

Jaderná fyzika



25.1 Vazebná energie. Vlastnosti atomových jader.



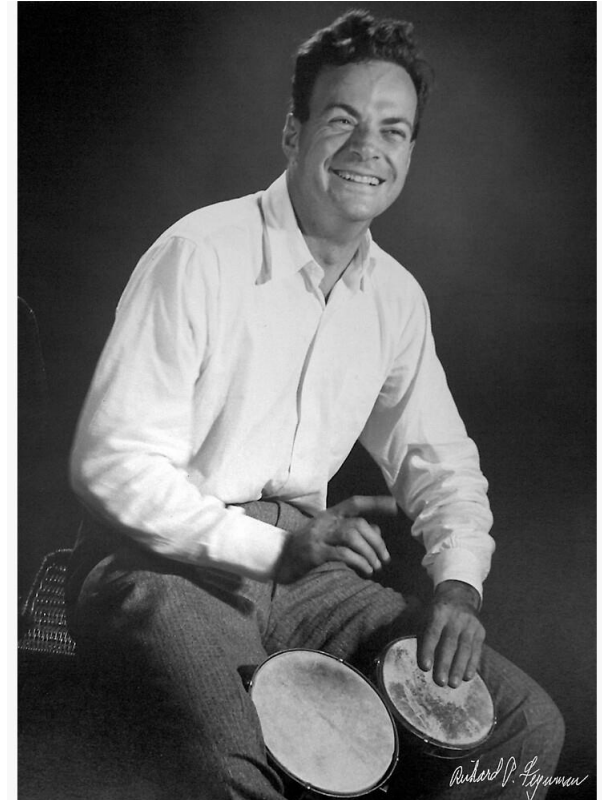
5. Solvay konference 1927 v Bruselu – nevyřešené problémy v oblasti fyziky a chemie

- Hlavní osobnosti v roce 1927: A. Einstein a N. Bohr
- Jediná žena: Marie Curie (první člověk, který získal 2 NC – 1903 (F), 1911 (Ch))

25.1 Vazebná energie. Vlastnosti atomových jader.



Oppenheimer, Dirac, Pais - 1947



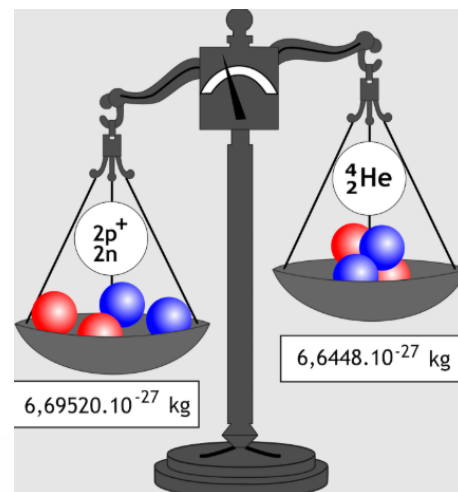
R. P. Feynman

25.1 Vazebná energie. Vlastnosti atomových jader.

Vazebná energie

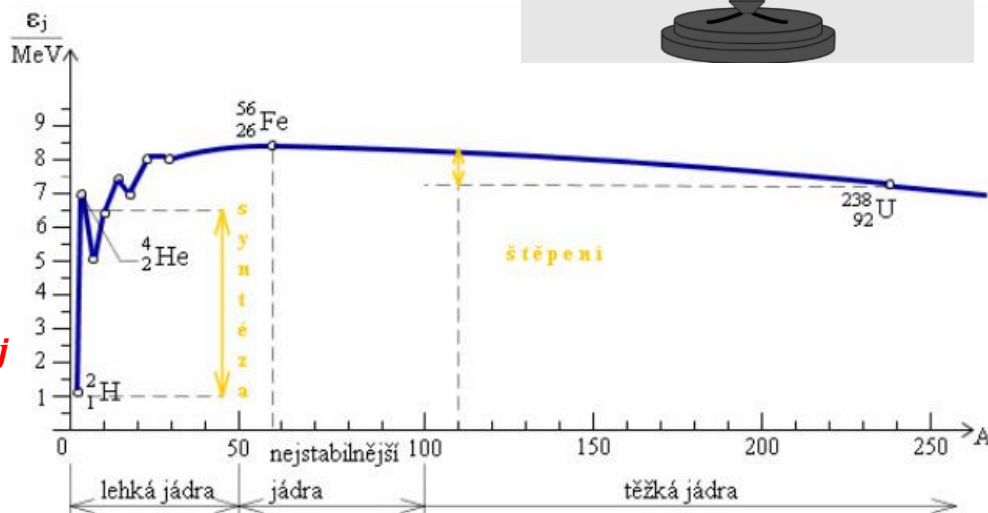
- součet hmotností jednotlivých částic v atomu **je vždy větší než hmotnost celého atomu**
- hmotnostní úbytek: $B = Zm_p + Nm_n - m_{\text{jádra}}$

$$E_v = (Zm_p + Nm_n - m_{\text{jádra}})c^2$$



Jaderné síly

- přitažlivé síly mezi protony a neutrony s dosahem $\approx 10^{-15} m$
- silnější než elektromagnetické síly



