

# Radiační biofyzika

Přednáška 5 2022

Částice (dokončení),  
(ne)stabilita atomového  
jádra, radioaktivní  
přeměny

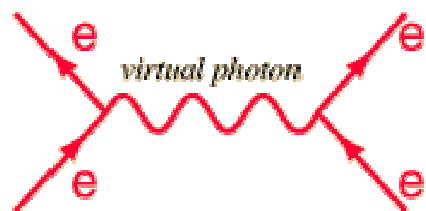
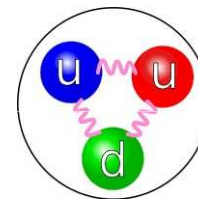
Martin Falk



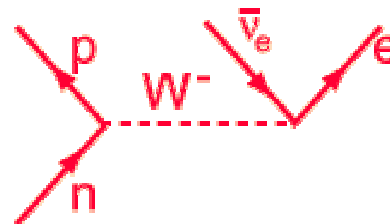


# Základní síly

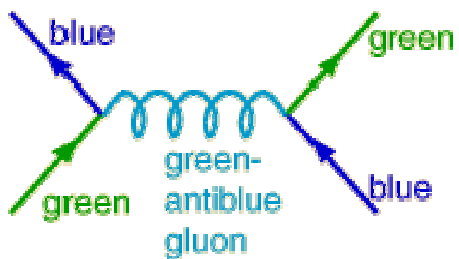
Feynmanovy diagramy



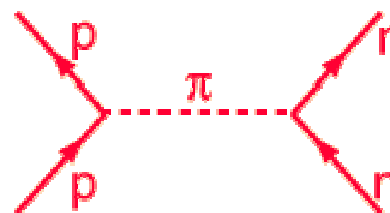
Electromagnetic



Weak

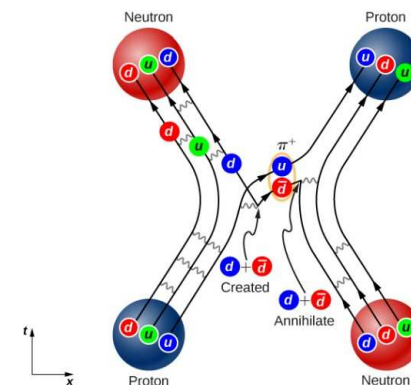
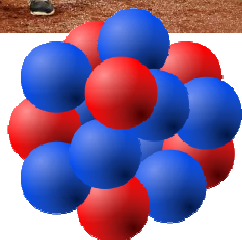


between quarks



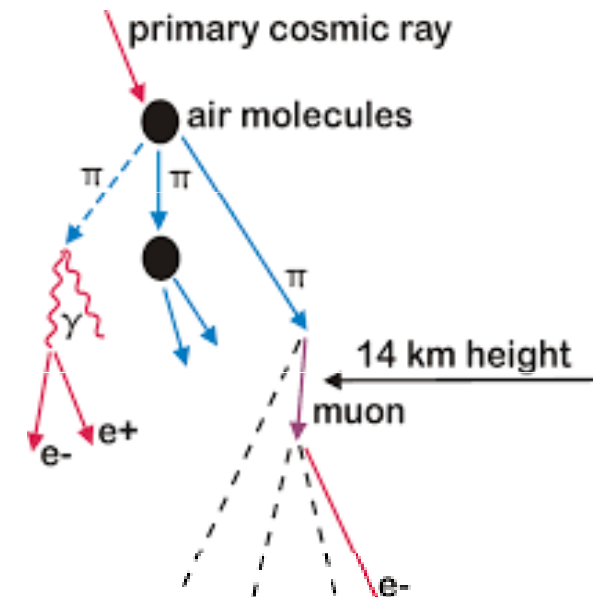
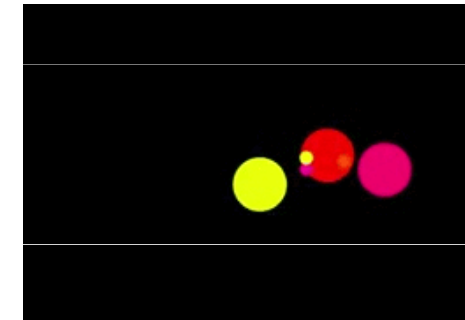
between nucleons

Strong Interaction



# Silná j. interakce

- Předpokládalo se, že analogicky jako v případě elektromagnetického pole, musí i v případě pole jaderných sil existovat zprostředkující částice neboli kvantum jaderných sil.
- Roku 1935 Yukawa na základě dosahu jaderných sil odhadnul, že by to měly být částice s hmotností mezi hmotnostmi protonu a elektronu. Z tohoto důvodu byly tyto zatím hypotetické částice nazvány *mezony*.
- V r. 1938 byly částice přibližně o této hmotnosti objeveny v kosmickém záření a byly nazvány *mezony  $\mu$*  (neboli *miony*), ale brzy se zjistilo, že jsou vůči jádrům zcela netečné, tzn. neinteragovaly s nimi *silnou interakcí*, resp. *jadernými silami*.
- Teprve r. 1947 byly nalezeny ty pravé částice, které jsou odpovědné za jadernou interakci. Tyto nové částice byly pojmenovány jako *mezony  $\pi$*  (též *piony*).

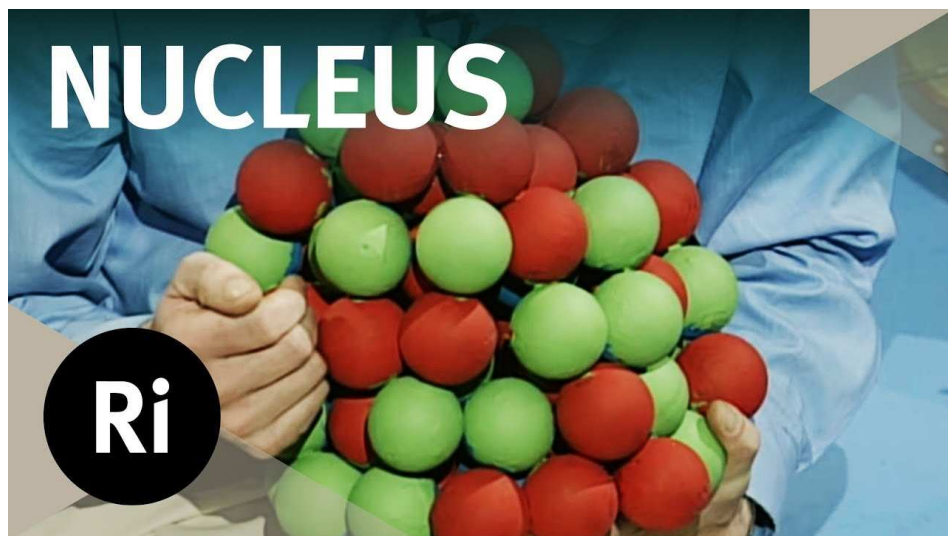


# Silná j. interakce

- Tyto částice jsou podle Yukawovy teorie kvantem pole jaderných sil. Známe tři typy mezonů  $\pi$  (**pionů**):
  - kladně elektricky nabitý  $\pi^+$
  - elektricky neutrální  $\pi^0$
  - záporně elektricky nabitý  $\pi^-$
- Nukleony v jádře si vyměňují virtuální piony, což se projeví jako jaderná interakce.
  - Vysláním nebo pohlcením neutrálního pionu se nemění typ nukleonu.
  - Vysláním kladného, resp. záporného pionu se mění proton, resp. neutron na neutron, resp. proton.
  - Pohlcením kladného, resp. záporného pionu se neutron, resp. proton mění na proton, resp. neutron.
- Celkový náboj jádra ani počet nukleonů se tak při těchto procesech nemění.

## Virtuální částice

- Jsou to částice, které na rozdíl od tzv. skutečných nelze přímo pozorovat, aniž bychom je v procesu měření změnilí na skutečné. Virtuální částice existují pouze po dobu, která je kratší než čas nutný ke změření jejich energie (podle *relací neurčitosti*).
- Virtuální částice vzniká v páru s příslušnou *antičásticí*, která má stejnou *klidovou hmotnost*, ale opačné hodnoty některých veličin, které se zachovávají, jako je např. *elektrický náboj*.



## Silná j. interakce - Shrnutí

- Původní představa silných interakcí v jádře:  
**neustálá výměna virtuálních pionů** (kladný, záporný nebo neutrální) **mezi nukleony**; velmi krátká doba interakce, řádově  $10^{-23}$  s.

- Virtuální piony vznikají výměnou **gluonů mezi kvarky**.
- **Velmi krátký dosah** –  $10^{-15}$  m (**tedy jen v jádře**). Dosah jaderných sil definuje poloměr jádra (proto jsou velká jádra méně stabilní). 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)

# 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 →  $n_0$  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 přiblížování protonu se navíc nejdříve uplatňuje coulombické odpuzování nábojů jádra a  $p+$ . 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:

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

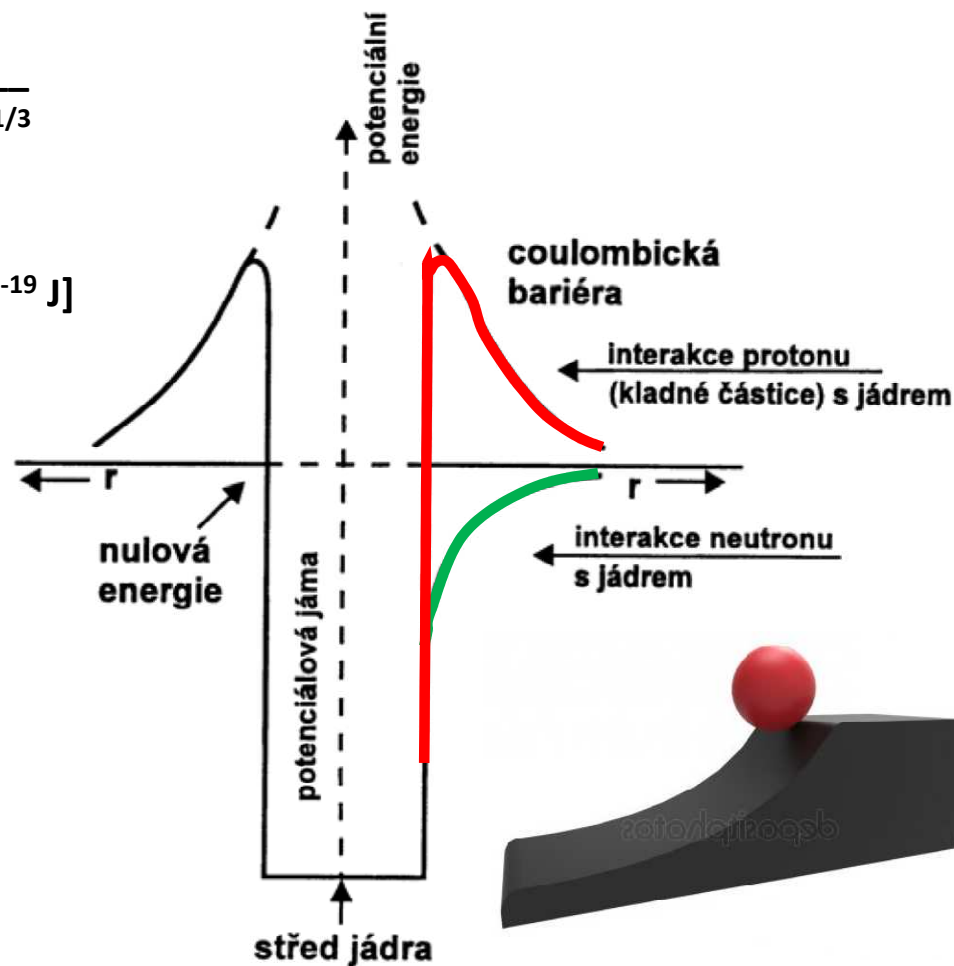
- Kde:  $Z_1$  a  $Z_2$  jsou protonová čísla jádra a kladné částice (zde protonu)

$A_1$  a  $A_2$  jsou nukleonová čísla jádra

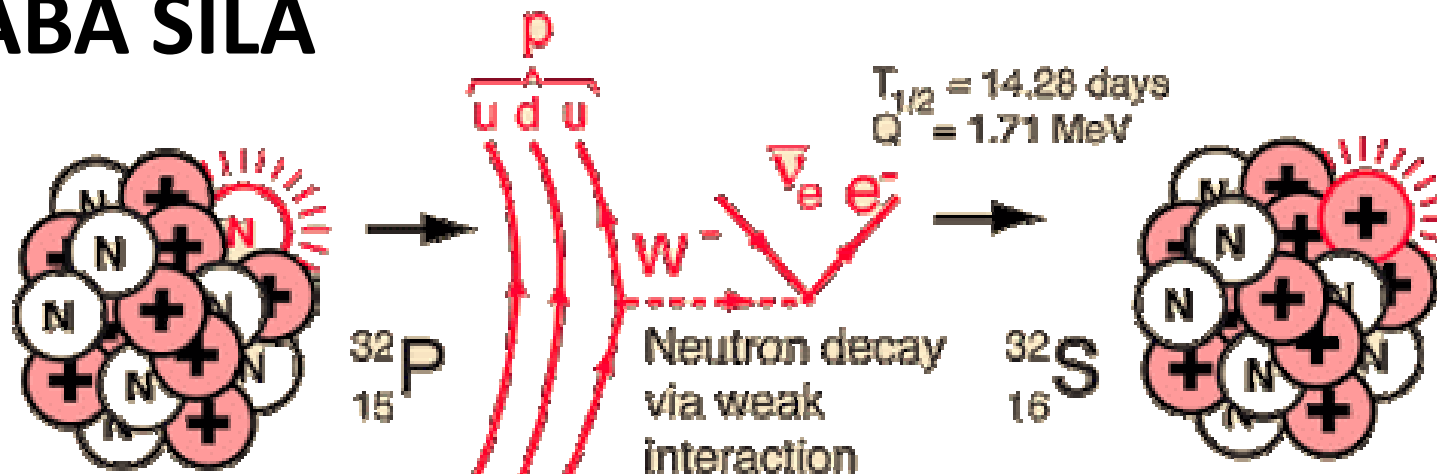
# Průběh interakce mezi jádrem a dalším nukleonem, potenciálová jáma a bariéra

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

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



# SLABÁ SÍLA



A neutron in  $^{32}_{15}\text{P}$  decays by  $W^-$  weak interaction.

The weak interaction converts a down quark to an up quark, changing the neutron to a proton.

The decay process moves the phosphorus nucleus up one step in the periodic table to sulfur.



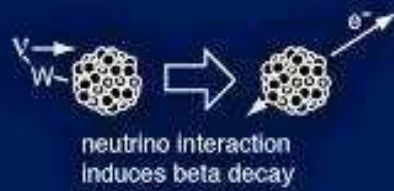

C <sup>6</sup>	N <sup>7</sup>	O <sup>8</sup>	F <sup>9</sup>
Si <sup>14</sup>	P <sup>15</sup> →	S <sup>16</sup>	Cl <sup>17</sup>
Ge <sup>32</sup>	As <sup>33</sup>	Se <sup>34</sup>	Br <sup>35</sup>

- $\beta^+$  rozpad
- Nestabilita volných  $n^0$
- Většina radioaktivity ve štěpném materiálu (jader po štěpení U v reaktorech) → mají nadbytek  $n^0$  →  $\beta^+$  (Černobyl)
- Oscilace neutrin
- Slučování protonů (H) ve Slunci → produkce neutrin



- 1) The **W bosons** have a mass of about **100 times that of a proton**, which gives the weak force a **very short range**.  
...Creating a **virtual W particle** uses **so much energy** that it can only exist for a **very short time** and it **can't travel far**.
- 2) On the other hand, the **photon** has **zero mass**, which gives you a force with **infinite range**.

## Fundamental Forces

Force	Diagram	Strength	Range (m)	Particle
<i>Strong</i>		1	$10^{-15}$ (diameter of a medium sized nucleus)	gluons, $\pi$ (nucleons)
<i>Electro-magnetic</i>		$\frac{1}{137}$	Infinite	photon mass = 0 spin = 1
<i>Weak</i>		$10^{-6}$	$10^{-18}$ (0.1% of the diameter of a proton)	Intermediate vector bosons $W^+$ , $W^-$ , $Z_0$ , mass > 80 GeV spin = 1
<i>Gravity</i>		$6 \times 10^{-39}$	Infinite	Particle graviton ? mass = 0 spin = 2

Prakticky ale odstínění díky existenci dvou nábojů

The **Larger the Mass of the Gauge Boson, the Shorter the Range of the Force**

# Antičástice

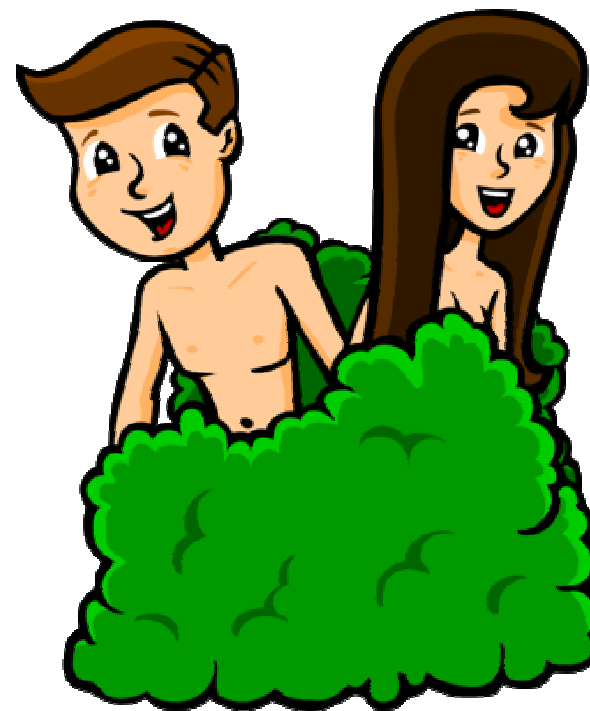
- **Antičástice** jsou rovněž elementární částice, které mají
  - určité fyzikální charakteristiky shodné s příslušnými elementárními částicemi
  - a jiné fyzikální charakteristiky opačného znaménka, resp. směru.
- Antičástice: **mají stejnou** hmotnost, spin, dobu života a velikost elektrického náboje jako částice
- **Liší se** ale **znaménkem** elektrického náboje, leptonového čísla, respektive baryonového čísla, **směrem** vlastního magnetického momentu vzhledem k vlastnímu momentu hybnosti, **popř. jinou vlastností**
- Charakteristickou vlastností antičástic je jejich intenzivní reakce s příslušnou částicí – obě během reakce zanikají a přeměňují se na lehčí částice, případně fotony



# Antičástice

I antičástice patří do běžného světa

- Pokud jsou všechny fyzikální charakteristiky spadající do druhé z uvedených skupin charakteristik nulové, nelze částici a antičástici odlišit žádnou fyzikální vlastností. Částice je v tomto případě totožná se svou antičásticí, hovoříme též o **skutečně neutrální částici**.
- Stručně se označuje jako **neutrální částice**, v tomto případě je třeba **rozlišovat neutrální částici** a např. elektricky neutrální částici, u které je nulový pouze elektrický náboj.
- Skutečně neutrální částicí je **foton**.
- **Neutron** je pouze elektricky neutrální. Antičásticí neutronu **je antineutron** – můžeme ho od neutronu rozlišit např. právě směrem magnetického momentu



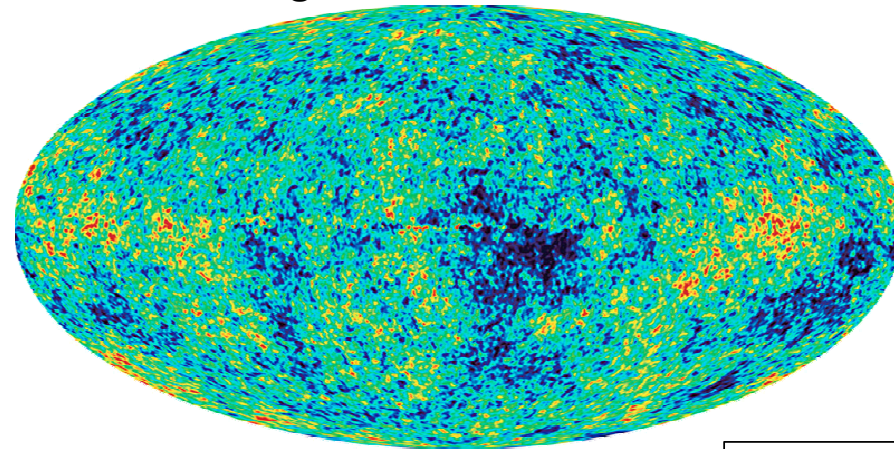
# ANIHILACE

HMOTA + ANTIHMOTA → **anihilace** → přeměna hmoty na fotony a mezony → mezony se rozpadají v konečném důsledku na fotony a neutrina → uvolnění energie:

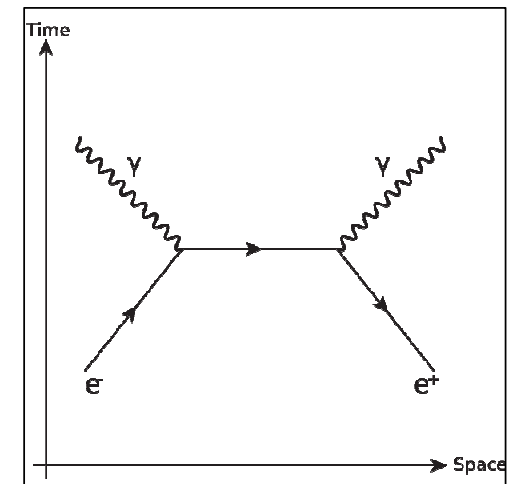
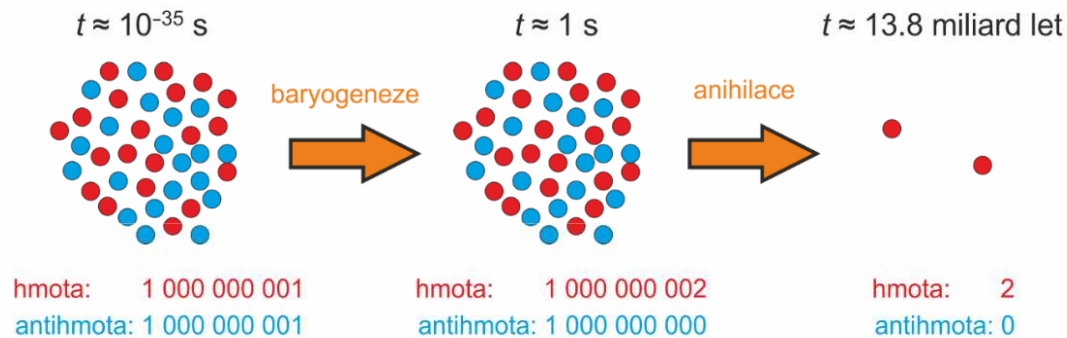
$$E = mc^2$$

přeměna klidové hmotnosti (energie) na energii → **nejkompaktnější zdroj energie**

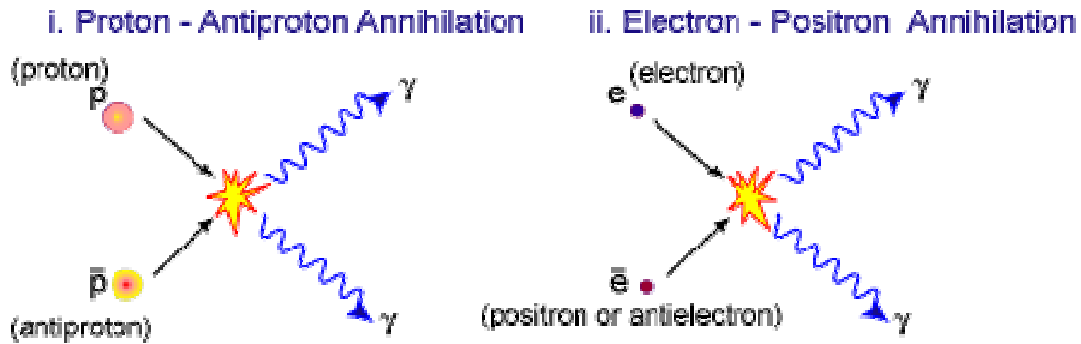
Počátek vesmíru → téměř shodné množství hmoty a antihmoty → obrovská anihilace (vzniká **reliktní záření**) – malý přebytek hmoty zůstává



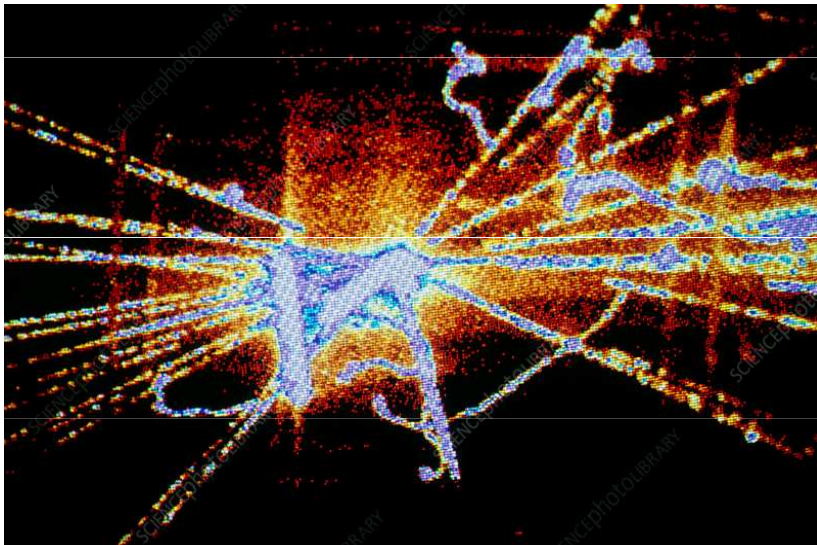
Největší anihilace v našem vesmíru nastala na jeho počátku a jejím pozůstatkem je reliktní záření



# ANIHILACE



In each case the particle and its antiparticle annihilate each other, releasing a pair of high-energy gamma photons



Computer-processed streamer chamber photograph of the tracks of subatomic particles produced in a proton- antiproton collision at a total energy of 900 GeV (CERN). The proton & antiproton have come in from the sides of the picture & annihilated at centre into pure energy; this energy rematerialises in a spray of new particles, mostly pions. Recorded 1985.



(veškerá hmota-klidová energie na kinetickou energii)

- **Anihilace (anti)p a (anti)n<sup>0</sup> → rozpad na mezony**

- mezony → miony + neutrina

- miony → e<sup>-</sup> + neutrina

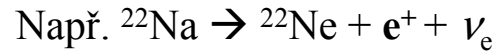
- e<sup>-</sup> reagují s e<sup>+</sup> → fotony γ + neutrina

(ta mají malinkatou hmotnost)

# ZDROJE ANTIHMOTY

## Přírodní zdroje :

- 1) **Rozpad beta plus** – zdroj pozitronů



- 2) **Kosmické záření** – srážka částic (jader)  
s vysokou energií → zdroj široké palety  
antičástic – **hlavně antiprotony**, vznik  
těžších antijader nepravděpodobný



Existence antihelia by byla důkazem antihvězd

## Umělé zdroje :

- 1) **Urychlovače** – podobně jako u kosmického  
záření – velmi vysoké energie, produkce v  
páru, urychlení na rychlosti  $v \approx c$

Jak antihmotu skladovat?

Uchovávání antičástic pomocí magnetického pole  
v podobě nabitých částic - plazmy → magnetické  
prstence, magnetické pasti – dnes až několik měsíců



Část zařízení LEAR pro produkci pomalých antiprotonů (protonový urychlovač v CERNu)



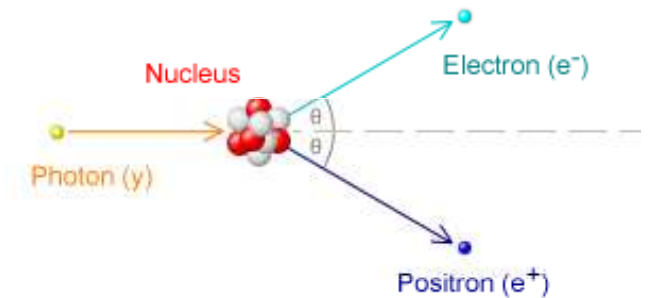
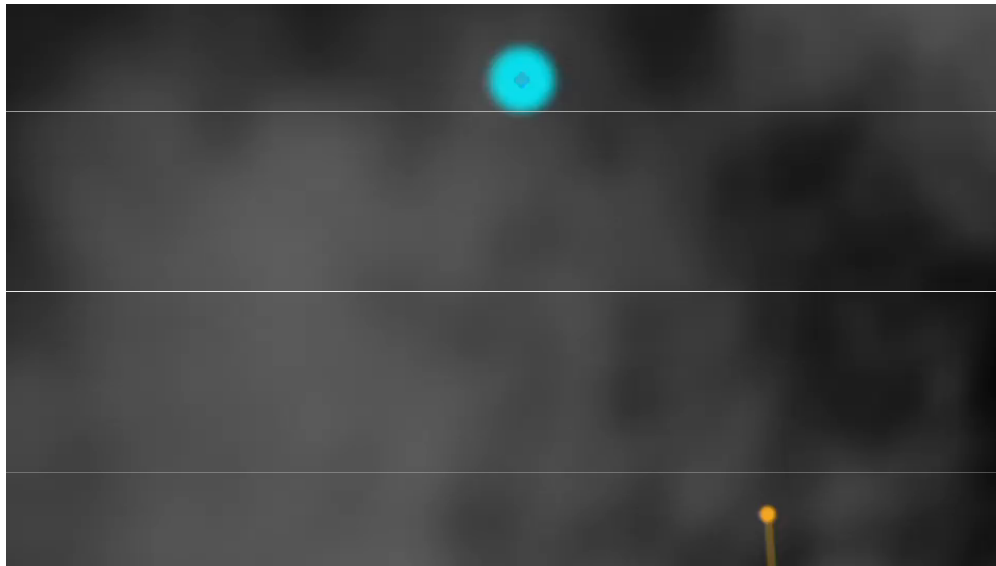
akumulační prstenec ISR v CERNu (Ženeva)

# BLESKY JAKO ZDROJ POZITRONŮ

- **Blesk = přírodní urychlovač** – e- jsou urychleny mezi vysokým napětím v mracích
- **NASA's Fermi Gamma-ray Space Telescope Catches Thunderstorms Hurling Antimatter into Space** (Released on January 10, 2011)

[Článek + různá videa dostupná na:](#)

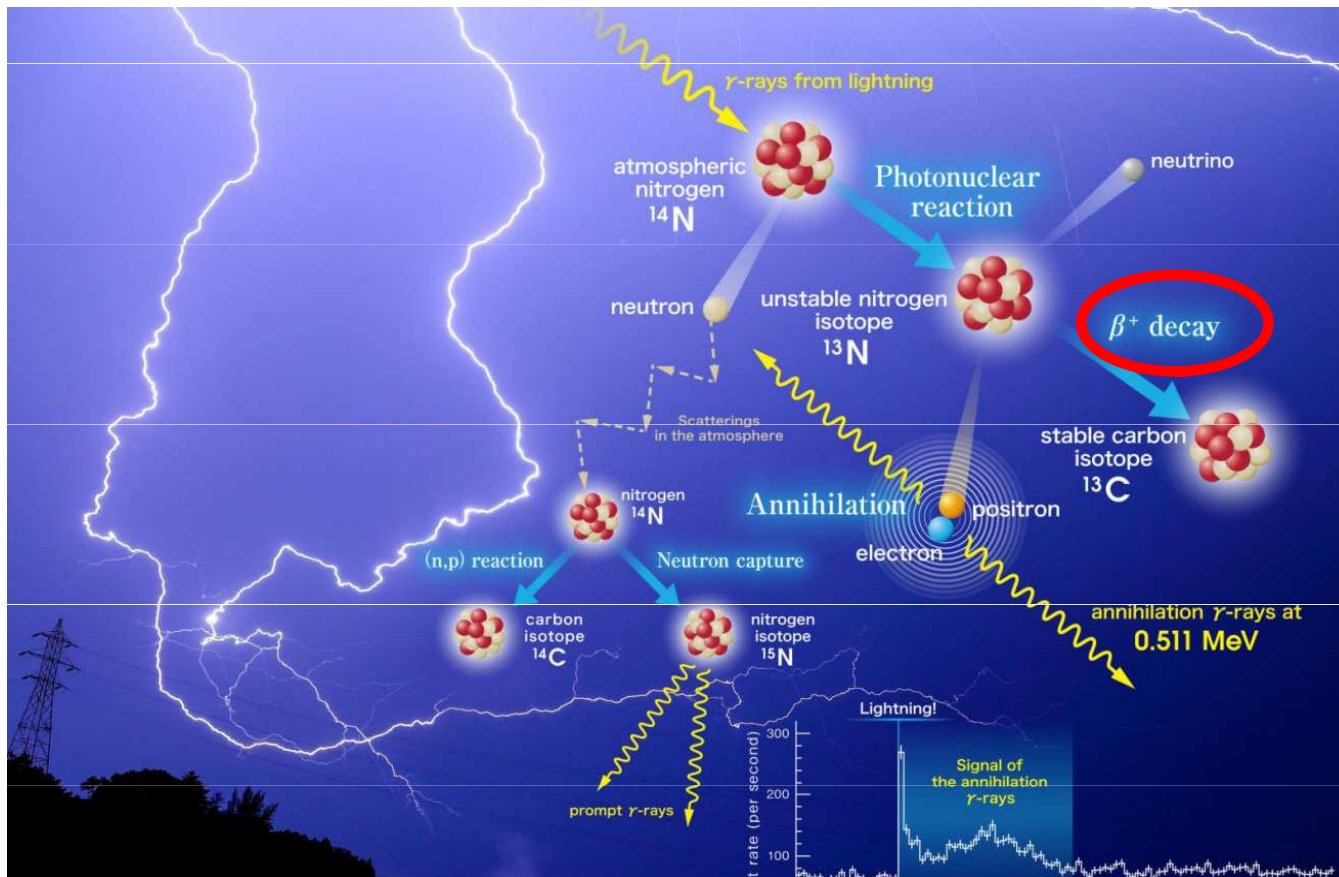
[https://www.nasa.gov/mission\\_pages/GLAST/news/fermi-thunderstorms.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/GLAST/news/fermi-thunderstorms.html)



Scientists using NASA's Fermi Gamma-ray Space Telescope have detected beams of antimatter (positrons) produced above thunderstorms on Earth, a phenomenon never seen before.

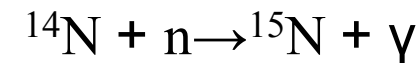
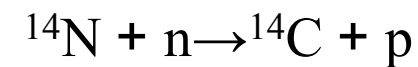
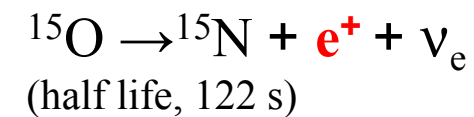
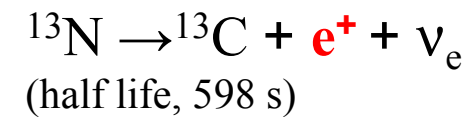
# BLESKY JAKO ZDROJ POZITRONŮ

Teruaki Enoto et al., *Nature*, November 2017 | voL 551 (originální článek: <https://www.nature.com/articles/nature24630.pdf>)



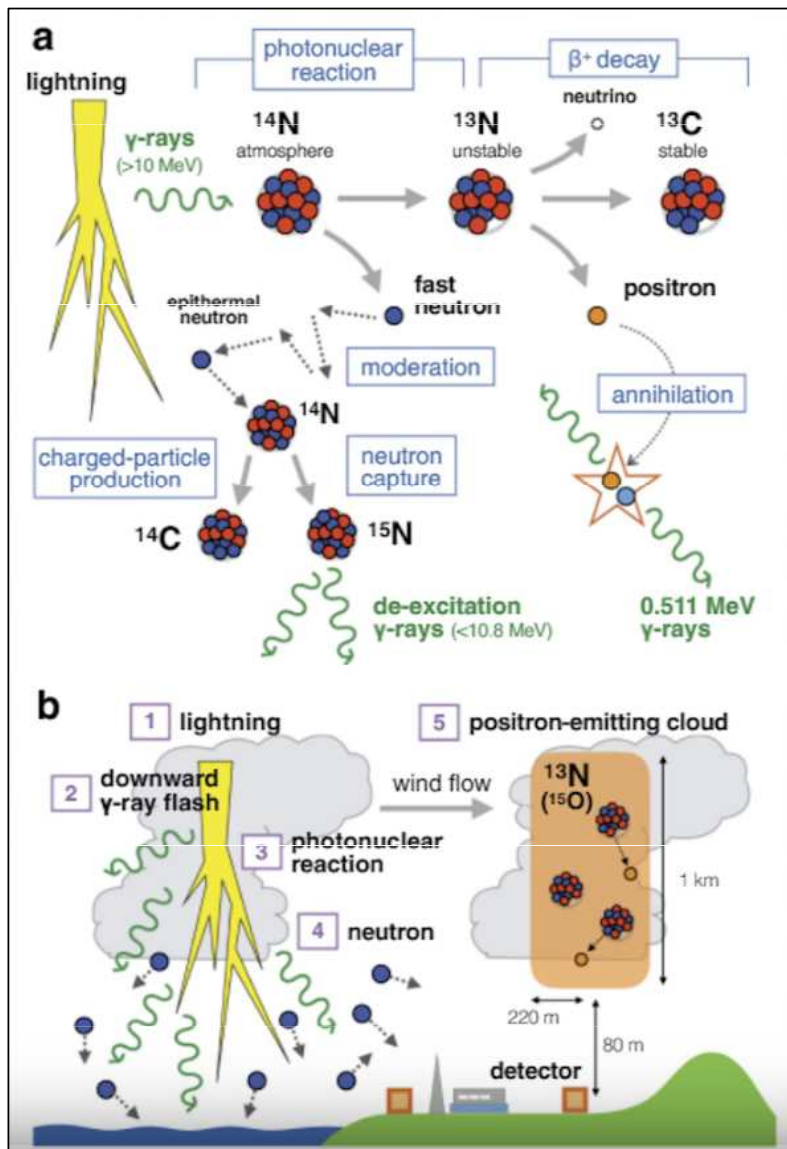
[https://www.kyoto-u.ac.jp/en/research/research\\_results/2017/171123\\_1.html](https://www.kyoto-u.ac.jp/en/research/research_results/2017/171123_1.html)

$^{13}\text{N}$  and  $^{15}\text{O}$ , decay gradually into stable  $^{13}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}$  nuclei via  $\beta^+$  decays:



producing quasi-stable  $^{14}\text{C}$  nuclei (with a half life of 5,730 years) without emitting any strong  $\gamma$ -rays

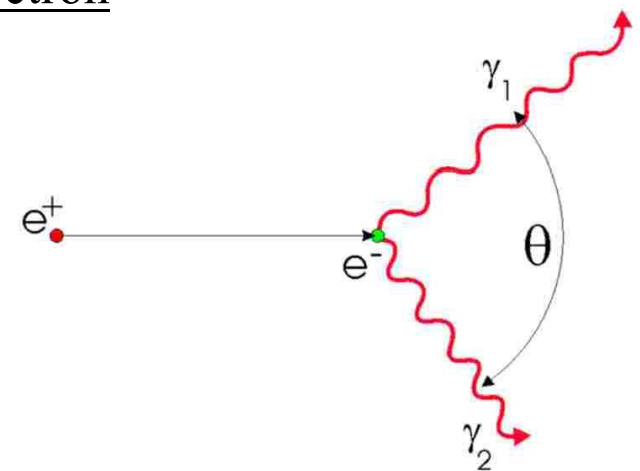




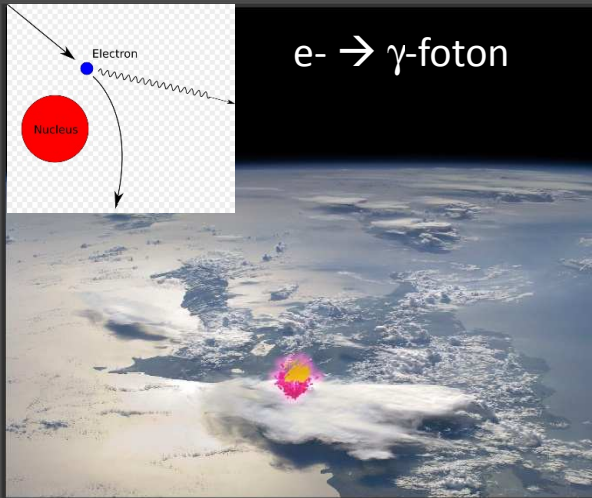
# BLESKY JAKO ZDROJ $e^+$

Teruaki Enoto et al., *Nature*, November 2017 | voL 551  
 (originální článek: <https://www.nature.com/articles/nature24630.pdf>)

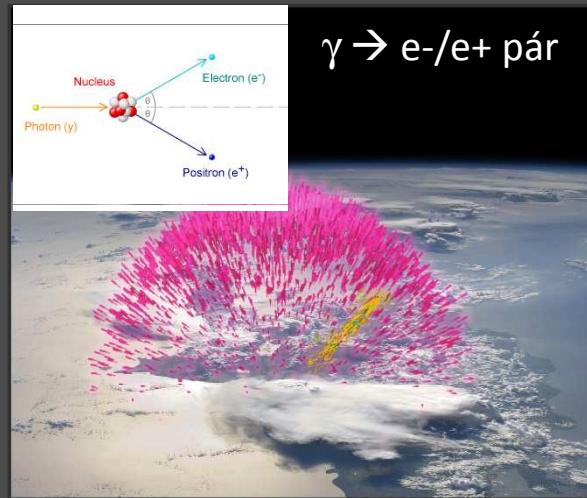
- region, or ‘cloud’, filled with these isotopes emits positrons for more than 10 min
- A **positron** emitted from  $^{13}\text{N}$  or  $^{15}\text{O}$  travels a few metres in the atmosphere, **annihilates** quickly in meeting an ambient electron
- ...and radiates **two 0.511-MeV photons**, the atmospheric mean free path of which is about 89 m



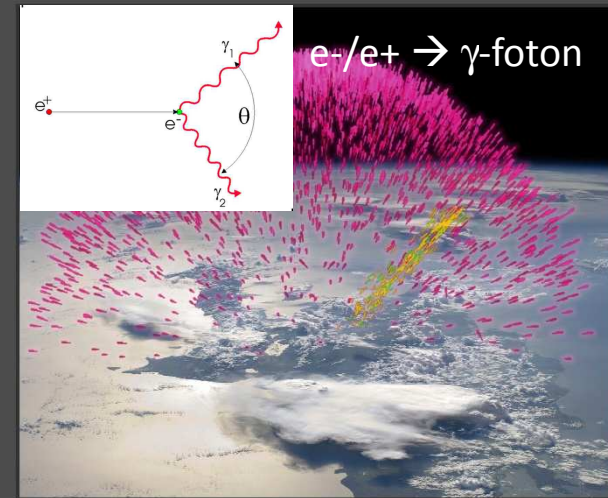
# How thunderstorms launch particle beams into space



$e^- \rightarrow \gamma\text{-foton}$



$\gamma \rightarrow e^-/e^+\text{ pár}$



$e^-/e^+ \rightarrow \gamma\text{-foton}$

1. Electric fields near the top of the storm create an upward-moving avalanche of **electrons**. When their paths are deflected by molecules in the air, these electrons emit **gamma rays**, the highest-energy form of light.

