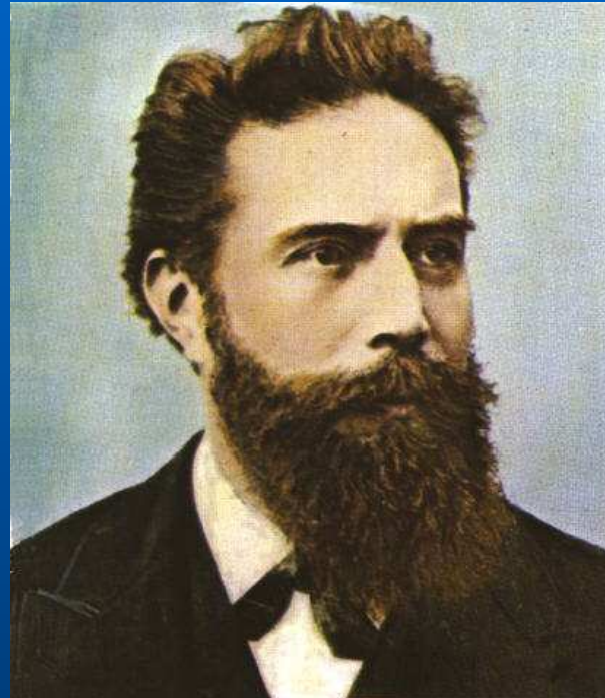
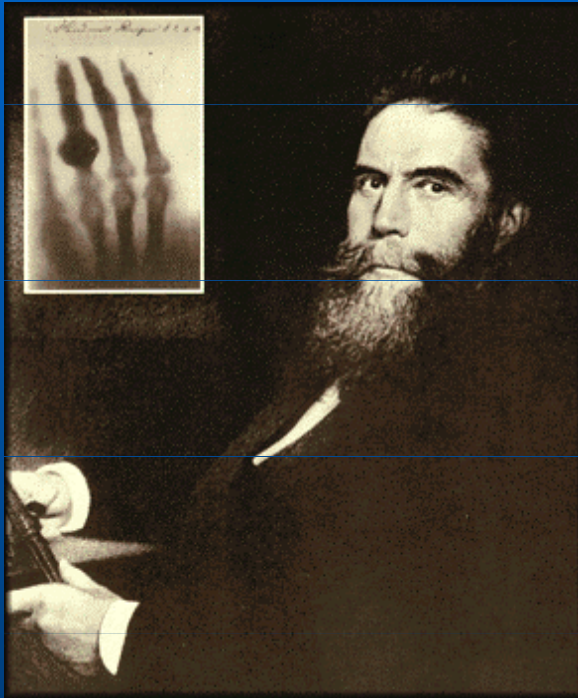


# 3. Spektra atomů

## 3. 2. Rentgenová spektra

1895 – Roentgen: elektromagnetické záření s kratšími vlnovými délkami než ultrafialové: 10 až 0,01 nm



Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923)



ruka poraněná brokovnicí

# 3. Spektra atomů

## 3. 2. Rentgenová spektra



uspořádání podle Coolidge

# 3. Spektra atomů

## 3. 2. Rentgenová spektra

a) brzdné záření: spojité spektrum, nezávisí na materiálu antikatody

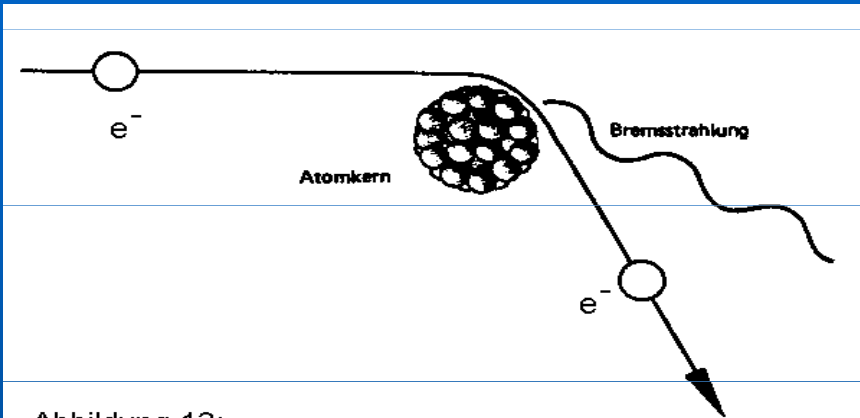
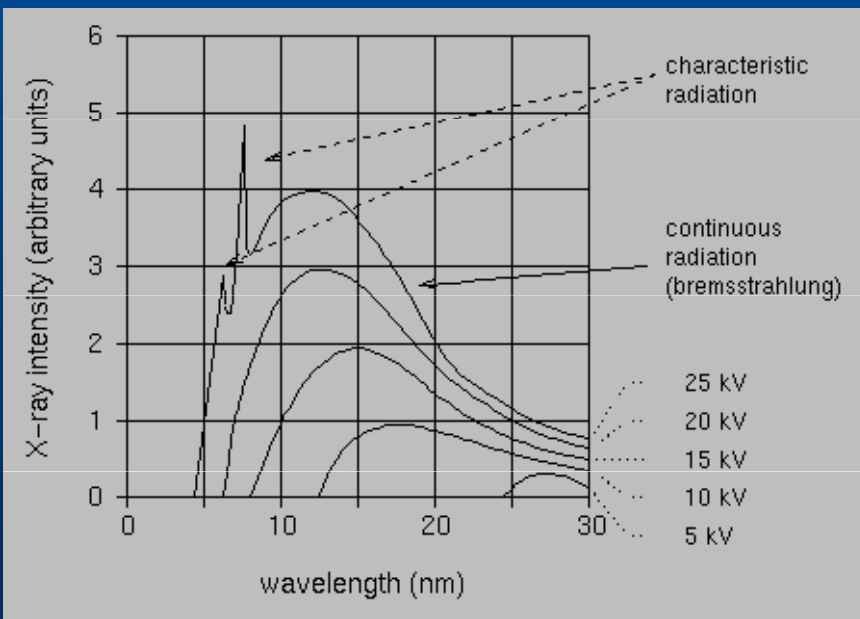
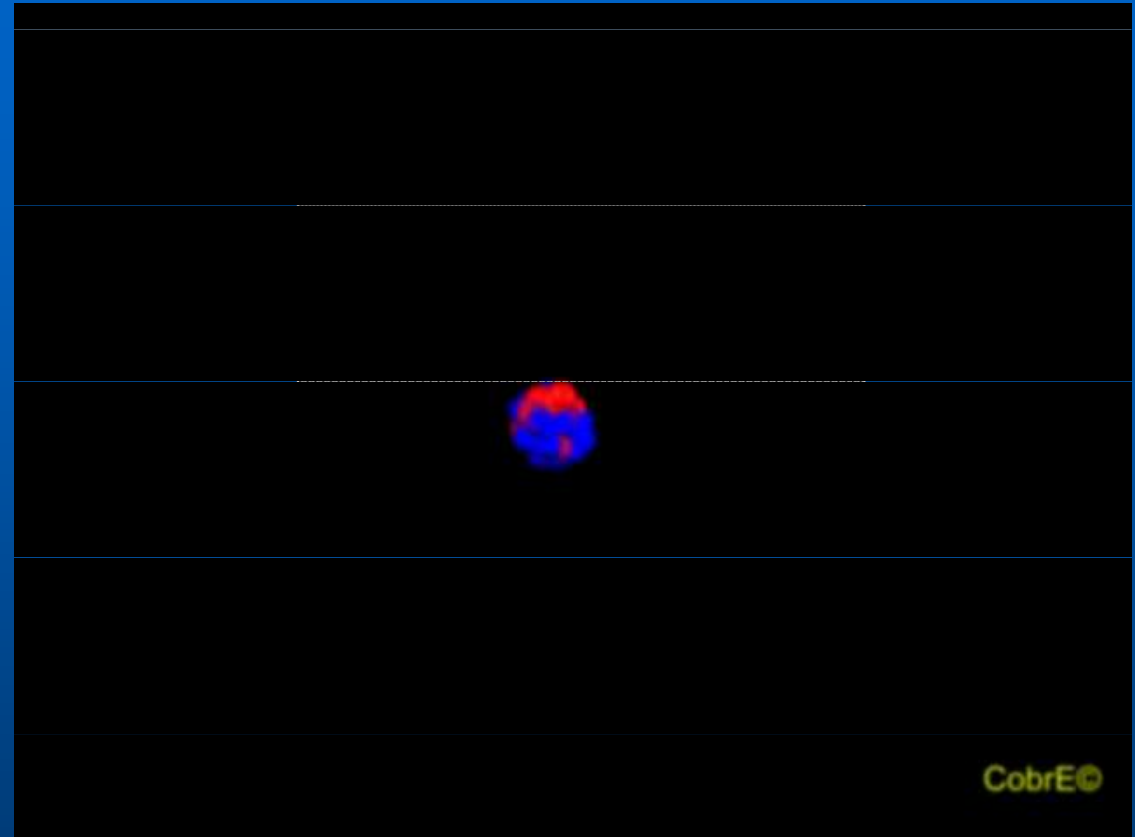


Abbildung 13:

Zur Bremsstrahlung

In der Nähe eines positiv geladenen Atomkerns wird ein Elektron abgebremst. Dabei verliert es Energie, die es in Form von Bremsstrahlung abgibt.



$$eU = h\nu \Rightarrow \lambda_{\min} = \frac{hc}{eU}$$

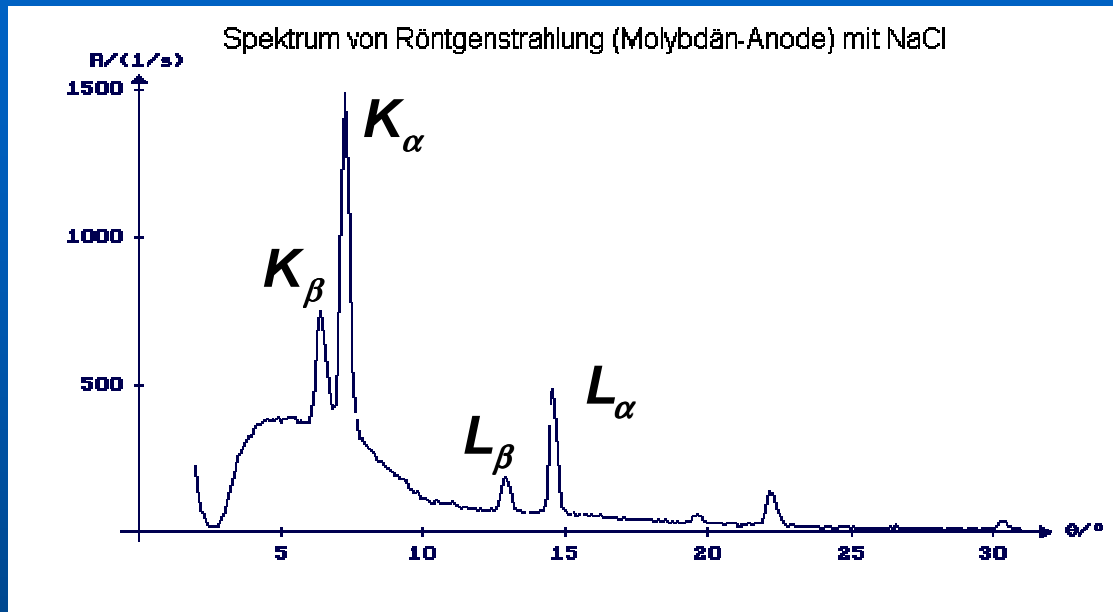
krátkovlnná hranice

$$U = 25 \text{ kV} \Rightarrow \lambda_{\min} = 0,05 \text{ nm}$$

# 3. Spektra atomů

## 3. 2. Rentgenová spektra

b) charakteristické záření: čárové spektrum, závisí na materiálu antikatody



vznik: excitace elektronu v atomu  
z vnitřních vrstev: série

$$K_{\alpha} \approx L \rightarrow K \quad K_{\beta} \approx M \rightarrow K$$

$$L_{\alpha} \approx M \rightarrow L \quad L_{\beta} \approx N \rightarrow L$$

frekvence čar charakteristického Roentgenova spektra popsal Moseley:

$$\sqrt{\nu} = C \cdot (Z - \rho)$$

konstanta čáry

vyjadřuje odstínění slupky,  
ze které elektron přechází  
od jádra

vztah je ve shodě se  
vztahem Balmerovým:

$$\sigma = \frac{\nu}{c} = \Delta \frac{(Z - \rho_i)^2}{n_i^2}$$

# 4. Atomové jádro

## 4. 1. Hmotnost atomových jader

Hmotnosti atomů jsou v poměru malých celých čísel, protože téměř celá hmotnost atomu je v jádře, musí být hmotnosti jader vyjádřitelné přibližně násobkem jisté malé hmotnosti.

atomová hmotnostní jednotka  $u = 1,660\,43 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \approx 931,478 \text{ MeV}$

z definice (1/12 hmotnosti neutrálního atomu uhlíku 12) vyplývá:

$$u = \frac{10^{-3}}{N_a} \quad N_a \text{ Avogadrovo číslo}$$

relativní atomová hmotnost:  $A_r = \frac{m_a}{u}$

nukleonové (hmotnostní) číslo:  $A = [A_r + 0,5]$  [ ] – celá část

označení konkrétního jádra (atomu):  ${}^A_Z\text{X}$

## 4. Atomové jádro

### 4. 1. Hmotnost atomových jader

#### měření hmotnosti atomů: **hmotnostní spektrografy**

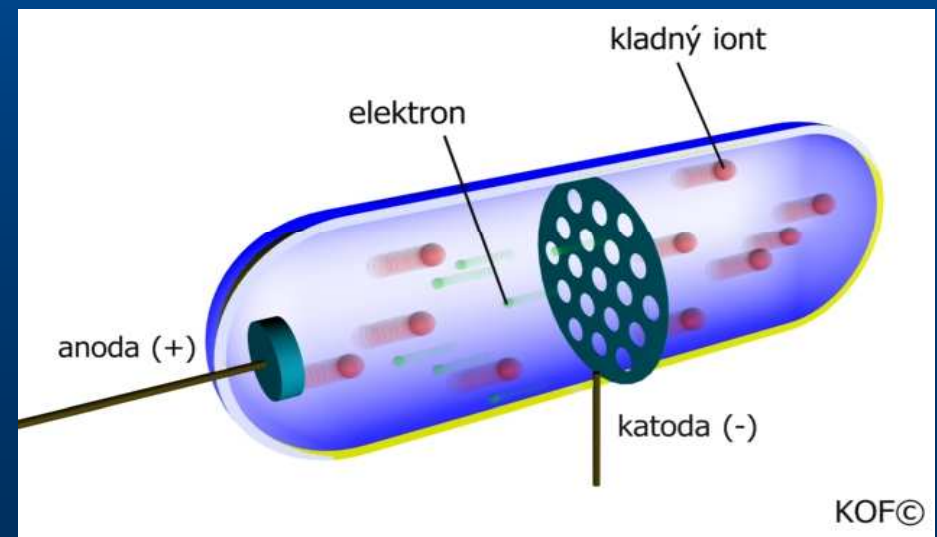
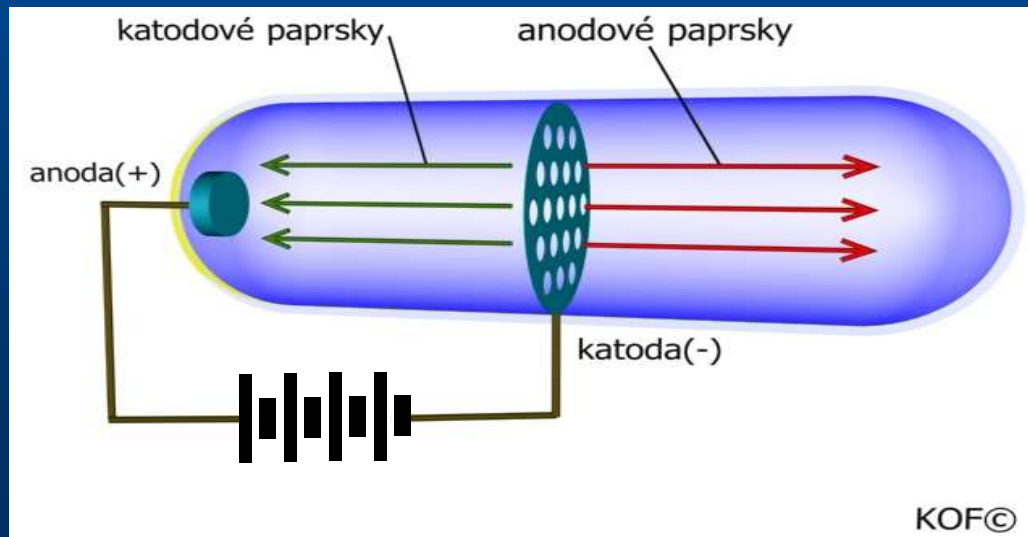
obecně vychází jejich princip z chování nabitě částice s hmotností  $m$  a s nábojem  $q$ , která se pohybuje v kombinaci elektrického a magnetického pole:

$$m\ddot{\vec{r}} = q \cdot \left\{ \vec{E} + \left[ \dot{\vec{r}} \times \vec{B} \right] \right\} \quad \vec{E} \text{ je intenzita elektrického pole}$$

$\vec{B}$  je magnetická indukce

trajektorie závisí na poměru  $\frac{q}{m}$  (specifickém náboji)

atomy je nutné ionizovat: ideálním zdrojem jsou anodové (kanálové) paprsky

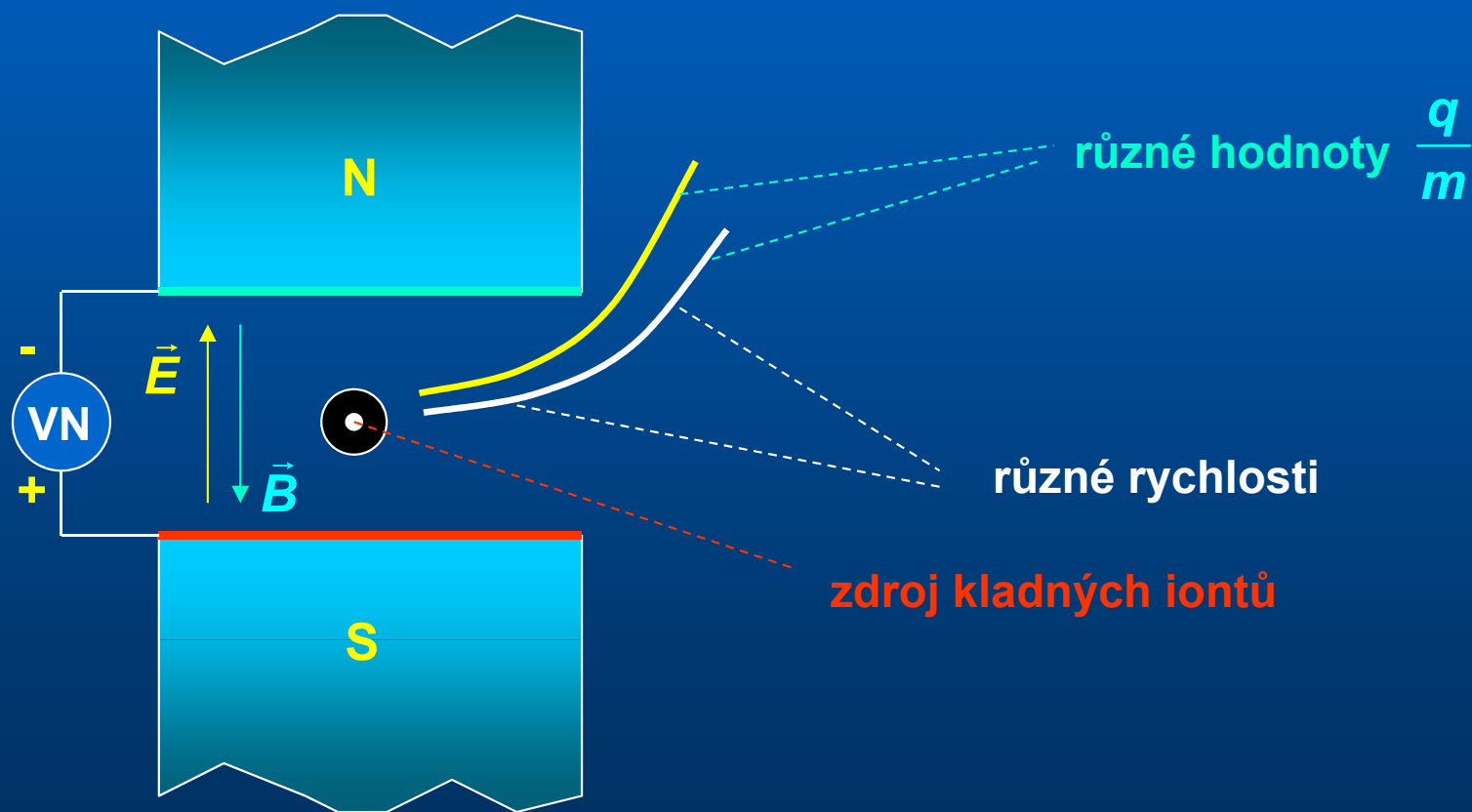


## 4. Atomové jádro

### 4. 1. Hmotnost atomových jader

# Thomsonův hmotnostní spektrograf

1913: příčné  $\vec{E}$  a příčné rovnoběžné  $\vec{B}$

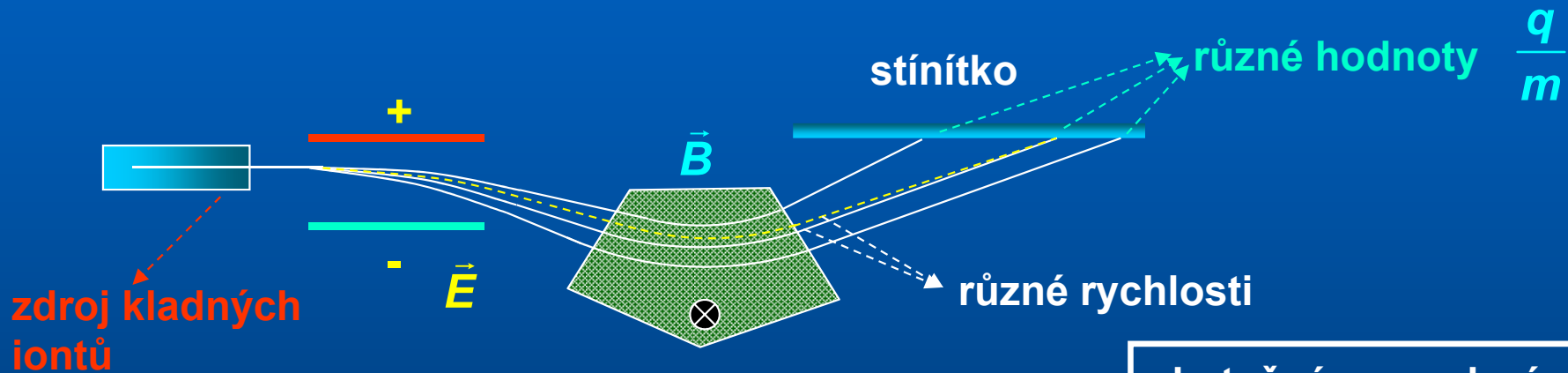


## 4. Atomové jádro

### 4. 1. Hmotnost atomových jader

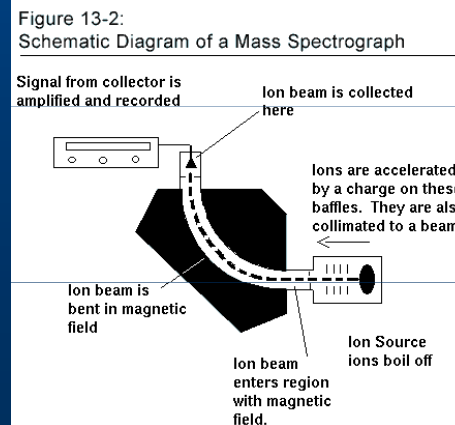
# Astonův hmotnostní spektrograf

1918: příčné  $\vec{E}$  a příčné kolmé  $\vec{B}$



zlepšení: místo dopadu nezávisí na rychlosti iontu (fokusace magnetickým polem)

