jaderné fyzice speciální jednotka

→ **1 fermi** = 1 Fm =  $10^{-15}$  m = femto m (fm)

→ **1 Å (angstrom)** =  $10^{-10}$  m (velikost atomu)  
=  $10^5$  fm (Fm) (velikost jádra)

$$R_j = r_0 \cdot A^{1/3}$$



**Objem jádra:**  
 **$V_j = 4/3\pi R_j^3$**

dle zdroje  $r_0 = 0.25 \cdot 10^{-15}$  m, A = počet nukleonů

## HMOTNOSTI

$$E = mc^2$$

$$1 \cdot u = \frac{1 \cdot u \cdot c^2}{c^2} = 931,494028 \frac{\text{MeV}}{c^2} \approx 931,5 \text{ MeV} \cdot c^{-2},$$

$$1 \text{ MeV} \cdot c^{-2} = 1,7825 \cdot 10^{-30} \text{ kg},$$

$$1 \text{ kg} = 0,561 \cdot 10^{30} \text{ MeV} c^{-2},$$

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}.$$

Atomová konstanta $m_u$	$A_u = 1$ $m_u = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	= 931,5 MeV $c^{-2}$
Proton p	$A_p = 1,0078250$ $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	= 938,3 MeV $c^{-2}$
Neutron n	$A_n = 1,0086649$ $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	= 939,6 MeV $c^{-2}$

# Kapkový model jádra

- jádro si připodobňujeme ke "kapce" nestlačitelné kapaliny",
- molekuly kapaliny nám zde zastupují nukleony.

$E_v \cong k A$  - krátký dosah jaderných sil obdoba v kapce vody, působí na sebe jen sousední molekuly

$$E_v = \underbrace{k_1 A}_{\text{objemová e.}} - \underbrace{k_2 A^{2/3}}_{\text{povrchová e.}} - \underbrace{k_3 Z^2 A^{-1/3}}_{\text{coulombické odp. protonů}}$$

objemová e.      povrchová e.      coulombické odp. protonů

- Na analogii jádra s kapkou poukazují především dvě experimentální skutečnosti:
  - **1. Koeficient "stěsnání" je nepatrný, neboli hustota jaderné hmoty je téměř nezávislá na počtu nukleonů v jádře** - podobně jako hustota kapaliny je nezávislá na velikosti kapky a poloměr kapky je úměrný třetí odmocnině z počtu molekul v kapce.
  - **2. Vazbová energie na nukleon (viz dále) je téměř „konstantní“ (alespoň pro středně těžká jádra!)**,
  - Jinak řečeno: **celková vazbová energie je úměrná počtu nukleonů v jádře** - podobně jako energie potřebná na úplné vypaření kapky je úměrná počtu molekul v kapce.
  - Každý vnitřní nukleon interaguje s cca. **12 "sousedními" nukleony**.
- Kapkový model slouží **především pro analýzu hmotností a vazbových energií jader**

## 2. Statistický model

- uvažuje atomové jádro s celkovým počtem nukleonů  $A$  jako **plyn složený z  $p^+$  a  $n^0$** , uzavřený v kouli s poloměrem úměrným  $A^{1/3}$

- E. Fermi:

**soubor fermionů lze považovat za "degenerovaný plyn"**, v němž rozdělení hybností a energií nukleonů se bude řídit Fermiho-Diracovou statistikou

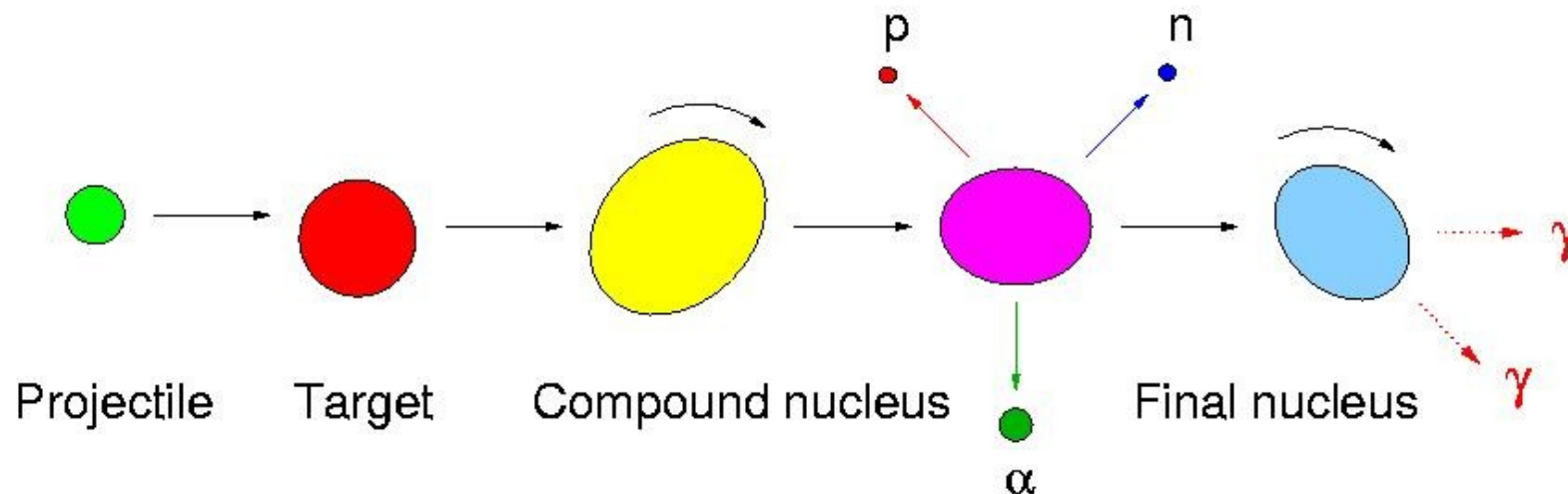
- lze předpovídat pravděpodobnosti jevů, při nichž nukleony získají dostatečné hybnosti a energie na překonání jaderných vazbových sil.
- Nezabývá se vnitřním uspořádáním nukleonů v jádře.





# 3. Model složeného jádra (Compound nucleus model, multi-step reaction model)

- Atomové jádro je souborem nukleonů, které spolu interagují a interagují i s prolétávající částicí
- Nejprve pohlcení prolétávající částice (a) terčovým jádrem X, čímž vznikne složené jádro N\*
- Prolétávající částice **a** rychle předá svou energii ostatním částicím.
- Pokud některá z částic v jádře (**b**) získá dostatečně velkou energii, je v druhém stupni interakce složeným jádrem **N\*** emitována...
- ...čímž vzniká nové jádro **Y**.



# Model složeného jádra

(Compound nucleus model, multi-step reaction model)

- Celkově lze tedy interakci jádra s prolétávající částicí zapsat:

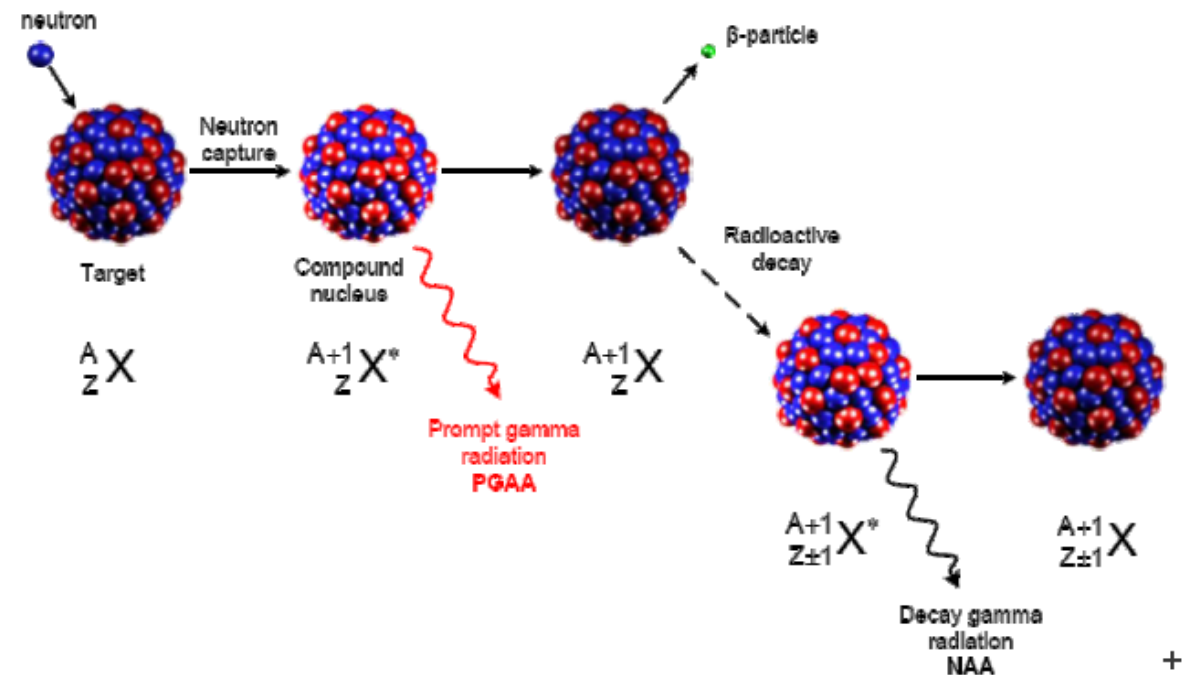


- nebo zkráceně  $X(a,b)Y$  př.  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ ,

- deexcitace  $N^*$  může proběhnout vyzářením kvanta  $\gamma$ :

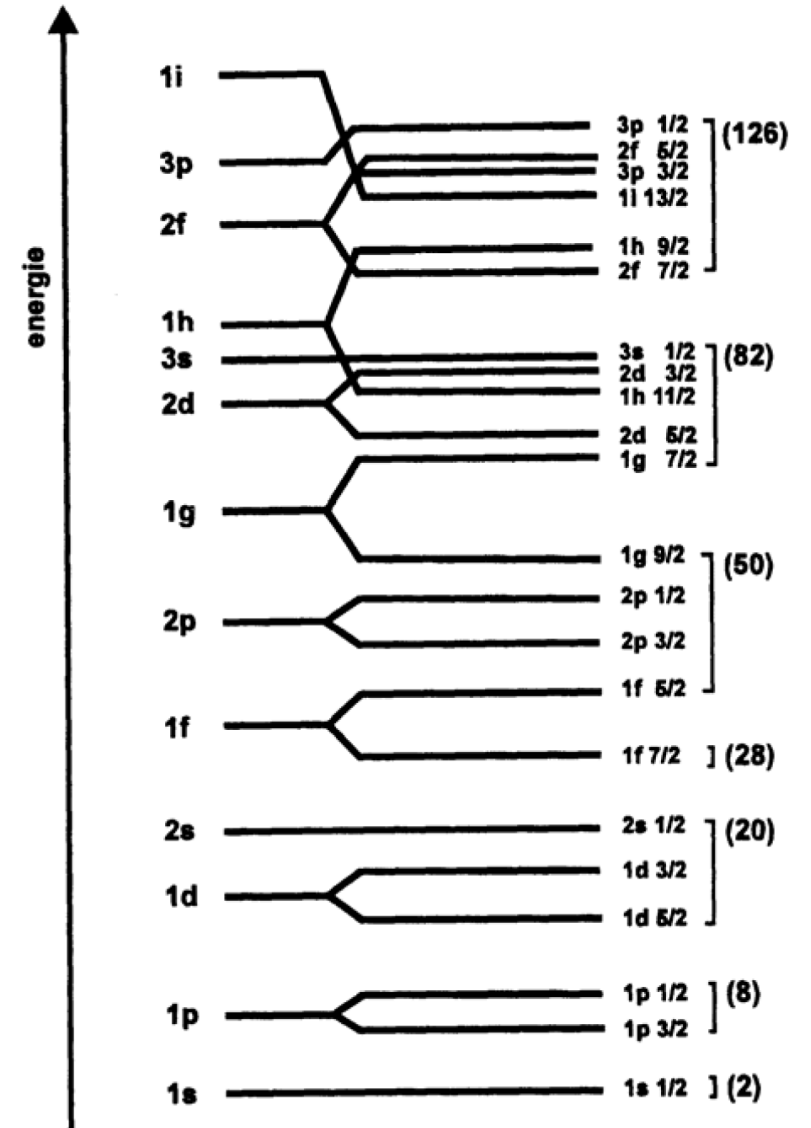


- Důležitým předpokladem je zde vzájemná nezávislost prvního a druhého stupně interakce: **způsob rozpadu  $N^*$  závisí pouze na jeho vlastnostech, nikoliv na procesech jeho vytvoření**
- slouží pro **modelování jaderných reakcí**.



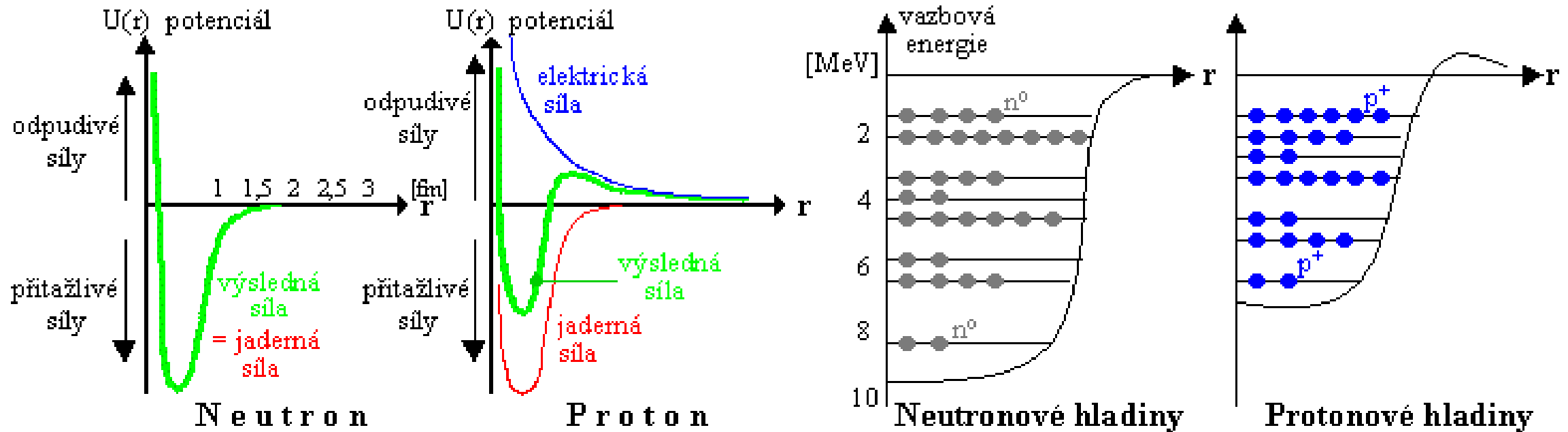
# 4. HLADINOVÝ MODEL JÁDRA

- $n^0$  a  $p^+$  mají podobně jako  $e^-$  **spin  $\frac{1}{2}$**
- Pokud se více částic se spinem  $\frac{1}{2}$  pohybuje ve společném silovém poli, musí být **podle Pauliho principu každá částice v jiném kvantovém stavu**
- Podobně jako u uspořádání elektronů v jaderném obalu, stal se této princip podstatou tzv. **HLADINOVÉHO MODELU JÁDRA**
- Podle HMJ obsazují nukleony v potenciálové jámě **obsazují postupně jednotlivé kvantové stavy** a vyšší stav obsazují teprve tehdy, je-li nižší stav již zcela zaplněn
- Energie příslušných hladin byly **vypočteny stejnými metodami jako u energetických stavů  $e^-$**  (nukleony, stejně jako  $e^-$  a jiné částice, mají totiž DUÁLNÍ charakter (částice/vlnění))



# HLADINOVÝ MODEL JÁDRA

- p i n mají spin 1/2 a ve společném (ale zvlášť p a n) silovém poli **platí Pauliho princip** - každá částice musí být v jiném kvantovém stavu (jako u e v obalu)
- vzniká tak soubor hladin (zvlášť pro p a n)



