

# Prvek, nuklid, izotop, izobar, izoton

A = Nukleonové (hmotnostní) číslo

A = počet protonů + počet neutronů

A = Z + N

Z = Protonové číslo, náboj jádra

Prvek = soubor atomů se stejným Z

Nuklid = soubor atomů se stejným A a Z

Izotopy = soubor nuklidů daného prvku

Izobary = nuklidy se stejným A a různým Z ( $^{14}\text{C}$ - $^{14}\text{N}$ ;  $^3\text{H}$ - $^3\text{He}$ )

Izotony = nuklidy se stejným počtem neutronů,  $N = A - Z$

Izomery = stejné nuklidy, liší se obsahem energie



Frederick Soddy  
(1877-1956)

NP za chemii 1921

# Izotopy

Izotopy jsou souborem nuklidů pro daný prvek  
existuje asi 2600 nuklidů (stabilních i radioaktivních)  
340 nuklidů se vyskytuje v přírodě  
270 stabilních a 70 radioaktivních

Monoizotopické prvky:

${}^9\text{Be}$ ,  ${}^{19}\text{F}$ ,  ${}^{23}\text{Na}$ ,  ${}^{27}\text{Al}$ ,  ${}^{31}\text{P}$ ,  ${}^{59}\text{Co}$ ,  ${}^{127}\text{I}$ ,  ${}^{197}\text{Au}$

Polyizotopické prvky:

${}^1\text{H}$ ,  ${}^2\text{H}$  (D),  ${}^3\text{H}$  (T)

${}^{10}\text{B}$ ,  ${}^{11}\text{B}$

Sn má největší počet **stabilních** izotopů – 10

112, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 122,  ${}^{124}\text{Sn}$

## Stabilita jader

Stabilita (vzhledem k radioaktivnímu rozpadu)  
je určena počtem protonů a neutronů

Zona stability

Lehké nuklidy stabilní pro  $Z \sim A-Z$

Jen  ${}^1\text{H}$  a  ${}^3\text{He}$  mají více p než n.

${}^2\text{H}$ ,  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^{10}\text{B}$ ,  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{14}\text{N}$ ,  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{20}\text{Ne}$ ,  ${}^{24}\text{Mg}$ ,  ${}^{28}\text{Si}$ ,  ${}^{32}\text{S}$ ,  ${}^{36}\text{Ar}$  a  ${}^{40}\text{Ca}$   
mají stejný počet p a n

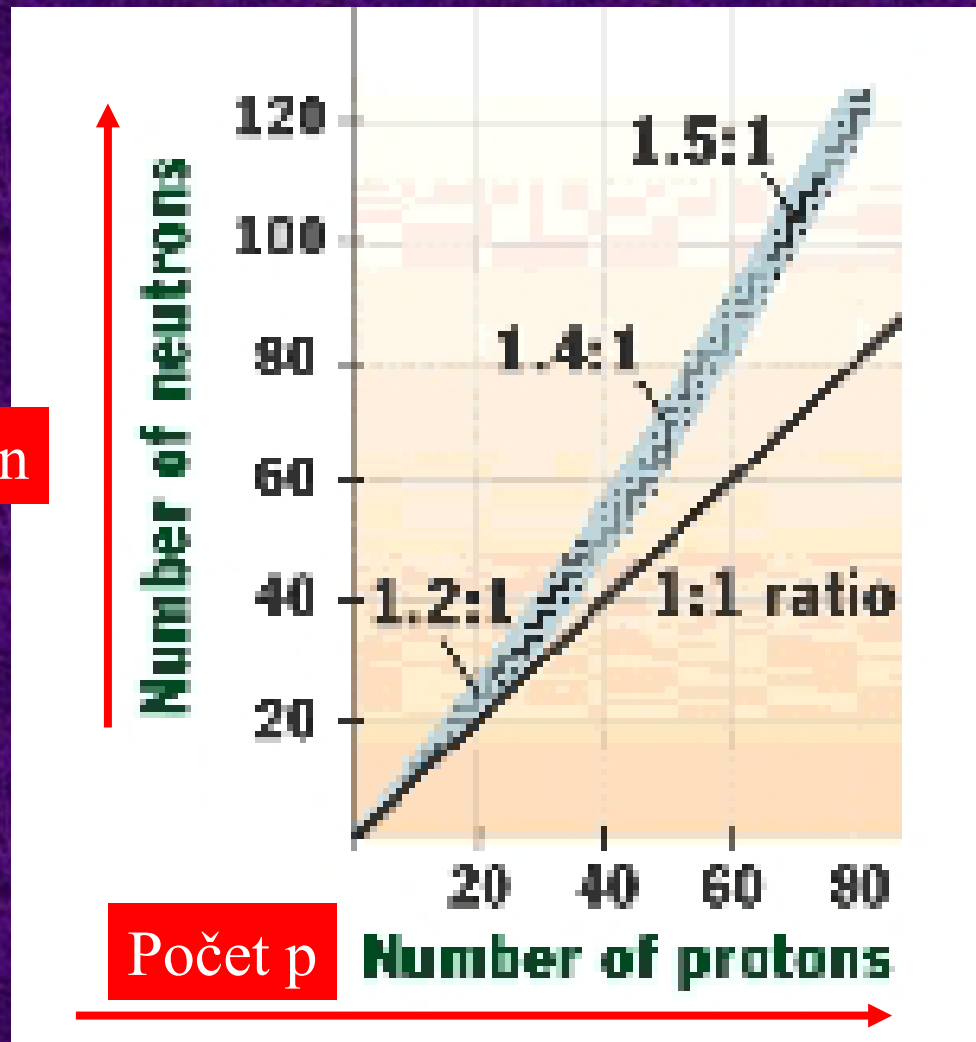
Všechny ostatní nuklidy mají **více** n než p

Mattauchovo pravidlo: ze dvojice izobarů, které se liší o 1 v  
protonovém čísle, je jeden radioaktivní.

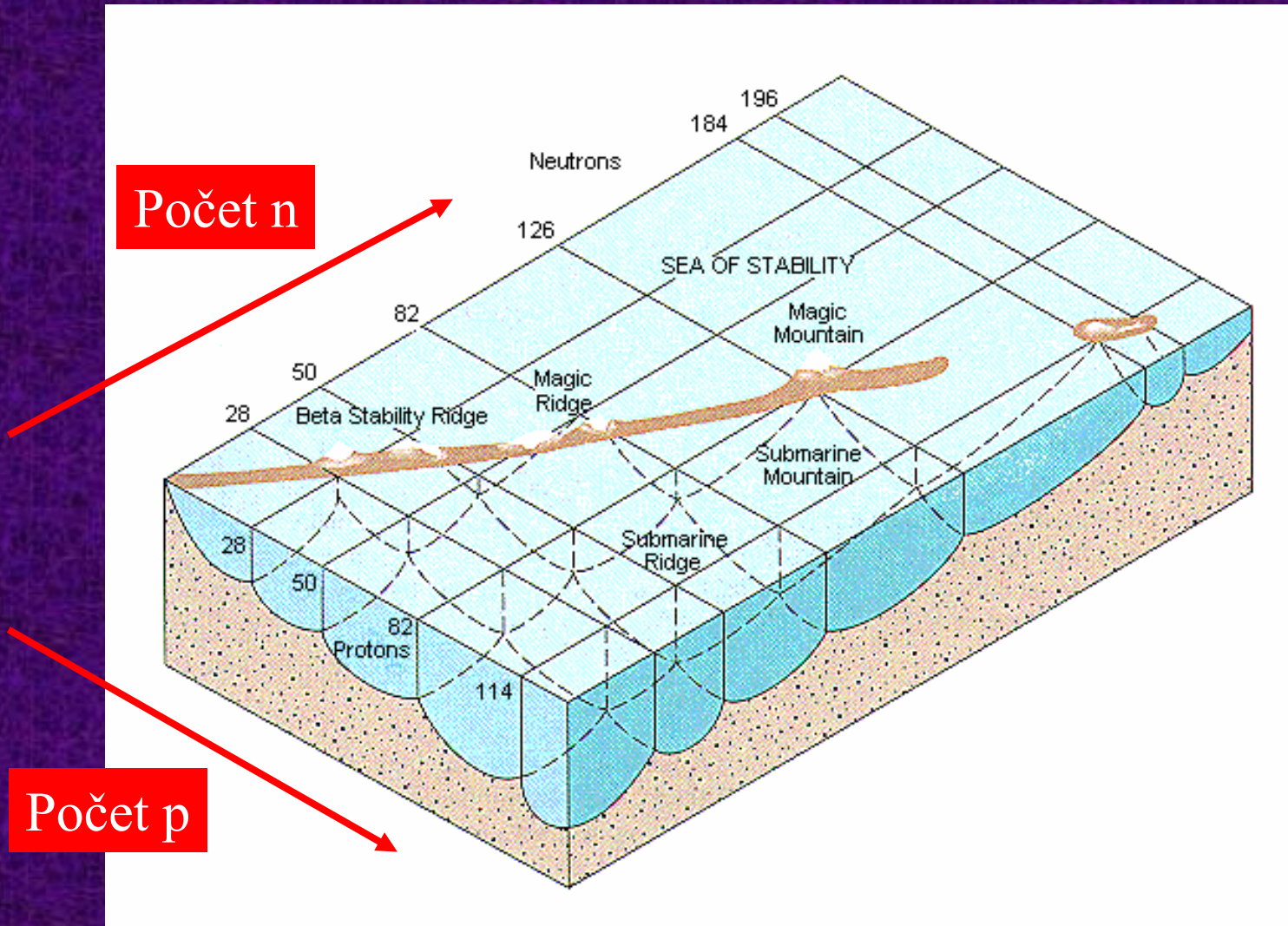
${}^{40}\text{Ar}$   ${}^{40}\text{Ca}$   $\Delta Z = 2$        ${}^{40}\text{Ar}$   ${}^{40}\text{K}$   ${}^{40}\text{Ca}$   $\Delta Z = 1$   ${}^{40}\text{K}$  je radioaktivní

# Stabilita jader

Počet n



# Ostrov stability



## Stabilita jader

U některých prvků existují v přírodě radioaktivní izotopy s dlouhým poločasem přeměny  $^{40}\text{K}$ , 0.012%,  $1.3 \cdot 10^{10}$  roků

Prvky s  $Z \leq 83$  (Bi) mají alespoň jeden stabilní izotop

$Z = 43$  (Tc), 61 (Pm) se nevyskytují v přírodě

Umělé radioaktivní izotopy připravené jadernými reakcemi

Nuklidy s  $Z \geq 84$  (Po) jsou nestabilní vzhledem k radioaktivnímu rozpadu, radioaktivní prvky

## Magická čísla

Počet Protonů	Počet Neutronů	Počet stabilních nuklidů
Sudá	Sudá	168
Sudá	Lichá	57
Lichá	Sudá	50
Lichá	Lichá	4

Nuklidy se sudým počtem  $p$  a  $n$  jsou nejčastější

Astonovo pravidlo: prvky se sudým  $Z$  mají více izotopů, prvky s lichým  $Z$  nemají více než dva izotopy, z toho jeden nestabilní, prvky s lichým počtem nukleonů ( $A$ ) mají jen jeden stálý izotop.

Jen  ${}^2\text{H}$ ,  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^{10}\text{B}$ ,  ${}^{14}\text{N}$ ,  ${}^{40}\text{K}$ ,  ${}^{50}\text{V}$ ,  ${}^{138}\text{La}$ ,  ${}^{176}\text{Lu}$  mají lichý počet jak  $p$  tak  $n$

# Magická čísla

Magická čísla 2, 8, 20, 28, 50, 82, a 126

Prvky s  $Z =$  magické číslo mají velký počet stabilních izotopů, pokud je izotop radioaktivní, pak má dlouhý poločas rozpadu

Nuklidy  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{40}\text{Ca}$ ,  ${}^{48}\text{Ca}$  a  ${}^{208}\text{Pb}$  mají magický počet  $p$  i  $n$



## Hmotnost elektronu a nukleonů

Symbol	m [kg]	m [amu]
e	$9.11 \cdot 10^{-31}$	0.0005486
p	$1.673 \cdot 10^{-27}$	1.007276
n	$1.675 \cdot 10^{-27}$	1.008665

$$1 \text{ amu} = 1.6606 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

# Hmotnostní úbytek

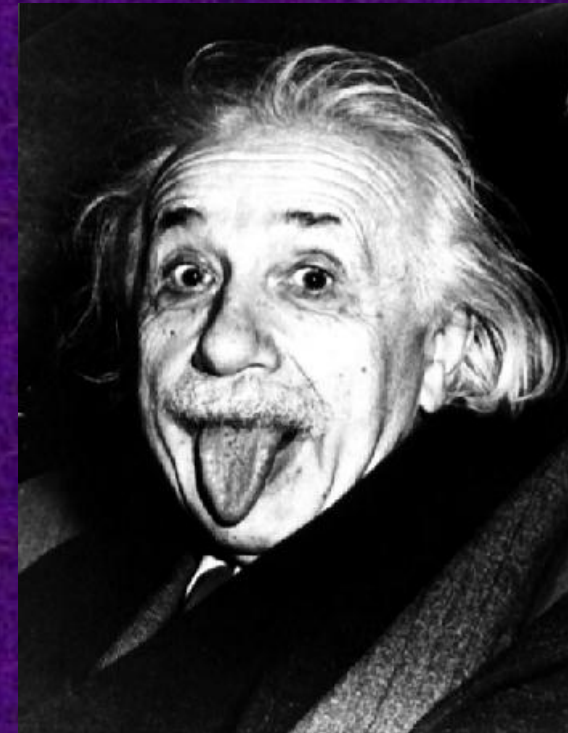
Hmotnost jádra je vždy menší než součet hmotností nukleonů

$$M_j < Z m_p + (A-Z) m_n$$

Hmotnostní úbytek  $\Delta m < 0$   
[ $\Delta m$  v jednotkách amu]

Vazebná energie jádra  $E_v = - \Delta m c^2$

$$E_v = - 931.5 \Delta m \text{ [MeV]}$$



NP za fyziku 1921

## Vazebná energie jádra, $E_v$

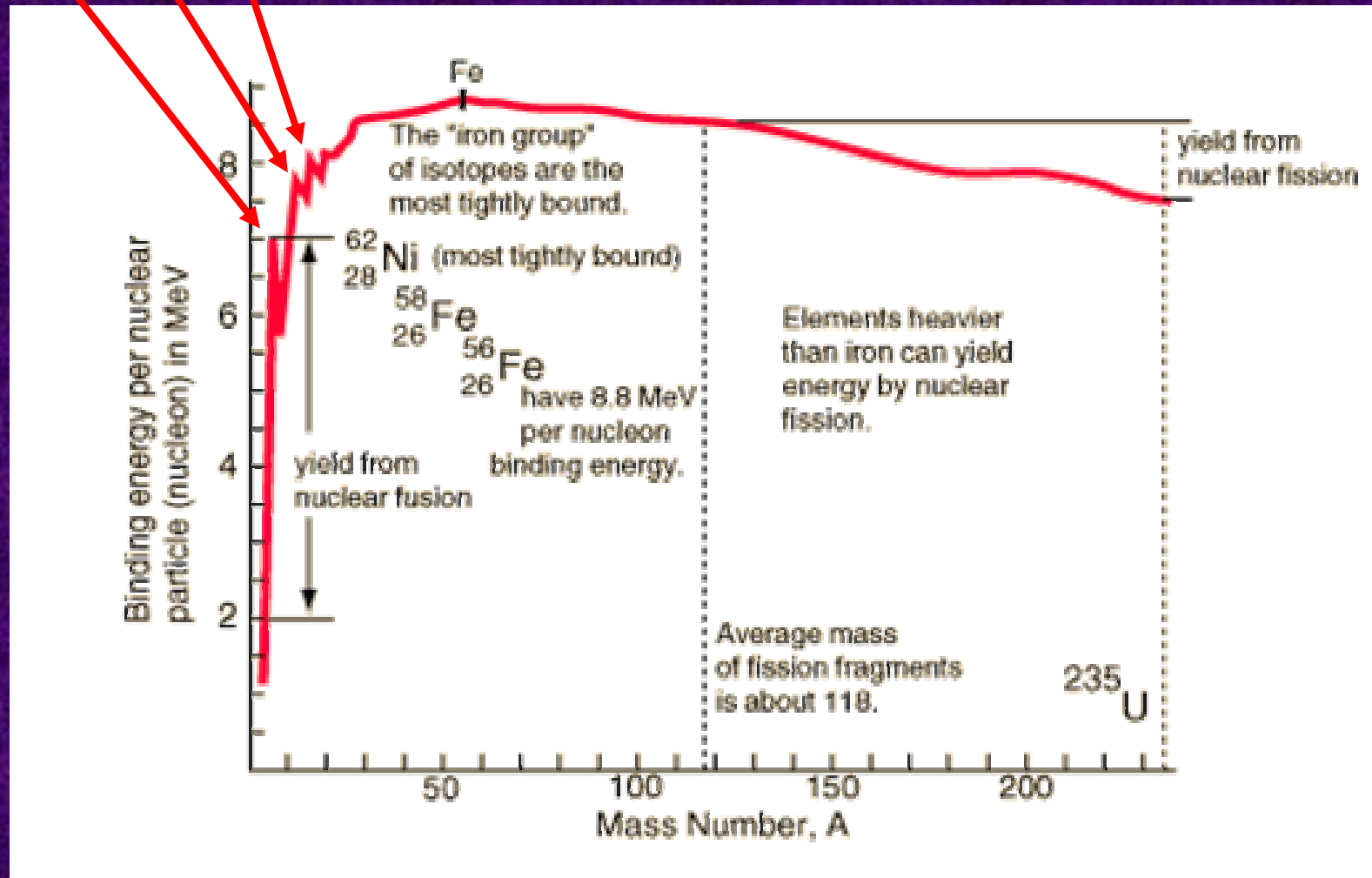
Nuklid	$E_v$ , MeV
$^2\text{H}$	2.226
$^4\text{He}$	28.296
$^{14}\text{N}$	104.659
$^{16}\text{O}$	127.619
$^{40}\text{Ca}$	342.052
$^{58}\text{Fe}$	509.945
$^{206}\text{Pb}$	1622.340
$^{238}\text{U}$	1822.693

