

# 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  
(objev izotopů)

# 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, ostatní uměle připravené

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  $Z \sim N$

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

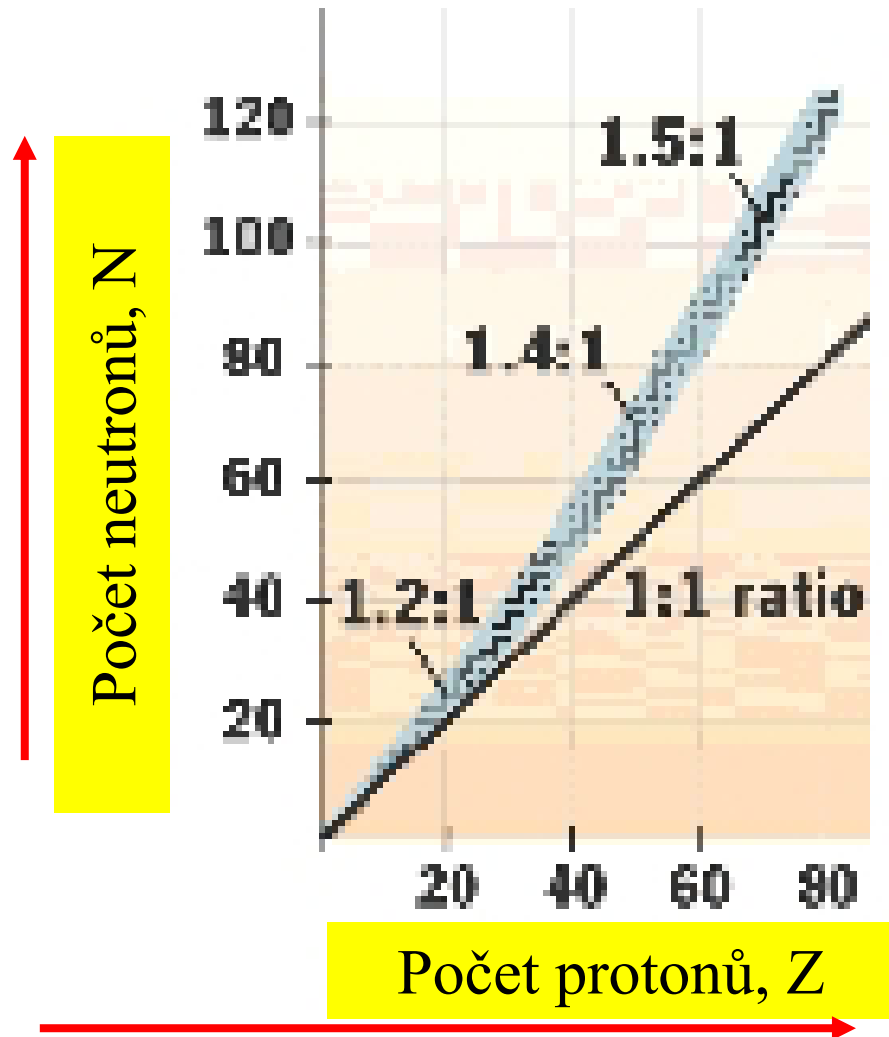
${}^2\text{H}$ ,  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^{10}\text{B}$ ,  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{14}\text{N}$ ,  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{20}\text{Ne}$ ,  ${}^{24}\text{Mg}$ ,  ${}^{28}\text{Si}$ ,  ${}^{32}\text{S}$ ,  ${}^{36}\text{Ar}$  a  ${}^{40}\text{Ca}$   
mají stejný počet p a n

Všechny ostatní nuklidy mají **více** n než p  $N > Z$

**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



# 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, Z	Počet Neutronů, N	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 ( $^{19}\text{F}$ ,  $^{23}\text{Na}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{31}\text{P}$ ).