Hladiny  $p^+$  jsou položeny výše než pro  $n^0$ , protože odpuzivé coulombovské síly způsobují pokles vazebné energie  $p^+$  v jádře

# (NE)STABILITA JADER ATOMŮ a RADIOAKTIVITA

- „Atomová jádra v sobě mají nakumulovanou sílu hvězd a supernov a snaží se jí zbavit“
- Časová stabilita či nestabilita atomových jader je dána složitou souhrou silných, elektromagnetických a slabých interakcí mezi nukleony (a dokonce i uvnitř nukleonů)

- „V zásadě silné interakce mezi nukleony musí převažovat odpudivé elektrické síly mezi  $p^+$





# (NE)STABILITA JADER ATOMŮ a RADIOAKTIVITA

- Jádra, která nejsou v energeticky stabilním stavu, mají snahu určitou **rekombinací** protonových a neutronových stavů přejít do stavu energeticky stabilnějšího; dochází k radioaktivním přeměnám jader
  - přeměnou  $p^+$  a  $n^0$ ,
  - emisí částic ( $\alpha$ , jaderné fragmenty)
  - či vyzářením energetických kvant ( $\gamma$ )

# HMOTNOST A VAZEBNÁ ENERGIE JÁDRA

- Srovnáme-li hmotnost jádra atomu s hmotností částic, které jádro tvoří, dojdeme k poznání, že hmotnost jádra je menší:

$$m(A,Z) < Z \cdot m_p + (A-Z) \cdot m_n$$

hmotnost jádra                      hmotnost volných  $p^+$  a  $n^0$

$$m_p = 1.6726 \times 10^{-27} \text{ kg}; m_n = 1.6750 \times 10^{-27} \text{ kg}; m_e = 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$$
$$m_u = 1,6605 \times 10^{-27} \text{ kg (atomová hmotnostní konstanta)}$$

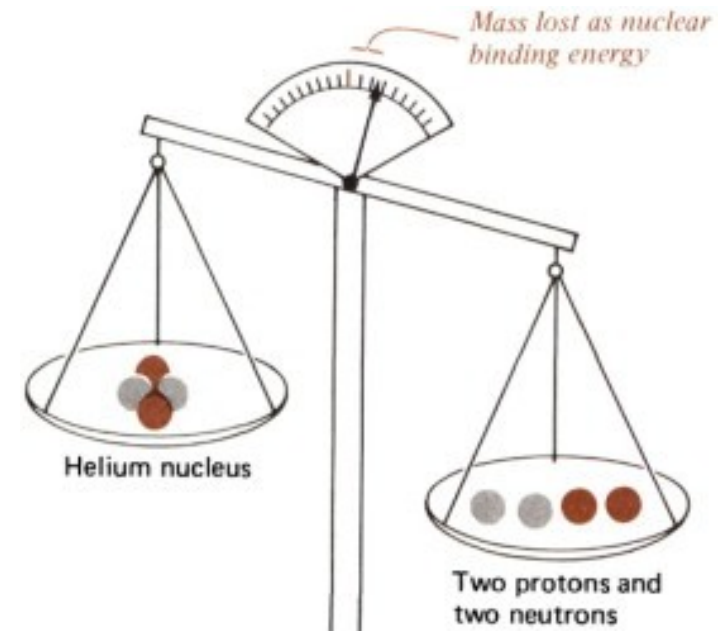
$$\text{Rozdíl } \Delta m = m_j(A,Z) - [Z \cdot m_p + N \cdot m_n], \text{ kde } N = A - Z$$
$$= m_j(A,Z) - [Z \cdot m_p + (A-Z) \cdot m_n] = m_j(A,Z) - Z \cdot m_p - (A-Z) \cdot m_n$$

...se nazývá hmotnostní úbytek (B) (hmotnostní defekt, schodek), který má zápornou hodnotu,  $B_j = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n) - m_j(A,Z)$ ,  $\Delta m < 0$ .

- Jemu ekvivalentní energie je podle Einsteinova vztahu rovna energie:

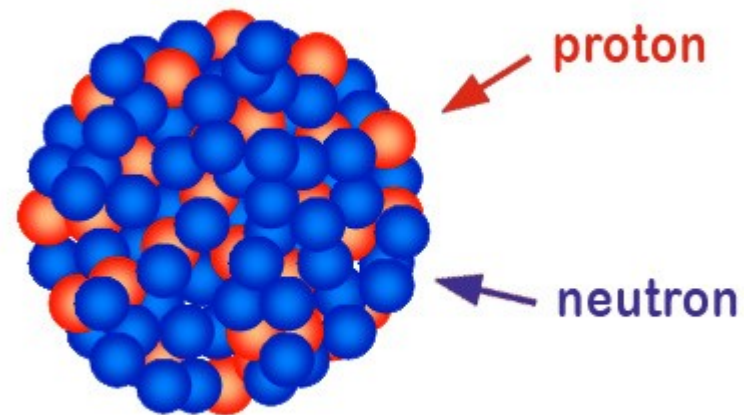
$$E_v = - \Delta m \cdot c^2 \quad (E_v > 0)$$

- a nazývá se vazbovou energií jádra. Je to energie, která by se hypoteticky uvolnila při vytvoření jádra z volných nukleonů, respektive energie potřebná k úplnému rozložení jádra na jednotlivé volné nukleony.  $E_j = B_j \cdot c^2$



# Vazebná energie jádra

deuterium



Uranium Nucleus

Vazebná energie deuteronu = 2,23 MeV

Vazebná energie  $^{235}\text{U}$  = 1,73 GeV

→ Vazebná energie na 1 nukleon

# HMOTNOST A VAZEBNÁ ENERGIE JÁDRA

- **Střední vazebná energie na nukleon:  $\varepsilon = E_v/A$**
- **tj. v podstatě energie potřebná k uvolnění jednoho nukleonu z jádra**
- **Separační energie:**

$$S_p = E_v(A, Z) - E_v(A-1, Z-1)$$

$$S_n = E_v(A, Z) - E_v(A-1, Z)$$

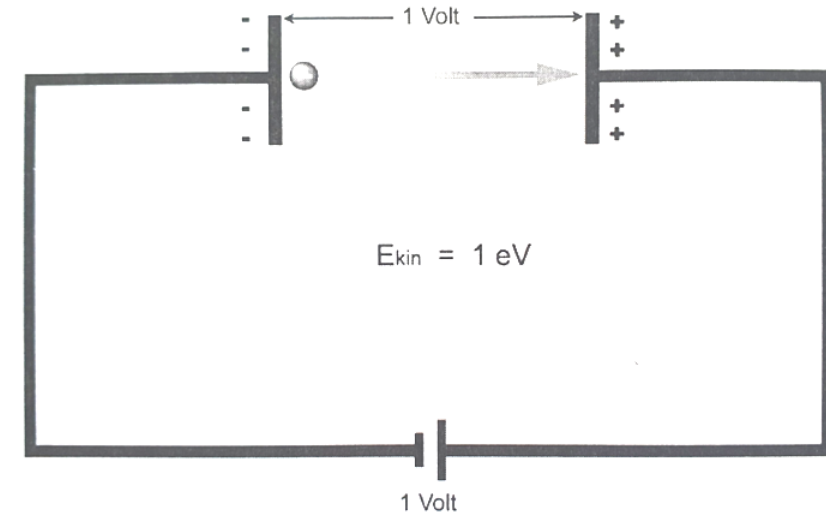
Energie jádra  
zbaveného  
jednoho  $p^+$   
nebo  $n^0$

$$[1 \text{ eV} = 1 \cdot e_0 \cdot 1 \cdot \text{V} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}]$$

- $\Delta m$  se vyjadřuje v gramech nebo v atomových jednotkách hmotnosti ( $m_u = 1/12$  hmotnosti atomu uhlíku  $^{12}\text{C}$ ),
- $E_v$  se v jaderné fyzice většinou vyjadřuje v [MeV]

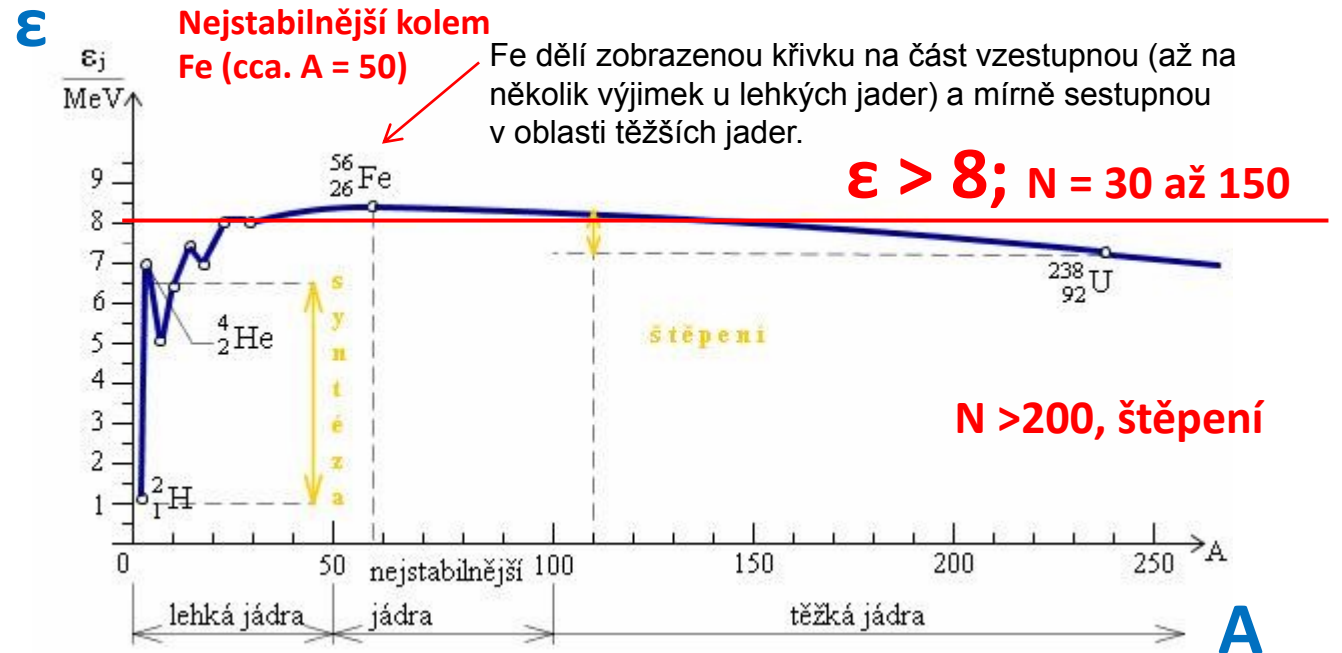
## **Energie:**

$J \times eV$ , **definice eV:** je to energie, kterou elektron získá při průchodu potenciálovým spádem 1V  **$E = Q U$**   
po vyčíslení:  **$E = Q U = 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 1 = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1 \text{ eV}$**



# HMOTNOST A VAZEBNÁ ENERGIE JÁDRA

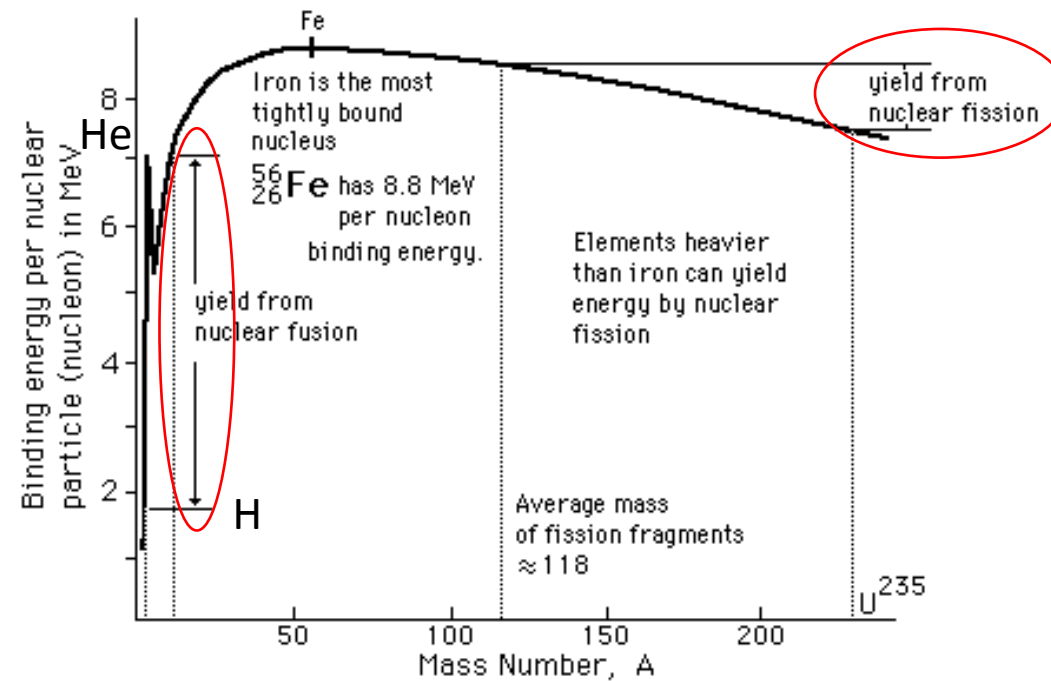
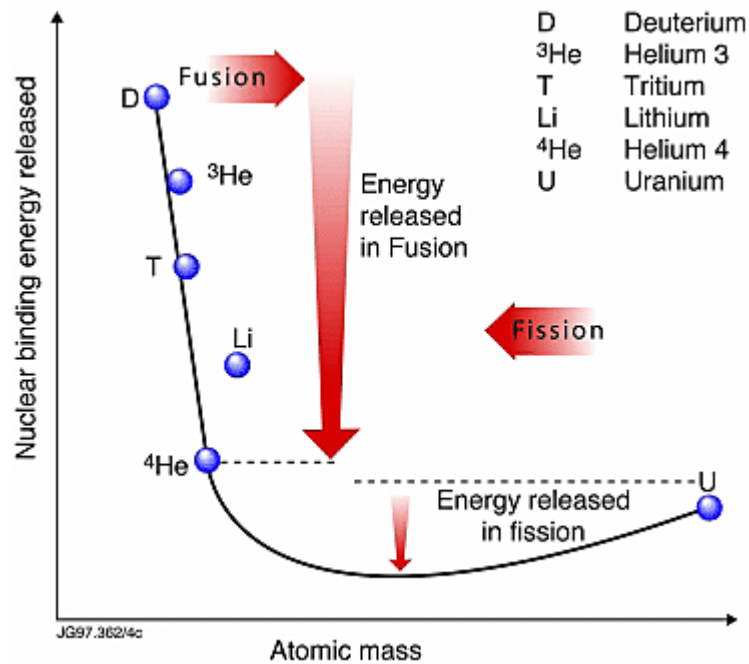
- Obecně je excitační  $E$  jádra o 5 – 6 řádů vyšší než excitační energie  $e^-$  ve valenční sféře atomů nebo molekul
- Vazbová energie na jeden nukleon ( $\epsilon$ ) zpočátku rychle roste v závislosti na  $Z$ , **největší je pro jádra kolem železa**, pak zase mírně klesá
- $\epsilon$  souvisí jednak se
  - **stabilitou "vnější"** (při dodání energie jádru zvenci - rozptylem částic ostřelujících jádro),
  - **stabilitou „vnitřní“** (či nestabilitou) působením vnitřních mechanismů v nukleonech a jejich vazbách