Vazebná energie připadající na 1 nukleon – ϵ_j

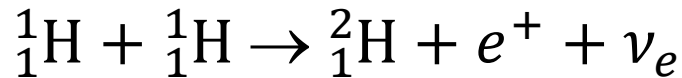
$$\epsilon_j = \frac{E_v}{A}$$

- nejstabilnější prvky: $\epsilon_j \in (8 - 9)\text{MeV}$, (Fe56)
- magická čísla Z a N: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126
- lehká jádra: syntéza (H, He)
- těžká jádra: štěpení (U238)

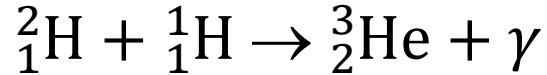
25.2 Jaderné reakce. Syntéza a štěpení jader.

Jaderná syntéza

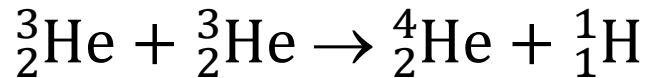
- sloučením lehkých jader (H) vzniká těžší jádro
- pro prvky s $A < 56$
- PŘ. **slučování jader H na jádro He**



vodík + vodík → deuterium + pozitron + el. neutrino

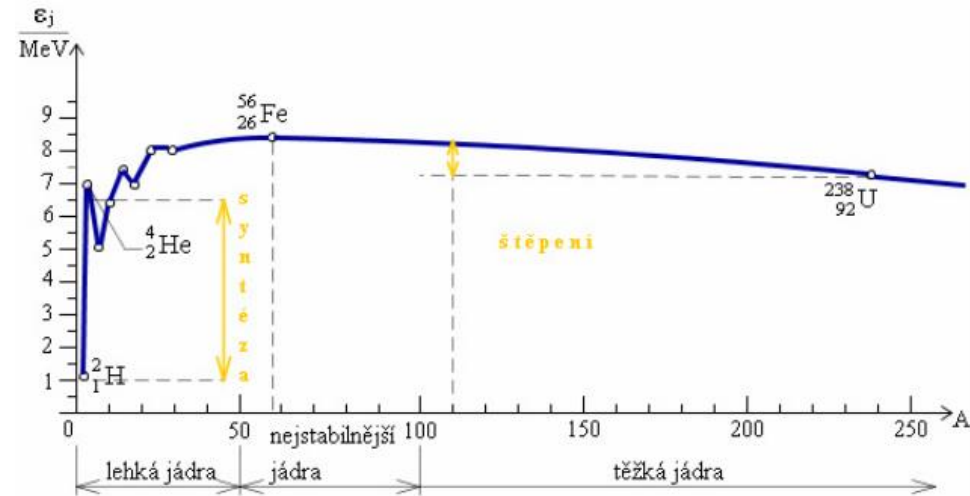


deuterium + vodík → izotop helia + gama záření

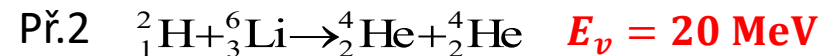


dva izotopy helia → helium + vodík

- při slučování jader je třeba dosáhnout **teploty cca 10^6 K**
- **vodíková bomba:** neřízená termonukleární reakce, má větší destruktivní účinky než atomová bomba



