

Radiační biofyzika

5/2019

Atomové jádro, Radioaktivita

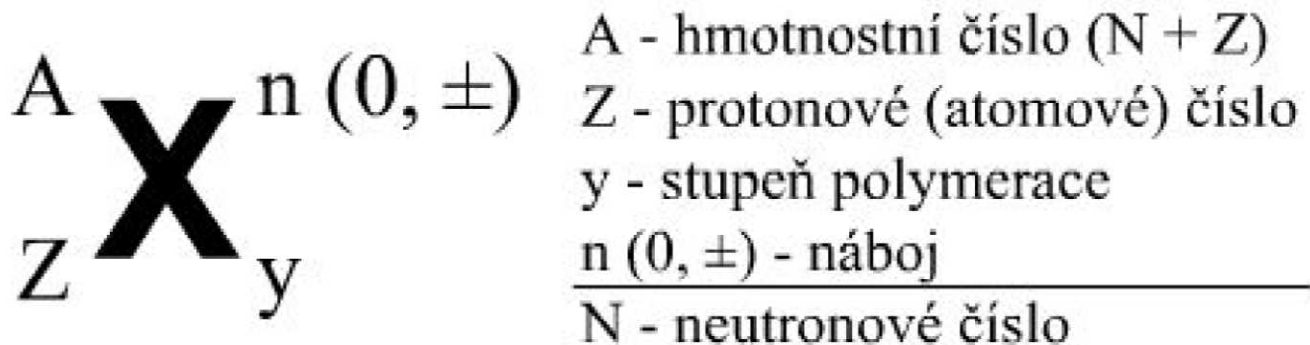
Martin Falk

ATOMOVÉ JÁDRO

uspořádání

ATOMOVÉ JÁDRO – základní pojmy

- $p^+ + n^0$,
- Sídlo veškeré kladné elektřiny a téměř veškeré hmoty (nukleony $>2000x$ větší hmotnost než e^-)
- silné jaderné interakce \ggg elektrostatické interakce
- Počet p^+ : **PROTONOVÉ (ATOMOVÉ) ČÍSLO, Z** – definuje prvek (pozice v periodické t.)
- Počet nukleonů $p^+ + n^0$: **NUKLEONOVÉ (HMOTNOSTNÍ) číslo, A**
- Počet n^0 : **NEUTRONOVÉ číslo, N**



Atomové jádro

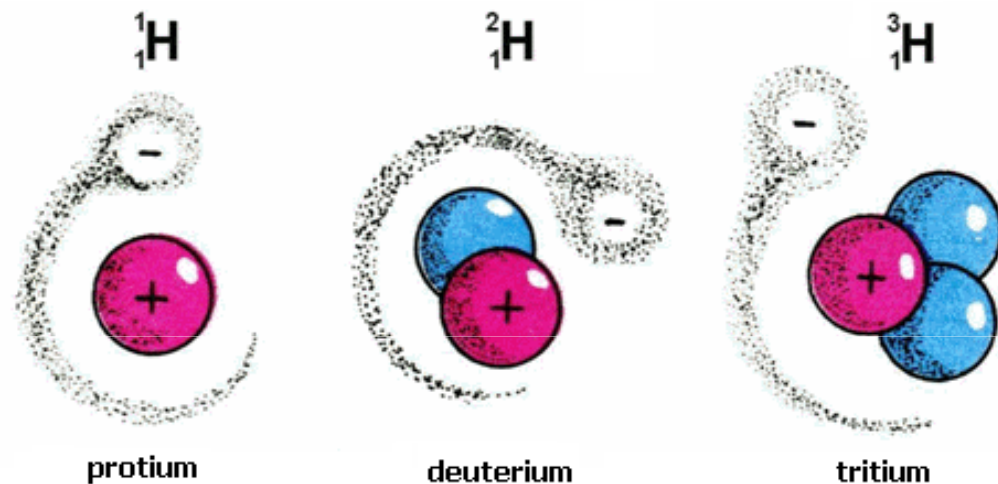
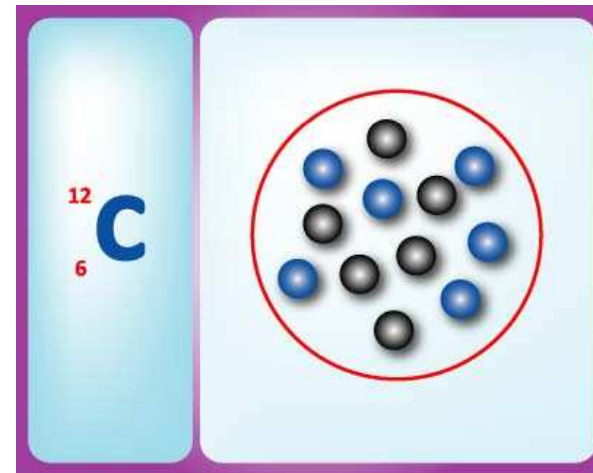
- Jádra běžných atomů se skládají z protonů a neutronů mezi kterými existují silné jaderné interakce. Je v nich soustředěna prakticky veškerá hmotnost atomu
- Nukleony mají svůj jaderný spin rovný $\frac{1}{2}$
- Částice jádra mají své vlastní uspořádání, které popisuje např. hladinový nebo kapkový model jádra
- Mezi nukleony působí silné jaderné interakce, které jsou podstatou jaderných sil (výměna virtuálního pionu)

ATOMOVÉ JÁDRO – základní pojmy

Nuklid – je chemická látka složená z atomů se stejným protonovým i nukleonovým číslem (např. nuklid uhlíku $^{12}_6\text{C}$ obsahuje pouze atomy, které mají v jádře 6 protonů a 6 neutronů)

Dnes známo >2000 nuklidů, z nichž pouze 266 je stabilních

Izotopy – jsou atomy téhož prvku, které mají stejný počet protonů, ale liší se počtem neutronů v jádře atomu. Proto mají stejné protonové číslo, ale různé nukleonové číslo.



Izotopy vodíku (modely atomů)

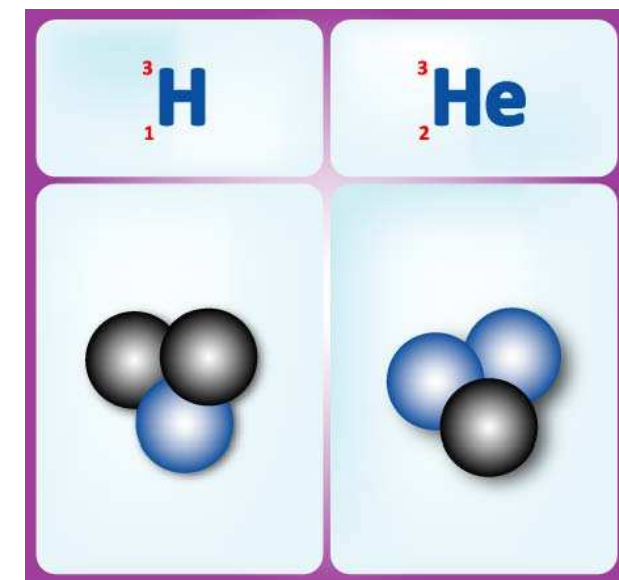
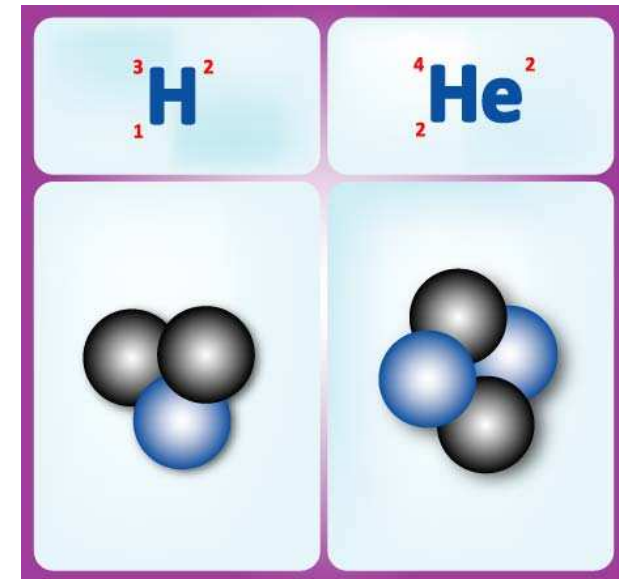
ATOMOVÉ JÁDRO – základní pojmy

IZOTONY: nuklidy, které mají **shodné neutronové číslo** a liší se nukleonovým (a také protonovým) číslem

- Pojem **izotony** se používá hlavně k vyjádření vztahu mezi dvěma jádry.
- Nuklidy ${}^3_1\text{H}^2$ a ${}^4_2\text{He}^2$ jsou izotony. Jedná se o dva různé prvky.

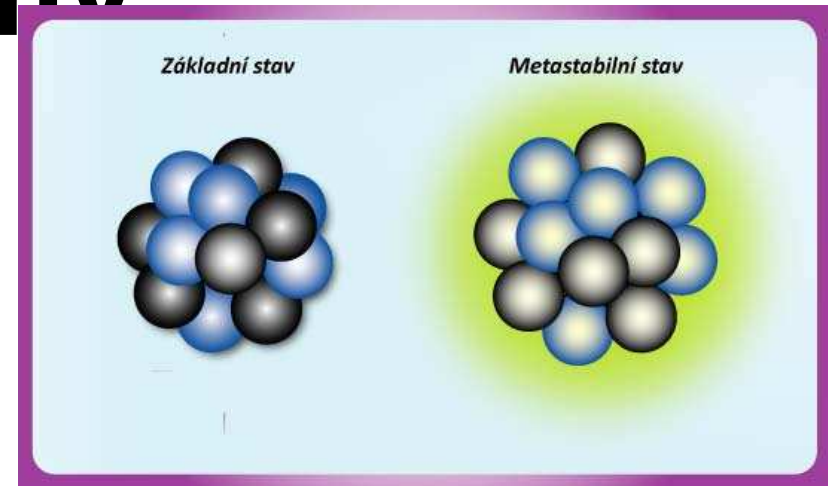
IZOBARY: nuklidy, které mají shodné nukleonové číslo, ale liší se protonovým a neutronovým číslem.

- Nuklidy ${}^3_1\text{H}$ a ${}^3_2\text{He}$ jsou izobary, obsahují stejný počet nukleonů



ATOMOVÉ JÁDRO – základní pojmy

IZOMERY: označení určitého nuklidu s jádrem v metastabilním excitovaném stavu. Toto označení má smysl jen ve vztahu k tomuto *nuklidu* s jádrem v *základním stavu*

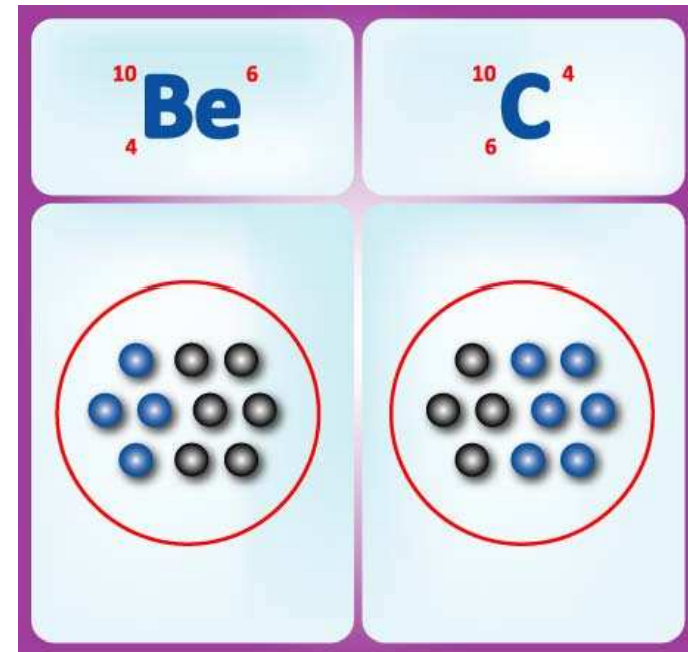


- Označení *izomer* bylo zvoleno jako analogie k pojmu izomer v chemii, se kterým se ale nesmí zaměňovat. V obou případech je izomer složen ze stejných počtů jednotlivých částic, ale liší se svou strukturou a chováním v reakcích.
- Doba života excitovaných jaderných hladin je většinou velmi krátká ($\gg 10^{-15}$ - 10^{-6} s), existují však situace, kdy doba života excitované hladiny je řádově sekundy, minuty a dokonce i několik hodin, dní i roků! - takové hladiny se nazývají **metastabilní** a mluvíme o **izomerním** stavu jádra. Takový jaderný izomer se často považuje se samostatný nuklid
- a označuje se horním indexem "m" u nukleonového čísla např. ^{99m}Tc .

ATOMOVÉ JÁDRO – základní pojmy

ZRCADLOVÁ JÁDRA: je označení jádra, které se používá pouze ve vztahu k jinému jádru. Zrcadlové jádro k jádru určitého nuklidu ${}^A_Z\text{X}^I$ je jádro nuklidu ${}^A_Z\text{X}^N$ a naopak, tzn. jádra jsou zrcadlová navzájem.

- Např.: ${}^{10}_4\text{B}^6$ ${}^{10}_6\text{C}^4$

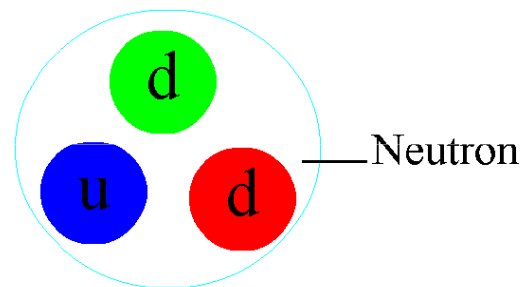
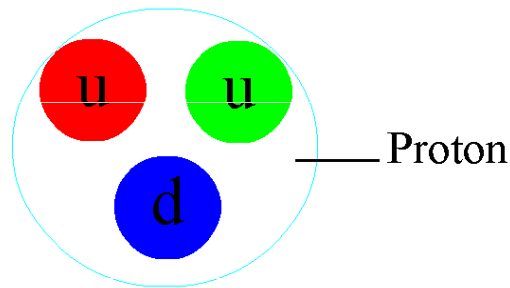
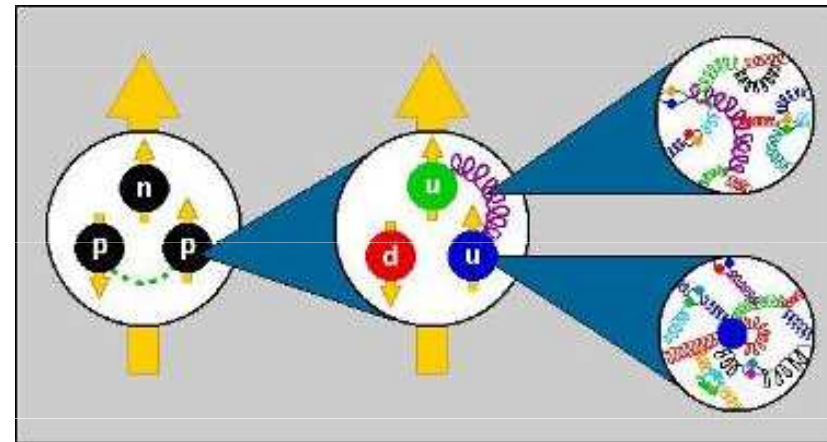
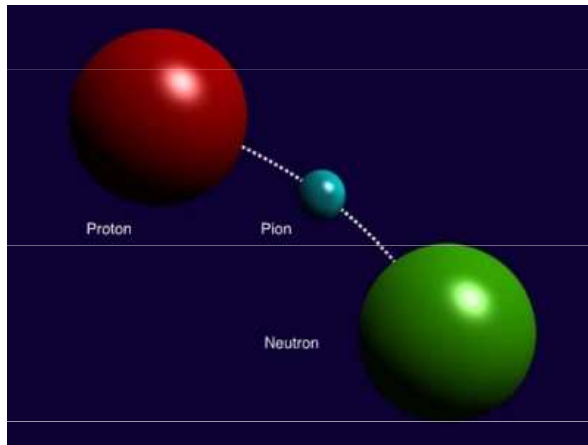


Další definice:

http://artemis.osu.cz/mm fyz/jm/jm_2_1_4.htm

ATOMOVÉ JÁDRO – silná j. interakce

- Původní představa silných interakcí v jádře: neustálá výměna virtuálních pionů (kladný, záporný nebo neutrální) mezi nukleony; velmi krátká doba interakce, řádově 10^{-23} s.
- Nověji založeno na výměně **gluonů**.
- **Velmi krátký dosah** – 10^{-15} m (**tedy jen v jádře**). Dosah jaderných sil definuje poloměr jádra. Poloměr jádra závisí na počtu nukleonů následovně:
 - $r = r_0 A^{1/3}$ ($r_0 = 1,4 \cdot 10^{-15}$ m)
- **Nábojová nezávislost** – interakce je stejně silná bez ohledu na náboj
- **Nasycenost** – vzhledem ke krátkému dosahu sil interagují jen nejbližší sousedé (viz kapkový model)



- Původní představa silných interakcí v jádře: neustálá výměna virtuálních **pionů** (kladný, záporný nebo neutrální) mezi nukleony (vlevo)
- Dnešní představa: výměna **gluonů** (vpravo)

JADERNÁ POTENCIÁLOVÁ JÁMA

• Interakce jádra s dalším nukleonem:

- Pokud je nukleon **daleko od jádra** – nepůsobí žádná síla (nulová potenciální energie)
- **Po přiblížení neutronu** na 10^{-15} m (do oblasti vlivu jaderných sil) → silná výměnná interakce s některým z nukleonů v jádře → nukleon je vtažen do jádra, stává se jeho součástí a je v něm vázán → přitom se uvolní energie neutronu. Soustava má nyní nižší (zápornou) potenciální energii – neutron se nachází v potenciálové jámě.
- **Při přibližování protonu** se navíc nejdříve uplatňuje coulombické odpuzování nábojů jádra a protonu. Potenciální energie proto nejprve roste a až po překonání odpudivých sil – potenciálové bariéry – se proton dostává do působnosti silných jaderných sil a je zachycen.

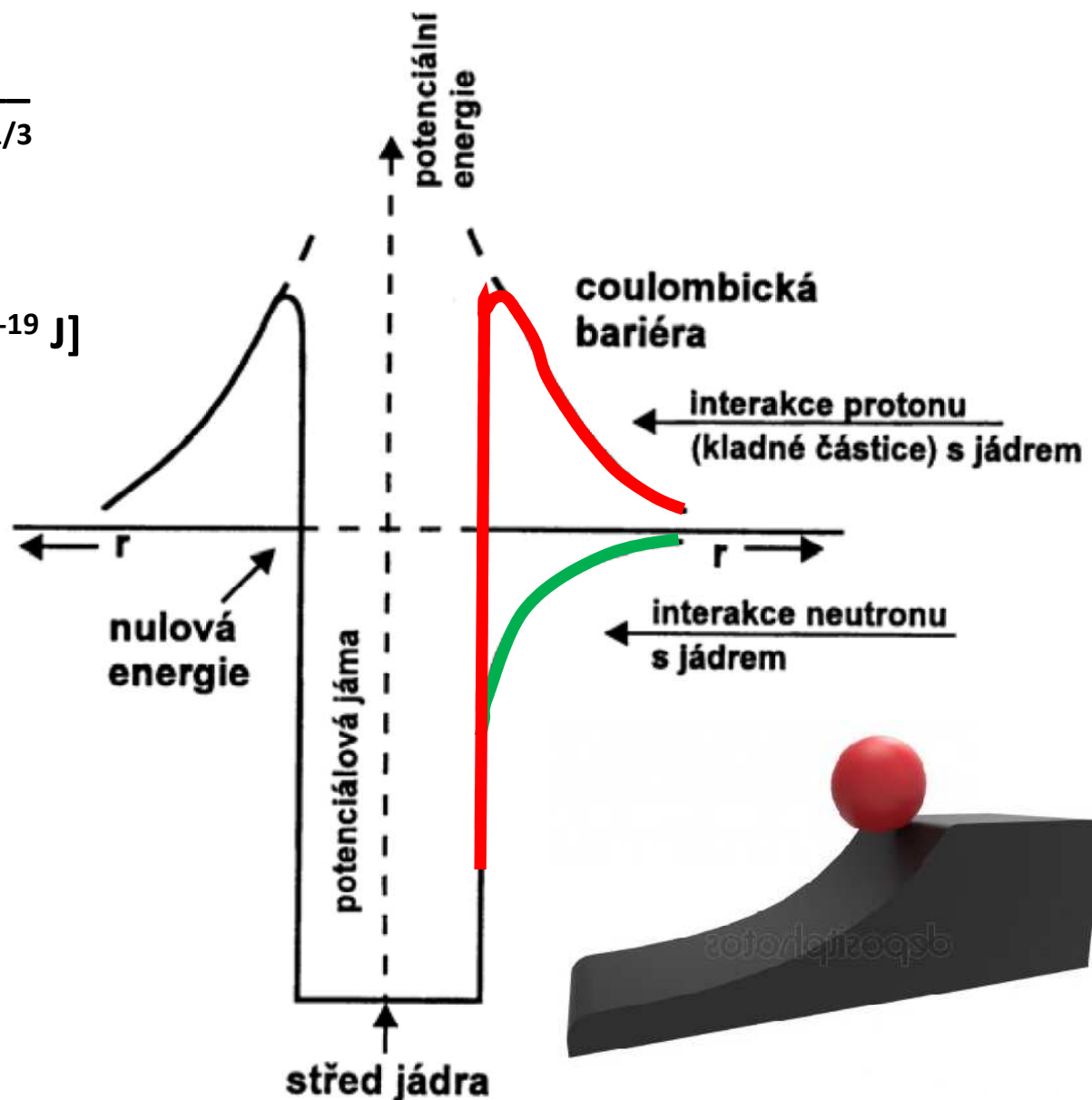
- Pro výšku potenciálové bariéry platí vztah:
$$E_B = \frac{Z_1 Z_2}{A_1^{1/3} + A_2^{1/3}} \quad [\text{MeV}, \quad 1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}]$$

- Kde: Z_1 a Z_2 jsou protonová čísla jádra a kladné částice (zde protonu)
 A_1 a A_2 jsou nukleonová čísla jádra

Průběh interakce mezi jádrem a dalším nukleonem, potenciálová jáma a bariéra

$$E_B = \frac{Z_1 Z_2}{A_1^{1/3} + A_2^{1/3}}$$

[MeV,
1 eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ J]



MODELY ATOMOVÉHO JÁDRA

REALITA



MODEL – 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...

Kapkový model jádra



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

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).

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

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

($r_0 = 1,4 \cdot 10^{-15}$ m, A je počet nukleonů)

$E_v \cong k A$ - 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

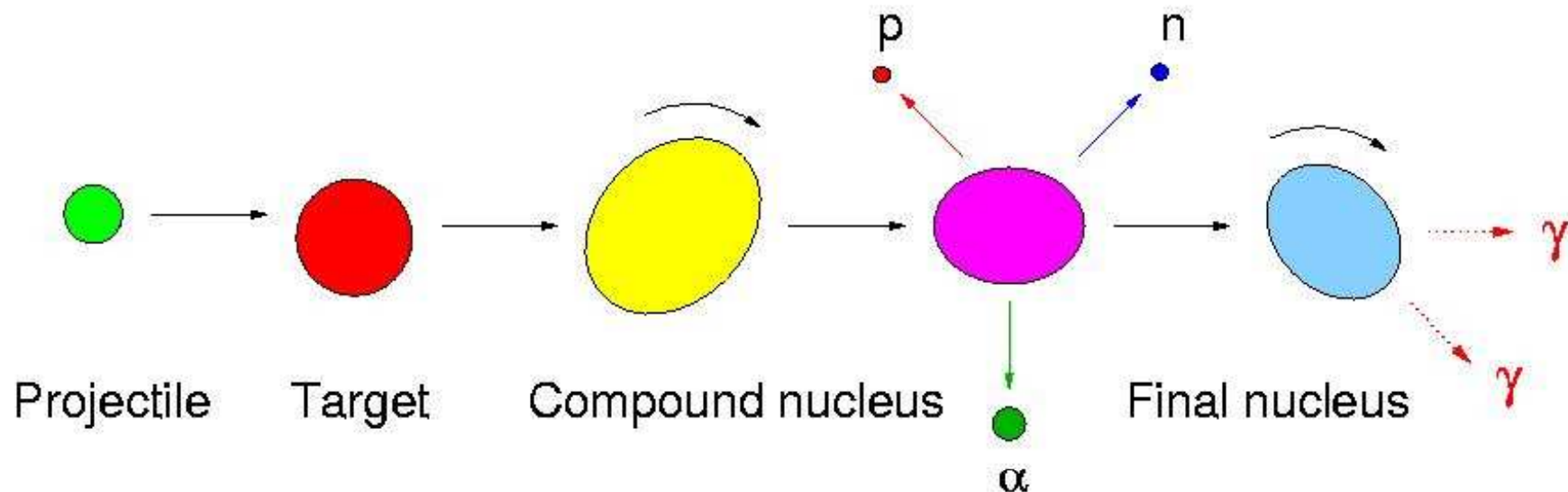
Statistický model

- uvažuje atomové jádro s celkovým počtem nukleonů A jako **plyn** složený z protonů a neutronů, 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.