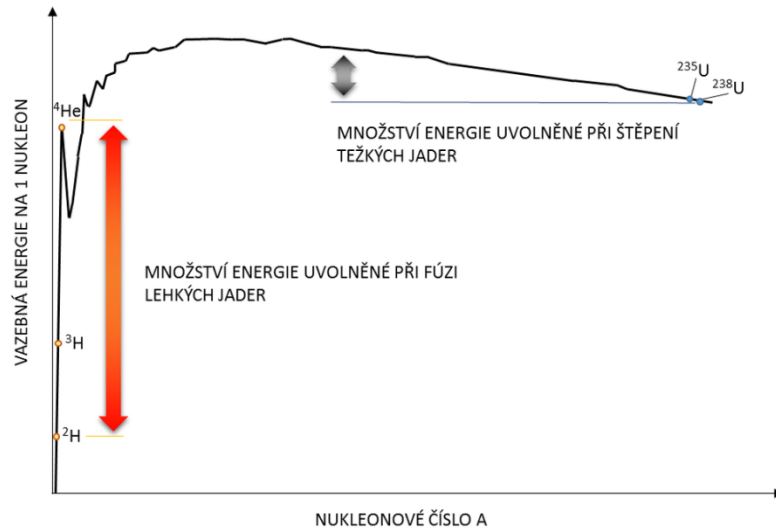
- Obecně lze konstatovat, že stabilita jader je záležitostí jejich složité vnitřní struktury. **Podle velikosti vazebné energie jádra vztažené na nukleon** můžeme jádra rozdělit na:
  - **nukleárně stabilní** (mají velkou vazebnou energii)
  - **nukleárně labilní**



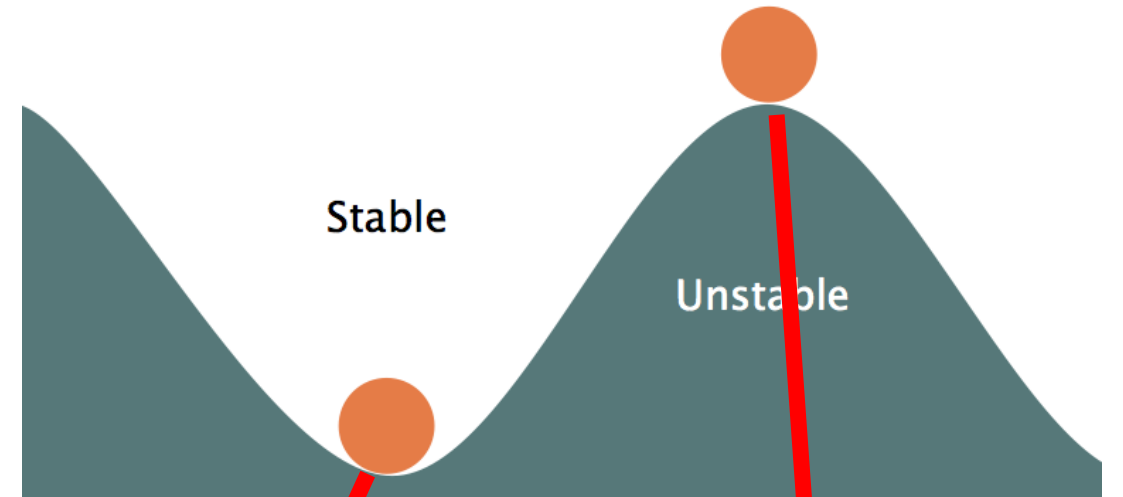
# HMOTNOST A VAZEBNÁ ENERGIE JÁDRA – fúze vs. štěpení



# STABILITA JADER ATOMŮ



Situaci si lze představit jako příkop: nejstabilnější jádra na jeho dně, na stěnách postupně roste nestabilita. Analogicky s lezením člověka ze dna příkopu: **jak leze ven, roste jeho potenciální energie, a tedy i jeho nestabilita** a možnost (opětovného) spadnutí do příkopu.



## Hmotnostní deficit (defekt) $\Delta m$

Jak velká je jaderná vazebná energie v atomu izotopu  $^{12}\text{C}$ ?

Hmotnost atomu  $^{12}\text{C}$  je podle definice přesně rovna  $12 m_u$

$$m(\text{jádro}) = 12 m_u - 6 m_e$$

Atomová hmotnostní jednotka – definována jako 1/12 hmotnosti atomu izotopu  $^{12}\text{C}$

$$m_u = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \quad (m_u \cdot 12 \cdot N_A) = M(^{12}\text{C})$$

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

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

$$\Delta m = 6m_p + 6m_n - (12m_u - 6m_e)$$

$$\Delta m = 6 \cdot 1,6726 \cdot 10^{-27} + 6 \cdot 1,6750 \cdot 10^{-27} - 12 \cdot 1,6605 \cdot 10^{-27} + 6 \cdot 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$\Delta m = 1,651 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$$

$$\Delta E = \Delta mc^2 = 1,651 \cdot 10^{-28} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \text{ J} = 1,486 \cdot 10^{-11} \text{ J}$$

$$= \frac{1,486 \cdot 10^{-11}}{1,602 \cdot 10^{-19}} \text{ eV} = 92,7 \text{ MeV} \quad \rightarrow \quad \epsilon = 7,7 \text{ MeV / nukleon (viz dále)}$$

další slide

# ZAJÍMAVOSTI: VAZEBNÁ ENERGIE JÁDRA

- Při vzniku 12 g  $^{12}\text{C}$  (1 mol) z  $p^+$  a  $n^0$ , by se uvolnilo  $1,4736 \cdot 10^{-11} \times 6,022 \cdot 10^{23} = 8,9 \text{ TJ}, \dots$
- ... vs. rozštěpením 12 g **uranu** se uvolní asi 1 TJ.
- Např. pro jádro  $^4_2\text{He}$  je  $\Delta_m = 5,000618 \cdot 10^{-29} \text{ kg} \rightarrow E_v = 4,5 \cdot 10^{-12} \text{ J/atom}$  (7 MeV/nukleon) = 2,71 TJ/mol
- Toto množství tepla ohřeje **6500 tun** vody z  $0^\circ\text{C}$  k varu.

$$m = Q / (c \cdot \Delta t) = 2.71 \cdot 10^{12} / (4\ 200 \cdot 100) = 6\ 452 \text{ tun}$$

---

Molární hmotnost He: **4,0026 g**·mol<sup>-1</sup>

Avogadrova konst =  $6,022 \cdot 10^{23}$

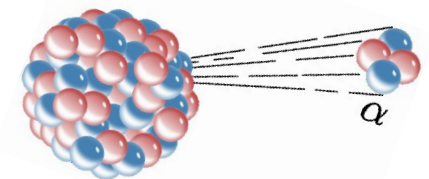
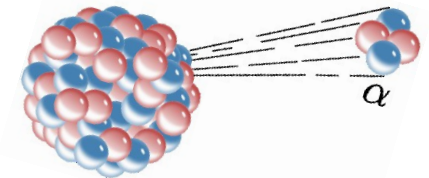
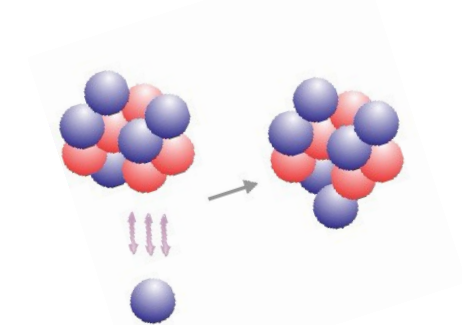
**MĚRNÁ TEPELNÁ KAPACITA VODY**

$$C_v = 4,2 \text{ kJ/Kg}^\circ\text{C}$$

K ohřátí 1l vody o  $1^\circ\text{C}$  je potřeba přibližně 4200 Joulů.

# STABILITA JADER ATOMŮ

- **1. Příliš velká jádra**: **nedostatečný dosah silné jaderné interakce** → nestačí dostatečně silně vázat jádro → emise nukleonů –  **$\alpha$ -radioaktivní rozpad**, nebo dokonce k **rozštěpení jádra**
- Jádra se  **$Z > 82$  (tj. od  $^{207}_{82}\text{Pb}$  dále**: Bi, Po, At... dnes prokázáno, že i Bi je radioaktivní, ovšem s extrémním poločasem rozpadu (viz níže), nestabilní bez ohledu na poměr  $p^+ : n^0$
- Jádra se  **$Z > 100$  (92, transurany)** jsou již tak nestabilní – tj. mají tak krátký Tm (dny, hodiny, minuty, sekundy, ...), že se již v přírodě nevyskytují
- Obecně se nepředpokládá se že by mohly být objeveny/vytvořeny další atomy se  $Z > 110$ , které by byly stabilní --- vs. --- úvahy o tzv. „**ostrovech stability**“ → i některé supertěžké atomy by mohly být dočasně „stabilní“, než dojde k jejich rozpadu
- **Vzhledem ke krátkému dosahu silné interakce jsou naopak velmi stabilní jádra hélia  $^4_2\text{He}$**  →  $^4_2\text{He}$  mohou být emitovány z těžkých jader jakožto částice alfa (opět při splnění energetické podmínky).






# Radioaktivní prvky

$Z > 82$  – všechny izotopy prvků jsou již radioaktivní (žlutě)

$Z > 92$  natolik nestabilní, že se (dnes již) volně v přírodě nevyskytují



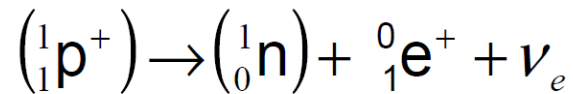
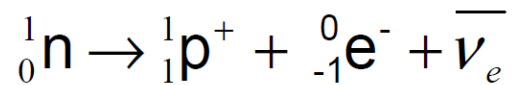
H																	He														
Li	Be															B	C	N	O	F	Ne										
Na	Mg															Al	Si	P	S	Cl	Ar										
K	Ca															Ga	Ge	As	Se	Br	Kr										
Rb	Sr	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	In	Sn	Sb	Te	I	Xe										
Cs	Ba	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn										
Fr	Ra															Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn						
																Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd						
																Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg						
																Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uun	Uuu	Uub						
																										Uuq					

# STABILITA JADER ATOMŮ

## 2. Jádra s odchylkou od ideálního poměru $p^+ : n^0$

- nadbytek  $p^+$  může zvyšovat **odpudivé síly mezi  $p^+$**  a destabilizovat jádro
- ...ale ani přílišný přebytek  $n^0$  není prospěšný.
- Stabilizace jader pomocí **rozpadu  $\beta^-$**  (přebytek  $n^0$ ) nebo **rozpadu  $\beta^+$**  (přebytek  $p^+$ ).

A	$p^+ : n^0$
$A < 20$	1 : 1
$A > 20$	1 : 1,5



Pro  $Z < 92$  platí empirický vztah

$$Z = \frac{A}{1.98 + 0,0155 \cdot A^{2/3}}$$

## 3. Jádra s nadbytkem energie: Zbavení se energie vyzářením **fotonů $\gamma$**

# STABILITA JADER ATOMŮ

Pro stabilní jádra s  $A < 20$  (40) platí, že se soustřeďují v okolí **přímky  $N = Z$** .

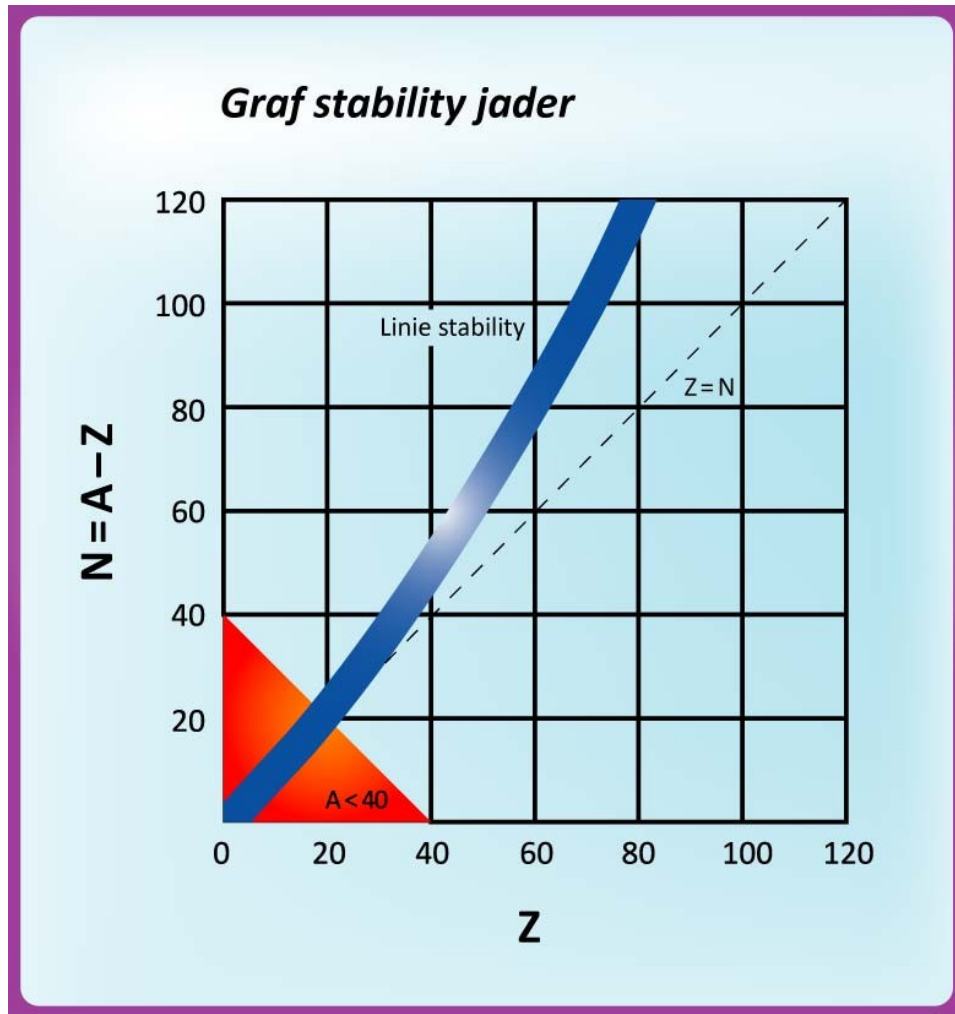
- nejstabilnější jádra mají  $p^+ = n^0$ , tzn. jsou **symetrická** (lze objasnit pomocí slupkového modelu jádra – je energeticky výhodné zaplnit stejný energetický stav protonem a pak i neutronem).