## Střední vazebná energie jádra, $E_v(\text{st})$

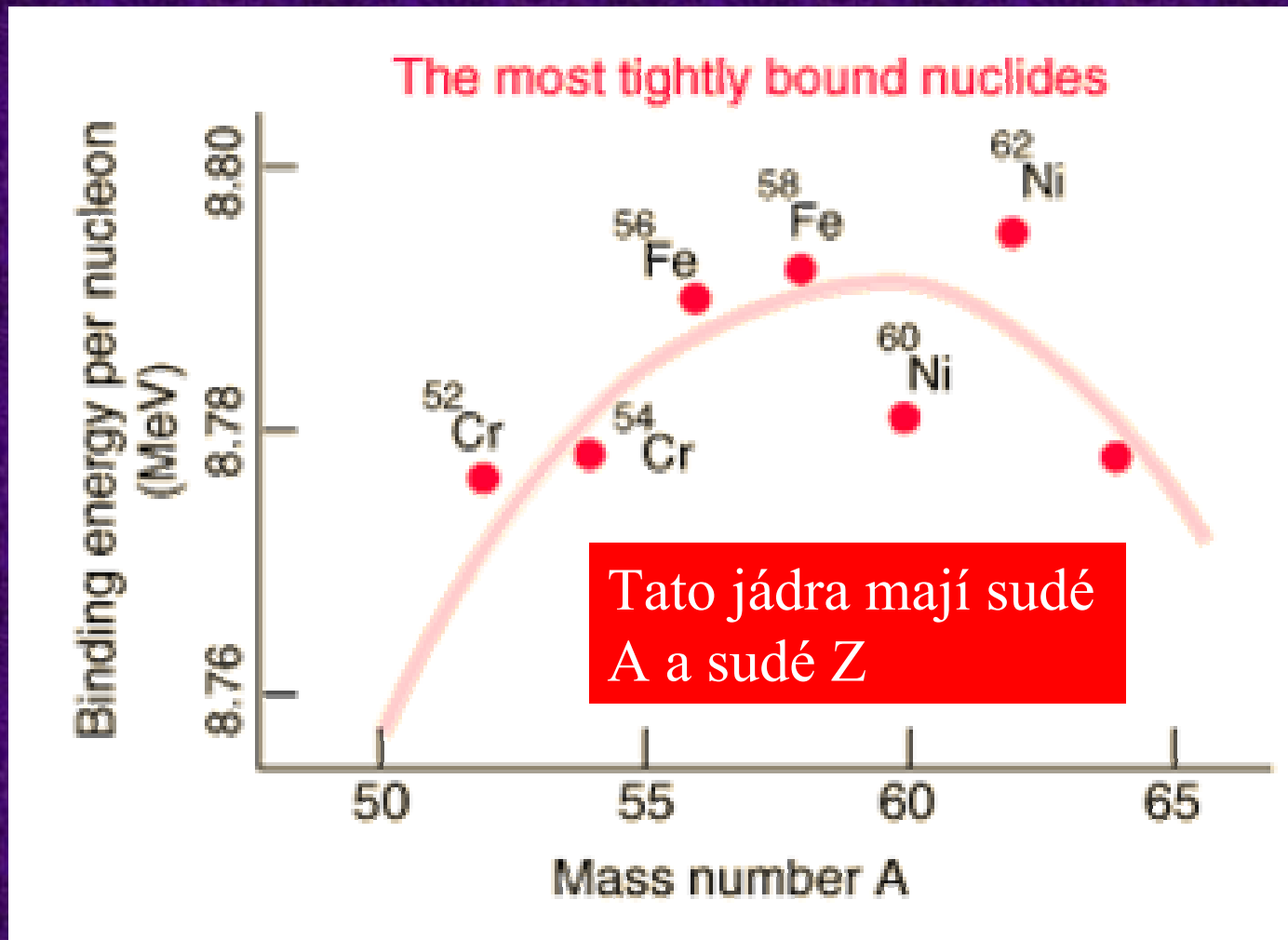
Nuklid	$E_v(\text{st}), \text{MeV}$	$E_v, \text{MeV}$	
$^2\text{H}$	1.113	2.226	
$^4\text{He}$	7.074	28.296	$E_v(\text{st}) = E_v / A$
$^{14}\text{N}$	7.476	104.659	Energie na odtržení 1
$^{16}\text{O}$	7.976	127.619	nukleonu
$^{19}\text{F}$	7.779	147.801	
$^{40}\text{Ca}$	8.551	342.052	
$^{55}\text{Mn}$	8.765	482.070	
$^{58}\text{Fe}$	8.792	509.945	
$^{62}\text{Ni}$	8.795	545.259	
$^{206}\text{Pb}$	7.875	1622.340	
$^{238}\text{U}$	7.658	1822.693	

# Střední vazebná energie jádra

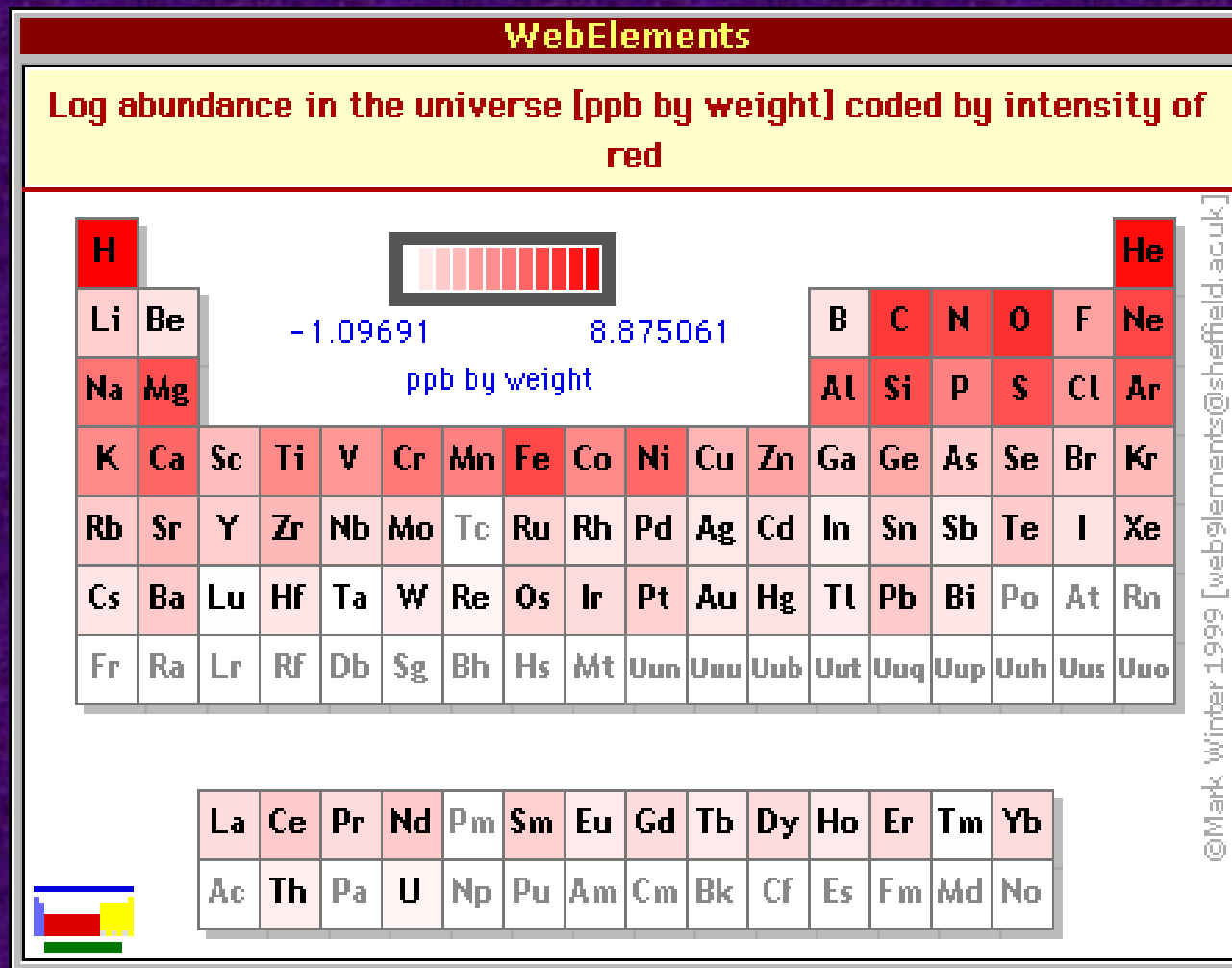
$^4\text{He}$   $^{12}\text{C}$   $^{16}\text{O}$



## Střední vazebná energie jádra



# Výskyt prvků ve vesmíru



## Vazebná energie jádra a chemické vazby

Střední vazebná energie jádra  $^{58}\text{Fe}$  8.792 MeV

Energie vazby C-H  $411 \text{ kJ mol}^{-1} = 4.25 \text{ eV}$

Jaderná vazebná energie je milionkrát větší než chemická vazebná energie.



## Vazebná energie jádra a chemické

Chemické reakce se odehrávají ve vnější elektronové slupce, atomové jádro zůstává neovlivněno.

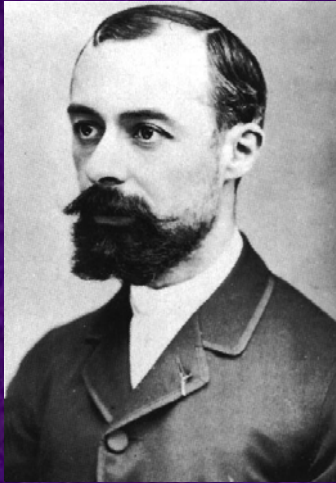
Energetické změny při chemických reakcích jednotky eV

Hmotnostní úbytek neměřitelný, platí zákon zachování hmotnosti.

Jaderné reakce mění složení jader, elektronový obal nehraje žádnou roli. Energetické změny řádu MeV. Významné hmotnostní úbytky, platí zákon zachování energie a ekvivalence hmoty a energie.

$$E = m c^2$$

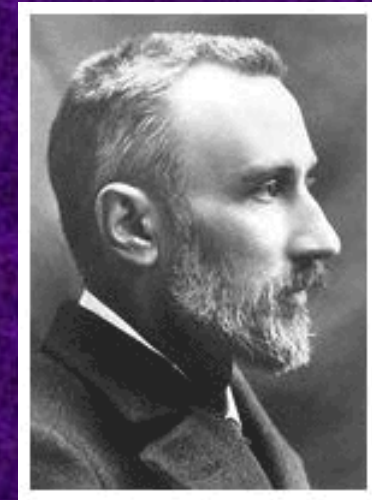
## Radioaktivita



Uran, Thorium

Antoine Henri Becquerel  
(1852-1908)

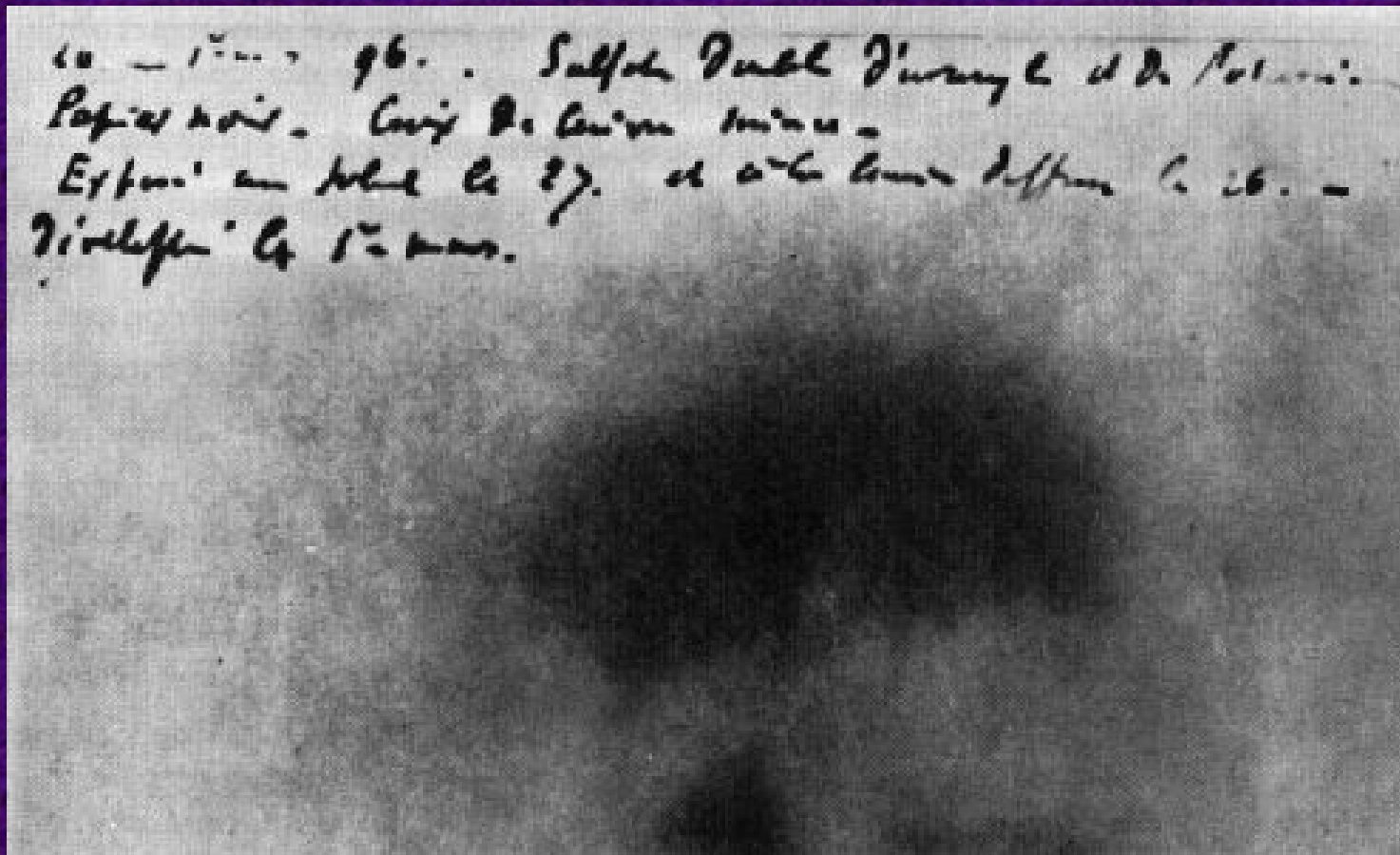
Objev radioaktivity 1896  
NP za fyziku 1903



Radium, Polonium

Marie Curie (1867-1934)  
Pierre Curie (1859-1906)  
NP za fyziku 1903  
M. C. NP za chemii 1911

## Objev radioaktivity



# Radioaktivita



Radioaktivita = schopnost některých jader přeměňovat se na jiné jádro, emitují se menší částice a uvolňuje se energie (exo)