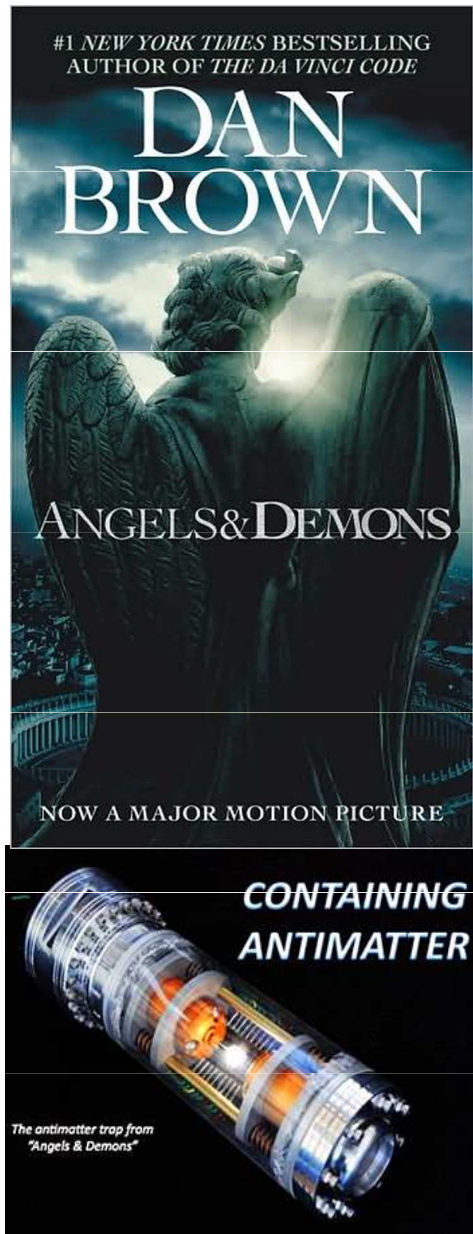
These images are based on a TGF simulation by Joseph Dwyer at the Florida Institute of Technology. This frame tracks the gamma rays and particles from a 0.2-millisecond-old TGF that began at an altitude of 9.3 miles (15 km).

2. When gamma-ray energy collides with electrons, they accelerate to near the speed of light. Some gamma rays pass near the nuclei of atoms. When this happens, the gamma ray transforms into an electron and its antiparticle, a **positron**.

These high-energy electrons and positrons escape into space by spiraling along Earth's magnetic field. In this frame, the TGF is 1.4 milliseconds old.

3. Here the TGF is 1.98 milliseconds old, and its electron/positron beam is reaching altitudes where it may intercept spacecraft, such as NASA's Fermi Gamma-ray Space Telescope.

Fermi's Gamma-ray Burst Monitor detected a signal characteristic of positron annihilation. When a positron collided with an electron on the spacecraft, the two particles transformed into gamma rays.



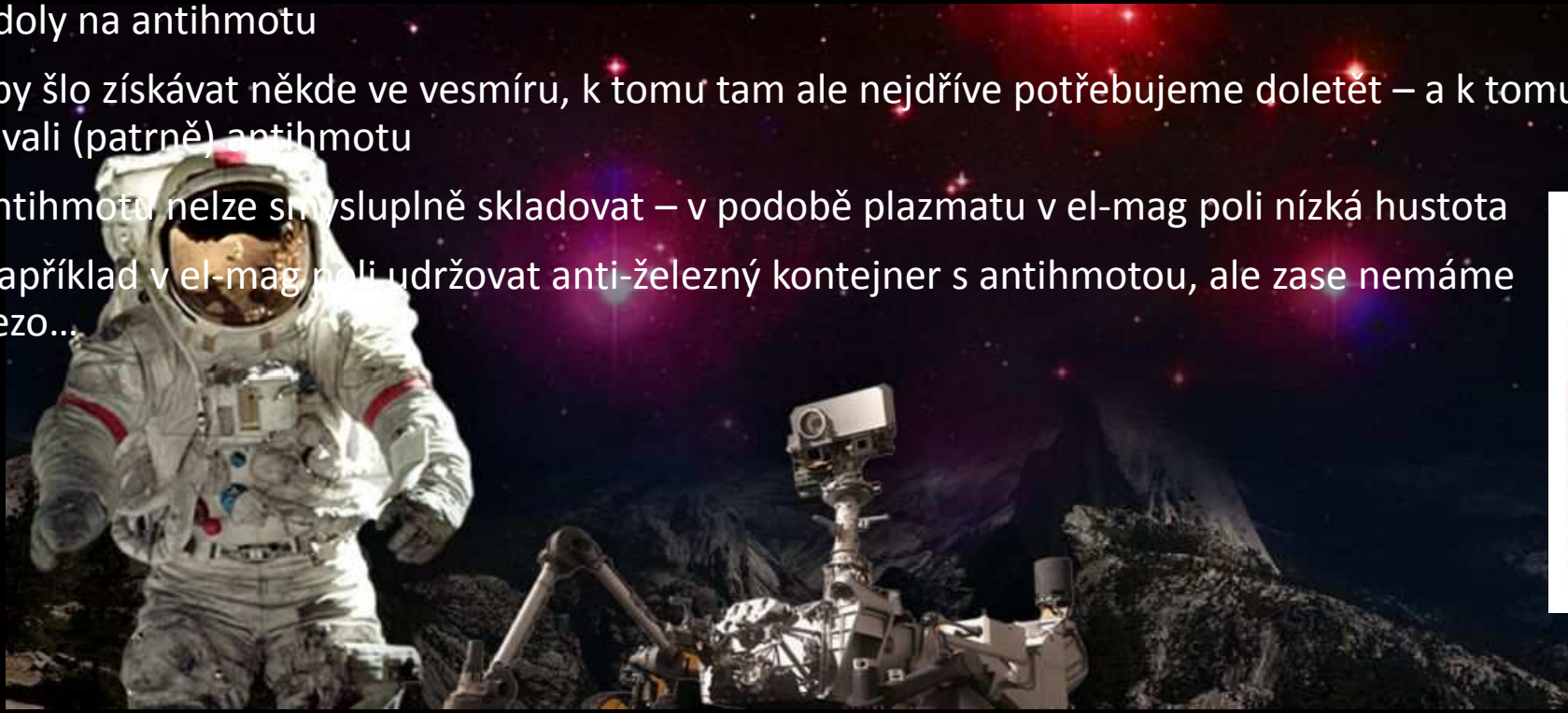
# Antihmotová bomba

- Primární výhoda antihmotové zbraně → mnohem vyšší účinnost než vodíková (fúzní) bomba (ta úč. pouze asi 7-10%).
- Při chemických reakcích se může z jednoho kilogramu hmoty uvolnit max.  **$10^7$  J**,
- při štěpných jaderných reakcích maximálně  **$8 \times 10^{13}$  J**
- a při termonukleární fúzi maximálně  **$3 \times 10^{14}$  J**
- Naproti tomu při anihilaci dojde k uvolnění veškeré energie z hmoty dle  $E = mc^2$
- – tedy  **$9 \times 10^{16}$  J** z 1 kg
- Sic je zapotřebí stejné množství antihmoty + hmoty →  $E = 2mc^2$
- ...tzn., pro 1 g antihmoty + 1 g hmoty  
→  $2 * 0.001 \text{ [kg]} * 300\,000\,000^2 \text{ [ms}^{-1}\text{]} = \mathbf{1.8 * 10^{14} \text{ J}}$ .
- Pokud 1 kt TNT =  $4.184 * 10^{12}$  J, pak 1 g antihmoty + 1 g hmoty = 43 kt TNT (ačkoliv ztráty díky produkci neutrin).

# Problémy s antihmotou

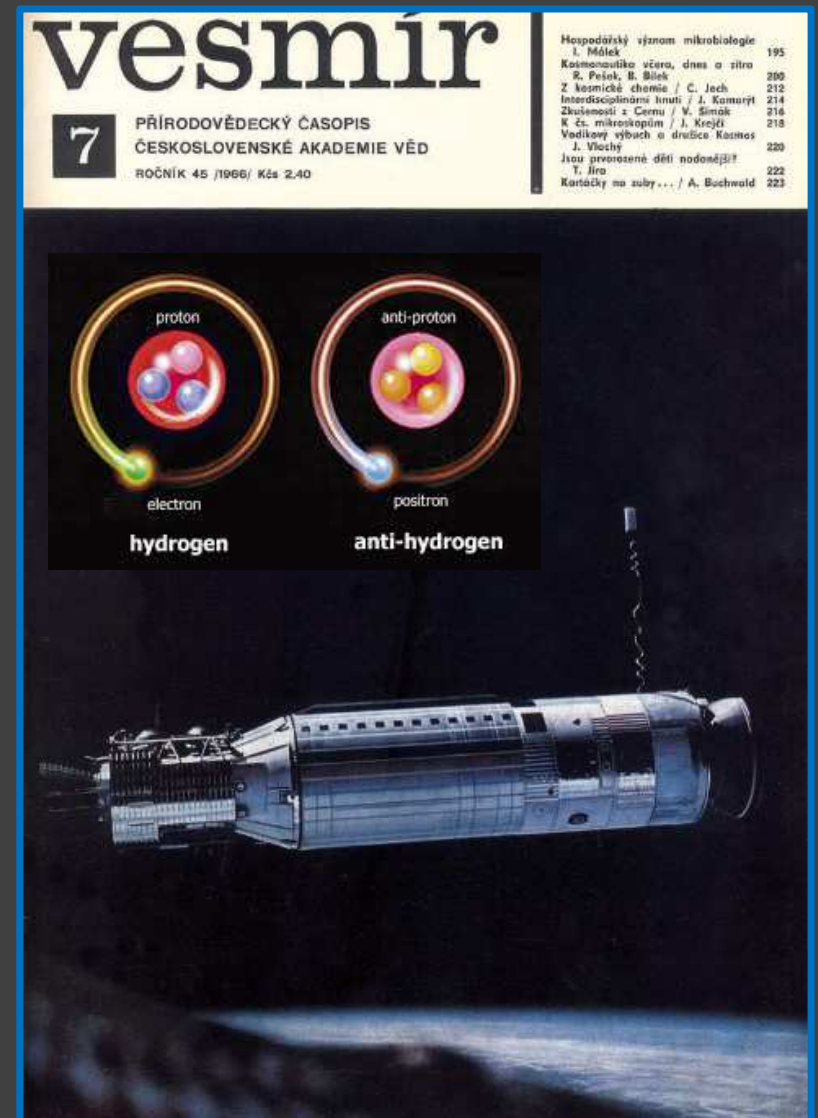
Přednáška prof. Vladimír Wagner: Antihmota ve vesmíru, 2016  
[https://www.youtube.com/watch?v=oyqus\\_9xPis](https://www.youtube.com/watch?v=oyqus_9xPis)

- Jen malé výtěžky: Za současného stavu > 2 mld let pro výrobu 1 g antihmoty na bombu se stejnou ničivostí jako „typická“ jaderná bomba.
- Ve skutečnosti, kdyby se sebrala veškerá antihmota, která kdy byla v CERNu vyrobena, a nechala by se zanihilovat, získali bychom energii, která by sotva stačila k rozsvícení jediné elektrické žárovky na pár minut.
- Výroba antihmoty extrémně náročná a drahá (63 bilionů ( $10^{12}$ ) USD/gram)
- Nejsou doly na antihmotu
- Možná by šlo získávat někde ve vesmíru, k tomu tam ale nejdříve potřebujeme doletět – a k tomu bychom potřebovali (patrně) antihmotu
- Zatím antihmotu nelze smysluplně skladovat – v podobě plazmatu v el-mag poli nízká hustota
- Šlo by například v el-mag poli udržovat anti-železný kontejner s antihmotou, ale zase nemáme anti-železo...



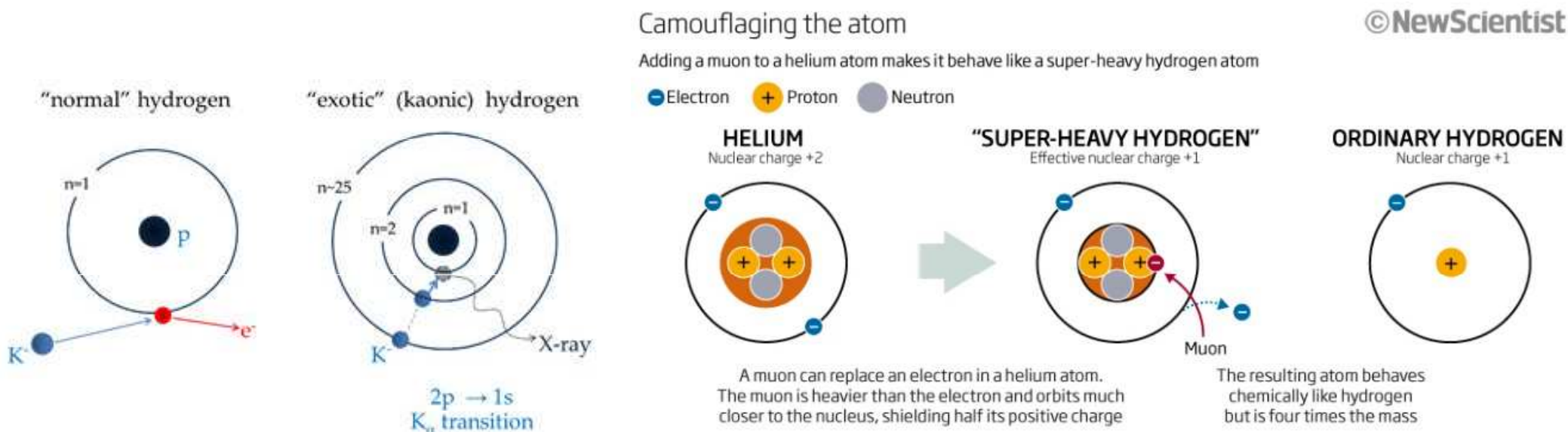
# ANTIATOMY (ANTI-DEUTERON)

- Vznik **anti-deuteronu**. Je to **prvé „anti-jádro“** (tedy jádro atomu antimoty, složené z **více elementárních částic**, i když zatím jen ze dvou), jehož existence byla fyzikálně prokázána.
- Je složeno z **antiprotonu** a **antineutronu** a představuje **anti-jádro těžkého vodíku**, tedy **anti-deuteria**.
- Tento objev je přímým důkazem možnosti existence antimoty (z níž jsme dosud znali jen elementární částice) s obdobnými jadernými vaznými silami jako v normálních atomových jádrech.
- Pojem antimoty složené ze záporně nabitých jader, kolem nichž obíhají kladně nabité pozitrony, se tak dostává z oblasti spekulativní do oblasti reálných fyzikálních výzkumů.
- M. Černocho (Vesmír, 45, 222, 1966/7)

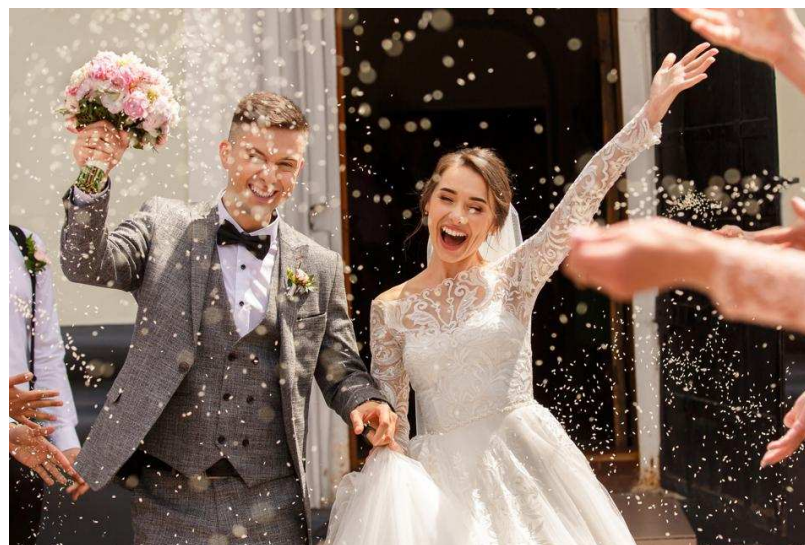
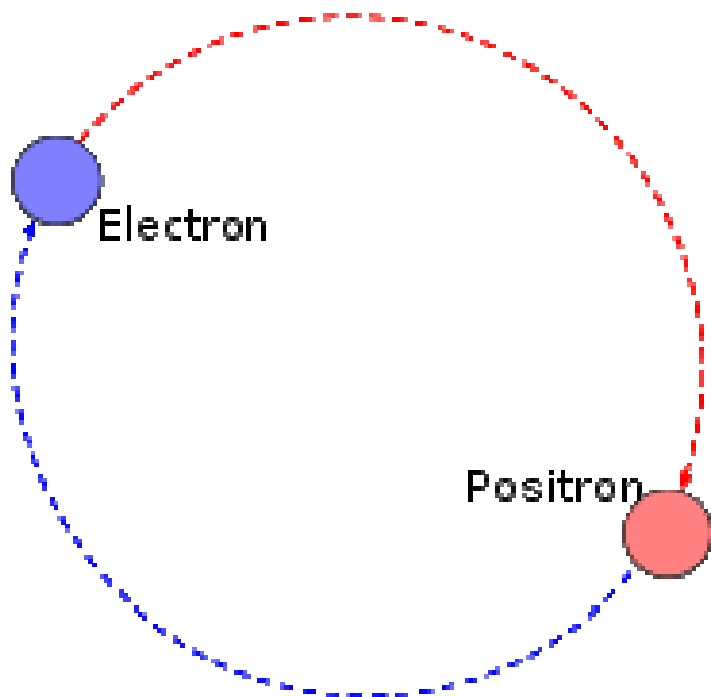


# EXOTICKÉ ATOMY a ANTIATOMY

- Některé nestálé částice mohou v atomech nahrazovat elektrony respektive nukleony
- Náhrada  $e^-$  → např. **záporným mionem** nebo **záporným mezonem K** nebo **antiprotonem**
- Náhrada  $n^0$  → např. **hyperonem**  $\Lambda$
- Takovéto atomy se nazývají jako „**EXOTICKÉ ATOMY**“ a vznikají při průchodu nestálých částic hmotou. Exotické atomy jsou však vzhledem ke krátké životnosti částic nestálé



# Koexistence hmoty a antihmoty - Positronium (Ps):



Positronium (Ps): Hmota a antihmota může tvořit i **metastabilní** útvar

# Antičástice (předpověděl Paul Dirac, 1928)

K libovolné elementární částici existuje **antičástice**, která je rovněž elementární částicí

**kvarky**

**antikvarky**

**leptony**

**antileptony**

elektron, mion, tauon

pozitron, antimion, antitauon

**hadrony**

**antihadrony**

**baryony**

**mezony**

**antibaryony**

**antimezony**

$qqq$

$q\bar{q}$

$\bar{q}q\bar{q}$

$q\bar{q}$

proton, neutron ...

antiproton, antineutron ...

pí mezony, K mezony ...

pí mezony, K mezony ...

**jádra**

**antijádra**

**atomy**

**antiatomy**

**hmota**

**antihmota**


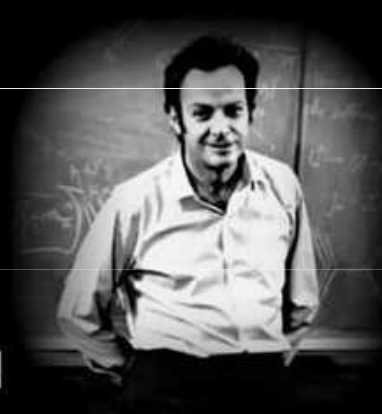
**hvězdy**

**antihvězdy ???**

**svět**

**antisvět ???**

## Antiparticles

Dirac Picture	Feynman Picture
“	“
Antiparticles are the particles that have negative energy.	Antiparticles are the particles with positive energy that move backwards in time.
	



**UP QUARK**  
A teeny little point inside the proton and neutron, it is friends forever with the down quark.

**DOWN QUARK**  
A teeny little point inside the proton and neutron, it is friends forever with the up quark.

**CHARMED QUARK**  
A second generation quark, it is charmed, indeed.

**STRANGE QUARK**  
Why is this second generation quark so strange?

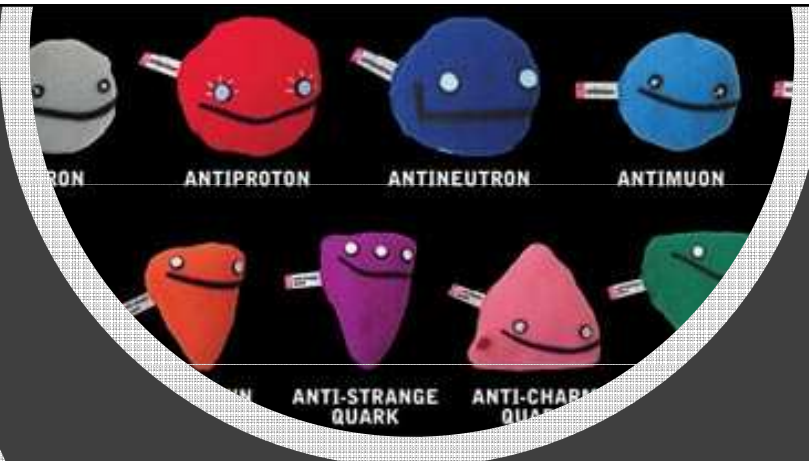
**BOTTOM QUARK**  
This third generation is putting pounds.