## Pro $A > 20$ (40)

- u stabilních jader postupně  $n^0 > p^+$
- způsobeno skutečností, že **při vzrůstajícím  $Z$  roste odpudivá coulombická interakce protonů** v jádře (náboj jádra je úměrný  $Z$ )
- Pro snížení celkové energie jádra je tedy výhodnější přítomnost více  $n^0$  než  $p^+$  ( $n^0$  participují na silné interakci – přitahování, ale ne na elmag. odpuzování)

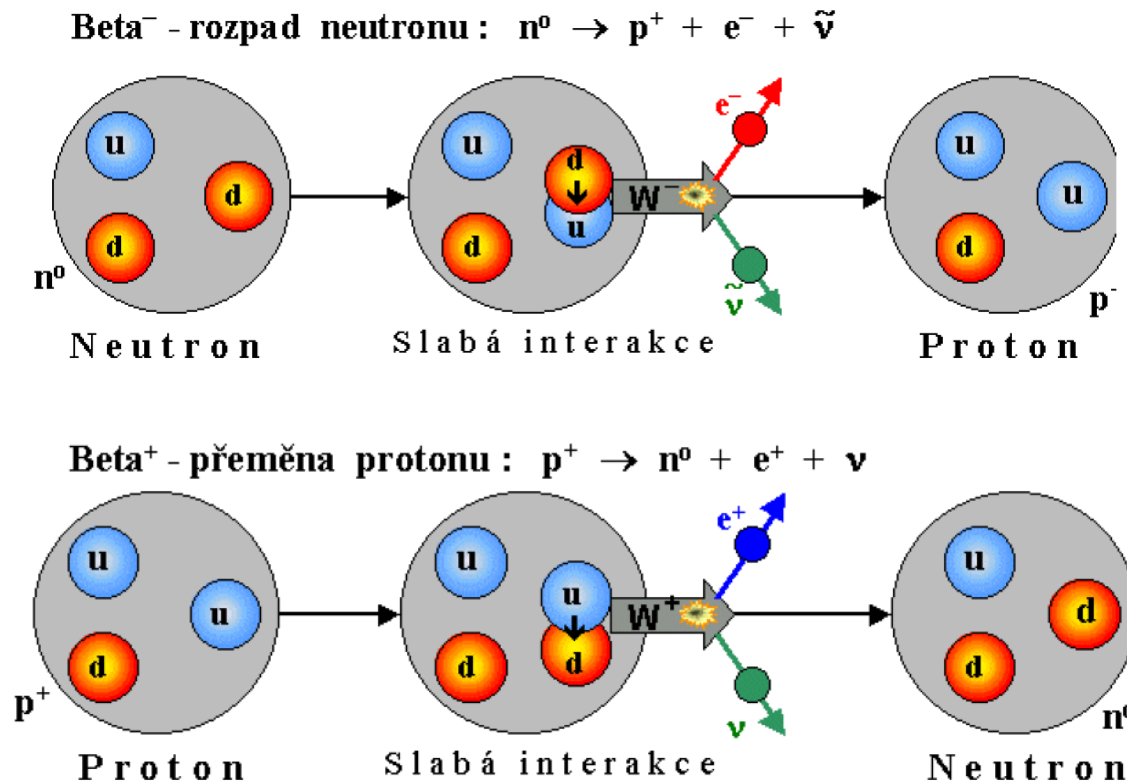
$$Z = \frac{A}{1,98 + 0,0155 \cdot A^{2/3}}$$

Stabilní poměr  $p^+$  a  $n^0$  (empirický vzorec) pro jádra se  $Z < 93$

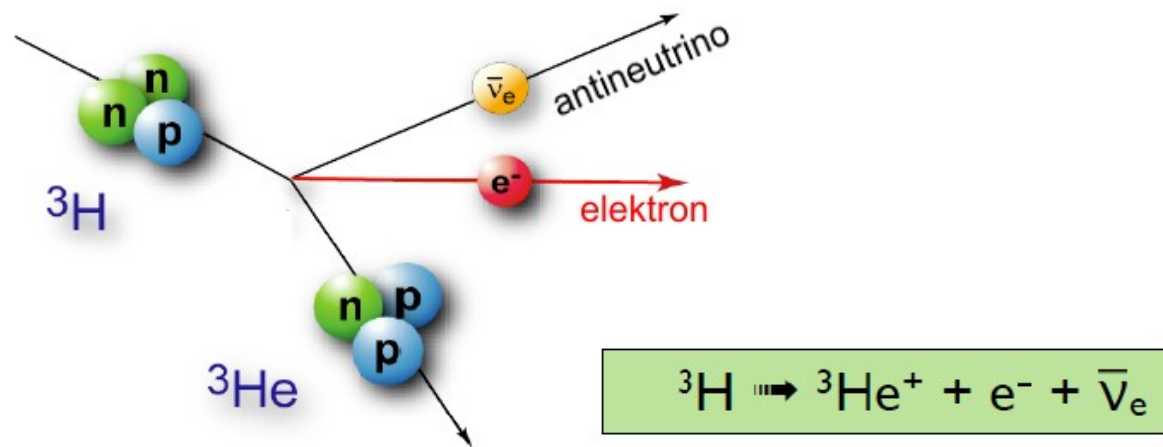
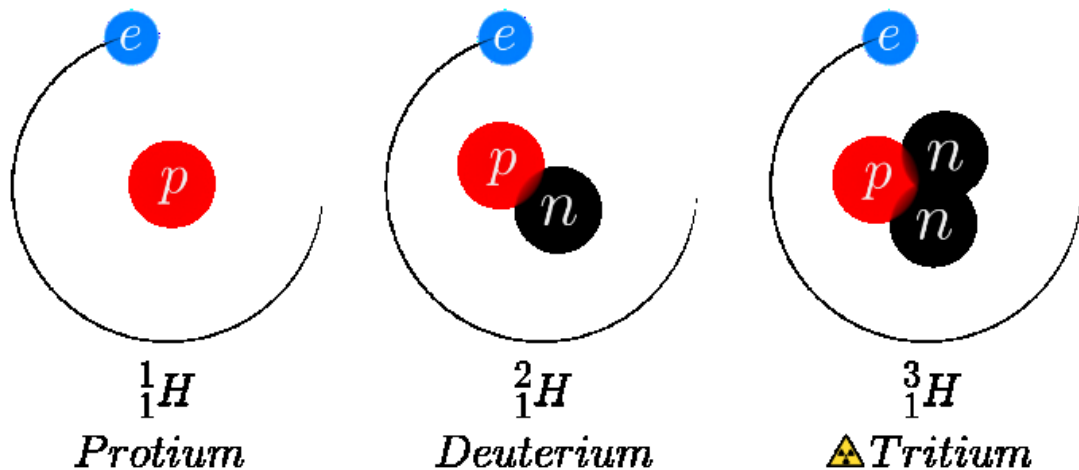


# STABILITA JADER ATOMŮ – NUKLEONŮ

- Uvnitř samotných nukleonů pak působí **silné** a **slabé interakce** mezi kvarky;
- slabé interakce mohou vést k **transmutacím kvarků** uvnitř nukleonů a tím k vzájemné přeměně mezi protony a neutrony - to vyústí v nestabilitu jádra a jeho přeměnu na jiné jádro (*radioaktivita beta*).



## Die Isotope von Wasserstoff

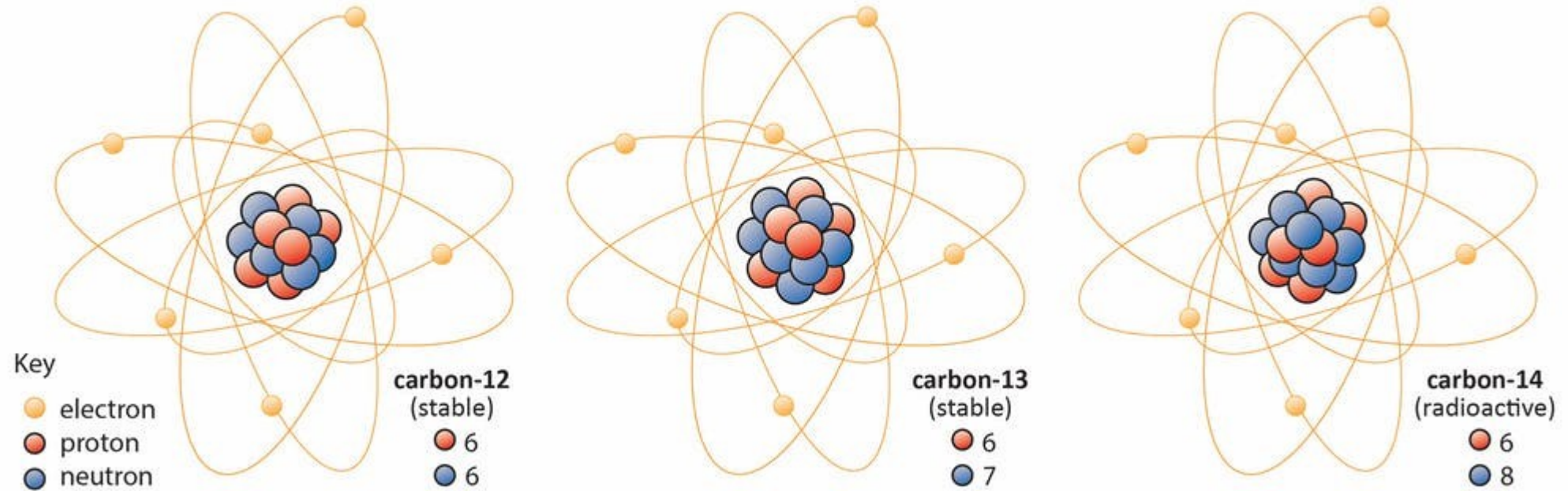


Tritium



- PŘ. Nejjednodušším prvek - **vodík**  ${}^1\text{H}_1$  (hydrogenium, protium)
- Přidáním jednoho neutronu  $n^0$  vzniká těžký vodík  ${}^2\text{H}_1$  - deuterium.
- Nejtěžším isotopem vodíku je tritium  ${}^3\text{H}_1$ , obsahující proton a 2 neutrony;  
dva neutrony na jeden proton jsou zde však "trochu moc", rovnovážná konfigurace je porušena a tritium  ${}^3\text{H}_1$  se již radioaktivně rozpadá (rozpadem  $\beta^-$  s poločasem 12,36 let na hélium 3).

# Obdobně pro izotopy uhlíku





# Nuklidy podle vazebné energie

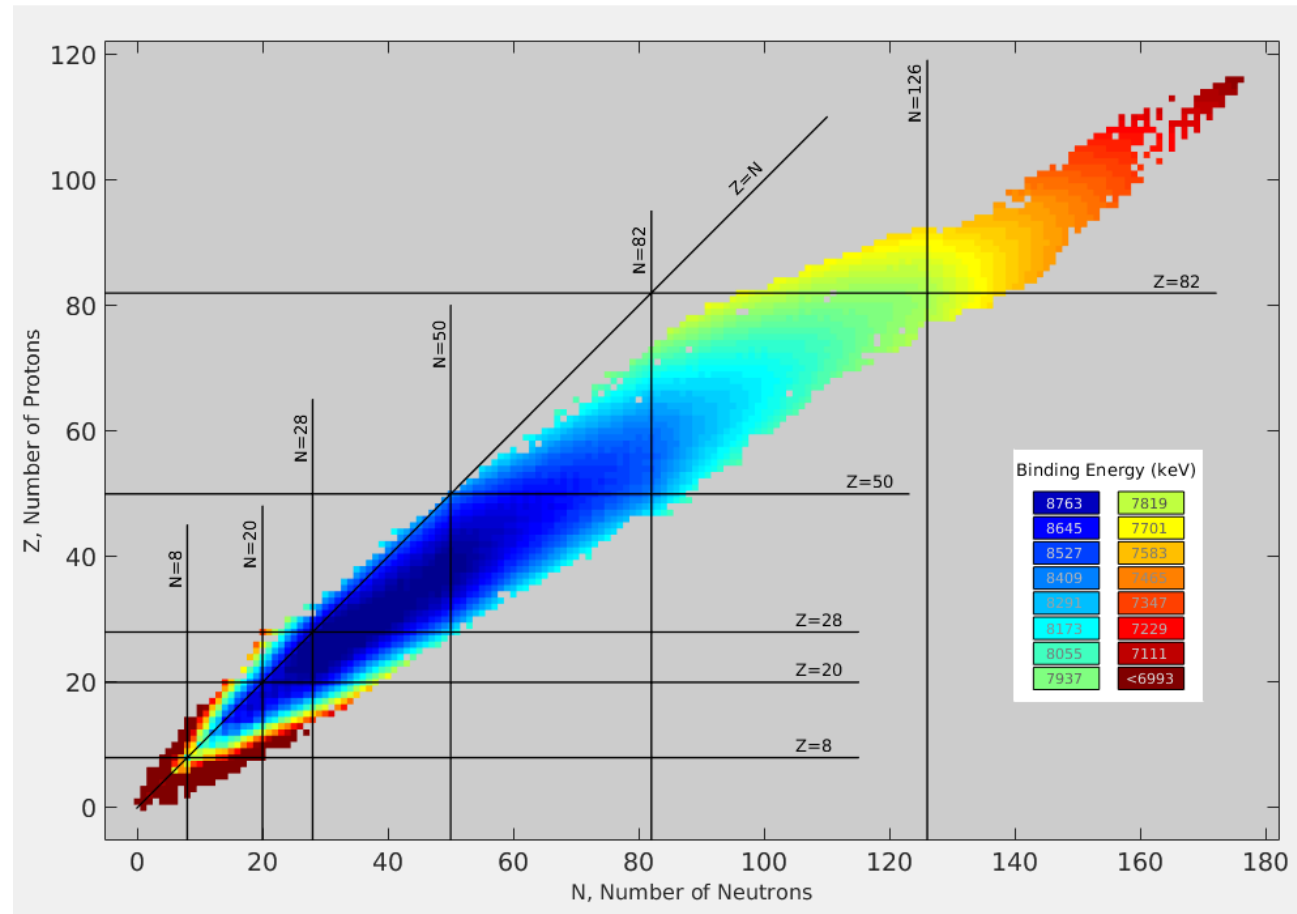
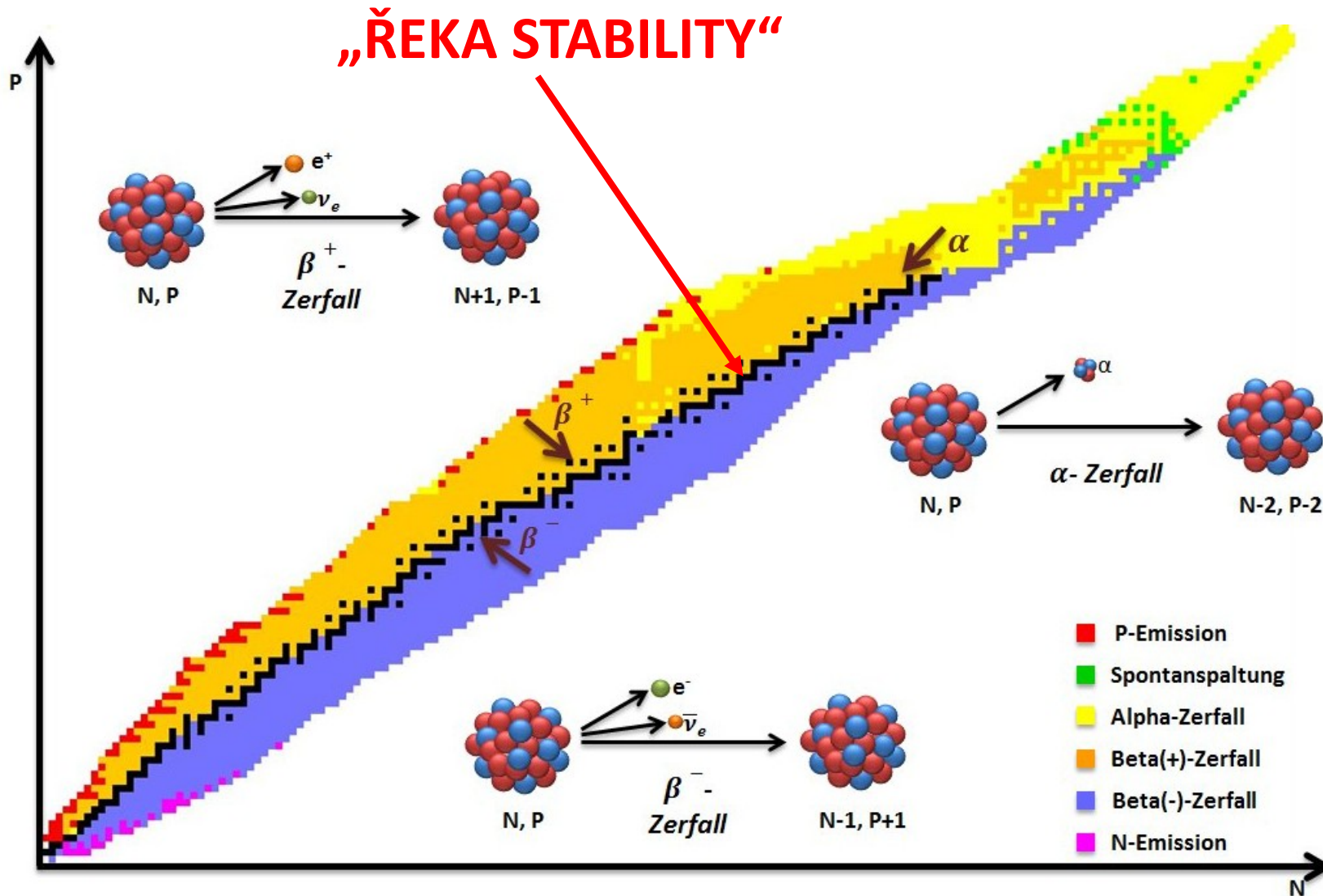
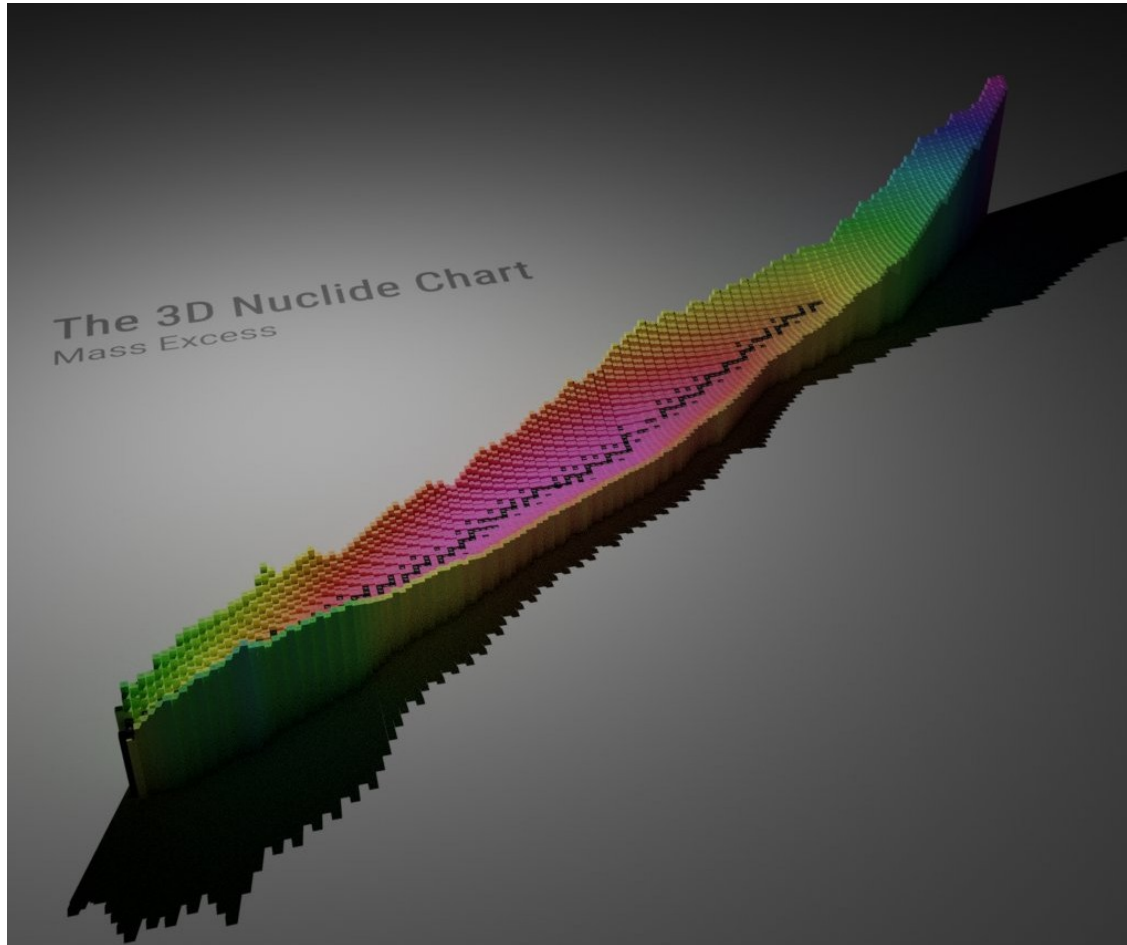