skutečné provedení z roku 1919



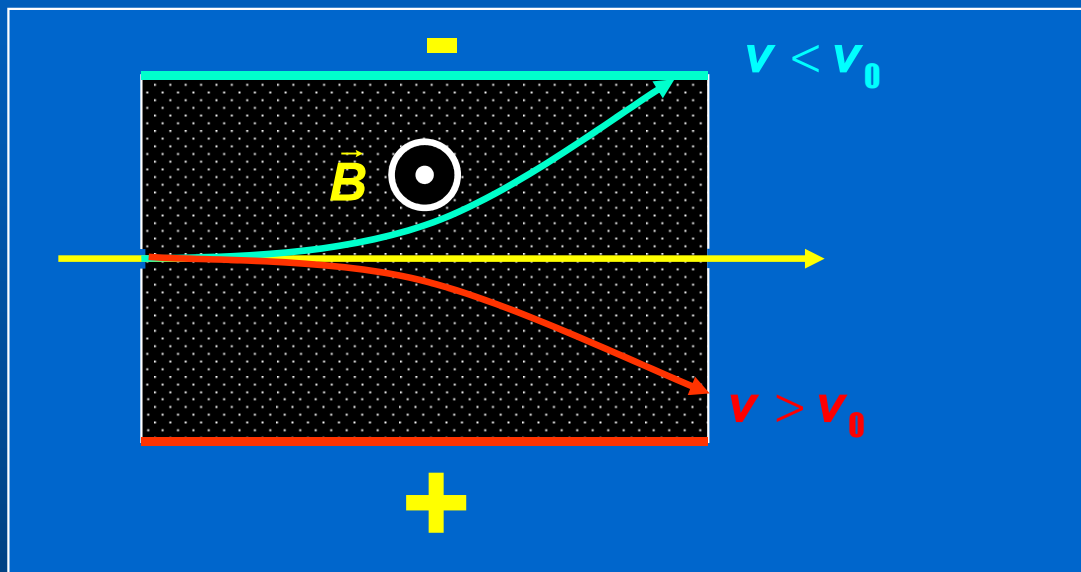


## 4. Atomové jádro

### 4. 1. Hmotnost atomových jader

# Bainbridgeův hmotnostní spektrograf

filtr rychlostí



$$q \cdot E - q \cdot v_0 \cdot B = 0$$

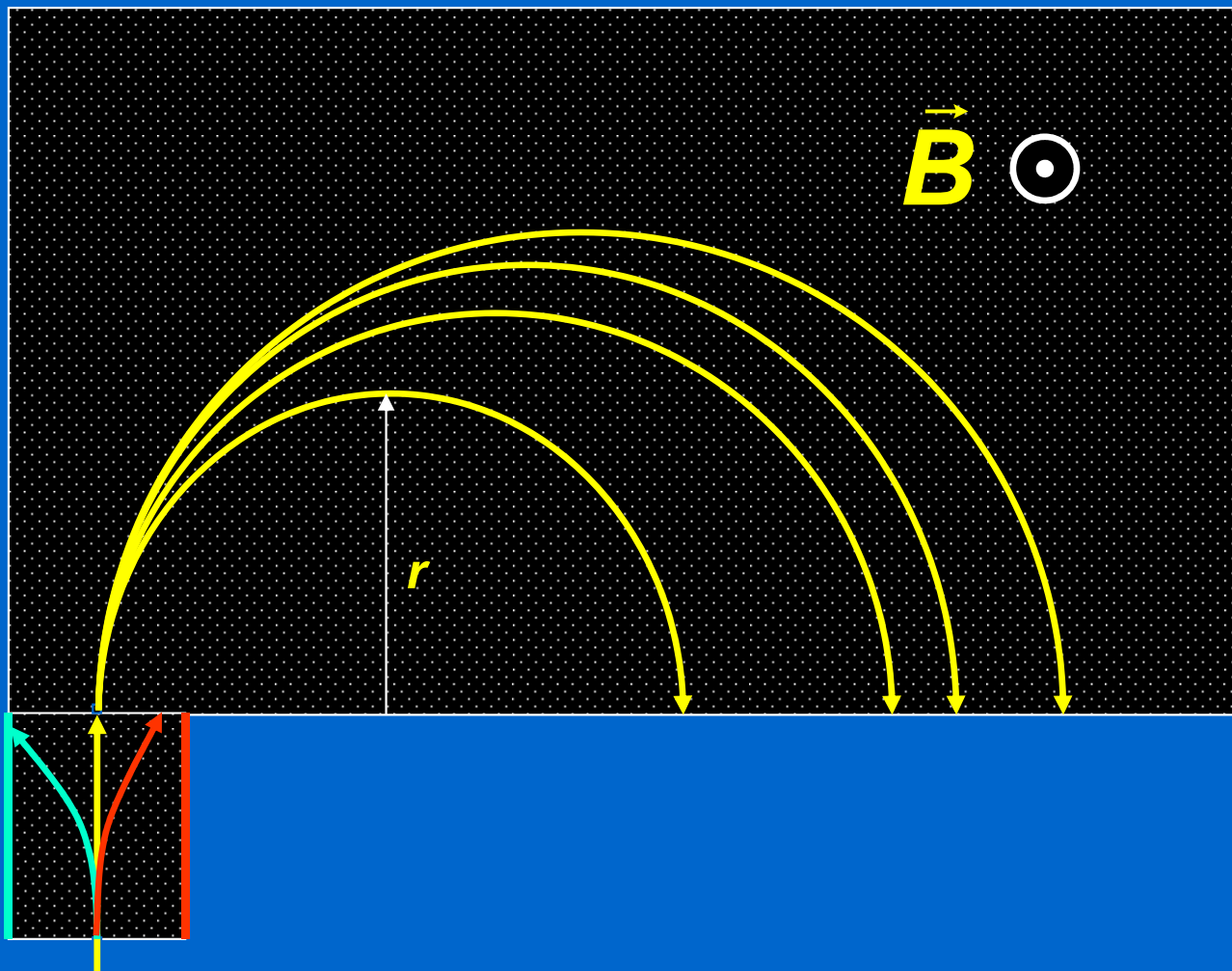
$$v_0 = \frac{E}{B}$$

## 4. Atomové jádro

### 4. 1. Hmotnost atomových jader

magnetický  
analyzátor

$$\frac{mv_0^2}{r} = q \cdot v_0 \cdot B$$
$$r = \frac{mv_0}{qB}$$

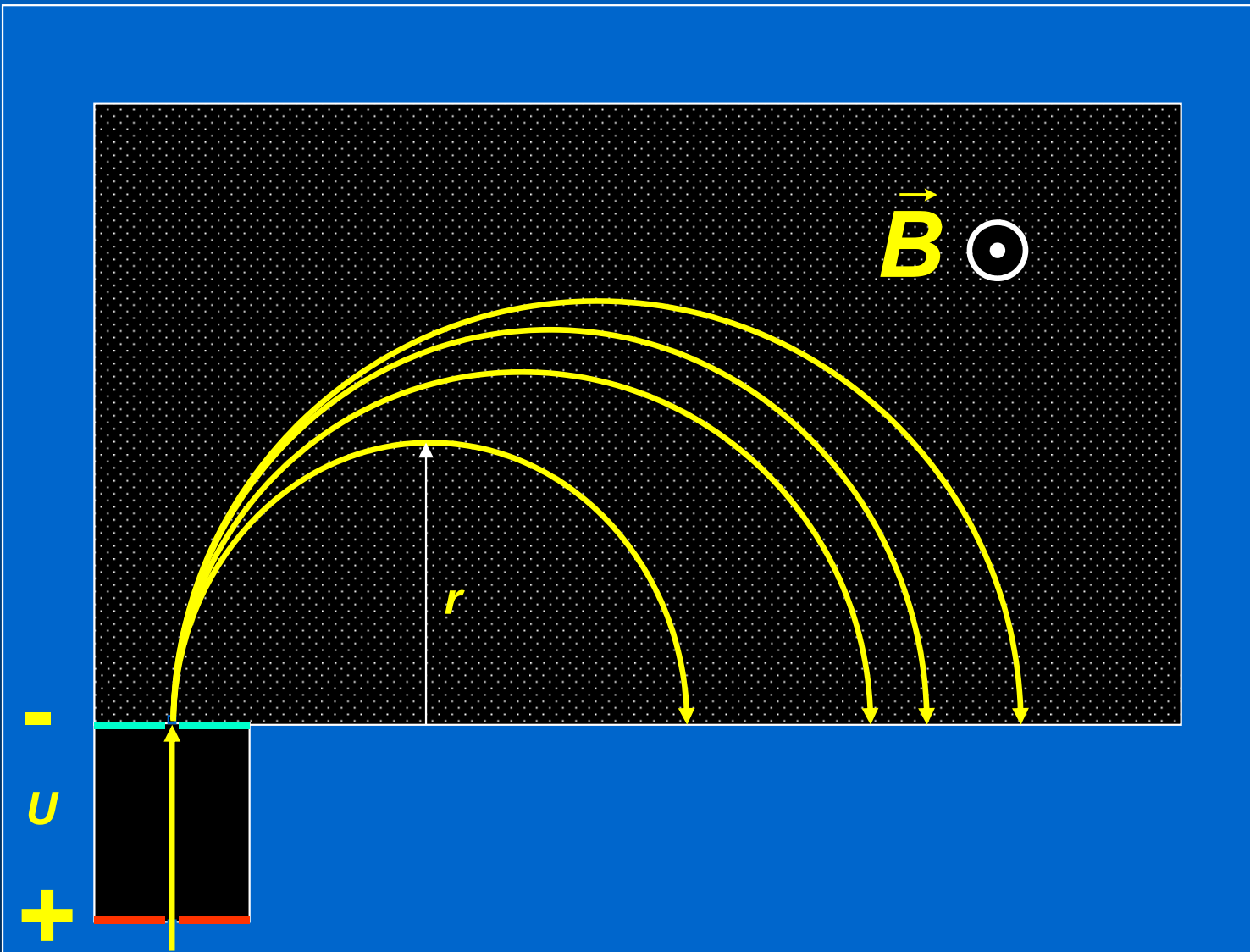


## 4. Atomové jádro

### 4. 1. Hmotnost atomových jader

# Bleakneyův hmotnostní spektrograf

filtr rychlostí – malá účinnost, zde se ionty získávají s nepatrnou energií a urychlují se:



$$\frac{mv^2}{2} = q \cdot U$$

$$\frac{mv^2}{r} = q \cdot v \cdot B$$

$$v = \frac{q \cdot r \cdot B}{m}$$

$$\frac{mr^2q^2B^2}{2m^2} = q \cdot U$$

$$\boxed{\frac{m}{q} = \frac{r^2B^2}{2U}}$$

separace izotopů

## 4. Atomové jádro

### 4. 2. Vývoj představ o složení jader

1896 Becquerel – radioaktivní záření – z některých atomů vycházejí elektrony s energiemi až 1 MeV, ty nemohou pocházet z obalu, musejí vycházet z jádra

1 hypotéza: jádro  ${}^A_ZX$  tvoří  $A$  protonů a  $A - Z$  elektronů:

$$\text{celkový náboj: } A \cdot e + (A - Z) \cdot (-e) = Ze$$

tato představa vede ke dvěma sporům:

Jádro  ${}^{14}_7N$  obsahuje podle hypotézy celkem 21 částic (14 protonů a 7 elektronů), všechny částice jsou fermiony, jádro by mělo být také fermionem a skupina jader by se měla řídit statistickým rozdělení Fermiho-Diracovým a podléhat Pauliho vylučovacímu principu.

z experimentů: jádro je bosonem – **dusíková katastrofa**

2. spor vyplývá z relací neurčitosti: má-li být elektron lokalizován v jádře s rozměrem  $10^{-15}$  m, musí být jeho neurčitost v hybnosti:

$$\Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2\Delta x} \cong 5 \cdot 10^{-20} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \quad \text{proto jeho energie může dosahovat:}$$

$$W_k = \sqrt{(\Delta p_x)^2 c^2 + W_0^2} - W_0 \cong 1,4 \cdot 10^{-11} \text{ J} = 100 \text{ MeV} \quad \text{z beta rozpadu však jen } \sim 1 \text{ MeV}$$

## 4. Atomové jádro

### 4. 2. Vývoj představ o složení jader

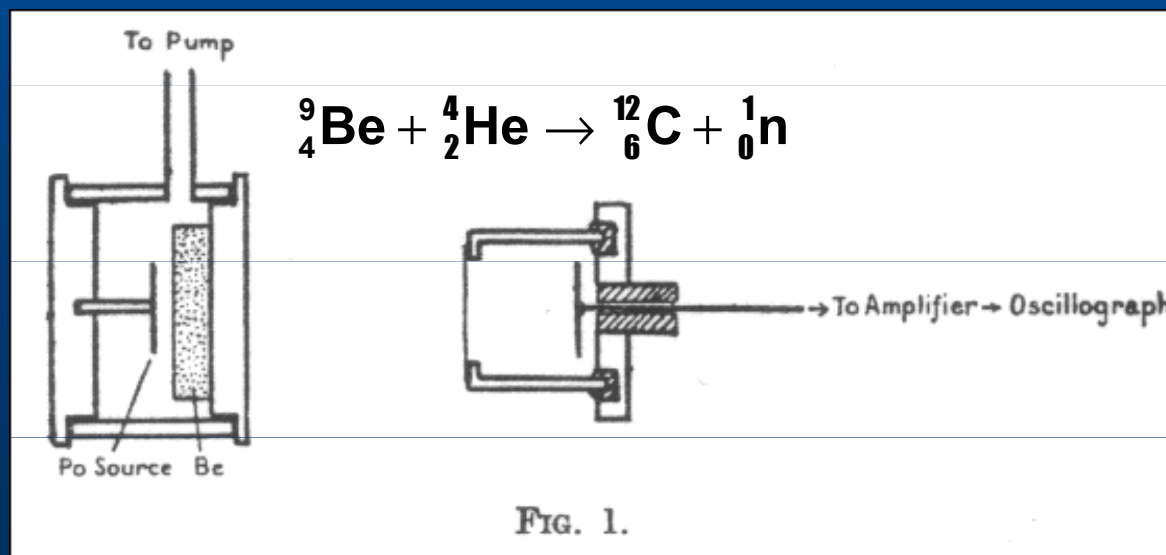
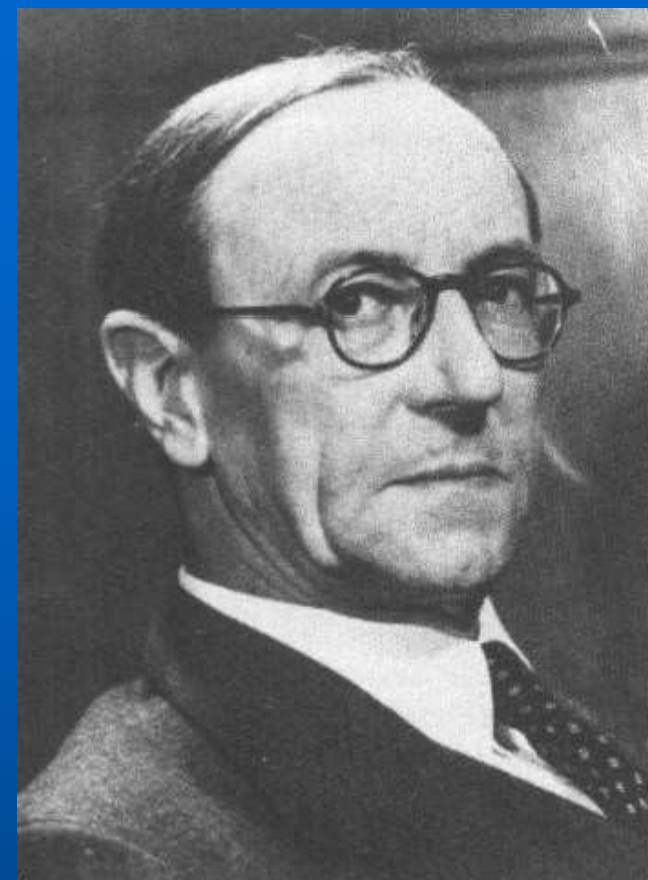
1931 – Ivaněnko a Heisenberg: teorie o neutronu



Werner Heisenberg (1901-1976)

1932 – experimentální důkaz:  
Chadwick

James Chadwick (1891-1974)



## 4. Atomové jádro

### 4. 2. Vývoj představ o složení jader

${}^A_ZX$  obsahuje Z protonů  $A - Z$  neutronů ( ${}^{14}_7N$  obsahuje tedy pouze 14 fermionů, proto je bosonem)

${}^A_ZX$  obecný název pro konkrétní hodnoty: **nuklid**

skupiny nuklidů se stejným Z: **izotopy** daného prvku

skupiny nuklidů se stejným A: **izobary**

skupiny nuklidů se stejným A - Z: **izotony**

částice	$m / u$	$mc^2 / \text{MeV}$	spin	doba života / s	mag. moment / $\mu_J$
proton	1,007 276 61	938,2796	$\frac{1}{2}$	$> 10^{-37}$	2,79
neutron	1,008 665 2	939,5731	$\frac{1}{2}$	$918 \pm 14$	1,91
elektron	$5,4893 \cdot 10^{-4}$	0,511004	$\frac{1}{2}$	stabilní	1836,5

$$\mu_J = \frac{e\hbar}{2m_p} = 5,0505 \cdot 10^{-27} \text{ J} \cdot \text{T}^{-1}$$

jaderný magneton

## 4. Atomové jádro

### 4. 3. Vazebná energie

$$B = Z \cdot m_H c^2 + (A - Z) m_n c^2 - m_J c^2$$

hmotnost atomu vodíku

hmotnost neutronu

hmotnost jádra

vazebné energie elektronů lze zanedbat ~ 1000 eV

$\frac{B}{A}$  vazebná energie na 1 nukleon

$\frac{B}{c^2}$  hmotnostní deficit

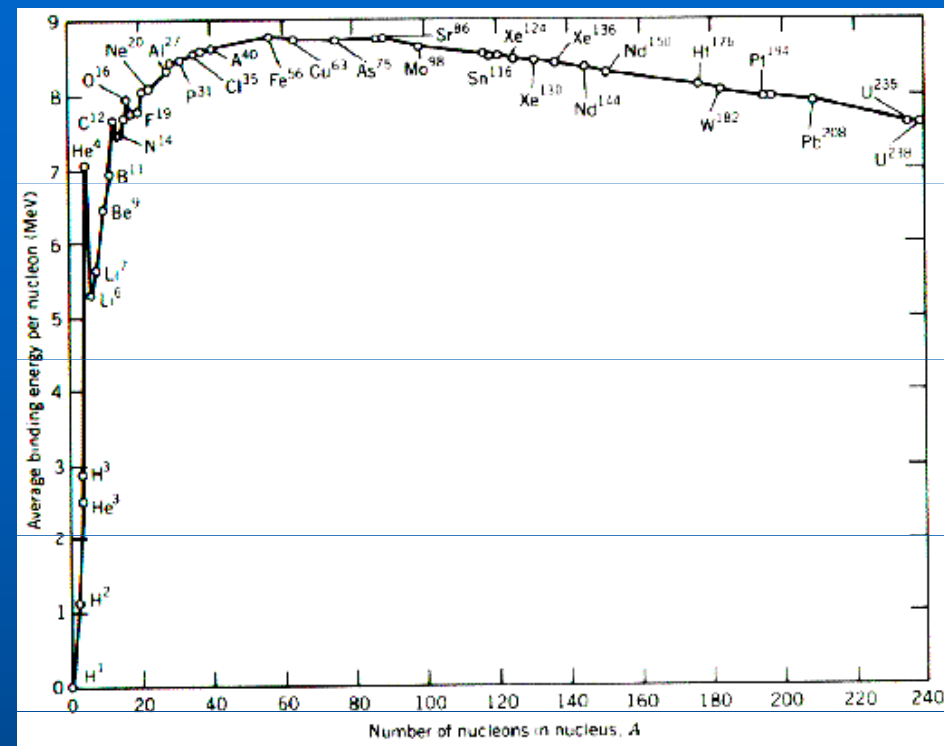
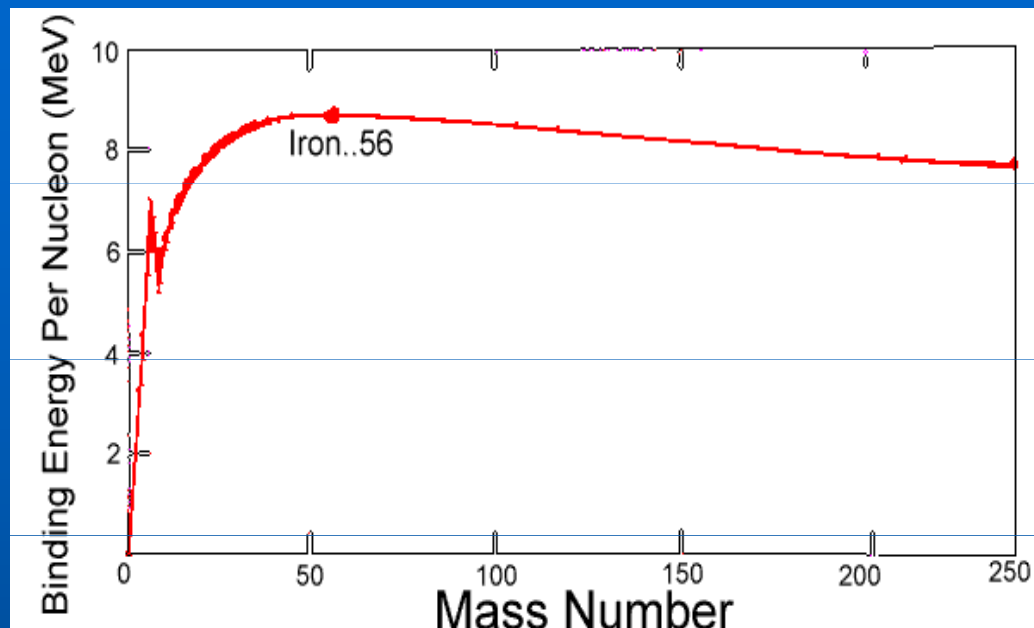
$\frac{B}{A}$  míra stability jádra (energie, kterou by bylo nutné vynaložit k rozložení jádra na jednotlivé nukleony)

síly způsobující přitažlivou interakci mezi nukleony: **jaderné síly** (jedny za 4 základních sil v přírodě)

kdyby měly jaderné síly stejný charakter jako síly gravitační, muselo by  $\frac{B}{A}$  lineárně vzrůstat s velikostí  $A$  (byly by nenasycené)