Samovolný děj, produkty mají nižší obsah energie, stabilnější

1 Bq (becquerel) = 1 rozpad za 1 s

1 Ci (curie) =  $3.7 \cdot 10^{10}$  Bq

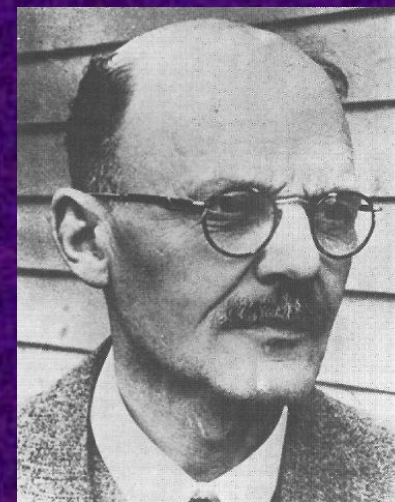
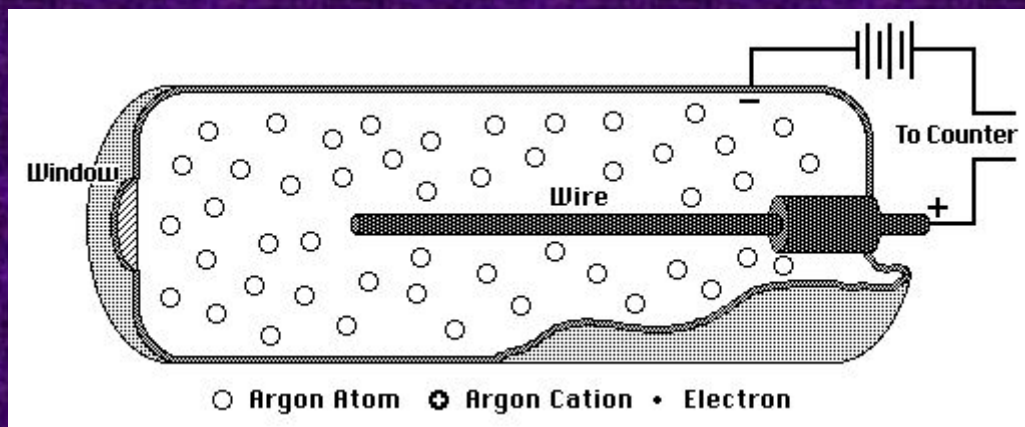
Radiační dávka 1 Gy (gray)

= absorpce 1 J v 1 kg

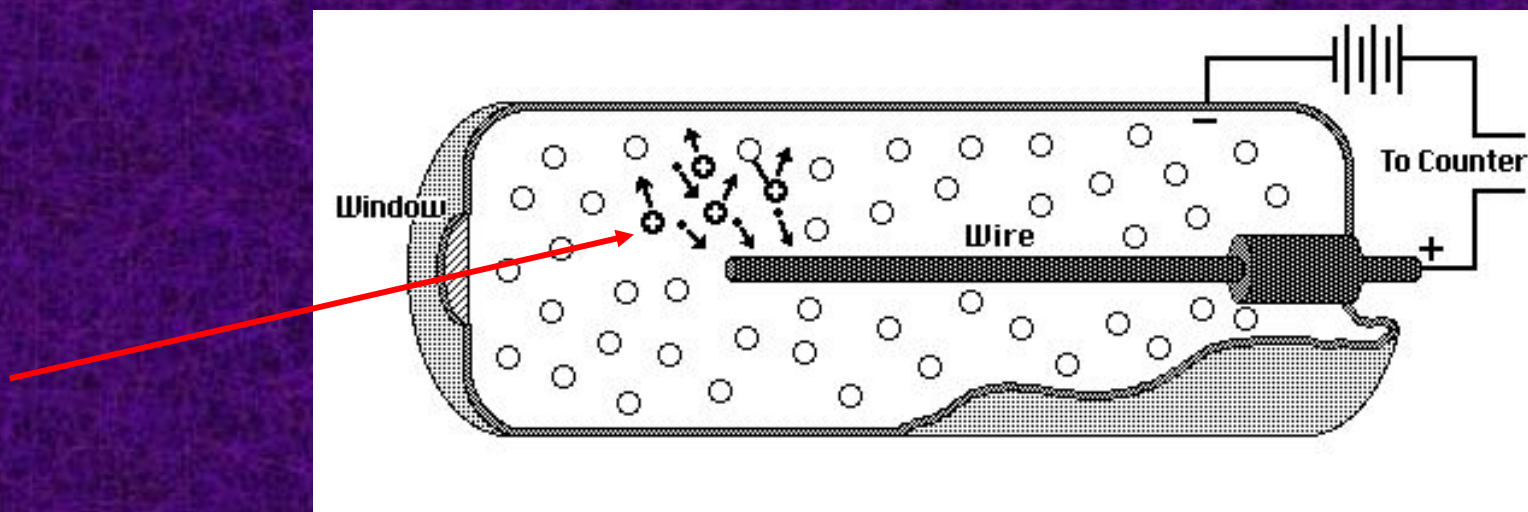
1 Gy = 100 rad



# Geigerův čítač



Hans Geiger  
(1882-1945)



# Jaderné reakce

Rutherford – odklon radioaktivního záření v elektrickém a magnetickém poli

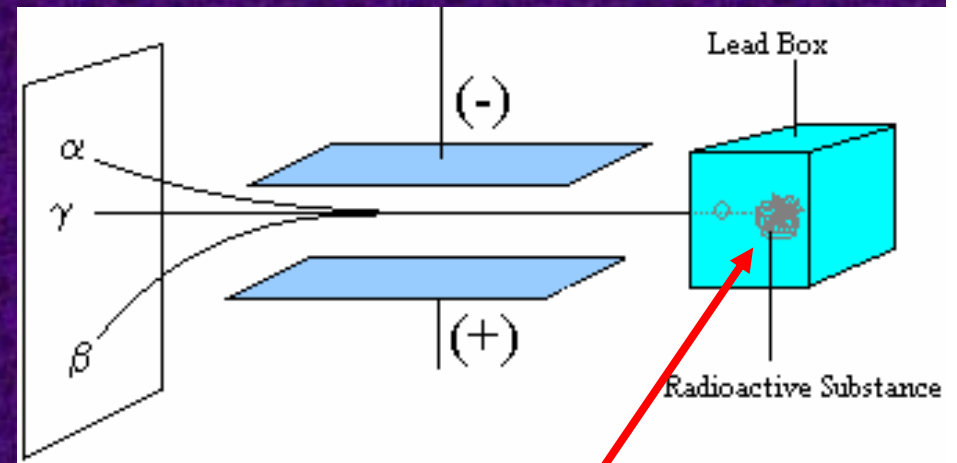
Alfa = pozitivně nabitě částice

Beta = negativně nabitě částice

Gama = neutrální částice

Tvorba nového nuklidu

Posuvové zákony



Radioaktivní látka

## Emise alfa částice ${}^4_2\text{He}$

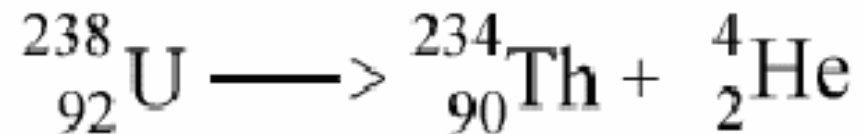
U těžkých jader

Alfa částice pouští jádro rychlostí 10% c

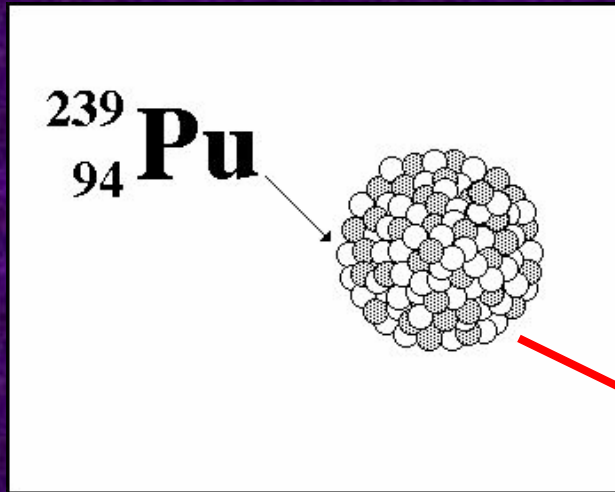
Velmi malá penetrace, několik cm ve vzduchu, zastaví je list papíru

Velmi škodlivé pro buňky

Inhalace

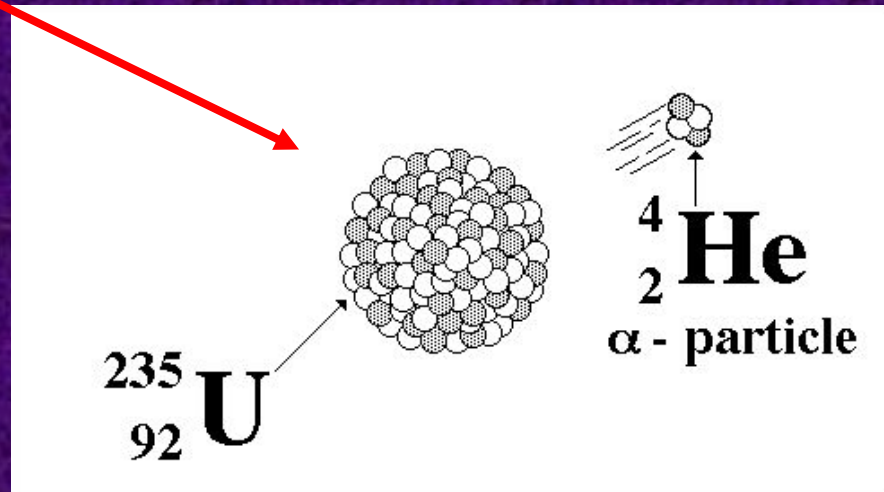


# Alfa emise



$$\begin{matrix} A - 4 \\ Z - 2 \end{matrix} \text{N}_2$$

$$\begin{matrix} A \\ Z \end{matrix} \text{N}_1$$





## Alfa emise

Radium-226

Curium-240

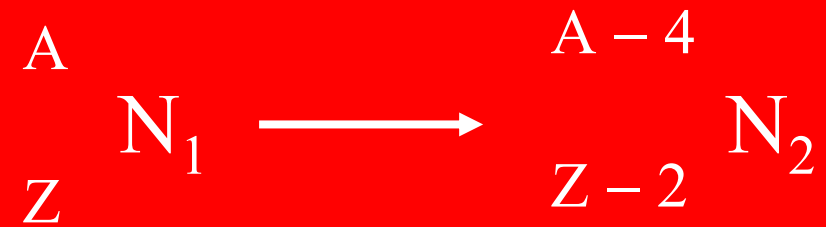
Uran-232

Zlato-185

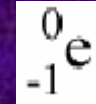
Thorium-230

Americium-243

Polonium-210



## Beta částice



Jádra s nadbytkem neutronů, nedostatek protonů

Beta částice jsou elektrony (ale ne z elektronového obalu!!!)



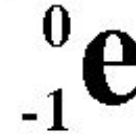
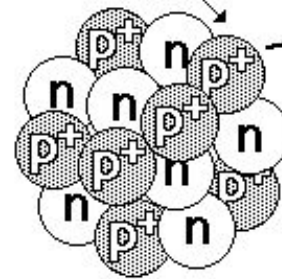
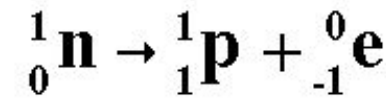
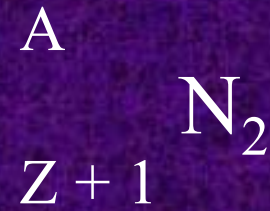
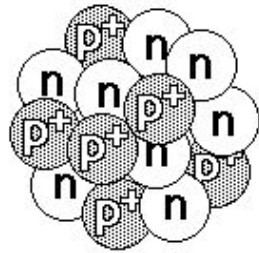
Vznikají rozpadem neutronu

e opouští jádro rychlostí 90% c

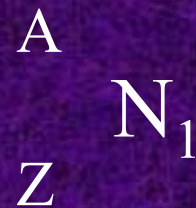
Penetrace větší než alfa, několik m ve vzduchu, zastaví je 1 cm Al folie



# Beta emise



beta particle  
(electron)



Krypton-87

## Beta emise

Zinek-71

Křemík-32

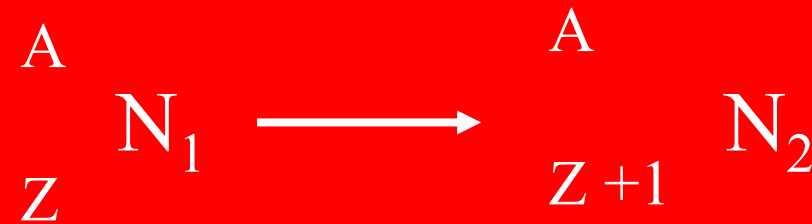
Kobalt-60

Hořčík-27

Sodík-24

Železo-59

Fosfor-32



# Gama částice

Jádra s nadbytkem energie emitují gama částice

Elektromagnetické záření s velmi krátkou vlnovou délkou,  
Vysoká energie, MeV

Rychlost světla

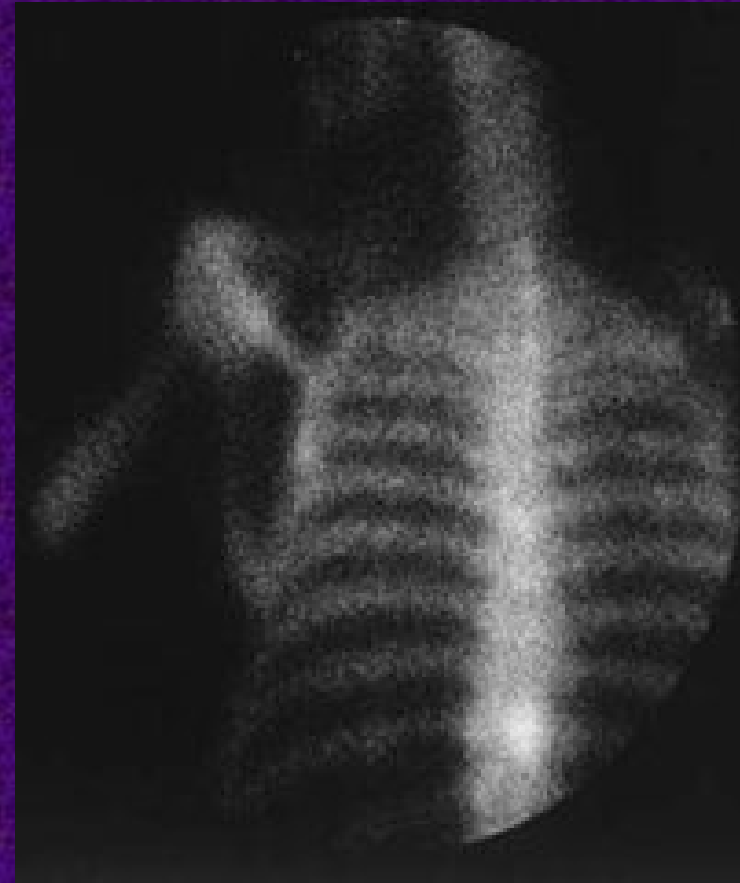
Hluboká penetrace, 500 m ve vzduchu



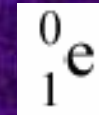
# Tracer

Gyorgy Hevesy 1913

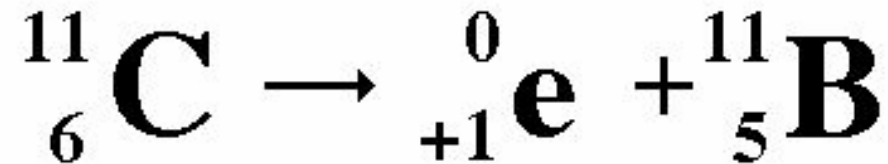
NP 1943



# Positronová emise



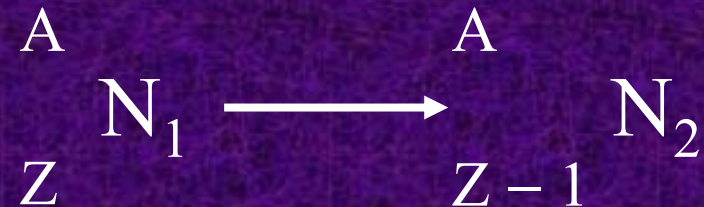
Jádra s nadbytkem protonů, nedostatek neutronů