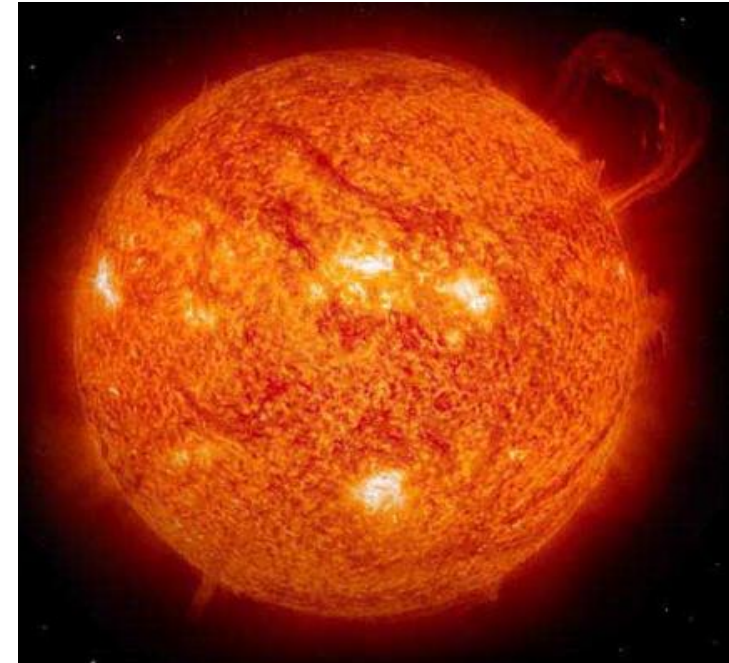
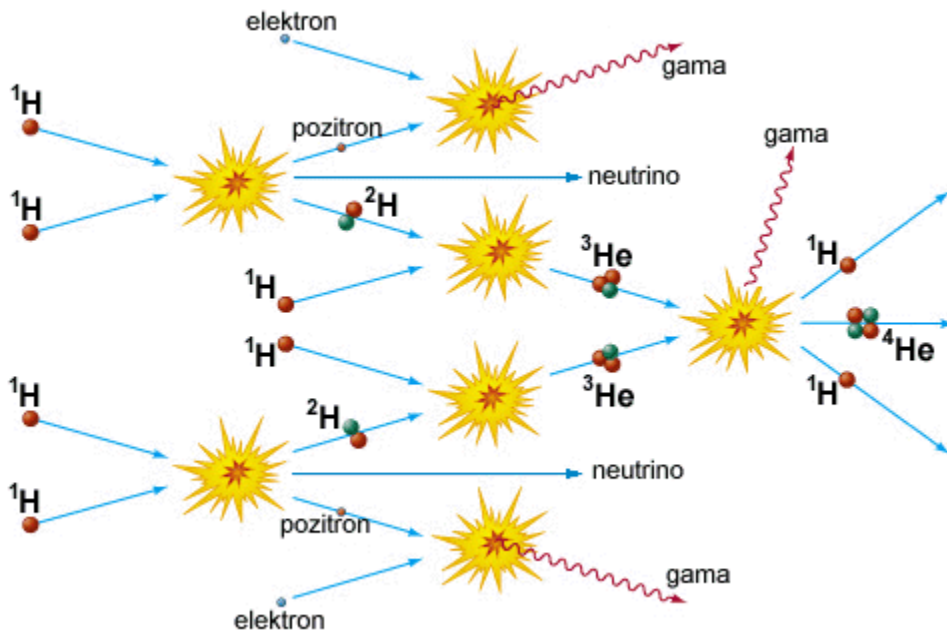
uvolněná energie: **$E_\nu = 4 \text{ MeV}$**



25.2 Jaderné reakce. Syntéza a štěpení jader.

Jaderná syntéza ve Slunci

- **slučování jader H na jádro He: $560 \cdot 10^9 \text{ kg / s}$, $E = 4 \cdot 10^{26} \text{ J}$, $\downarrow m = 4 \cdot 10^9 \text{ kg/s}$**
- **proton-protonový cyklus:**

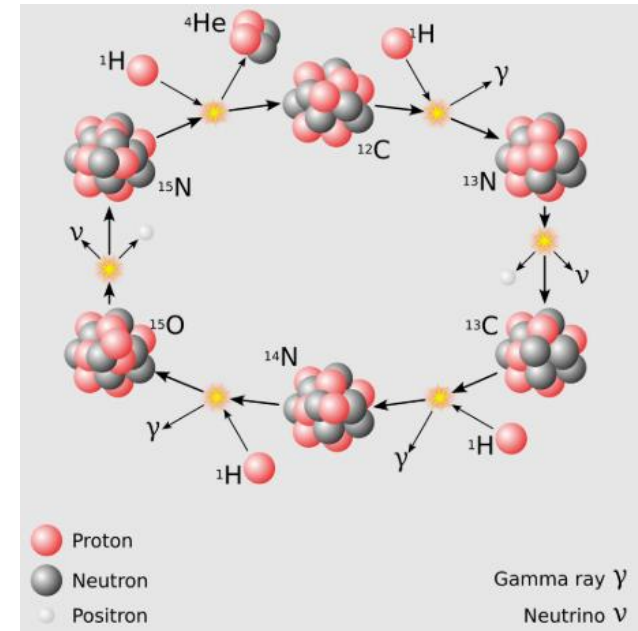
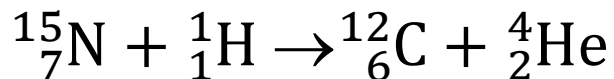
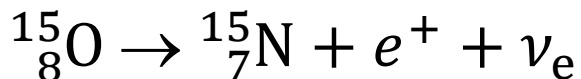
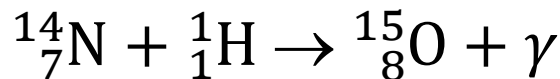
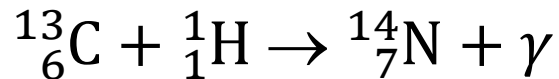
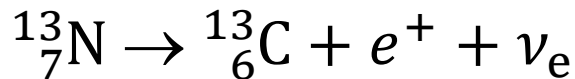
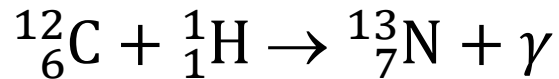