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

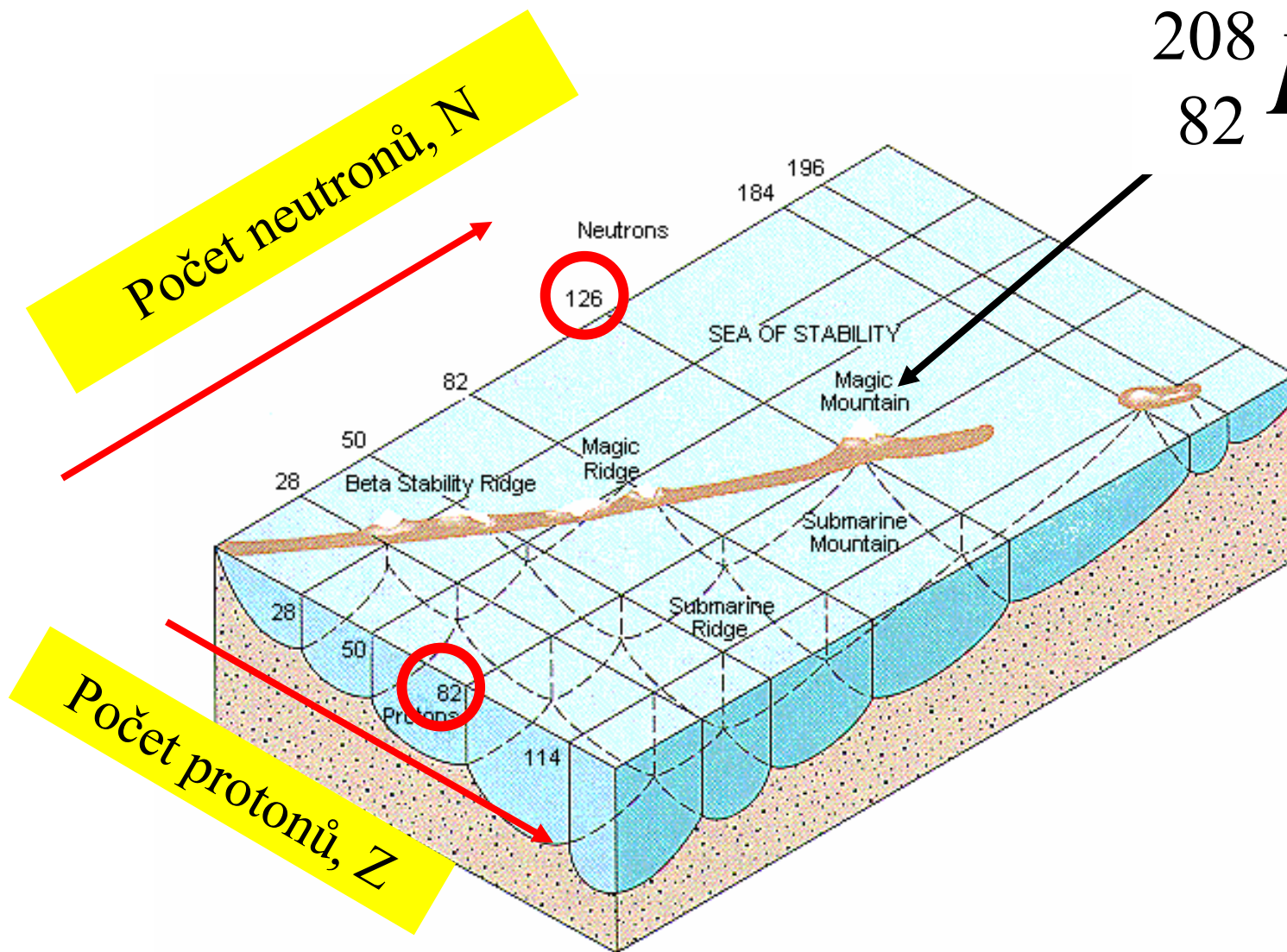
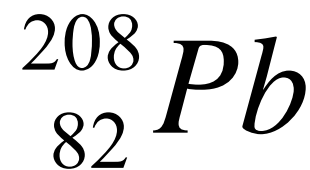
# Magická čísla