Positron se rekombinuje během  $10^{-10}$  s

Velmi malá penetrace

Anihilace  ${}^0_1\text{e} + {}^0_{-1}\text{e} \rightarrow \gamma$



# Positronová emise

Rubidium-81

Germanium-66

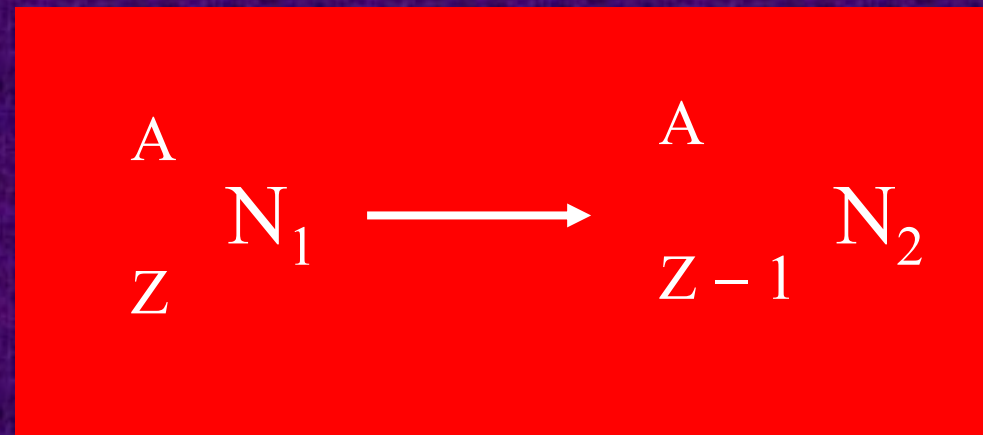
Praseodym-140

Neon-18

Kyslík-15

Dusík-13

Měď-59





## Elektronový záchyt

Elektron z elektronového obalu atomu může být zachycen jádrem

Zachycený e přemění p na n,  
e z vnější slupky klesne na volnou hladinu,  
emise rentgenového záření

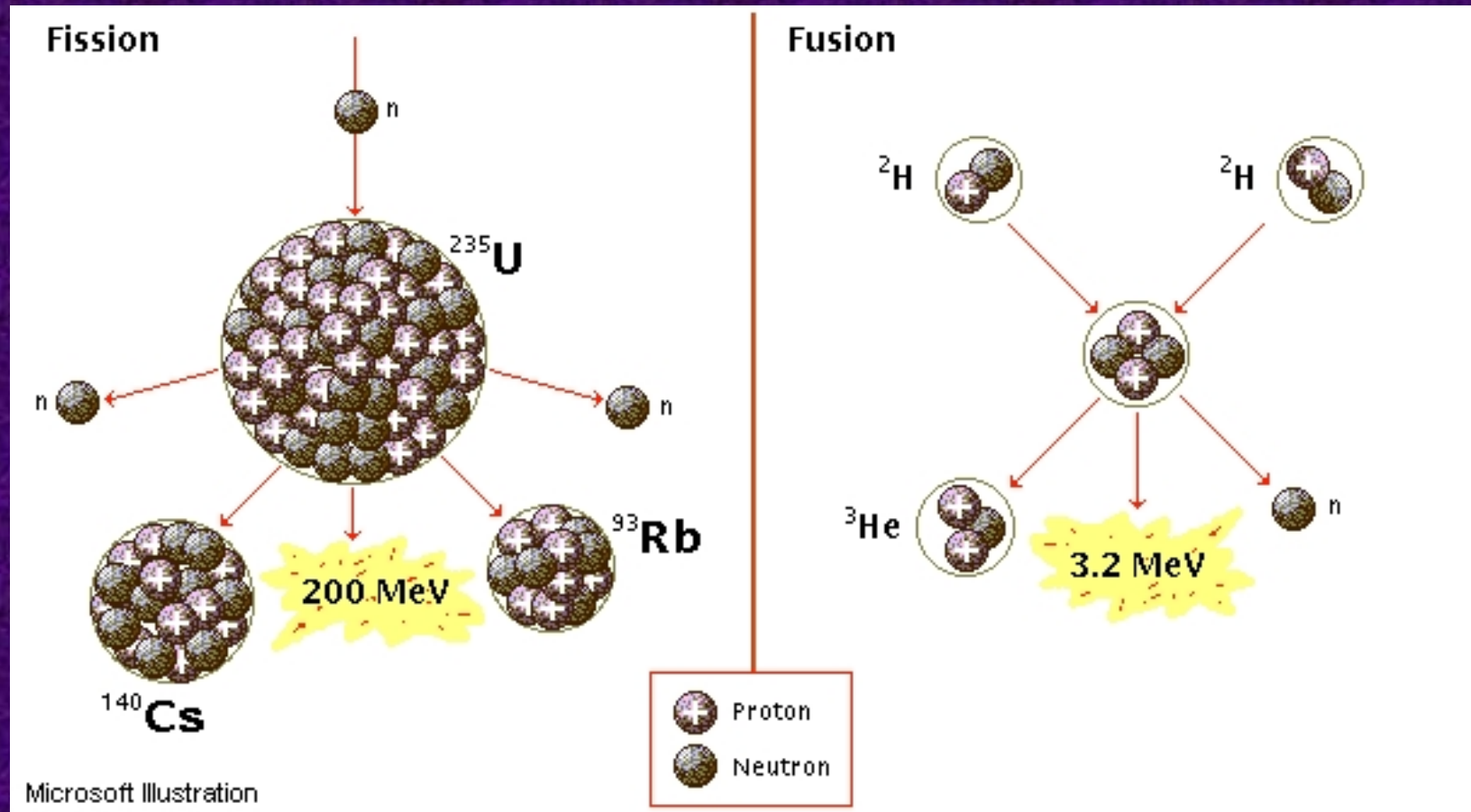
Jádra s  $Z > 83$  nemohou dosáhnout stability beta emisí,  
pozitronovou emisí nebo elektronovým záchytem

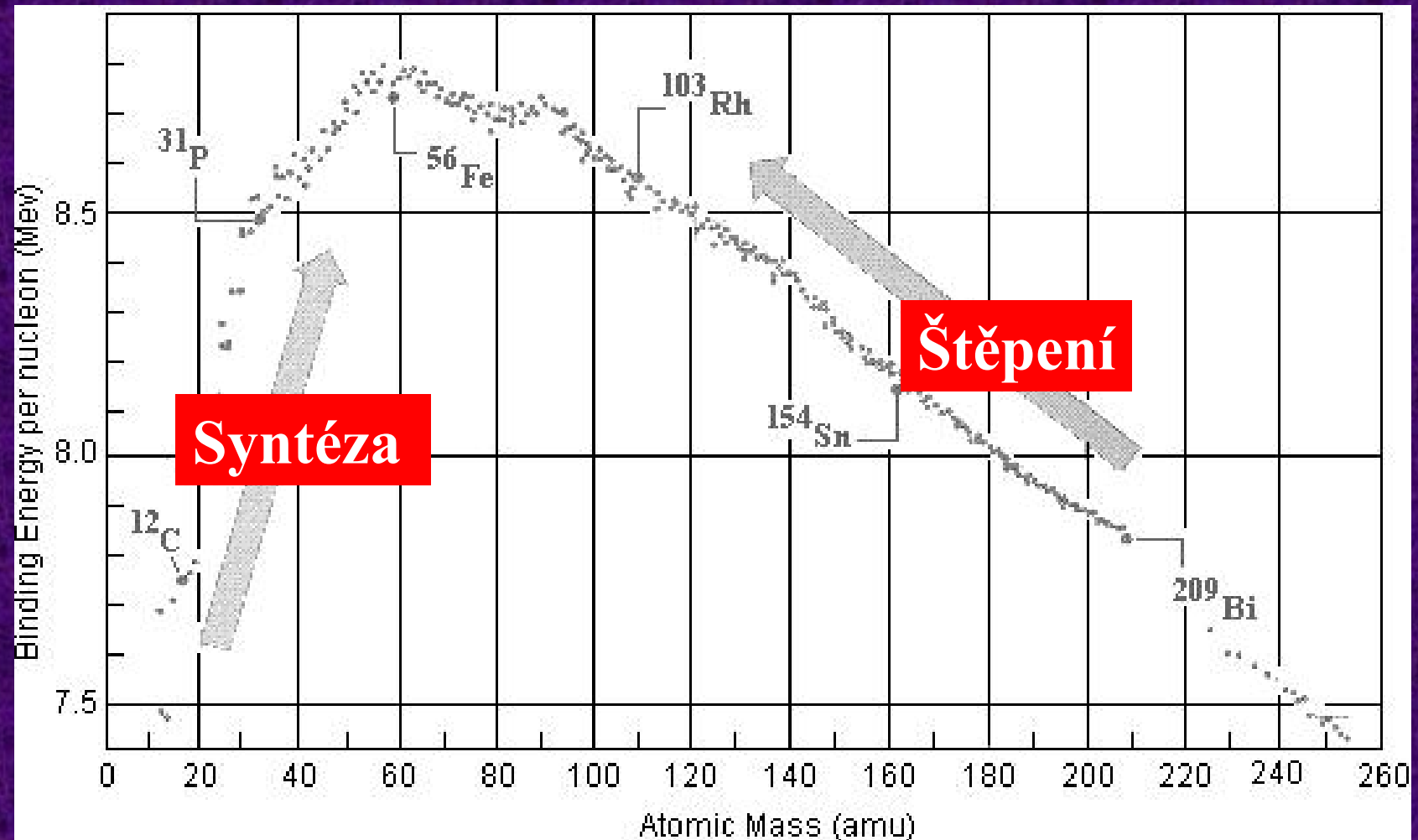


# Samovolné štěpení



# Syntéza a štěpení jader





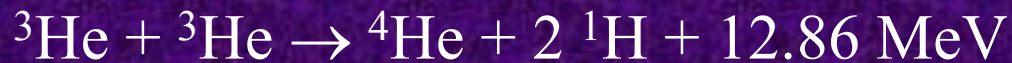
# Syntéza jader ve vesmíru

Big Bang



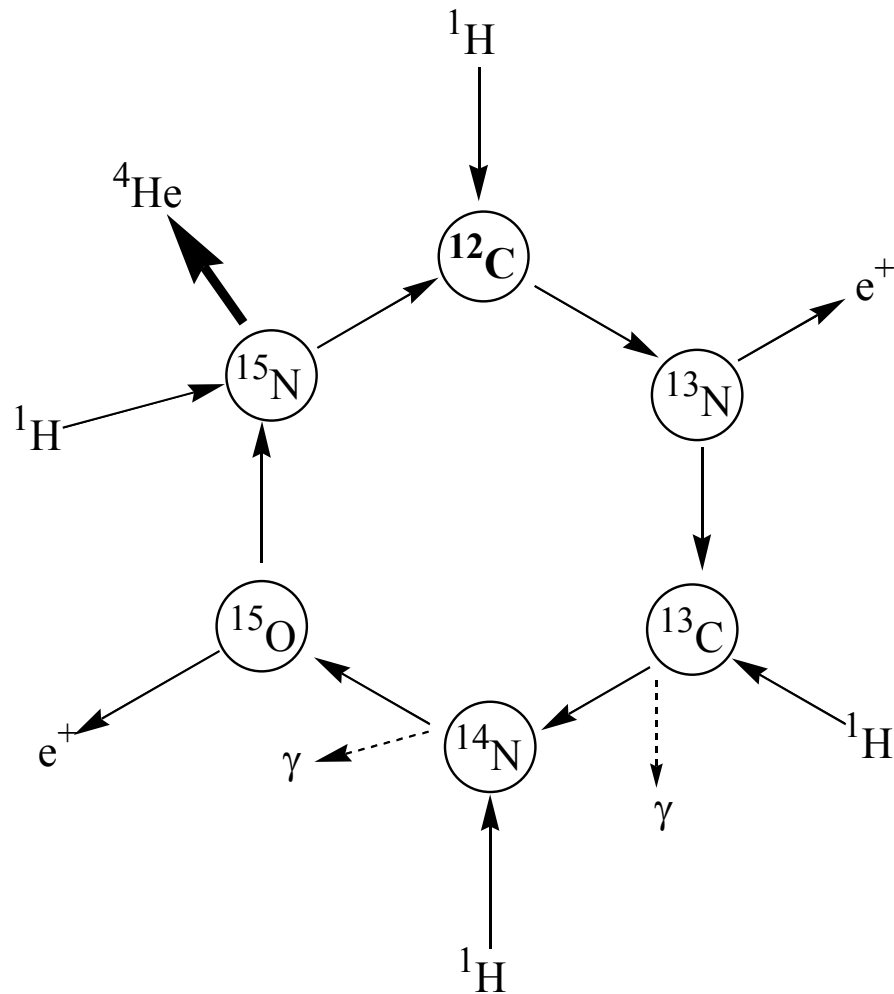
Slunce (teplota =  $2 \cdot 10^6$  K v nitru, energie z PP nebo CNcyklu)  
→ rudý obr

PP cyklus



# Uhlíkový cyklus

CN cyklus



## Syntéza jader ve vesmíru

Slunce → rudý obr → bílý trpaslík



# Syntéza jader ve vesmíru

Těžké hvězdy

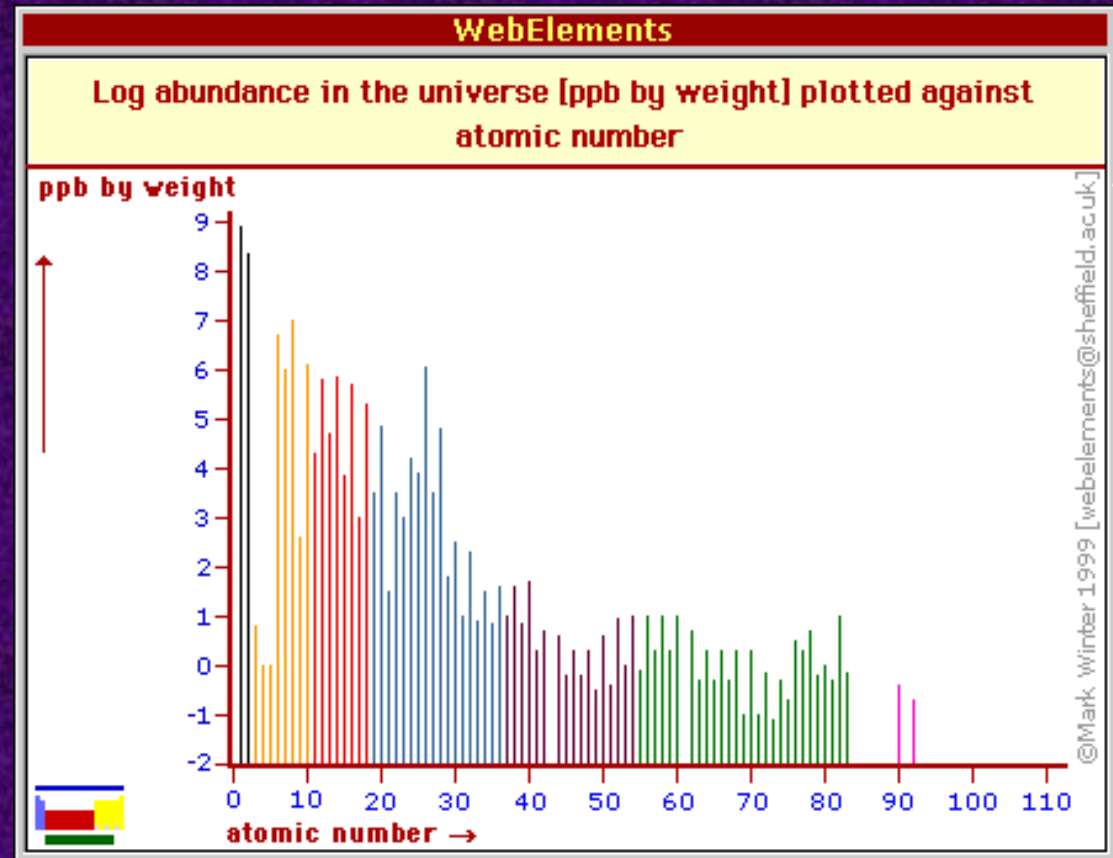
$^{12}\text{C} \rightarrow \text{Ne, Mg}$

$^{16}\text{O} \rightarrow \text{Si, S}$

$\text{Si} \rightarrow ^{58}\text{Fe}$

Výbuch supernovy  
vysoké toky neutronů

$\text{Fe} + \text{n} \rightarrow \text{Au} \rightarrow \text{Pb} \rightarrow \text{U}$