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:

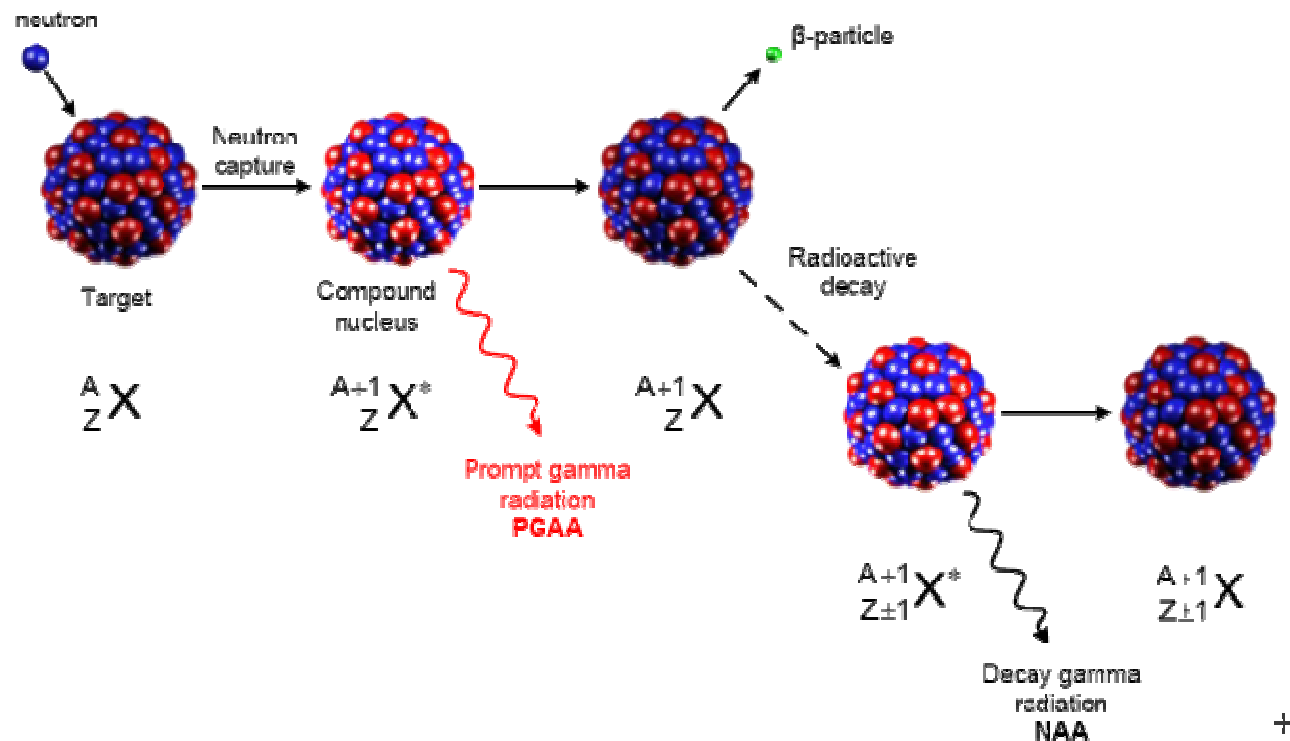


- nebo zkráceně $X(a,b)Y$ př. $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$,

- deexcitace N^* může proběhnout vyzářením kvanta γ :



- 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**.

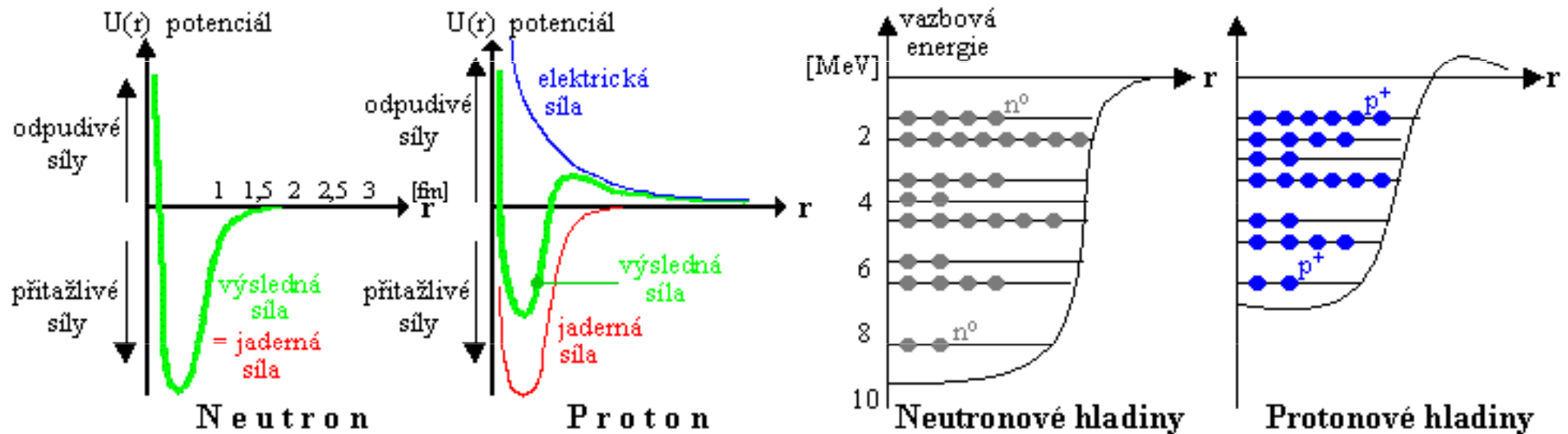


HLADINOVÝ MODEL JÁDRA

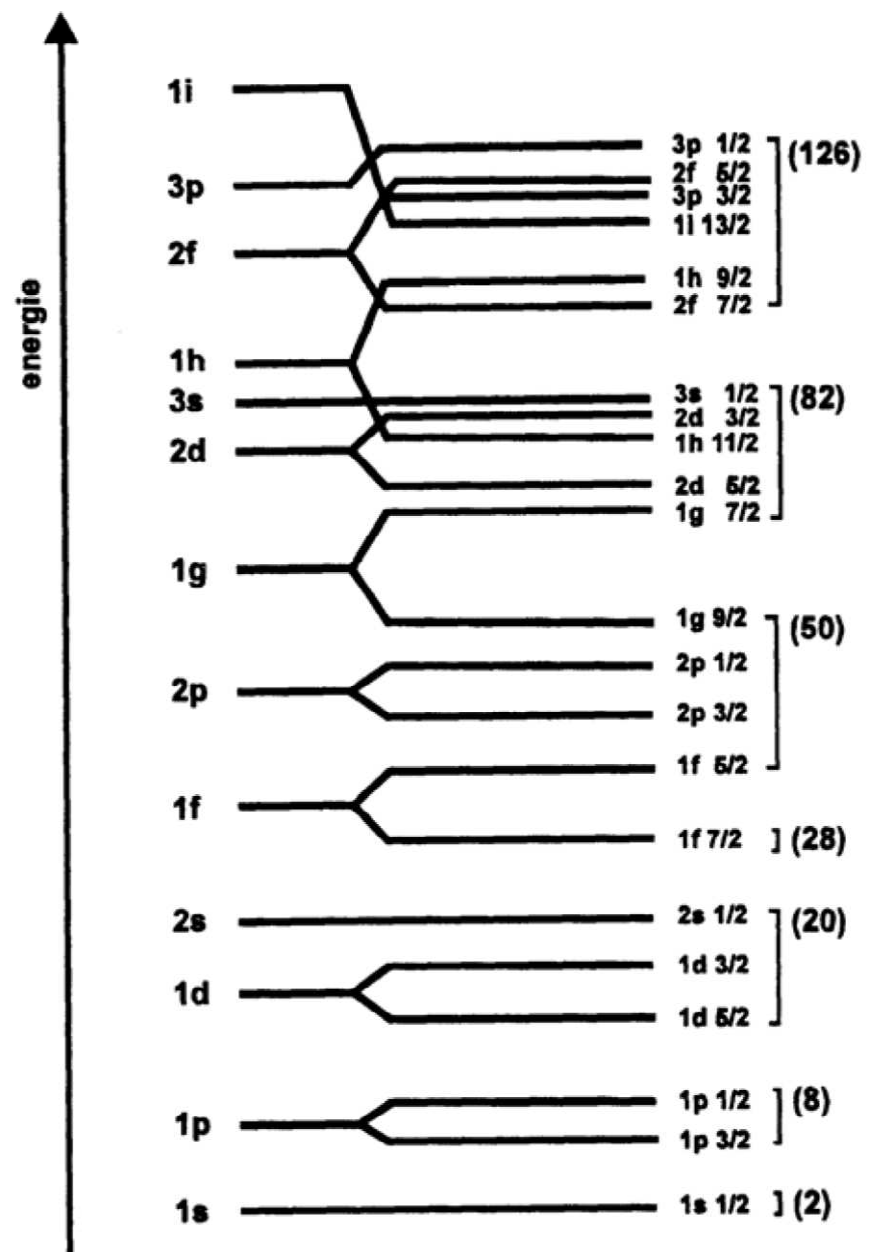
- n^0 a p^+ mají podobně jako e^- spin $\frac{1}{2}$
- Pokud se více částic se spinem $\frac{1}{2}$ pohybuje ve společném silovém poli, musí být **podle Pauliho principu každá částice v jiném kvantovém stavu**
- Podobně jako u uspořádání elektronů v jaderném obalu, stal se této princip podstatou tzv. **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

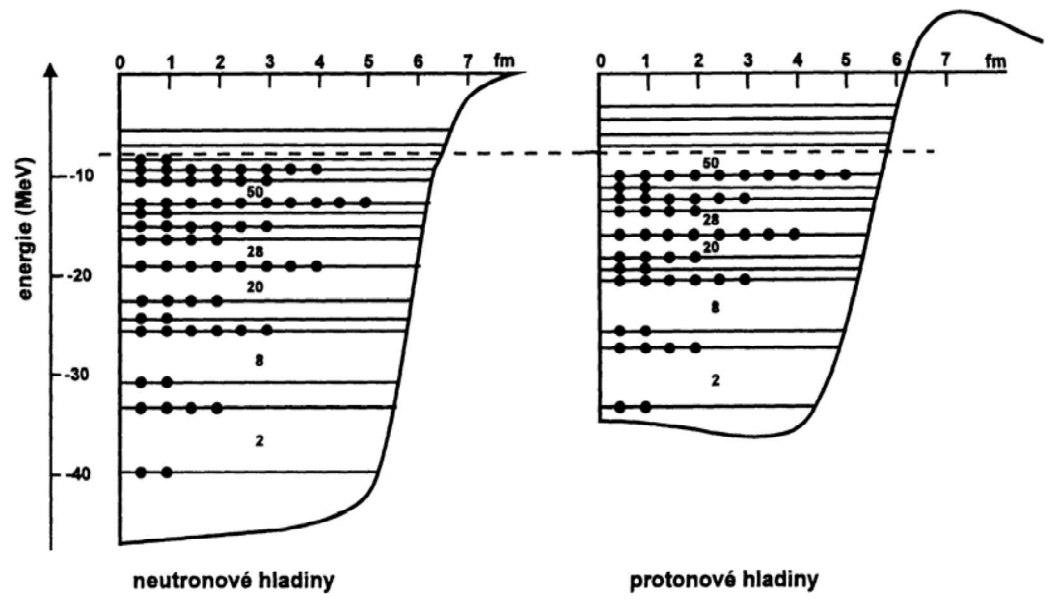
- p i n mají spin $1/2$ a ve společném (ale zvlášť p a n) silovém poli **platí Pauliho princip** - každá částice musí být v jiném kvantovém stavu (jako u e v obalu)
- vzniká tak soubor hladin (zvlášť pro p a n)



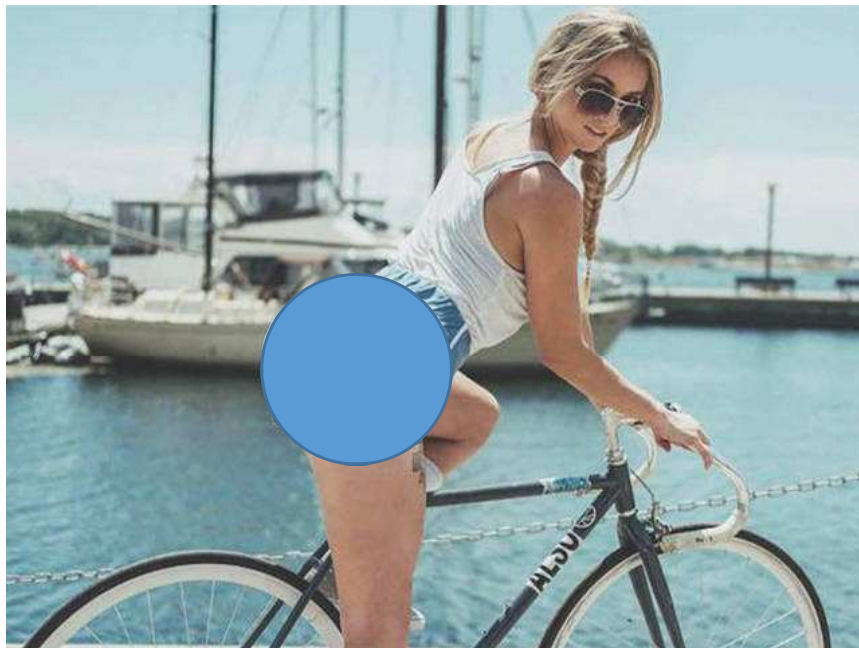
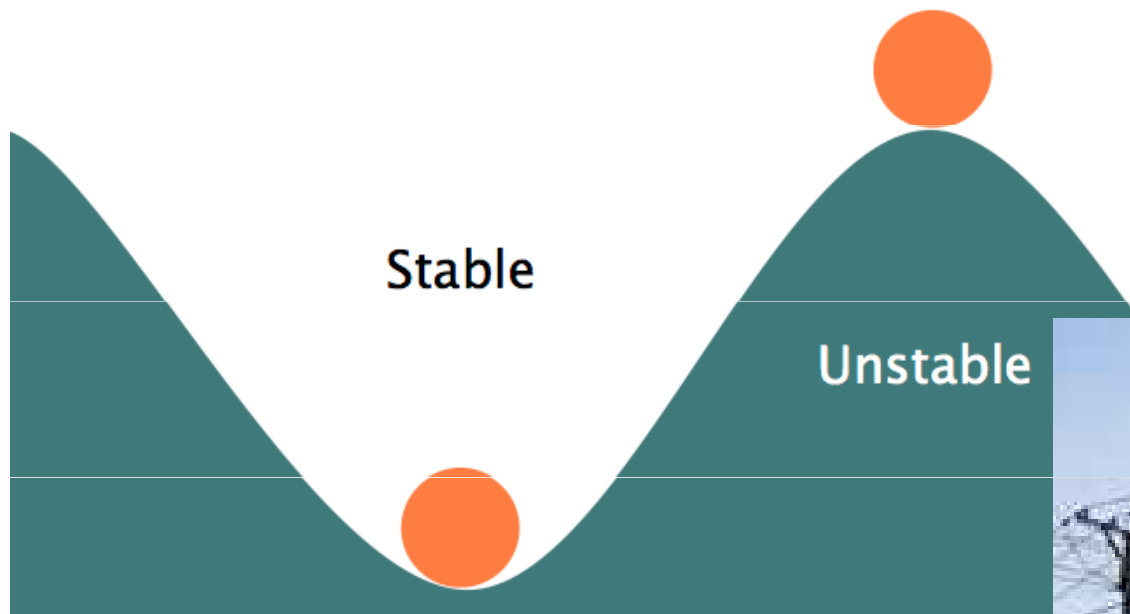
HLADINOVÝ MODEL JÁDRA



- Energetické hladiny v potenciálové jámě jádra:
- Pro p^+ a n^0 existují samostatné soustavy energetických hladin
- Hladiny p^+ jsou položeny výše než pro n^0 , protože odpuzivé coulombovské síly způsobují pokles vazebné energie p^+ v jádře



STABILITA JADER ATOMŮ



(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^+



- Jádra, která nejsou v energeticky stabilním stavu, však mají snahu určitou **rekombinací** protonových a neutronových stavů –
 - přeměnou protonů a neutronů,
 - emisí částic
 - či vyzářením kvant"přebytečné" energie, přejít do stavu energeticky stabilnějšího; dochází k radioaktivním přeměnám jader
- Aby mohla proběhnout taková přeměna jádra, musejí být splněny dvě základní podmínky:

HMOTNOST A VAZEBNA 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

$$\begin{aligned} \text{Rozdíl } \Delta m &= m(A,Z) - [Z \cdot m_p + (A-Z) \cdot m_n] \\ &= m(A,Z) - Z \cdot m_p - (A-Z) \cdot m_n \end{aligned}$$

...se nazývá hmotnostní úbytek (hmotnostní defekt), který má zápornou hodnotu, $\Delta m < 0$.



$$\begin{aligned} m_p &= 1.6726 \times 10^{-27} \text{ kg} \\ m_n &= 1.6750 \times 10^{-27} \text{ kg} \\ m_e &= 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg} \end{aligned}$$

$$m_u = 1,6605 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

atomová hmotnostní konstanta

- 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

HMOTNOST A VAZEBNÁ ENERGIE JÁDRA

- Střední vazebná energie na nukleon: $\epsilon = E_v/A$
- 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

$$[1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}]$$

- Δm se vyjadřuje v gramech nebo v atomových jednotkách hmotnosti (1/12 hmotnosti atomu uhlíku ^{12}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: $E = Q U = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \text{ V} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1 \text{ eV}$.

$$P = U \cdot I$$

$$I = Q / t$$

$$W = P \cdot T$$

$$\rightarrow W = U \cdot I \cdot t$$

$$= U \cdot (Q/t) \cdot t$$

$$= U \cdot Q [\text{MeV}]$$

Hmotnostní deficit (defekt) Δm

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

Hmotnost atomu ^{12}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}C

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

$$m_J = Z m_p + N m_n - \Delta m$$

$$\Delta m = Z m_p + N m_n - m_J$$

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

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

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

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

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

ZAJÍMAVOSTI: VAZEBNÁ ENERGIE JÁDRA

- Při vzniku 12 g ^{12}C 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_2He je $\Delta_m = 5,000618 \cdot 10^{-29} \text{ kg} \rightarrow E_v = 4,5 \cdot 10^{-12} \text{ J/atom}$ (7 MeV nukleon) = $2,71 \cdot 10^{12} \text{ J/mol}$
- Toto množství tepla ohřeje **6500 tun** vody z 0°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⁻¹

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

MĚRNÁ TEPELNÁ KAPACITA VODY

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

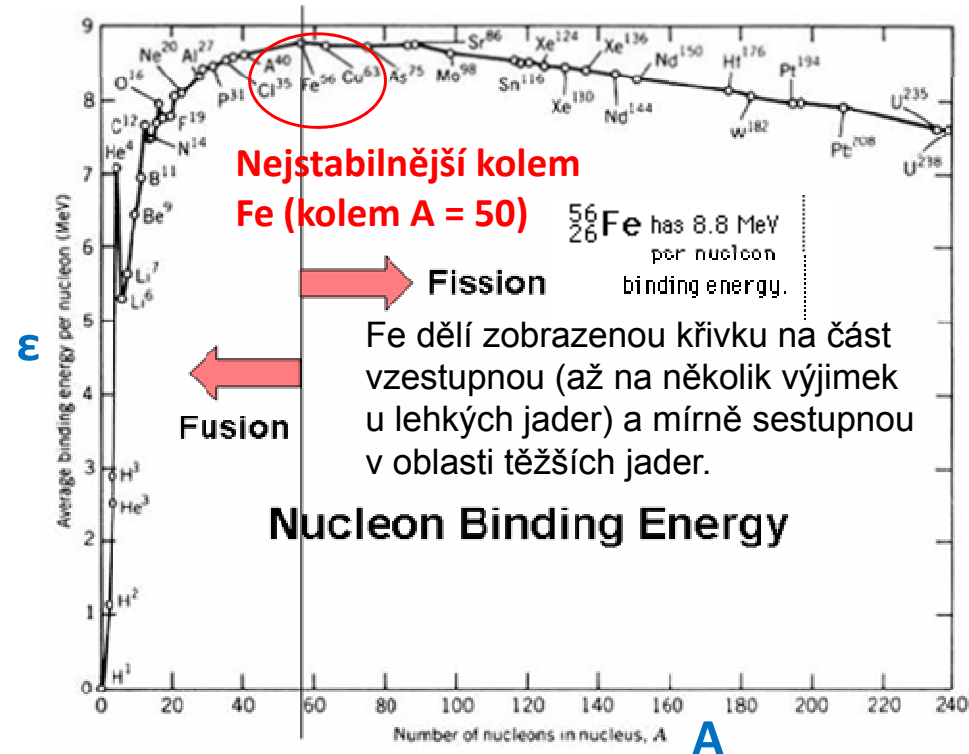
K ohřátí 1l vody o 1°C je potřeba přibližně 4200 Joulů.

HMOTNOST A VAZEBNÁ ENERGIE JÁDRA

- Vazebná energie jádra vztažená na jeden nukleon

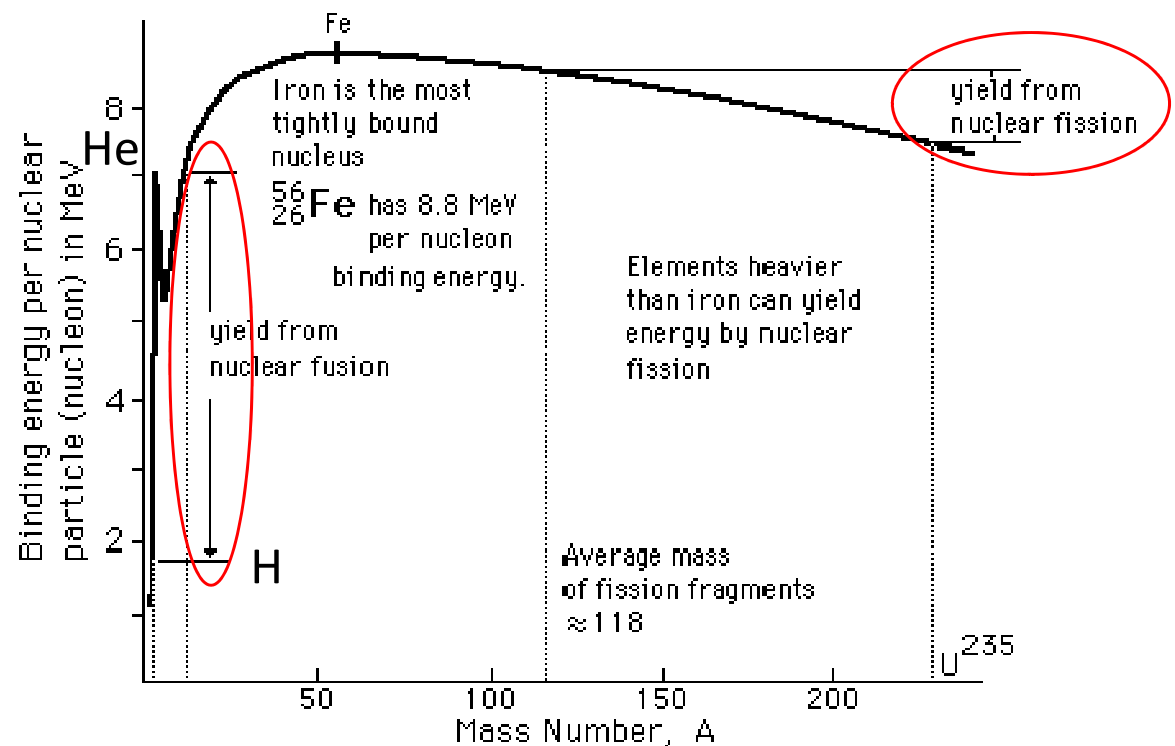
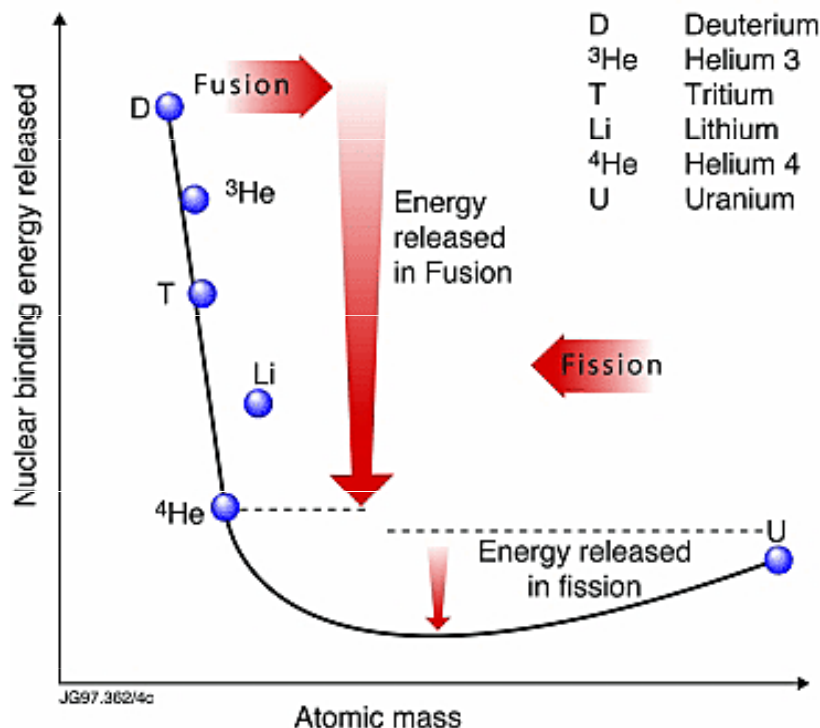
$$\epsilon = E_v / A$$

- se dá chápat jako energie potřebná k uvolnění nukleonu z jádra.
- Obecně je excitační E jádra o 5 – 6 řádů než excitační energie e- ve valenční sféře atomů nebo molekul
- Vazbová energie na jeden nukleon (ϵ) zpočátku rychle roste v závislosti na Z, největší je pro jádra kolem železa, pak zase mírně klesá
- ϵ souvisí jednak se **stabilitou "vnější"** (při dodání energie jádru zvenčí - rozptylem částic ostřelujících jádro), jednak s **"vnitřní" stabilitou** 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

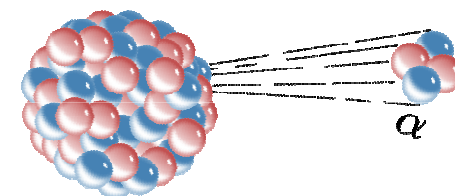
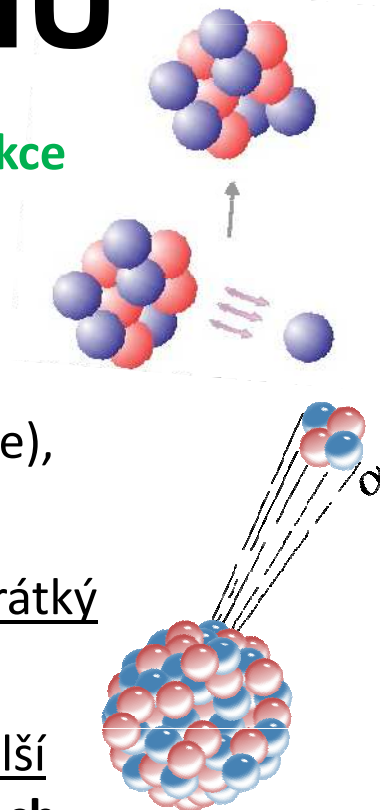


Situaci si lze představit jako příkop: nejstabilnější jádra na jeho dně, na stěnách postupně roste nestability.