## 4. Atomové jádro

### 4. 3. Vazebná energie





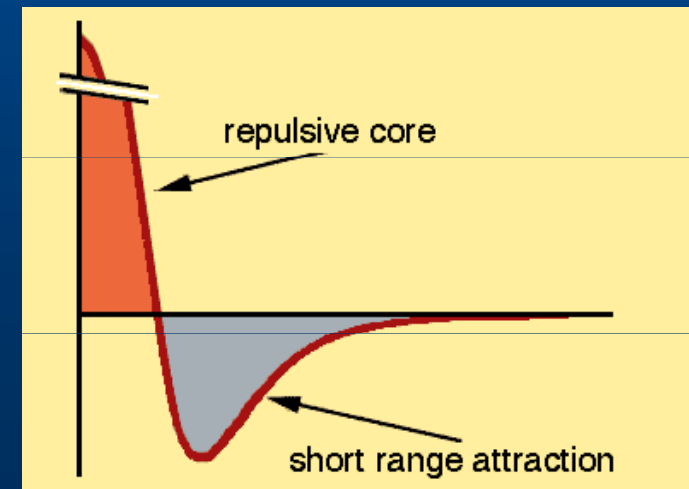
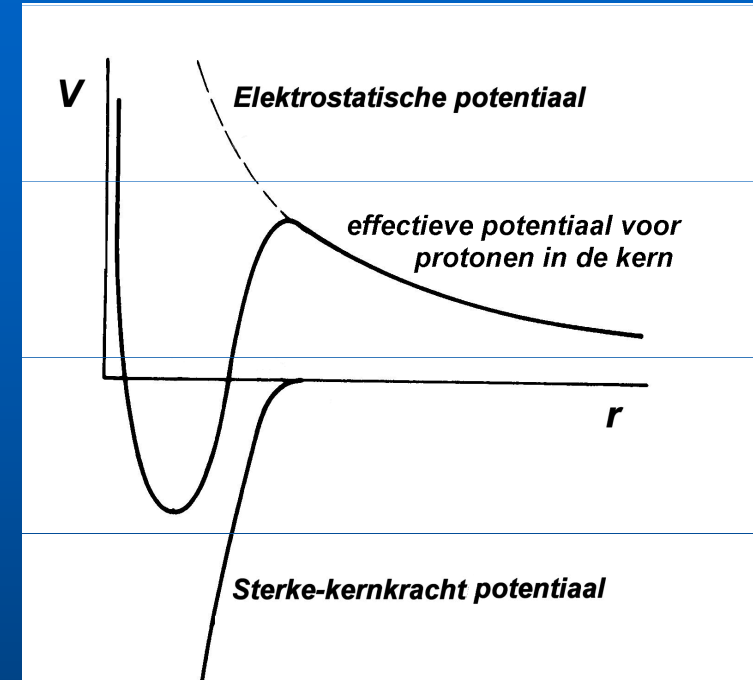
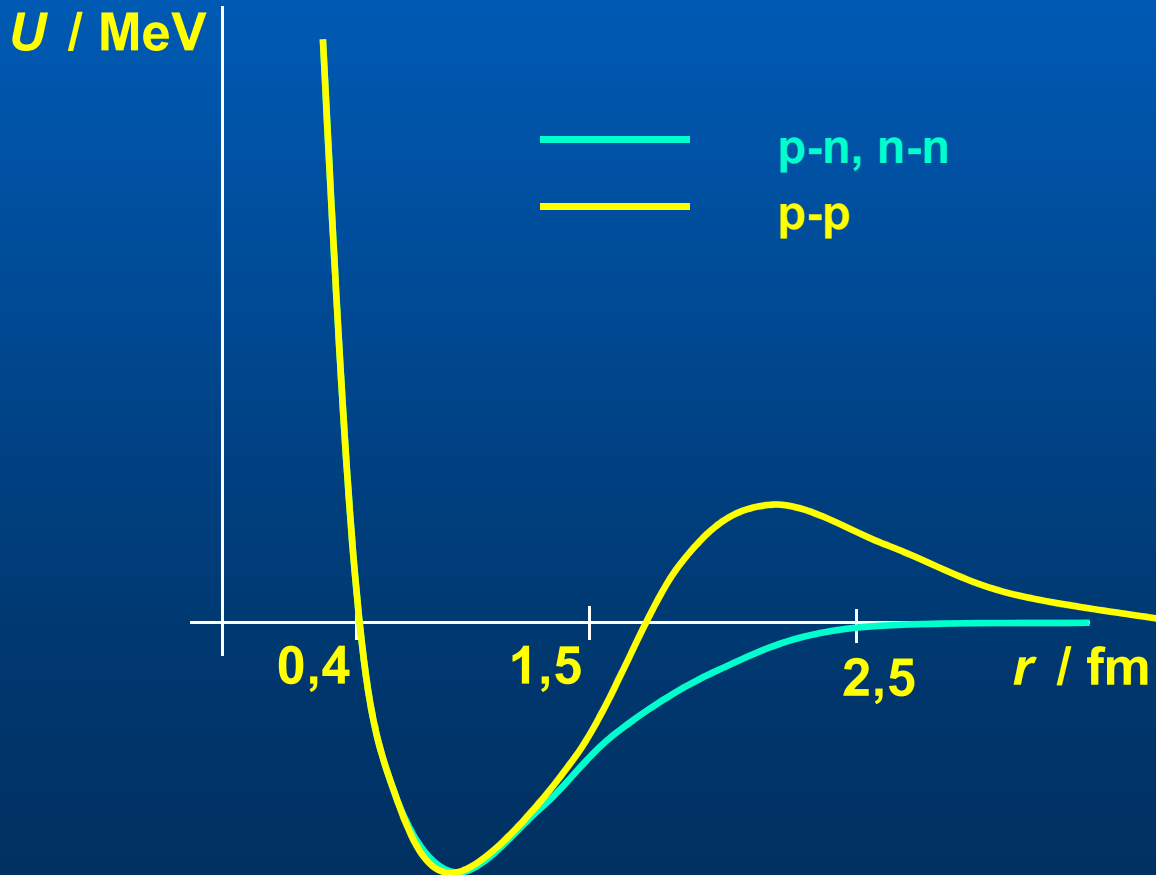
## 4. Atomové jádro

### 4. 4. Jaderné síly

anomální Rutherfordův rozptyl: u lehkých jader rozptylujícího prvku docházelo k změně energie částice alfa, z toho vyplynulo, že dosah jaderných sil, do jejichž vlivu se částice alfa dostala je menší než  $10^{-14}$  m

Základní vlastnosti jaderných sil:

#### 1. mají krátký dosah



## 4. Atomové jádro

### 4. 4. Jaderné síly

## 2. jsou nábojově nezávislé

## 3. dosahují nasycení

Vyplývá to jednak z grafu vazebné energie na jeden nukleon, jednak z krátkého dosahu: jeden nukleon se váže pouze s nukleony, které jsou v dosahu jaderných sil.

## 4. jsou spinově závislé

## 5. mají tenzorový charakter

Jaderné síly závisejí nejen na orientaci spinů nukleonů, ale i na úhly mezi těmito momenty hybnosti a jejich spojnicí.

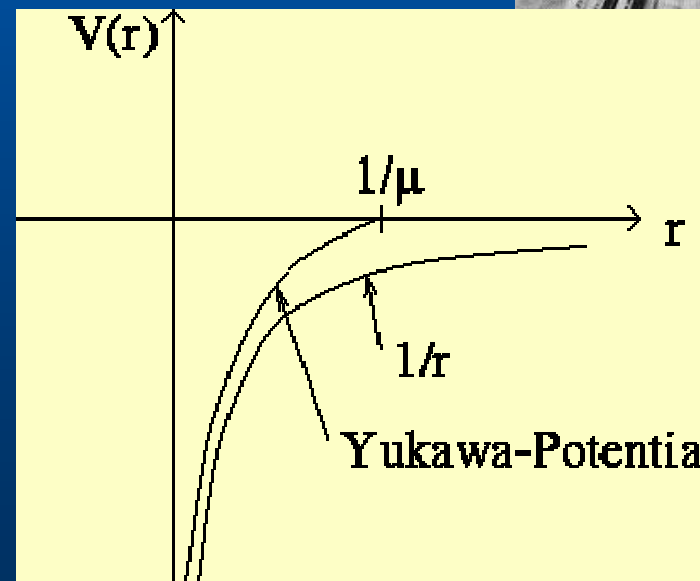
Podstata jaderných sil: 1935 Yukawa

$$U(r) = -g \frac{e^{-\alpha r}}{r}$$

$g$  je konstanta

$r$  je vzdálenost nukleonů

$\frac{1}{\alpha}$  je parametr s rozměrem délky



Hideki Yukawa (1907-1981)

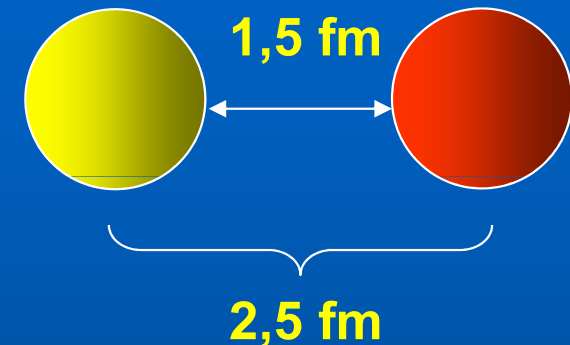
## 4. Atomové jádro

### 4. 4. Jaderné síly

vlastnosti jaderných sil naznačují, že jde o výměnné síly,  $\frac{1}{\alpha}$  je vlnová délka zprostředkující částice dělená  $2\pi$ :

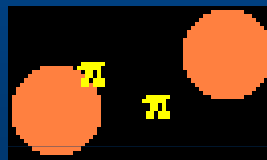
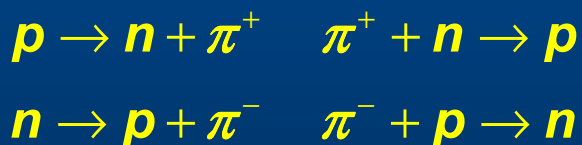
$$\frac{1}{\alpha} = \frac{\hbar}{mc}$$

$$m = \frac{\hbar}{\frac{1}{\alpha} c} = \frac{1,05 \cdot 10^{-34}}{1,5 \cdot 10^{-15} \cdot 3 \cdot 10^8} = 2,34 \cdot 10^{-28} \text{ kg} = 257 m_e$$



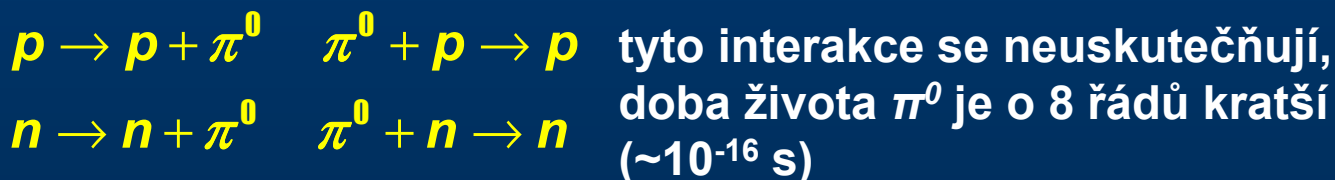
Zprostředkující částice má hmotnost mezi elektronem a nukleonem, Yukawa ji nazval **mezon**

experimentální objev těchto částic: 1947, protože bylo později objeveno více částic tohoto typu, dnes **mezon  $\pi$  (pion)**



výměna  
pionu

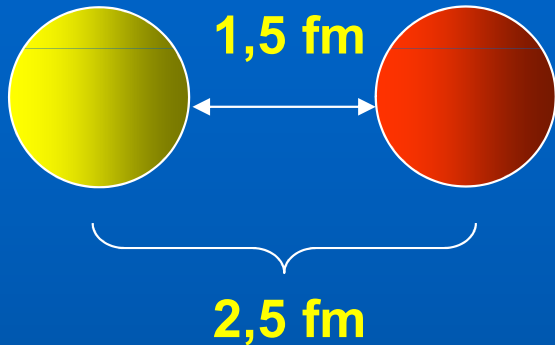
pionový  
„obal“  
protonu



## 4. Atomové jádro

### 4. 4. Jaderné síly

Odhad hmotnosti mezonu  $\pi$  je možné provést i na základě relací neurčitosti:



za předpokladu, že mezon přelétá maximální možnou rychlostí:  $\sim c$ , lze psát:

$$\Delta x = c \cdot \Delta t = 1,5 \cdot 10^{-15} \text{ m} \quad \Delta E \cdot \Delta t \cong \frac{\hbar}{2} \quad \Delta E = m_{\pi} \cdot c^2$$

$$m_{\pi} \cong \frac{\hbar}{2c \cdot (c \cdot \Delta t)} = \frac{\hbar}{2c \cdot \Delta x} = 1,2 \cdot 10^{-28} \text{ kg} = 118 m_e$$

tj. polovina odhadu z Yukawovy vlnové délky. Skutečná hmotnost pionu je  $273 m_e$ .

Z interakcí vyplývá, že spin pionu je 0. Je to tedy boson.

## 4. Atomové jádro

### 4. 4. Jaderné síly

Další vlastnosti jaderných sil:

Separační energie je energie potřebná k odtržení neutronu nebo protonu od jádra. Charakteristiky jádra jsou:  $A$  počet nukleonů,  $Z$  počet protonů,  $A-Z$  počet neutronů.

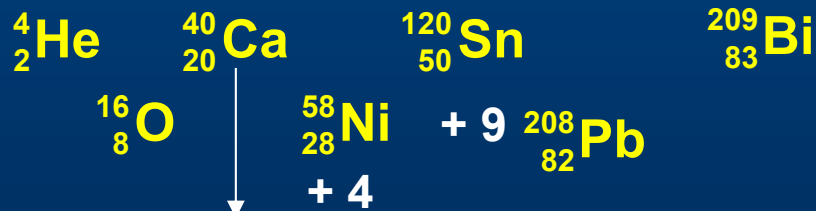
$$S_n = [m(Z, N-1) + m_n - m(Z, N)] \cdot c^2 = B(Z, N) - B(Z, N-1)$$

Párová energie je rozdíl dvou sousedních separačních energií:

$$\delta_n = S_n(Z, N) - S_n(Z, N-1)$$

Separační energie vykazuje maxima obdobná maximům ionizační energie u elektronových obalů netečných plynů. Extrémně stabilní jsou jádra, u kterých počet protonů, neutronů nebo nukleonů dosahuje některého z magických čísel:

**2, 8, 20, 28, 50, 82, 126**

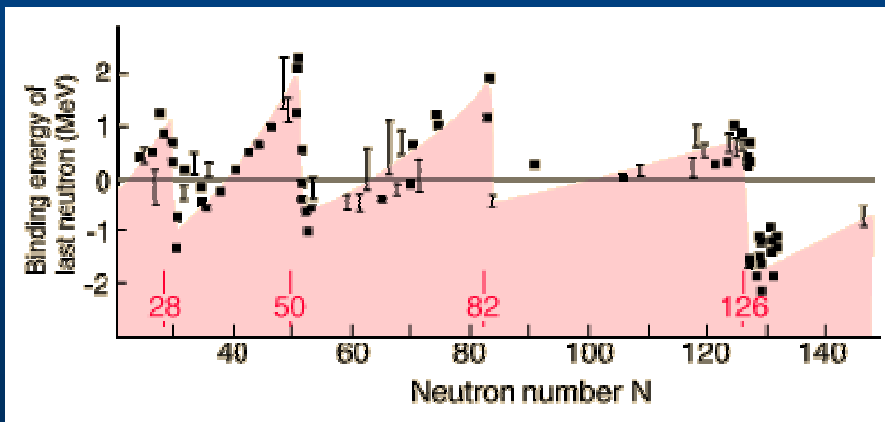
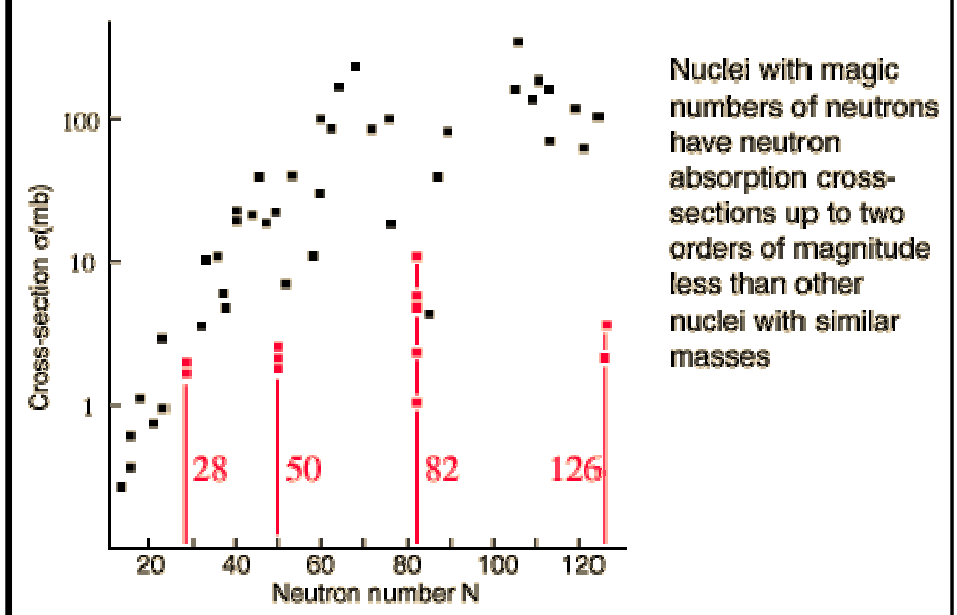
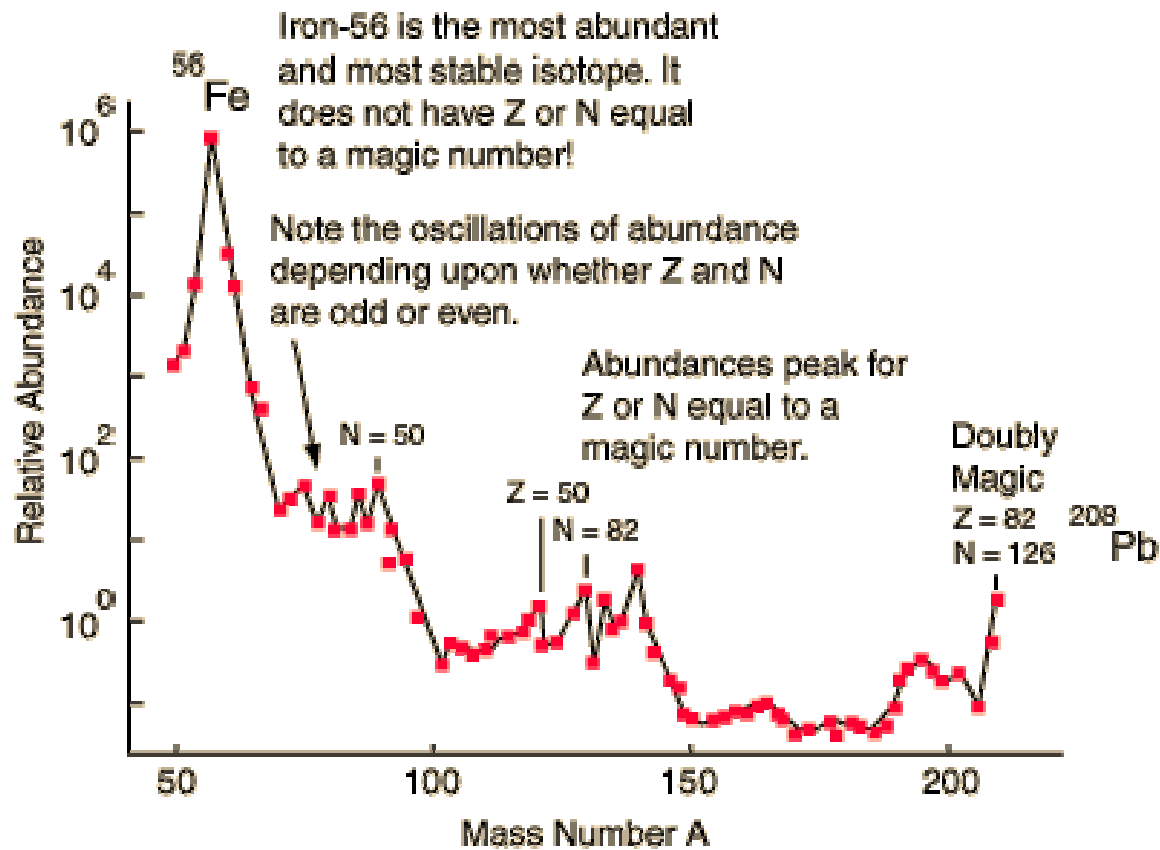


+ dalších 5 stabilních izotopů

V jádře musí existovat také jakási slupková struktura s kvantovanými energiemi.

# 4. Atomové jádro

## 4. 4. Jaderné síly



## 4. Atomové jádro

### 4. 5. Kapkový model jádra

z různých experimentů pro poloměr jádra:  $R = r_0 \cdot A^{\frac{1}{3}}$   $r_0 = 1,25 \cdot 10^{-15} \text{ m}$

Objem jádra je úměrný počtu nukleonů, nukleony se chovají jako nestlačitelné, jádro se chová jako kulová kapka nestlačitelné jaderné kapaliny.