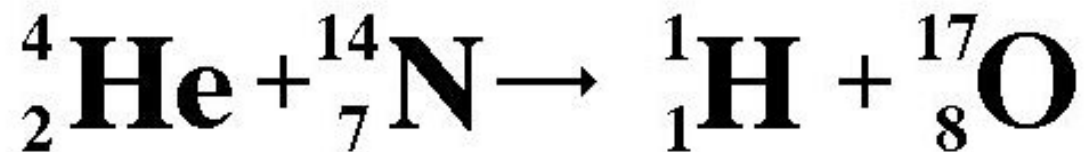


## Termojaderné reakce

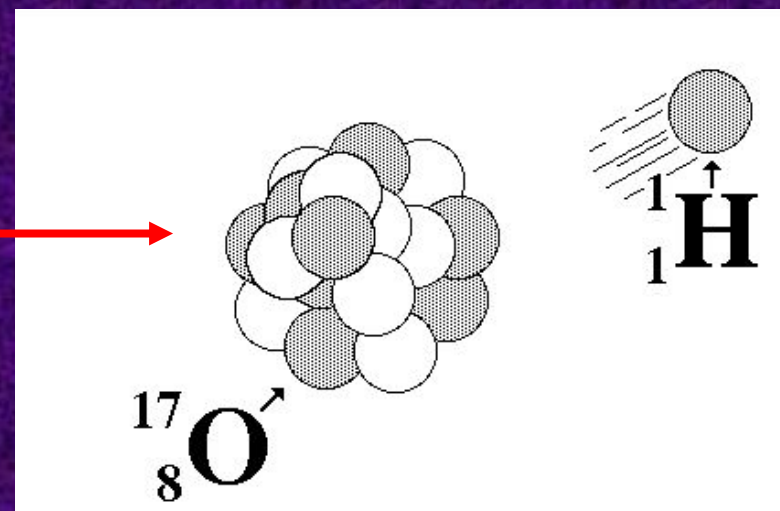
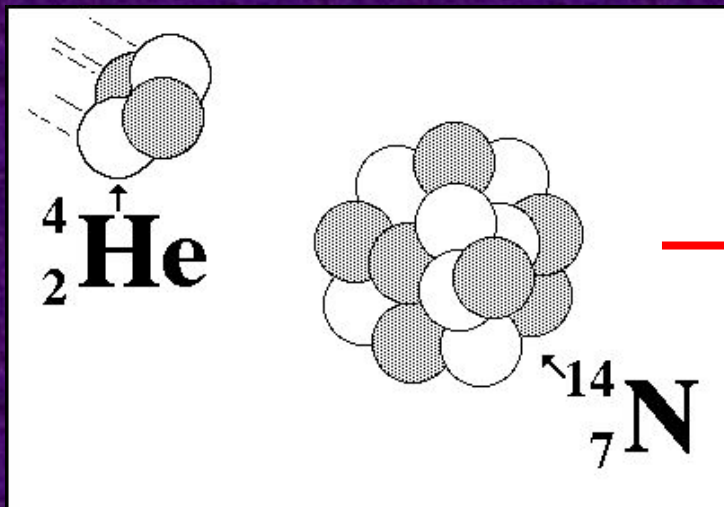


# Transmutace

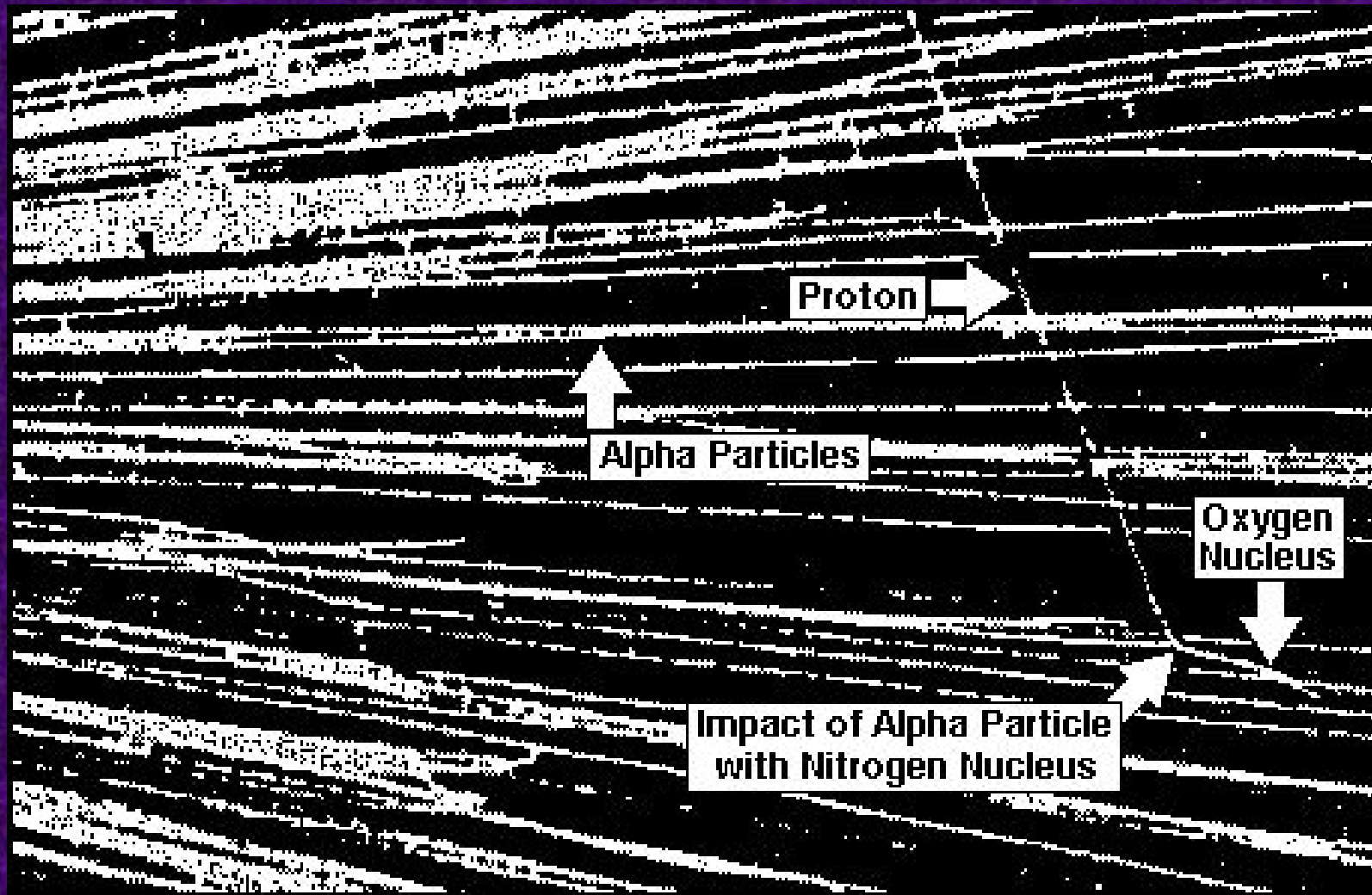
1919, Rutherford, první umělá příprava prvku



ekvivalentní zápis jaderné rovnice  ${}^{14}\text{N}(\alpha, p){}^{17}\text{O}$



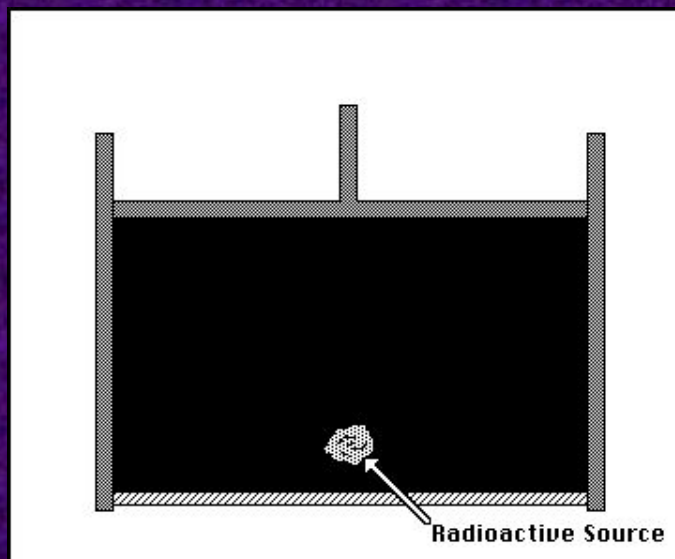
# Transmutace



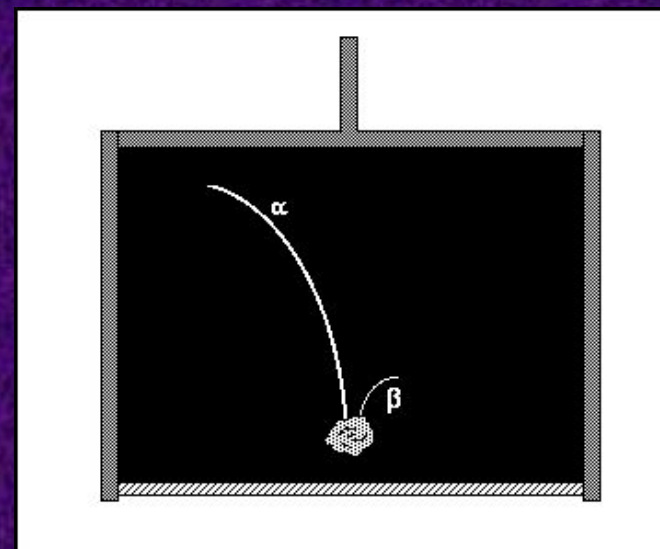
# Wilsonova mlžná komora



Charles Wilson (1869-1959) NP za fyziku 1923



Plyn (vzduch, He, Ar,...)  
a páry vody nebo alkoholu v  
komoře se zářičem, píst pro  
změnu objemu

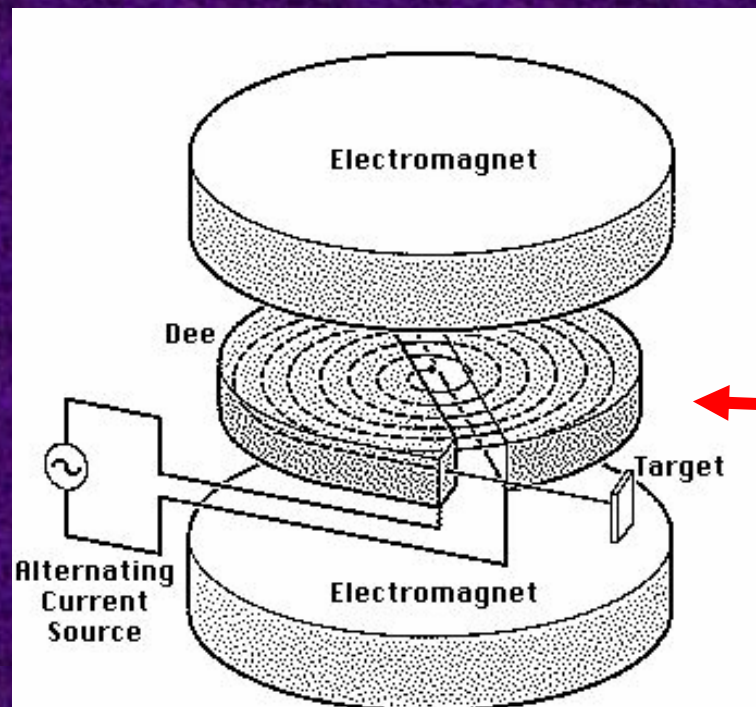


Expanze, ochlazení, vznik  
přesycené páry, částice při  
průletu ionizují okolní atomy,  
kondenzace na ionizovaných<sub>44</sub>  
atomech

1929

## Cyklotron

urychlovač pozitivních iontů ( $H^+$ ,  $D^+$ , ...)  
průchod potenciálovým rozdílem,  
střídavé poz/neg nabíjení D elektrod,  
kruhový pohyb v magnetickém poli,  
energie do 100 MeV



Ernest O. Lawrence  
(1901-1958)  
NP za fyziku 1939

← duté elektrody tvaru D

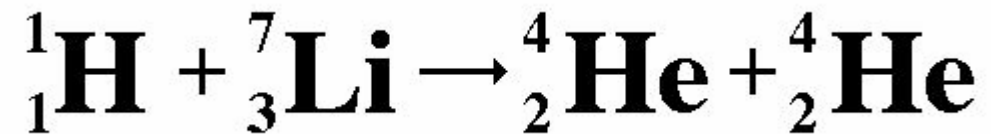
## Štěpení jader

1932

John D. Cockcroft (1897-1967) a Ernest T. S. Walton (1903-1995)

Kaskádový urychlovač, protony 800 keV

První štěpení stabilního jádra urychlenou částicí



1951 společně NP za fyziku

# Transmutace

Cyklotron

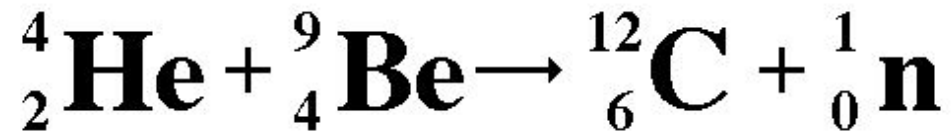


Bombardování neutrony



# Objev neutronu

1932

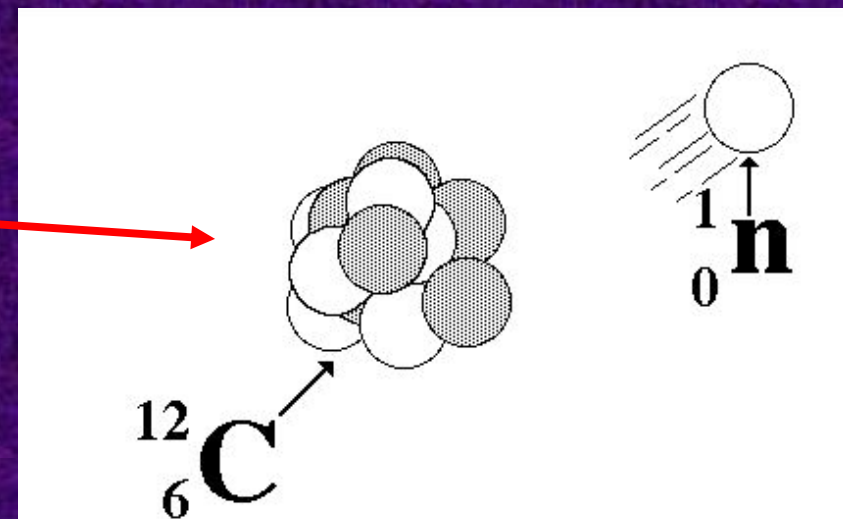
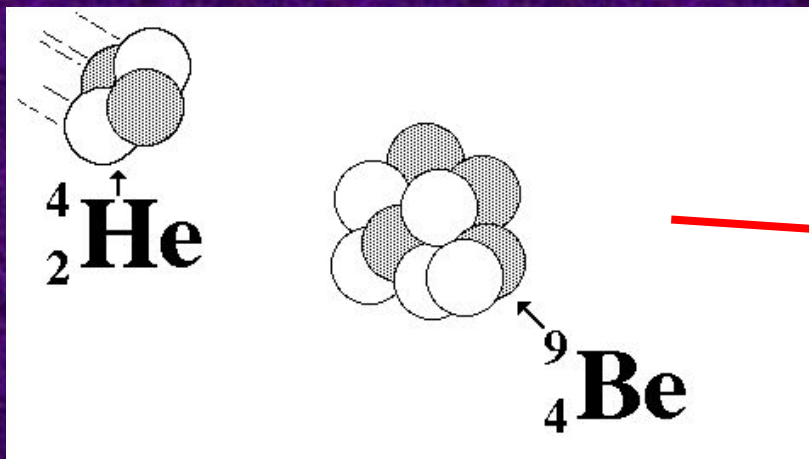


neutron = částice s nulovým nábojem, spin  $\frac{1}{2}$   
 $m = 1.67470 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$



James Chadwick  
(1891-1974)

NP za fyziku 1935





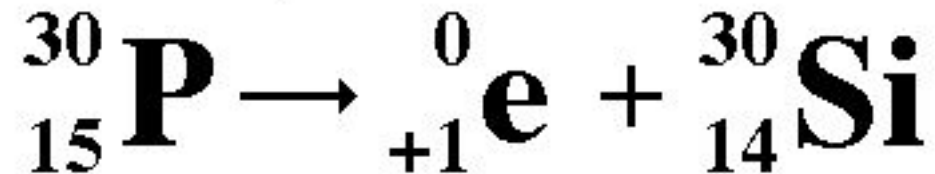
## Umělá radioaktivita

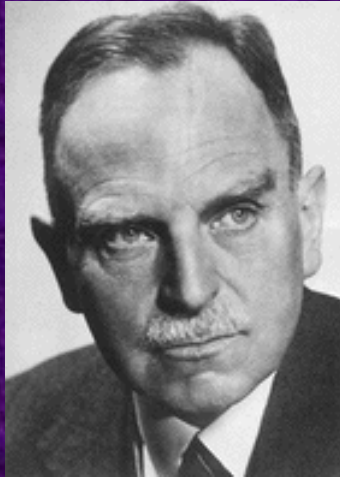
1933

Frederic and Irene Joliot-Curie  
(1900-1958) (1897-1956)