Chart of nuclides (isotopes) by binding energy, depicting the valley of stability. The diagonal line corresponds to equal numbers of neutrons and protons. **Dark blue squares represent nuclides with the greatest binding energy**, hence they correspond to the most stable nuclides. The binding energy is greatest along the floor of the valley of stability.

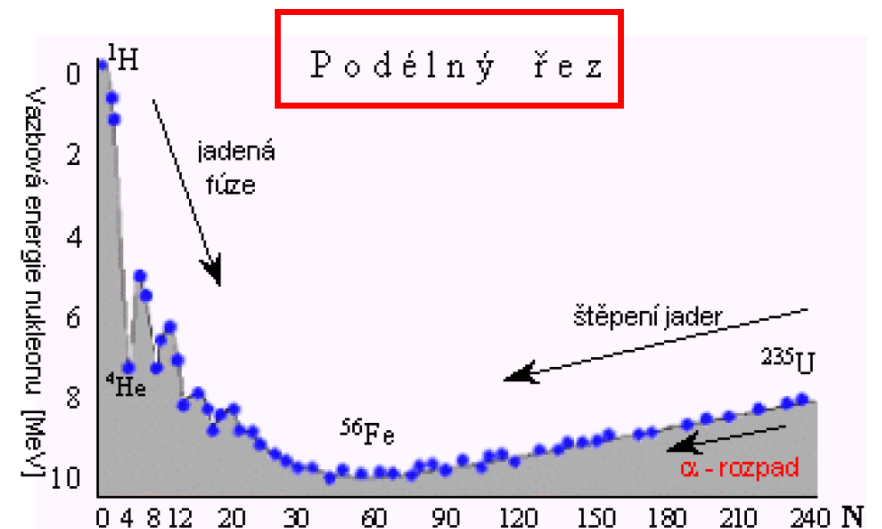
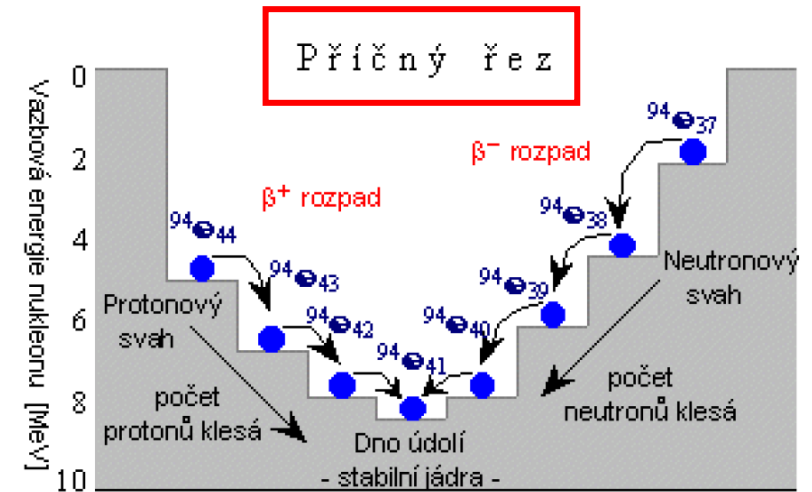
# Tendence k samovolným radioaktivním přeměnám všech známých atomových jader (nuklidů)



# „Řeka stability“

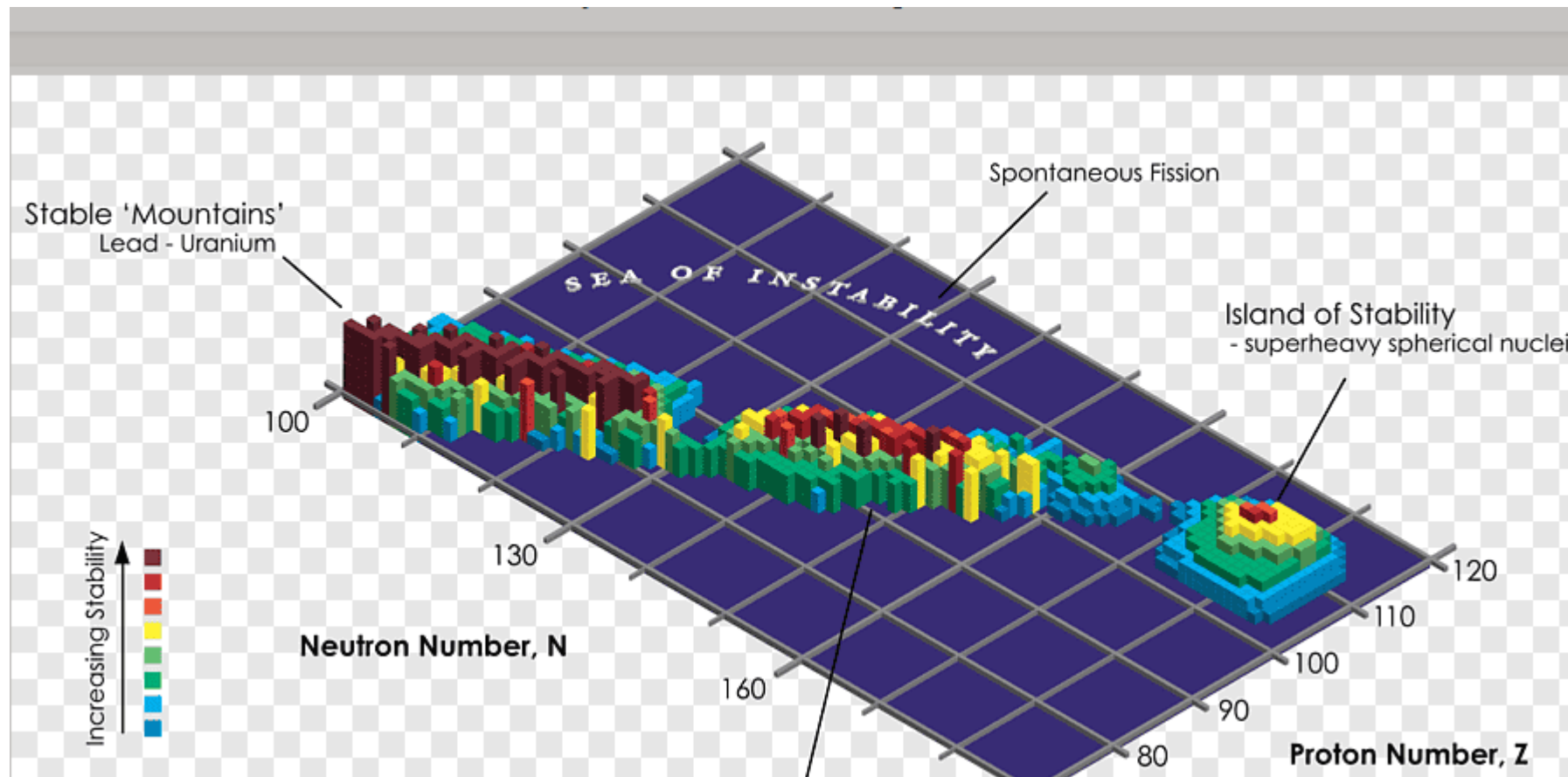


Trojrozměrná mapa



# Inverzní analogie

- ostrůvky stability v moři nestability



# Tendence k samovolným radioaktivním přeměnám všech známých atomových jader (nuklidů)

Černá pole označují stabilní izotopy tvořící jeho dno.

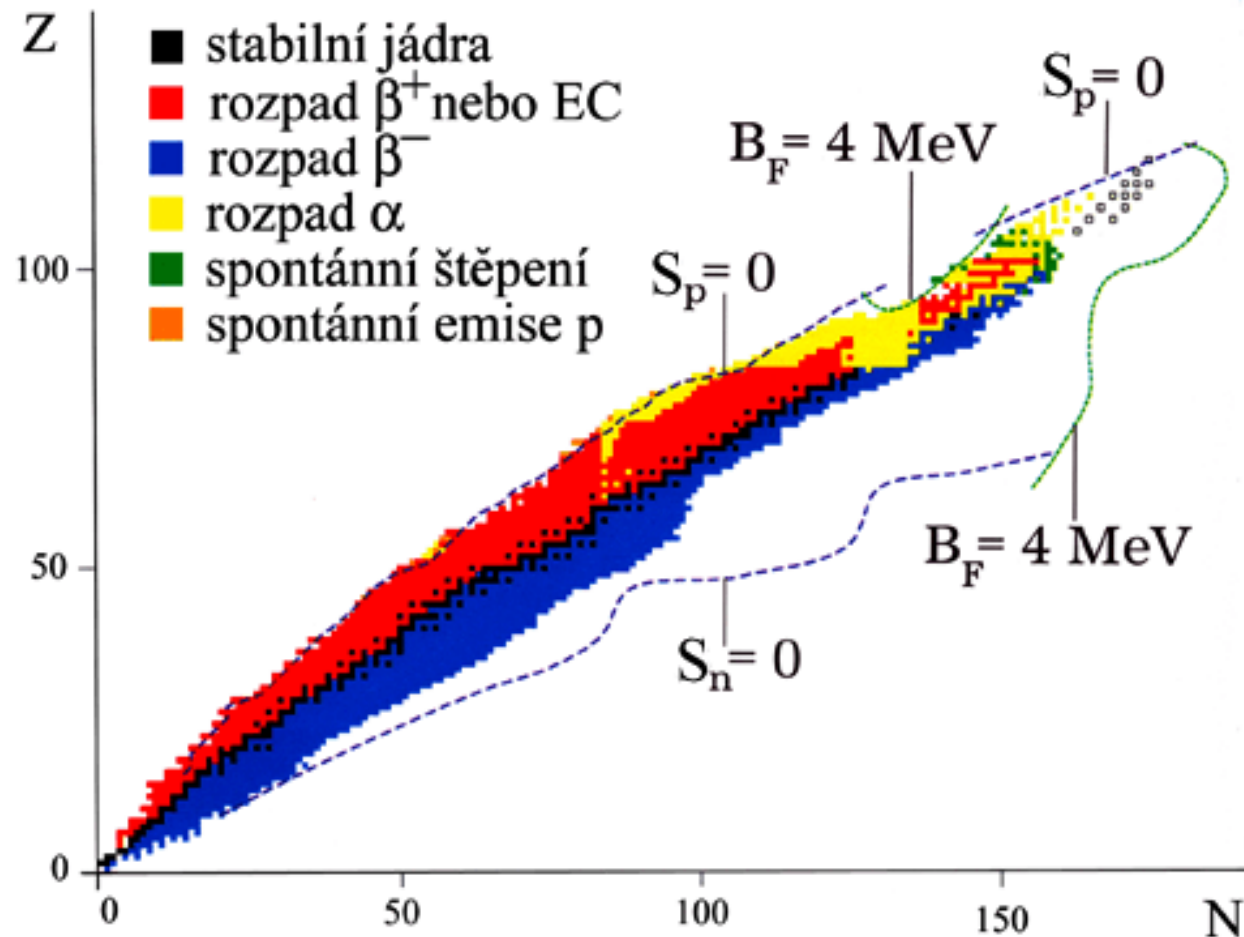
Ostatní jádra jsou radioaktivní.

Údolí je ohraničeno několika liniemi, které vymezují limity existence jader jako vázaných systémů.

**Zelená čára je mezí stability vůči spontánnímu rozštěpení.** Jádra za touto hranicí se vlivem coulombického odpuzování protonů okamžitě rozštěpí a nevytvoří ani vázaný stav.

**Linie s označením  $S_n = 0$  a  $S_p = 0$ .** Určují, u kterých izotopů je energie potřebná na odebrání neutronu, respektive protonu nulová.

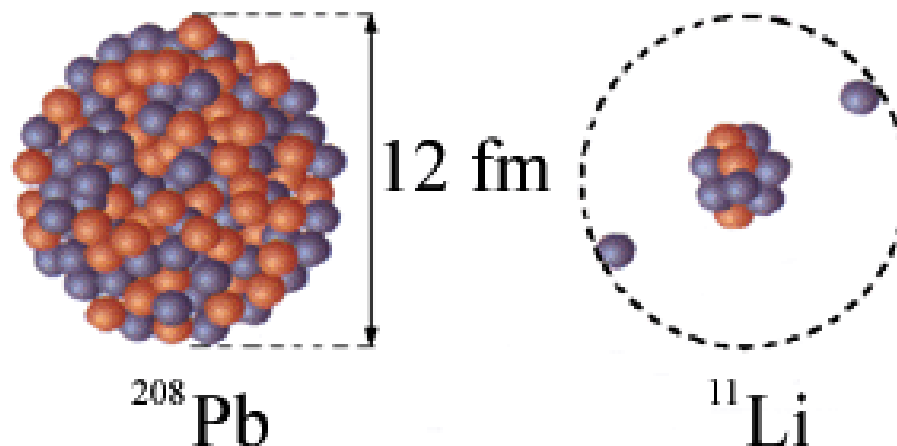
Tyto linie se proto nazývají **liniemi přesycenosti (drip line)**



# Zvláštnosti na liniích přesycenosti

- Poblíž linií přesycenosti objevujeme u některých jader pozoruhodné a zcela nečekané vlastnosti
- Např. u lehkých prvků s extrémním poměrem protonů k neutronům se setkáváme s tzv. **haló jádry**.