**MUON-NEUTRINO**  
A slightly heavier bandit than its sibling to the left.

**TAU-NEUTRINO**  
Wily and sly, this bandit's newest arrivals.

**ELECTRON**  
A familiar friend, this negatively charged, busy fella likes to bond.

**MUON**  
A "heavy electron" who lives fast & dies.



# STANDARD MODEL

PARTICLE „ZOO“ — **???**  
TOO MUCH TO BE FUNDAMENTAL PARTICLES

# Standardní model částic a co dál?

- Po objevu Higgsova bosonu (4. července 2012) je kompletní – prokázány všechny element. částice, které model vyžaduje
- Až překvapivě dobře popisuje jevy mikrosvěta. Veškeré experimenty prováděné na největších urychlovačích světa jsou s tímto modelem v souladu.
- **I přesto je zjevně neúplný**, a tudíž patrně nepředstavuje konečnou úroveň struktury mikrosvěta a jeho zákonů neboť:
- Má příliš mnoho volných (25) parametrů (tj. konstant jako hmotnosti, náboje a další)
- Nesjednocuje všechny tři síly (el-mag., silnou, slabou)
- Nezahrnuje gravitaci
- Další problémy (další slide)

Je to na závalu  
nebo je lze nějak  
spočítat?

Ideální model by měl obsahovat jedinou konstantu, ze které by vyplynuly veškeré hmotnosti, náboje a další vlastnosti všech elementárních částic.



## Otevřené problémy:

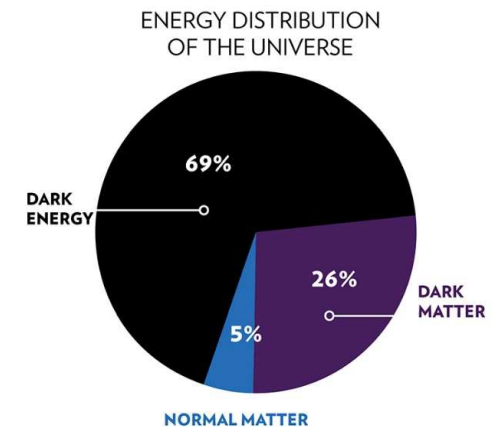
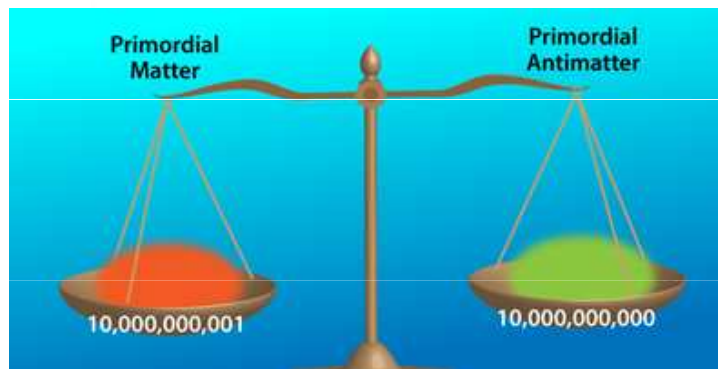
- proč jsou právě 3 generace
- otázky kolem hmotností neutrin
- proč není ve vesmíru stejně hmoty jako antihmoty
- temná hmota a energie ve vesmíru - až 95% hmoty a energie ve vesmíru je „něco jiného“
- .....

Generation			Charge
I	II	III	
u	c	t	$+2/3$
d	s	b	$-1/3$

Increasing mass

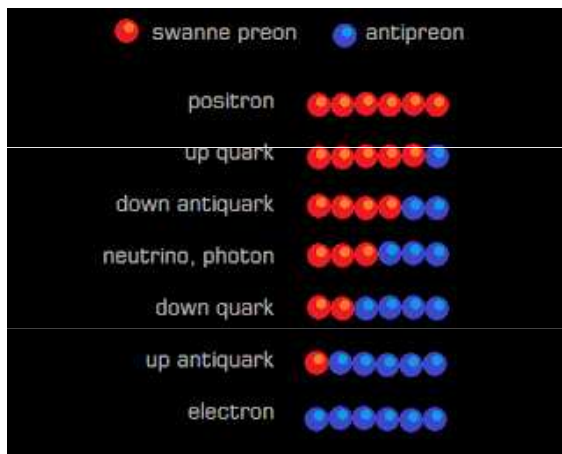
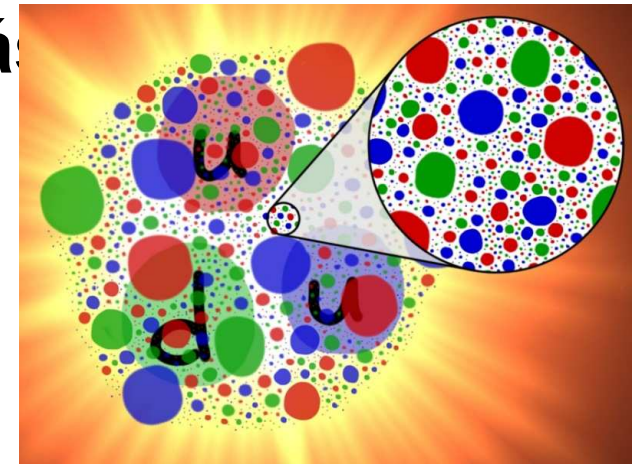


Illustration: © Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences



# KVARKY A LEPTONY – Fundamentální částice

- **Kvarky a leptony** se jeví jako **bodové** částice až na měřítko  $10^{-18}$  m.
- Přesto mohou mít kvarky a leptony společnou vnitřní strukturu –  
Proč je například velikost elektrického náboje shodná mezi  $p^+$  (složeným z kvarků) a  $e^-$  (leptonem)?
- hypoteticky se mohou skládat z **preonů** jak předpověděli Jogesh Pati a Abdus Salam (1974).  
**(neplést s PRIONY)**
- Experimentálně však vnitřní struktura leptonů a kvarků dosud objevena nebyla (první náznaky možná ve Fermilabu, 1994).



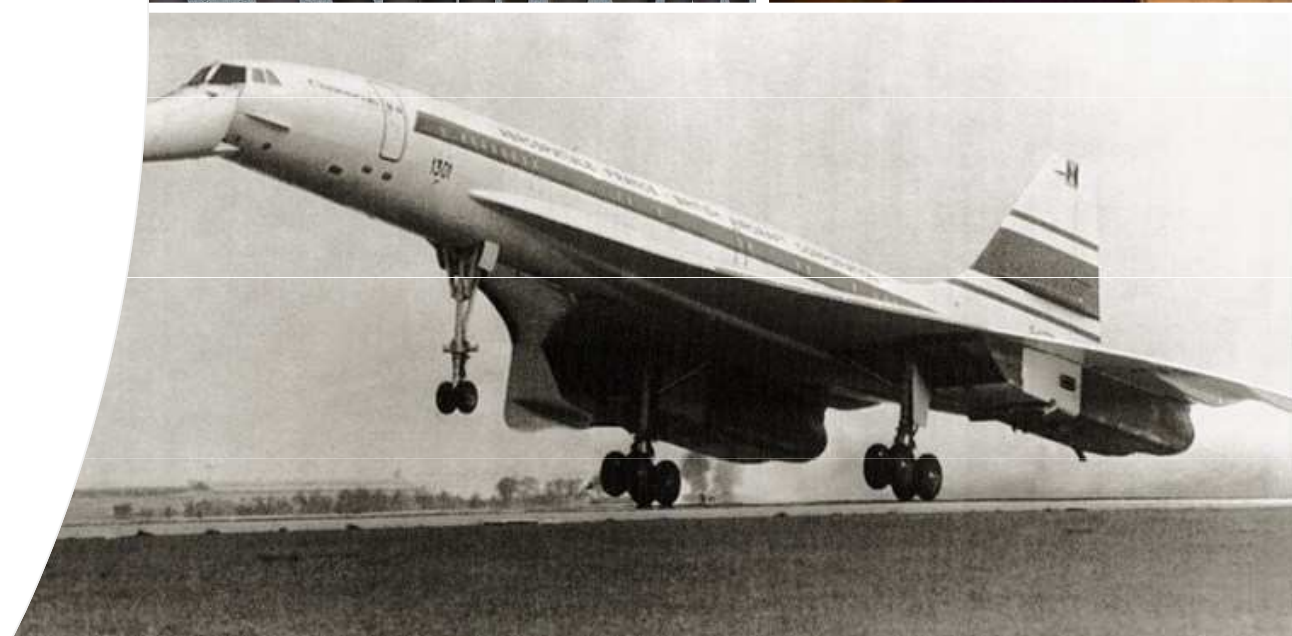
$aaaaaa = +1e = \text{positron}$   
 $aaaaab = +2e/3 = \text{up quark}$   
 $aaaabb = +e/3 = \text{down antiquark}$   
 $aaabbb = 0e = \text{neutrino and neutral boson}$   
 $aabbbb = -e/3 = \text{down quark}$   
 $abbbbb = -2e/3 = \text{up antiquark}$   
 $bbbbbb = -1e = \text{electron}$

**The Singular Primordial Preon Theory** is the first to propose that everything in the universe, may it be water, humans, nebulae, dinosaurs, light, perhaps even dark matter, is composed of a single preon and of its antipreon.

# 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...)





Pro děti na hraní



Vizuální model  
(co nejvěrnější zevní vzhled)



Funkční model  
(co nejvěrnější funkce,  
na hraní pro tatínky)

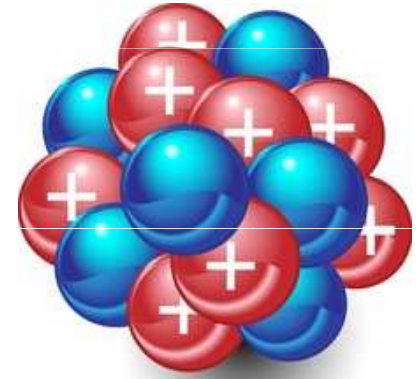


Prototypy...

# MODELY

---

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



shutterstock.com · 1170924397

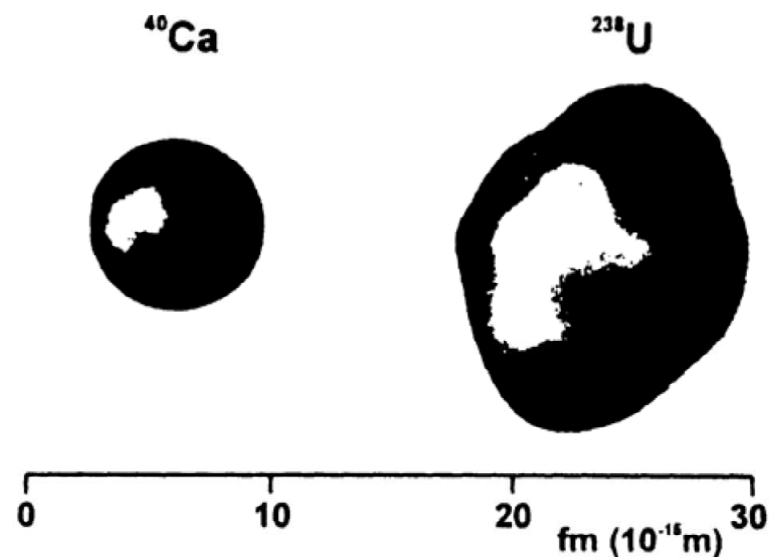
## 1. Kapkový model jádra

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).



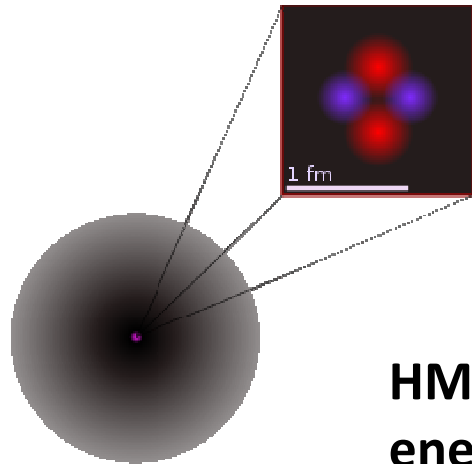
# Tvar a poloměr jádra

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



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

## POLOMĚR JÁDRA



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

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



### Objem jádra:

$$V_j = \frac{4}{3}\pi R_j^3$$

dle zdroje a atomu:  $r_0 = 1.2 \times 10^{-15}$  m, A = počet nukleonů

$$r^3 \propto A, V \propto A$$

### HMOTNOSTI a vazebné energie: $E = mc^2$

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

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

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

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

Atomová hmotnostní konstanta:  $\frac{1}{12}$   
klidové hmotnosti atomu  $^{12}_6\text{C}$

Atomová konstanta  $m_u$

$$\frac{A_u = 1}{m_u = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} = 931,5 \text{ MeV} c^{-2} = 1 \text{ Da (dalton)}$$

Proton p

$$\frac{A_p = 1,0078250}{m_p = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} = 938,3 \text{ MeV} c^{-2}$$

Neutron n

$$\frac{A_n = 1,0086649}{m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} = 939,6 \text{ MeV} c^{-2}$$

$$1 \text{ \AA} = 100 \text{ pm}$$

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)

# 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  $n^0$

$$m_p = 1.6726 \times 10^{-27} \text{ kg}; m_n = 1.6750 \times 10^{-27} \text{ kg}; m_e = 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$m_u = 1,6605 \times 10^{-27} \text{ kg (atomová hmotnostní konstanta)}$$

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

$$\rightarrow \Delta m = [Z \cdot m_p + (A-Z) \cdot m_n] - m_j(A,Z) = Z \cdot m_p - (A-Z) \cdot m_n = [Zm_p + (A-Z)m_n - M_j(A,Z)]u; u = 1.67377 \times 10^{-27} \text{ [kg]}$$

...se nazývá hmotnostní úbytek (B) (hmotnostní defekt, schodek),

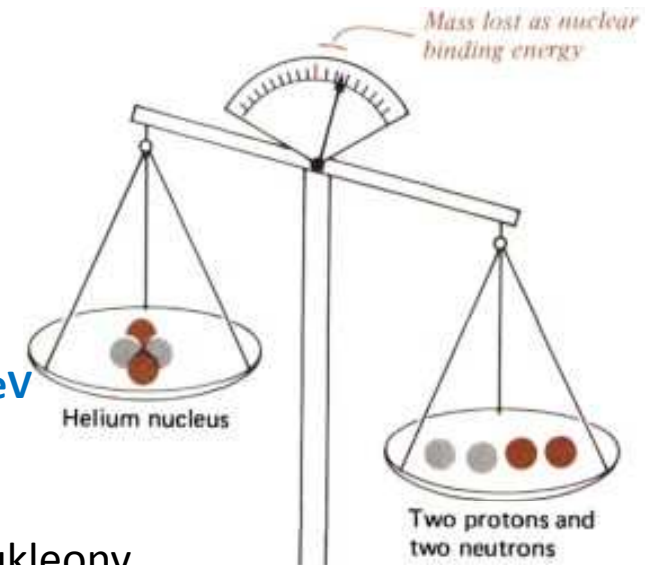
který má zápornou hodnotu,  $B_j(Z,A) < 0$ .  $B = \sum_{i=1}^A m_i - m$

- Jemu ekvivalentní energie je podle Einsteinova vztahu rovna energie:

$$E_v \text{ [J]} = Bc^2 = \Delta m \cdot c^2 \quad (E_v > 0) \quad \{ [Zm_p + (A-Z)m_n] - m_j(A,Z) \} c^2 - M_j(A,Z)u \cdot c^2;$$

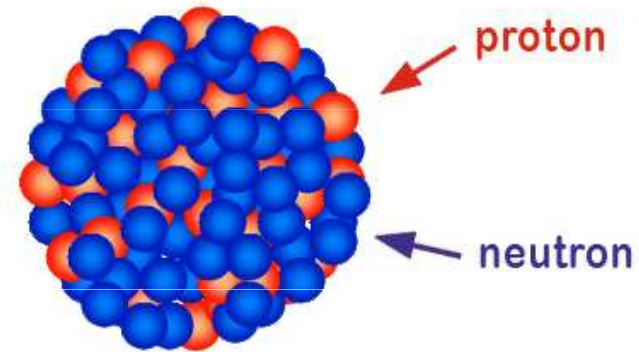
$$u \cdot c^2 = 931.5 \text{ MeV}$$

- 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



# Vazebná energie jádra

deuterium



Uranium Nucleus

Pro srovnání: vazebná energie atomu nepřevyšuje 0,12 MeV, vazebná energie elektronu v atomu vodíku je 13,6 eV. Vazebná energie atomů v molekulách je pouze několik eV

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:**

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

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

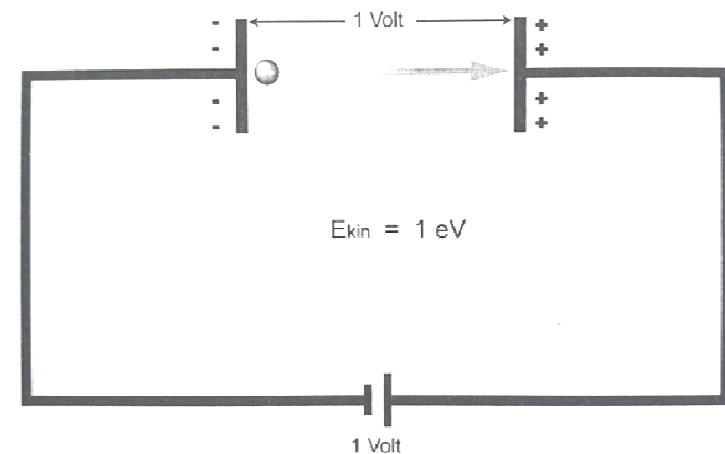
Energie jádra  
zbaveného  
jednoho  $p^+$   
nebo  $n^0$

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

- $\Delta m$  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]

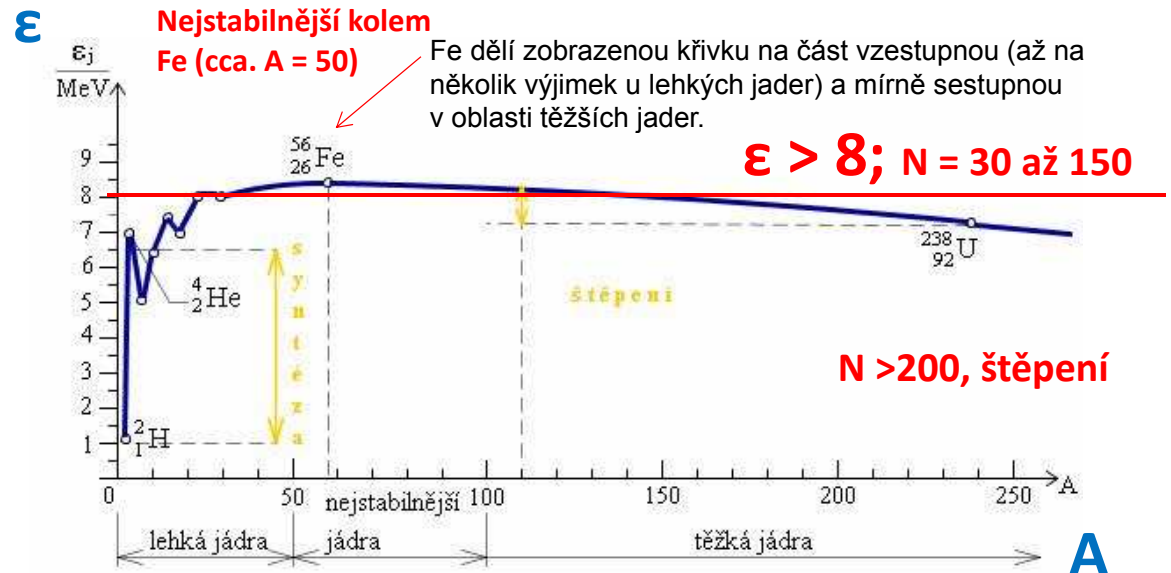
## Energie:

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



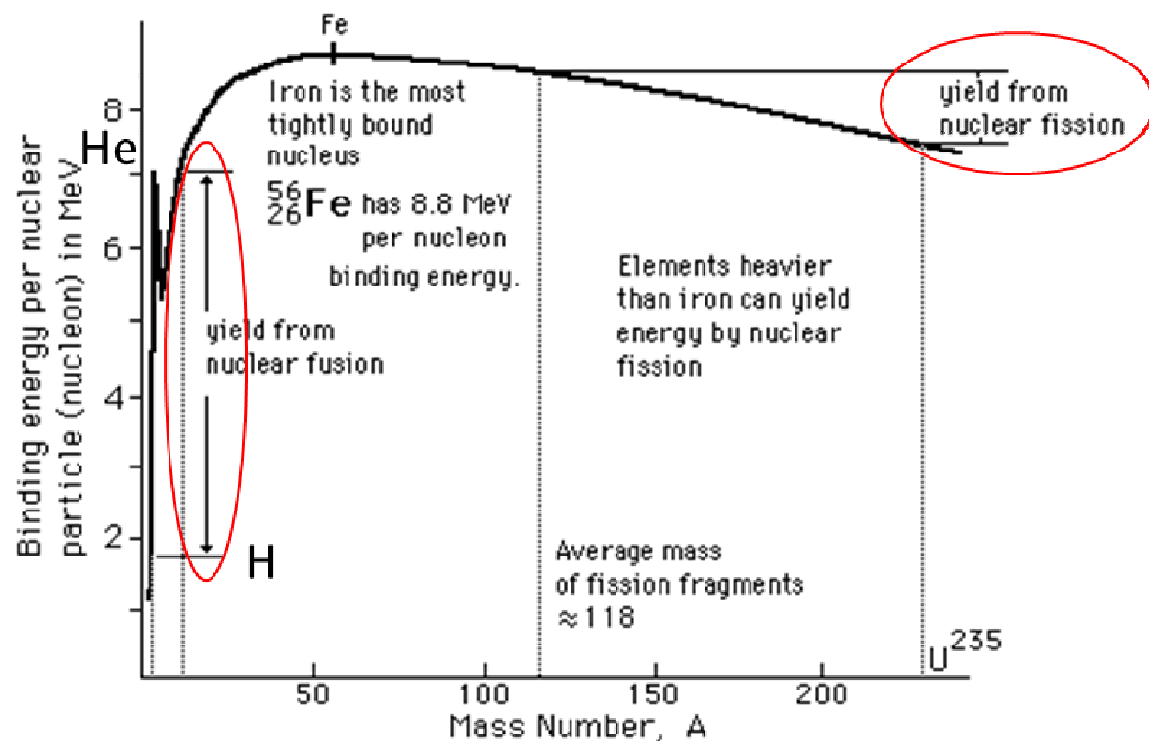
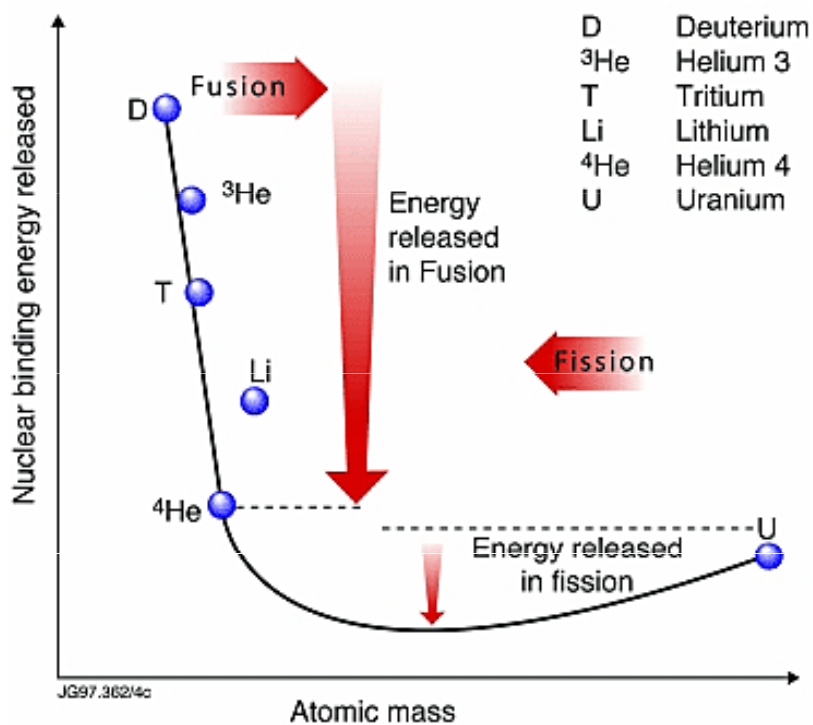
# HMOTNOST A VAZEBNÁ ENERGIE JÁDRA

- 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

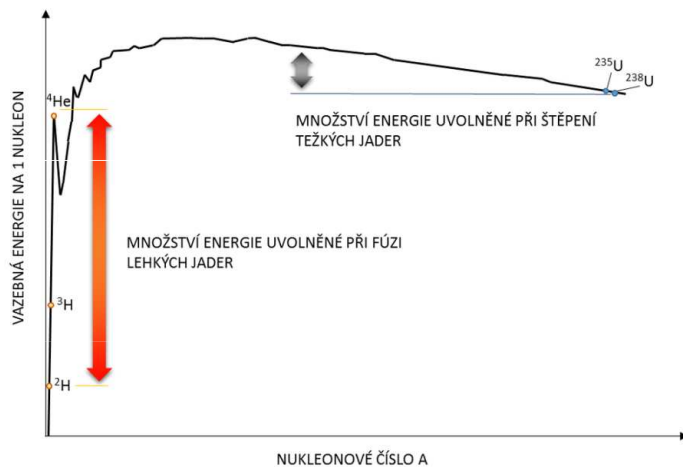


- Obecně lze konstatovat, že stabilita jader je záležitostí jejich složité vnitřní struktury. **Podle velikosti vazebné energie jádra vztažené na nukleon** můžeme jádra rozdělit na:
  - **nukleárně stabilní** (mají velkou vazebnou energii)
  - **nukleárně labilní**

# 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  $^{12}\text{C}$

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

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

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

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

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

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

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

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

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.

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

Při štěpení jednoho atomu  $^{235}\text{U}$  se uvolní asi 202,5 MeV ( $3,244 \times 10^{-11} \text{ J}$ ) energie, čemuž odpovídá 19,54 TJ/mol nebo 83,14 TJ/kg.

---

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.

# 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.  $r = r_0 \cdot A^{1/3}$
  - **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**

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

$$E_v = k_1 A - k_2 A^{2/3} - k_3 Z^2 A^{-1/3}$$

↓                      ↓                      ↓  
objemová e.    povrchová e.    coulombické odp. protonů

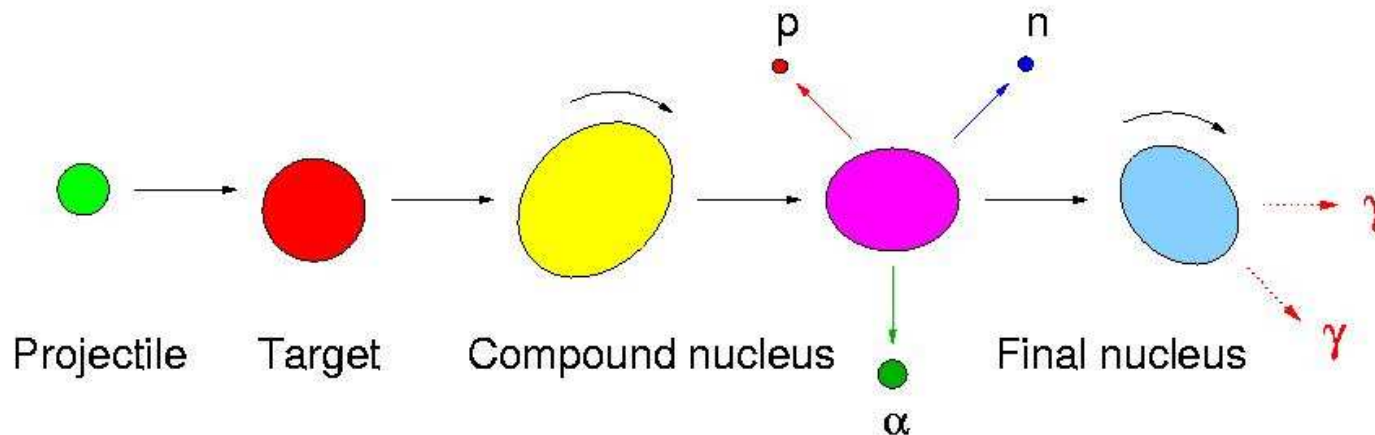
## 2. Statistický model

- 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)

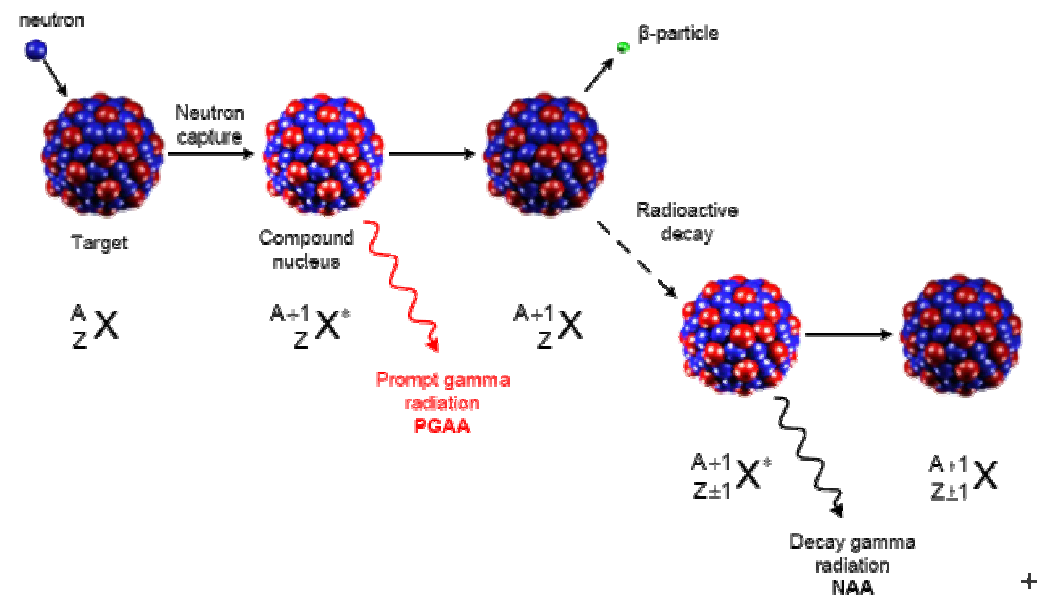
- Celkově lze tedy interakci jádra s prolétávající částicí zapsat:



- nebo zkráceně  $X(a,b)Y$  př.  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ ,
- deexcitace  $N^*$  může proběhnout vyzářením kvanta  $\gamma$ :

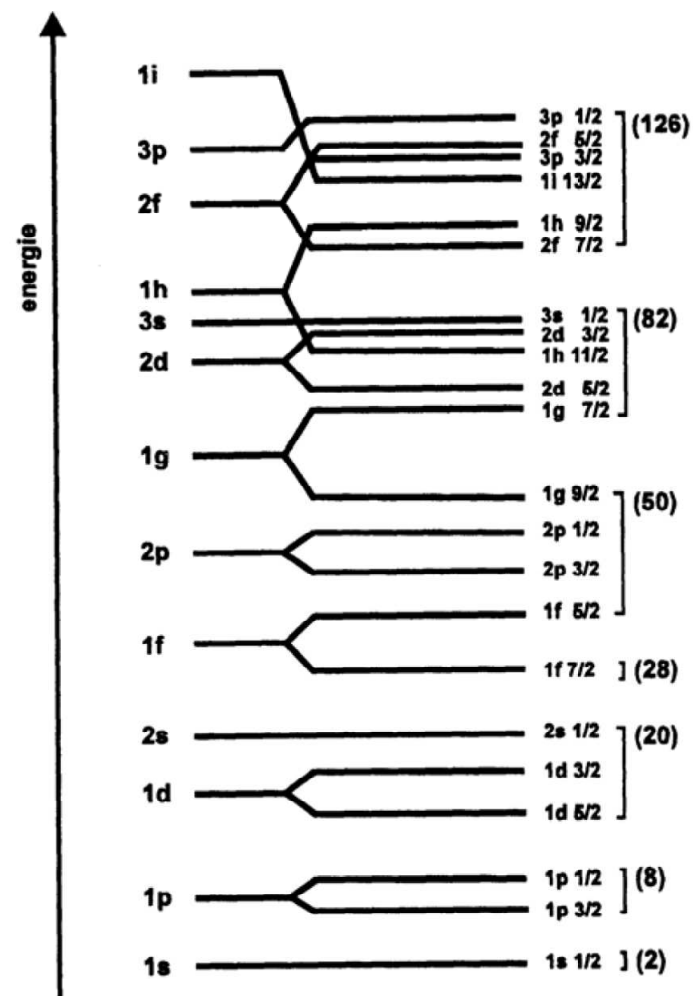


- Důležitým předpokladem je zde vzájemná nezávislost prvního a druhého stupně interakce: **způsob rozpadu  $N^*$  závisí pouze na jeho vlastnostech, nikoliv na procesech jeho vytvoření**
- slouží pro modelování jaderných reakcí.



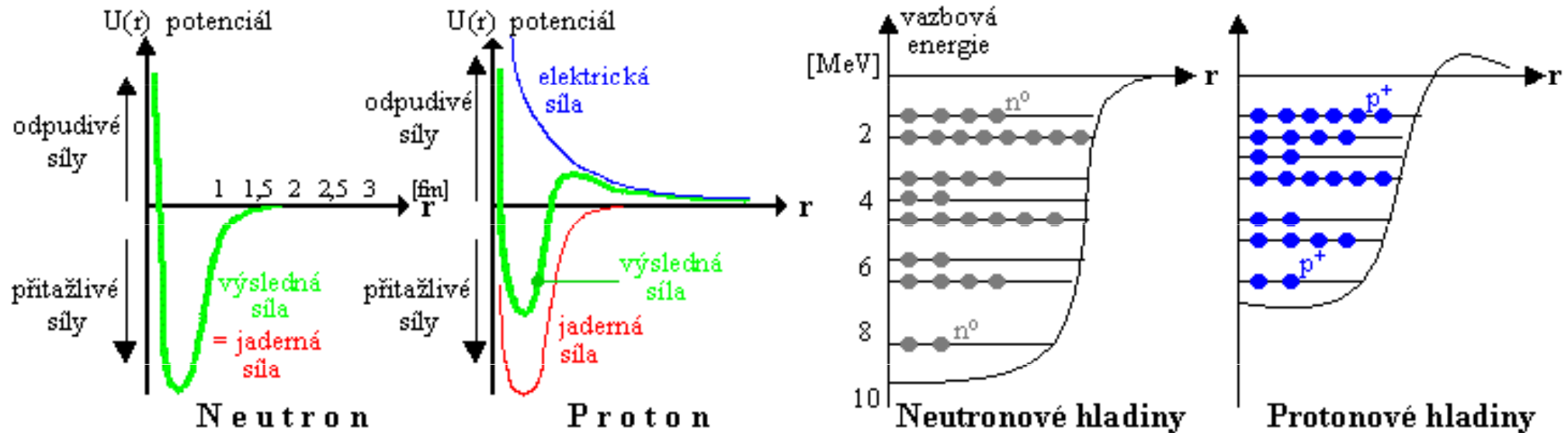
# 4. HLADINOVÝ MODEL JÁDRA

- $n^0$  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 odpudivé 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  $p^+$

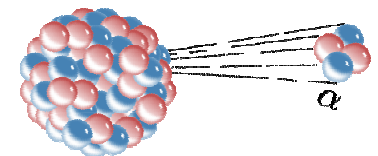
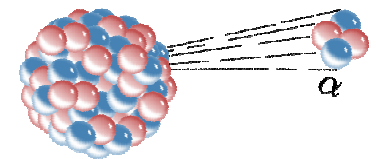
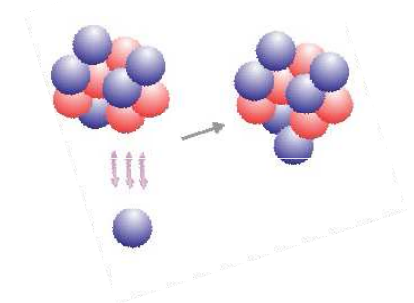


# (NE)STABILITA JADER ATOMŮ a RADIOAKTIVITA

- 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 ( $\gamma$ )

# 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  $T_m$  (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  $^4_2\text{He}$  →  $^4_2\text{He}$**  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



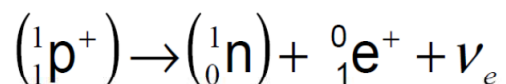
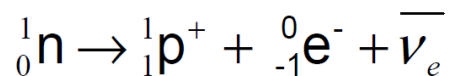
H																	He									
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne									
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar									
K	Ca											Ga	Ge	As	Se	Br	Kr									
Rb	Sr											In	Sn	Sb	Te	I	Xe									
Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn					
Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	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  $\beta^-$**  (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 vyzařením **fotonů $\gamma$**

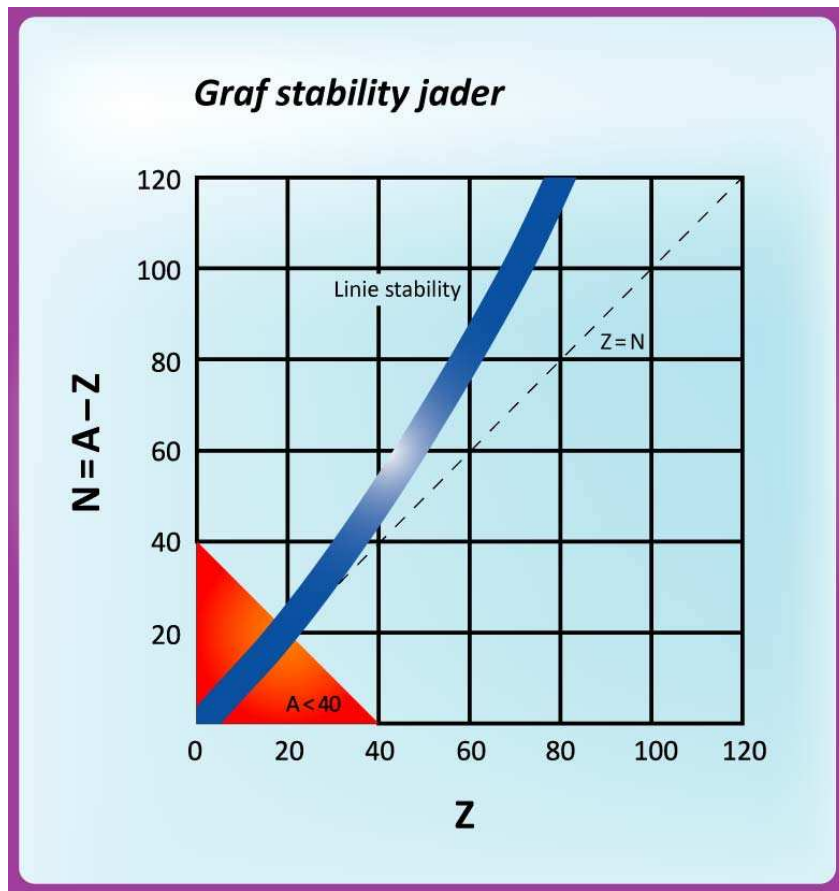
# STABILITA JADER ATOMŮ

Pro stabilní jádra s  $A < 20$  (40) platí, že se soustředují 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).

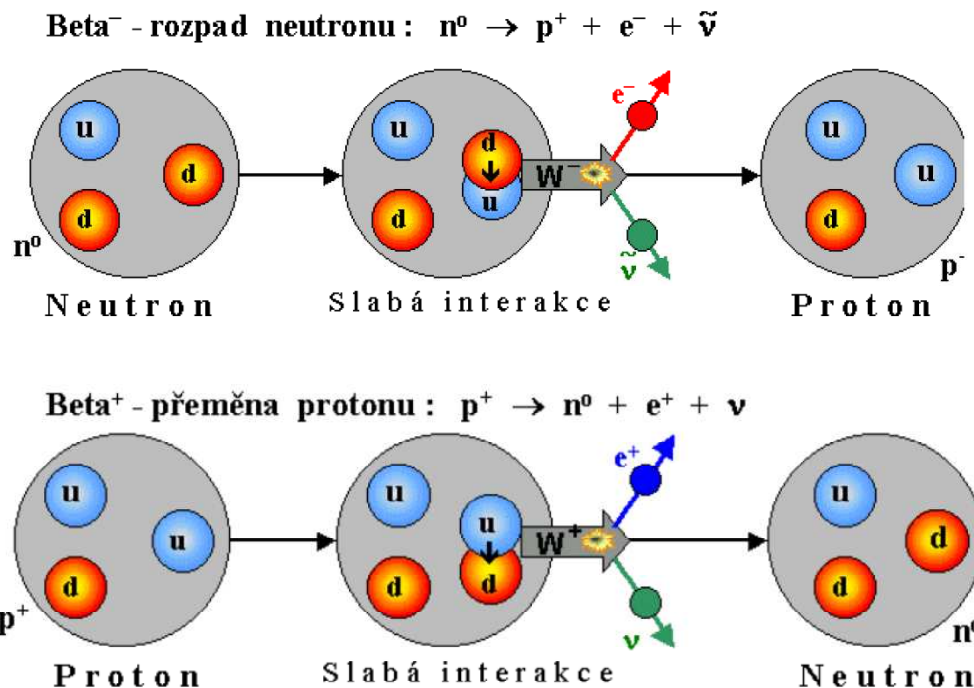
## Pro $A > 20$ (40)

- u stabilních jader postupně  $n^0 > p^+$
- způsobeno skutečností, že **při vzrůstajícím  $Z$  roste odpudivá coulombická interakce protonů** v jádře (náboj jádra je úměrný  $Z$ ).
- **El-mag. interakce** mají teoreticky nekonečný dosah, a tudíž na rozdíl od silné interakce působící jen na velice krátké vzdálenosti **nejsou satureovány**
- 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)