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.

STABILITA JADER ATOMŮ

- **1. Příliš velká jádra:** **nedostatečný dosah silné jaderné interakce**
→ nestačí dostatečně silně vázat jádro → emise nukleonů – **α -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 T_m (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_2He** → ^4_2He mohou být emitovány z těžkých jader jakožto **částice alfa** (opět při splnění energetické podmínky).




Radioaktivní prvky

Radioactive Elements

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

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



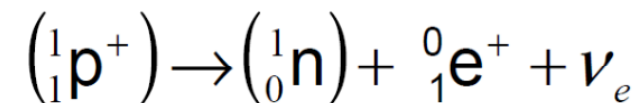
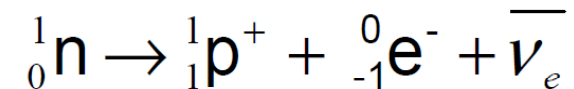
H																	He									
Li	Be															B	C	N	O	F	Ne					
Na	Mg															Al	Si	P	S	Cl	Ar					
K	Ca															Ga	Ge	As	Se	Br	Kr					
Rb	Sr	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	In	Sn	Sb	Te	I	Xe					
Cs	Ba	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn					
Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	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 β^-** (přebytek n^0) nebo **rozpadu β^+** (přebytek p^+).

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



Pro $Z < 92$ platí empirický vztah

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

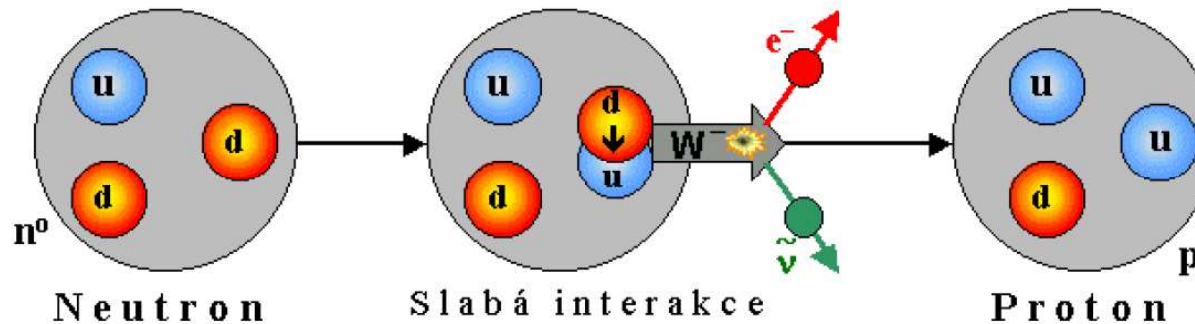
3. Jádra s nadbytkem energie

- Zbavení se energie vyzářením **fotonů γ**

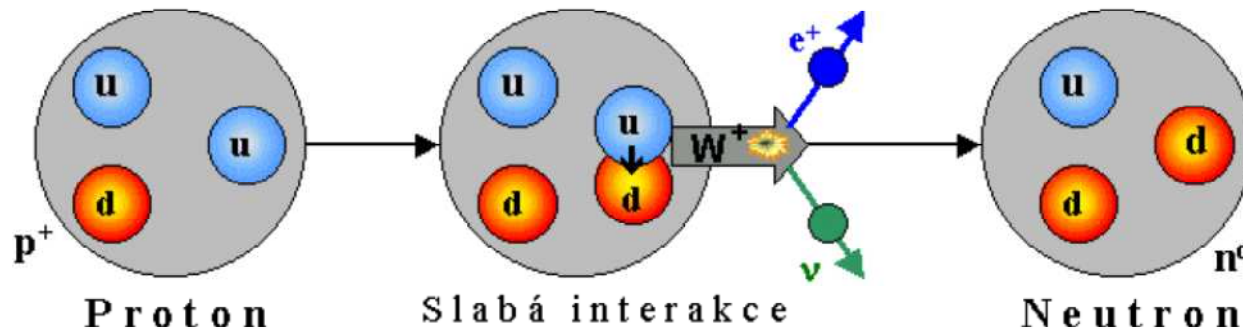
STABILITA JADER ATOMŮ

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

Beta⁻ - rozpad neutronu : $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}$



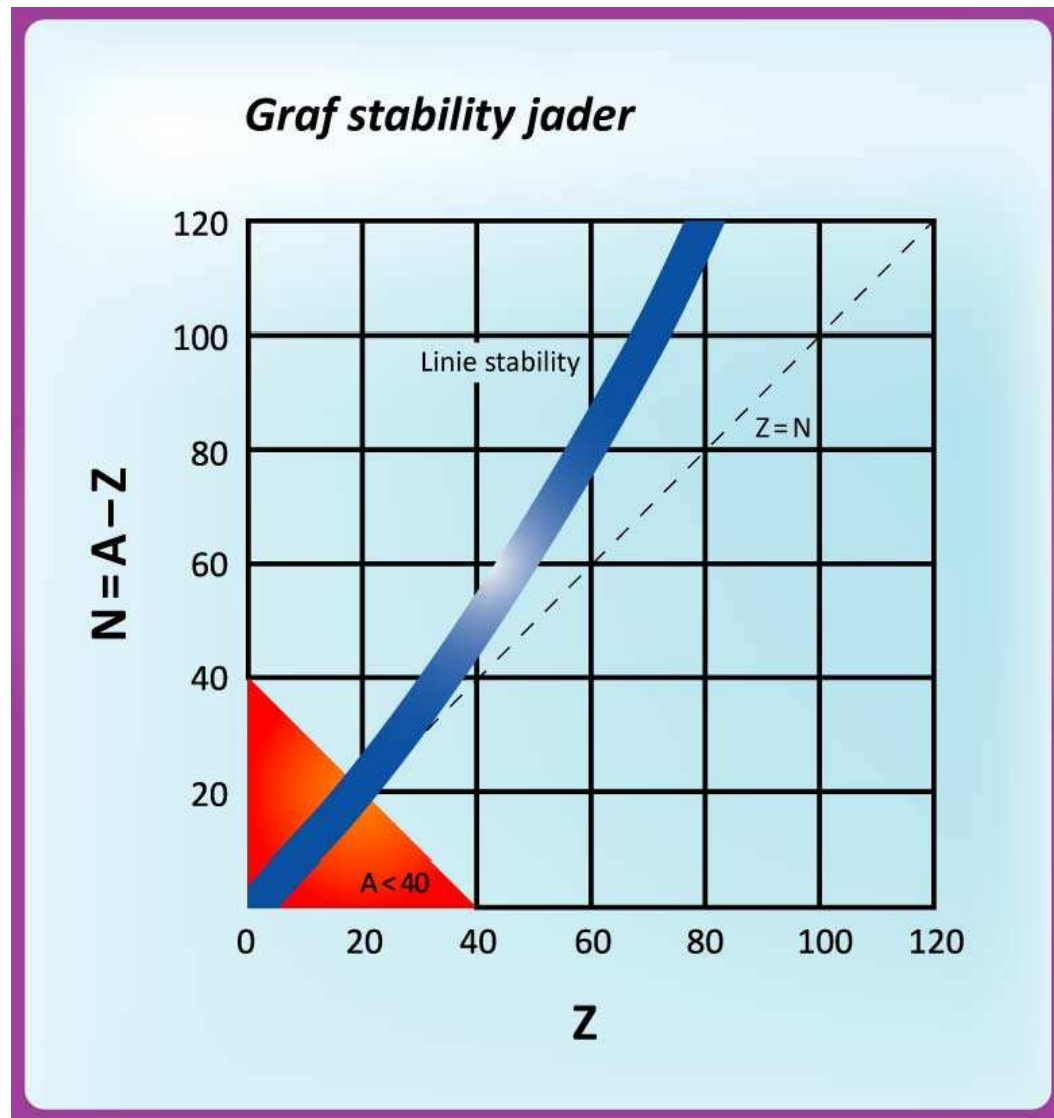
Beta⁺ - přeměna protonu : $p^+ \rightarrow n^0 + e^+ + \nu$



STABILITA JADER ATOMŮ

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

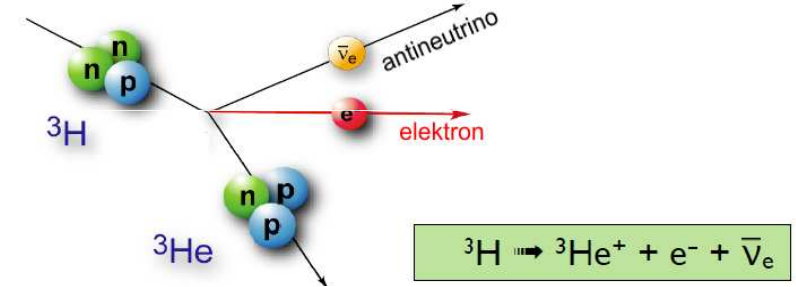
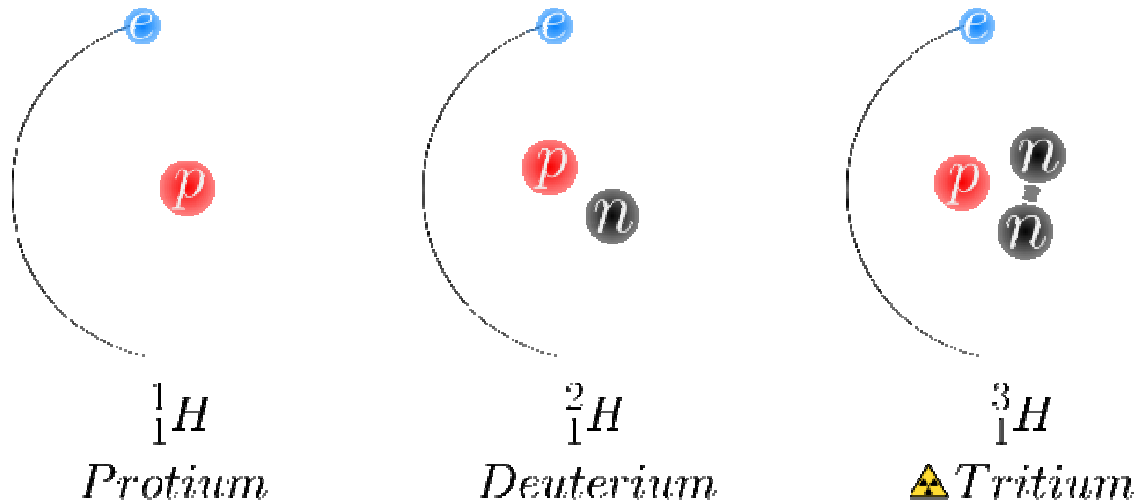
- nejstabilnější jádra mají **$p^+ = n^0$** , tzn. jsou **symetrická** (lze objasnit pomocí slupkového modelu jádra – je energeticky výhodné zasplnit stejný energetický stav protonem a pak i neutronem).



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)

Die Isotope von Wasserstoff



- 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 β^- s poločasem 12,36 let na hélium 3).

STABLE ATOMS

Carbon 12



6 Protons
6 Neutrons

Carbon 13



6 Protons
7 Neutrons

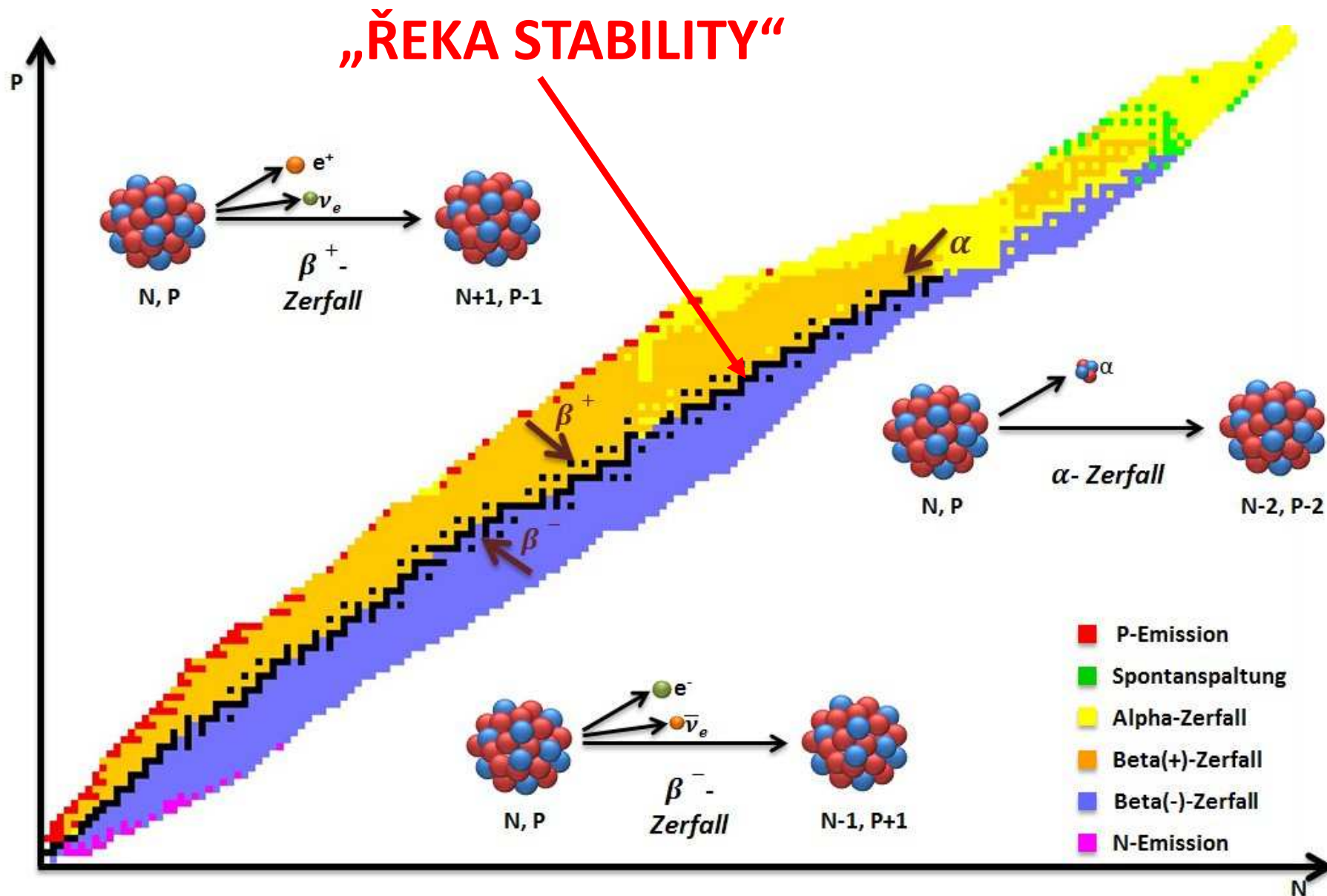
UNSTABLE ATOM

Carbon 14



6 Protons
8 Neutrons

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



Totéž v jiných barvách

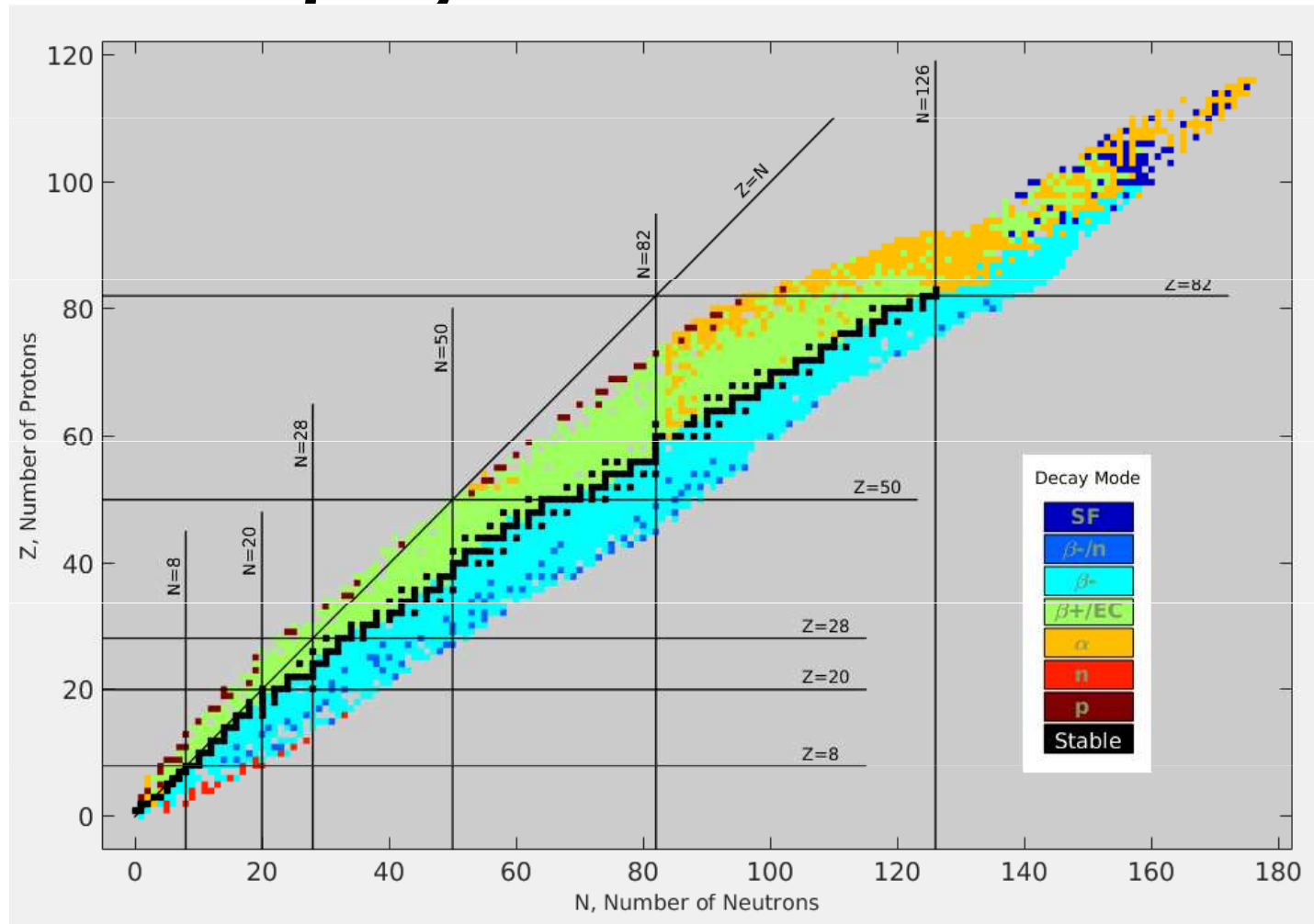


Chart of nuclides by type of decay. Black squares are stable nuclides. Nuclides with excessive neutrons or protons are unstable to β^- (light blue) or β^+ (green) decay, respectively. At high atomic number, alpha emission (orange) or spontaneous fission (dark blue) become common decay modes.

Nuklidy podle vazebné energie

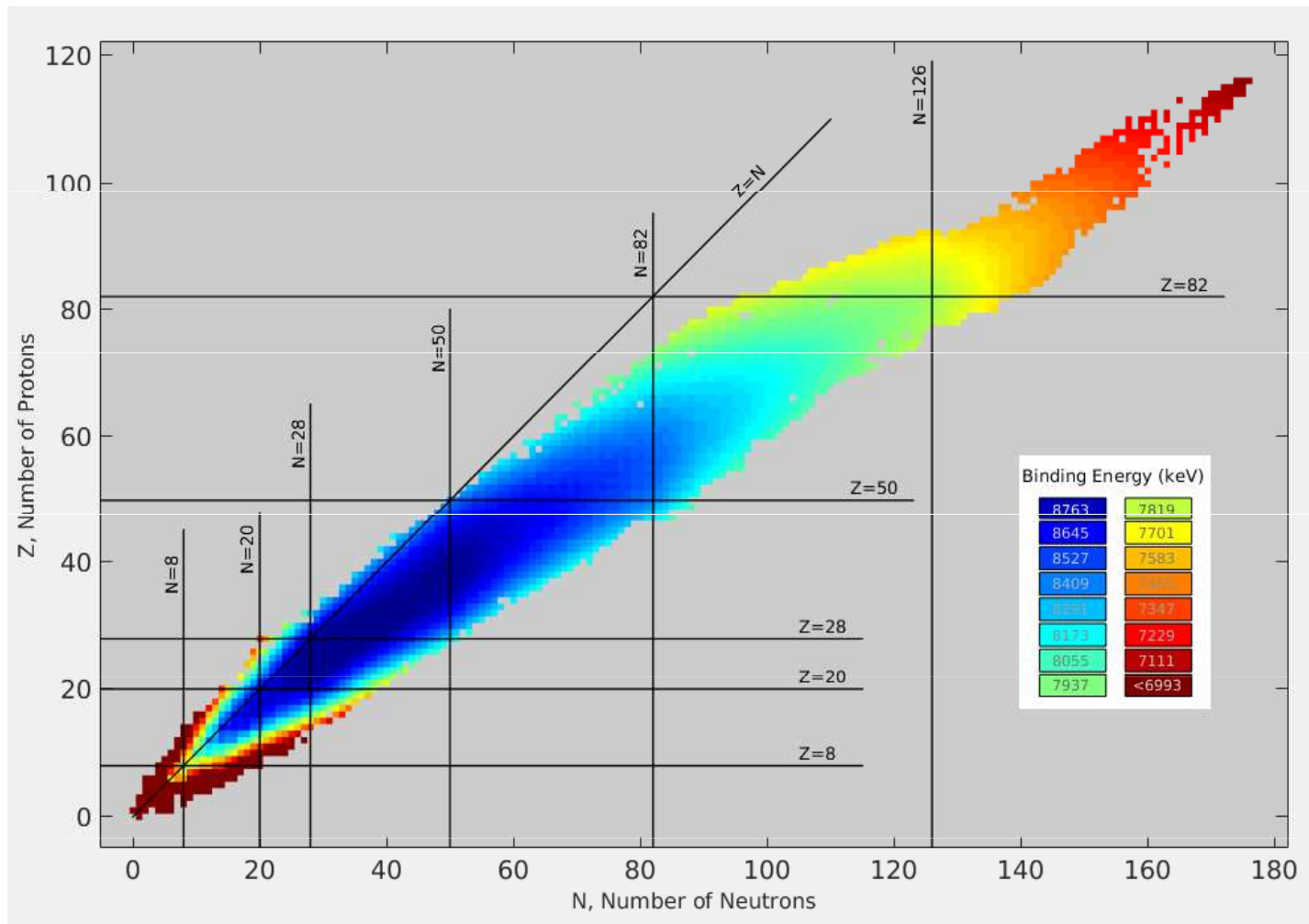
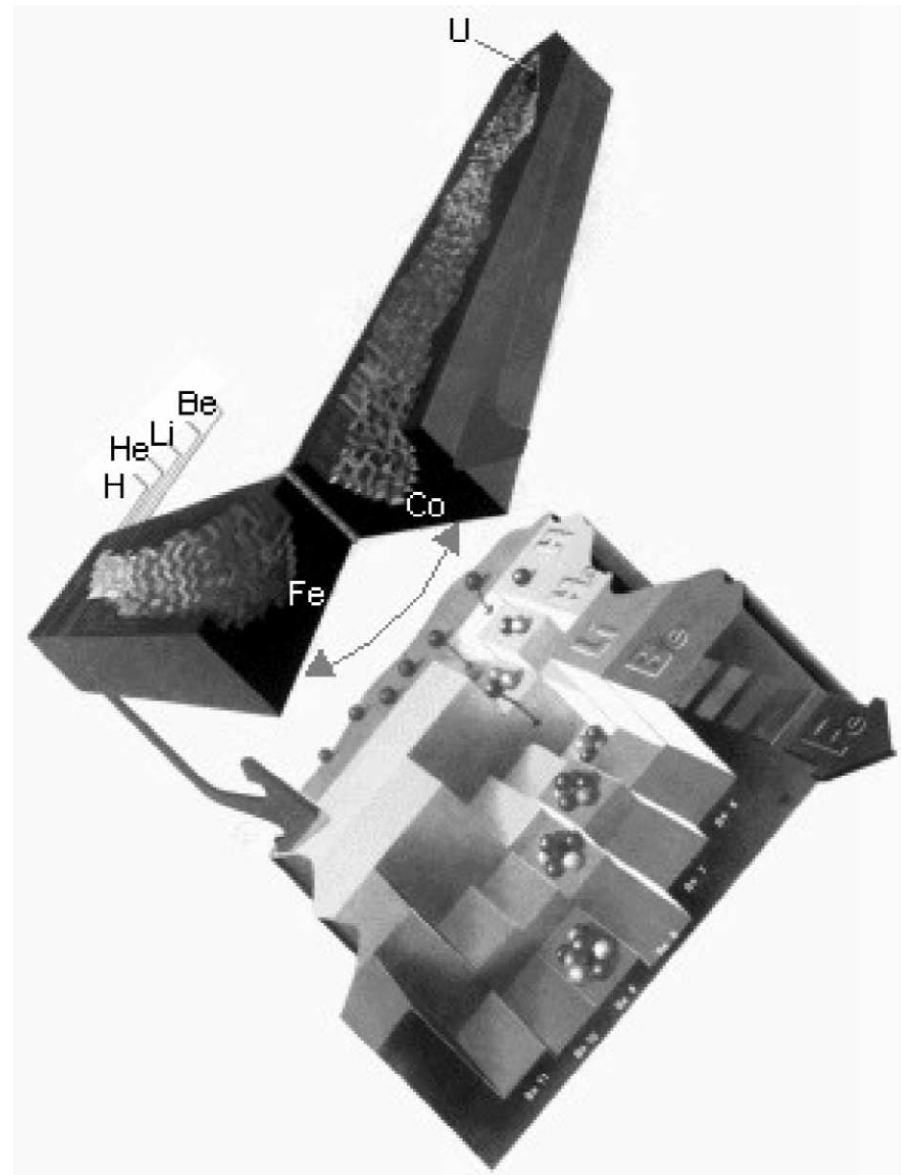
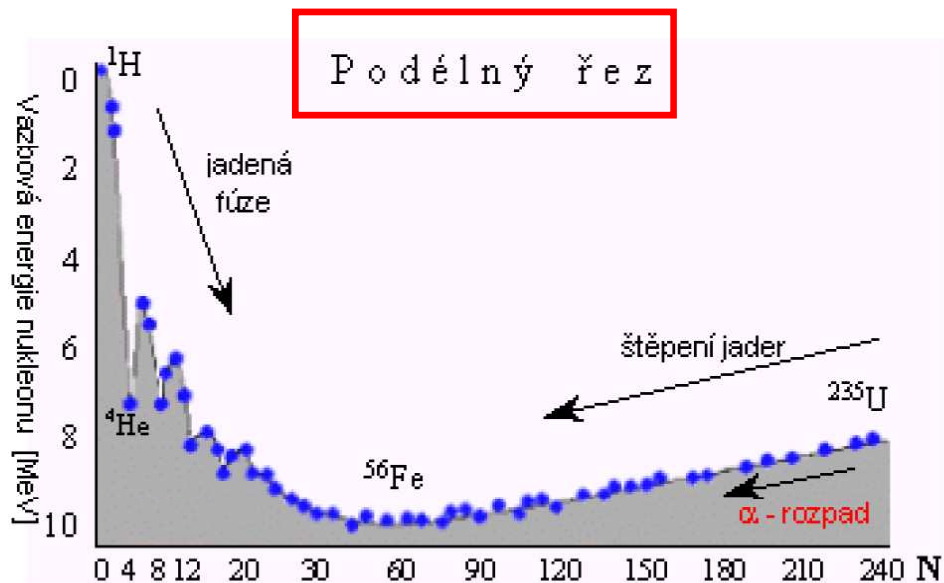
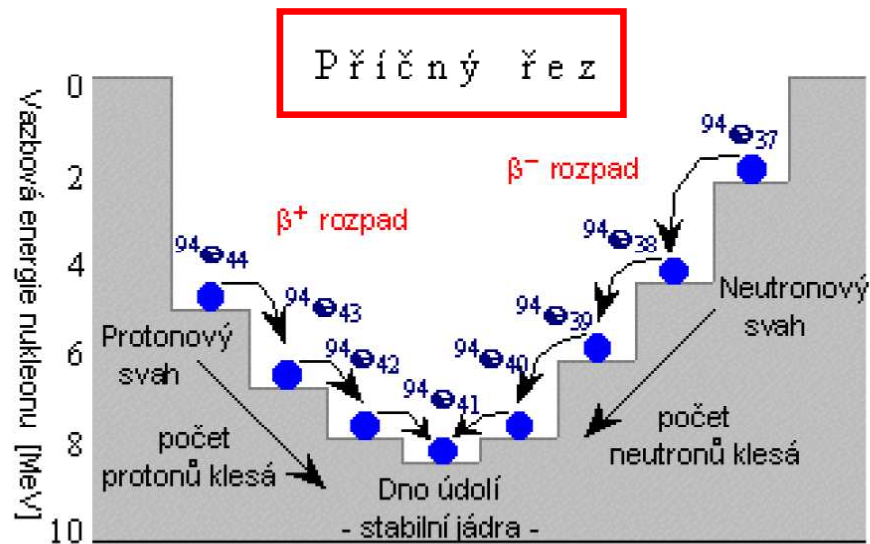