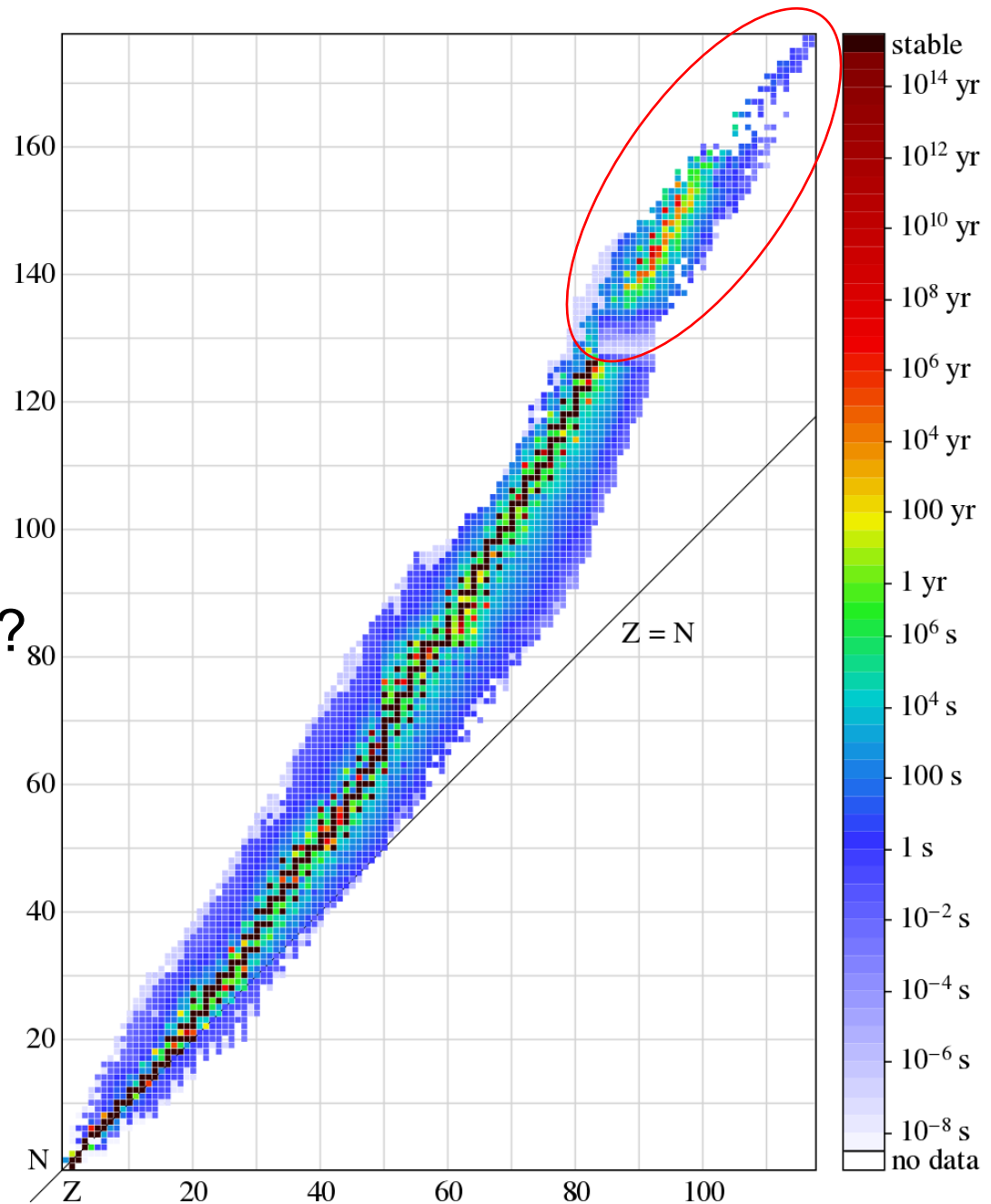
O co se jedná? Běžná jádra si můžeme představit jako malinkou kapičku nukleonové kapaliny. U haló jader si tímto přiblížením nevystačíme. Spíše bychom je mohli popsat jako kompaktní centrální objekt (jadérko), kolem kterého se do dálky rozprostírá oblak slabě vázaných nukleonů (haló). Celý tento systém proto vypadá spíše jako jakási „jaderná molekula“.



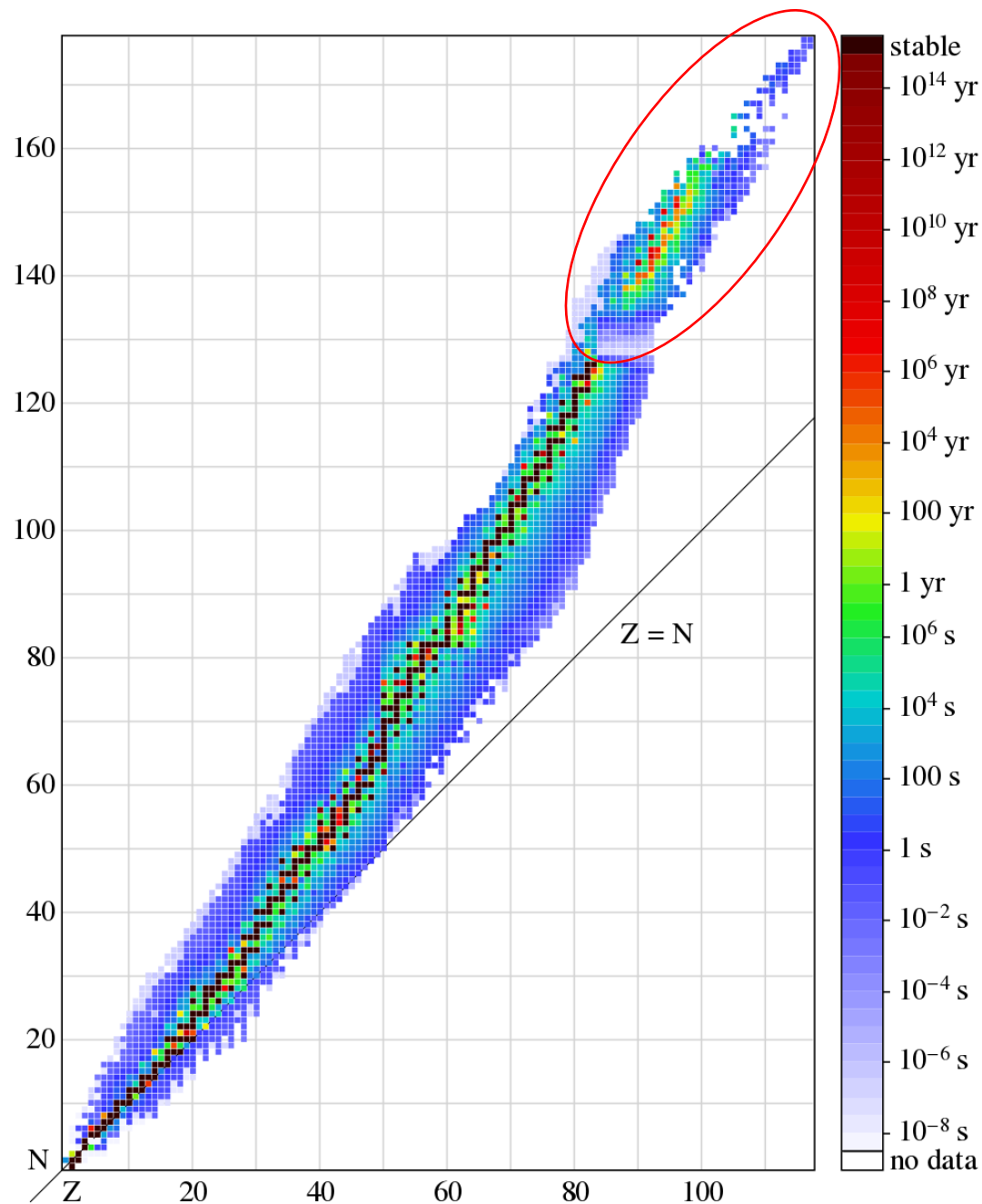
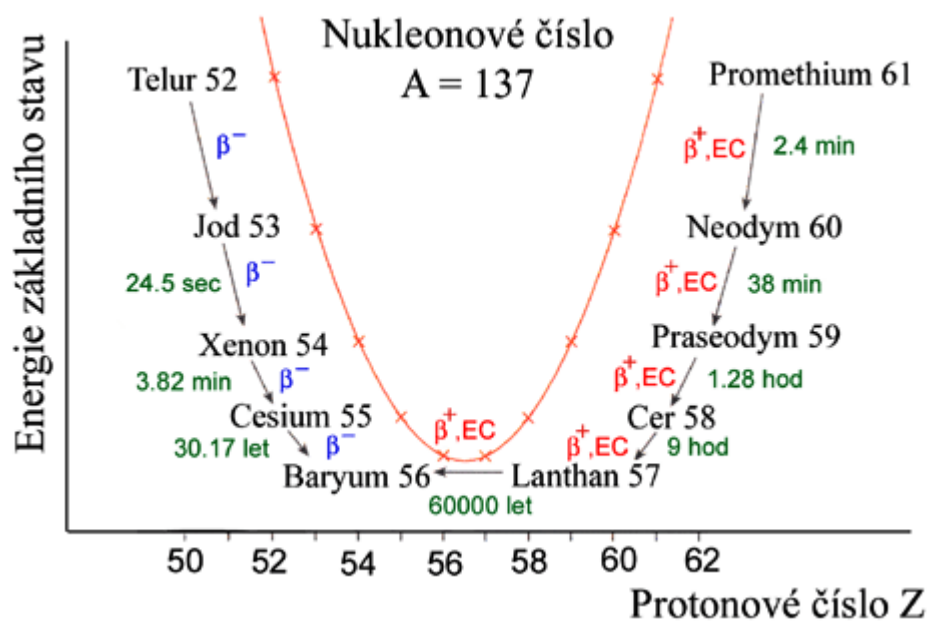


# Ostrov stability v oblasti supertěžkých jader

Zde se již nevyskytují stabilní jádra?  
Ostrůvky stability?



# N vs. Z a poločas rozpadu



# Zajímavost: Bi

Periodic Table of the Elements

1A																	8A
1 H 1.00794																	2 He 4.002602
3 Li 6.941	4 Be 9.012182											5 B 10.811	6 C 12.0107	7 N 14.0067	8 O 15.9994	9 F 18.9984032	10 Ne 20.1797
11 Na 22.989769	12 Mg 24.3050											13 Al 26.9815386	14 Si 28.0855	15 P 30.973762	16 S 32.065	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948
19 K 39.0983	20 Ca 40.078	3B	4B	5B	6B	7B	8B		1B	2B	31 Ga 69.723	32 Ge 72.64	33 As 74.92160	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.798	
37 Rb 85.4678	38 Sr 87.62	39 Y 88.90585	40 Zr 91.224	41 Nb 92.90638	42 Mo 95.96	43 Tc [98]	44 Ru 101.07	45 Rh 102.90550	46 Pd 106.42	47 Ag 107.8682	48 Cd 112.411	49 In 114.818	50 Sn 118.710	51 Sb 121.760	52 Te 127.60	53 I 126.90447	54 Xe 131.29
55 Cs 132.9054519	56 Ba 137.327	57-71 Lanthanides	72 Hf 178.49	73 Ta 180.94788	74 W 183.84	75 Re 186.207	76 Os 190.23	77 Ir 192.222	78 Pt 195.084	79 Au 196.966569	80 Hg 200.59	81 Tl 204.3833	82 Pb 207.2	83 Bi 208.9804	84 Po [209]	85 At [210]	86 Rn [222]
87 Fr [223]	88 Ra [226]	89-103 Actinides	104 Rf [261]	105 Db [262]	106 Sg [263]	107 Bh [264]	108 Hs [265]	109 Mt [266]	110 Ds [267]	111 Rg [268]	112 Cn [269]	113 Uut [270]	114 Fl [271]	115 Uup [272]	116 Lv [273]	117 Uus [274]	118 Uuo [276]
Lanthanides		57 La 138.9047	58 Ce 140.116	59 Pr 140.90765	60 Nd 144.242	61 Pm [145]	62 Sm 150.36	63 Eu 151.964	64 Gd 157.25	65 Tb 158.92535	66 Dy 162.500	67 Ho 164.93032	68 Er 167.259	69 Tm 168.93421	70 Yb 173.054	71 Lu 174.967	
Actinides		89 Ac [227]	90 Th 232.0375	91 Pa 231.03888	92 U 238.02891	93 Np [237]	94 Pu [244]	95 Am [243]	96 Cm [247]	97 Bk [247]	98 Cf [251]	99 Es [252]	100 Fm [257]	101 Md [258]	102 No [259]	103 Lr [262]	

- Bi dlouho považován za poslední stabilní prvek
- Nicméně, citlivými metodami byl i u isotopu <sup>209</sup>Bi byl prokázán rozpad s extrémním poločasem rozpadu alespoň  $T_m = 1.9 \times 10^{19}$  let (od Velkého třesku uplynulo  $\sim 1.38 \times 10^{10}$  let)
- Též náznaky (zatím experimentálně nepotvrzené), že se samovolně rozpadá i **proton** s  $T_m = 10^{32} - 10^{35}$  let

ČERVENÁ: pouze radioaktivní isotopy

ŽLUTÁ: případně též radioaktivní, ovšem s extrémně dlouhým poločasem rozpadu ??

# HLADINOVÝ MODEL JÁDRA

- **Protonové slupky** obsahují při plném zaplnění  
2, 6, 12, 18, 22 a 32 protonů
- **Neutronové slupky** obsahují při plném zaplnění  
2, 6, 12, 18, 22, 32 a 44 neutronů
- Pokud má jádro jednu nebo více slupek zaplněných, pak obsahuje celkem  
2, 8, 20, 28, 50 nebo 82 protonů,  
resp. 2, 8, 20, 28, 50, 82 nebo 126 neutronů
- Jde o tzv. **magická čísla**, tato jádra jsou velmi stabilní (protože mezi slupkami jsou značné energetické mezery, jsou tato jádra stabilizována analogicky jako atomy s elektronovou konfigurací vzácných plynů).