- 60 % záření je ve viditelné oblasti, 30 % IČ, 10% UV a RTG
- **teplota povrchu** odpovídá záření AČT o teplotě **5780 K**
- **teplota jádra:** $\approx 14 \cdot 10^6 \text{ K}$
- **chemické složení:** 73 % H, 24 % He, 3% O, C, Fe, Ne, N, Si, Mg, S
- **solární konstanta:** **1367 W / m^2** – intenzita záření dopadajícího na zemský povrch v ČR: 620 W / m^2

25.2 Jaderné reakce. Syntéza a štěpení jader.

Jaderná syntéza v nitru hvězd

- **proton-protonový cyklus**
- **C-N-O cyklus – přeměna H na He za současného vzniku izotopů C, N, O**



Fúzní reaktor

- Řízená jaderná fúze – čistý zdroj levné energie s větší účinností než má jaderná elektrárna, bez jaderného odpadu
- TOKAMAK, ITER – aktuálně (2025) plazma po dobu cca 2 s (potřeba cca 500 s)

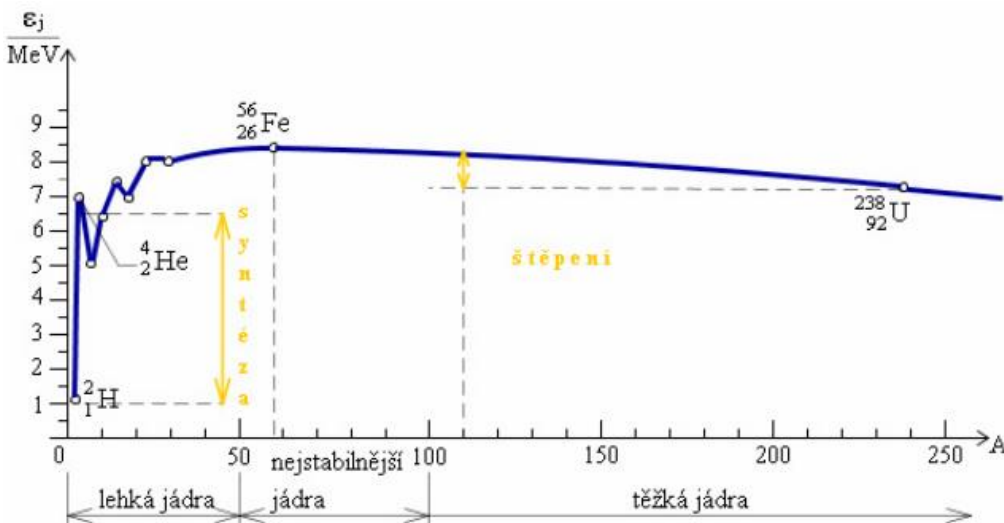
25.2 Jaderné reakce. Syntéza a štěpení jader.

Jaderné štěpení

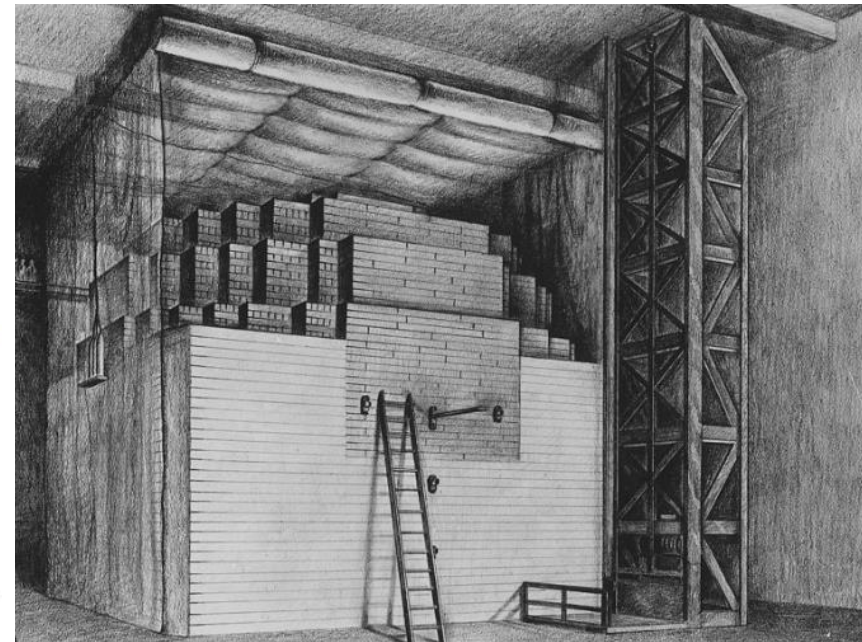
- štěpením těžkých jader (U) vznikají lehčí jádra (Ba, Kr, Xe, ...)
- pro prvky s $A > 110$
- Př. **štěpení jader U235**, $E_\nu = 200 \text{ MeV}$