Chart of nuclides (isotopes) by binding energy, depicting the valley of stability. The diagonal line corresponds to equal numbers of neutrons and protons. Dark blue squares represent nuclides with the greatest binding energy, hence they correspond to the most stable nuclides. The binding energy is greatest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

„Řeka stability“

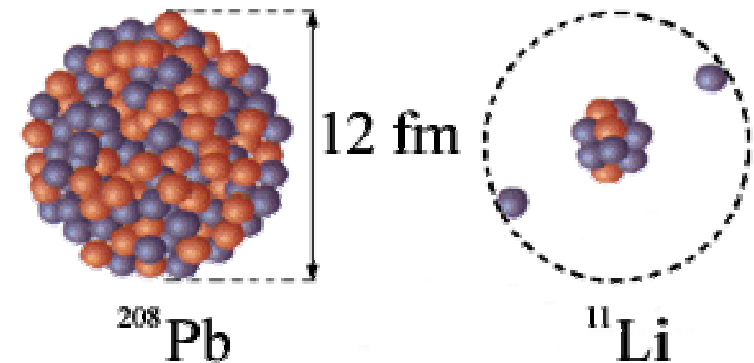
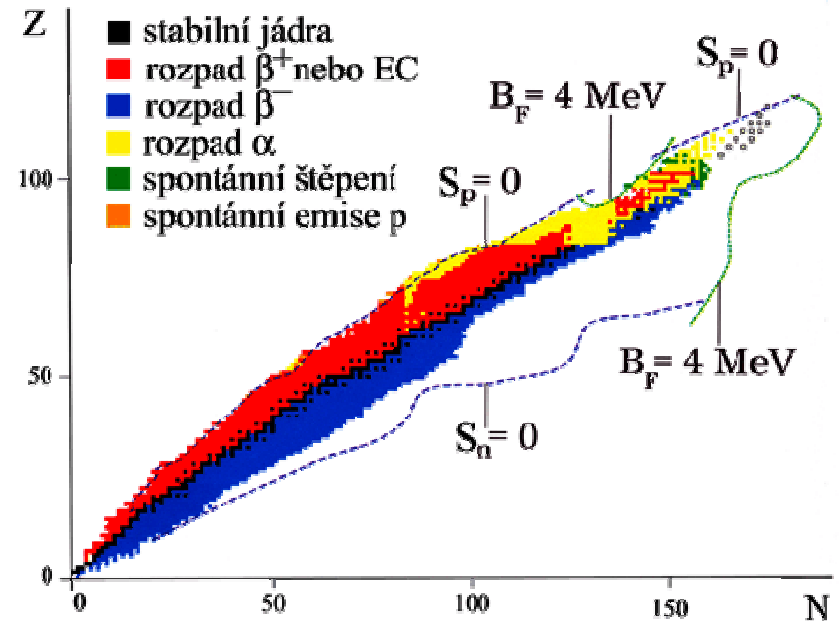


Trojrozměrná mapa včetně vazbových energií.

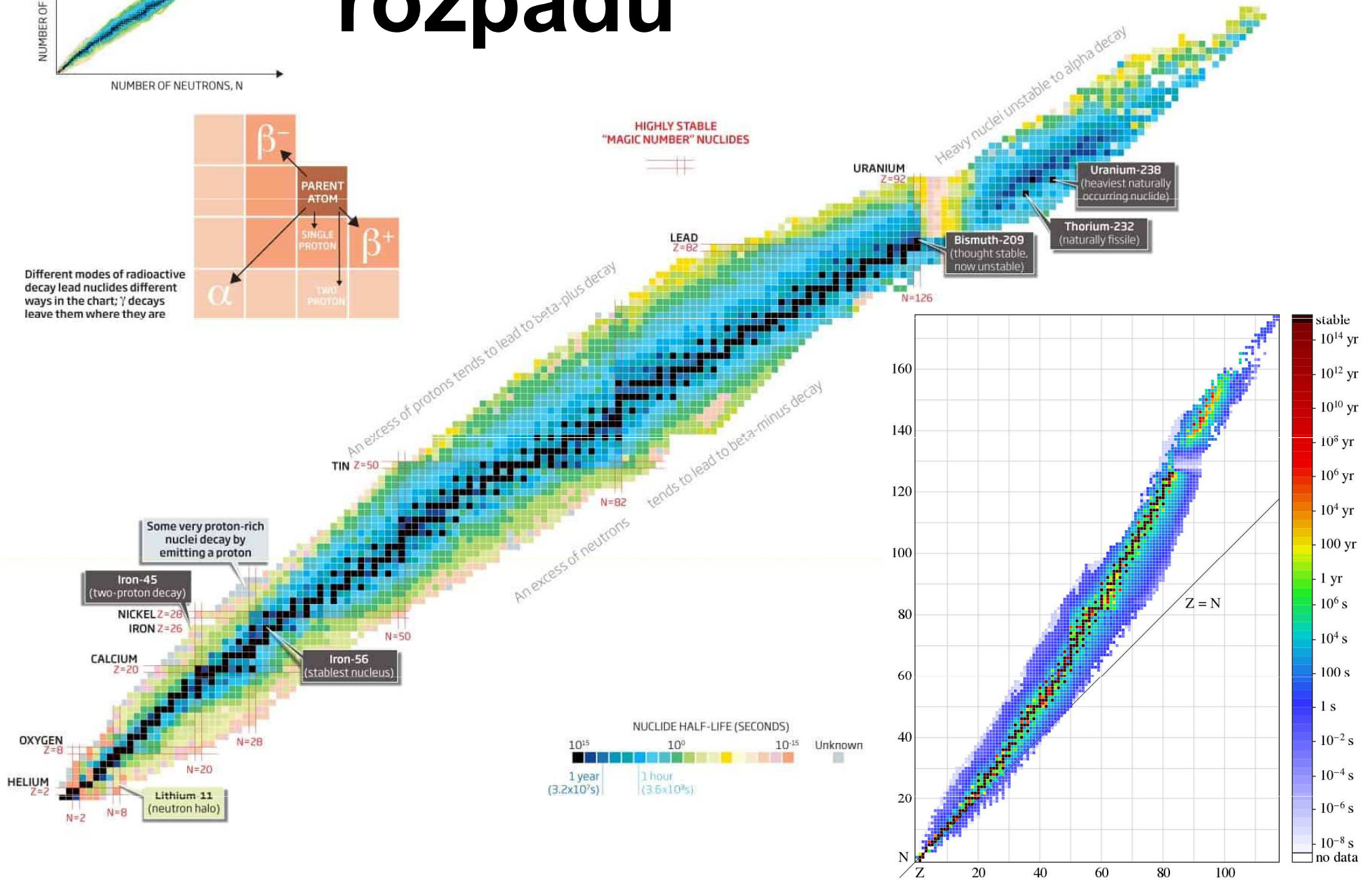
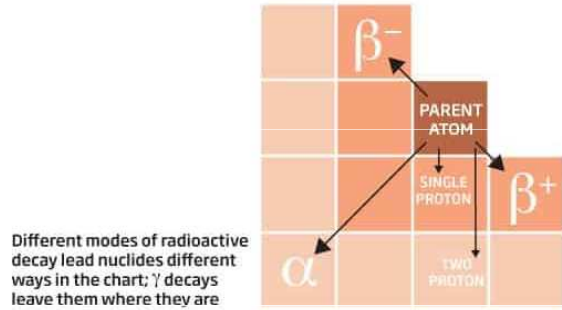
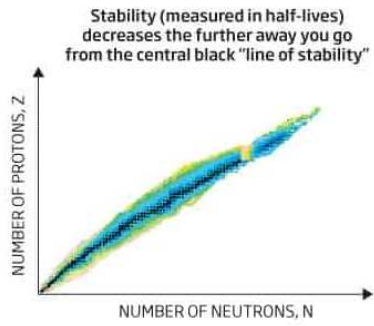
Tendence k samovolným radioaktivním přeměnám všech známých atomových jader (nuklidů)

Pokud u všech existujících izotopů známých prvků zaznamenejme jejich polohy do grafu protonové číslo (Z) versus počet neutronů (N), dostaneme obr. vlevo. Je to pohled na údolí stability shora. Černá pole označují stabilní izotopy tvořící jeho dno. Ostatní jadra jsou radioaktivní. Údolí je ohraničeno několika liniemi, které vymezují limity existence jader jako vázaných systémů. **Zelená čára je mezí stability vůči spontánnímu rozštěpení.** Jadra za touto hranicí se vlivem coulombického odpuzování protonů okamžitě rozštěpí a nevytvoří ani vázaný stav.

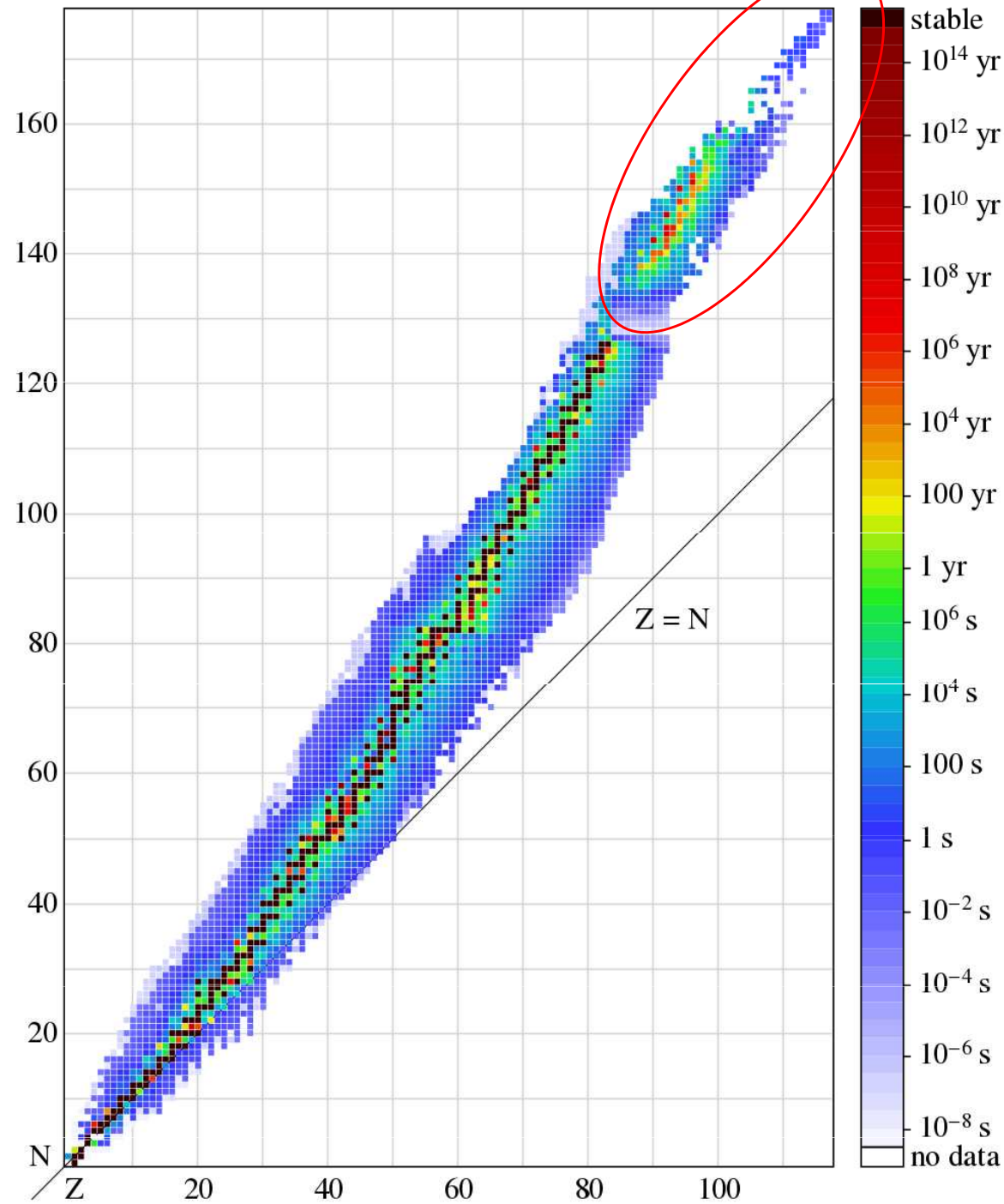
Linie s označením $S_n = 0$ a $S_p = 0$. Určují, u kterých izotopů je energie potřebná na odebrání neutronu, respektive protonu nulová. Tyto linie se proto nazývají liniemi přesycenosti (drip line) a právě poblíž nich se u lehkých prvků setkáváme s haló jádry.



N vs. Z a poločas rozpadu



Zde se již
nevyskytu
jí stabilní
jádra
?
Ostrůvky
stability?



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	21 Sc 44.955912	22 Ti 47.867	23 V 50.9415	24 Cr 51.9961	25 Mn 54.938045	26 Fe 55.845	27 Co 58.933195	28 Ni 58.6934	29 Cu 63.546	30 Zn 65.38	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 95.94	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 192.225	78 Pt 195.084	79 Au 196.966569	80 Hg 200.59	81 Tl 204.3833	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98040	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 [286]
Lanthanides		57 La 138.90547	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 168.930421	70 Yb 173.054	71 Lu 174.9668	
Actinides		89 Ac [227]	90 Th 232.0375	91 Pa 231.03688	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]	

V případě isotopu ^{209}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)

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



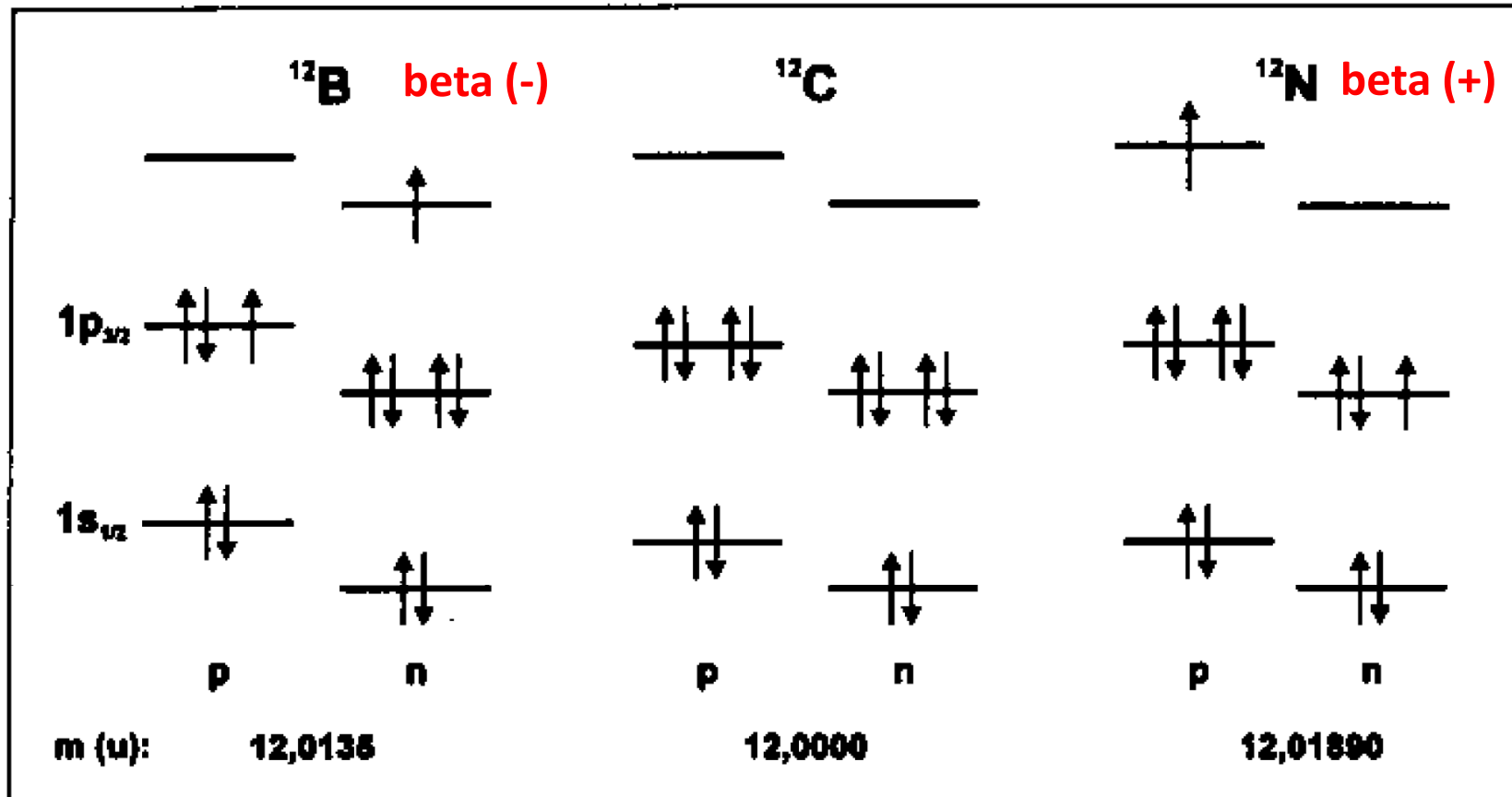
- Jde o tzv. **magická čísla**, tato jádra jsou velmi stabilní (protože mezi slupkami jsou značné energetické mezery, jsou tato jádra stabilizována analogicky jako atomy s elektronovou konfigurací vzácných plynů).

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. $^{100}_{50}\text{Sn}$ je velmi nestálý, kvůli nedostatku n^0 ($T_{1/2} = \text{cca. } 1 \text{ s}$),
- $^{10}_2\text{He}$ je zase velmi nestabilní kvůli nadbytku n^0 .



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



Obrázek 9: Souvislost nestability jádra vůči přeměnám β s nukleonovou konfigurací.

Stabilita jader

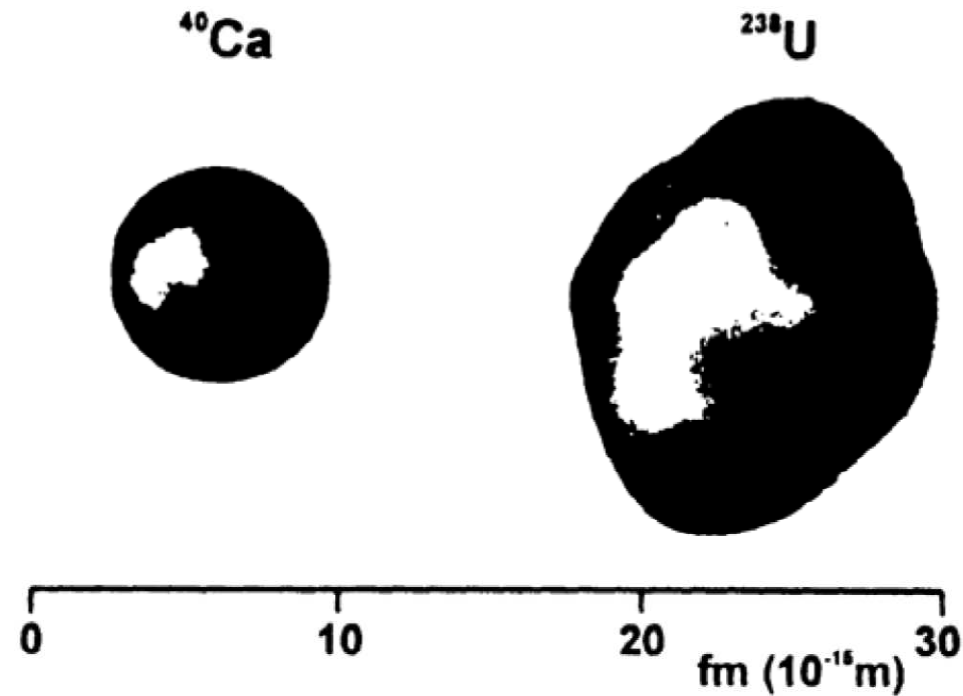
- Závislá na vazebné energii, vztažené na jeden nukleon (nejvyšší pro $Z = 14 - 50$)
- Významný poměr N/Z (pro většinu nuklidů $N/Z = 1,0 - 1,6$)
- Rozdíly v závislosti na tom, zda jsou N a Z sudá či lichá čísla

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

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

Tvar jádra

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



ALE... i magická jádra mohou být nestabilní

Např. dvojitě magické jádro $^{100}_{50}\text{Sn}$ je velmi nestabilní pro relativní nedostatek neutronů.