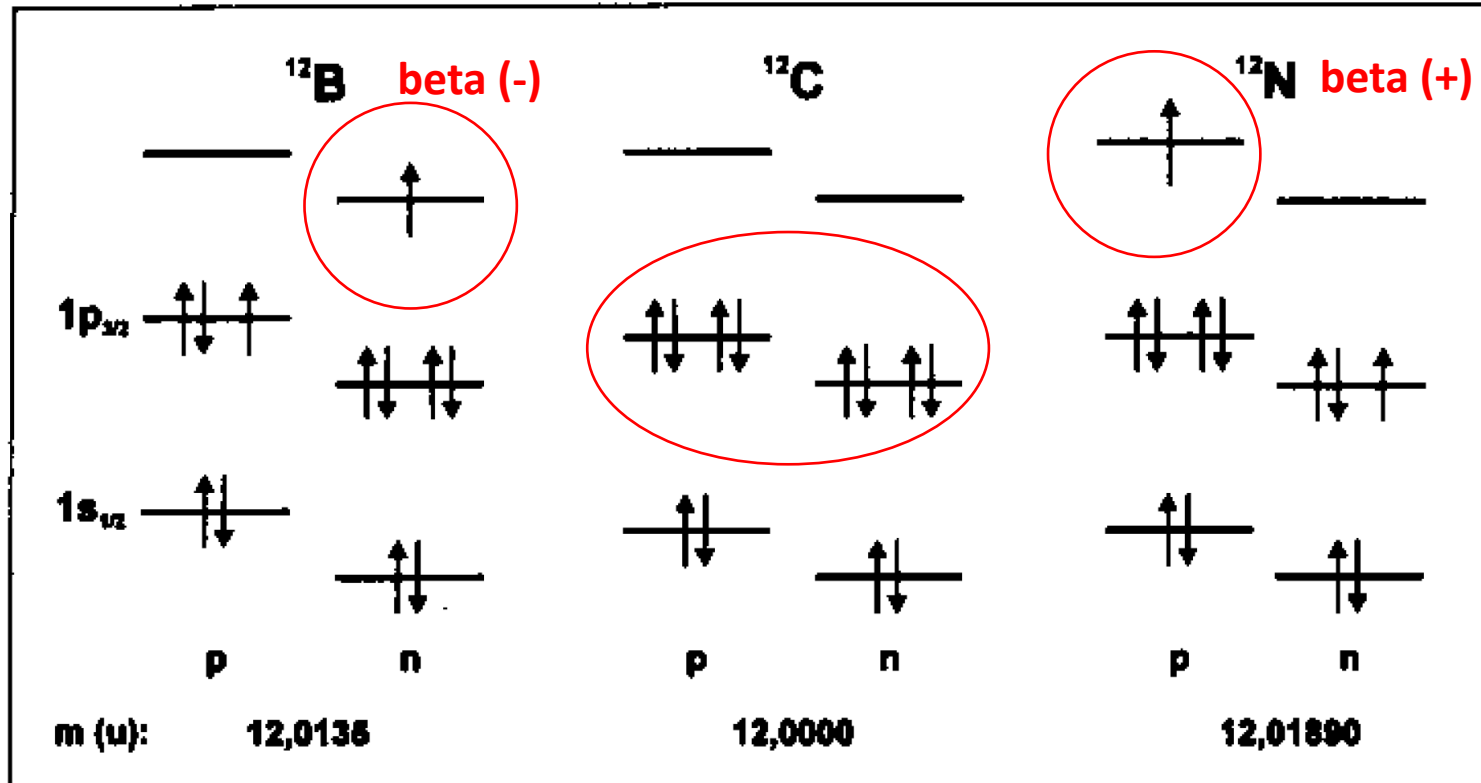


# HLADINOVÝ MODEL JÁDRA

- Pokud jádro obsahuje magická čísla pro  $p^+$  i  $n^0$  (je zaplněno několik protonových i neutronových slupek), pak jde o jádra **dvojitě magická** s mimořádnou stabilitou,...
- ...pokud je ovšem **současně splněna** základní **podmínka** stability jádra, tj. **optimálního poměru počtů  $p^+$  i  $n^0$**  ( $N : Z = \text{cca. } 1 - 1,5$ ).
- Proto ne každá kombinace magických čísel dává stabilní jádro.
  - Např. dvojitě magické  $^{100}_{50}\text{Sn}$  je velmi nestálý, kvůli nedostatku  $n^0$  ( $T_{1/2} = \text{cca. } 1 \text{ s}$ ),
  - dvojitě magické  $^{10}_2\text{He}$  je zase velmi nestabilní kvůli nadbytku  $n^0$ .



# Závislost stability jádra na $p^+$ a $n^0$ konfiguraci

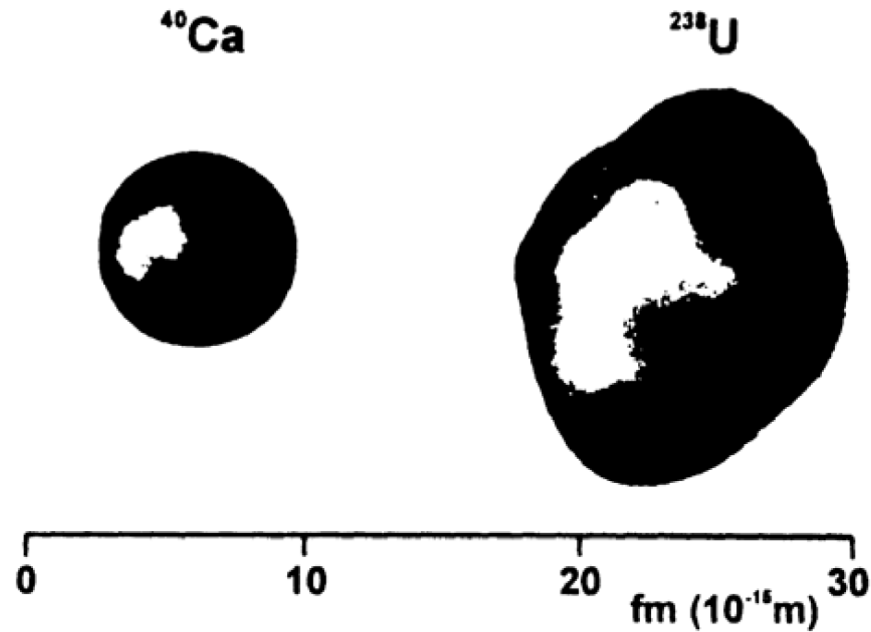


Obrázek 9: Souvislost nestability jádra vůči přeměnám  $\beta$  s nukleonovou konfigurací.



## Tvar jádra

- Dvojitě magická jádra mají **kulovitý tvar**.
- Ostatní jádra s vysokým spinem mají tvar deformovaný: protáhlý elipsoid – lanthanoidy, aktinoidy, zploštělý



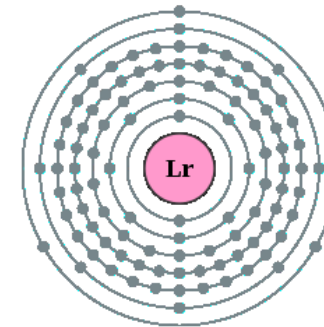
# HLADINOVÝ MODEL JÁDRA

- 60 % stabilních nuklidů v přírodě je **SUDO-SUDÝCH**
- 40 % **SUDO-LICHÝCH** a **LICHO-SUDÝCH**
- Pouze 4 nuklidy jsou **LICHO-LICHÉ**:  ${}^2_1\text{H}$ ,  ${}^6_3\text{Li}$ ,  ${}^{10}_5\text{B}$  a  ${}^{14}_7\text{N}$ .
- Sudé prvky mají více izotopů

	${}_{47}\text{Ag}$	${}_{48}\text{Cd}$	${}_{49}\text{In}$	${}_{50}\text{Sn}$	${}_{51}\text{Sb}$	${}_{52}\text{Te}$	${}_{53}\text{I}$
počet izotopů	2	8	1	10	2	8	1

- Hladinový model též dobře vysvětluje excitaci a deexcitaci jádra vyzářením záření gama  
→ obdoba s elektronovým obalem, kde však rozdíly mezi orbitaly (energetickými hladinami) činí řádově pouze eV (viditelné světlo a UV); v případě jádra se jedná o  $10^3 - 10^6$  eV ( $\gamma$ -záření)
- Spin sudých jader (sudé A) je 0 nebo celé číslo,
- Spin lichých jader je  $\frac{1}{2}$  nebo  $\frac{3}{2}$

- Čím těžší jádro, tím více má různých izotopů, z nichž jen některé jsou stabilní (většina je radioaktivních).
- **Posledními stabilními jádry jsou olovo  $^{208}\text{Pb}_{82}$  (a prakticky i bizmut  $^{209}_{83}\text{Bi}$ )** všechna těžší jádra jsou již radioaktivní
- **Oblast jader uranových ( $^{235,238}_{92}\text{U}$  a další izotopy)**
- **a transuranových** (plutonium, americium, kalifornium, einsteinium, fermium, mendělejevium ...).



- **Nejtěžší známá jádra** (jako je  $^{258}_{103}\text{Lw}$  – **Lawrencium** - a vyšší) se již rozpadají natolik rychle po jejich umělém vyrobení, že je obtížné jejich existenci vůbec prokázat.

# Stabilita jader - SHRNU TÍ

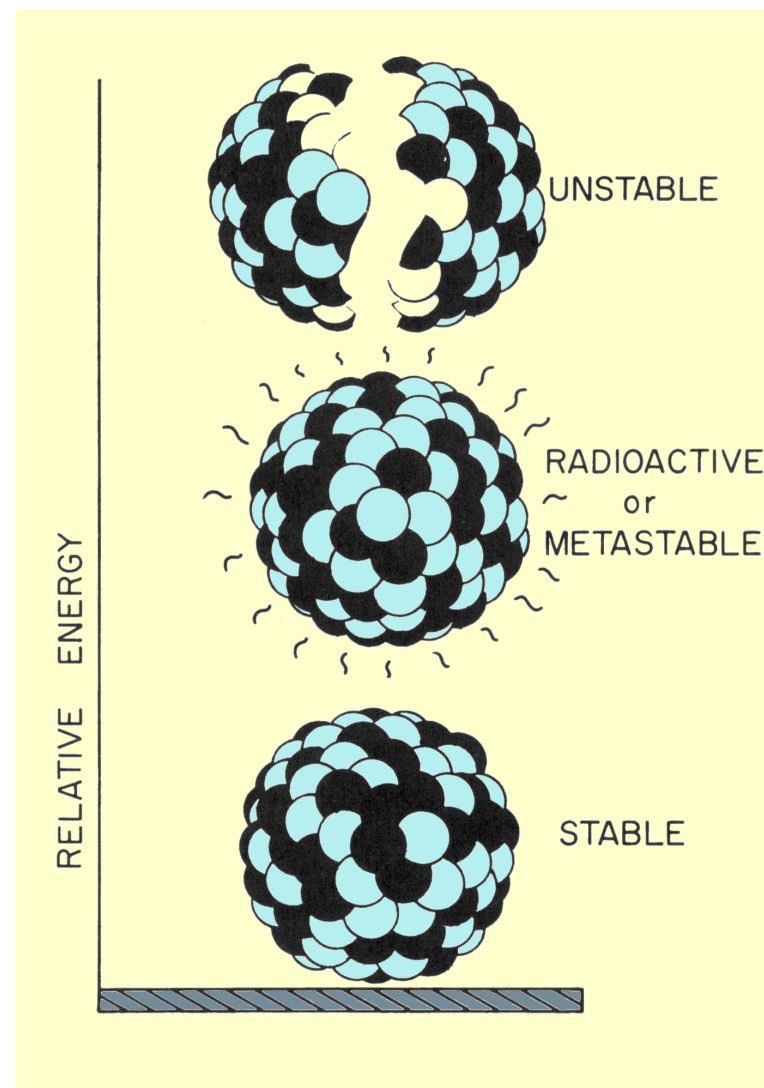
1. Závislá na vazebné energii, vztažené na jeden nukleon (nejvyšší pro  $Z = 14 - 50$ )
2. Významný poměr  $N/Z$  (pro většinu nuklidů  $N/Z = 1,0 - 1,6$ )
3. Rozdíly v závislosti na tom, zda jsou  $N$  a  $Z$  sudá či lichá čísla

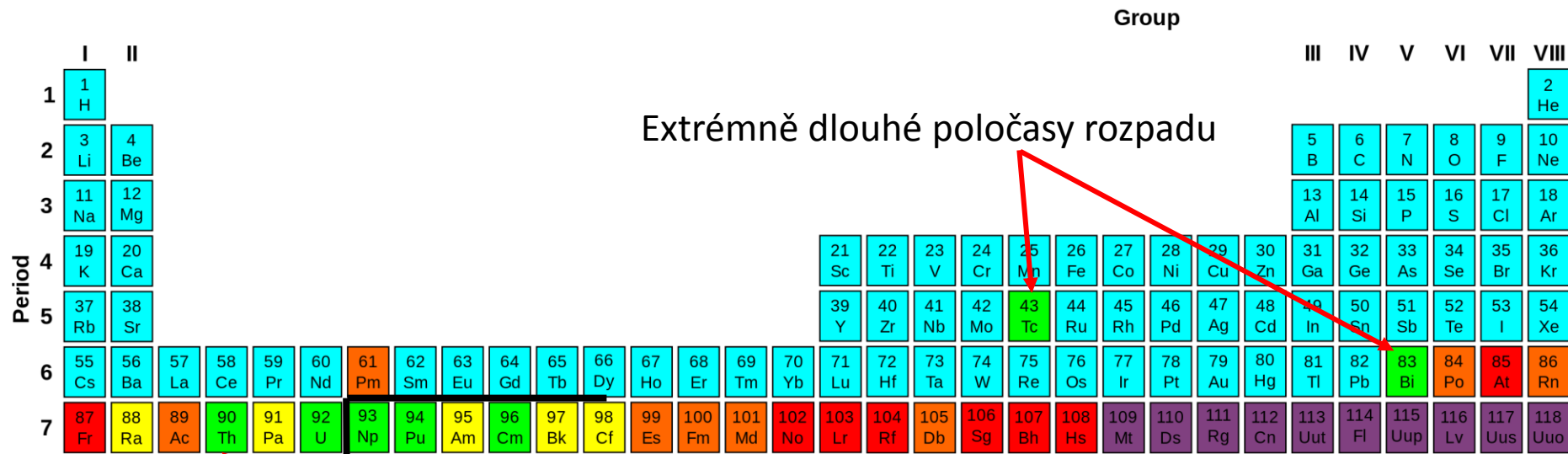
$Z$	$N$	Počet stabilních isotopů
sudé	sudé	164
sudé	liché	55
liché	sudé	50
liché	liché	4

4. Nahromadění **61 a více protonů v jádře** → pravděpodobně destabilizace jádra (příliš mnoho kladného náboje, který neutrony nedokáží kompenzovat)
5. Prvky se  **$Z > 83$**  pouze radioaktivní isotopy
6. Atomová jádra s 2, 8, 20, 28, 50, 82 a 126 protony, nebo neutrony neobvykle stabilní – **magická čísla** –  ${}_{20}\text{Ca}$ : 6 stabilních isotopů

# STABILITA NUKLIDŮ - shrnutí

- V současné době je známo více než **2600** druhů různých jader, lišících se od sebe počtem protonů nebo neutronů.
  - z toho **stabilních** jader je si **270**,
  - ostatní jádra jsou **radioaktivní**.
- V pozemské přírodě se vyskytuje **340** nuklidů –
  - **270** stabilních
  - a **70** radioaktivních.





Extrémně dlouhé poločasy rozpadu

3 přirozené + 1 umělá rozpadová řada  
 Transurany – umělá jádra

- Elements that contain at least one stable isotope.
- Radioactive elements: the most stable isotope is very long-lived, with half-life of over four million years.
- Radioactive elements: the most stable isotope has half-life between 800 and 34.000 years.
- Radioactive elements: the most stable isotope has half-life between one day and 103 years.
- Highly radioactive elements: the most stable isotope has half-life between several minutes and one day.
- Extremely radioactive elements: the most stable isotope has half-life less than several minutes. Very little is known about these elements due to their extreme instability and radioactivity.