Z této představy a dalších experimentů lze sestavit poloempirickou formuli pro výpočet hmotnosti jader (pro vazebnou energii):

a) Pro většinu jader platí, že  $\frac{B}{A}$  je zhruba konstantní,

proto můžeme vyjádřit v nejhrubším přiblížení:

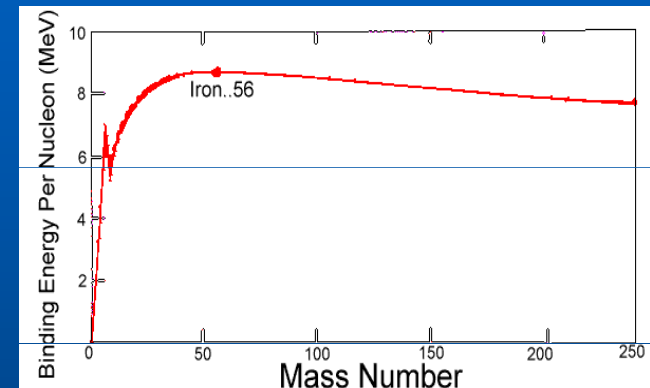
$$B_1 = a_v \cdot A, \quad a_v \text{ je konstanta objemové energie } B_1$$

b) Nukleony na povrchu „kapky“ se mohou vázat, jen s omezeným počtem dalších nukleonů, vazebná energie se snižuje:

$$B_2 = -a_s \cdot A^{\frac{2}{3}}, \quad a_s \text{ je konstanta povrchové energie } B_2$$

c) Vazebná energie se snižuje odpudivou Coulombovskou silou mezi protony:

$$B_3 = -a_c \cdot Z^2 A^{-\frac{1}{3}}, \quad a_c \text{ je konstanta Coulombovské energie } B_3$$



## 4. Atomové jádro

### 4. 5. Kapkový model jádra

d) Při malých hodnotách  $A$  je jádro nejstabilnější, je-li  $Z = A/2$

$$B_4 = -a_a \cdot \frac{\left(Z - \frac{A}{2}\right)^2}{A}, \quad a_a \text{ je konstanta asymetrické energie } B_4$$

e) Z hodnot separačních energií vyplývá, že nejstabilnější jádra mají sudý počet protonů a sudý počet neutronů – jsou **sudo-sudá**.

$$B_5 = \begin{cases} a_p \cdot A^{-\frac{1}{3}}, & \text{pro jádra ss} \\ 0, & \text{pro ls a sl jádra, } a_p \text{ je konstanta paritní energie } B_5 \\ -a_p \cdot A^{-\frac{1}{3}}, & \text{pro jádra ll} \end{cases}$$

Poznámka: existují jen 4 stabilní **lichó-lichá** jádra:  ${}^2_1\text{H}$ ,  ${}^6_3\text{Li}$ ,  ${}^{10}_5\text{B}$ ,  ${}^{14}_7\text{N}$

Vazebná energie jádra:  $B = \sum_{i=1}^5 B_i$

Hmotnost jádra:

$$m(Z, A) = Zm_H + (A - Z)m_n + \frac{1}{c^2} \left[ -a_V A + a_S A^{\frac{2}{3}} + a_C \cdot Z^2 A^{-\frac{1}{3}} + a_a \frac{\left(Z - \frac{A}{2}\right)^2}{A} - B_5 \right]$$



## 4. Atomové jádro

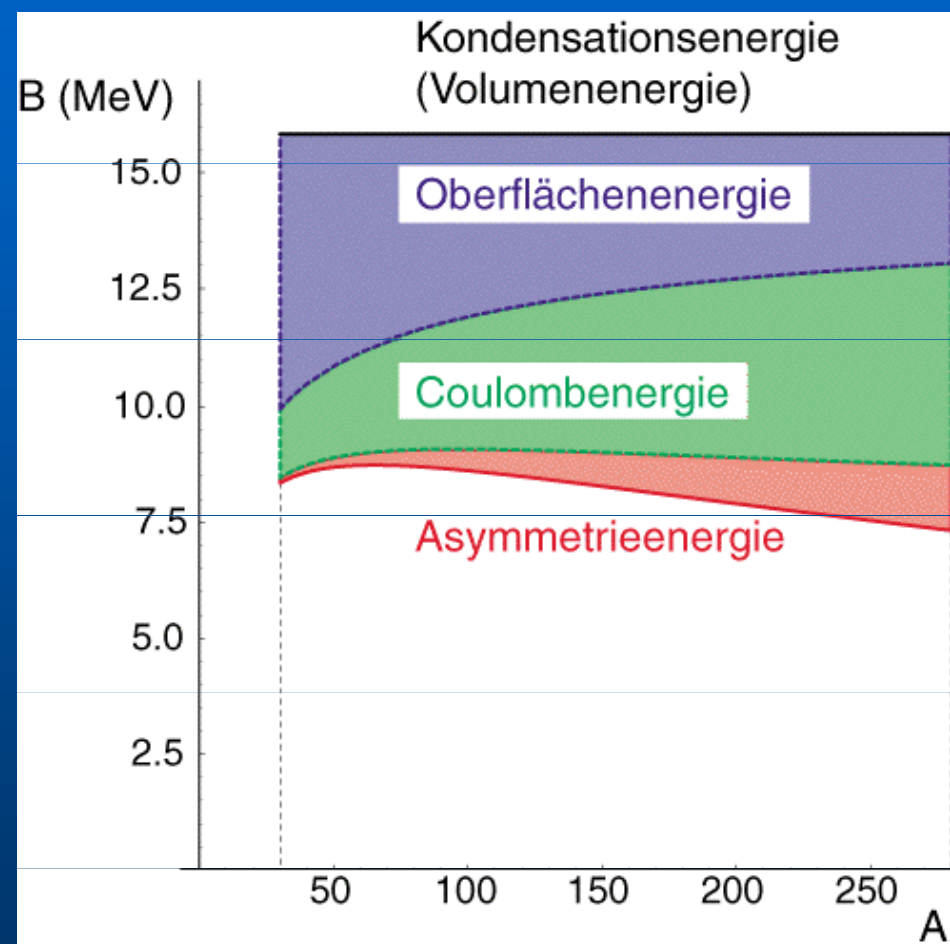
### 4. 5. Kapkový model jádra

poslední vztah je tzv. Weizsäckerova formule pro výpočet hmotnosti jader. Pro  $A > 30$  je přesnost lepší než 1 %



Carl-Friedrich von Weizsäcker (1912-)

$$a_v = 15,75 \text{ MeV}, a_s = 17,8 \text{ MeV},$$
$$a_c = 0,711 \text{ MeV}, a_a = 93,2 \text{ MeV},$$
$$a_p = 11,2 \text{ MeV},$$



## 4. Atomové jádro

### 4. 6. Moment hybnosti atomového jádra

O existenci svědčí velmi jemná struktura spektrálních čar (hyperjemná), vznikající interakcí magnetických momentů elektronu v obalu s magnetickým momentem jádra.

Moment hybnosti jádra je dán kombinací dílčích orbitálních momentů hybnosti  $\vec{l}_i$  jehož průmět je vždy celočíselným násobkem  $\hbar$  a spinovým momentem hybnosti  $\vec{s}_i$ , jehož průmět je vždy poločíselný (nukleony jsou fermiony).

Celkový moment hybnosti  $i$ -tého nukleonu:  $\vec{j}_i = \vec{l}_i + \vec{s}_i$

Celkový moment hybnosti jádra:  $\vec{J} = \sum_{i=1}^A \vec{l}_i + \vec{s}_i$

Tento moment hybnosti musí být kvantován podle obecných vztahů:

$$|\vec{J}|^2 = I \cdot (I + 1) \hbar^2 \quad J_z = m_I \hbar \quad m_I = -I, -I + 1, \dots, I - 1, I$$

$$I \begin{cases} 0, 1, 2, 3, \dots & \text{pro licho-lichá jádra} \\ \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots & \text{pro s-l a l-s jádra} \\ 0 & \text{pro sudo-sudá jádra} \end{cases}$$

Číslo  $I$  se říká spin jádra.

## 4. Atomové jádro

### 4. 7. Magnetický moment jádra

Moment hybnosti + náboj  $\Rightarrow$  magnetický moment jádra.

$$\vec{\mu} = g\mu_j\vec{J}$$

$g$  je gyromagnetický faktor, není kvantován, nabývá hodnot - 4 až + 6

$$\mu_j = \frac{e\hbar}{2m_p} = 5,0505 \cdot 10^{-27} \text{ J} \cdot \text{T}^{-1}$$

proton:  $g = 5,58$       neutron:  $g = -3,82$

**$g$  není kvantován  $\Rightarrow$  možnost analýzy**

NMR – nukleární magnetická rezonance (jaderná m. r.) - tomografy

## 4. Atomové jádro

### 4. 7. Magnetický moment jádra

Princip NMR: zkoumaná látka se umístí do magnetostatického pole, jádro změní energii o:

$$W = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} = -\mu_z B \quad (\text{je-li magnetické pole orientováno ve směru osy } z)$$

dosazením za složku jaderného magnetického momentu:  $\mu_z = g\mu_j m_l \hbar$

$$W = -g\mu_j m_l \hbar \cdot B \quad \mu_l \text{ může nabývat } 2l + 1 \text{ hodnot}$$

rozdíl dvou sousedních energií:  $\Delta W = g\mu_j \hbar \cdot B$

měření  $\Delta W$  (a tím i  $g$ ): na vzorek se vyšle paprsek kolmý k magnetostatickému poli, jestliže

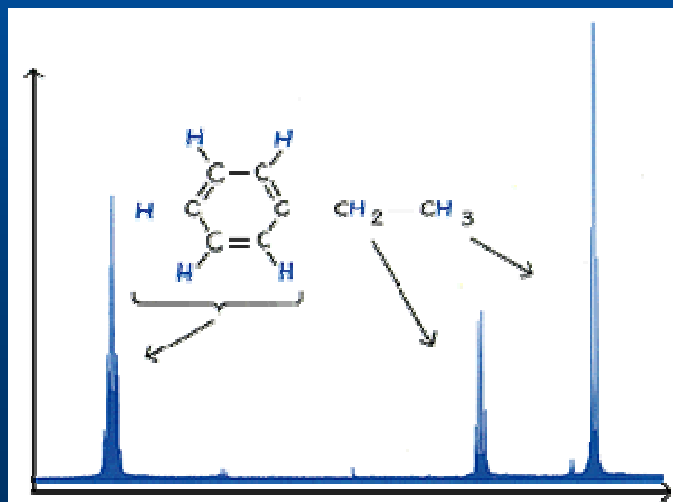
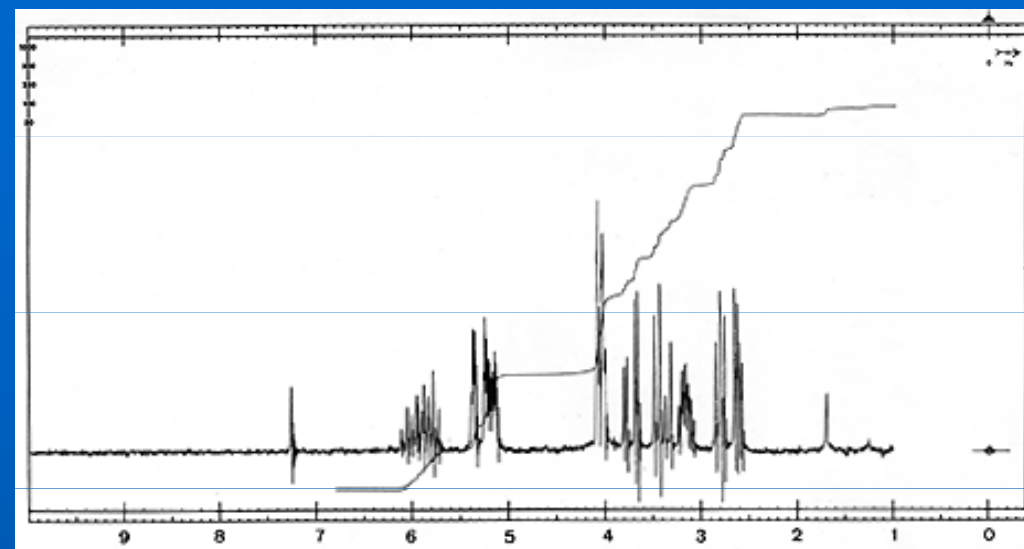
$h\nu < \Delta W$  nedochází k absorpci, jestliže  $h\nu = \Delta W$  je absorpce maximální, pak

lze měřením frekvence zjistit velikost  $g$  a tím identifikovat atom

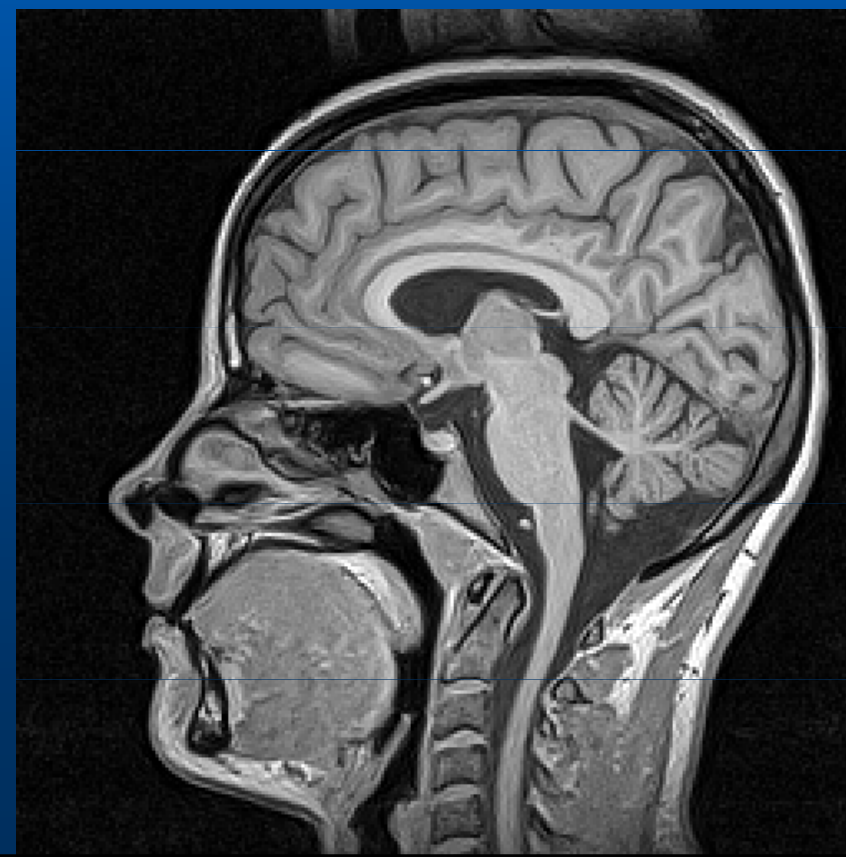
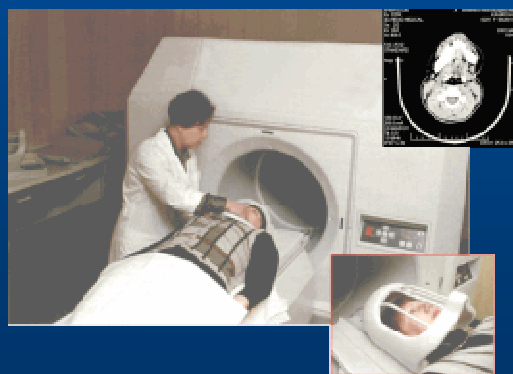
Při známém  $g$  lze měřit magnetickou indukci.

## 4. Atomové jádro

### 4. 7. Magnetický moment jádra



A proton NMR spectrum of a solution containing a simple organic compound, ethyl benzene. Each group of signals corresponds to protons in a different part of the molecule.



# 4. Atomové jádro

## 4. 8. Slupkový model jádra

1949 Mayerová, Jensen

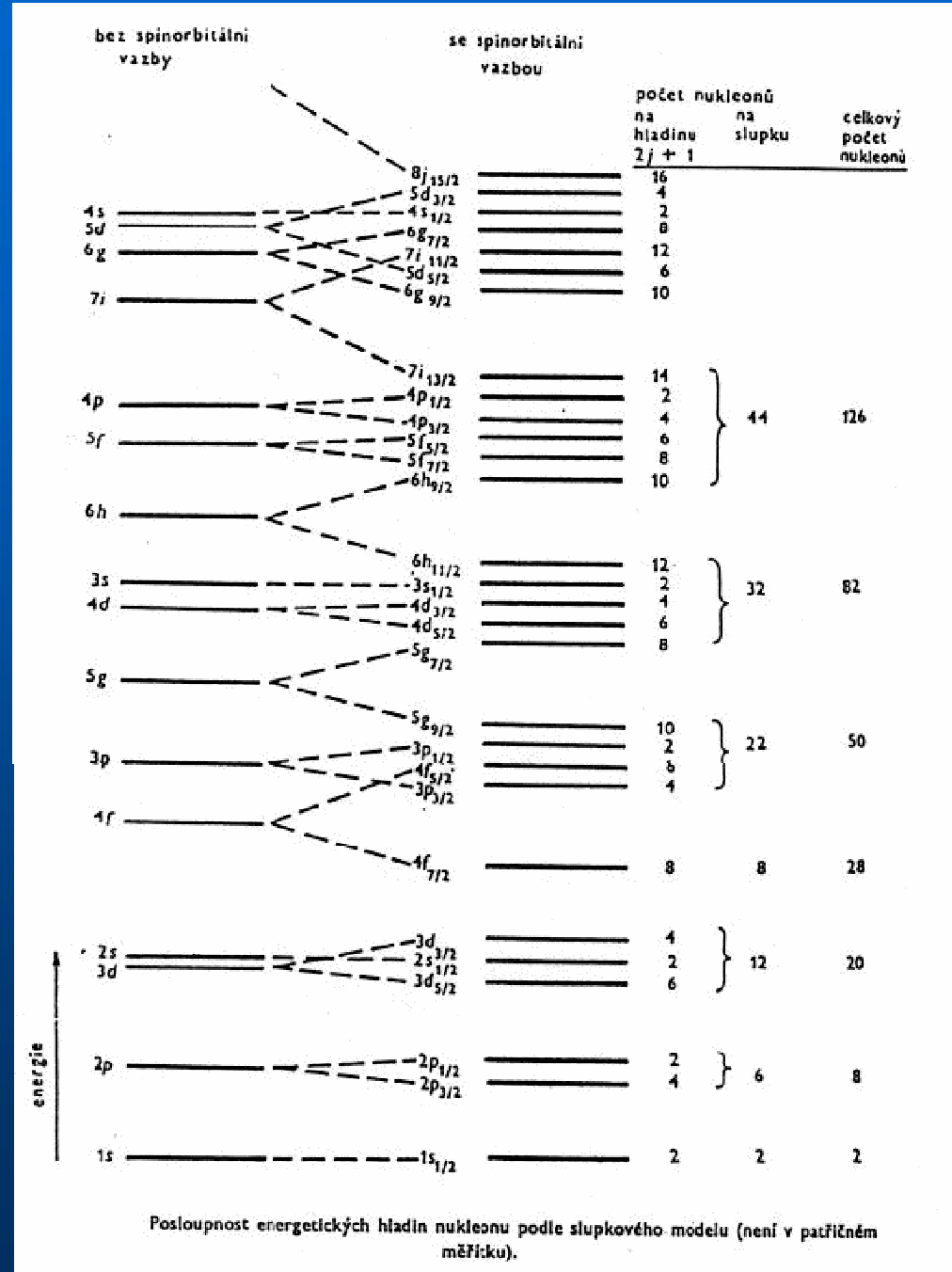
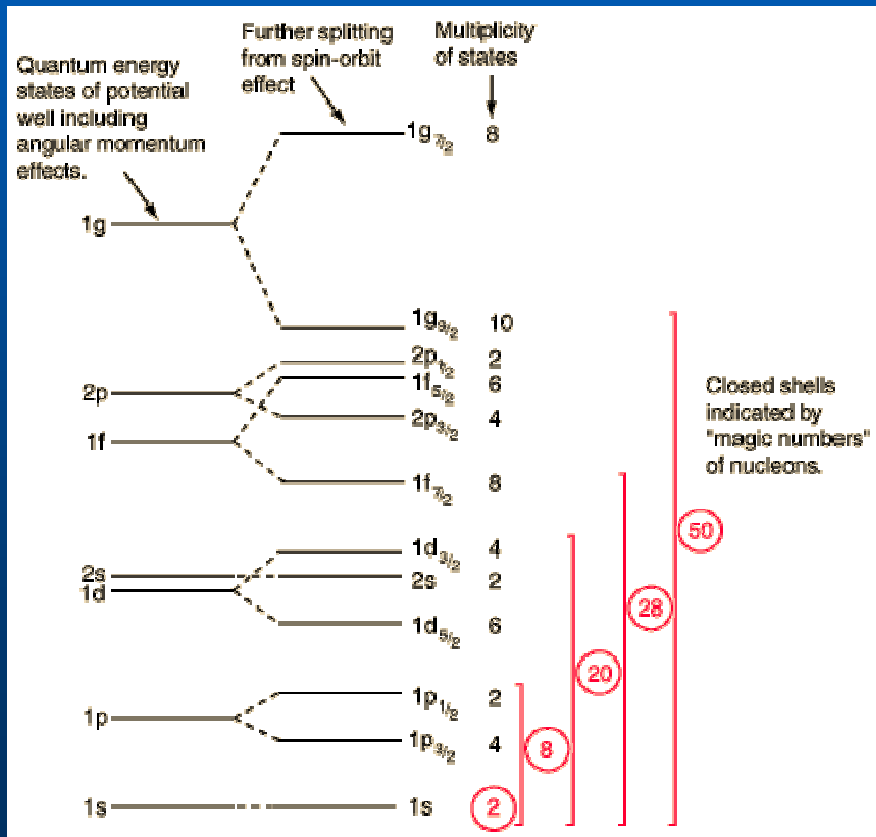


2, 8, 20, 28, 50, 82, 126

počty elektronů ve slupkách:

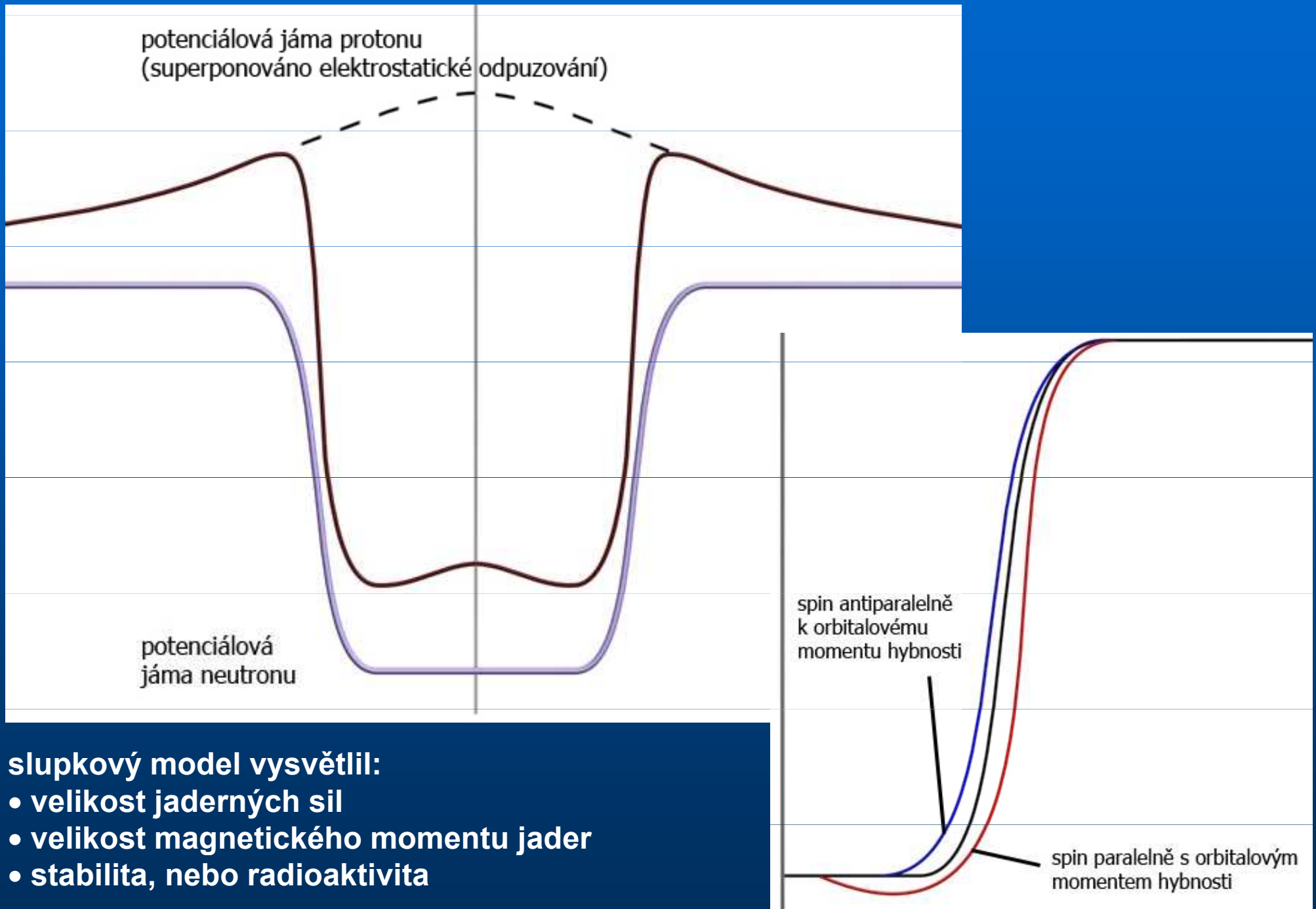


2, 6, 12, 8, 22, 32, 44



## 4. Atomové jádro

### 4. 8. Slupkový model jádra



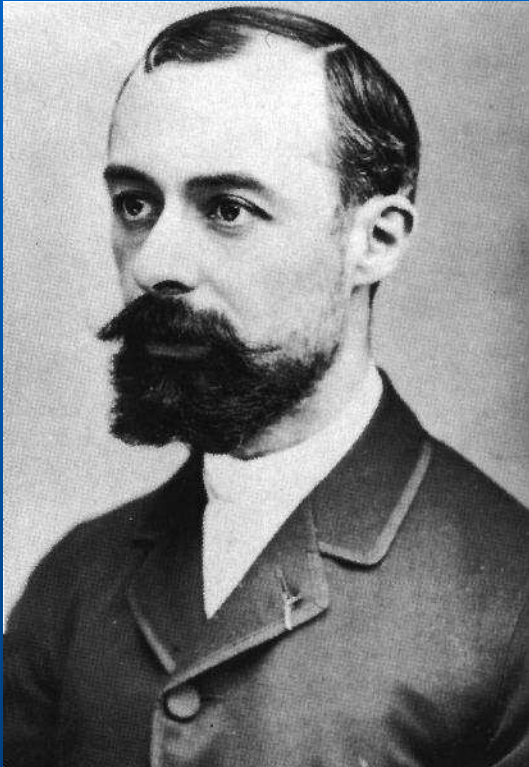
slupkový model vysvětlil:

- velikost jaderných sil
- velikost magnetického momentu jader
- stabilita, nebo radioaktivita

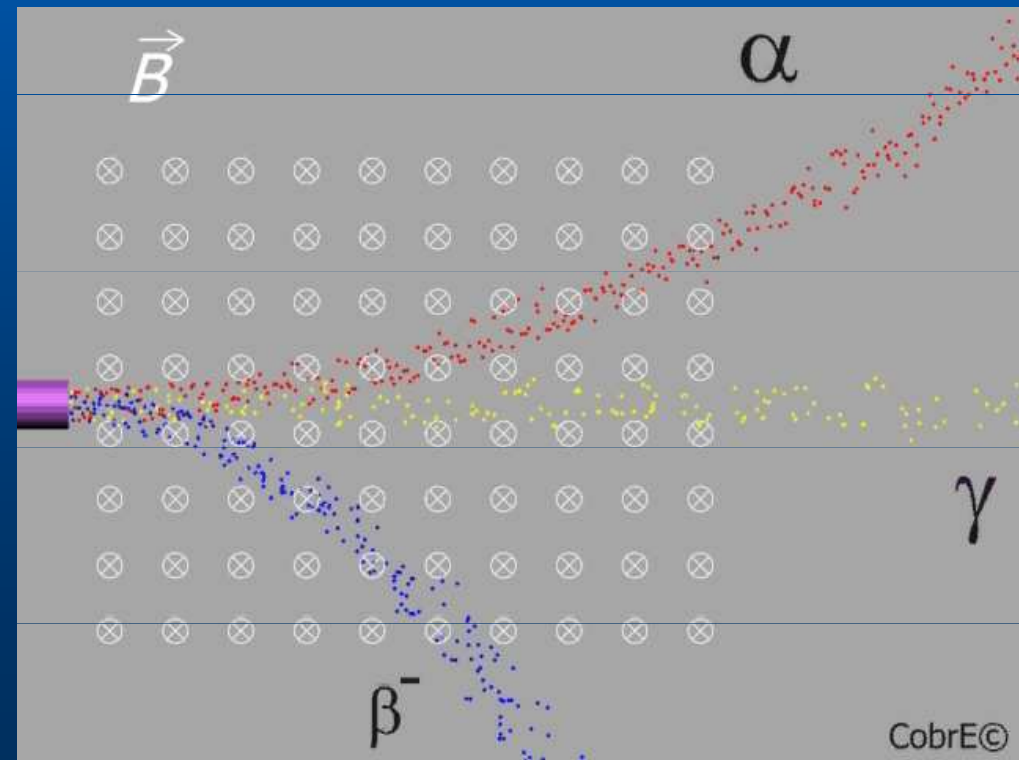
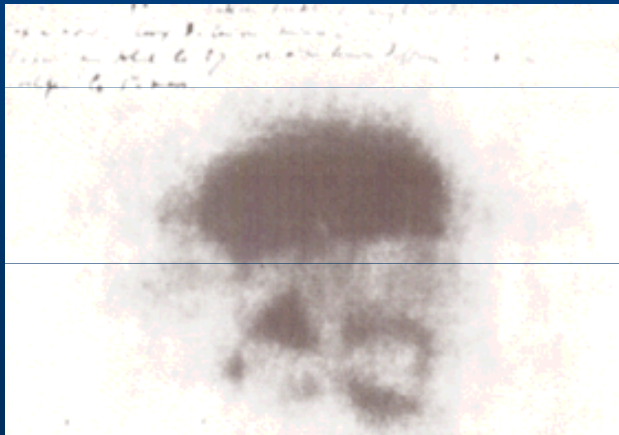
# 5. Radioaktivita

## 5. 1. Objev, základní vlastnosti záření

1896 Henri Antoine Becquerel (1852-1908)



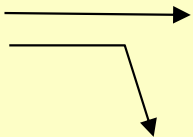
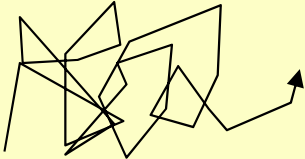
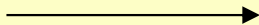
- z některých látek vychází neviditelné pronikavé záření
- záření má 3 složky
- nedá se ovlivnit žádnými fyzikálními ani chemickými procesy
- po roce 1911  $\Rightarrow$  musí pocházet z jádra atomu
- Rutherford: je pouze průvodním jevem přeměny jader





## 5. Radioaktivita

### 5. 1. Objev, základní vlastnosti záření

vlastnost	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	způsob zjištění
náboj	+2e	-e	0	v magnetickém poli
rychlost	$20 \cdot 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$0,3 - 0,998 c$	$c$	hmot. spektroskopy
schopnost ionizace / i. p. / cm vzduchu	$10^5$	60 - 100	1	detektory
pronikavost	5 cm vzduch, 0,1 mm Al	3-5 mm Al	velká – nedá se odstínit	detektory
způsob šíření				zobrazovací detektory

## 5. Radioaktivita

### 5. 2. Rozpadový zákon

přeměny jader typu  $\alpha$ ,  $\beta$  – v procesu je skryta obrovská energie

jeden rozpad jádra uranu 5 MeV, v 1 gramu je  $2,5 \cdot 10^{21}$  atomů, při úplném rozpadu by se uvolnila energie  $12,5 \cdot 10^{27}$  eV =  $2 \cdot 10^9$  J = 550 kWh

hledaly se způsoby, jak rozpad urychlit, nedá se však ničím ovlivnit

aktivita: počet rozpadů za 1 s:  $A$ , jednotkou je  
1 becquerel = 1 bq = 1 rozpad za sekundu

aktivita závisí pouze na druhu radioaktivního se jádra a na počtu jader  $N$ :

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

rozpadová konstanta, pro různé nuklidy  $10^{-30}$  až  $10^{20}$  s<sup>-1</sup>

z diferenciální rovnice  $\Rightarrow$  rozpadový zákon

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

$$A = \lambda N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

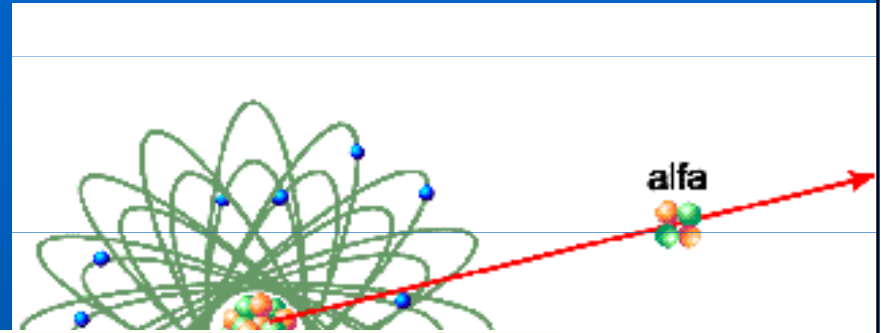
## 5. Radioaktivita

### 5. 2. Rozpadový zákon

Místo nepraktické rozpadové konstanty se spíše používá „poločas rozpadu“:  $T$  - doba, za kterou se rozpadne právě polovina původního počtu radioaktivních atomů.

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda T} \quad T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

pro různé nuklidy je  $T$  od  $10^{-20}$  s do  $10^{20}$  roků

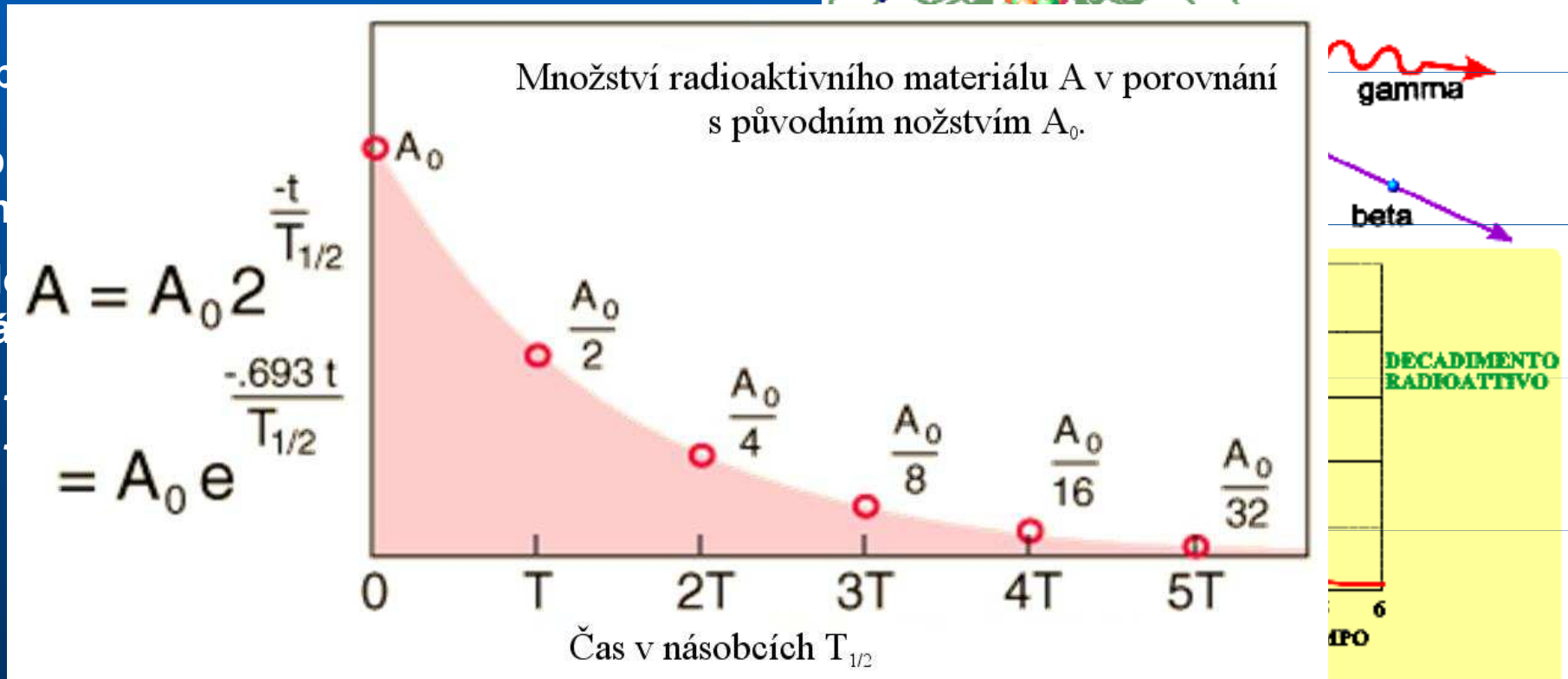


střední doba

problém: p  
radioaktivn

pravděpod  
že se jedná

- $\alpha$  rozpad
- $\beta$  rozpad



$T_f$  = PERIODO DI DIMEZZAMENTO FISICO

## 5. Radioaktivita

### 5. 3. Radioaktivní přeměny

Rutherford: radioaktivní záření je projevem přeměny (rozpadu) atomových jader.



přírozená radioaktivita: radioaktivita nuklidů vyskytujících se v přírodě

nejtěžší stabilní nuklid:  ${}_{83}^{209}\text{Bi}$  od  ${}_{84}\text{Po}$  jsou všechny prvky radioaktivní

$A$  se při obou druzích radioaktivní přeměny mění buď o 4 nebo se nemění.

přírozeně radioaktivní nuklidy jsou proto součástí 4 radioaktivních řad:

- řada typu  $4n$ : thoriová



- řada typu  $4n+1$ : neptuniová



- řada typu  $4n+2$ : uranová



- řada typu  $4n+3$ : aktiniová



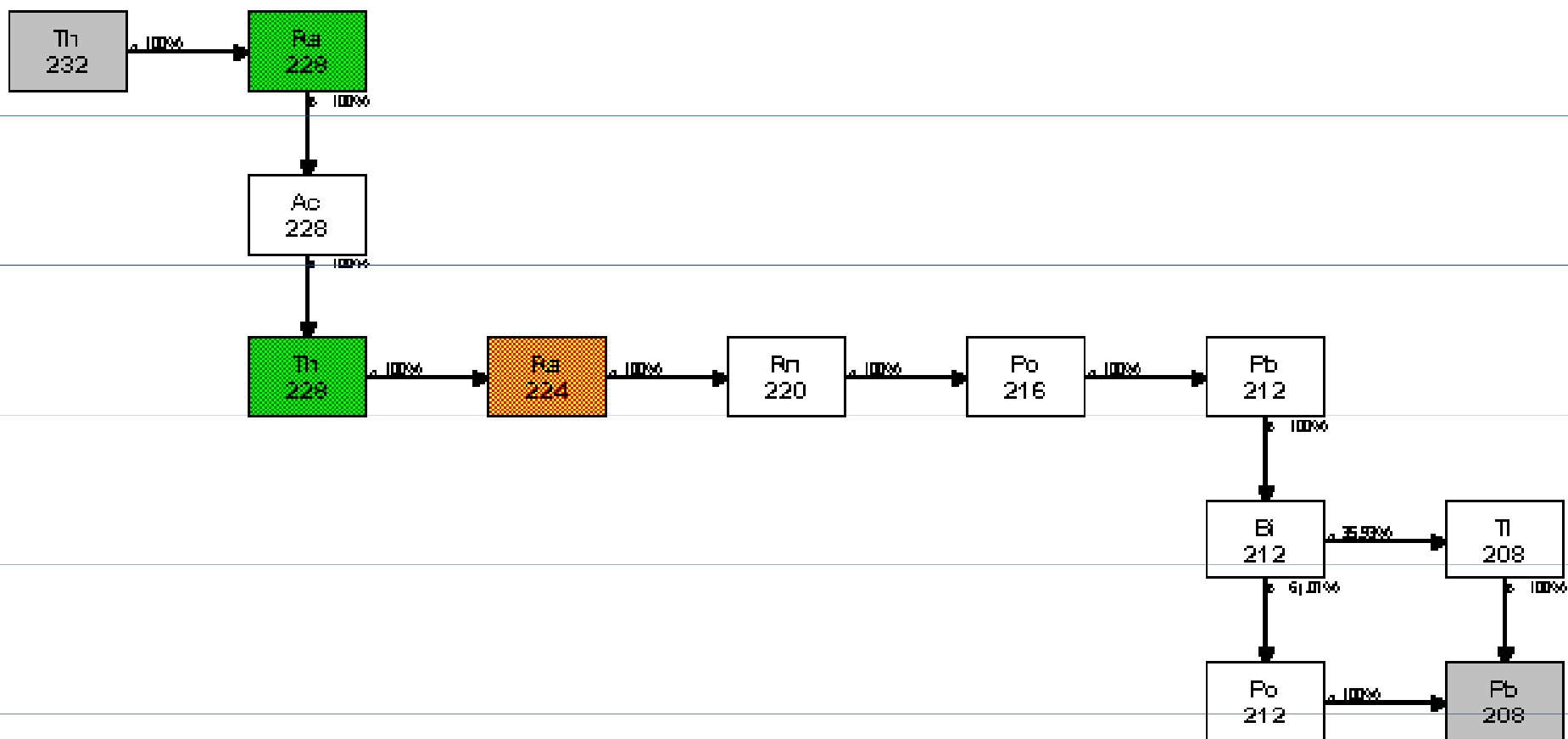
Ize jednoduše vypočítat, ke kolika přeměnám  $\alpha$  a ke kolika přeměnám  $\beta$  v řadě došlo