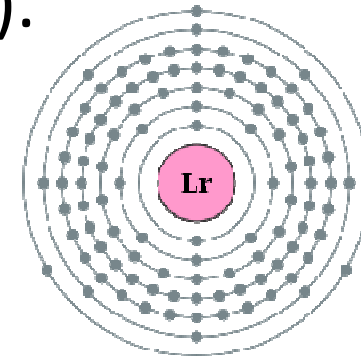
HLADINOVÝ MODEL JÁDRA

- 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 → vyzáření záření gama (pro srovnání – rozdíl mezi orbitaly – eV → viditelné světlo a UV; zde $10^3 - 10^6$ eV)
- 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 isotopů, z nichž jen některé jsou stabilní, ale většina je radioaktivních.
- **Posledními stabilními jádry jsou olovo $^{208}\text{Pb}_{82}$ (a prakticky i bizmut $^{209}\text{Bi}_{83}$) všechna těžší jádra jsou již radioaktivní –**
- **Oblast jader uranových ($^{235,238}\text{U}_{92}$ a další isotopy)**
- **a transuranových (plutonium, americiu, kalifornium, einsteinium, fermium, mendělejevium ...).**



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

1	1										18							
1	H 1											He 2						
2	Li 3	⁹ Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	¹⁹ F 9	Ne 10
3	²³ Na 11	Mg 12											²⁷ Al 13	Si 14	³¹ P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
4	K 19	Ca 20	⁴⁵ Sc 21	Ti 22	⁵¹ V 23	Cr 24	⁵⁵ Mn 25	Fe 26	⁵⁹ Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	⁷⁵ As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
5	⁸⁵ Rb 37	Sr 38	⁸⁹ Y 39	Zr 40	⁹³ Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	¹⁰¹ Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	¹¹⁵ In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	¹²⁷ I 53	Xe 54
6	¹³³ Cs 55	Ba 56	*	Hf 72	Ta 73	W 74	¹⁸⁷ Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	¹⁹⁷ Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	²⁰⁹ 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	¹³⁹ La 57	Ce 58	¹⁴¹ Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	¹⁵² Eu 63	Gd 64	¹⁵⁹ Tb 65	Dy 66	¹⁶³ Ho 67	Er 68	¹⁶⁹ Tm 69	Yb 70	¹⁷⁵ Lu 71
** actinoids	Ac 89	²³² Th 90	²³¹ Pa 91	U 92	Np 93	²⁴⁴ Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103

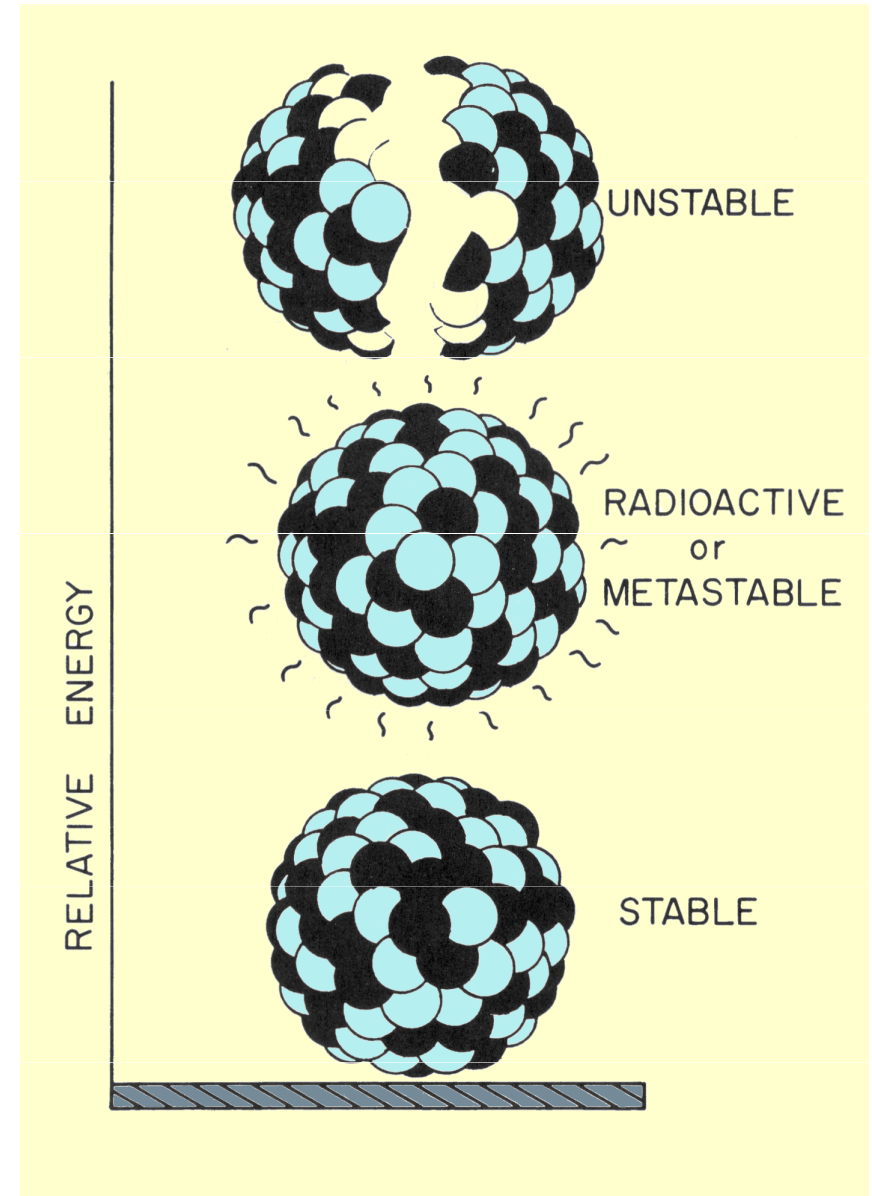
- Polyisotopic
- Monoisotopic (mass number shown) with natural radionuclides
- Monoisotopic and mononuclidic (mass number shown)
- Mononuclidic radioactive (mass number of the only natural radionuclide shown)
- Other radioactive

Natural radionuclides:

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

STABILITA NUKLIDŮ - shrnutí

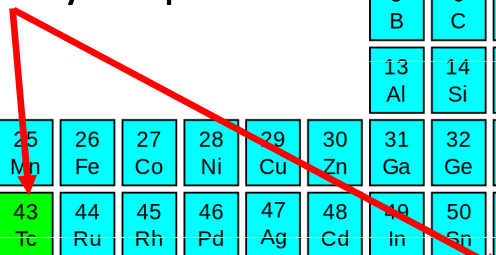
- V současné době je známo více než **2600** druhů různých jader, lišících se od sebe počtem protonů nebo neutronů.
 - z toho **stabilních** jader je si **270**,
 - ostatní jádra jsou **radioaktivní**.
- V pozemské přírodě se vyskytuje **340** nuklidů –
 - **270** stabilních
 - a **70** radioaktivních.



Group

Period	I	II																	III	IV	V	VI	VII	VIII										
1	1 H																								2 He									
2	3 Li	4 Be																	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne										
3	11 Na	12 Mg																	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar										
4	19 K	20 Ca																	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr																	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn		
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo		

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.

Přirozené radioaktivní prvky s dlouhým T1/2

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

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

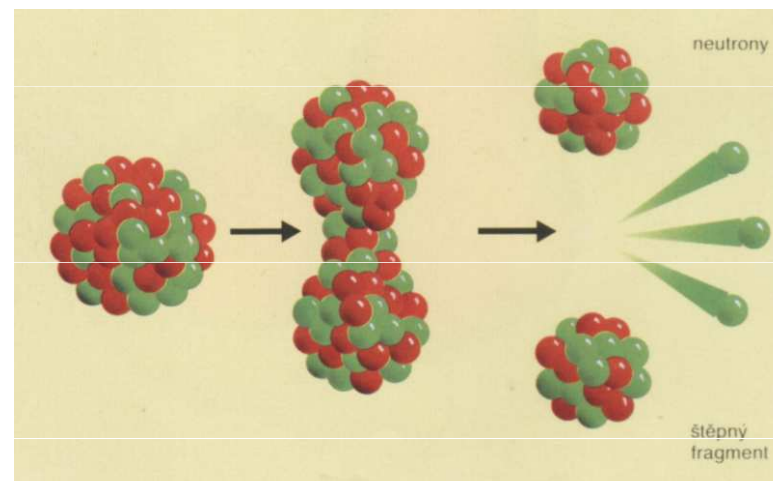
RADIOAKTIVNÍ ROZPAD

PŘIROZENÁ RADIOAKTIVITA

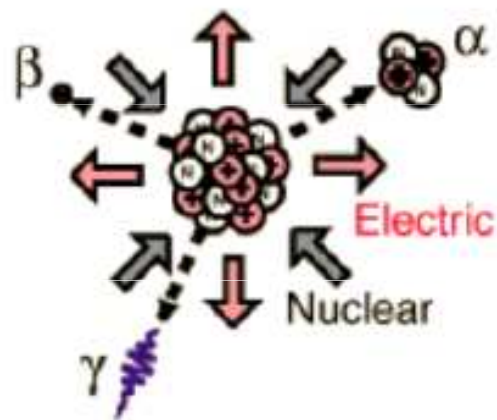
objev r. 1896 **Henri Becquerel**

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 α , β , γ

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

- **Skupiny radioaktivních přeměn:**
- **1.mění se Z** při konstantním A (β^- , β^+ , EZ)
- **2.mění se Z i A** (α , emise nukleonů, emise těžších jader ^{14}C , ^{24}Ne , samovolné štěpení)
- **3.deexcitace jádra** (γ emise okamžitá či zpožděna, vnitřní konverze)

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

Základní typy přeměn

Typ přeměny	Reakce	Popis přeměny
Přeměna α	${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2\text{He}$	Z jádra je emitována částice složená ze dvou protonů a dvou neutronů – částice α
Přeměna β^-	${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + {}^0_{-1}e + \bar{\nu}$	Z jádra je emitována částice β^- a antineutrino.
Přeměna β^+	${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + {}^0_{+1}e + \nu$	Z jádra je emitována částice β^+ 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

Základní typy přeměn, pokrač.

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 jádra jsou emitovány těžké částice
Přeměna γ	${}^A_ZX^* \rightarrow {}^A_ZX + \gamma$	Excitované jádro okamžitě přechází do základního stavu emisí fotonů záření gama
Izomerický přechod	${}^{Am}_ZX \rightarrow {}^A_ZX + \gamma$	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

Tabulka 4.1 Zastoupení jednotlivých typů jaderných přeměn

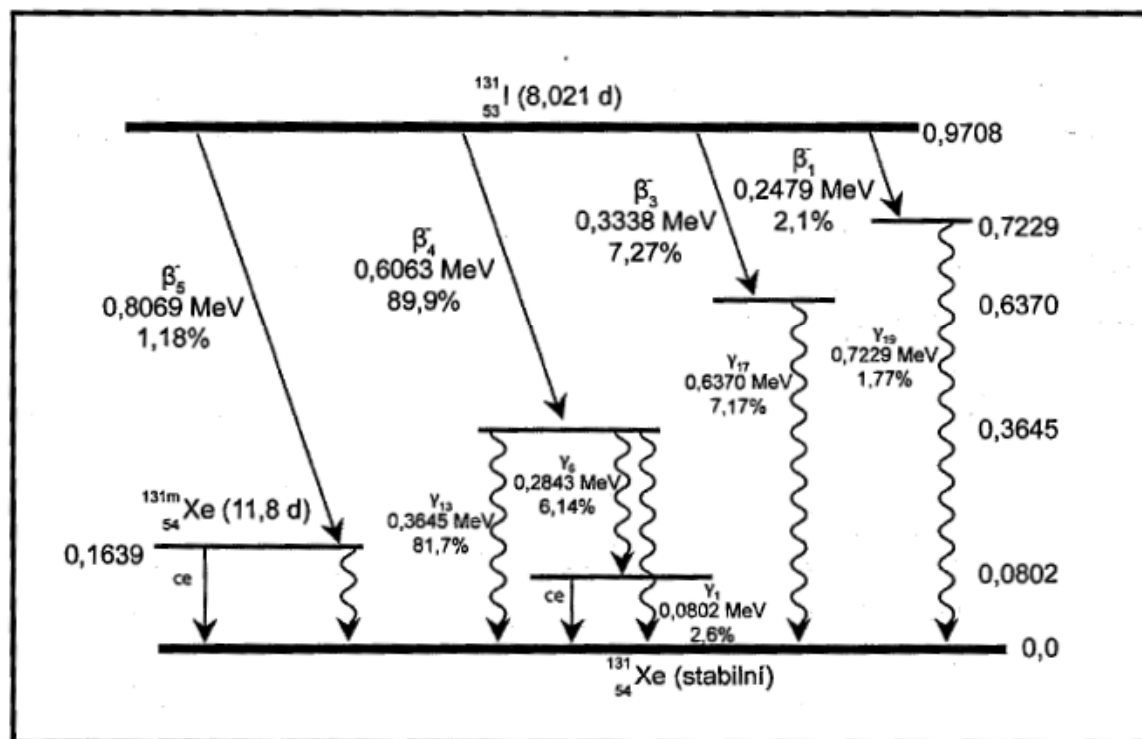
	Základní stav	Metastabilní stav	Σ
Stabilní jádra	214	0	214
alfa	424	80	504
beta-	1174	131	1305
ec/beta+	1044	214	1258
IT	--	334	334
n	28	--	28
SF	38	2	40
p	81	4	85
CE	112	4	116
Celkem	3115	769	3884

- **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.

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

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 β^- , γ , 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}I

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 α ,
- částice β (β^- , β^+),
- neutrony,
- fotony γ .

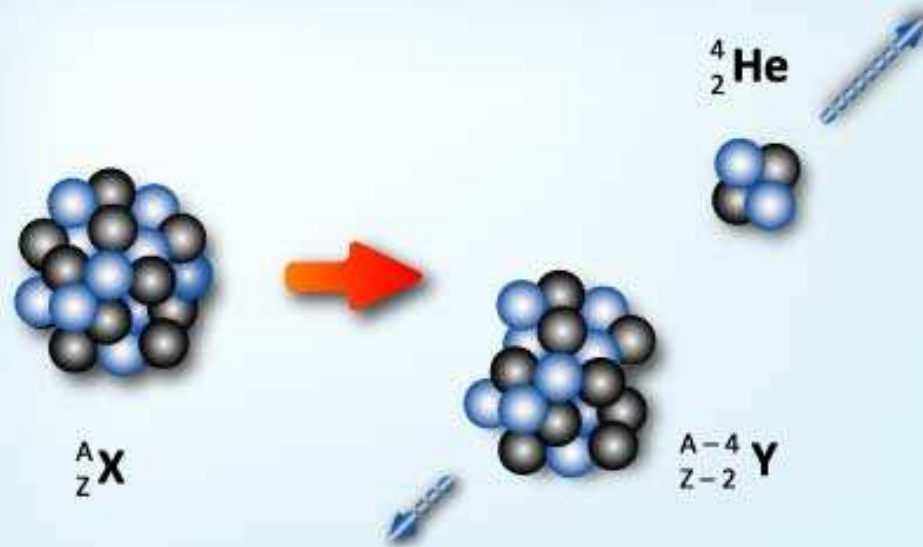
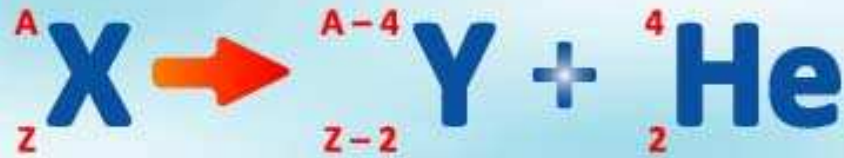
Vedle těchto částic vzniklých v jádře se z **elektronového obalu** uvolňují i elektrony, které **podle** mechanismu vzniku označujeme:

- konverzní elektrony,
- Augerovy elektrony.

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

- brzdné záření,
- charakteristické záření,
- anihilační záření.

ROZPAD α



RADIOAKTIVNÍ ZÁŘENÍ

1. ROZPAD α

nuklid emituje α - částice (jádra atomu helia)



α - částice:

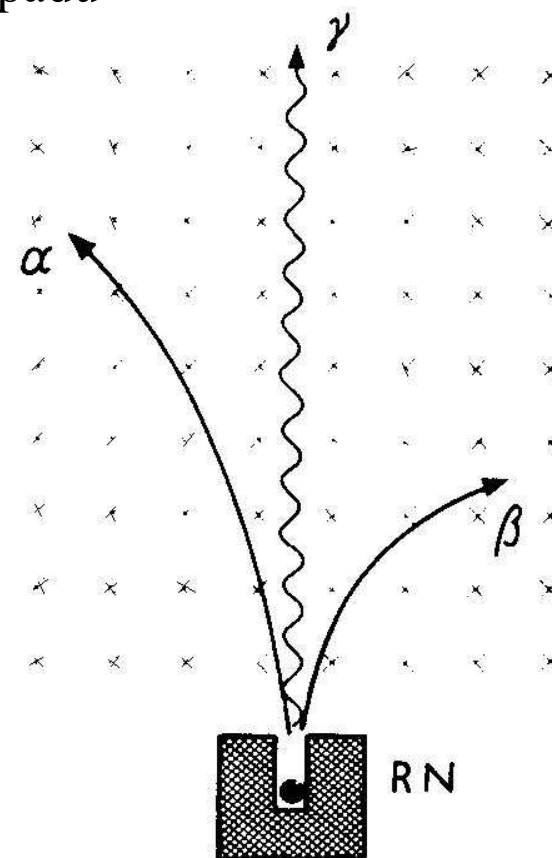
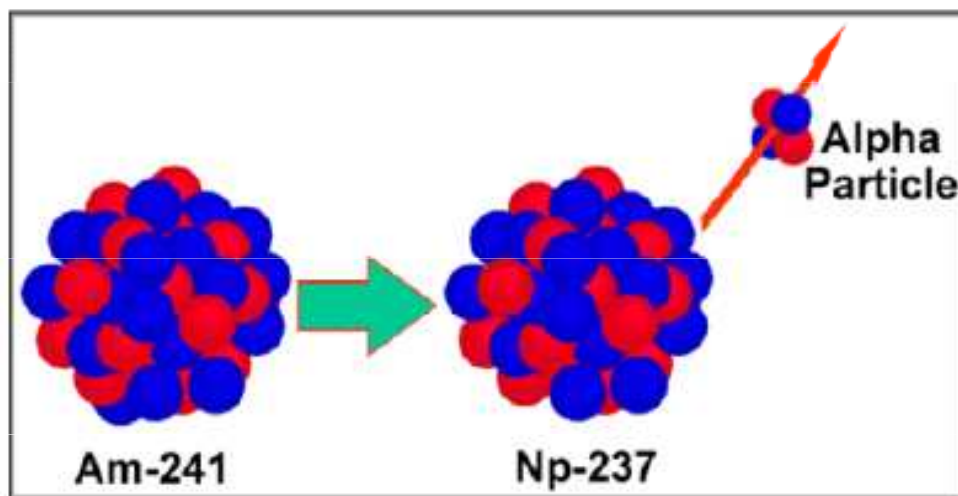


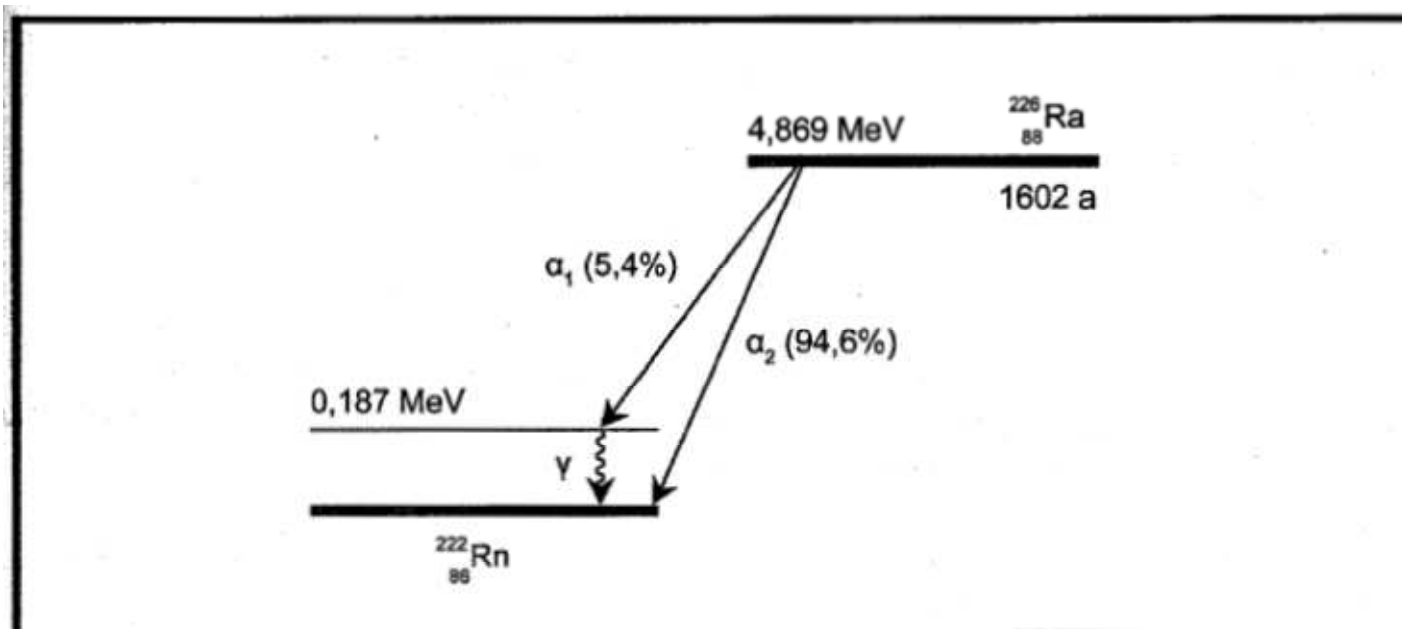
energie reakce, množství energie uvolněné při jednom rozpadu

... 4 nukleony, náboj $+2e$

... klidová hmotnost $m_\alpha = 6,656 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

... spin a magnetický moment je nulový





Obrázek 4.7 Rozpadové schéma ^{226}Ra .

Pro energetický výtěžek α přeměny ΔE platí rovnice:

$$\Delta E = (M_X - M_Y - m_\alpha) \cdot c^2,$$

$$\Delta E \cong (M_X - M_Y - M_\alpha) \cdot c^2,$$

kde M_X je atomová hmotnost původního (mateřského) nuklidu X,
 M_Y atomová hmotnost vzniklého (dceřiného) nuklidu Y,
 m_α hmotnost jádra ^4_2He ,
 M_α hmotnost atomu ^4_2He .

VLASTNOSTI ZÁŘENÍ α :

- při průchodu částic hmotným prostředím dochází k **IONIZACI**
- při srážkách s atomy prostředí uvolňuje elektrony z atomových obalů
- vznikají kladné a záporné ionty

Dolet částic α :

→ **dráha, na které ztratí částice veškerou svou energii**

✓ v **plynech** řádově centimetry

✓ v **kapalinách a pevných látkách** setiny milimetrů

2. ROZPAD β

➤ jádro emituje **elektron** (β^-) nebo **pozitron** (β^+)

➤ pozitron je **antičástice** k elektronu \Rightarrow stejná hmotnost, náboj kladný

➤ např.: $32\text{P} \rightarrow 32\text{S} + e^- + \text{antineutrino}$ $64\text{Cu} \rightarrow 64\text{Ni} + e^+ + \text{neutrino}$

→ energie rozpadu je rozdělena mezi elektron (pozitron) a neutrino (anti)
(v různých poměrech)

Pozn.: neutrino (antineutrino) jsou neutrální částice s téměř nulovou hmotností, slabě interagují, lze je obtížně zachytit

„Klasické“ třídění na α , β a γ rozpad

α rozpad

Radium se změní na radon při emisi α částice (jádra helia)



obecně

Nuklid X se změní na nuklid Y při emisi α částice (jádra helia)

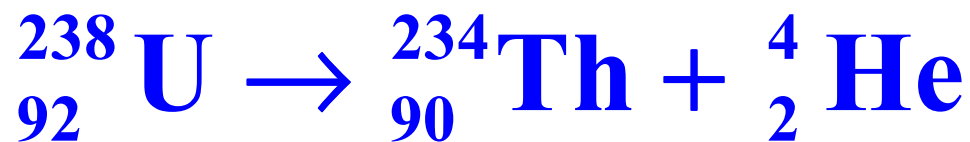


Hmotnostní přebytek nuklidu

$$\frac{\Delta}{u} = \left(\frac{m}{u} - A \right)$$

	<i>Z</i>	<i>A</i>	Δ/u
proton	1	1	0,007 276
neutron	0	1	0,008 665
deuteron	1	2	0,013 553
triton	1	3	0,015 501
helion	2	3	0,014 932
α částice	2	4	0,001 506

Spontánní α rozpad uranu

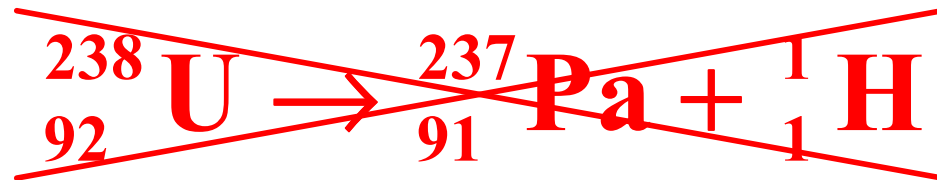


$$\Delta m c^2 =$$

$$(238,050\ 79 - 234,043\ 63 - 4,002\ 60) \text{u} c^2 =$$

$$0,004\ 56 \text{u} c^2 = \boxed{4,25 \text{MeV}}$$

Spontánní rozpad nastává, poločas rozpadu je $4,47 \cdot 10^9$ let.

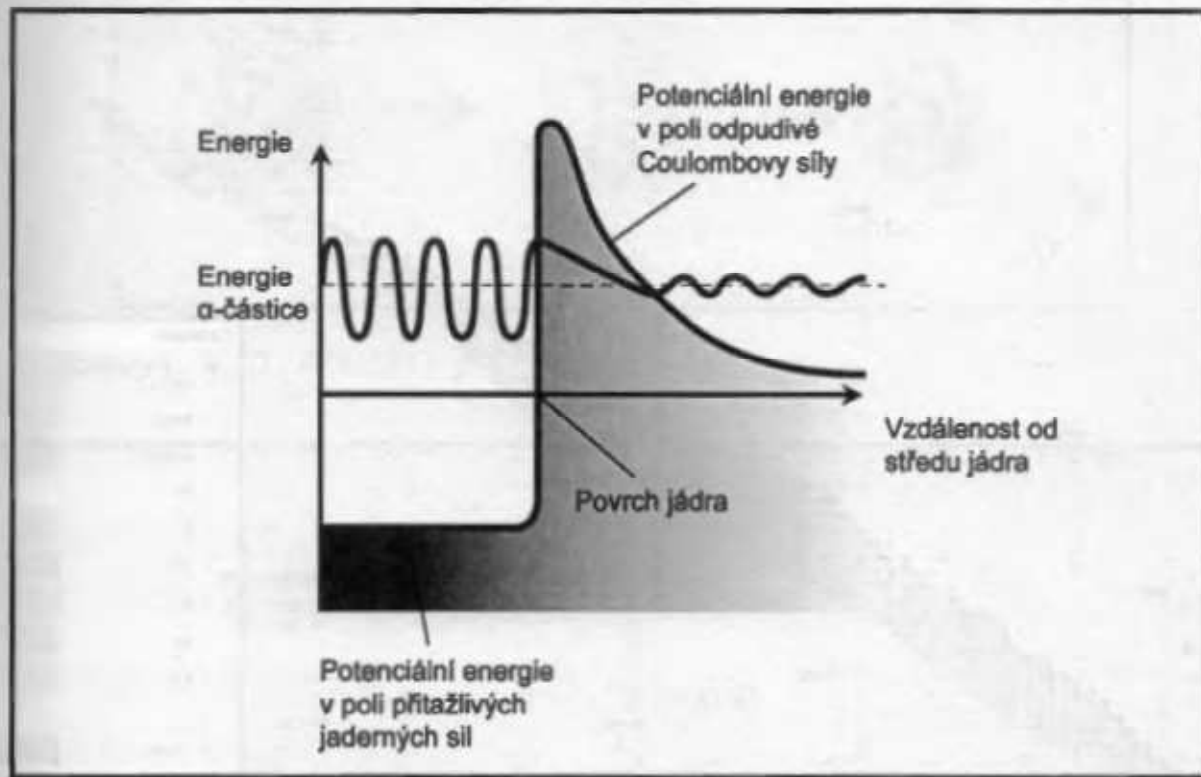


$$\Delta m c^2 =$$

$$(238,050\ 79 - 237,051\ 21 - 1,007\ 83) \text{u} c^2 =$$

$$-0,008\ 25 \text{u} c^2 = \boxed{-7,68 \text{MeV}}$$

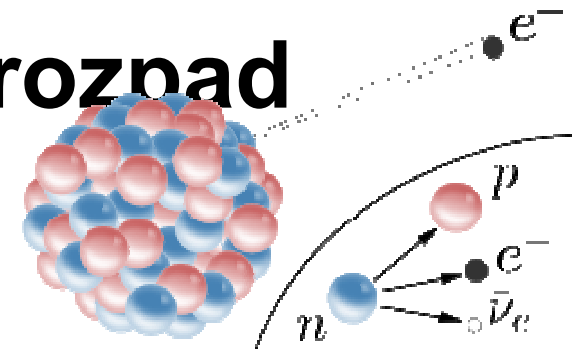
Spontánní rozpad nemůže nastat.