Autor: Periodic\_Table\_Armtuk3.svg: Armtuk (talk)derivative work: Alessio Rolleri (talk)derivative work: Gringer (talk) – Periodic\_Table\_Armtuk3.svg, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4281027>



1																	18	
1	H 1																	He 2
2	Li 3	<sup>9</sup> Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	<sup>19</sup> F 9	Ne 10
3	<sup>23</sup> Na 11	Mg 12										<sup>27</sup> Al 13	Si 14	<sup>31</sup> P 15	S 16	Cl 17	Ar 18	
4	K 19	Ca 20	<sup>45</sup> Sc 21	Ti 22	<sup>51</sup> V 23	Cr 24	<sup>55</sup> Mn 25	Fe 26	<sup>59</sup> Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	<sup>75</sup> As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
5	<sup>85</sup> Rb 37	Sr 38	<sup>89</sup> Y 39	Zr 40	<sup>93</sup> Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	<sup>101</sup> Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	<sup>115</sup> In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	<sup>127</sup> I 53	Xe 54
6	<sup>133</sup> Cs 55	Ba 56	*	Hf 72	Ta 73	W 74	<sup>187</sup> Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	<sup>197</sup> Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	<sup>209</sup> Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
7	Fr 87	Ra 88	**	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	Nh 113	Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118

* lanthanoids	<sup>139</sup> La 57	Ce 58	<sup>141</sup> Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	<sup>151</sup> Eu 63	Gd 64	<sup>159</sup> Tb 65	Dy 66	<sup>163</sup> Ho 67	Er 68	<sup>169</sup> Tm 69	Yb 70	<sup>175</sup> Lu 71
** actinoids	Ac 89	<sup>232</sup> Th 90	<sup>231</sup> Pa 91	U 92	Np 93	<sup>244</sup> Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103

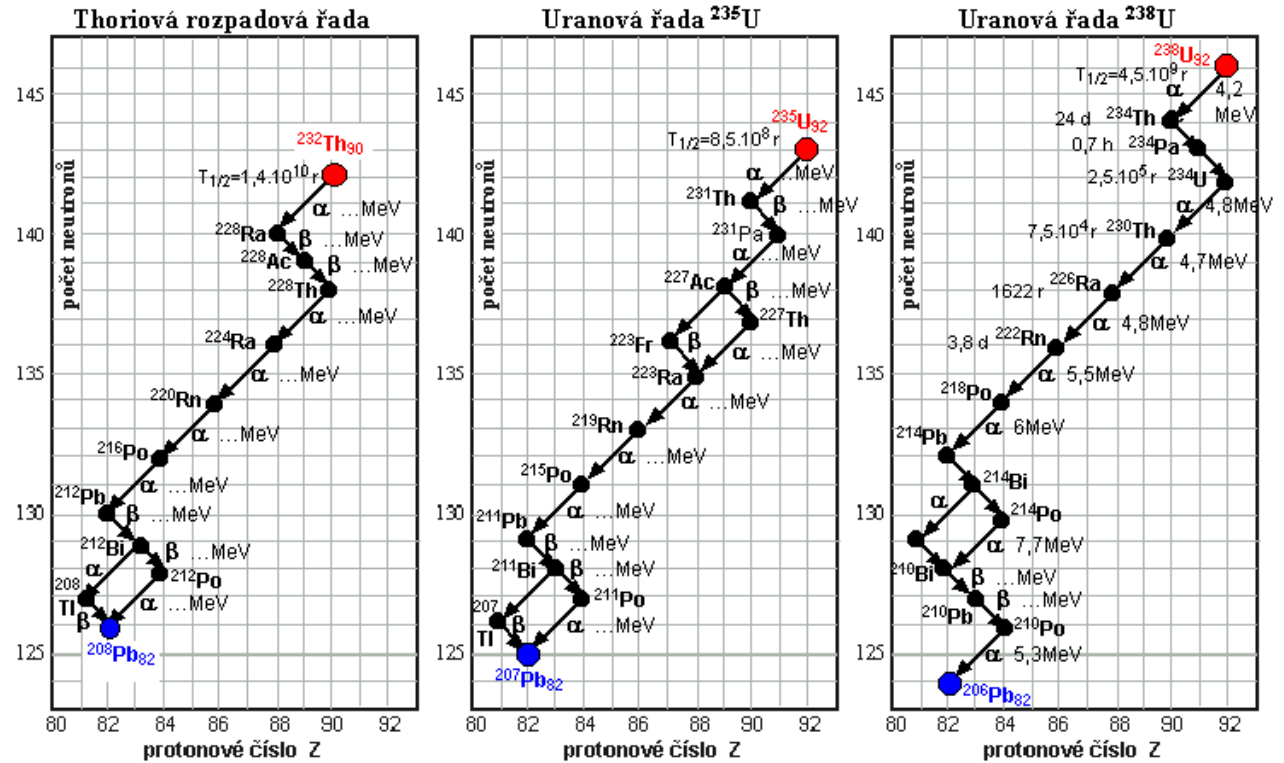
- Polyisotopic
- Monoisotopic (mass number shown) with natural radionuclides
- Monoisotopic and mononuclidic (mass number shown)
- Mononuclidic radioactive (mass number of the only natural radionuclide shown)
- Other radioactive

Natural radionuclides:

- none
- one isotope
- more than one isotope
- other: unclear or controversial

Izotop	Poločas rozpadu (roků)	Konečný produkt rozpadu
$^{92}_{238}\text{U}$	$4,46 \cdot 10^9$	$^{82}_{206}\text{Pb}$
$^{92}_{235}\text{U}$	$7,04 \cdot 10^8$	$^{82}_{207}\text{Pb}$
$^{90}_{232}\text{Th}$	$1,41 \cdot 10^{10}$	$^{82}_{208}\text{Pb}$

Přirozené radioaktivní prvky s dlouhým  $T_{1/2}$



# Izotopový efekt

je záležitostí rozdílných hmotností jader izotopů téhož prvku. Projevuje se na fyzikálních vlastnostech látek, kterých jsou tyto izotopy součástí a kde hmotnost má na příslušnou fyzikální vlastnost vliv.

Střední kinetická energie molekul plynu	těžší molekuly se pohybují pomaleji
Rychlost chemických reakcí	reakce s těžšími izotopy probíhají jinou rychlostí
Vibrace chemické vazby	změna vlnočtu vibrace v molekulových spektrech
Teplota tání	lehká voda 0 °C, těžká voda 3.82 °C
Rychlost difuze	dělení izotopů uranu 235 + 238 (Grahamův zákon)

# **RADIOAKTIVITA**

# RADIOAKTIVITA

- $X \rightarrow Y + n \text{ částic (+E)}$
- **Základní hmotnostní podmínka radioaktivity:**
- $M(X) > M(Y) + M(\text{ČASTIC})$
- **Energie uvolněna při radioaktivní přeměně:**
- $E_{\text{přeměny}} = E_{\text{kin}}(Y) + E_{\text{kin}}(\text{ČASTIC}) + E_{\gamma}$

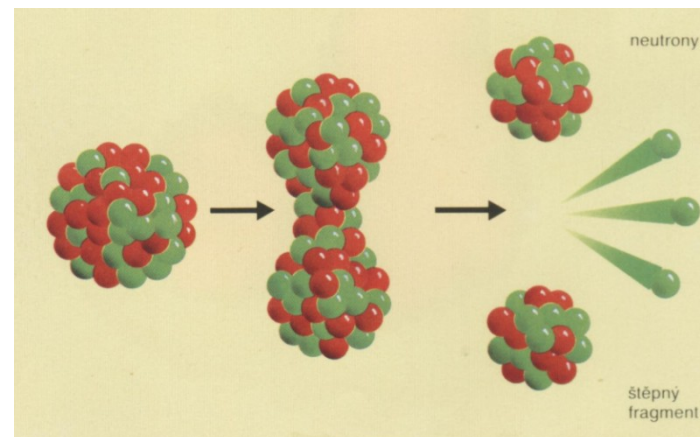
# RADIOAKTIVNÍ ROZPAD

## PŘIROZENÁ RADIOAKTIVITA

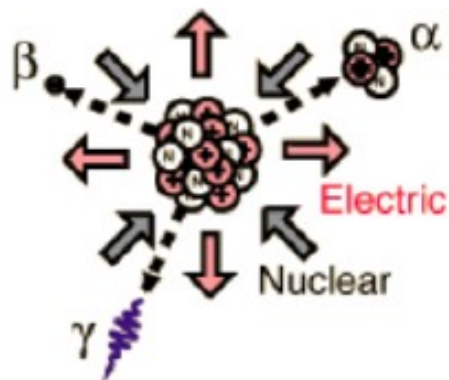
objev r. 1896 **Henri Becquerel**

uran a uranové soli vyzařují samovolně paprsky, kteřé mají schopnost:

- **ionizovat** vzduch
- **pronikat** látkami
- **exponovat** fotografickou emulzi
- vyvolávat **fluorescenci**



*Radioaktivita je jev, při kterém dochází ke změně chemické podstaty látky (nezávisí na vnějších podmínkách: tlak, teplota, vlhkost...).*



emitované záření je tzv.  
**radioaktivní záření  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$**

# Základní typy přeměn (8 typů + 3 procesy deexcitace)

Typ přeměny	Reakce	Popis přeměny
Přeměna $\alpha$	${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2\text{He}$	Z jádra je emitována částice složená ze dvou protonů a dvou neutronů – částice $\alpha$
Přeměna $\beta^-$	${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + {}^0_{-1}e + \bar{\nu}$	Z jádra je emitována částice $\beta^-$ a antineutrino.
Přeměna $\beta^+$	${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + {}^0_{+1}e + \nu$	Z jádra je emitována částice $\beta^+$ a neutrino.
Elektronový záchyt	${}^A_ZX + {}^0_{-1}e \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + \nu$	Jádrem je zachycen orbitální elektron a z jádra je emitováno neutrino
Emise protonů	${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-1}_{Z-1}Y + {}^1_1p$	Z jádra je emitován proton
Emise neutronů	${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-1}_ZY + {}^1_0n$	Z jádra je emitován neutron

obdoba  $\beta^+$



# Základní typy přeměn (8 typů + 3 procesy deexcitace)

Typ přeměny	Reakce	Popis přeměny
Samovolné štěpení	${}^A_ZX \rightarrow {}^{A_1}_{Z_1}Y + {}^{A-A_1}_{Z-Z_1}Z + xn$	Jádro se rozděluje na dva fragmenty a několik neutronů
Emise těžkých jader	${}^A_ZX \rightarrow {}^{A_1}_{Z_1}Y + {}^{A-A_1}_{Z-Z_1}Z$	Z jadra jsou emitovány těžké částice
Přeměna $\gamma$	${}^A_ZX^* \rightarrow {}^A_ZX + \gamma$	Excitované jádro okamžitě přechází do základního stavu emisí fotonů záření gama
Izomerický přechod	${}^{A_m}_ZX \rightarrow {}^A_ZX + \gamma$	Excitované jádro v metastabilním stavu přechází do základního stavu emisí fotonů záření gama
Vnitřní konverze	${}^A_ZX^* \rightarrow {}^A_ZX + e^-$	Jádro v excitovaném stavu předává veškerou přebytečnou energii orbitálnímu elektronu

= obdoba emise  $\alpha$

+ rozpady s emisí více částic ( $p^+$ , ...)

Procesy deexcitace jader po předchozím rozpadu

# Skupiny radioaktivních přeměn:

## 1.mění se $Z$ při konstantním $A$

- $\beta^-$
- $\beta^+$
- EZ = elektronový záchyt)

## 2.mění se $Z$ i $A$

- $\alpha$ ,
- emise nukleonů
- emise těžších jader  $^{14}\text{C}$ ,  $^{24}\text{Ne}$ ,
- SŠ = samovolné štěpení

## 3.deexcitace jádra ( $A$ i $Z$ konst.)

- $\gamma$  emise okamžitá
- $\gamma$  emise zpožděná (izomerický přechod),
- vnitřní konverze

# 8 základních přeměn

- Všechny jsou doprovázeny emisí elementárních částic, které jsou schopny ionizovat okolní látku

Částice (hmotné i nehmotné), které jsou uvolněny v **jádře**, označujeme:

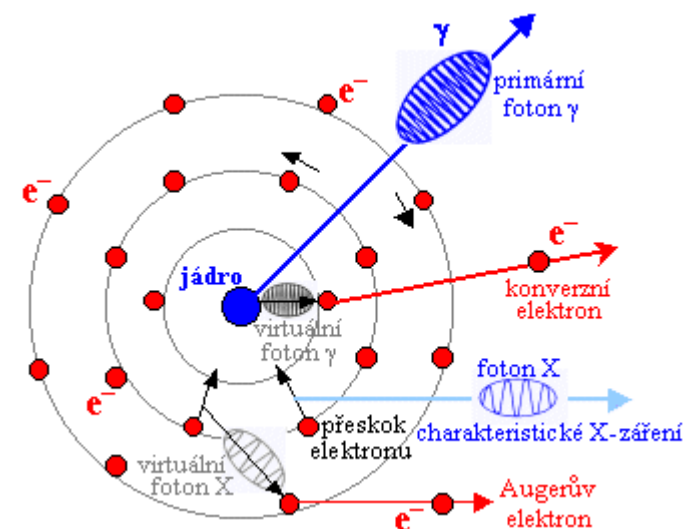
- částice  $\alpha$ ,
- částice  $\beta$  ( $\beta^-$ ,  $\beta^+$ ),
- neutrony,
- fotony  $\gamma$ .

Vedle těchto částic vzniklých v jádře se z **elektronového obalu** uvolňují i elektrony, které **podle** mechanismu vzniku označujeme:

- konverzní elektrony,
- Augerovy elektrony.

V elektronovém obalu dále vznikají i fotony elektromagnetického záření, které nazýváme:

- brzdné záření, viz přednáška 1 – RTG záření
- charakteristické záření,
- anihilační záření. (doprovází  $\beta^+$ )



## Zákony platné pro radioaktivní přeměnu

- Zákon zachování hmoty a energie
- Zákon zachování elektrického náboje
- Zákon zachování počtu nukleonů
- Zákon zachování hybnosti

**+ Zákon zachování leptonového a baryonového čísla**

Tabulka 4.1 Zastoupení jednotlivých typů jaderných přeměn

	Základní stav	Metastabilní stav	$\Sigma$
Stabilní jádra	214	0	214
alfa	424	80	504
beta-	1174	131	1305
ec/beta+	1044	214	1258
IT	--	334	334
n	28	--	28
SF	38	2	40
p	81	4	85
CE	112	4	116
Celkem	3115	769	3884

- **IT** – vnitřní konverze, **ec** –elektronový záchyt, **SF** – spontánní štěpení, **CE** – emise těžkých jader (cluster emission)

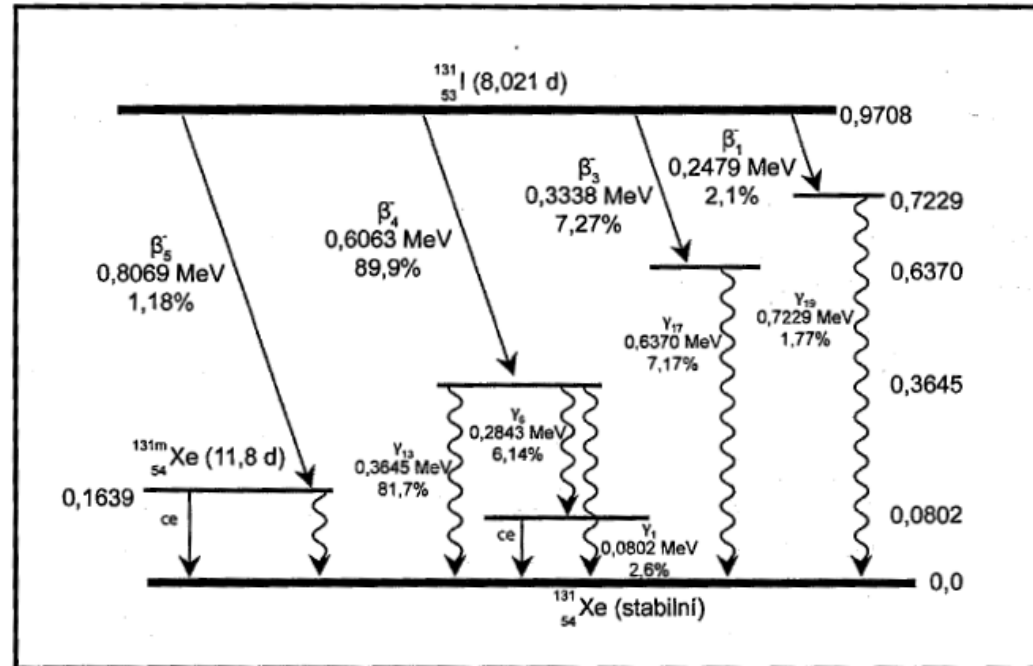


Vedle těchto jednoduchých přeměn s emisí jedné částice existuje celá řada složitějších přeměn s emisí několika částic. Např.

## Rozpadové diagramy

$$2\beta^+; 2\beta^-; \beta^-, d; \beta^+, \alpha; \beta^-, n; ec, \alpha; \dots$$

Jednotlivé radioaktivní přeměny, uvedené v tabulce 4.2, se u reálných přeměn vyskytují samostatně jen sporadicky. Většinou jsou doprovázeny alternativním druhem jaderné přeměny. Proto se u rozpadových schémat uvádějí pravděpodobnosti jejich výskytu. Na obr. 4.4 je znázorněno schéma rozpadu izotopu  $^{131}_{53}\text{I}$ . Najdeme zde několik přeměn  $\beta^-$ ,  $\gamma$ , kde dochází na slupce K nebo L k vnitřní konverzi a je následně emitováno charakteristické záření. Z toho je vidět, že přeměny jednotlivých izotopů jsou složitým mechanismem několika základních typů přeměn popsaných v předcházející části.



Obrázek 4.4 Rozpadové schéma  $^{131}\text{I}$