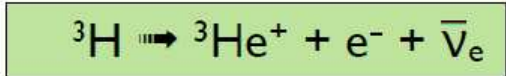
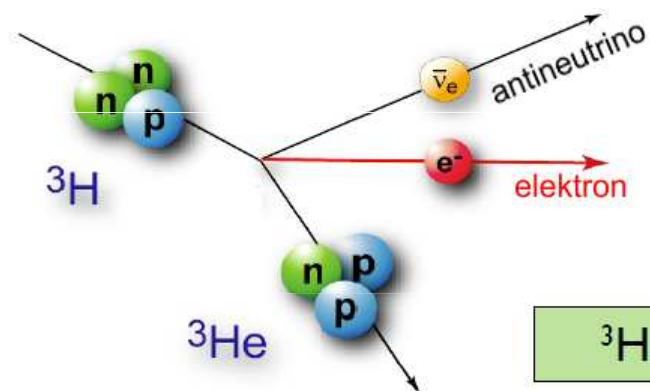
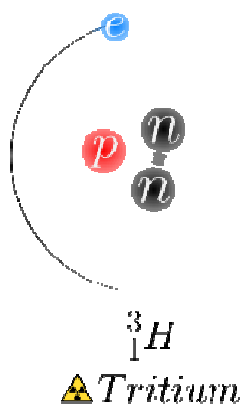
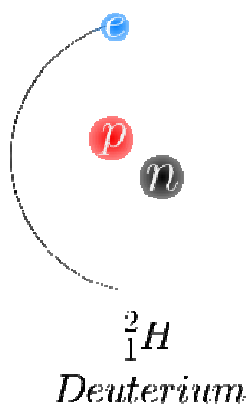
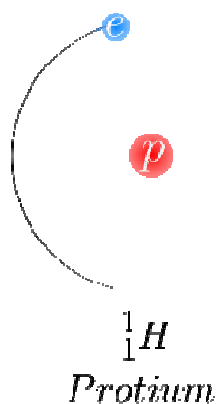


# STABILITA JADER ATOMŮ – NUKLEONŮ

- 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



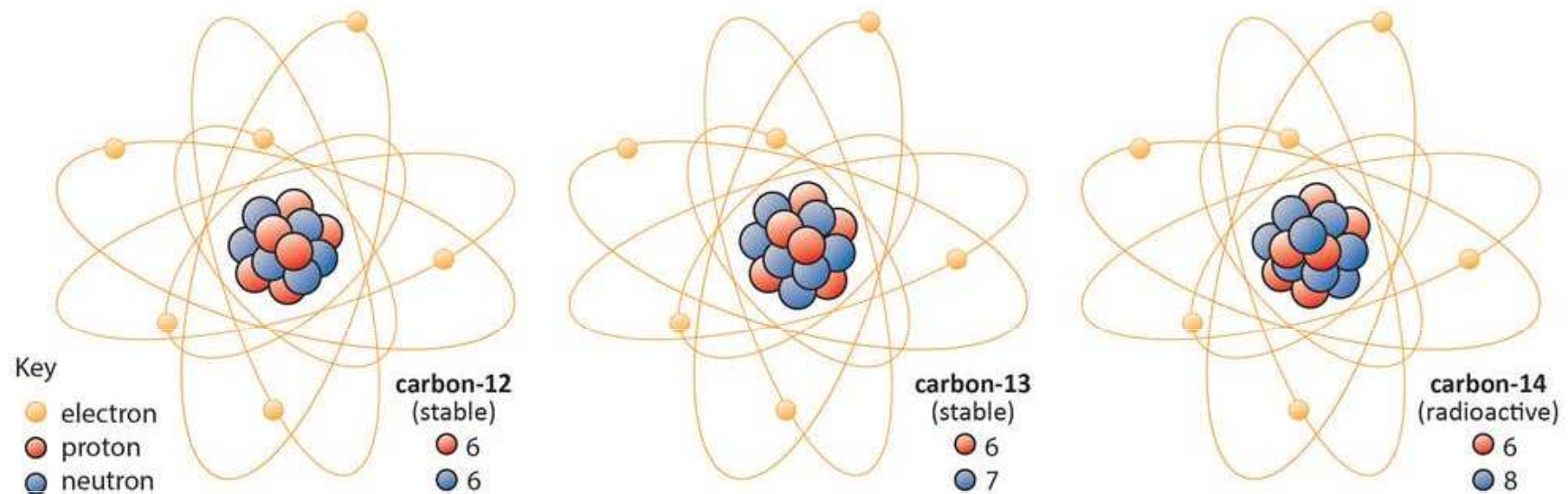
Tritium



- 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).

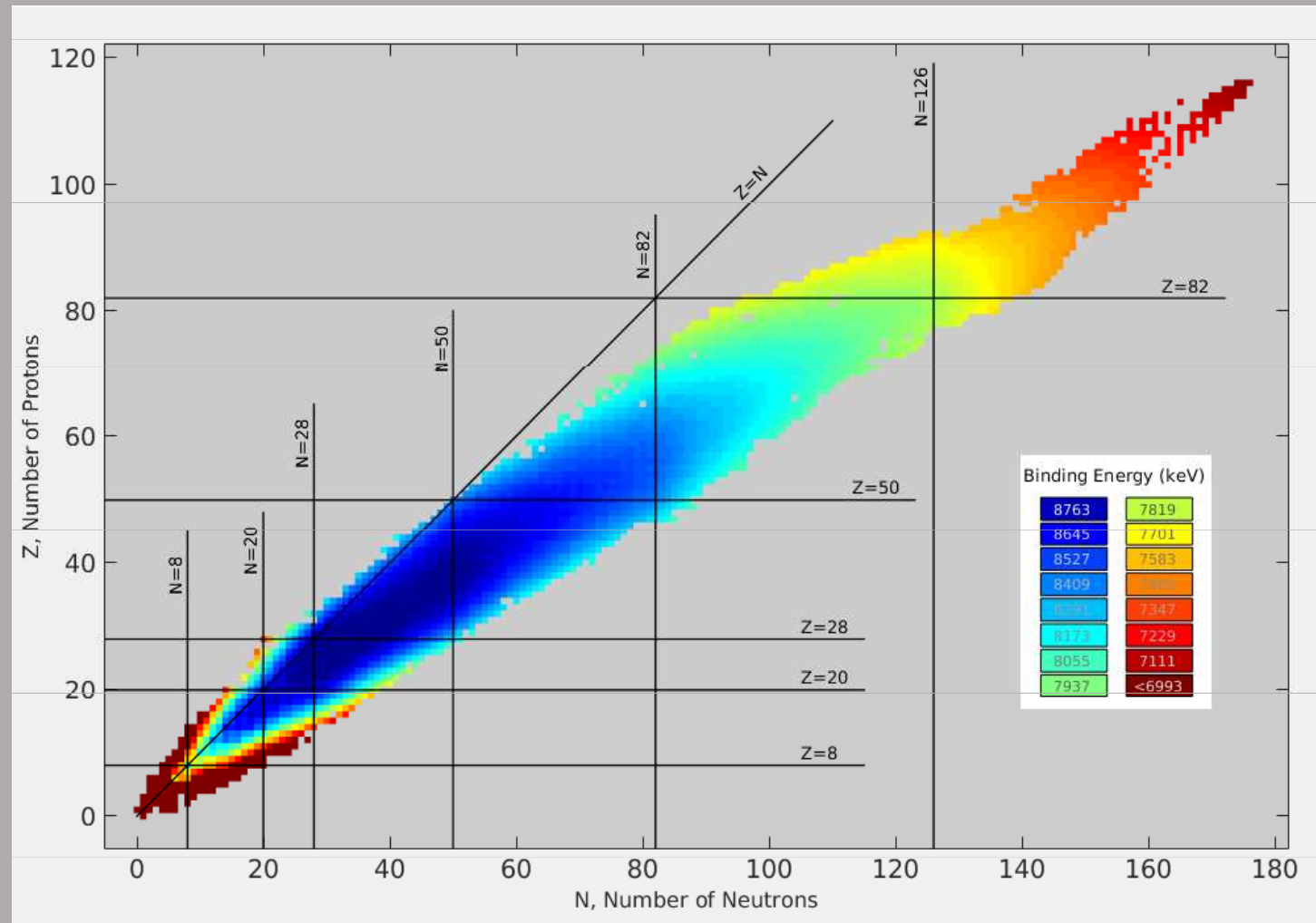


# Obdobně pro izotopy uhlíku

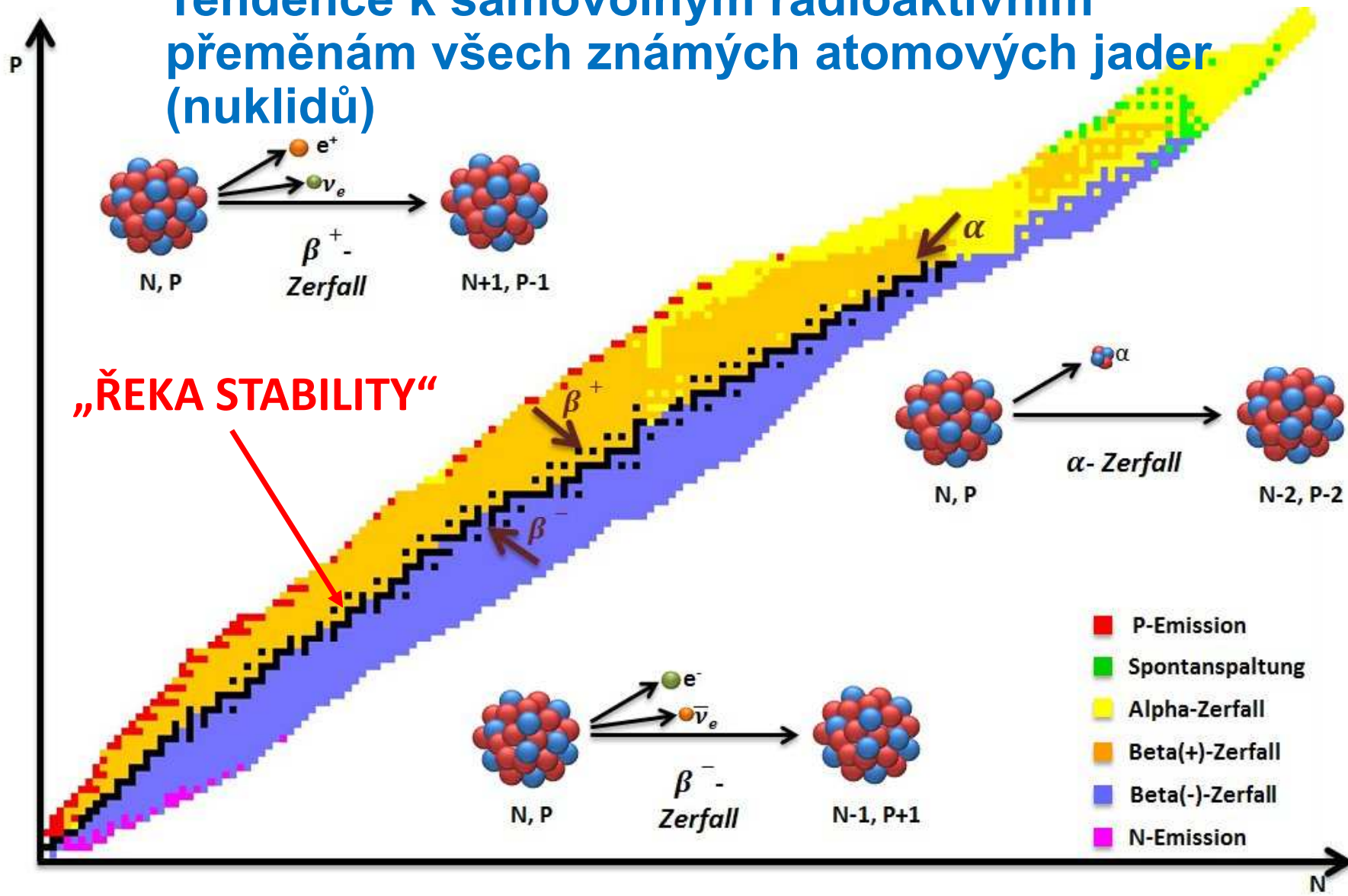


# Nuklidy podle vazebné energie

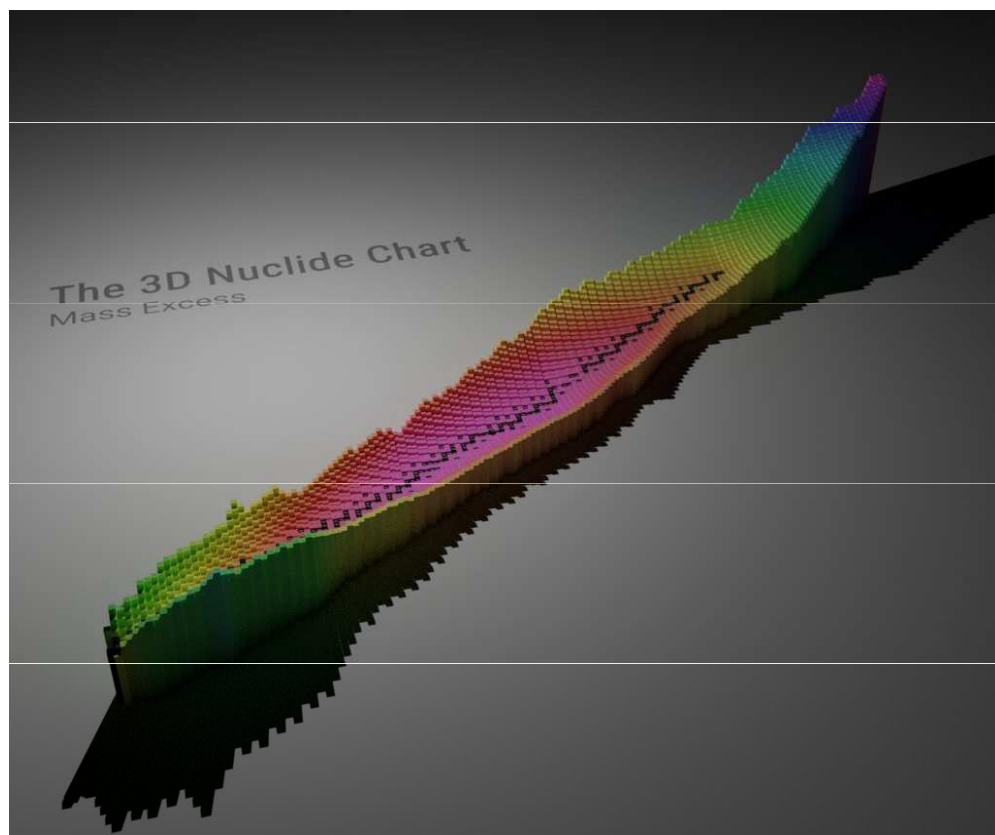
- Chart of nuclides (isotopes) by binding energy, depicting the valley of stability.
- The diagonal line corresponds to equal numbers of neutrons and protons.
- **Dark blue squares represent nuclides with the greatest binding energy**, hence they correspond to the most stable nuclides.
- The binding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



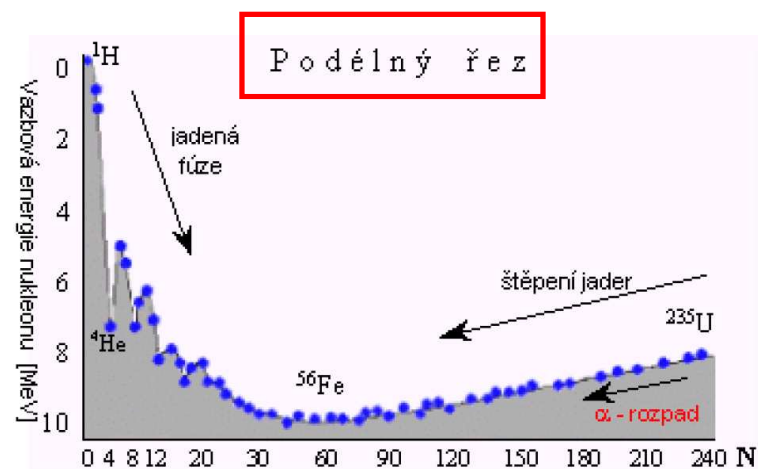
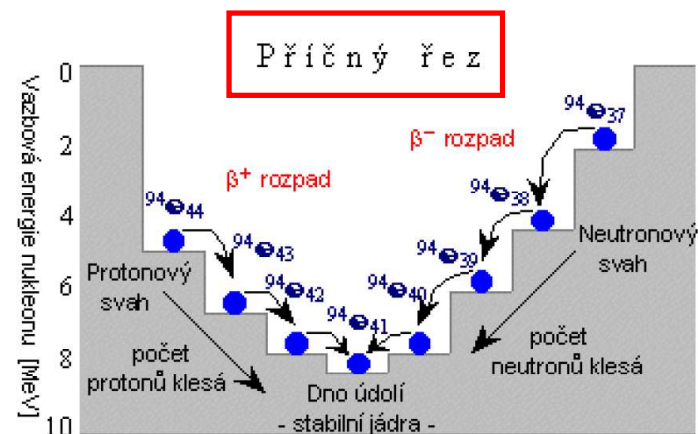
# Tendence k samovolným radioaktivním přeměnám všech známých atomových jader (nuklidů)



# „Řeka stability“

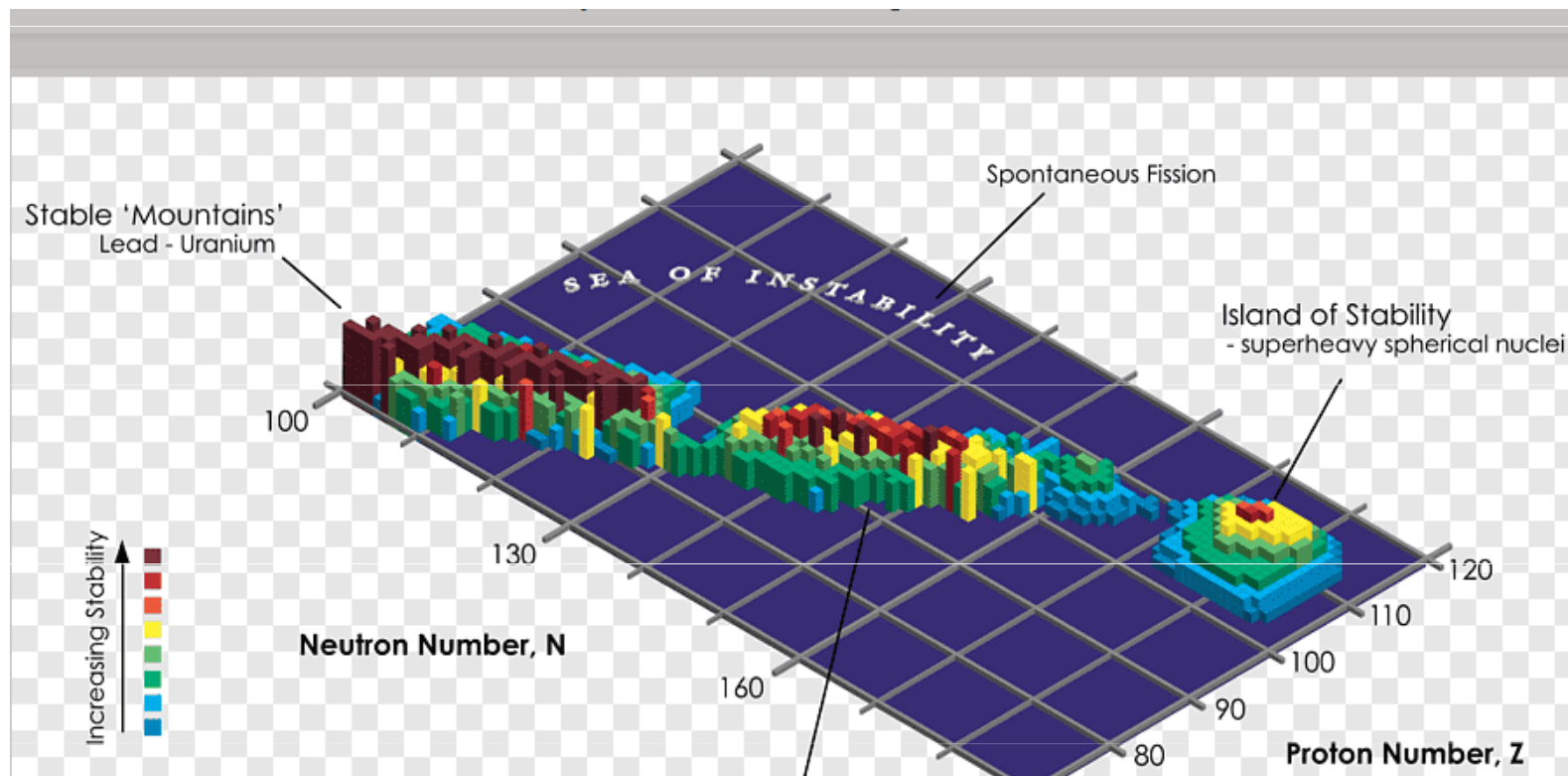


Trojrozměrná mapa



# 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.

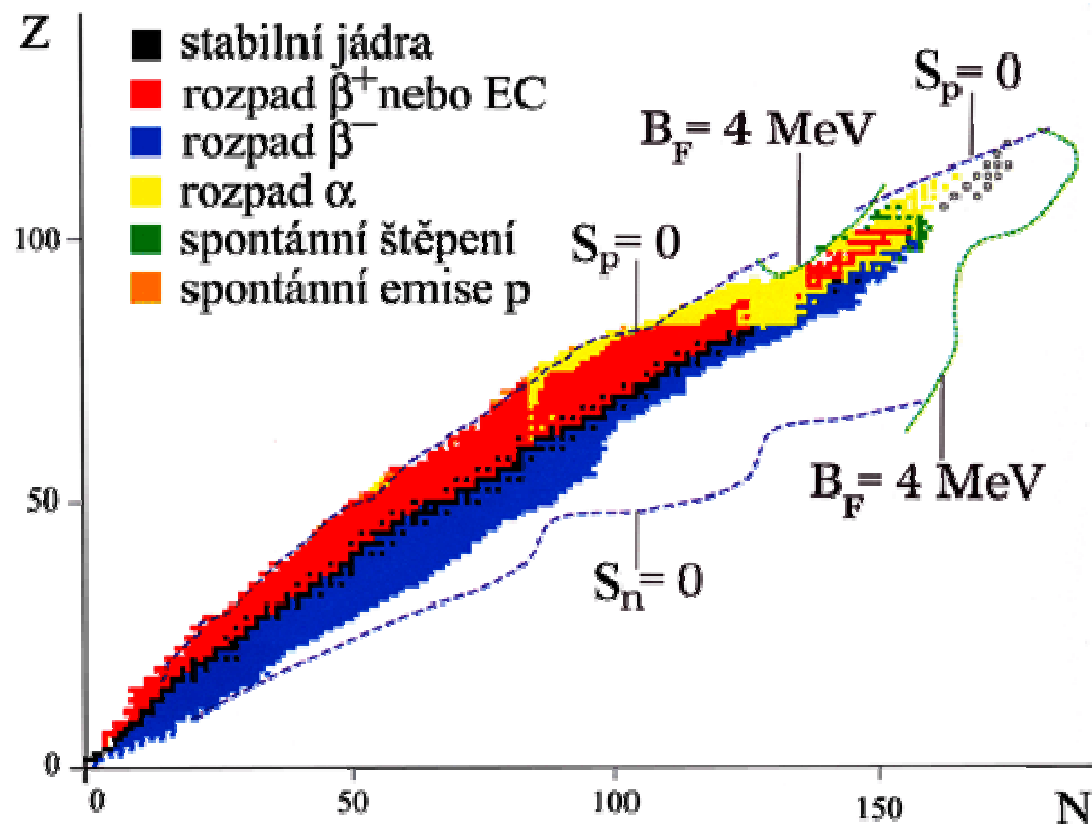
Ostatní jádra jsou radioaktivní.