## 5. Radioaktivita

### 5.3. Radioaktivní přeměny

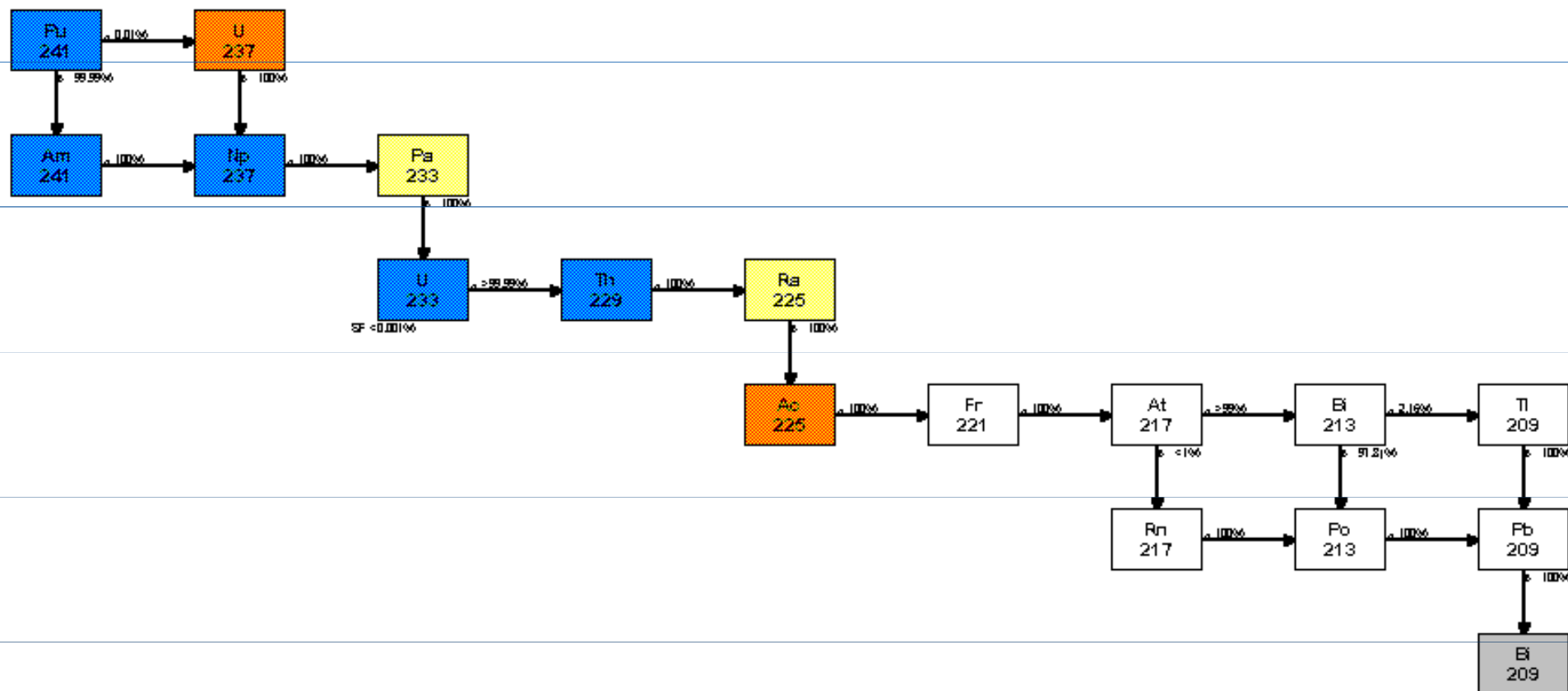
- řada typu 4n: thoriová



## 5. Radioaktivita

### 5.3. Radioaktivní přeměny

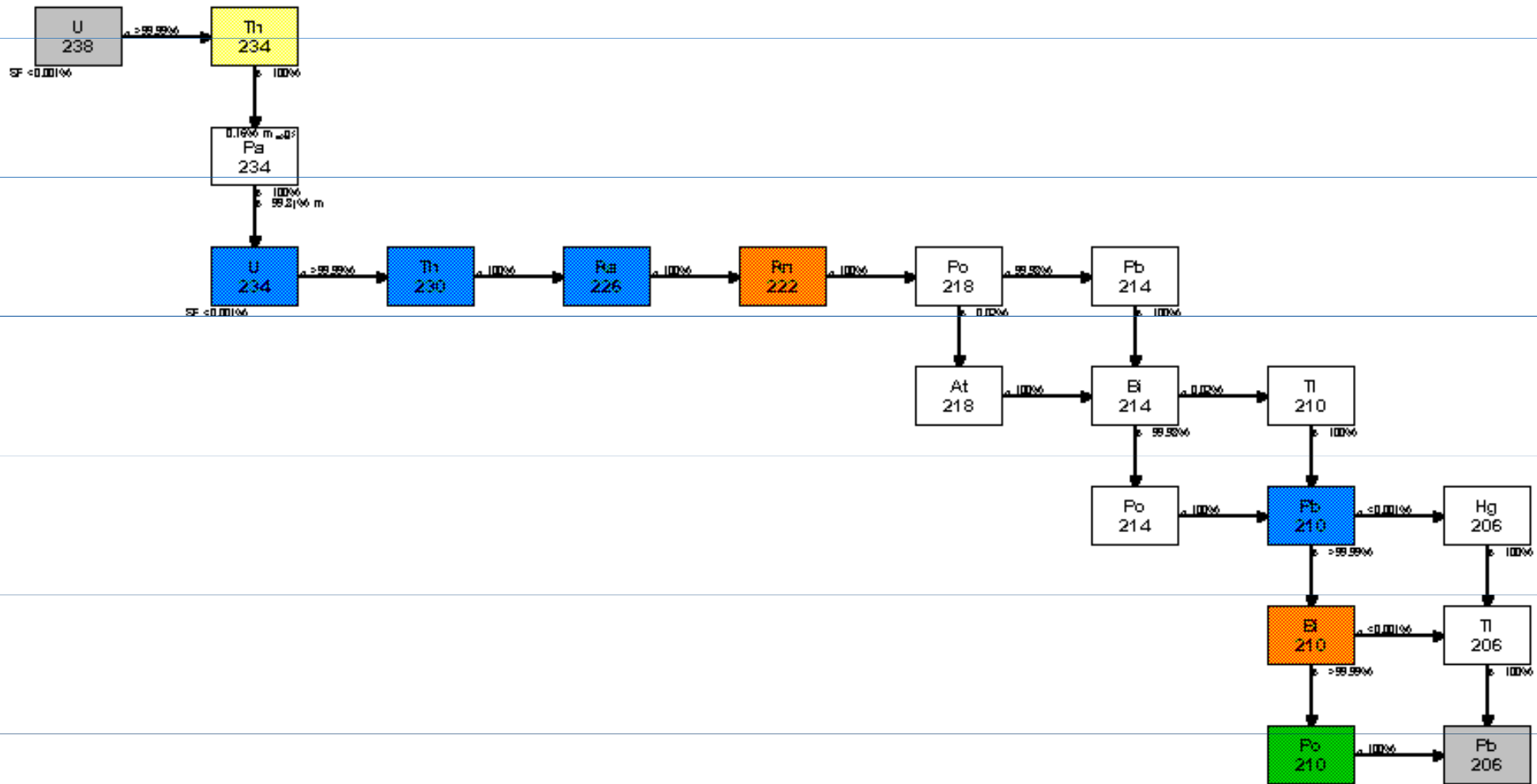
- řada typu  $4n+1$ : neptuniová



# 5. Radioaktivita

## 5.3. Radioaktivní přeměny

- řada typu  $4n+2$ : uranová

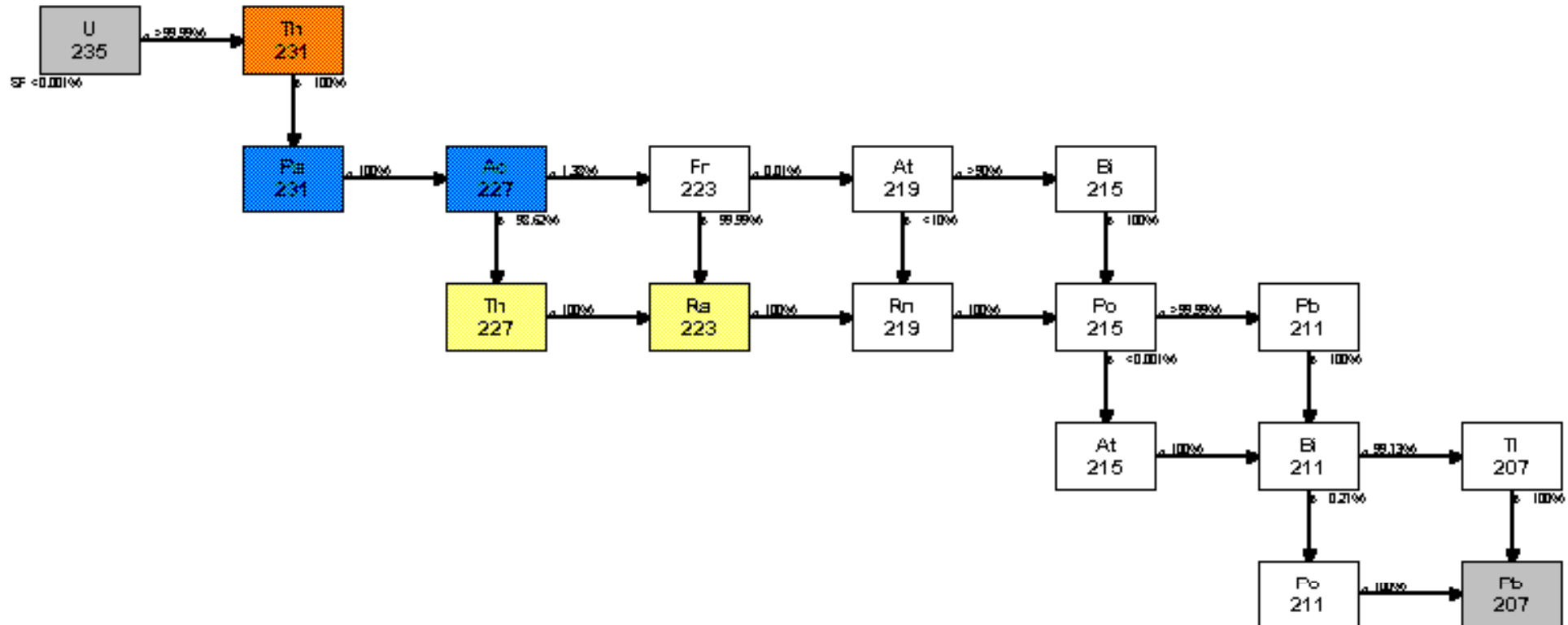




## 5. Radioaktivita

### 5.3. Radioaktivní přeměny

- řada typu  $4n+3$ : aktiniová



## 5. Radioaktivita

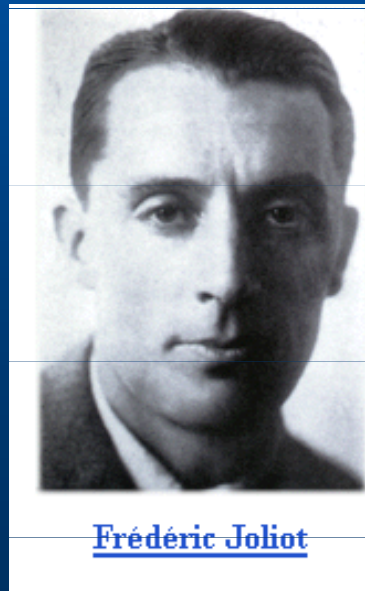
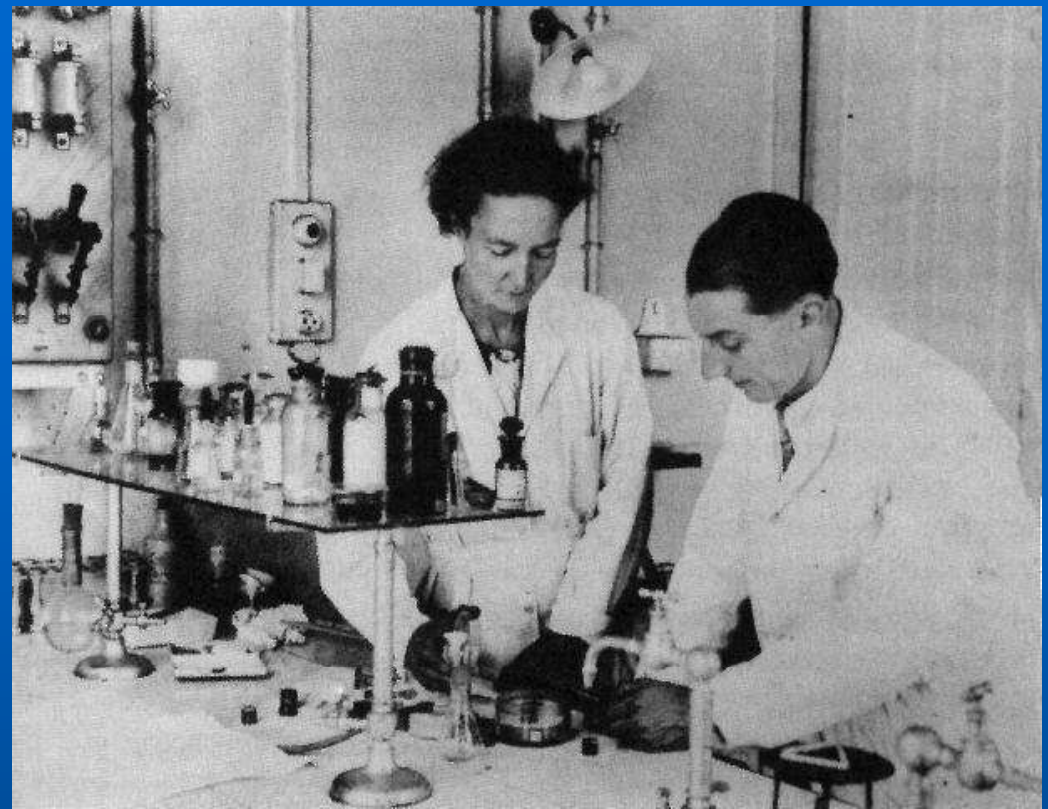
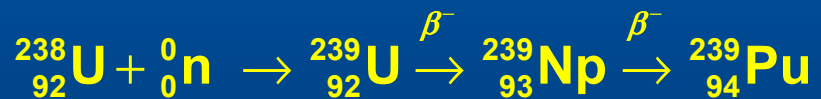
### 5. 4. Umělá radioaktivita

1934 manželé Joliot-Curieovi



jaderná reakce, pozitronový rozpad

dnes - nejefektivnější způsob:  
ozařování neutrony



Frédéric Joliot



Irène Joliot-Curie

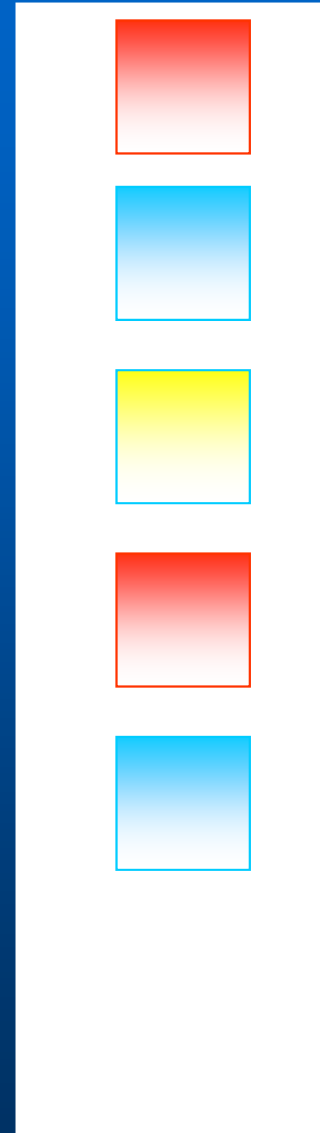
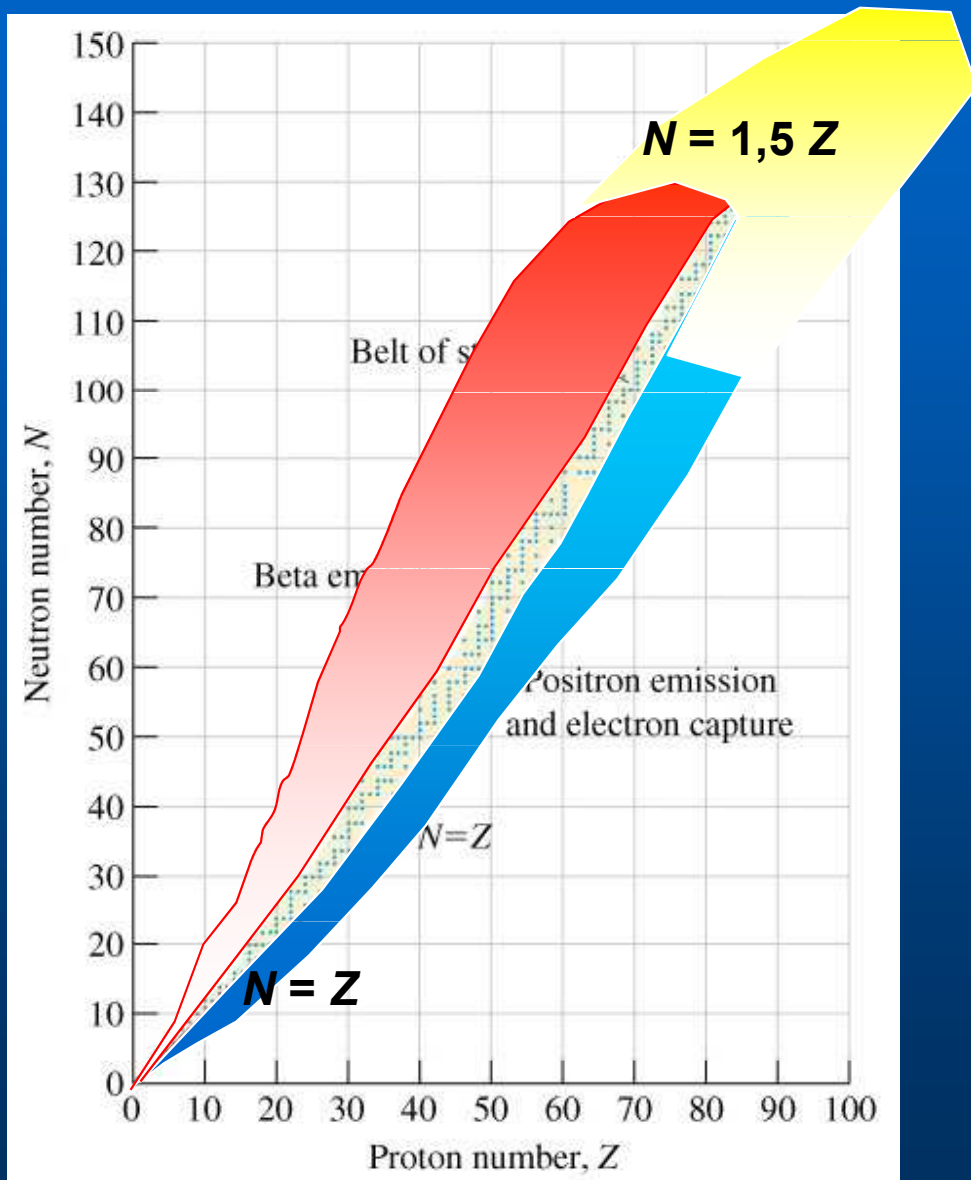
Frédéric Joliot (1900-1958),

Irène Joliot-Curie (1897–1956)

## 5. Radioaktivita

### 5. 5. Diagram stabilních nuklidů

jádro je radioaktivní, je-li separační energie pro emitovanou částici  $< 0$



rozpad  $\beta^-$



rozpad  $\beta^+$



rozpad  $\alpha$



emise neutronu



emise protonu



## 5. Radioaktivita

### 5. 6. Postupný rozpad, radioaktivní rovnováha

Jaká je bilance při postupném rozpadu?

**1** → **2** → **3** → ..... → **i** → .....**s**

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 \cdot N_1$$

$$N_1 = N_{10} \cdot e^{-\lambda_1 t} = c_{11} \cdot e^{-\lambda_1 t}$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 \cdot N_1 - \lambda_2 \cdot N_2$$

řešení druhé diferenciální rovnice: homogenní rovnice:

$$\frac{dN_2}{dt} = -\lambda_2 \cdot N_2 \Rightarrow N_{2h} = c_{22} \cdot e^{-\lambda_2 t}$$

partikulární řešení navrhne ve tvaru:

$$N_{2p} = c_{21} \cdot e^{-\lambda_1 t} \quad \text{dosazením:}$$

$$-\lambda_1 \cdot c_{21} \cdot e^{-\lambda_1 t} = \lambda_1 \cdot c_{11} \cdot e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 \cdot c_{21} \cdot e^{-\lambda_1 t} \quad \text{odtud:}$$

$$c_{21} = \frac{\lambda_1 \cdot c_{11}}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

z počáteční podmínky:  $N_2(0) = 0$

$$0 = c_{21} + c_{22} \Rightarrow c_{22} = -c_{21}$$

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

$$\frac{dN_s}{dt} = \lambda_{s-1} \cdot N_{s-1}$$

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1 \cdot N_{10}}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

## 5. Radioaktivita

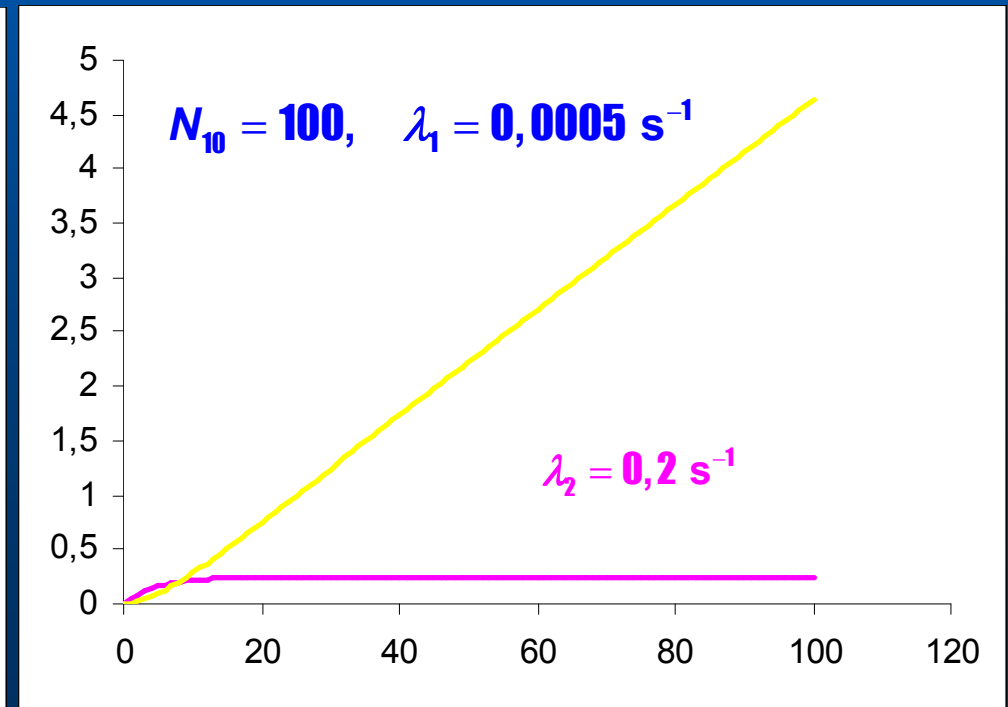
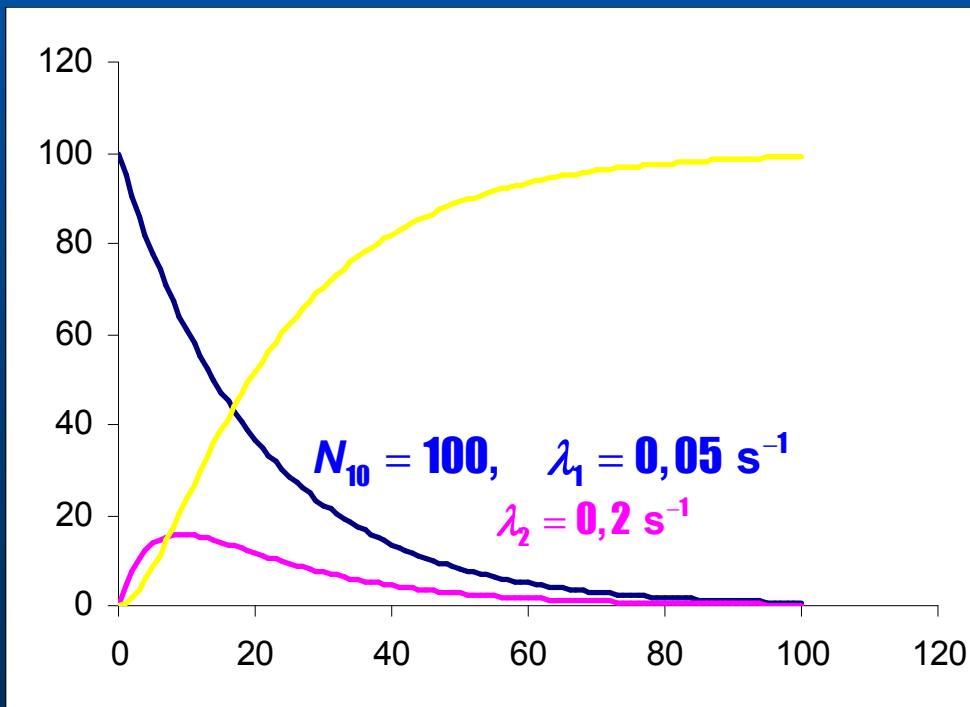
### 5. 6. Postupný rozpad, radioaktivní rovnováha

řešení  $i$  - té rovnice:

$$N_i(t) = \sum_{j=1}^i c_{ij} e^{-\lambda_j t} \quad c_{ij} = c_{i-1,j} \frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i - \lambda_j} \quad c_{ii} = -\sum_{k=1}^{i-1} c_{ik}$$

řešení  $s$  - té rovnice (jako  $i$  - tá pro  $\lambda_s = 0$  )

$$N_s(t) = c_{ss} + \sum_{j=1}^{s-1} c_{sj} e^{-\lambda_j t} \quad c_{sj} = -c_{s-1,j} \frac{\lambda_{s-1}}{\lambda_j} \quad c_{ss} = c_{10} = N_{10}$$



## 5. Radioaktivita

### 5. 6. Postupný rozpad, radioaktivní rovnováha

je-li  $\lambda_1 \ll \lambda_2$  
$$N_2(t) = \frac{\lambda_1 \cdot N_{10}}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \cong \frac{\lambda_1 \cdot N_{10}}{\lambda_2} \cdot (1 - 0)$$

$N_2$  je proto v malých časech konstantní a platí:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{T_1}{T_2}$$

**zákon radioaktivní rovnováhy**

podmínka  $\lambda_1 \ll \lambda_2$  je splněna ve všech rozpadových řadách, v historických dobách existuje u přírodních radioaktivních nuklidů rovnováha

## 5. Radioaktivita

### 5. 6. Postupný rozpad, radioaktivní rovnováha

Příklad: Před 3 miliardami let byl vytvořen 1 kg čistého U238. Jaké je zastoupení jednotlivých nuklidů rozpadové řady v současnosti?

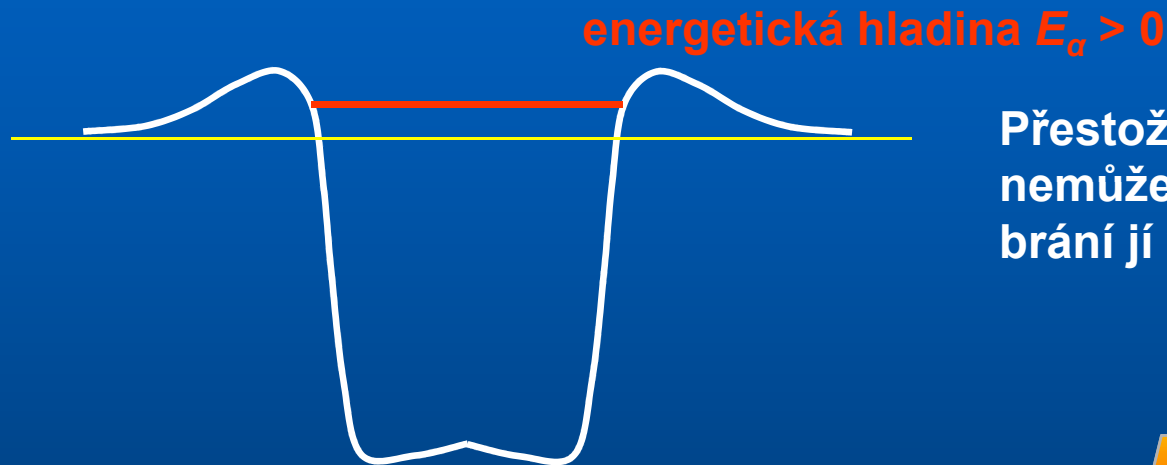
nuklid	poločas rozpadu / rok	poměrné zastoupení	počet atomů v současnosti	aktivita / Bq	Z	A	hmotnost / kg
U 238	4500000000	0,63	1,59E+24	7,78E+06	92	238	6,30E-01
Th 234	0,0657	9,198E-12	2,33E+13	7,78E+06	90	234	9,04E-12
Pa 234	0,000764	1,07E-13	2,71E+11	7,78E+06	91	234	1,05E-13
U 234	250000	0,000035	8,86E+19	7,78E+06	92	234	3,44E-05
Th 230	75000	0,0000105	2,66E+19	7,78E+06	90	230	1,01E-05
Ra 226	1600	2,24E-07	5,67E+17	7,78E+06	88	226	2,13E-07
Rn 222	0,0105	1,47E-12	3,72E+12	7,78E+06	86	222	1,37E-12
Po 218	0,00000589	8,246E-16	2,09E+09	7,78E+06	84	218	7,55E-16
Pb 214	0,0000513	7,182E-15	1,82E+10	7,78E+06	82	214	6,45E-15
Bi 214	0,000038	5,32E-15	1,35E+10	7,78E+06	83	214	4,78E-15
Po 214	5,07E-12	7,098E-22	1,80E+03	7,78E+06	84	214	6,38E-22
Pb 210	22	3,08E-09	7,79E+15	7,78E+06	82	210	2,72E-09
Bi 210	0,0137	1,918E-12	4,85E+12	7,78E+06	83	210	1,69E-12
Po 210	0,383	5,362E-11	1,36E+14	7,78E+06	84	210	4,73E-11
Pb 206	∞	0,36995	9,36E+23	0	82	206	3,20E-01
celkem			2,53E+24	1,09E+08			0,95
He 4			7,49+E24	0	2	4	4,98E-02

## 5. Radioaktivita

### 5. 7. Rozpad $\alpha$

Nutná a postačující podmínka pro rozpad alfa: nejnižší energetická hladina částice  $\alpha$  v jádře je  $>0$ :

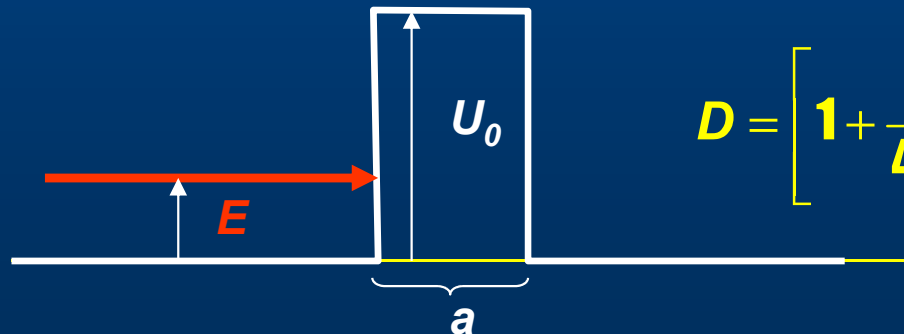
průběh potenciálu částice  $\alpha$  v okolí jádra



Přestože částice  $\alpha$  má energii kladnou, nemůže opustit jádro klasickým způsobem, brání jí v tom Coulombovská bariéra.