**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  $n$

# Ostrov stability





# 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

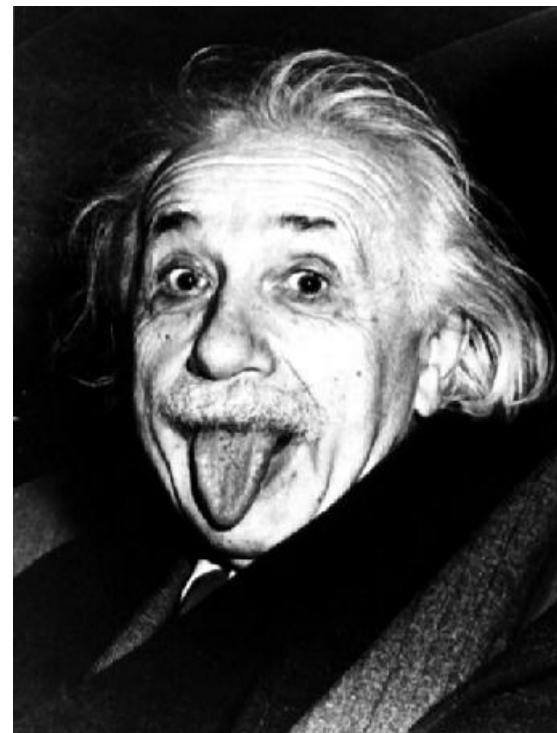
**Hmotnost jádra je vždy menší než součet hmotností nukleonů**