uran + **pomalý neutron** → barium + krypton + 3 neutrony

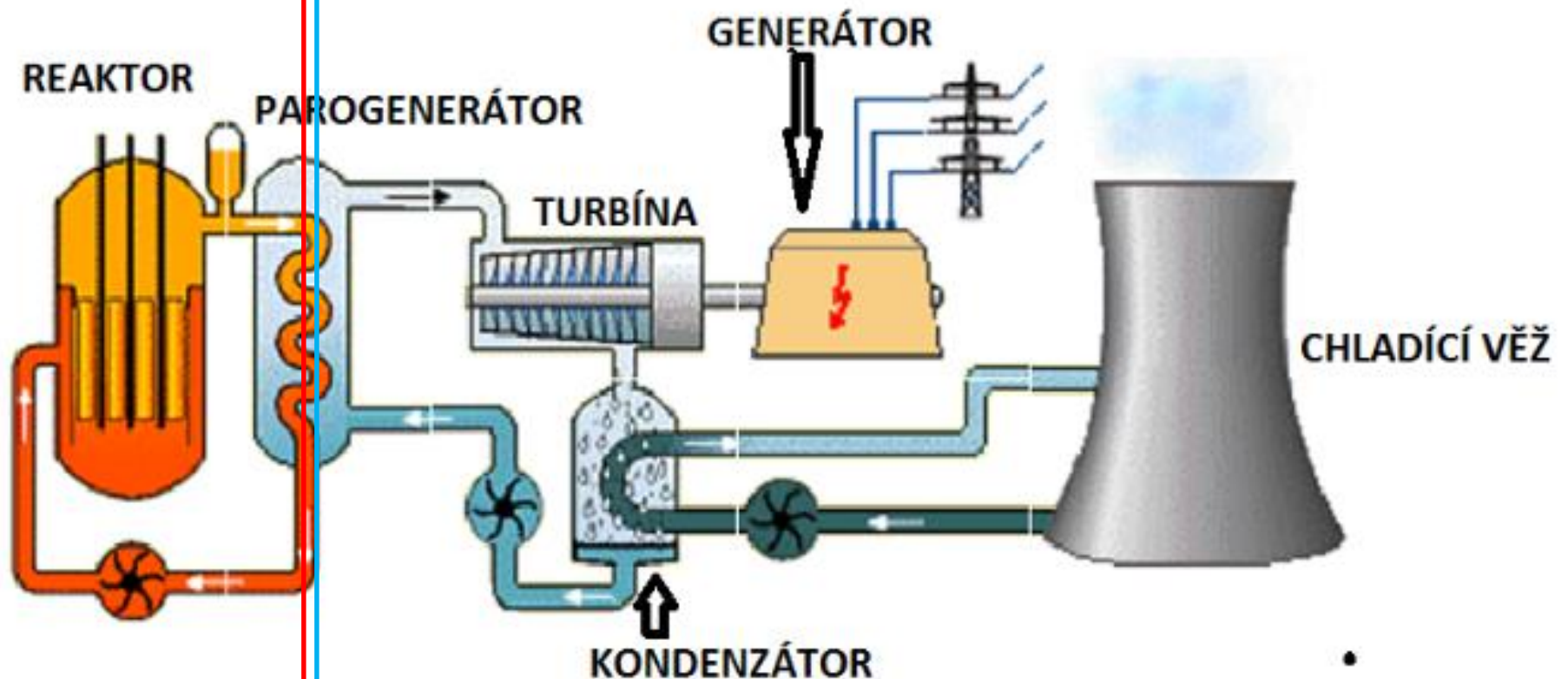


- neřízená exponenciální řetězová reakce → **jaderná bomba**: neřízená štěpná reakce
- **řízená štěpná reakce** → **jaderná elektrárna**
- **první jaderný reaktor** → **E. Fermi 12.12.1942**
Chicago, pod tribunou fotbalového stadionu