Phosphorus-30 is not stable

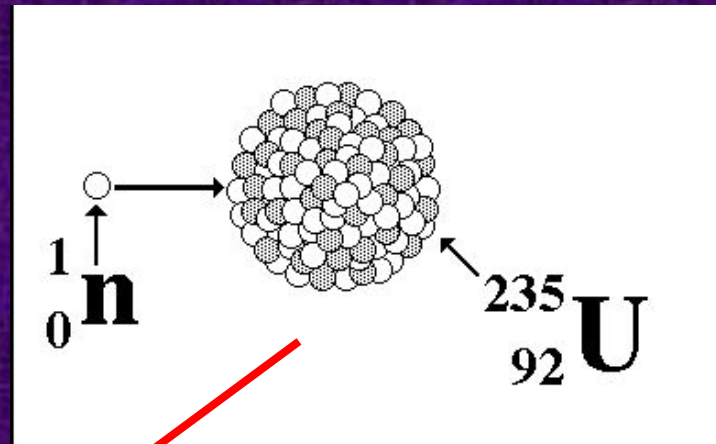




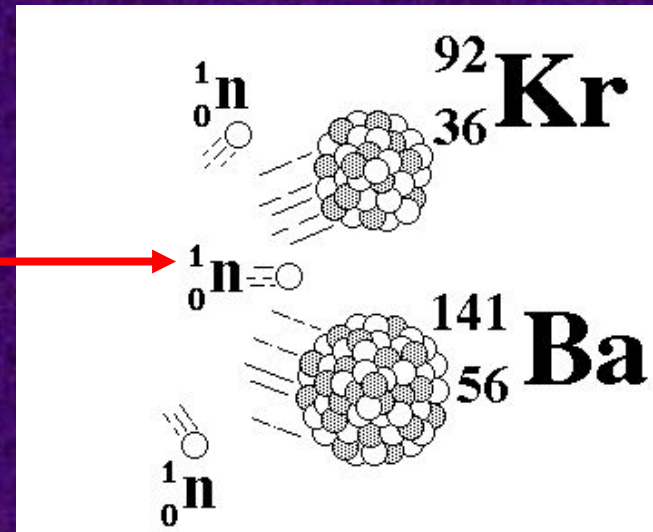
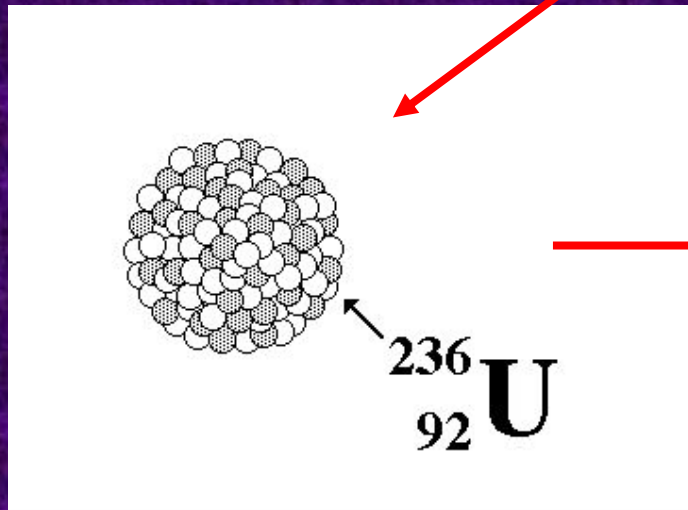
Otto Hahn  
(1879-1968)

NP za fyziku 1944

## Štěpení jader

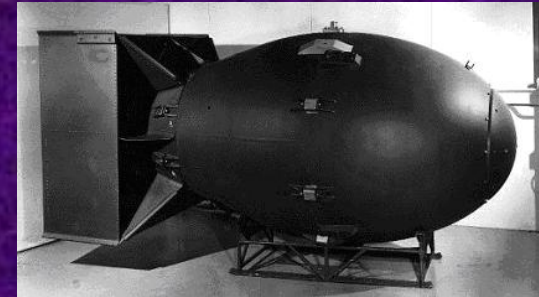
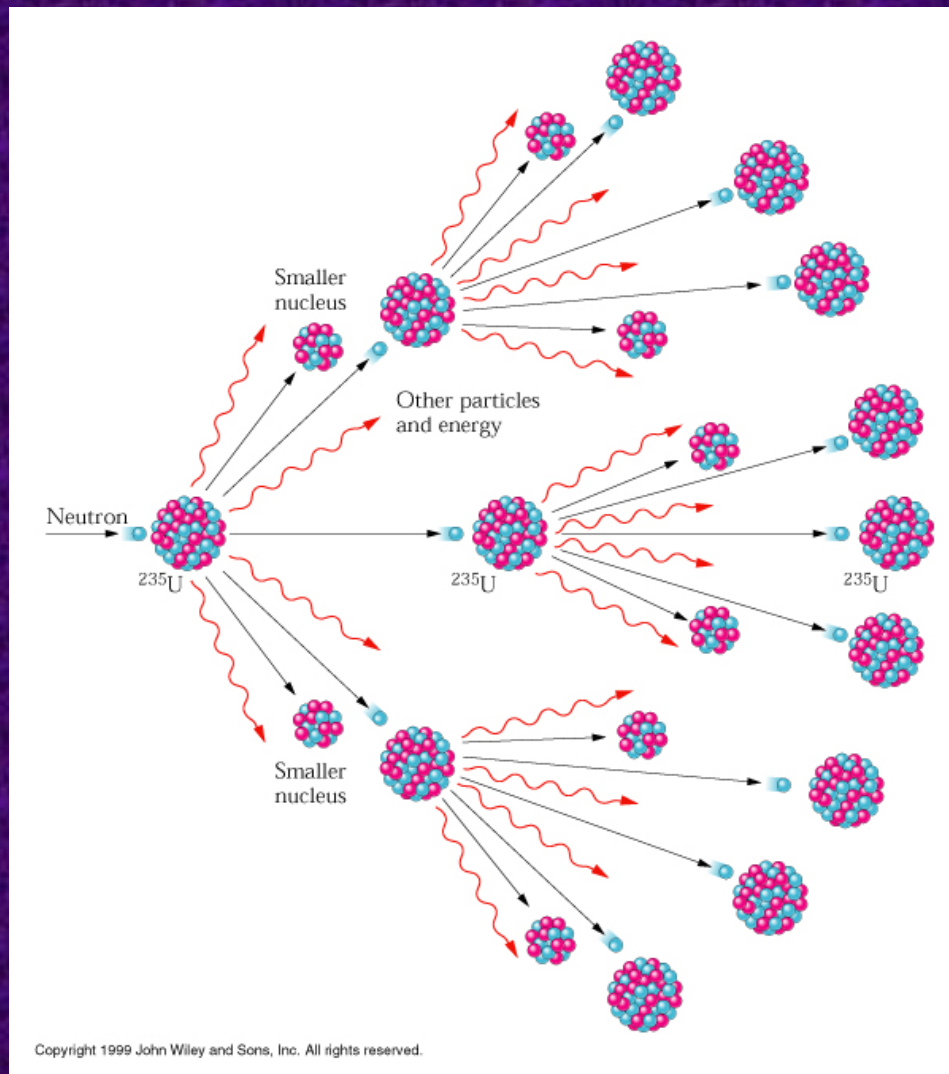


${}^{235}\mathbf{U}$ , 0.71%  
Pomalé neutrony



190 MeV

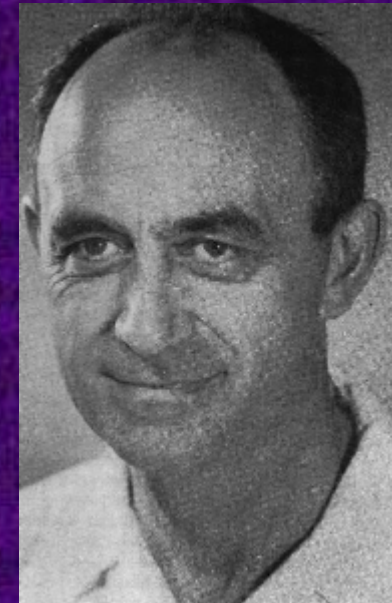
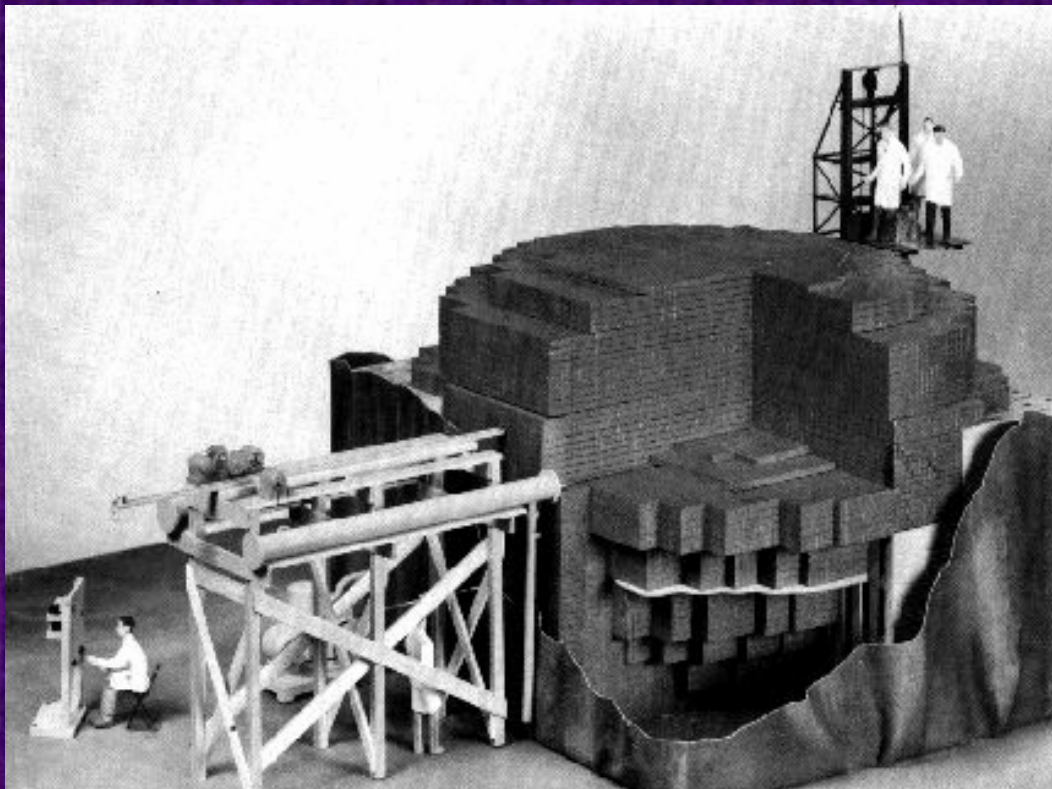
# Řetězová reakce



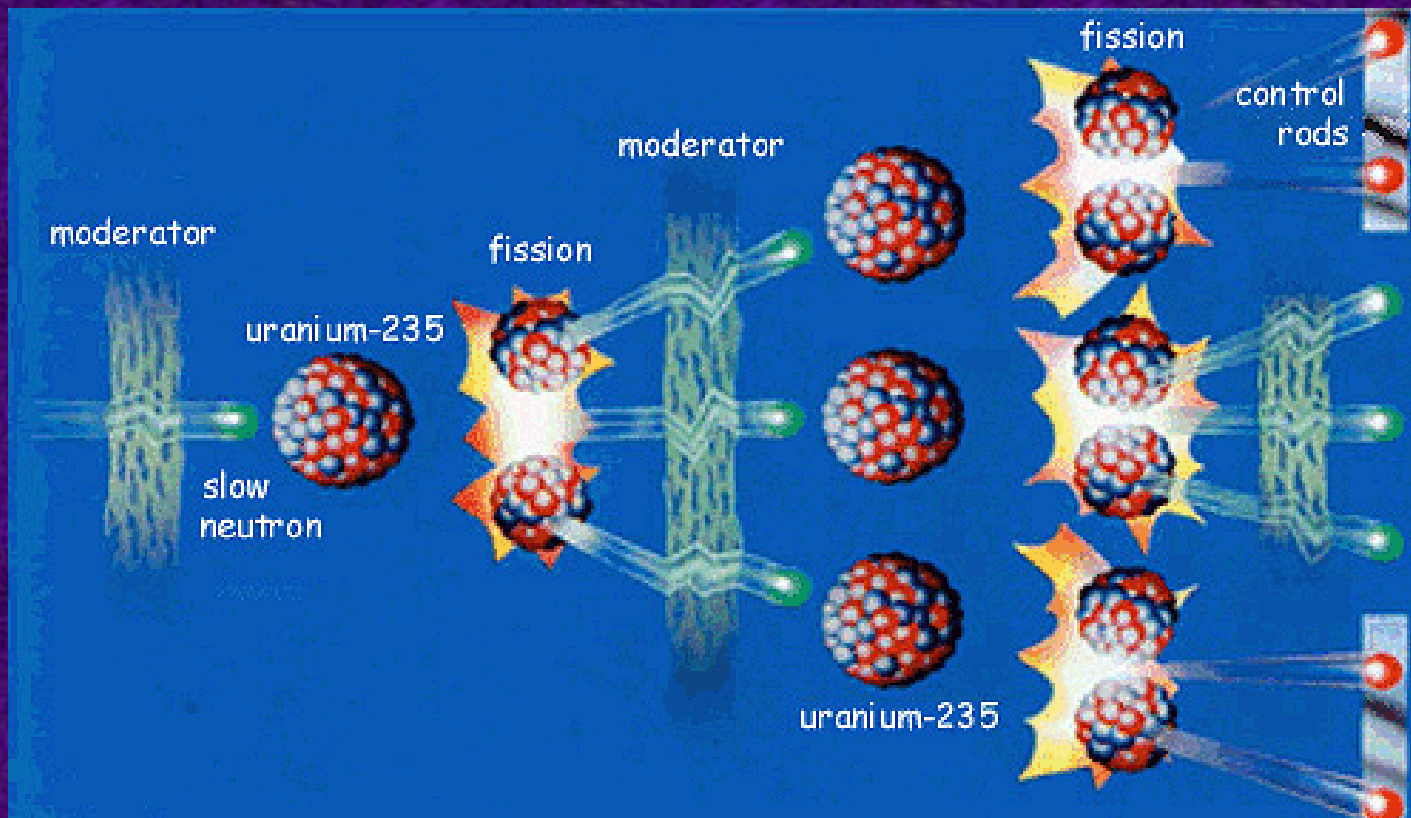
# Jaderný reaktor

1942 Chicago

První řízená štěpná reakce  $^{235}\text{U}$



Enrico Fermi  
(1901-1954)  
NP za fyziku 1938



## Transurany

Do 1940 nejtěžší přírodní prvek  $Z = 92$  (U)

1940 První umělý transuran

bombardování neutrony

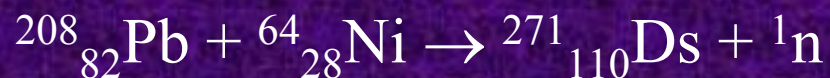


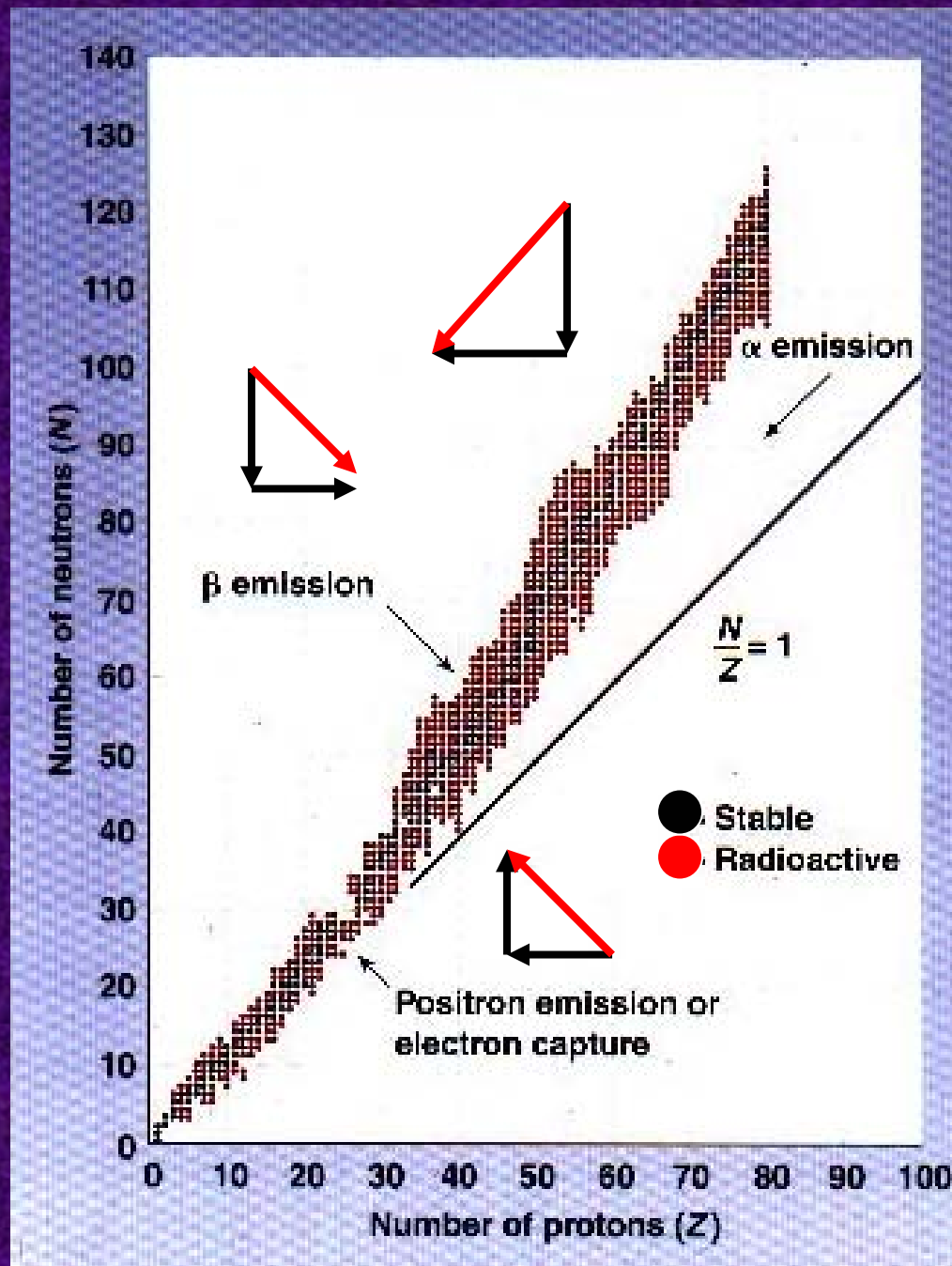
po  $Z = 95$  (Am)

bombardování kladnými ionty

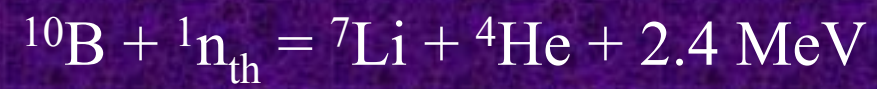
${}^4\text{He}$ ,  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{15}\text{N}$ ,  ${}^{18}\text{O}$ , .....