Obrázek 4.8 Průchod částice α potenciální bariérou



„Klasické“ třídění na α , β a γ rozpad



β^- rozpad

Kobalt se změní na nikl (v nabuzeném stavu) při emisi elektronu a antineutrina



obecně

Nuklid X se změní na nuklid Y při emisi elektronu a antineutrina



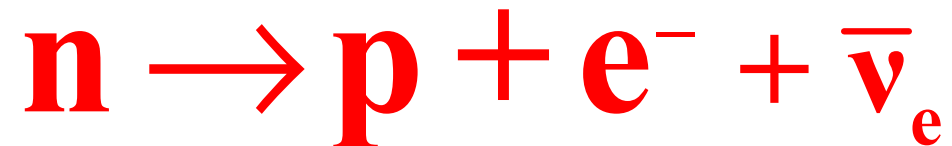
Popis β^- - rozpadu

fosfor se změní na síru
při emisi elektronu a neutrina



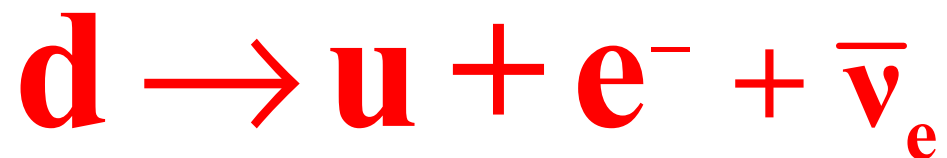
Zákon zachování počtu nukleonů ($32=32$) a elektrického náboje
($15=16-1$)

neutron se změní na proton
při emisi elektronu a
elektronového antineutrina



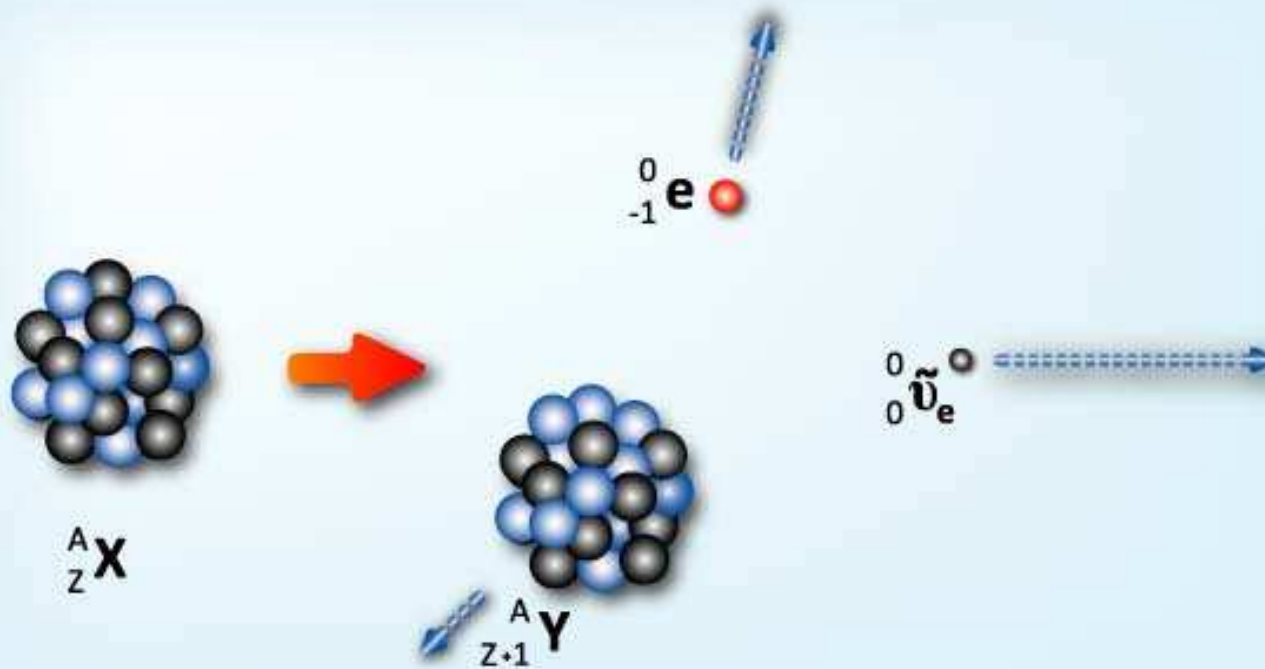
Zákon zachování baryonového ($1=1$), leptonového ($0=1-1$)
a elektrického náboje ($0=1-1$)

d-kvark se změní na u-kvark
při emisi elektronu a
elektronového antineutrina



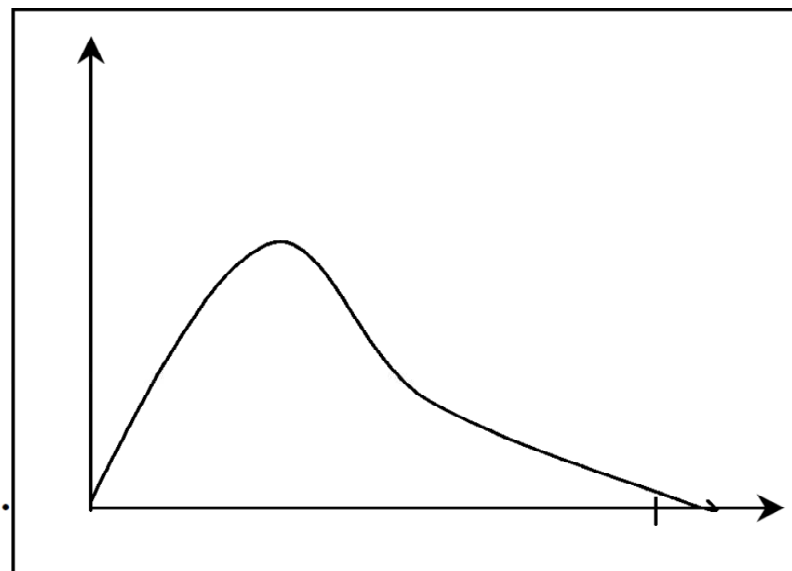
Zákon zachování baryonového ($1/3=1/3$), leptonového ($0=1-1$)
a elektrického náboje ($-1/3=2/3-1$)

ROZPAD β^-



Spojité spektrum β -záření → neutrino

Spektrum energií elektronu nebo pozitronu při přeměně β určitého nuklidu je spojité, mění se od nuly do maximální hodnoty W_{\max} (Podle druhu radionuklidu je hodnota W_{\max} rovna od 15 keV do 15 MeV.) Tato experimentálně zjištěná skutečnost je v rozporu s kvantovou mechanikou, která předpokládá, že energie nukleonů v jádře je kvantována a že určité jádro emituje β částici se zcela určitou hodnotou energie, rovnou W_{\max} . Obr. 3 ukazuje, že z atomu vystupuje jen velmi málo částic β , majících takovou energii. Vysvětlení, podle něhož částice β ztratí zbytek své energie srážkami s elektrony atomového obalu, nebylo experimentálně potvrzeno. Kalorimetricky byla měřena celková energie, kterou odnášejí částice β z jader určitého radionuklidu. Měřilo se teplo, o které se ohřál radioaktivní vzorek v důsledku srážek částic β s elektrony atomů látky a teplo, jehož příčinou byla absorpce β záření ve stěnách kalorimetru. Zjištěná hodnota energie se shodovala se střední energií spojitého spektra a nikoliv s její maximální hodnotou.



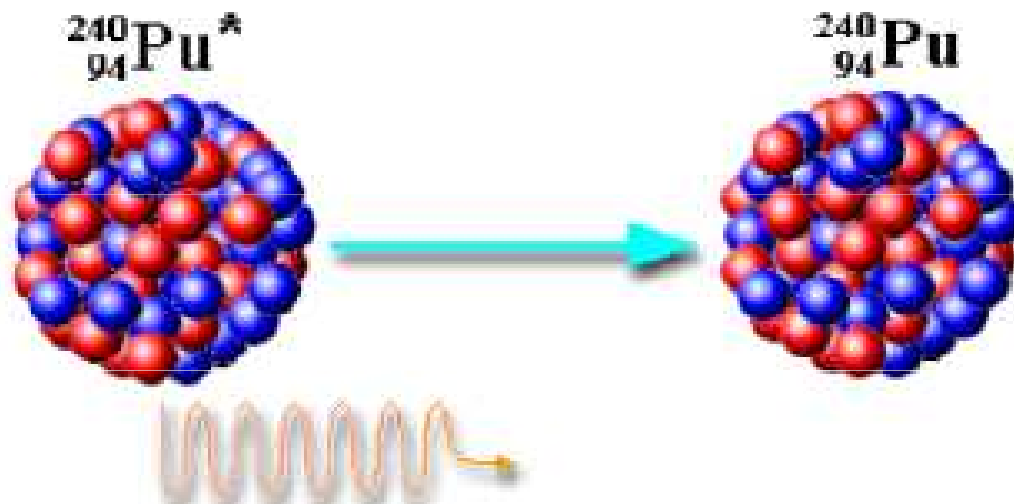
3. ZÁŘENÍ γ

- **elektromagnetické záření** o velmi krátkých vlnových délkách
- řádově $10^{-11} - 10^{-13}$ m
- vzniká v jádrech některých radioaktivních prvků
- zpravidla **doprovází** záření α i záření β

Některé prvky vysílají **monofrekvenční** záření jediné vlnové délky, jiné prvky (radium C, thorium, aktinium) vysílají celé spektrum záření γ **složené z jednotlivých čar.**

Nespojité spektrum je v souhlasu s kvantovou teorií:

- vznik v důsledku **přeskupení nukleonů** v jádře
- uvolněná energie se vyzáří jako jeden **foton**
- energie jádra je **kvantována** \Rightarrow **energie fotonů** nemůže nabývat libovolných hodnot!



γ záření

γ rozpad

Nikl v nabuzeném stavu přejde do základního stavu při emisi dvou fotonů



obecně

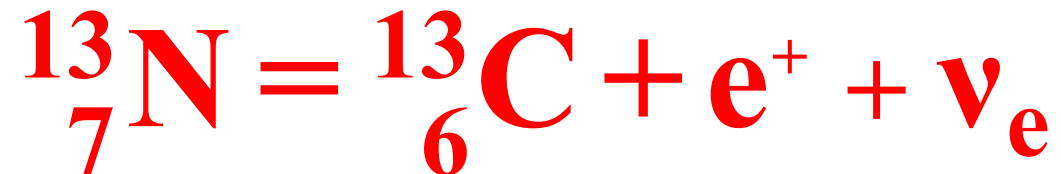
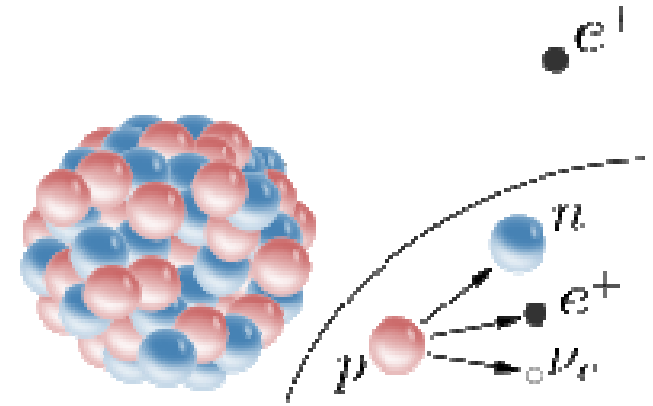
Nuklid v nabuzeném stavu X^* přejde do základního stavu X při emisi dvou fotonů



Další typy přechodů

β^+ rozpad

Dusík se změní na uhlík při emisi positronu a neutrina

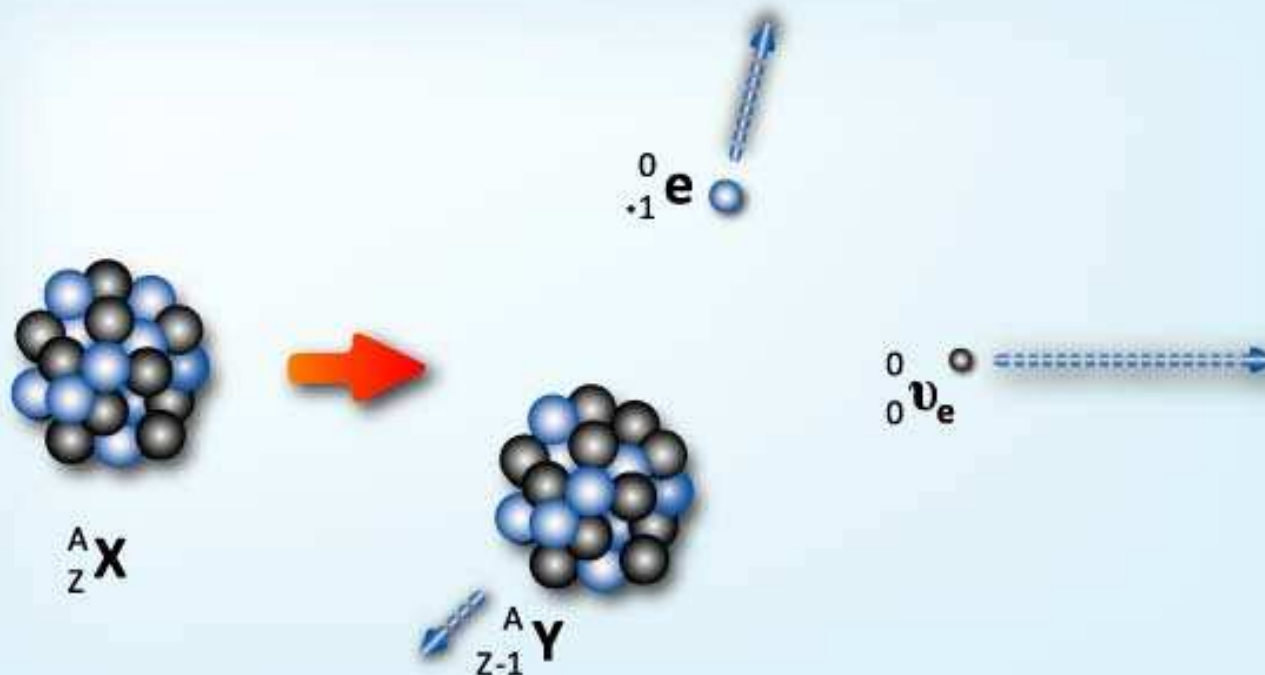


obecně

Nuklid X se změní na nuklid Y při emisi positronu a neutrina



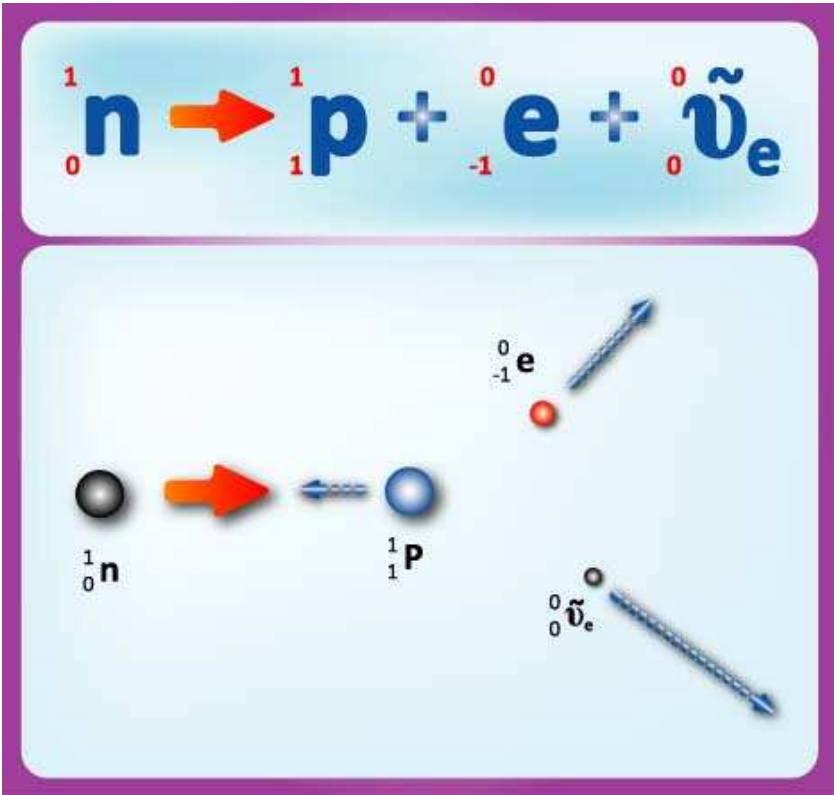
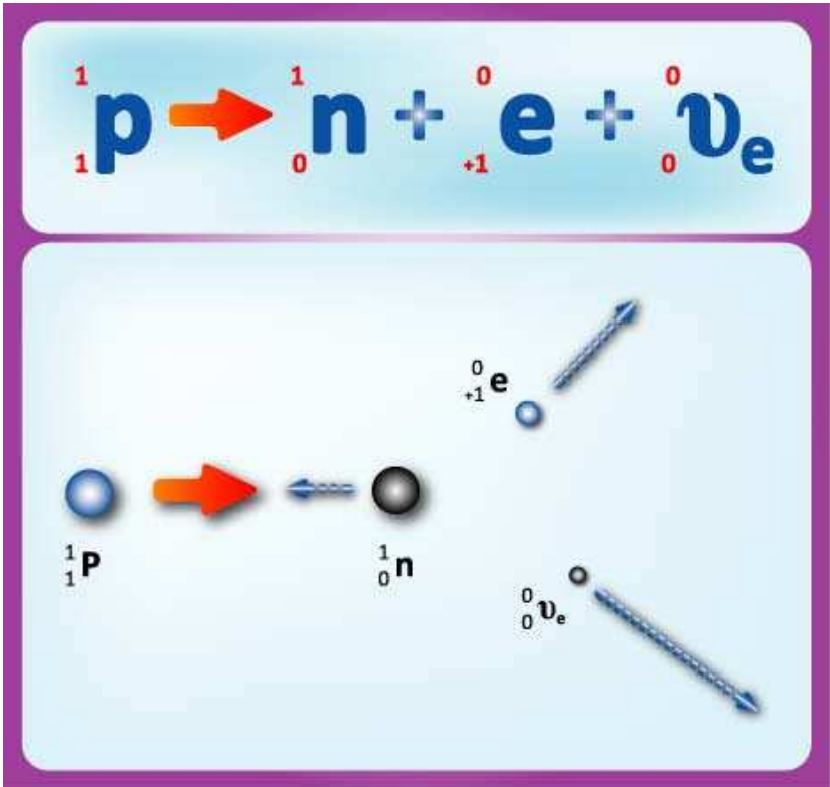
ROZPAD β^+



- v obou případech β rozpadu se **zachovává náboj a nukleonové číslo** prvku
- elektrony a pozitrony vznikají v průběhu emise:

$$p \rightarrow n + e^+ + \text{neutrino}$$

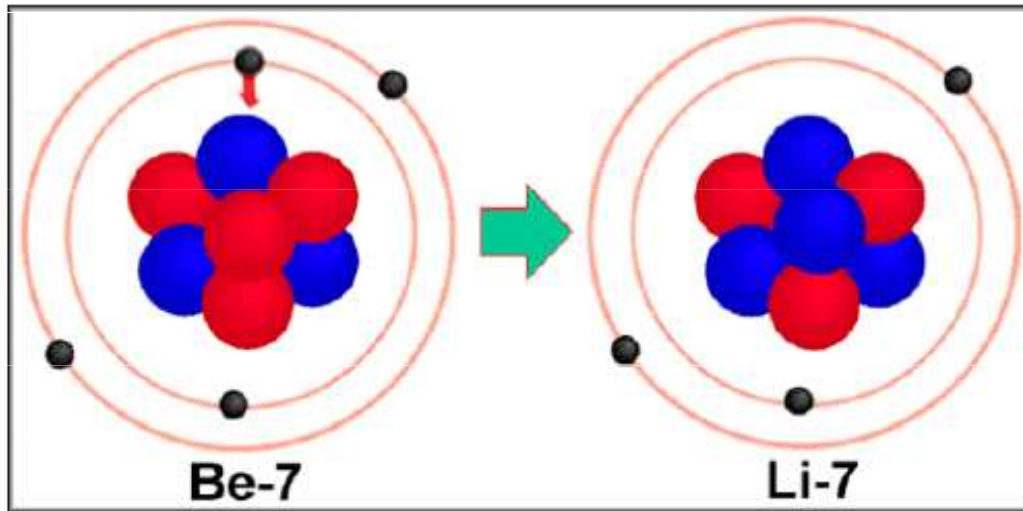
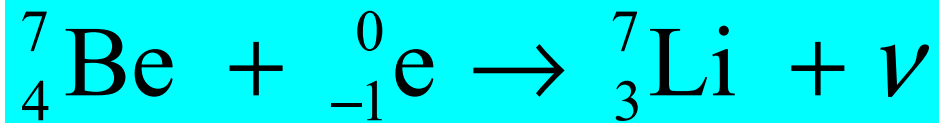
$$n \rightarrow p + e^- + \text{antineutrino}$$



⇒ protony a neutrony nejsou skutečné fundamentální částice !!!

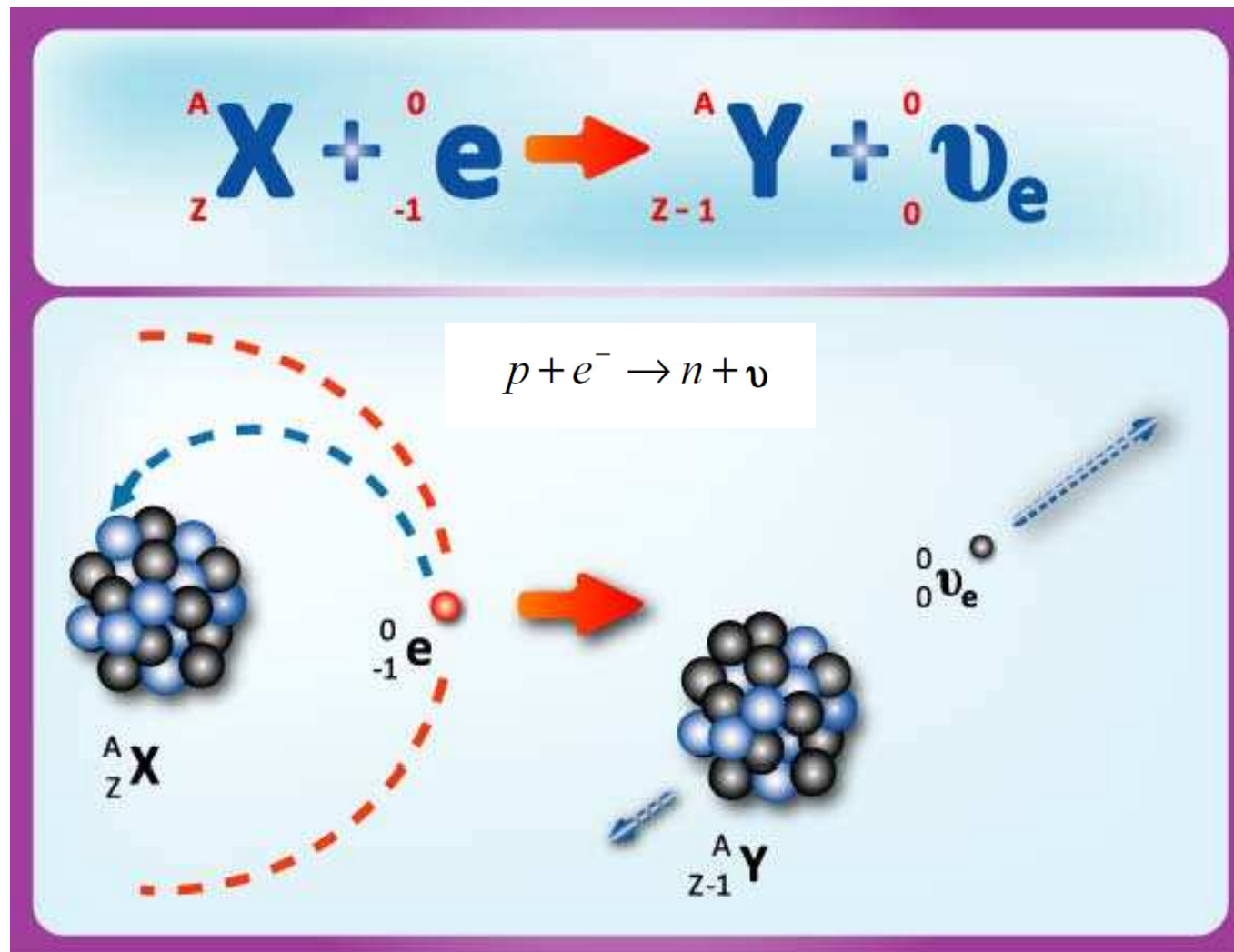
4. ELEKTRONOVÝ ZÁCHYT (K - ZÁCHYT)

- při porušení **stability** jádra (obsahuje-li o jeden proton více)
- jádro absorbuje nejbližší elektron (ze slupky K)
- **proton v jádře se přemění na neutron**
- na prázdné místo K – orbitu přejde **elektron z vyšší hladiny**
- dojde k **vyzáření energie** (fotonu)
- *nezmění se hmotnostní číslo, změní se protonové číslo prvku*



- Elektronový záchyt je jediným druhem radioaktivní přeměny jádra, na kterém **se podílí i elektronový obal atomu**
- Z toho plyne i určitá **možnost porušení dogmatu o neovlivnitelnosti $T_{1/2}$** – chemický stav atomu zde $T_{1/2}$ nepatrně mění

ELEKTRONOVÝ ZÁCHYT

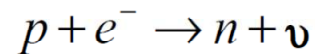


obecně

Elektron z vnitřní hladiny „se sloučí“ s protonem jádra na neutron při emisi neutrina

K – zachycení

Ekvivalentní k emisi pozitronu z hlediska přeměny jádra je tzv. k- zachycení. Označuje se tak případ, kdy jádro pohltí jeden elektron z vnitřních slupek svého obalu (nejčastěji z K-slupky, z čehož plyne název jevu). Proton jádra se spojí se zachyceným elektronem a přemění se v neutron. Přeměnu doprovází emise neutrina. Rovnice přeměny je:

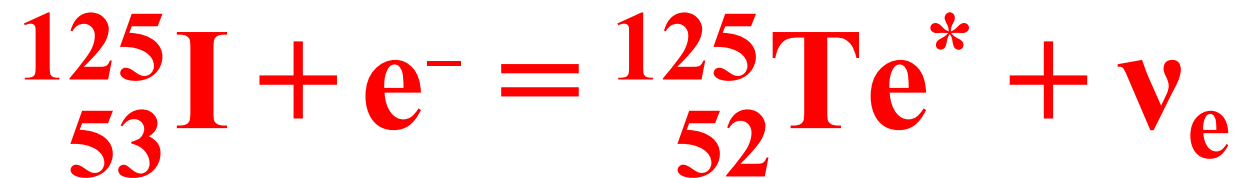


počet nukleonů se nezmění, avšak náboj jádra se sníží o jeden, jádro typu ${}^A_Z X$ se přemění na jádro ${}^A_{Z-1} Y$, což odpovídá posunutí v Mendělejevově tabulce prvků o jedno místo vlevo. K-zachycení je tedy ekvivalentní záření β^{+} .