25.2 Jaderné reakce. Syntéza a štěpení jader.

Jaderná elektrárna



Primární okruh

Sekundární a terciární okruh

25.2 Jaderné reakce. Syntéza a štěpení jader.

Jaderná elektrárna

■ Primární okruh jaderný reaktor

- **palivové články** obsahují štěpný materiál
- počet neutronů je řízen **regulačními tyčemi (bór, kadmium, grafit)**
- **střední počet účinných neutronů**: $k = 1$ ($k < 1$: zastavení reakce, $k > 1$ neřízená reakce)
- **moderátor**: látka zpomalující jadernou reakci (těžká voda D_2O)
- **aktivní zóna**: oddělena od vnějšího prostředí ochrannou ocelovou tlakovou nádobou v železobetonové obálce (plní funkci moderátoru, zachycuje neutrony, pohlcuje gama záření)
- **20 % jaderné energie se uvolňuje ve formě tepla, 80 % tvoří Ek jader a neutronů**



■ Sekundární okruh

- **parogenerátor** → přeměna horké vody na páru
- **turbogenerátor** → parní turbína spojená s alternátorem (3000-3600 ot/min, $\sim U = 6000 \text{ V}$)
- **kondenzátor** → pára z turbíny kondenzuje na horkou vodu
- **chladicí věže** → volným pádem a prouděním vzduchu ochlazují horkou vodu, která se vrací zpět do parogenerátoru



25.3 Přirozená a umělá radioaktivita.

Přirozená radioaktivita – historie objevu

▪ Radioaktivita

→ schopnost některých jader vysílat záření a změnit se při tom v jiné jádro

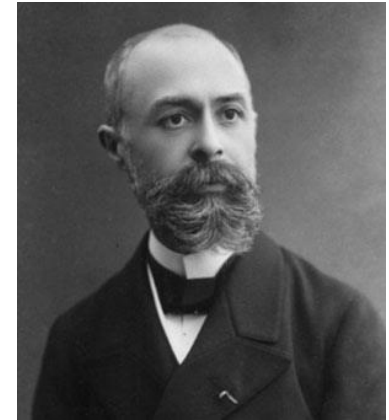
→ 1896 A. H. Becquerel (1852 – 1908)

→ francouzský fyzik a chemik

→ NC 1903 za objev přirozené radioaktivity (náhodou) při studiu fluorescence uranových solí které svým zářením vyvolaly expozici fotografické desky

→ Marie Curie u něho dělala disertační práci, záření pojmenovala **radioaktivita**, její manžel Pierre byl spolupracovníkem Becquerela

→ jednotka radioaktivity: Bq (čti bekrel)



Přirozená radioaktivita – česká stopa

▪ 1898 manželé Curie objevili v Paříži radioaktivní prvek **radium** – v jáchymovském smolinci

▪ 1910 – izolovala **radium a polonium** z odpadu jáchymovské továrny na výrobu uranové barvy (červené sklo)

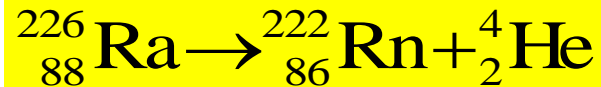


25.3 Přirozená a umělá radioaktivita.

Přirozená radioaktivita – druhy záření

- **přeměna nestabilních jader jednoho prvku na stabilní jádra jiného prvku**
→ při tomto procesu jádra vysílají **záření alfa, beta nebo gama**
→ radioaktivita je důsledkem tzv. **slabé jaderné interakce**

Záření alfa



- **jádra hélia**
- nejslabší – k odstínění stačí list papíru

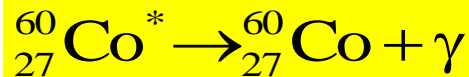
Záření beta

- **elektrony** – β^-
- **pozitrony** – β^+
- nejslabší – odstínění: tenký hliníkový plech

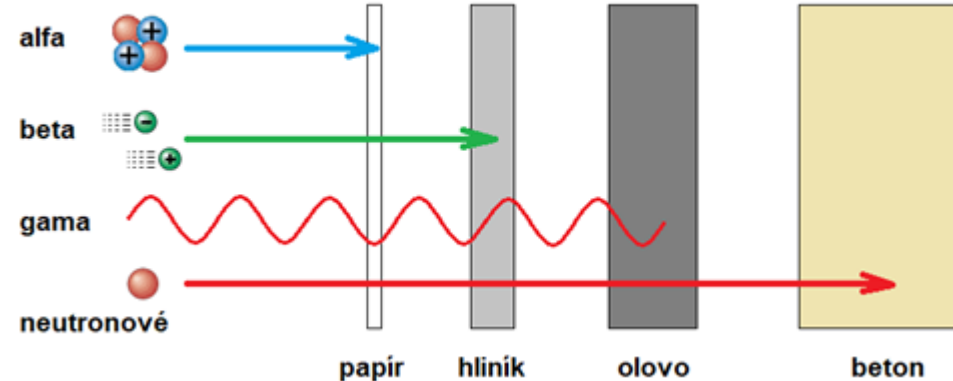


Záření gama

- **fotony – elektromagnetické záření**
- agresivní – 90% odstínění: 50 cm Pb deska