# TUNELOVÝ JEV

při pravoúhlé bariéře:



$$D = \left[ 1 + \frac{U_0^2}{4E \cdot (U_0 - E)} \cdot \sinh^2 \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} \cdot (U_0 - E) \cdot a} \right]^{-1}$$



## 5. Radioaktivita

### 5. 7. Rozpad $\alpha$

Při bariéře obecného tvaru se používá numerického postupu: bariéra se aproximuje velkým počtem pravoúhlých bariér a výsledná pravděpodobnost se určí součinem:

$$D_i = \left[ 1 + \frac{U_{0i}^2}{4E \cdot (U_{0i} - E)} \cdot \sinh^2 \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} \cdot (U_{0i} - E) \cdot a_i} \right]^{-1} \quad D = \prod D_i$$

Celková pravděpodobnost úniku částice  $\alpha$  přes Coulombovskou bariéru je pak:

$$\lambda = \lambda_\alpha \cdot \lambda_p \cdot D$$



pravděpodobnost toho, že částice  $\alpha$  je na povrchu jádra

pravděpodobnost vzniku částice  $\alpha$  v jádře

Přibližný tvar pro výpočet  $\lambda$  byl znám již před kvantovou mechanikou:

$\lambda$  je velmi malé ( $10^{-20}$  až  $10^{-50}$ ), proto  $\sinh^2 x \cong \frac{e^{2x}}{4}$ ,  $\frac{U_{0i}^2}{16E \cdot (U_{0i} - E)} \approx 1$

$$D = e^{-G}, \quad G = \frac{2\sqrt{2m}}{\hbar} \cdot \int_R^{R_E} \left( \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} - E \right)^{\frac{1}{2}} dr \quad G - \text{Gamowův faktor}$$

## 5. Radioaktivita

### 5.7. Rozpad $\alpha$

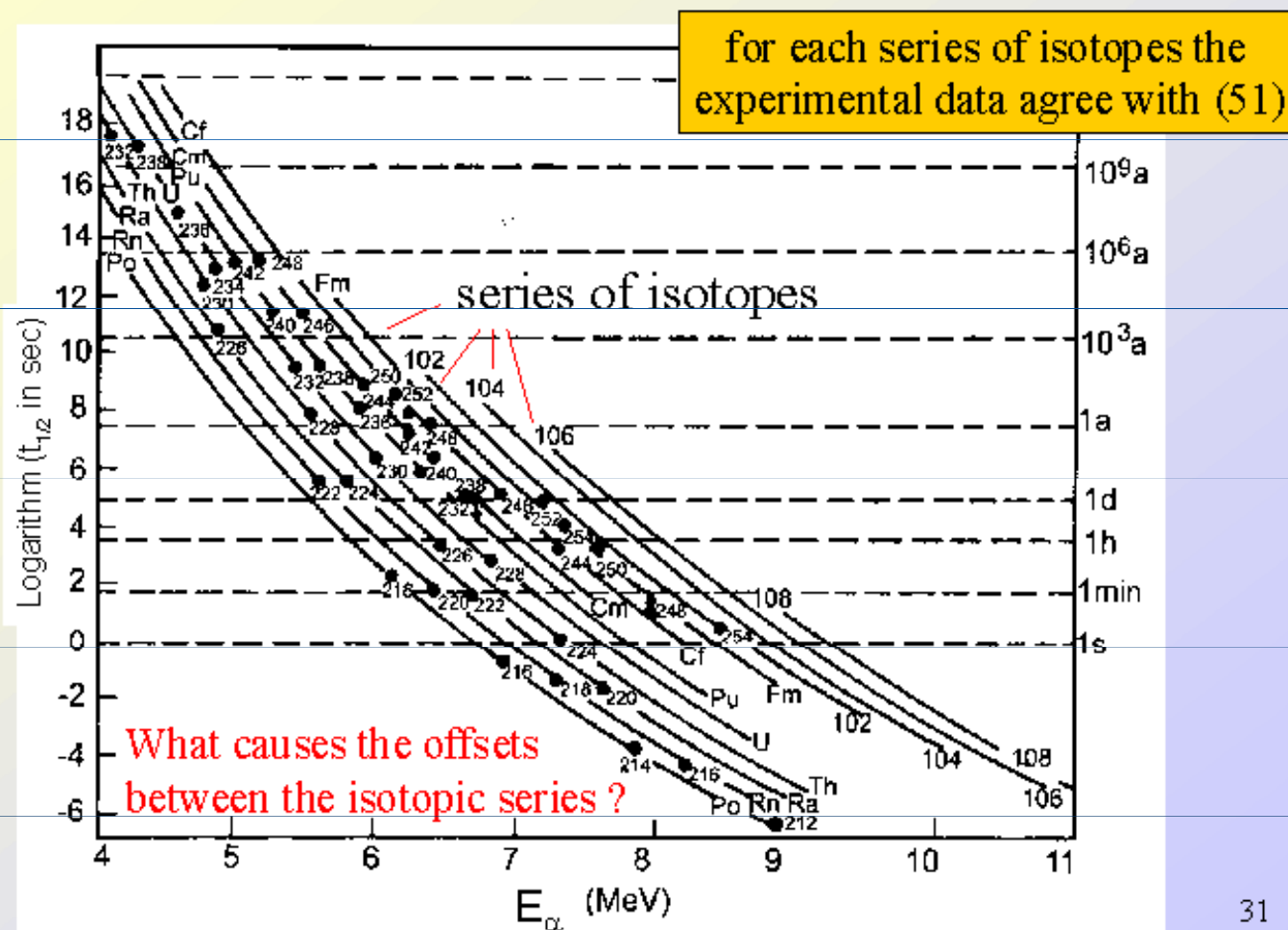
$$\ln \lambda = -a_1 \frac{Z}{\sqrt{E}} + a_2$$

$a_1, a_2$  konstanty jednotlivých rozpadových řad

čím větší energii má částice  $\alpha$ , tím menší je poločas rozpadu

### Geiger-Nuttall Rule

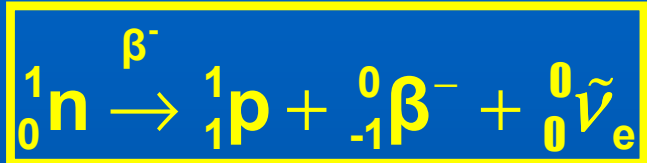
The logarithm of the half-life decreases with increasing emission energy  $E_\alpha$



## 5. Radioaktivita

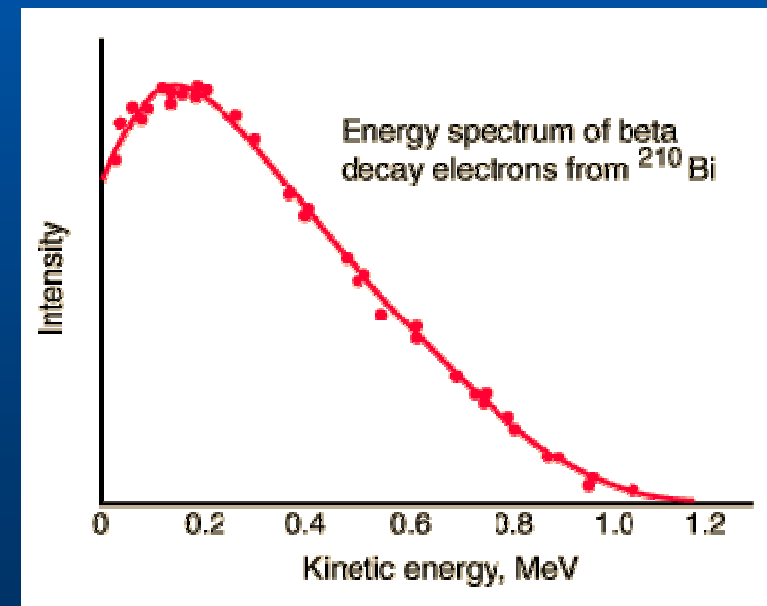
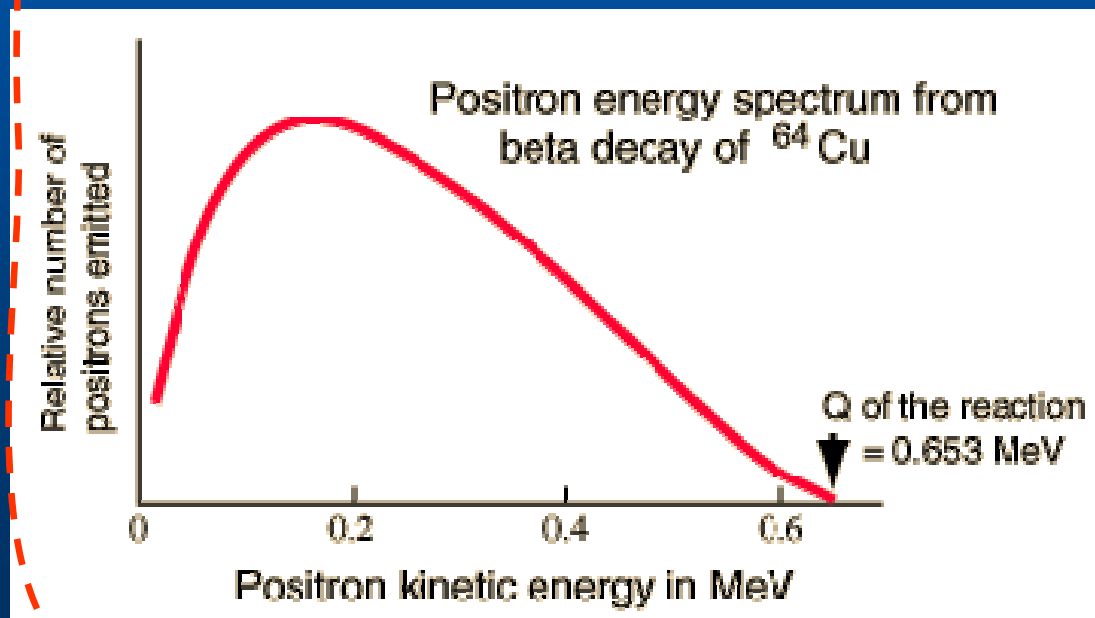
### 5. 8. Přeměna $\beta$

podstatou přeměny nukleonů



bez neutrina by byl porušen zákon zachování energie, hybnosti, momentu hybnosti

neutrino: W. Pauli 1934



→ probíhá i u volného neutronu s poločasem rozpadu 11,7 minut

## 5. Radioaktivita

### 5. 9. Ostatní druhy radioaktivních přeměn

#### a) vznik záření $\gamma$

po primární přeměně  $\alpha$ ,  $\beta$  může vzniknout jádro v excitovaném stavu, ze kterého přechází do základního vyzářením fotonu:



Excitované jádro má kvantované hodnoty energie  $\Rightarrow$  spektrum  $\gamma$  je čárové, má několik charakteristických energií, lze tedy poznat, o jaké jádro jde. Na tom je založena spektrální gama analýza.

Zvláštní případ: gama foton vykoná při průletu obalem fotoelektrický jev: předá veškerou svoji energii obalovému elektronu; z atomu pak vylétá elektron se zcela přesnou energií (na rozdíl od beta přeměny) – **elektronová konverze**

#### b) K záchyt

Jádra s přebytkem protonů mohou pohltnout elektron ze slupky K a změnit tak proton na neutron (obdoba pozitronové přeměny):



#### c) emise neutronu, emise protonu

## 5. Radioaktivita

### 5. 9. Ostatní druhy radioaktivních přeměn

#### d) spontánní štěpení

Velmi těžká jádra se mohou spontánně rozdělit na 2 lehčí. Velmi vzácně může tento děj probíhat i u uranu 238 a 235 (tisíciny procenta), běžnější je u Cf252 s poločasem rozpadu 2,64 roku. Protože se při štěpení uvolňuje několik neutronů, používá se tento nuklid jako zdroj neutronů.

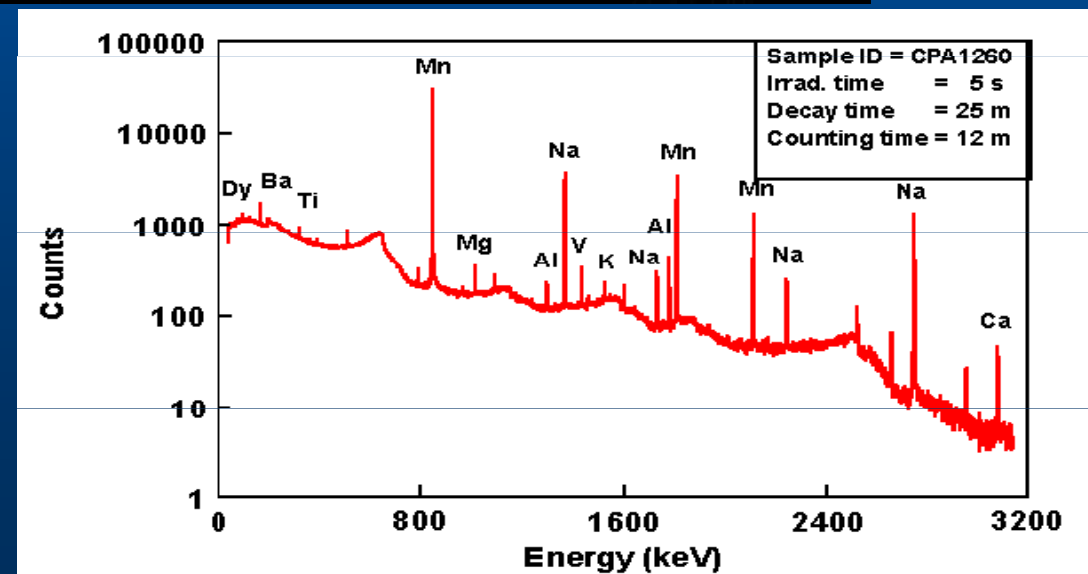
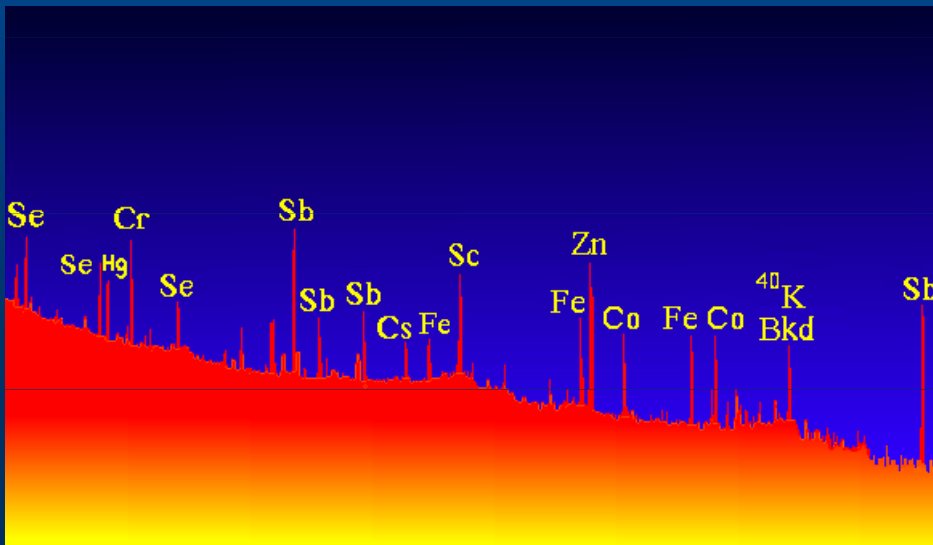
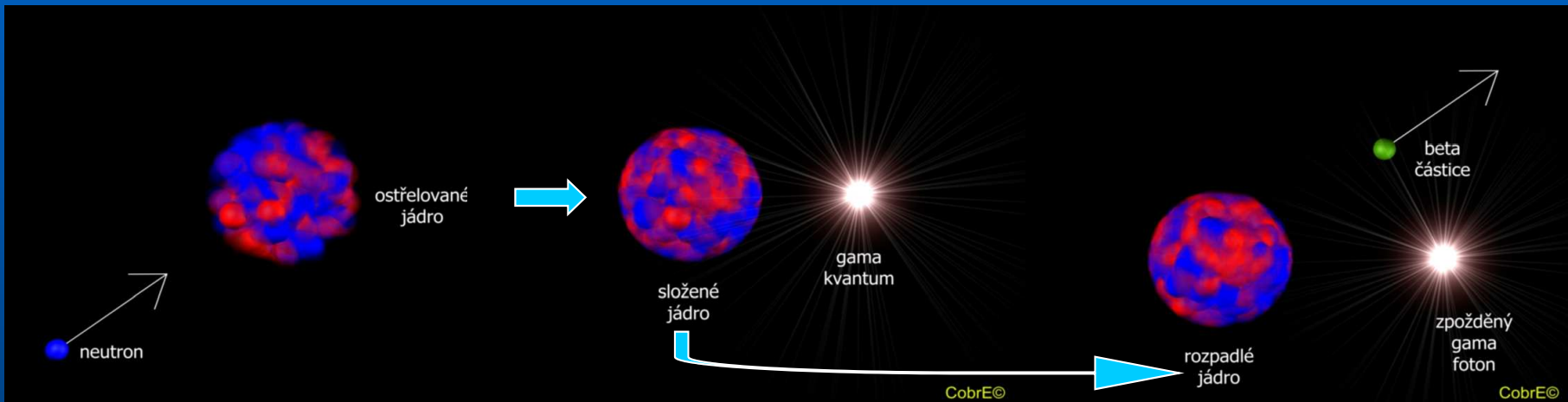


## 5. Radioaktivita

### 5. 10. Využití radioaktivity a fyziologické účinky

#### a) neutronová aktivační analýza - Neutron activation analysis (NAA)

Neutrony velmi snadno pronikají do jader: neexistuje pro ně Coulombovská bariéra. Jádru se dostane do excitované stavy: vyzáří charakteristický foton gama. V jádru je pak přebytek neutronů a jádro se tak zpravidla stane radioaktivním, nejčastěji  $\beta^-$ . Zbytek energie se pak může vyzářit ještě dalším fotonem gama. Analýzou všech produktů se identifikuje původní atom.

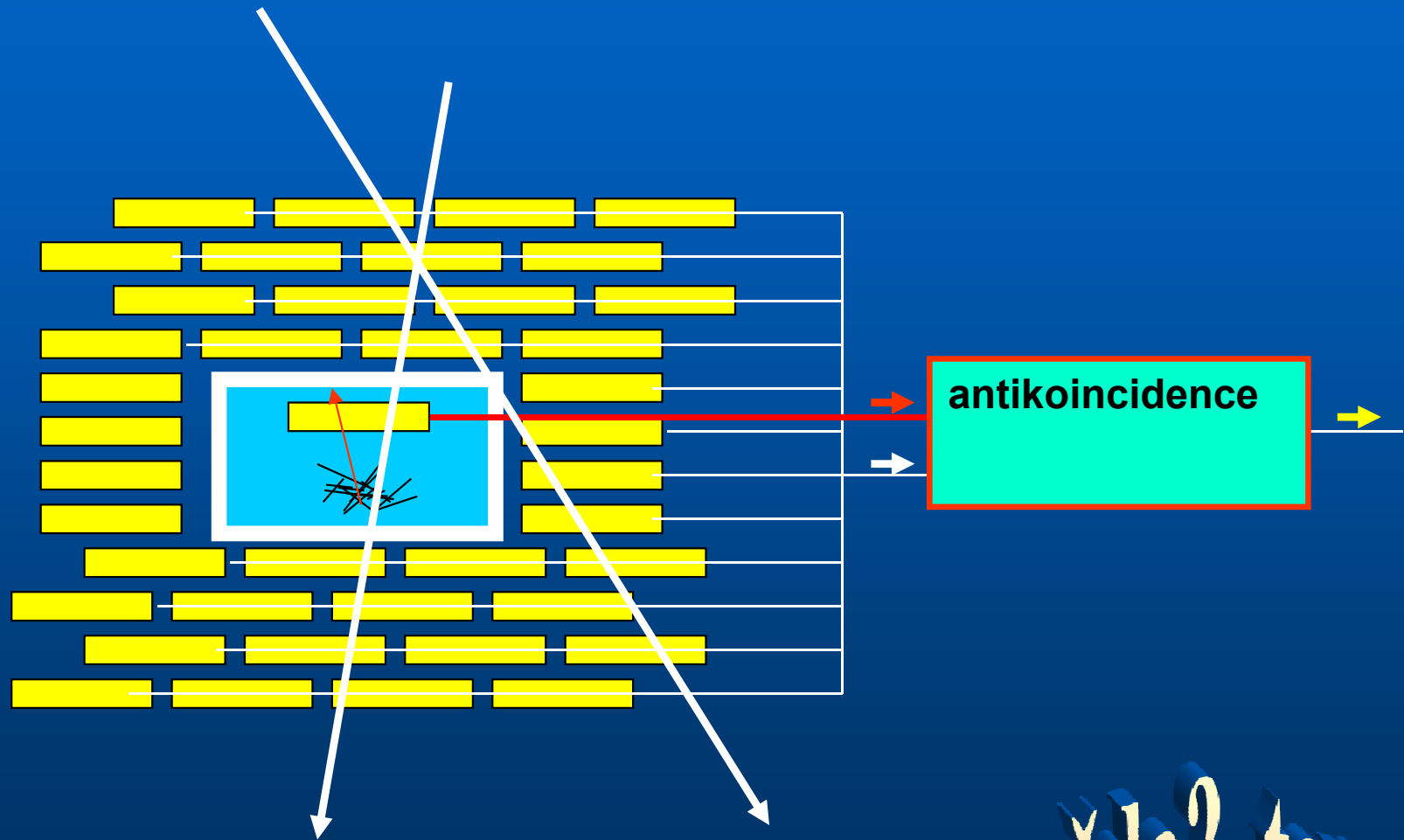


## 5. Radioaktivita

### 5. 10. Využití radioaktivity a fyziologické účinky

#### a) neutronová aktivační analýza - Neutron activation analysis (NAA)

Problém řešený v roce 1962: byl Napoleon při vyhnanství na Svaté Heleně otráven?