Další typy přechodů

Elektronový záchyt

Jod se přemění na tellur v nabuzeném stavu při emisi neutrina

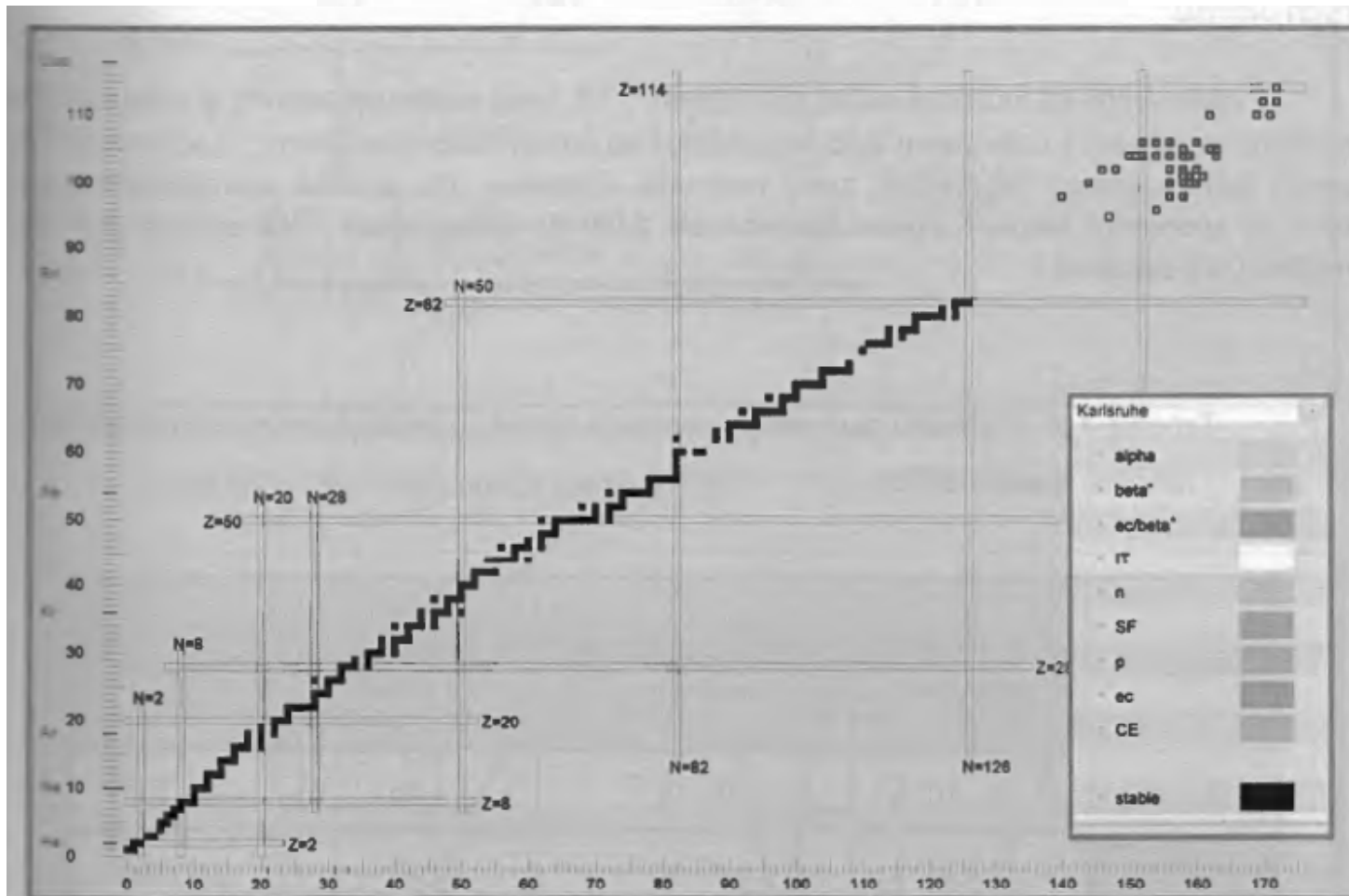
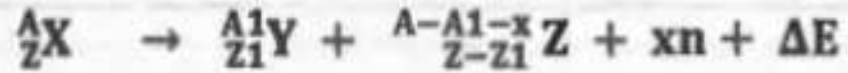


5. IZOMERNÍ PŘECHOD

- jádro přechází ze stavu o **vyšší energii na nižší úroveň**
- přebytek energie je vyzářen v podobě **záření γ**
- **hmotnost ani protonové číslo se nemění**

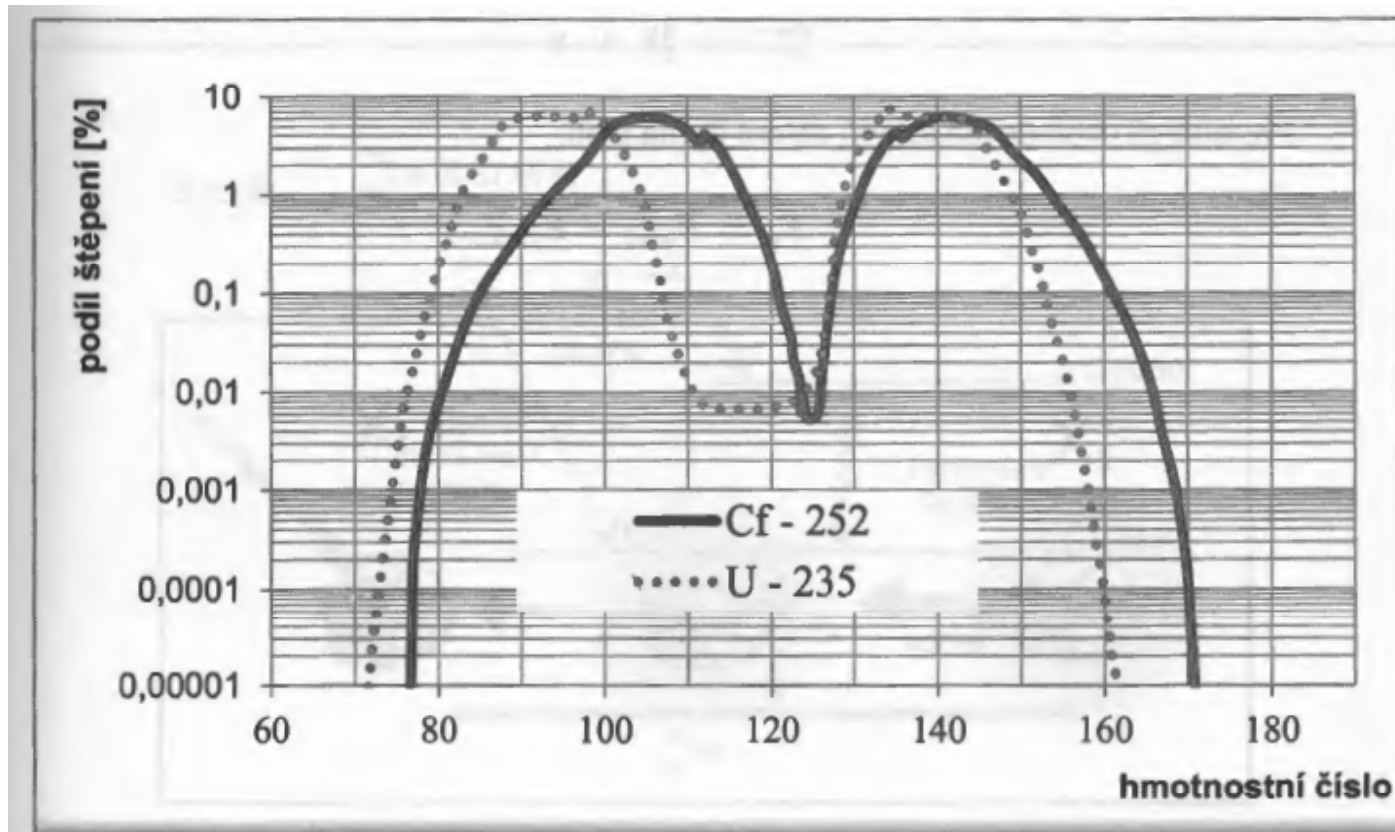
SAMOVOLNÉ ŠTĚPENÍ

X je samovolně se rozpadající jádro,
 Y, Z jsou dvě těžká jádra,
 xn je x uvolněných neutronů,
 ΔE je uvolněná energie.

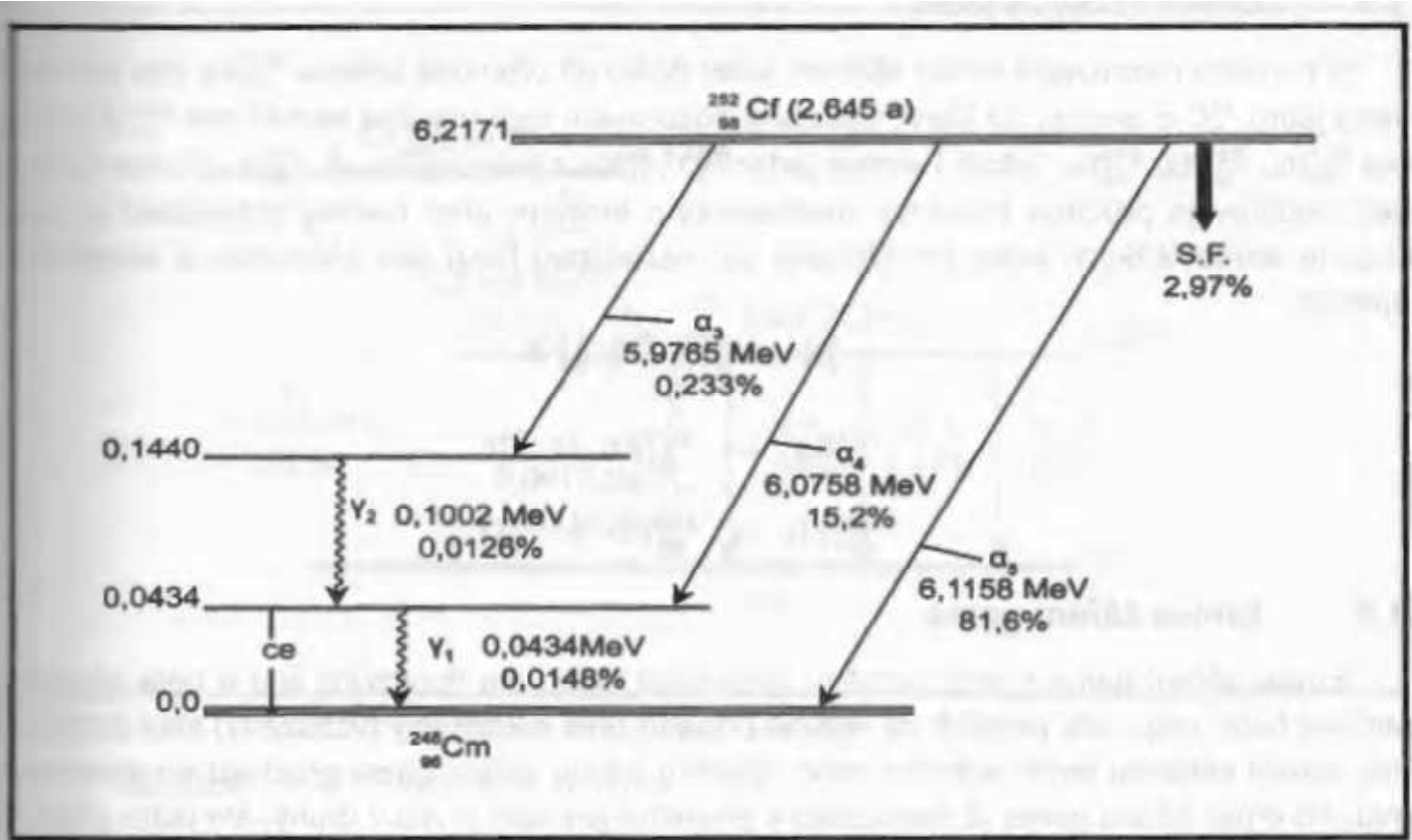


Obrázek 4.23 Samovolné štěpení (zelené čtverečky)

SAMOVOLNÉ ŠTĚPENÍ



Obrázek 4.25 Rozdělení hmotnostních čísel při štěpení ^{252}Cf a ^{235}U



Obrázek 4.24 Rozpadové schéma ^{252}Cf

Další typy přechodů

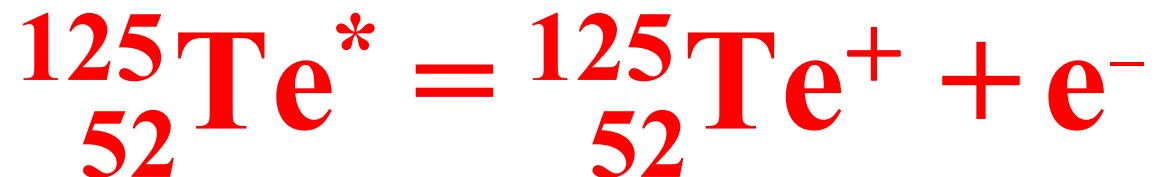
obecně

Prvek uvolní energii nabuzeného stavu **emisí vnitřního elektronu**

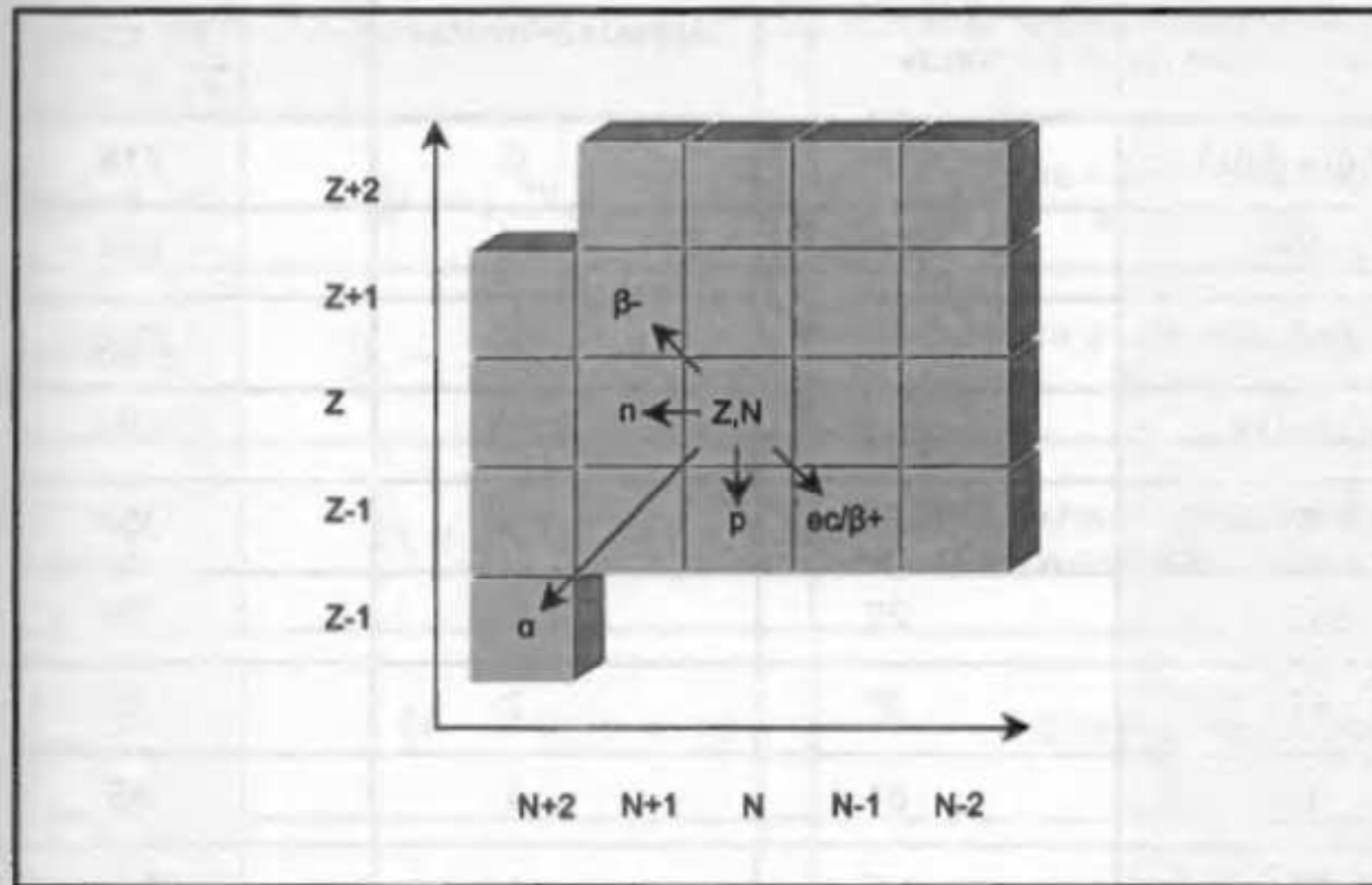


Vnitřní konverse

Tellur z nabuzeného stavu přejde do jedenkrát ionizovaného stavu při emisi elektronu



V současné době rozlišujeme osm základních radioaktivních přeměn, při kterých dochází ke změně protonového nebo nukleonového čísla.

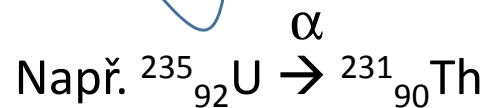


Obrázek 4.3 Základní radioaktivní přeměny

1												18						
1	H 1.008																	2
2	Li 6.941	Be 9.012											B 10.81	C 12.01	N 14.01	O 16.00	F 19.00	Ne 20.18
3	Na 22.99	Mg 24.31											Al 26.98	Si 28.09	P 30.97	S 32.07	Cl 35.45	Ar 39.95
4	K 39.10	Ca 40.08	Sc 44.96	Ti 47.88	V 50.94	Cr 52.00	Mn 54.94	Fe 55.85	Co 58.93	Ni 58.69	Cu 63.55	Zn 65.39	Ga 69.72	Ge 72.61	As 74.92	Se 78.96	Br 79.90	Kr 83.80
5	Rb 85.47	Sr 87.62	Y 88.91	Zr 91.22	Nb 92.91	Mo 95.94	Tc 98.91	Ru 101.1	Rh 102.9	Pd 106.4	Ag 107.9	Cd 112.4	In 114.8	Sn 118.7	Sb 121.8	Te 127.6	I 126.9	Xe 131.3
6	Cs 132.9	Ba 137.3	Lu 175.0	Hf 178.5	Ta 180.9	W 183.8	Re 186.2	Os 190.2	Ir 192.2	Pt 195.1	Au 197.0	Hg 200.6	Tl 204.4	Pb 207.2	Bi 209.0	Po 209.0	At 210.0	Rn 222.0
7	Fr 223.0	Ra 226.0	Lr 262.1	Rf 261.1	Db 262.1	Sg 263.1	Bh 264.1	Hs 265.1	Mt 268	Uun 269	Uuu 272	Uub 277	Uut 289	Uuq 289	Uup 289	Uuh 289	Uus 289	Uuo 293
6			57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70		
			La 138.9	Ce 140.1	Pr 140.9	Nd 144.2	Pm 146.9	Sm 150.4	Eu 152.0	Gd 157.3	Tb 158.9	Dy 162.5	Ho 164.9	Er 167.3	Tm 168.9	Yb 173.0		
7			89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102		
			Ac 227.0	Th 232.0	Pa 231.0	U 238.0	Np 237.0	Pu 244.1	Am 243.1	Cm 247.1	Bk 247.1	Cf 251.1	Es 252.0	Fm 257.1	Md 258.1	No 259.1		

6 — protonové č. Z
 C — chemická značka
 12.01 — nukleonové č. A

□ kovy
 □ polovodiče
 □ nekovy



Posun v periodické tabulce prvků

α – 2 místa vlevo (ztráta $2p^+$)

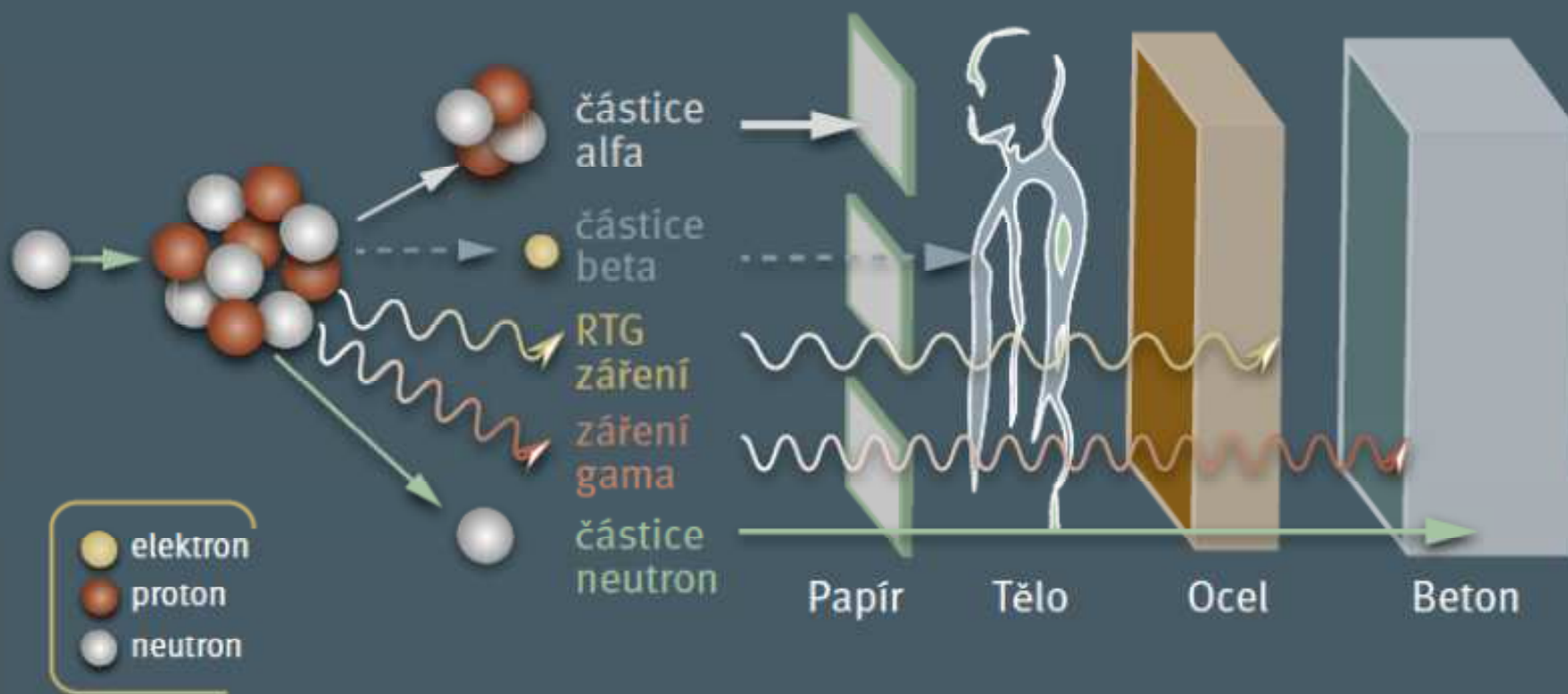
β^- - 1 místo vpravo ($n^0 \rightarrow p^+ \rightarrow Z$ roste o 1)