Pronikavost radioaktivního záření



Neutronové záření

- **neutrony** (1932 J. Chadwick)
- odstínění: Pb deska + několik m silný beton



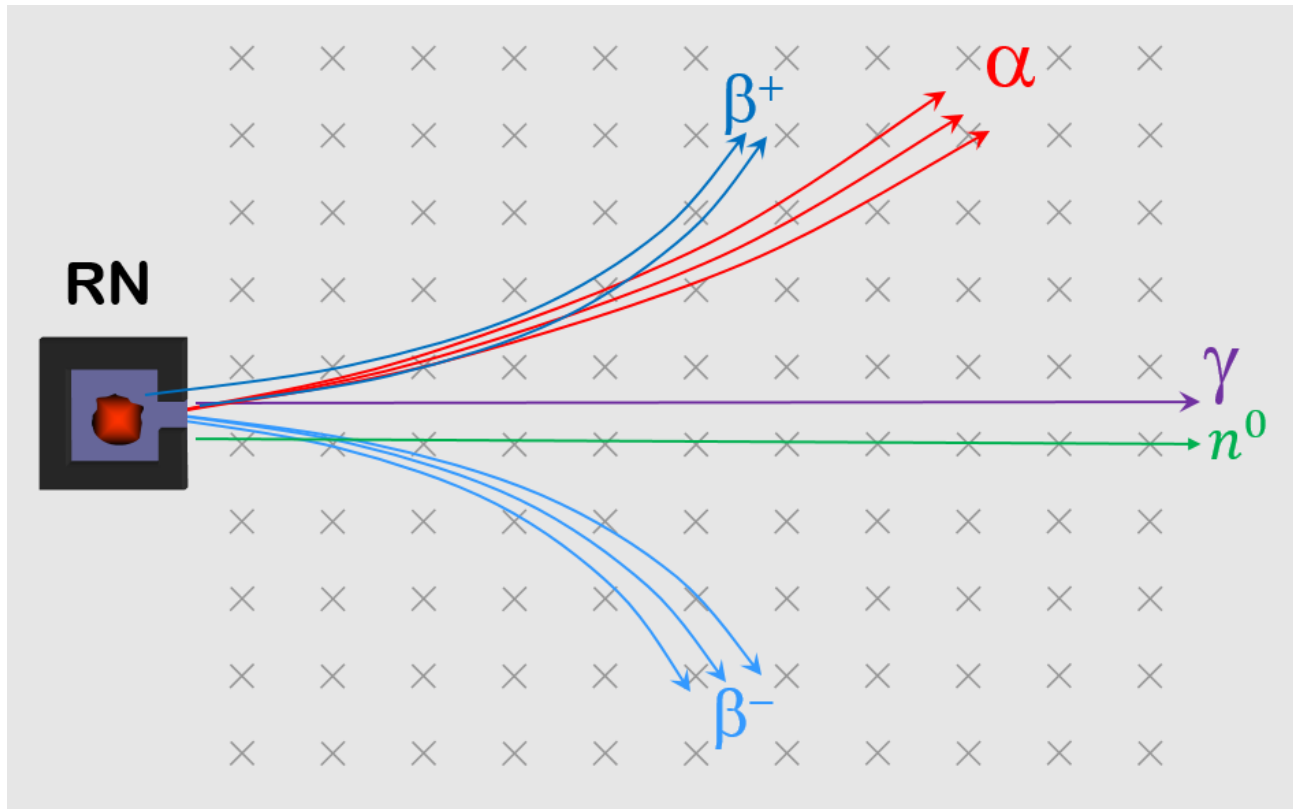
25.3 Přirozená a umělá radioaktivita.

Chování částic v magnetickém poli

- **respektuje Flemingovo pravidlo levé ruky**

→ prsty ve směru rychlosti, indukční čáry jdou do dlaně, palec ukazuje směr **síly působící na kladně nabitou částici** (záporně nabitá – opačný směr)

→ **neutron** – nulový náboj, nemění v magnetickém poli směr pohybu



25.3 Přírozená a umělá radioaktivita.

Umělá radioaktivita

Frederick a Irene Joliot-Curie

→ dcera Marie Curie

→ **1934** ostřelovali **alfa částicemi hliníkovou fólii**, pozorovali vznik fosforu, který se samovolně přeměnil na křemík



- při reakci **vzniká neutronové záření a následně pozitronové záření β^+**

Pozn.:

1919 – Rutherford: 1. umělá transmutace (přeměna) prvku



1932 – Chadwick: objev neutronu

- **transurany** – radionuklidy se **$Z > 92$** , vznikají ostřelováním jader neutrony a těžkými ionty
Př. toxické plutonium s $T = 24\,000$ roků

25.4 Zákon radioaktivní přeměny

Aktivita zářiče – A [A] = Bq (bekrel)