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.

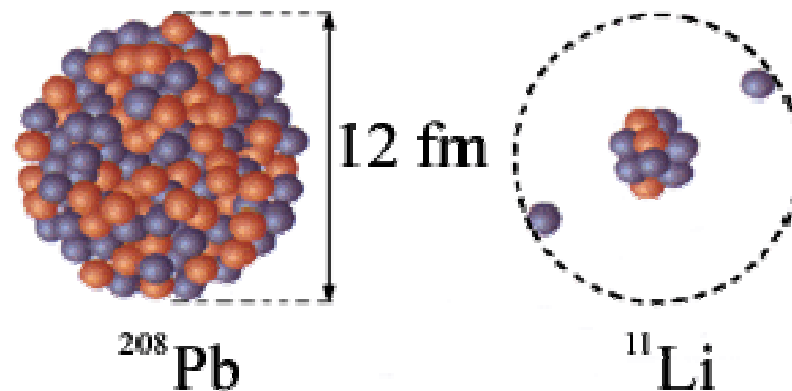
Tyto linie se proto nazývají **liniemi přesycenosti (drip line)**

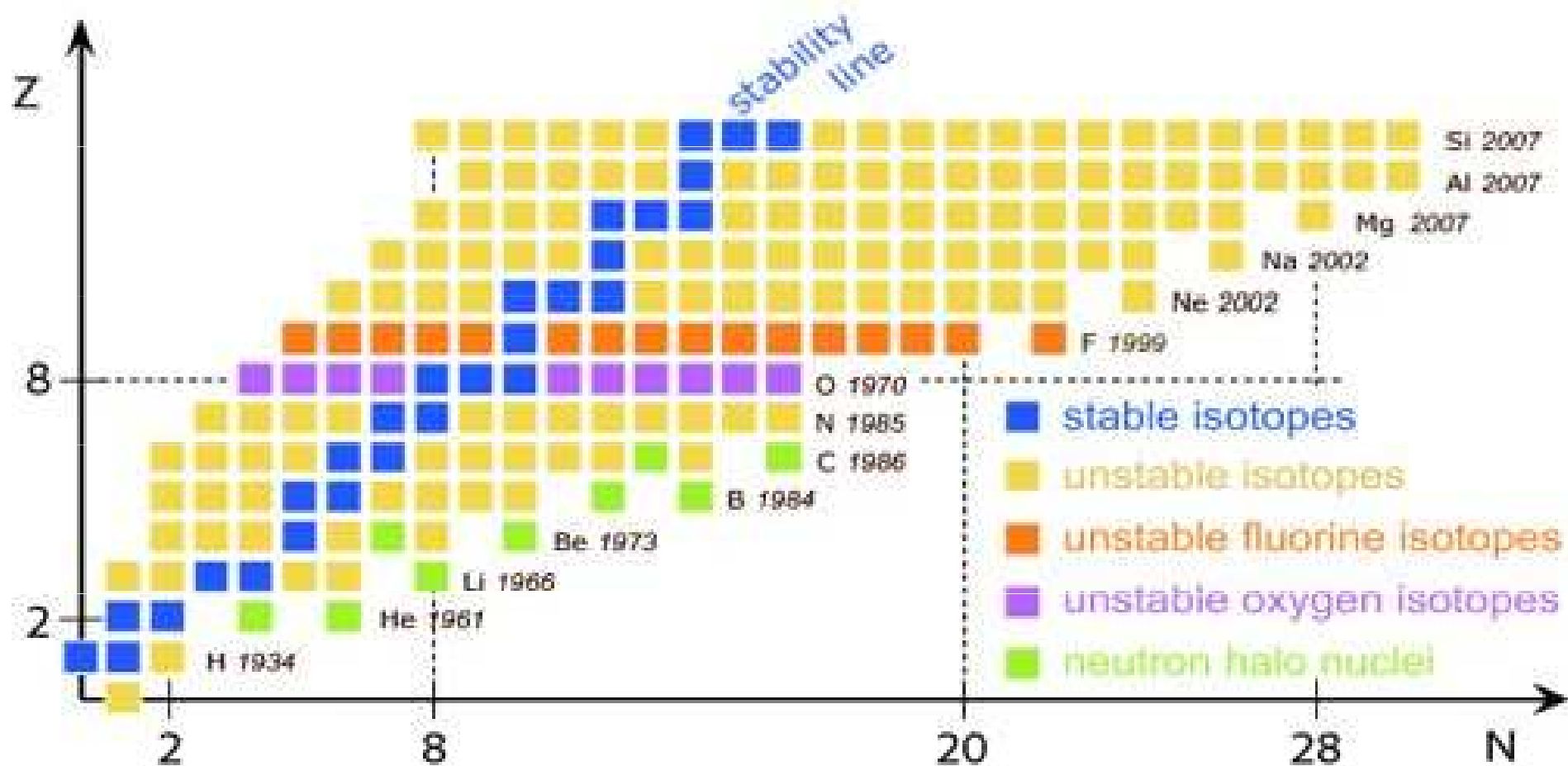


# Zvláštnosti na liniích přesycenosti

- 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“.



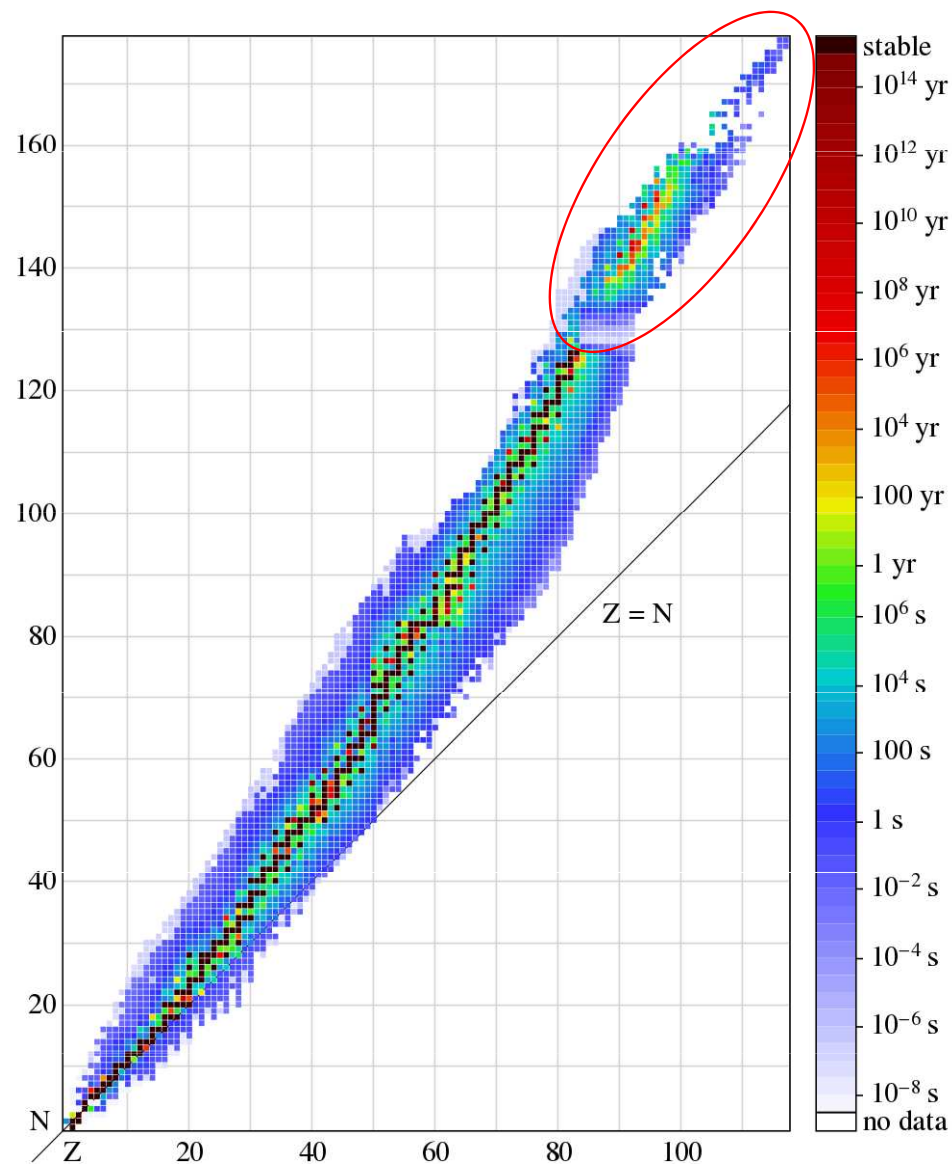
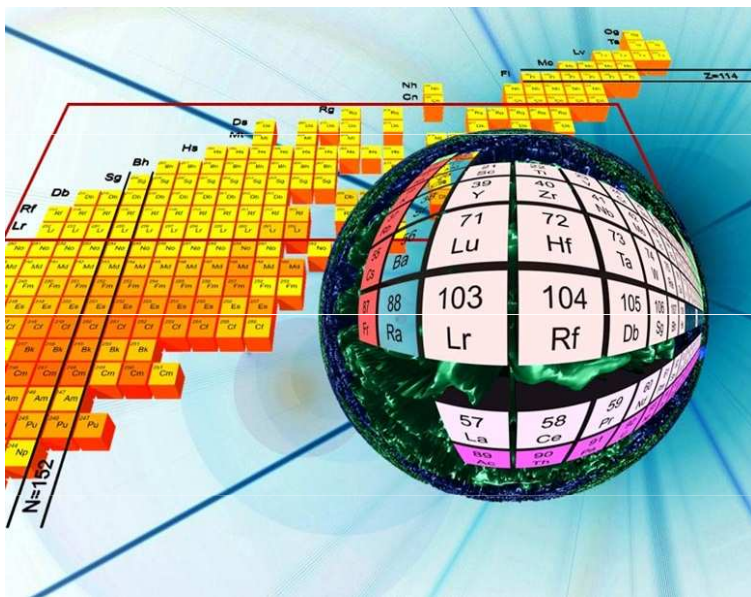




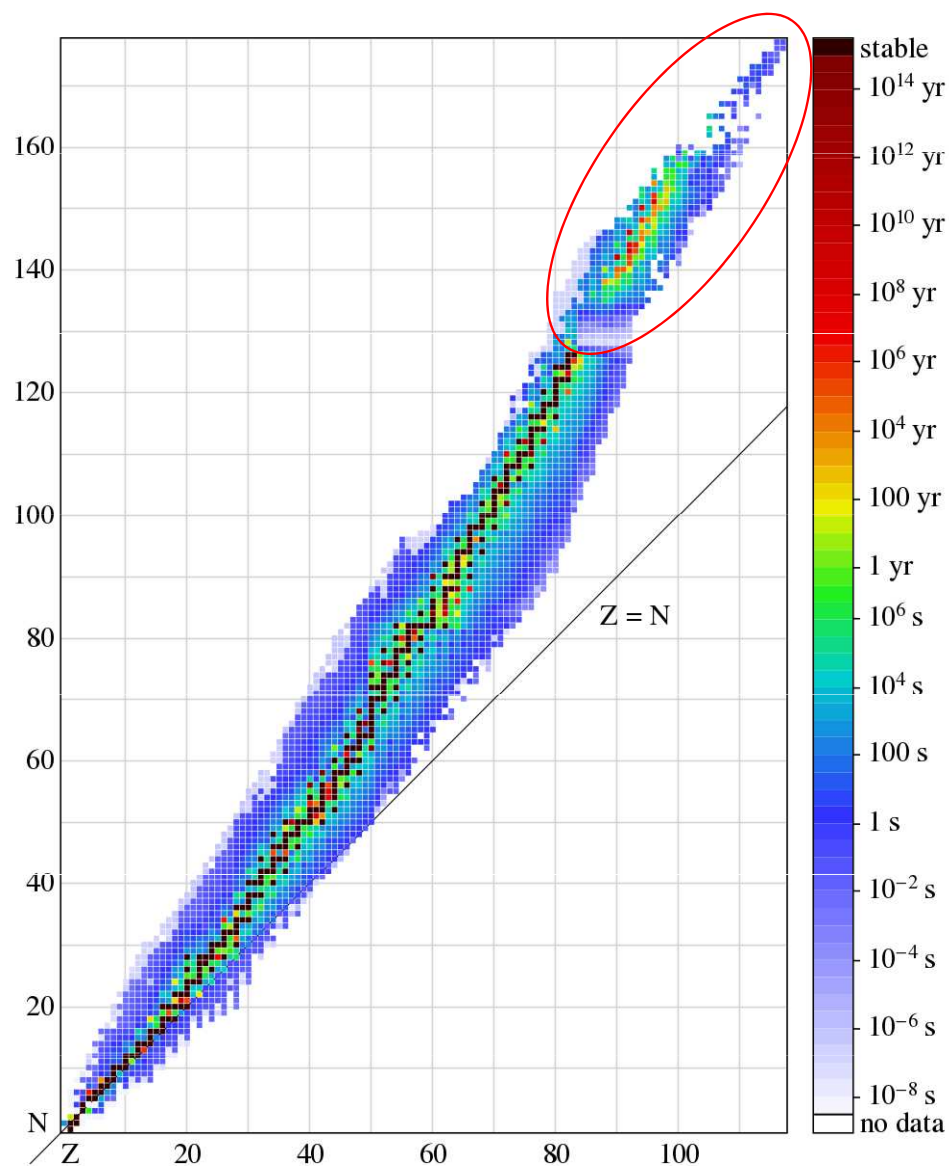
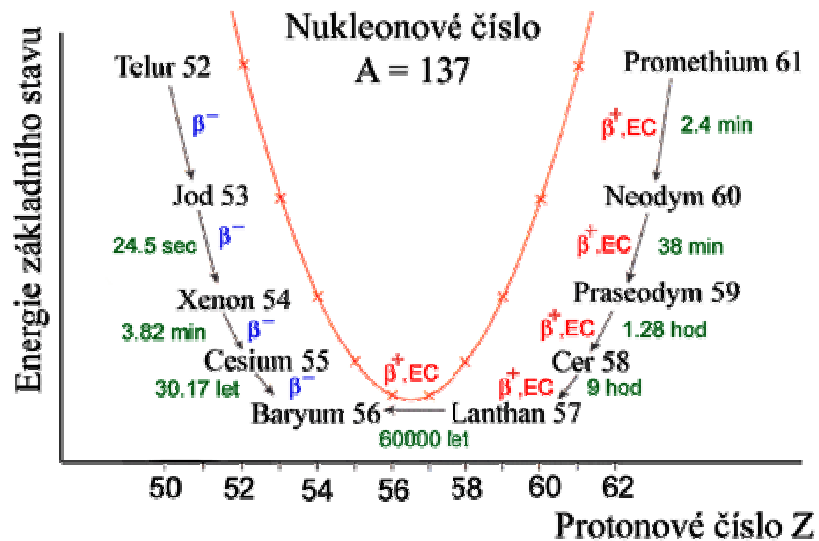
# Ostrov stability v oblasti supertěžkých jader

Mohou být některá supertěžká jádra „stabilní“?

→ Ostrůvky stability?



# N vs. Z a poločas rozpadu



# Zajímavost: Bi

Periodic Table of the Elements

1A 1 H 1.00794	2A																3A 5 B 10.811	4A 6 C 12.0107	5A 7 N 14.0067	6A 8 O 15.9994	7A 9 F 18.9984032	8A 2 He 4.002602
3 Li 6.941	4 Be 9.012182											13 Al 26.9815386	14 Si 28.0855	15 P 30.973762	16 S 32.065	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948					
11 Na 22.989769	12 Mg 24.3050	3B	4B	5B	6B	7B	8B		1B	2B	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					
19 K 39.0983	20 Ca 40.078	21 Sc 44.955912	22 Ti 47.887	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 132.90545196	56 Ba 137.327	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 208.980386	84 Po [209]	85 At [210]	86 Rn [222]				
87 Fr [223]	88 Ra [226]	Actinides		89-103	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 138.90547	58 Ce 140.12	59 Pr 140.90766	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 162.50	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 231.03688	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]						

- 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 ??

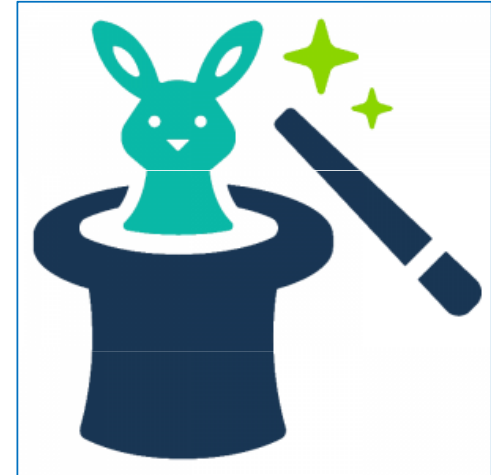
# HLADINOVÝ MODEL JÁDRA

- **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  $n^0$ .

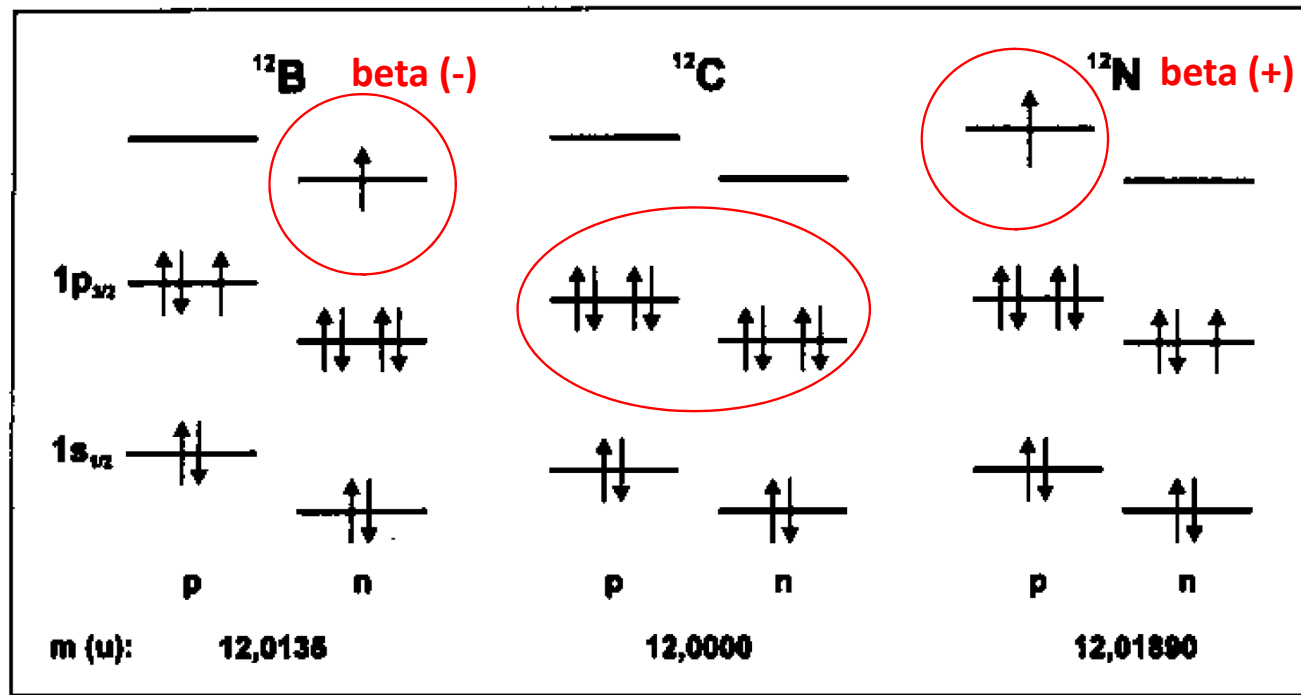


# Závislost stability jádra na $p^+$ a $n^0$ konfiguraci

$A=12, 5p^+ + 7n^0$

$A=12, 6p^+ + 6n^0$

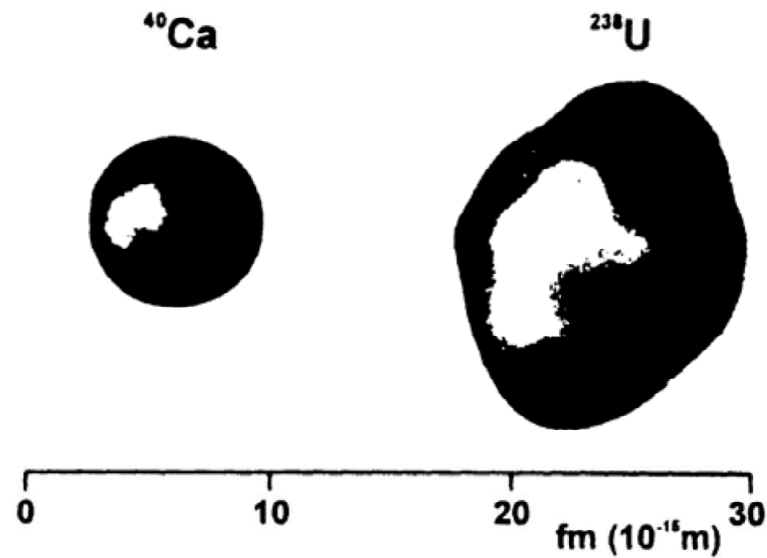
$A=12, 7p^+ + 5n^0$



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

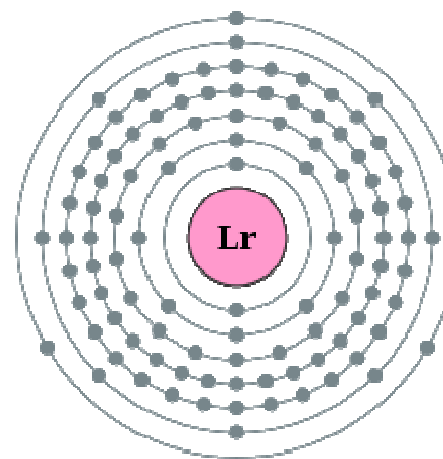
	${}_{47}\text{Ag}$	${}_{48}\text{Cd}$	${}_{49}\text{In}$	${}_{50}\text{Sn}$	${}_{51}\text{Sb}$	${}_{52}\text{Te}$	${}_{53}\text{I}$
počet izotopů	2	8	1	10	2	8	1

- 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 **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 ... Uměle připravené prvky se  $Z$  93 – 106).
- **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.