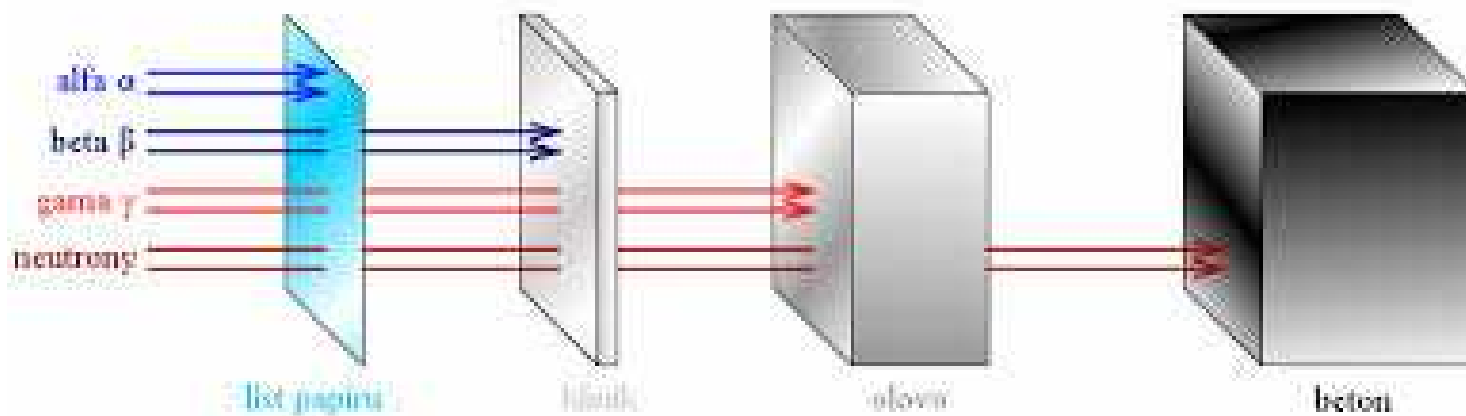
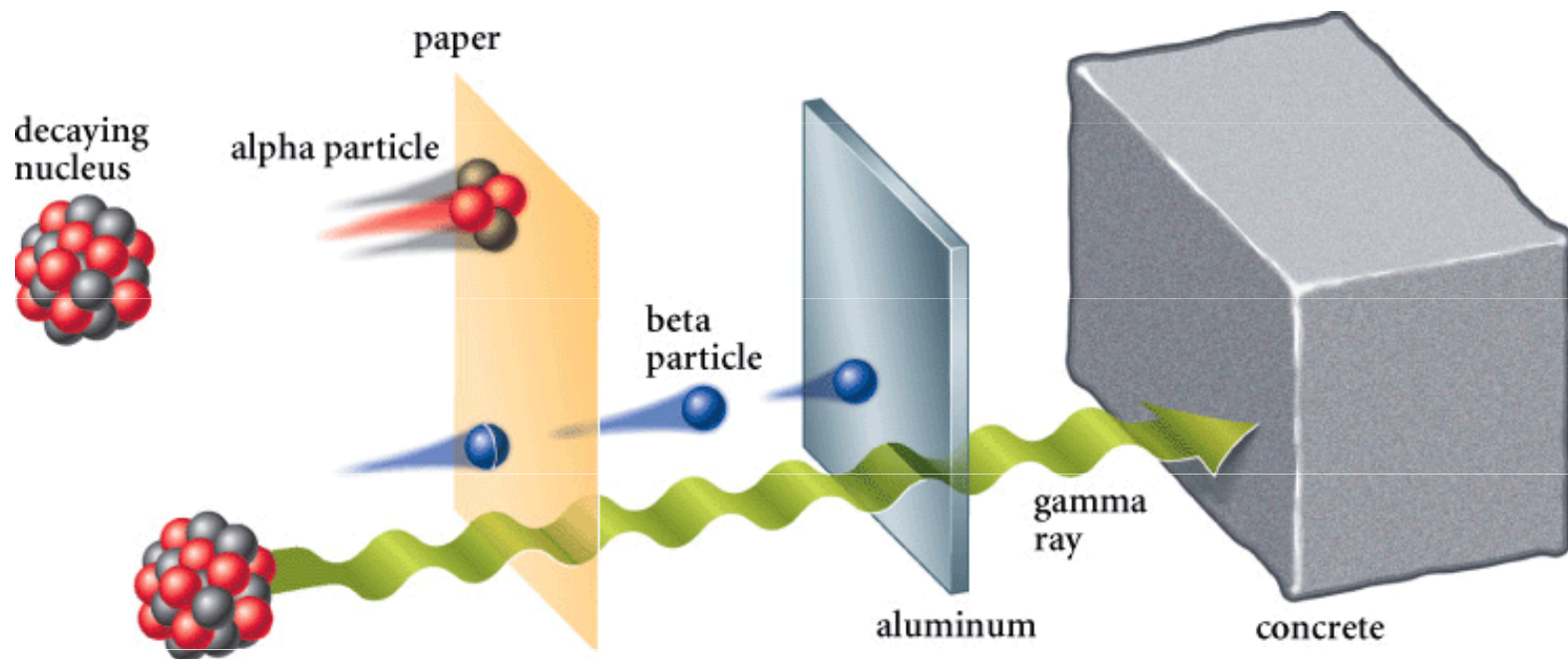
β^+ , K-záchyt – 1 místo vlevo ($p^+ \rightarrow n^0 \rightarrow Z$ klesá o 1)

γ – neposouvá se

PRONIKAVOST IZ

Pronikavost různých typů záření



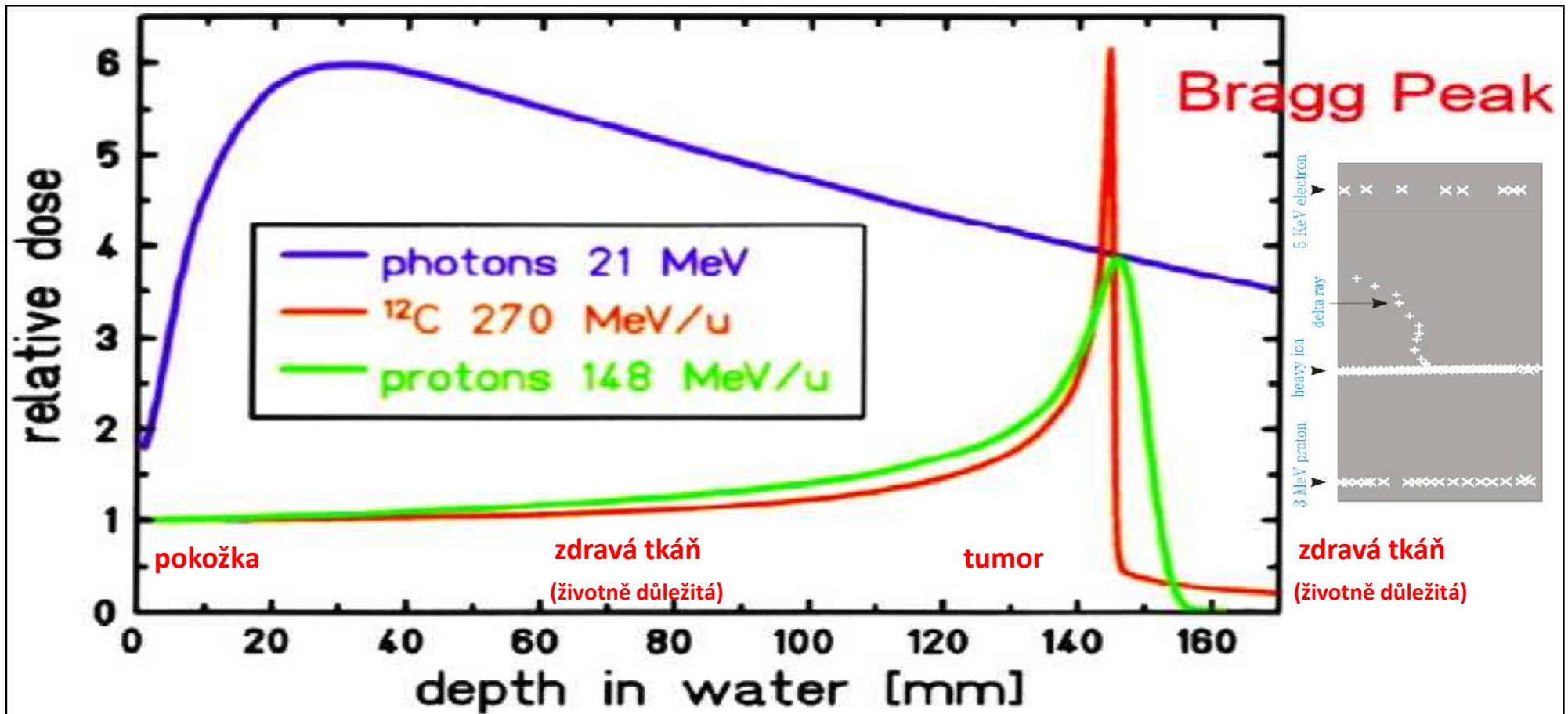


Dosah alfa částic je velmi krátký, ve vzduchu několik centimetrů, v tkáni desítky mikrometrů
 Pronikavost je větší než u alfa částic (dosah ve vzduchu okolo 1 metru)

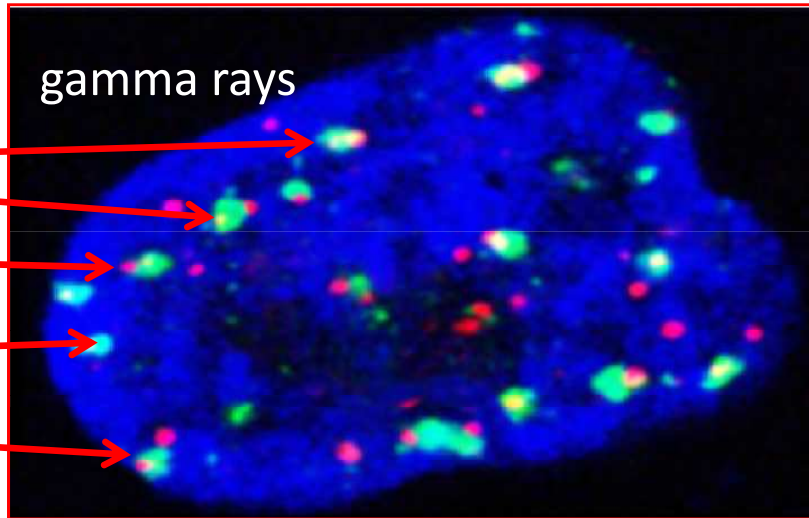
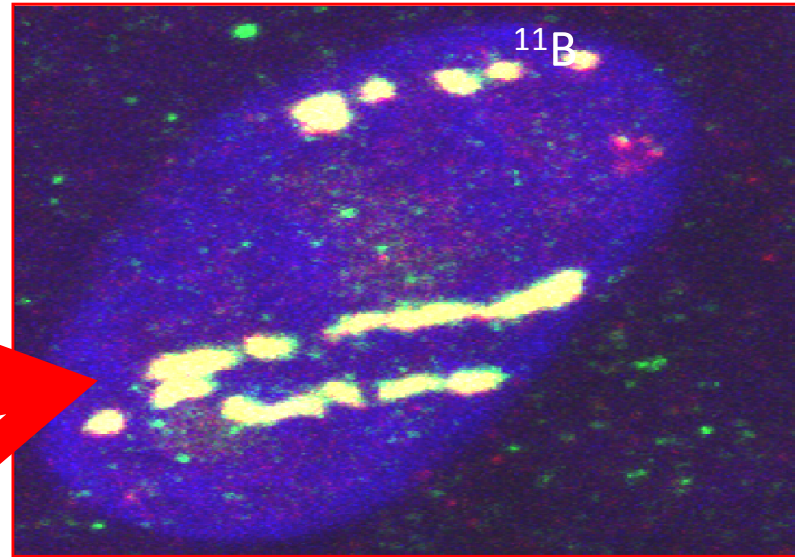
Výrazně pronikavější než alfa a beta záření, ve vzduchu má dosah i několik km, v tkáni centimetry

Dle SÚRO (Státní ústav radiační ochrany) - <https://www.suro.cz/cz/radiacni-ochrana/zakladni-pojmy>

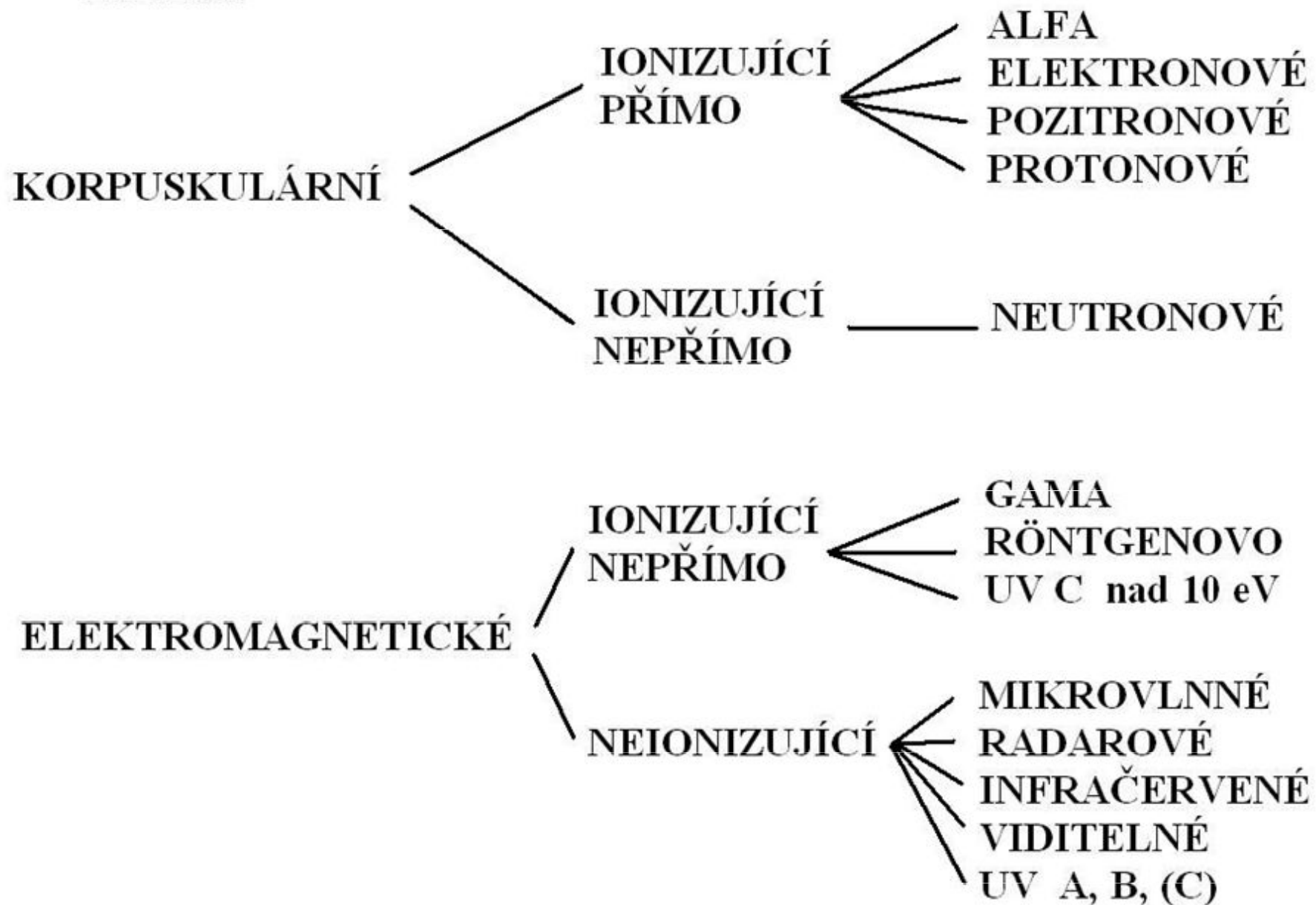
ENERGY DEPOSITION – DIFFERENT TYPES OF RADIATION



DSB INDUCTION FOR THE SAME DOSE OF 1 Gy



ZÁŘENÍ



Zákon radioaktivní přeměny

Aktivita A radioaktivního vzorku v daném okamžiku (tj. počet jader rozpadajících se za sekundu, $A = dN/dt$) je úměrná celkovému počtu *nepřeměněných* jader přítomných ve vzorku v daném okamžiku:

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

λ je přeměnová konstanta

Jednotkou aktivity A je **becquerel (Bq) [s⁻¹]**

(dříve: curie, 1 Ci = 3,7 x 10¹⁰ Bq)

Záporné znaménko v uvedené rovnici udává, že počet *nepřeměněných* jader se snižuje.

PROCES ROZPADU LÁTEK MÁ STATISTICKOU PODSTATU

- radioaktivní jádra nemají paměť

- radionuklid s N radioaktivními jádry
- **pravděpodobnost rozpadu** každého jádra daného nuklidu za pevně zvolený časový interval je v každém okamžiku **stejná**

↓
úbytek jader v čase $-\frac{dN}{dt}$ je úměrný jejich počtu N :

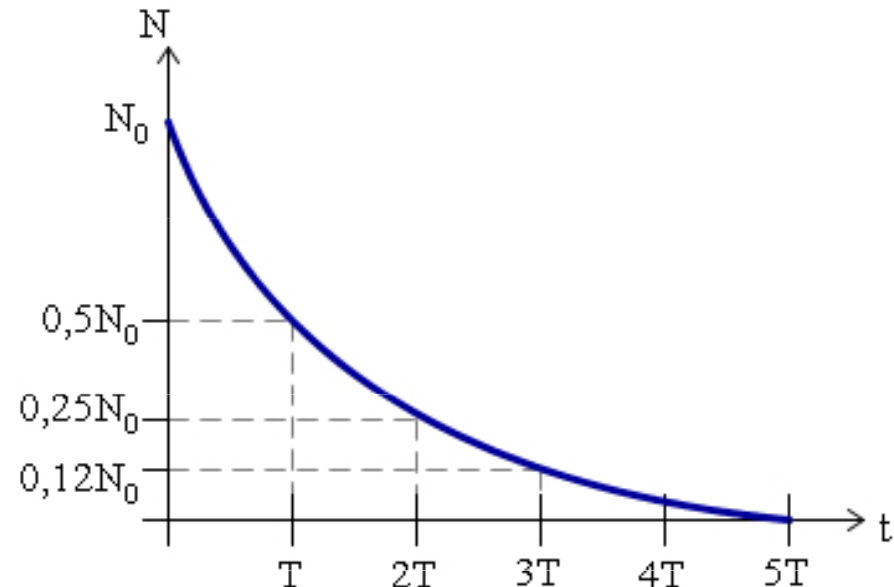
$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

... **přeměnová** (rozpadová) **konstanta**
jednotka: s^{-1}

integrace

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

N_0 je počet jader ve vzorku v čase $t = 0$
 N je počet zbylých (nerozpadlých) jader
v libovolném následujícím okamžiku t
 e – Eulerovo číslo, 2,71828.....



.....**PŘEMĚNOVÝ (ROZPADOVÝ) ZÁKON**

AKTIVITA RADIONUKLIDU



rychlost rozpadu radionuklidu:

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

z přeměnového zákona: $N = N_0 e^{-\lambda t}$

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

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$



derivace

$A_0 = \lambda N_0$... rychlost rozpadu v čase $t = 0$

A ... aktivita v libovolném následujícím okamžiku t

JEDNOTKY AKTIVITY RADIONUKLIDU:

současná jednotka (dle objevitele) **becquerel**

1 becquerel = 1 Bq = 1 rozpad za sekundu

starší jednotka (stále užívaná) **curie**

1 curie = 1 Ci = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq

POLOČAS ROZPADU

doba T , za kterou se samovolně přemění **přesně polovina** původního počtu jader

dosadíme: $N = \frac{1}{2} N_0$

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

$\frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda t}$

$\frac{1}{2} = e^{-\lambda t}$

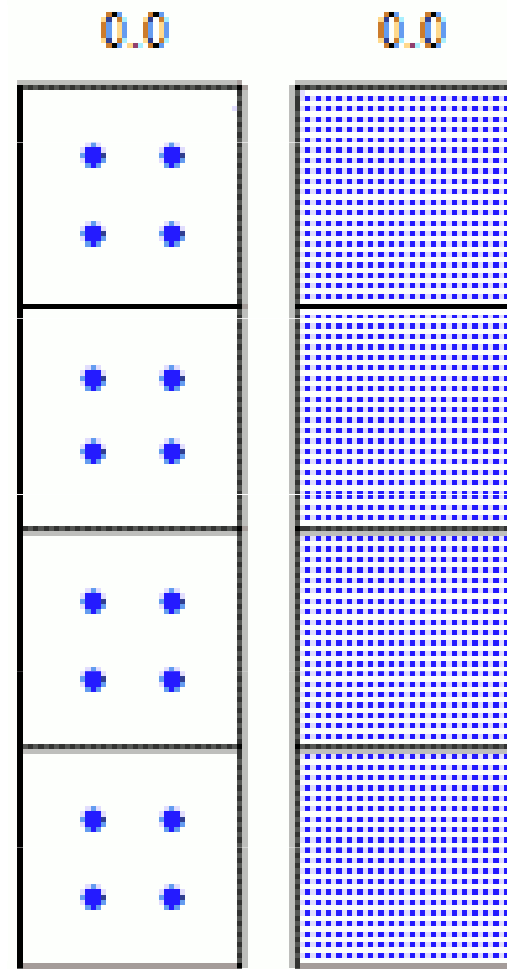
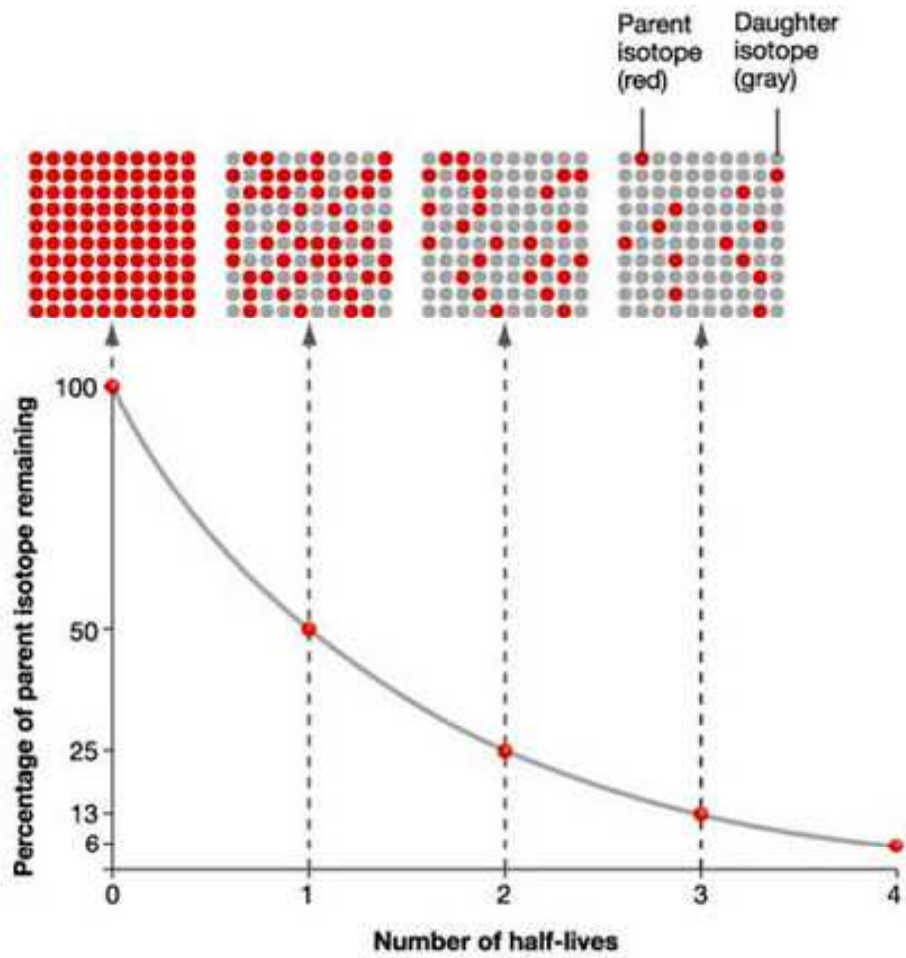
logaritmujeme

$\lambda T = -\ln \frac{1}{2}$

$T = \frac{\ln 2}{\lambda}$

UMĚLÁ RADIOAKTIVITA

- objev r. 1934 **manželé Joliot – Curieovi**
- hliník ozářený α -částicemi **emituje záření i po odstranění vnějšího zdroje** záření
- radioaktivita (nestabilita atomového jádra) je vyvolána **uměle** (obvykle jadernou reakcí)
- **stejně zákonitosti** jako pro přirozenou radioaktivitu



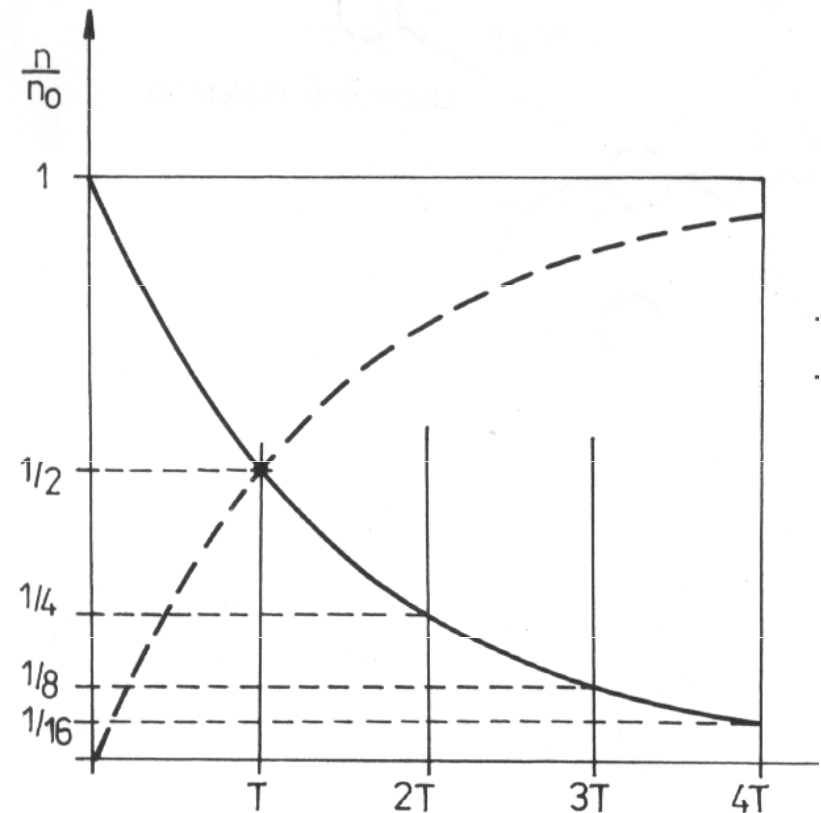
PRŮBĚH RADIOAKTIVNÍ PŘEMĚNY

➤ exponenciální přeměnový zákon platí pro **všechny druhy záření**

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

➤ atomy, které se rozpadají: tzv. atomy „**mateřského**“ prvku (λ)

➤ přeměněné atomy nezanikají, stávají se atomy nového „**dceřiného**“ prvku



A) během dostatečně dlouhé doby se mateřský prvek **přemění úplně** v prvek dceřinný (pokud ten není dále radioaktivní)

B) je-li **dceřinný prvek dále radioaktivní** (λ'), produkty radioaktivního rozpadu vytvářejí **radioaktivní přeměnové řady**