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

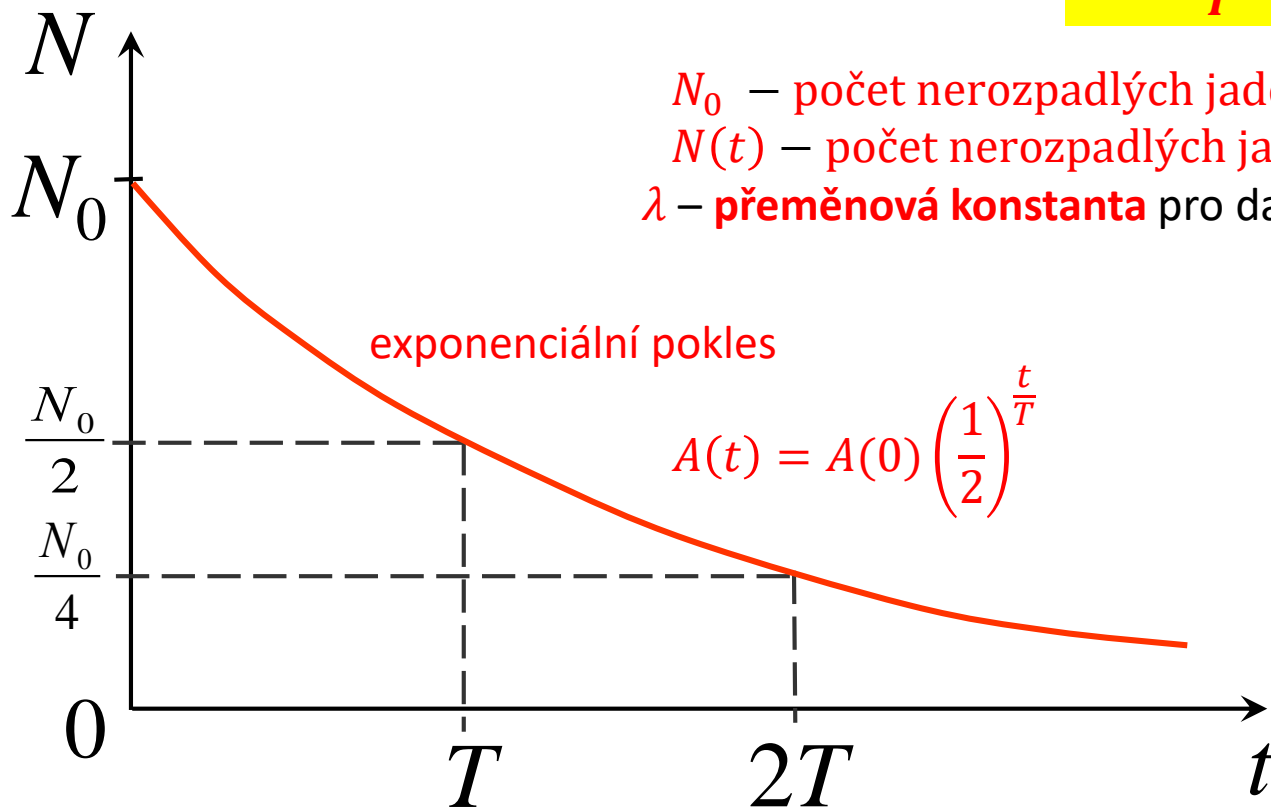
- udává počet rozpadlých jader za 1 s

Poločas rozpadu – T [T] = s

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

- doba, za kterou se rozpadne 1/2 jader nuklidu

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



N_0 – počet nerozpadlých jader na začátku
 $N(t)$ – počet nerozpadlých jader v čase t
 λ – **přeměnová konstanta** pro daný radionuklid

25.5 Využití radionuklidů v praxi

- využívá se princip, že záření se při průchodu látkou zeslabuje podle exponenciálního zákona

1. Určování tloušťky vrstev

→ měřením poklesu intenzity záření po průchodu vrstvou lze vypočítat její tloušťku

2. Změna vlastností látky po ozáření

→ hnědý odstín skla, polymerizace, vulkanizace
→ sterilizace lékařských nástrojů, ozařování nádorů
→ ošetření potravin (zamezení klíčivosti semen, brambor)

3. Lékařská diagnostika

→ sledování průtoku krve (technecium $T = 6$ hodin)
→ činnost štítné žlázy (jód $T = 2$ hodiny)

4. Radioizotopový termoelektrický generátor

→ zdroj elektrické energie s téměř neomezenou životností pro kosmické sondy

5. Archeologie → radiokarbonová analýza

→ určení stáří organických materiálů, $T = 5730$ let

6. Negativní projevy záření

→ poškození buněk, vznik karcinomů
→ radioaktivní odpad z jaderných elektráren, havárie elektráren (Černobyl, Fukušima)