1																	18
H	2											13	14	15	16	17	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Udu
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb		
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No		




# Stabilita jader - SHRNU TÍ




1. Závisí na **vazebné energii, vztažené na jeden nukleon** (nejvyšší pro  $Z = 14 - 50$ ,  $^{56}_{26}\text{Fe}$  má nejvyšší  $\epsilon$  a láme „křivku stability“)
2. Nahromadění **61 a více protonů v jádře**  $\rightarrow$  pravděpodobně destabilizace jádra (příliš mnoho kladného náboje, který neutrony nedokáží kompenzovat);
3. prvky se  $Z > 83$  pouze radioaktivní isotopy
4. Významný poměr  $N/Z$  (pro většinu nuklidů  $N/Z = 1,0 - 1,6$ )
5. 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

## Stability Conditions

$Z > 83$  unstable! 

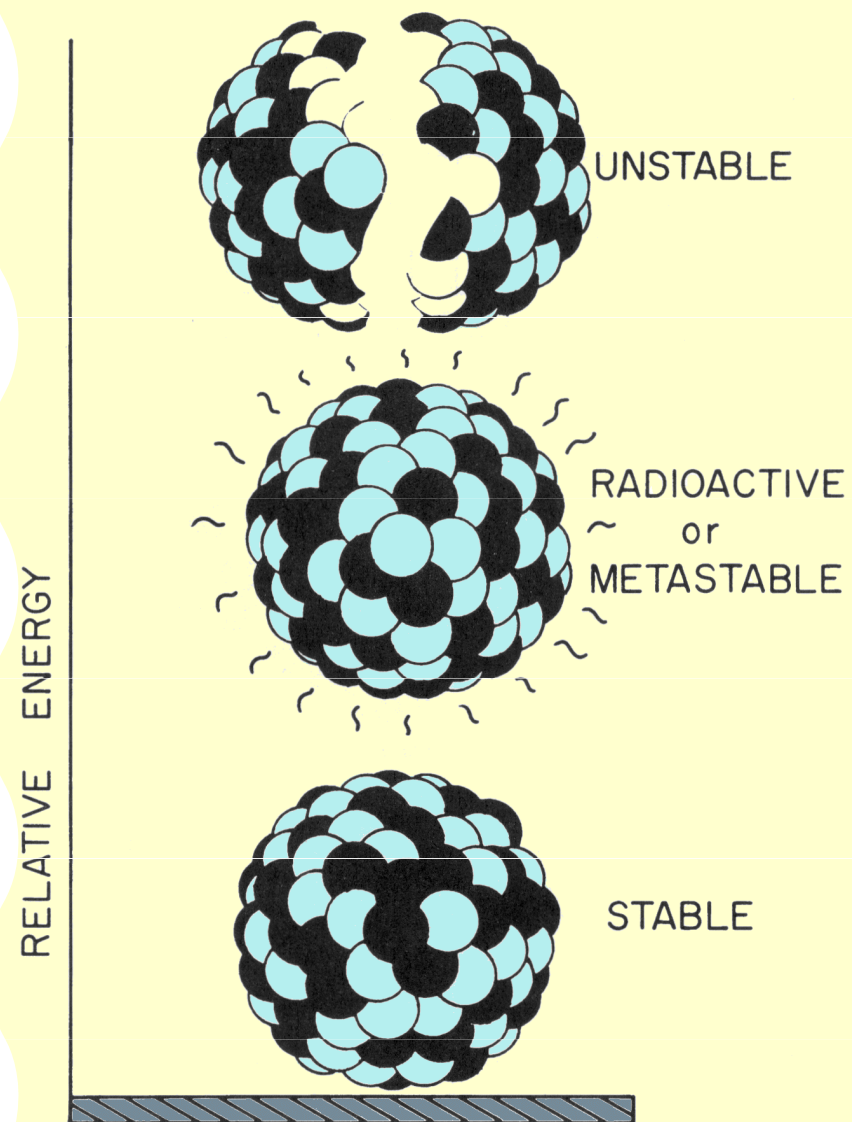
$Z \leq 83$

- $p > n$  unstable 
- $p \ll n$  unstable 
- $p \approx n$  stable! 

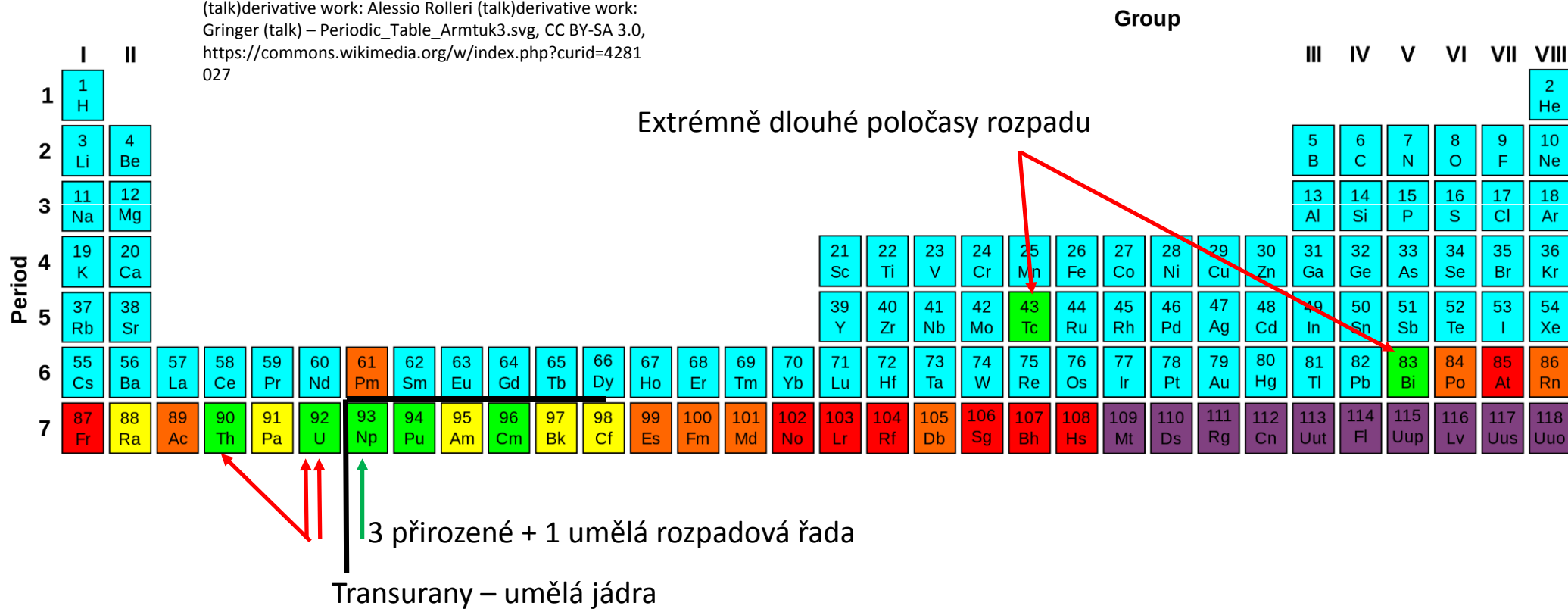
6. Vliv obsazenosti energetických hladin jádra protony a neutrony: Atomová jádra s 2, 8, 20, 28, 50, 82 a 126 protony nebo neutrony jsou neobvykle stabilní – **magická čísla** –  $^{20}_{20}\text{Ca}$ : 6 stabilních isotopů

# STABILITA NUKLIDŮ - shrnutí

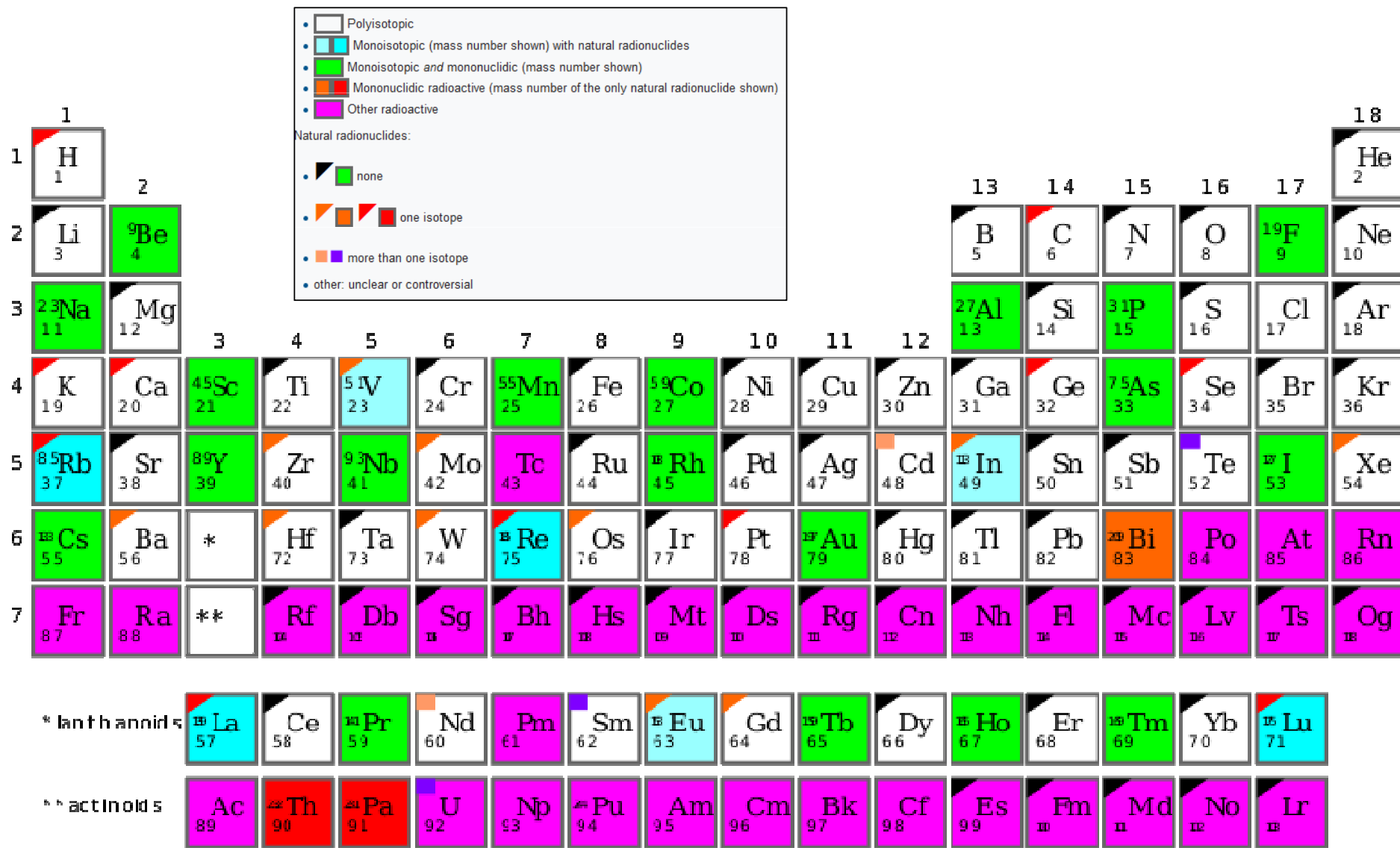
- V současné době je známo více než **2600** druhů různých jader (nuklidů), lišících se od sebe počtem protonů nebo neutronů.
  - z toho **stabilních** jader je si **270**,
  - ostatní jádra jsou **radioaktivní**.
- V pozemské přírodě se vyskytuje **340** nuklidů
  - **270** stabilních
  - a **70** radioaktivních.



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>



- 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.

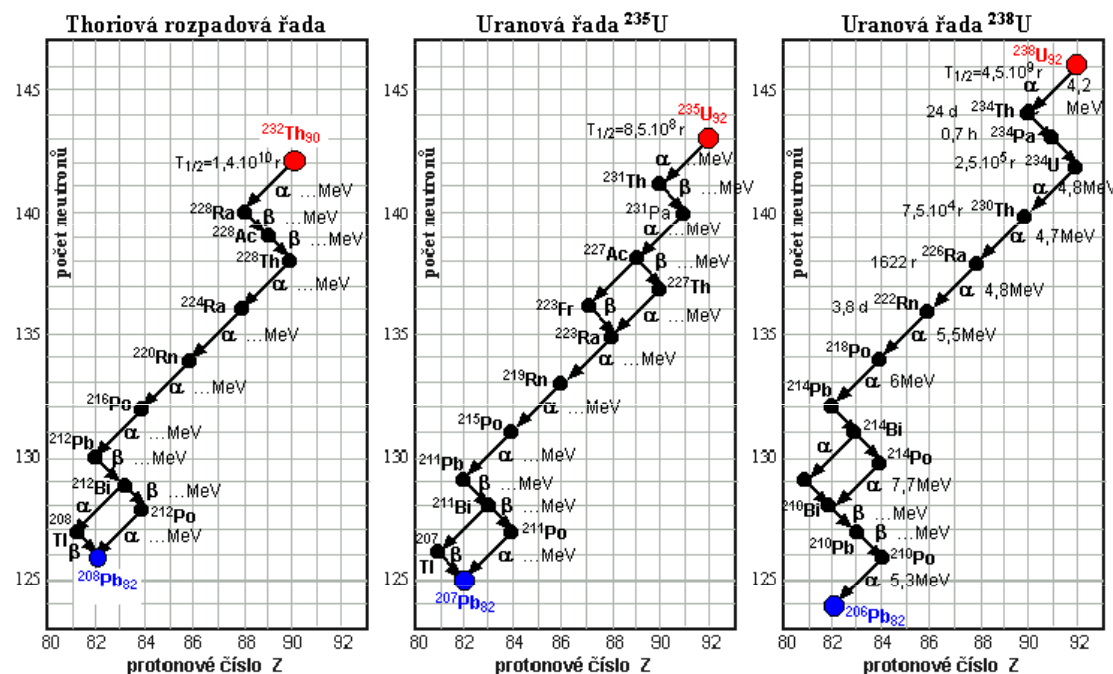


# Přirozené radioaktivní prvky s dlouhým $T_{1/2}$

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

- Thoriová rozpadová řada,  $N = 4n$
- Neptuniová rozpadová řada,  $N = 4n + 1$
- Uran-radiová rozpadová řada,  $N = 4n + 2$
- Uran-aktiniová rozpadová řada,  $N = 4n + 3$

Vzhledem k tomu, že hmotnostní (nukleonové) číslo při rozpadu buď klesne o 4 nebo zůstává stejné, vyplývá z toho, že všechna atomová jádra dané rozpadové řady mají při dělení hmotnostního čísla číslem 4 vždy stejný zbytek (0, 1, 2 nebo 3). Proto existují čtyři rozpadové řady, i když jedna z nich (Neptuniová řada) zahrnuje pouze uměle vytvořená atomová jádra.



## 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:**
- $E_{\text{přeměny}} = E_{\text{kin}}(Y) + E_{\text{kin}}(\text{ČASTIC}) + E_{\gamma}$

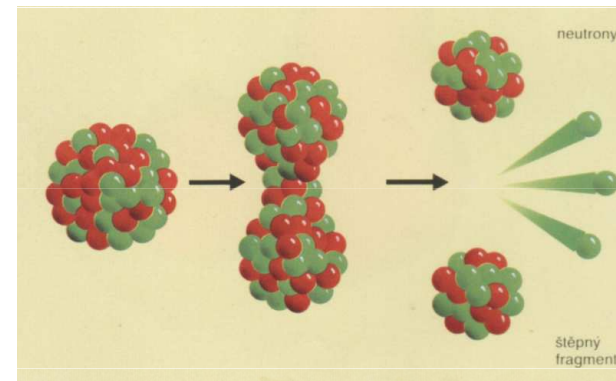
# RADIOAKTIVNÍ ROZPAD

## PŘIROZENÁ RADIOAKTIVITA

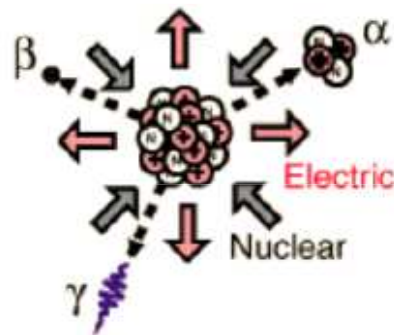
objev r. 1896 **Henri Becquerel**

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 jádra 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:

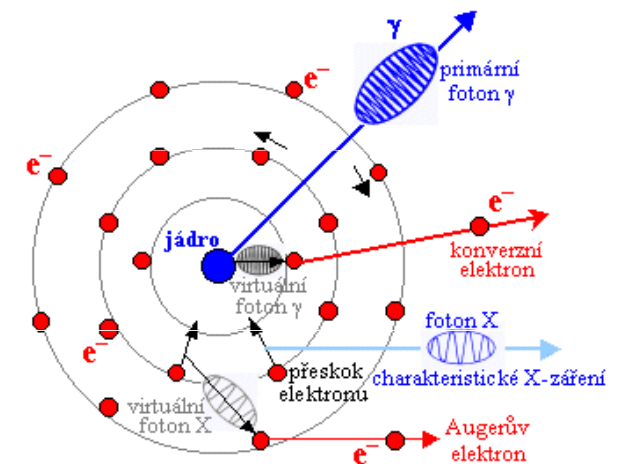
- částice  $\alpha$ ,
- částice  $\beta$  ( $\beta^-$ ,  $\beta^+$ ),
- neutrony,
- fotony  $\gamma$ .

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, (doprovází  $\beta^+$ )
- anihilační záření.



## 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
<b>Celkem</b>	<b>3115</b>	<b>769</b>	<b>3884</b>

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

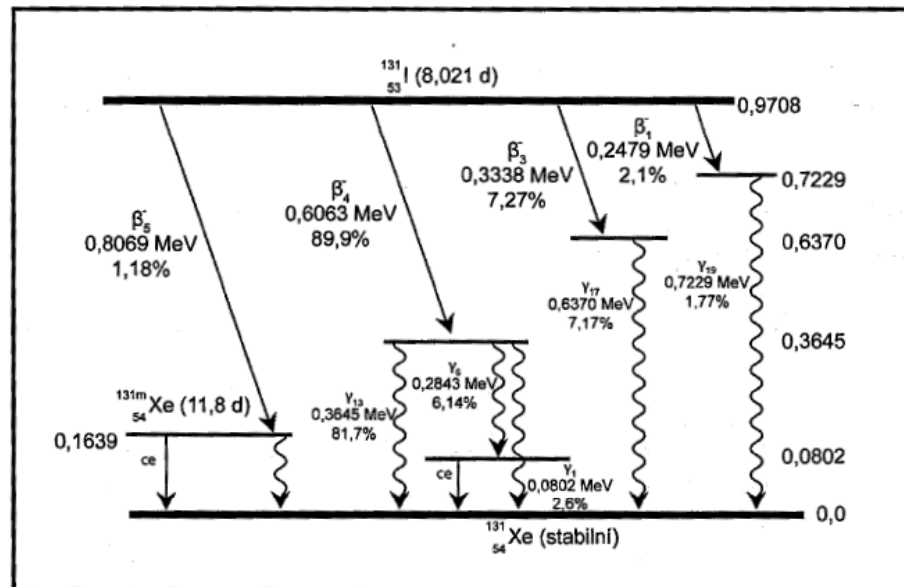


Vedle těchto jednoduchých přeměn s emisí jedné částice existuje celá řada složitějších přeměn s emisí několika částic. Např.

## 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  $^{131}\text{I}$