po  $Z = 114$





# BNCT





# Kinetika radioaktivního rozpadu

$$-dN/dt = k N$$

$$dN/N = -k dt$$

Integrace

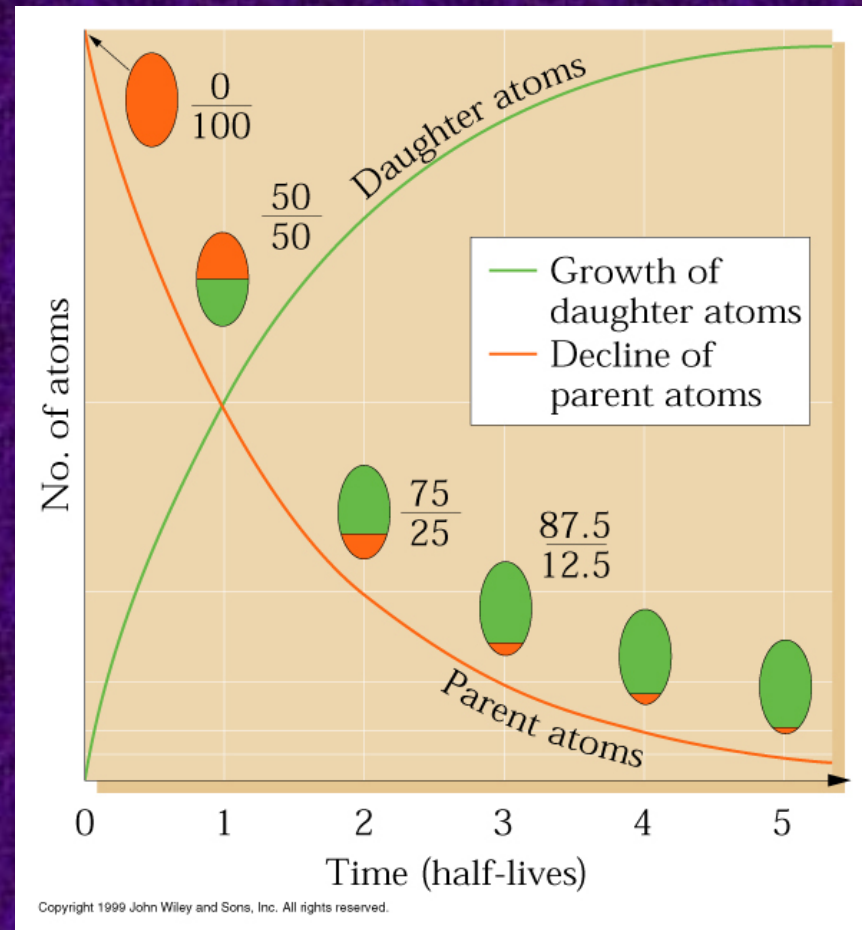
$$t = 0 \quad N = N_0$$

$$\ln(N/N_0) = -k t$$

$$N/N_0 = \exp(-k t)$$

$$N = N_0 \exp(-k t)$$

N



t

## Poločas rozpadu, $t_{1/2}$

$$t = t_{1/2} \quad N = N_0/2$$

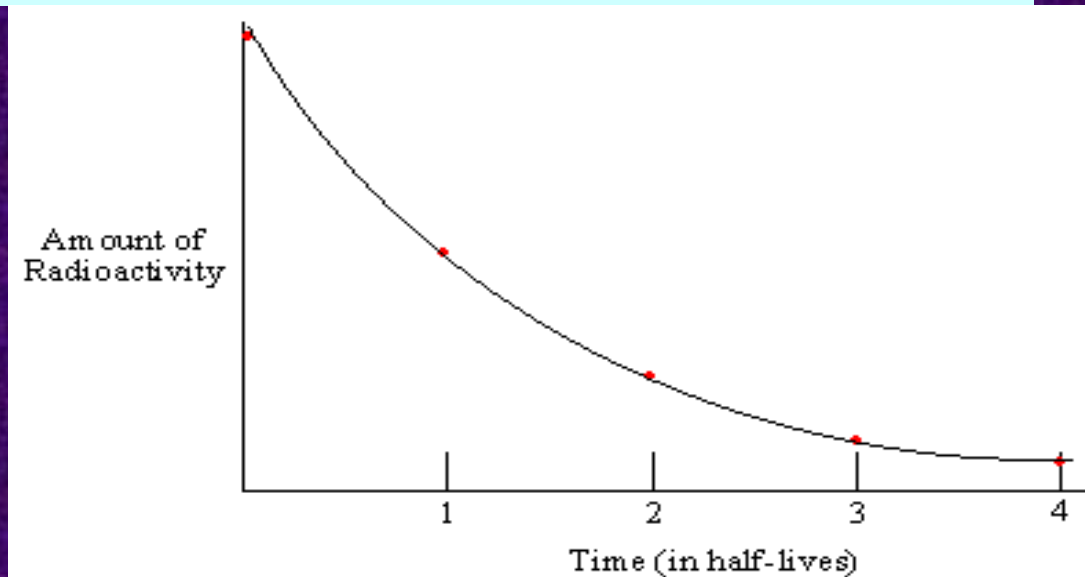
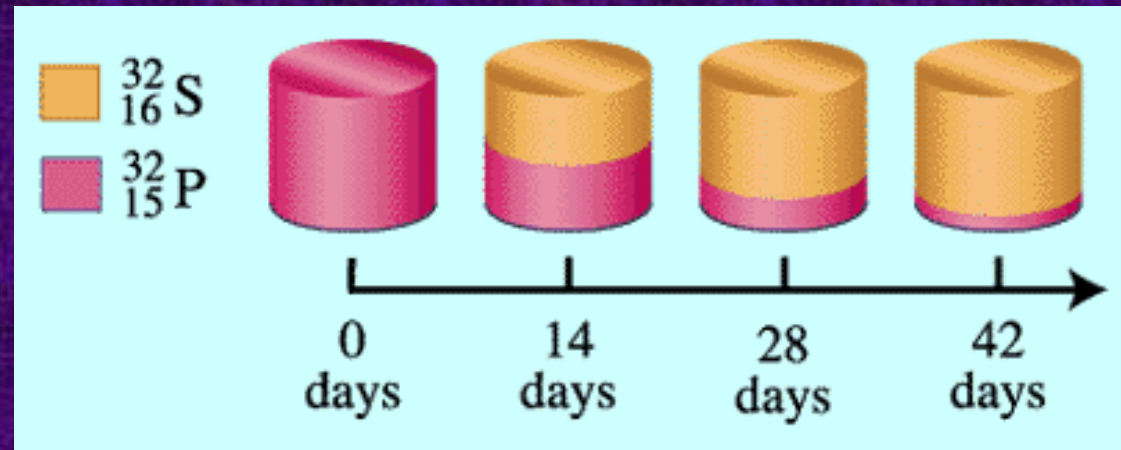
$$\ln(N/N_0) = -k t$$

$$\ln(1/2) = -k t_{1/2}$$

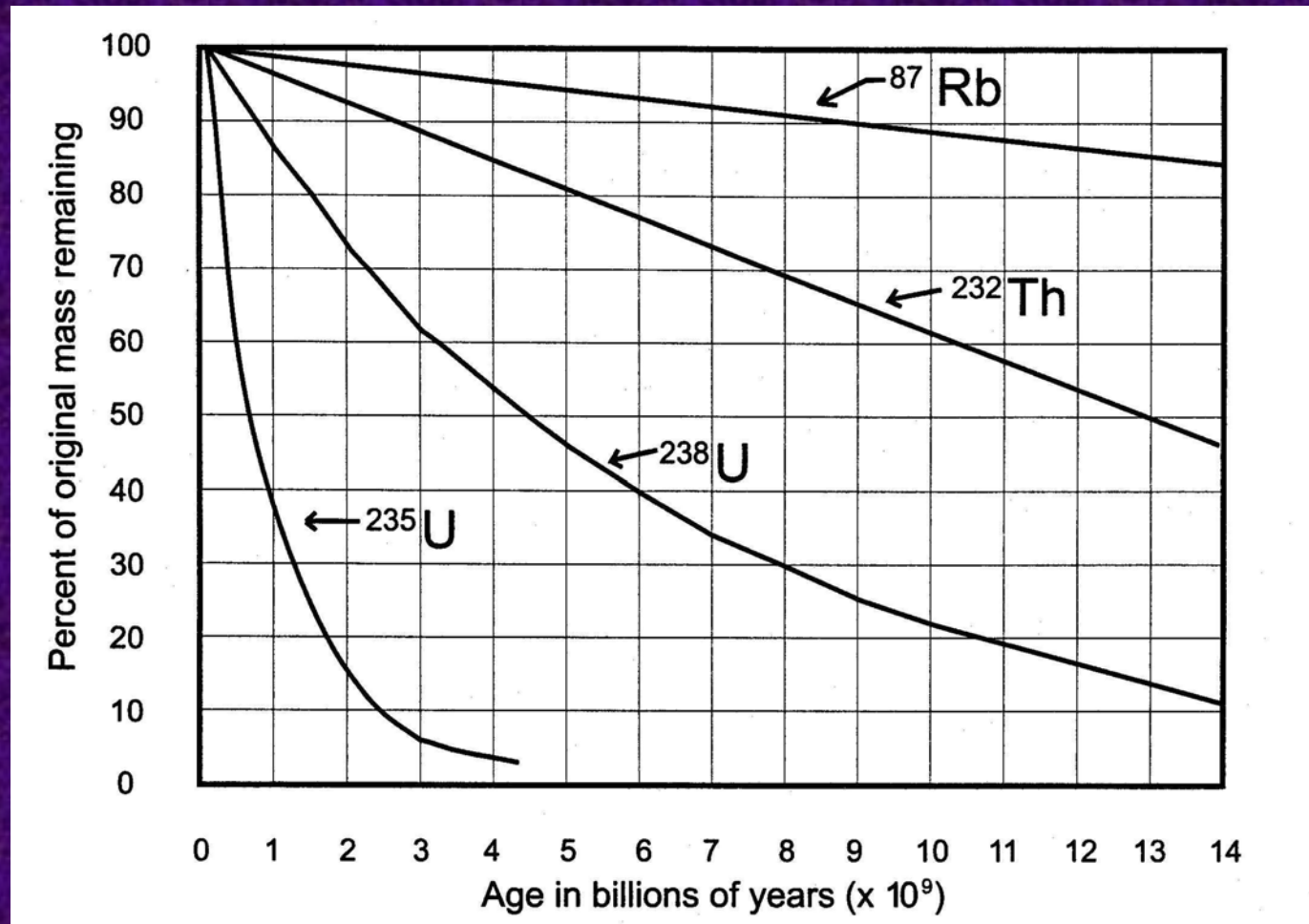
$$t_{1/2} = \ln(2) / k$$

$$k = \ln(2) / t_{1/2}$$

$$\ln(N/N_0) = -t \ln(2) / t_{1/2}$$



# Poločas rozpadu



## Datování pomocí $^{14}\text{C}$

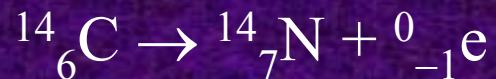


Willard Libby  
(1908-1980)  
NP za chemii 1960

$^{14}\text{C}$  vzniká kontinuálně vysoko v atmosféře



Rozpadá se beta rozpadem s poločasem  $t_{1/2} = 5730$  let



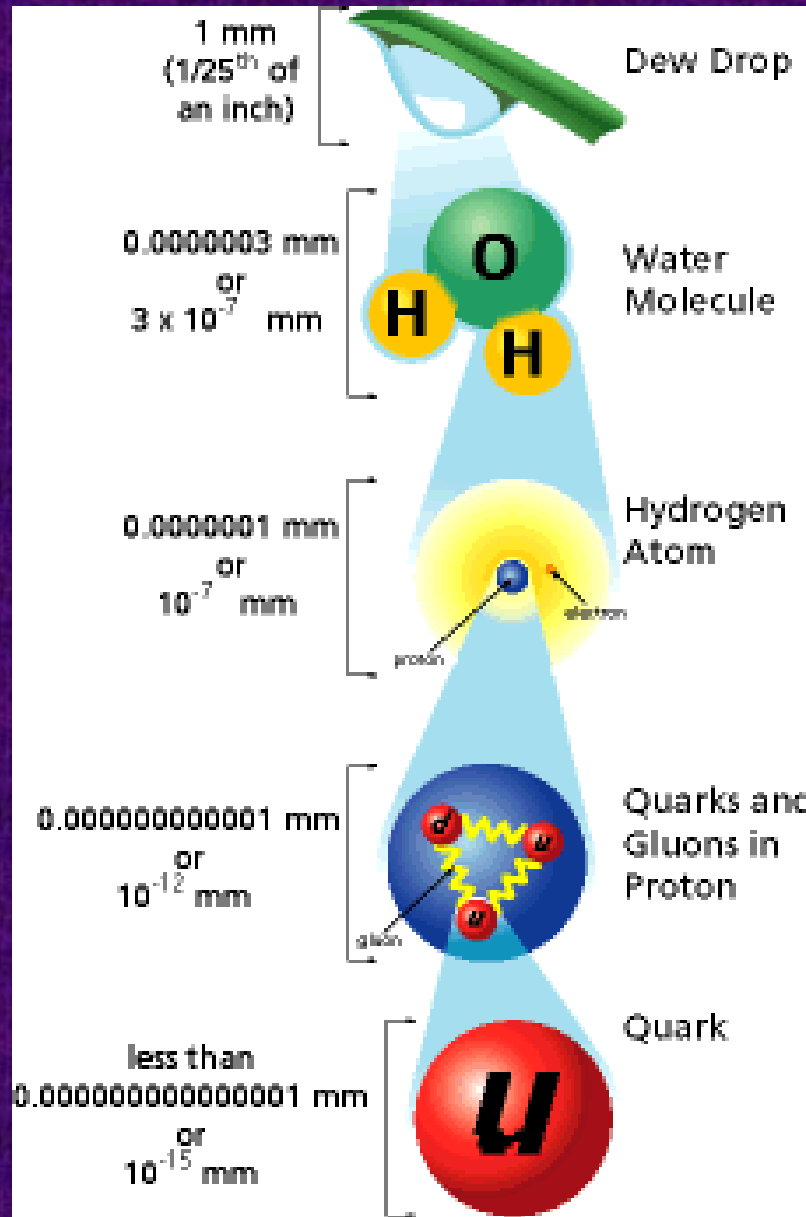
V atmosféře a živých rostlinách ( $\text{CO}_2$ , fotosyntéza) se ustaví rovnovážná koncentrace  $^{14}\text{C}$ . Po smrti organismu koncentrace  $^{14}\text{C}$  klesá.