Ve vlasech Napoleona byl zjištěn arzén v koncentraci 13krát vyšší (0,000 15 %).

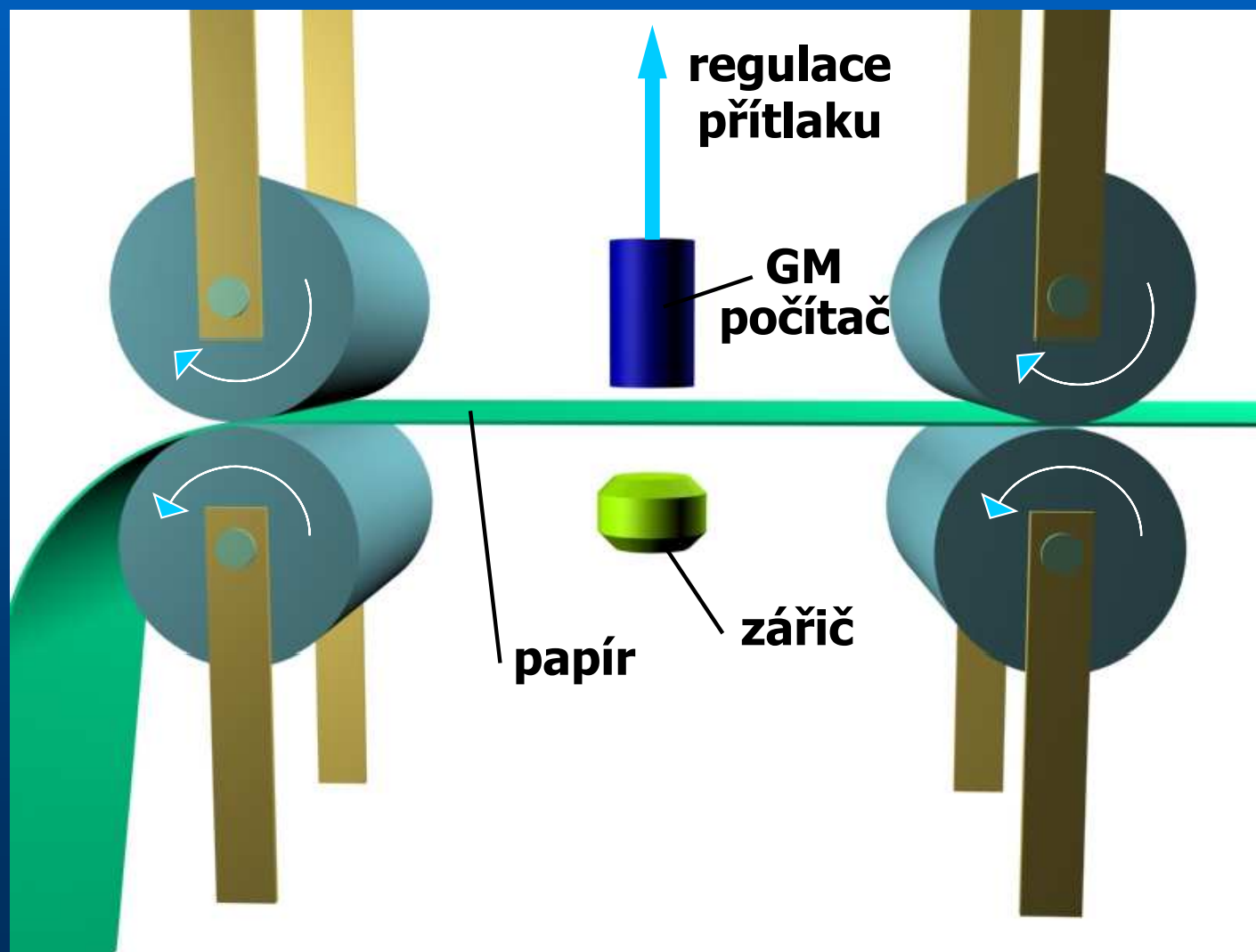
*-vražda? tapety?*

## 5. Radioaktivita

### 5. 10. Využití radioaktivity a fyziologické účinky

#### b) měření a kontrola tenkých vrstev

využívá se záření  $\alpha$  nebo  $\beta$ : zářič je na jedné straně kontrolovaného materiálu (papír, látka, plech, ...), na druhé straně je detektor; ve zpětné vazbě se ovládá výrobní zařízení



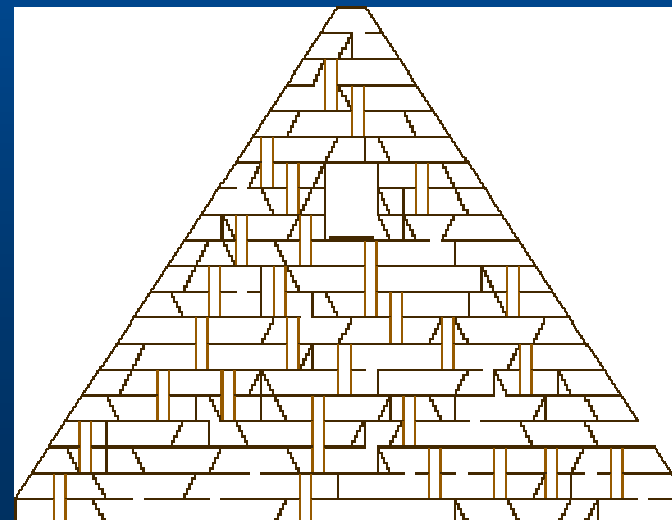
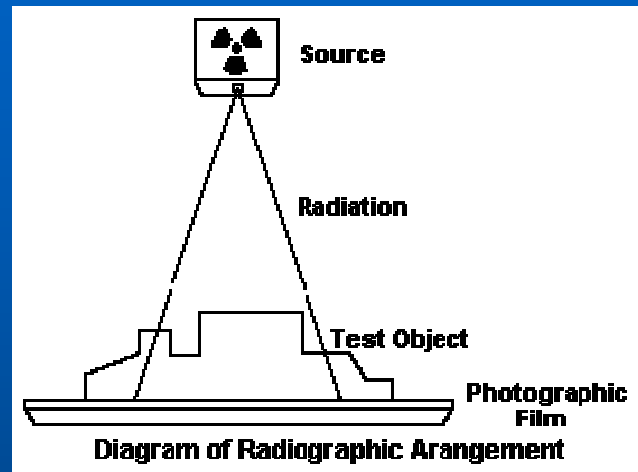


## 5. Radioaktivita

### 5. 10. Využití radioaktivity a fyziologické účinky

#### c) defektoskopie

využívá se záření  $\gamma$ , případně neutronů, prozařují se velké vrstvy materiálu (silné ocelové odlitky, pyramidy)



## 5. Radioaktivita

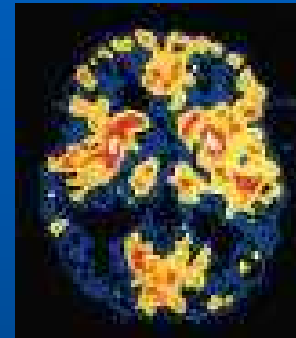
### 5. 10. Využití radioaktivity a fyziologické účinky

#### d) Lékařství - diagnostika

Do organismu se vpraví malé množství radioaktivního nuklidu s velmi krátkým poločasem rozpadu (minuty, hodiny). Sleduje se cesta nuklidu organismem, rychlost metabolismu, ukládání prvků v orgánech. Některé patologické struktury pak koncentrují zvolenou kontrastní látku, která je pak na snímku zdůrazněna.

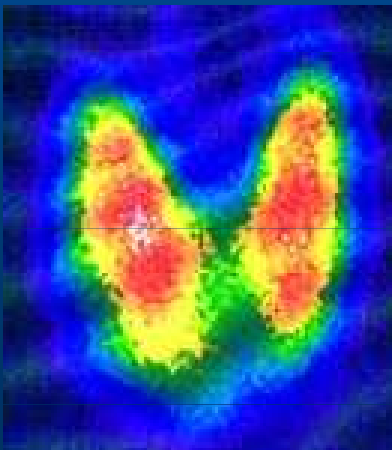
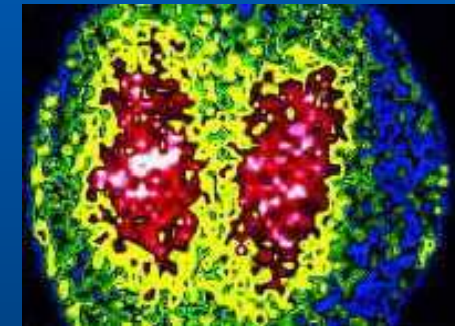


diagram plic po  
vdechnutí  
radioaktivního aerosolu  
s techneciem 99

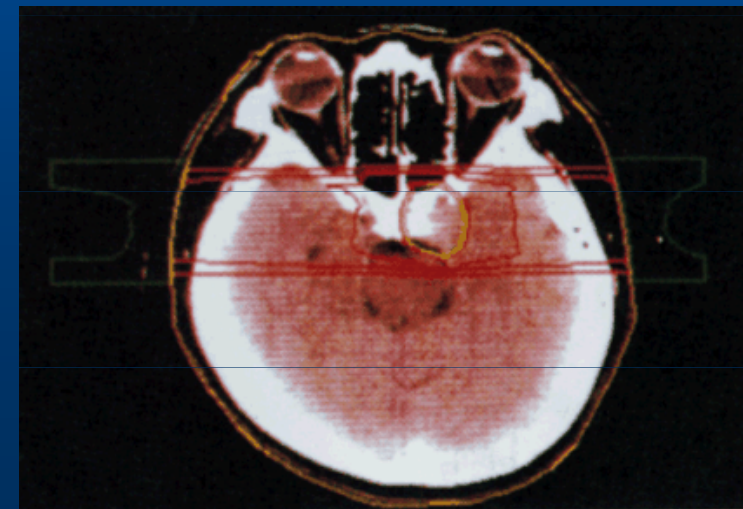


mozek s  
tumorem

Alzheimerova  
choroba



sledování ukládání  
derivátů mastných  
kyselin v myokardu

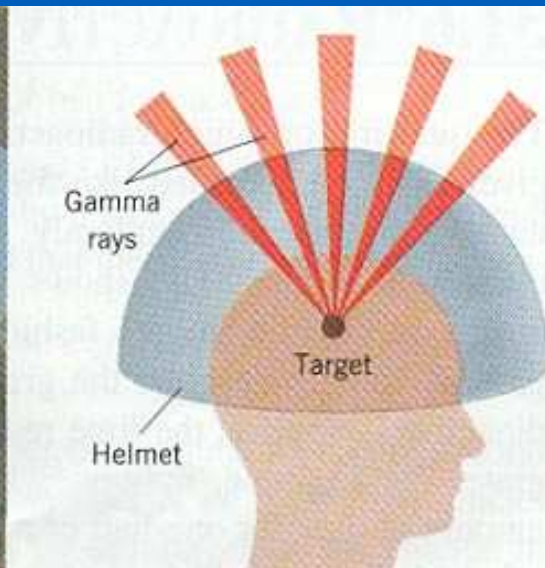


## 5. Radioaktivita

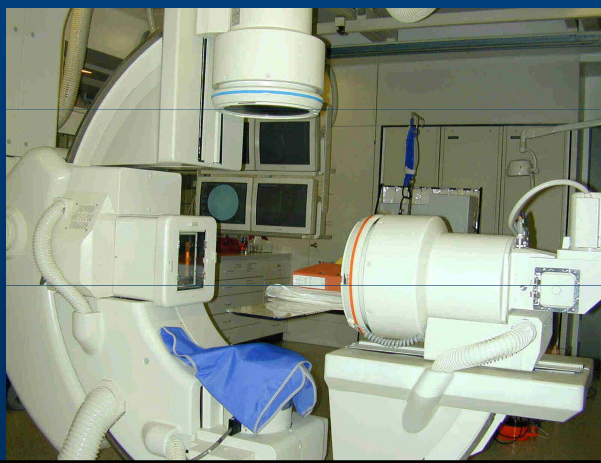
### 5. 10. Využití radioaktivity a fyziologické účinky

#### e) Lékařství - terapie

je založena na možnosti směrování paprsku radioaktivního záření, či na jeho omezeném doletu, případně na schopnosti většího zachycení záření v postižené tkáni



princip Leksellova gama nože



příklady zařízení pro směrové ozařování

## 5. Radioaktivita

### 5. 10. Využití radioaktivity a fyziologické účinky

#### e) Lékařství - terapie



lineární urychlovač

## 5. Radioaktivita

### 5. 10. Využití radioaktivity a fyziologické účinky

#### f) sterilizace a konzervace

využívá se hlavně záření  $\gamma$  ( $\text{Co60}$ ) proti mikrobům, škůdcům (červotoč), plísním, kvasinkám, zabraňuje se kažení potravin, klíčení brambor apod.



## 5. Radioaktivita

### 5. 10. Využití radioaktivity a fyziologické účinky

#### g) biologie, chemie – metoda značených atomů

Je obdobná lékařské diagnostice: do organismu nebo do chemické reakce se místo běžného izotopu vpraví radioizotop, sleduje se cesta organismem, chemickou reakcí (chemie jednoho atomu). V biologii se zkoumá metabolismus, ukládání stopových prvků, v chemii se zkoumá struktura molekul, průběhy chemických reakcí.

## 5. Radioaktivita

### 5. 10. Využití radioaktivity a fyziologické účinky

#### h) archeologie

Využívá několika radionuklidů, které vznikají v přírodě a ukládají se v určitých strukturách. Nejznámějším je příklad radiouhlíku C 14 s poločasem rozpadu 5720 let. Ten vzniká v atmosférickém CO<sub>2</sub> a dostává se do živých organismů – u rostlin asimilací, u živočichů po jídání rostlin, či živočichů živících se rostlinami. Po odumření organismu se začíná radiouhlík rozpadat a jeho množství v pozůstatcích klesá. Z poměru C14 a C12 lze určit, před kolika lety organismus odumřel.



V Alpách byly nalezeny pozůstatky „ledového muže“. Normální obsah C14 je 0,23 Bq na 1 gram. V ledovém muži byla aktivita jen 0,121 Bq na 1 gram, tedy asi polovina aktivity živého organismu. Z toho plyne, že ledový muž zahynul přibližně před 5700 lety.

## 5. Radioaktivita

### 5. 10. Využití radioaktivity a fyziologické účinky

#### h) archeologie



Turínské plátno, do kterého by měla být údajně zahalena mrtvola Ježíše Krista po sejmutí z kříže. V roce 1988 bylo zkoumáno radiouhlíkovou metodou a bylo zjištěno, že je staré 608-728 let, tj. z let 1260 až 1360. V této době se o Turínském plátně poprvé psalo. Zastánci pravosti tvrdí, že radiouhlík se v plátně obnovil zachycením sazí při požáru z uvedených let.



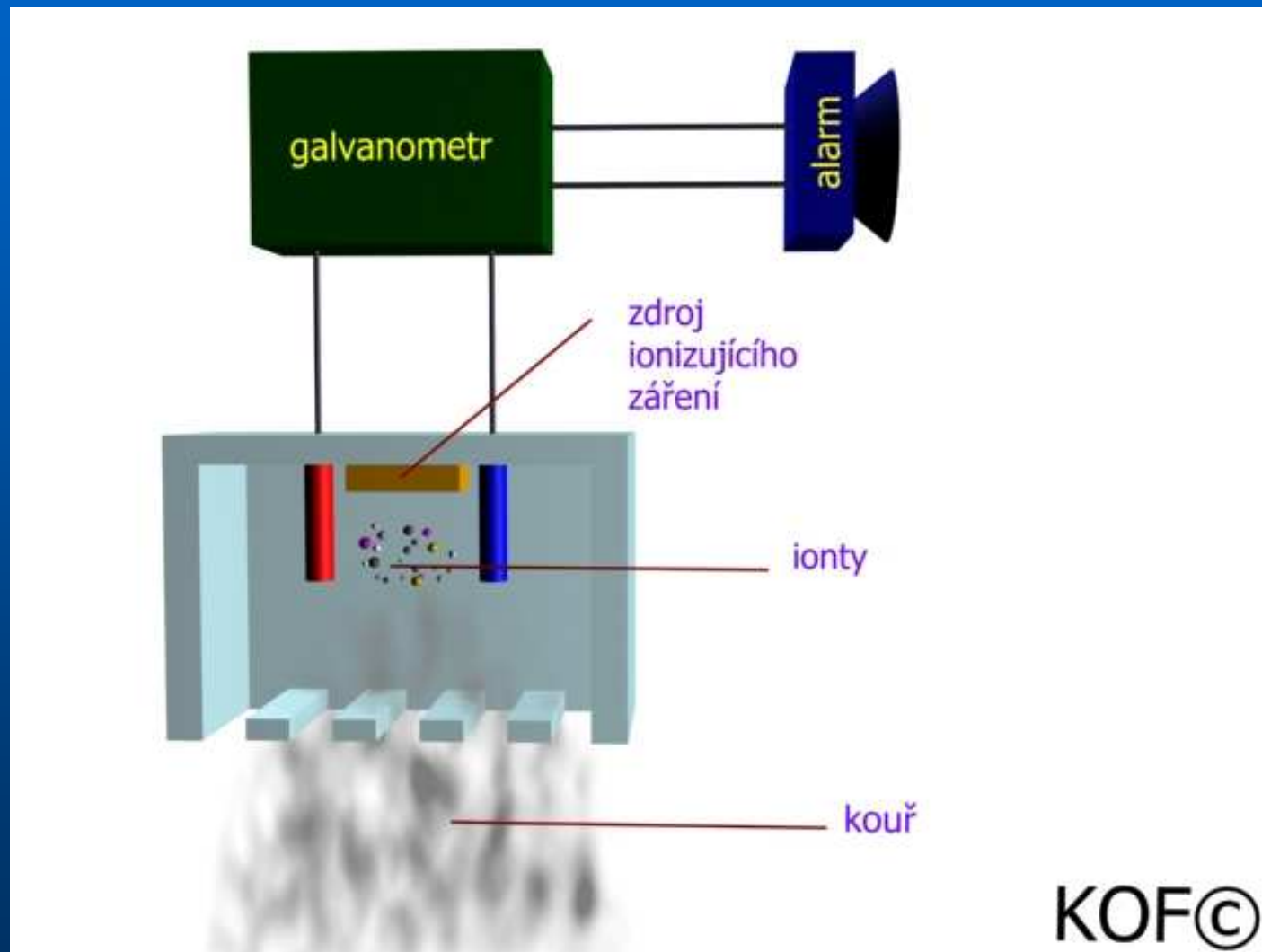
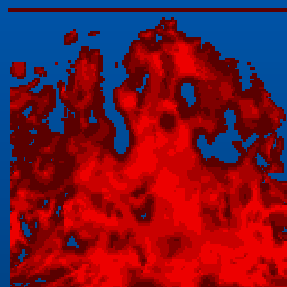
U fosilií starých například 80 milionů let není radiouhlíková metoda využitelná.



## 5. Radioaktivita

### 5. 10. Využití radioaktivity a fyziologické účinky

#### i) detektory kouře a ohně



## 5. Radioaktivita

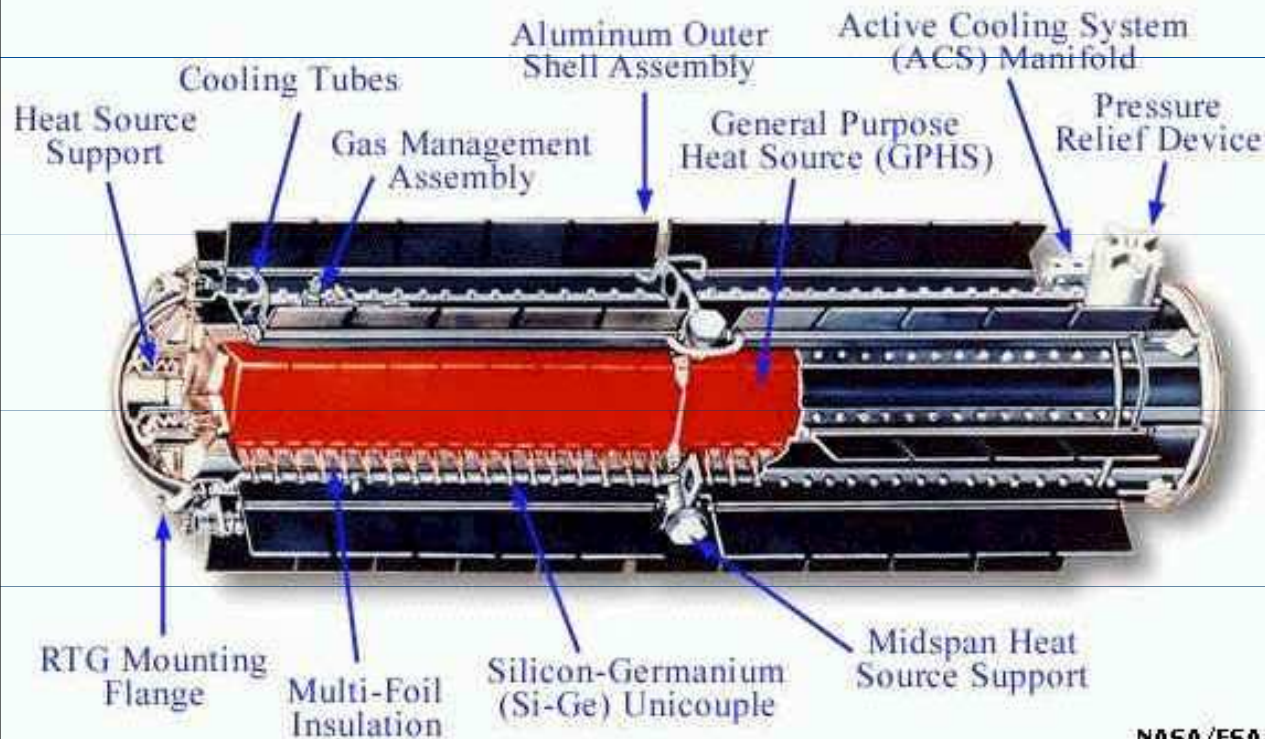
### 5. 10. Využití radioaktivity a fyziologické účinky

#### j) zdroje energie



170 gramů plutonia rozžhavených teplem uvolňovaným při radioaktivním rozpadu v grafitovém držáku

### GPHS-RTG



Jaderná baterie pro kosmický výzkum – elektrická energie se uvolňuje termoelektrickým jevem z rozdílu teplot: radioaktivní látka izolovaná uvnitř válce – vnější chladiče. Jako termočlánky slouží polovodičové spoje Si-Ge. Poskytuje výkon 628 W po 11 letech (sonda Cassini-Huygens)

## 5. Radioaktivita

### 5. 10. Využití radioaktivity a fyziologické účinky

#### k) zemědělství

šlechtitelství: k vyvolání mutací u rostlin a živočichů – ustupuje cílenému genovému inženýrství

zjišťování vlhkosti obilí na vjezdu do silových skladišť