$^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  se určí hmotnostní spektrometrií

$$\ln(\text{N}/\text{N}_0) = -k t$$

$$k = \ln(2) / t_{1/2}$$

$$\ln(\text{N}/\text{N}_0) = -t \ln(2) / t_{1/2}$$



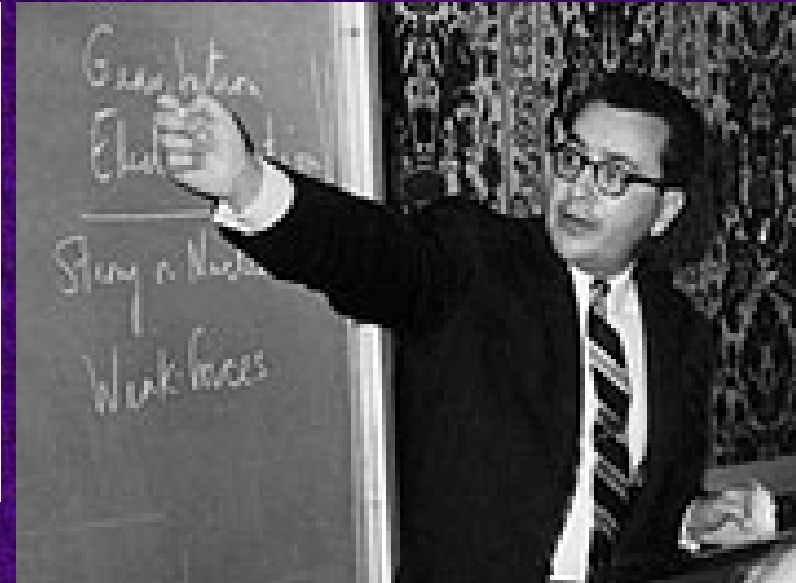
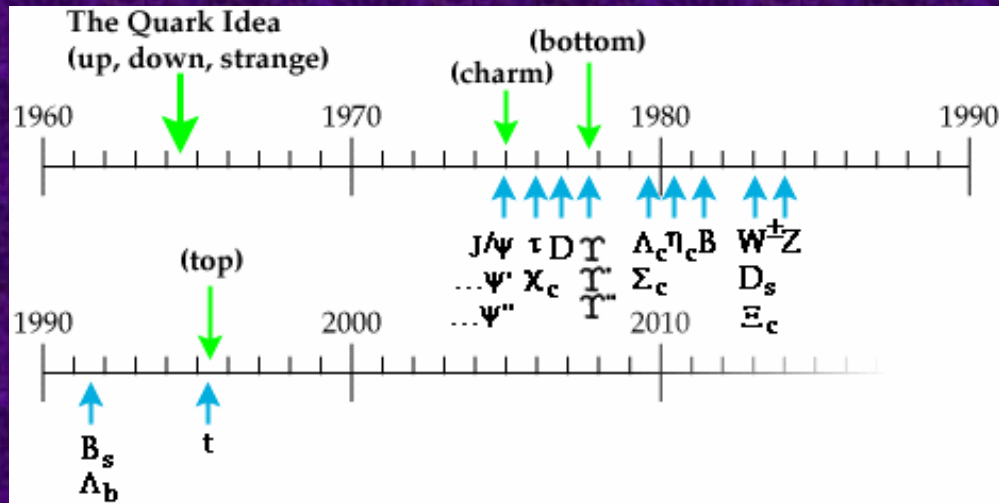
3 Å

$$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$$

$10^{-15} \text{ m}$

$10^{-18} \text{ m}$

# Elementární částice



Zoologická zahrada částic

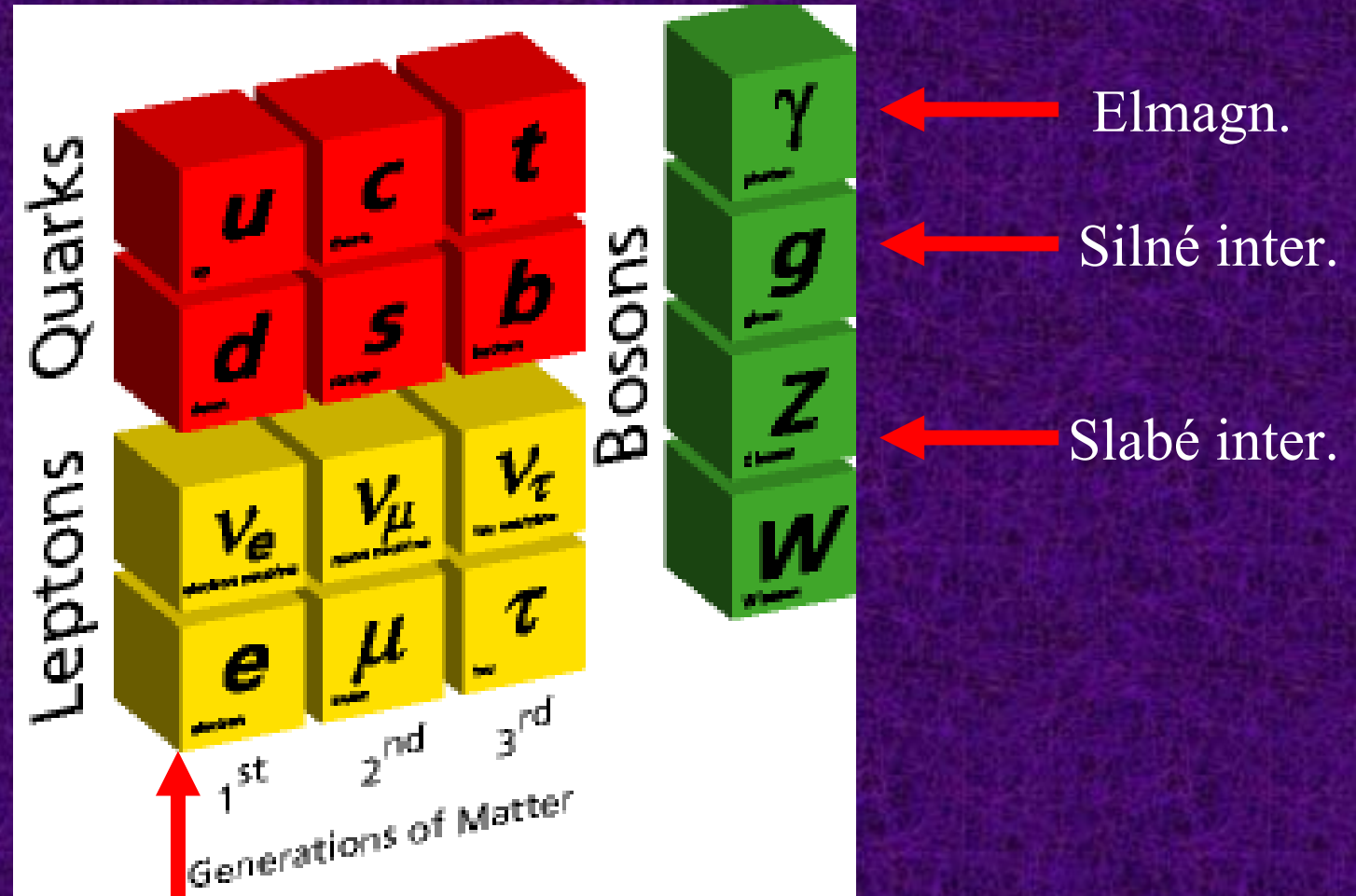
Quarky

- Spin
- Zlomkový náboj

Murray Gell-Mann  
(1929 -)  
NP za fyziku 1969

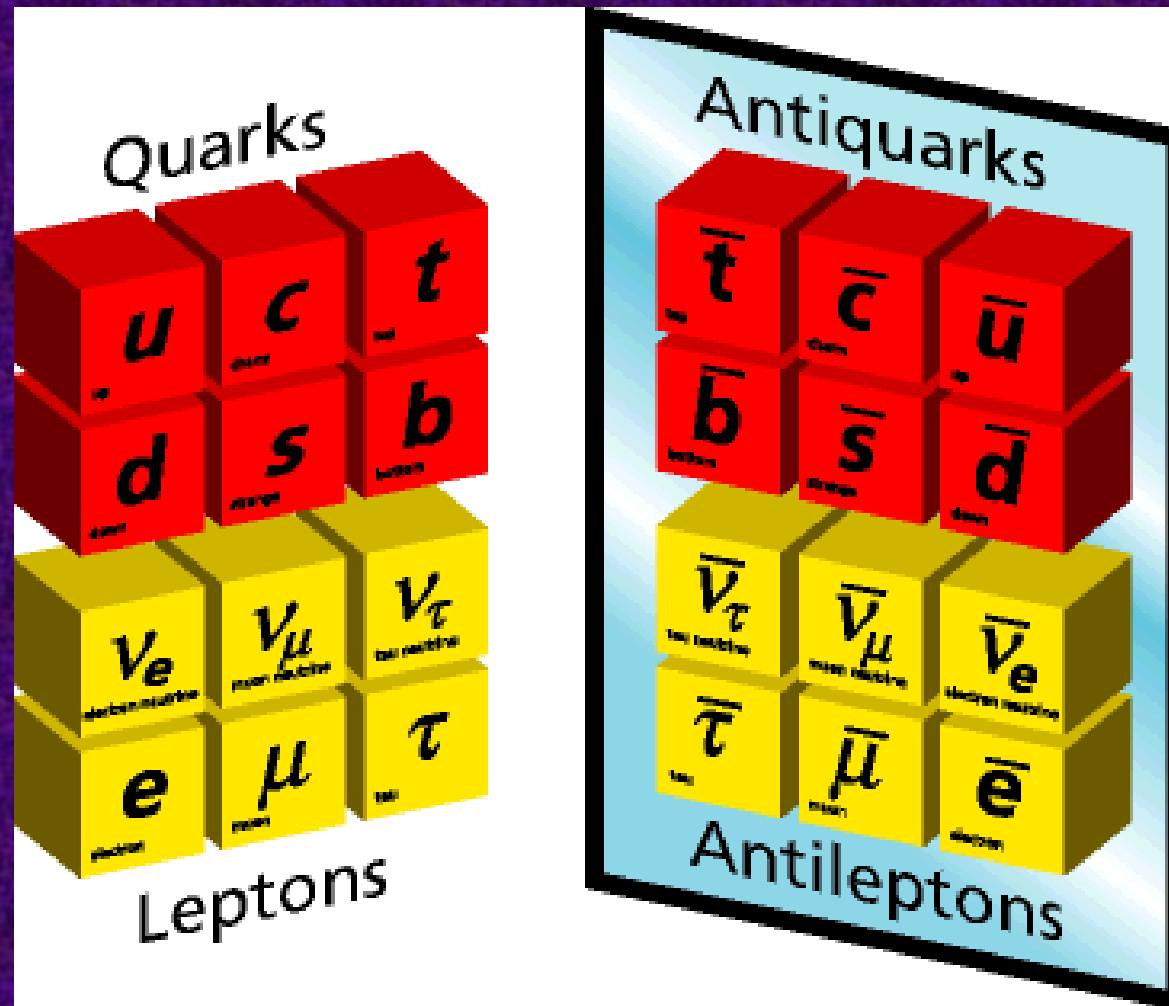
# Elementární částice – Standardní Model

Astrofyzika a  
částicová  
fyzika



Chemická hmota

# Antičástice





# Leptony

lepton	značka	el. náboj	m [amu]
elektron	$e^-$	-1	$5.5 \cdot 10^{-4}$
elektronické neutrino	$\nu_e$	0	
mion	$\mu$	-1	0.1144
mionické neutrino	$\nu_\mu$	0	
tauon	$\tau$	-1	1.915
tauonické neutrino	$\nu_\tau$	0	

# Leptony

Existují volné, nevážou se

Náboj číslo 0 nebo  $-1$ , kvantování el. náboje

Levoruké a s opačnou helicitou  
(neexistují pravoruká neutrina)

Antileptony mají opačný náboj

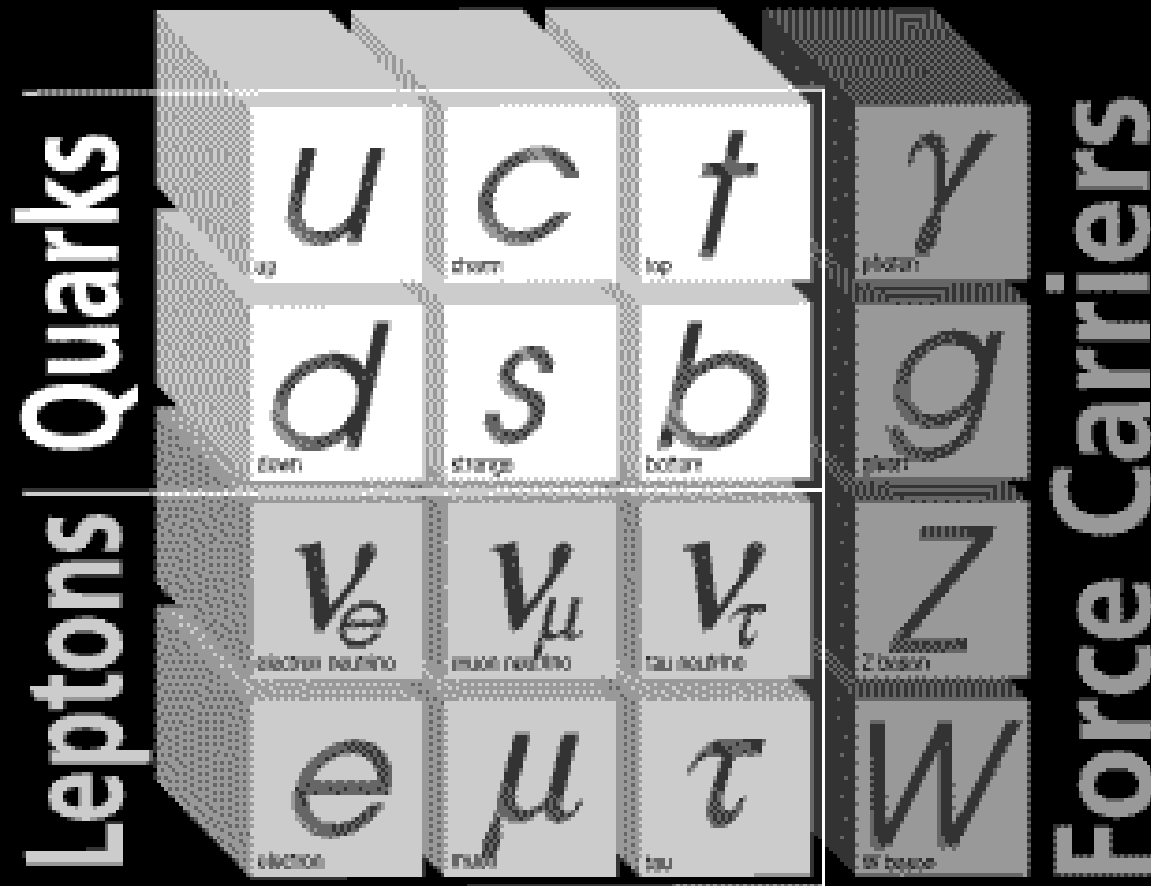
Leptonové číslo  $L$

$L = 1$  pro leptony

$L = -1$  pro antileptony

$L = 0$  pro ostatní

# ELEMENTARY PARTICLES



|      ||      |||  
 Three Generations of Matter

# Quarky

Quark	značka	el. náboj
<b>down</b>	<b>d</b>	<b>- 1/3</b>
<b>up</b>	<b>u</b>	<b>+2/3</b>
<b>strange</b>	<b>s</b>	<b>- 1/3</b>
<b>charm</b>	<b>c</b>	<b>+2/3</b>
<b>bottom</b>	<b>b</b>	<b>- 1/3</b>
<b>top</b>	<b>t</b>	<b>+2/3</b>

## Quarky

Quarky nejsou známy volné

Existují jen ve vázaných stavech – Hadrony (Baryony a Mezony)

Nábojové číslo  $+2/3$  a  $-1/3$

Levoruké a s opačnou helicitou

Antiquarky opačný náboj

Baryon = 3 quarky (např. proton se skládá z uud)

Antibaryon = 3 antiquarky

Mezon = 1 quark + 1 antiquark

Baryonové číslo

$B = 1$  pro baryony

$B = -1$  pro antibaryony

$B = 0$  pro ostatní

# Quarky

Vazebné síly mezi quarky:

- Zprostředkovány gluony
- Slabé na malou vzdálenost, při oddalování rostou  
(Proto není možné quarky zachytit volně)

# Hadrony

Hadron	značka	el. náboj	složení
pozitivní pion	$\Pi^+$	+1	ud
pozitivní kaon	$K^+$	+1	us
proton	p	+1	uud
neutron	n	0	udd
lambda	$\Lambda$	0	uds

# Bosony

Zprostředkovatelé interakcí

Boson	značka	el. náboj	interakce
foton	$\gamma$	0	elektromagnetická
gluon	g	0	silná
W-boson	$W^+$	+1	slabá
	$W^-$	-1	
Z-boson	Z	0	slabá



## Zákon zachování B a L čísla

Součet B a L před reakcí a po reakci musí být stejný

např.