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

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

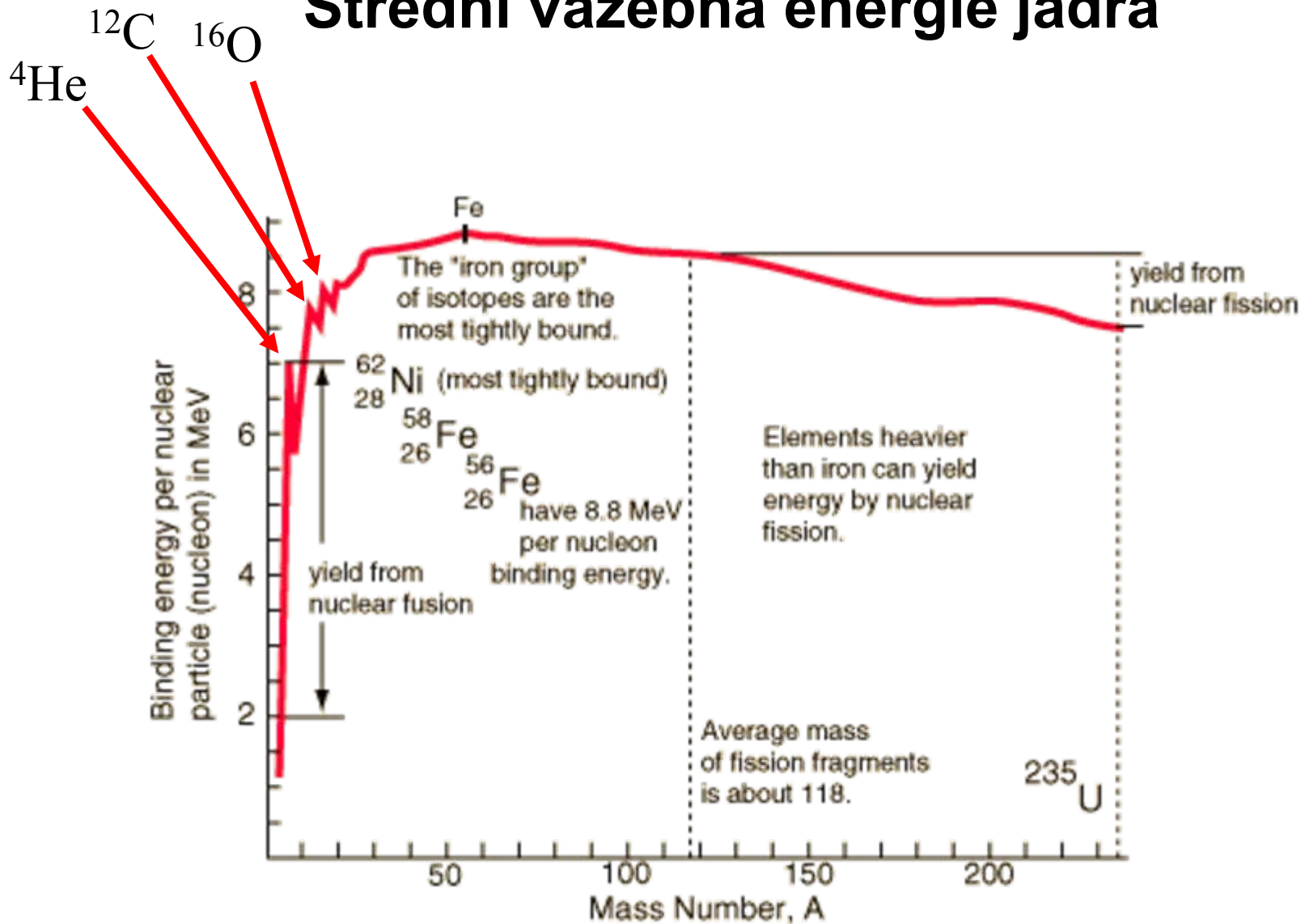
# Vazebná energie jádra, $E_v$

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

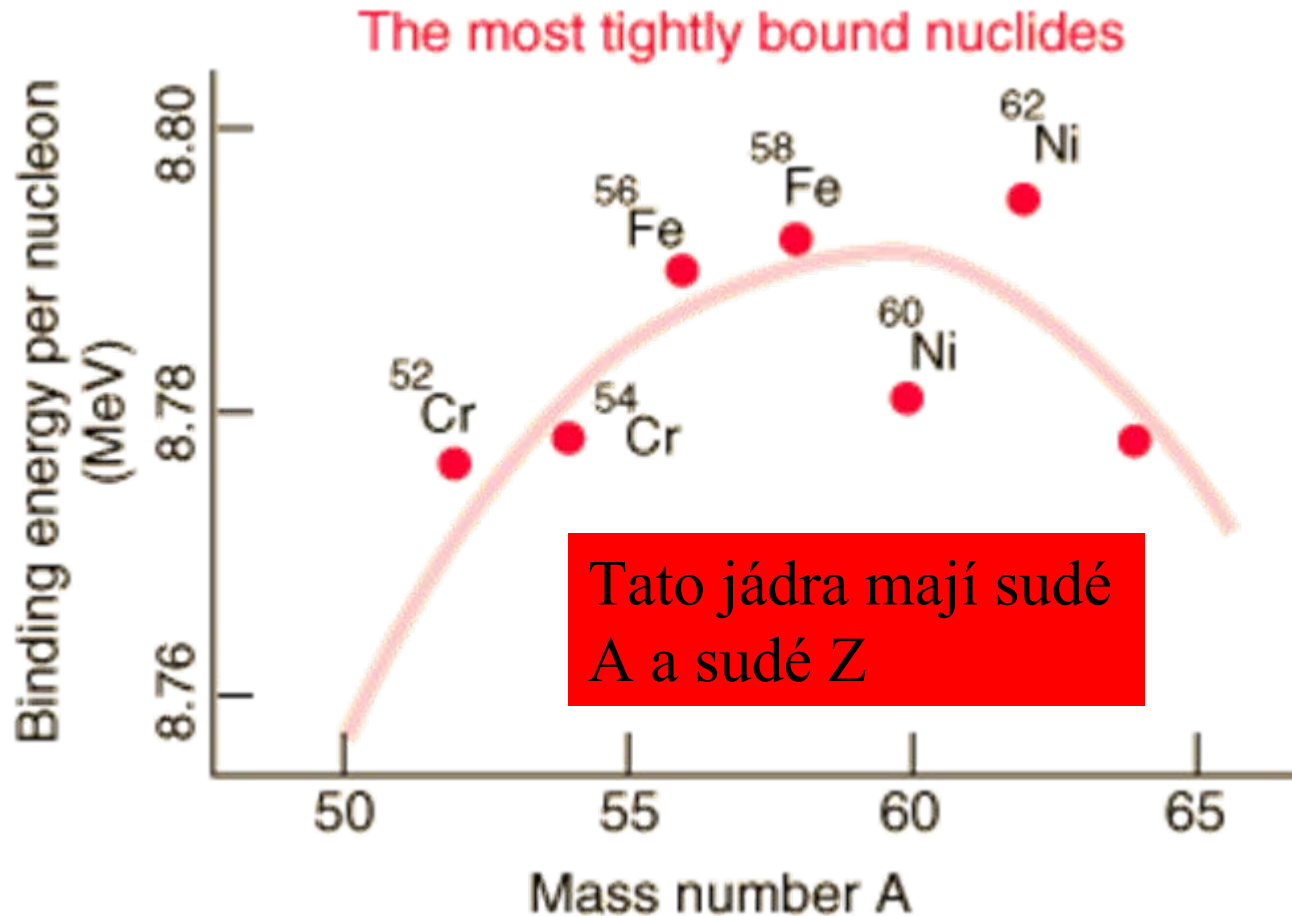
# Střední vazebná energie jádra, $E_v(\text{st})$

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	

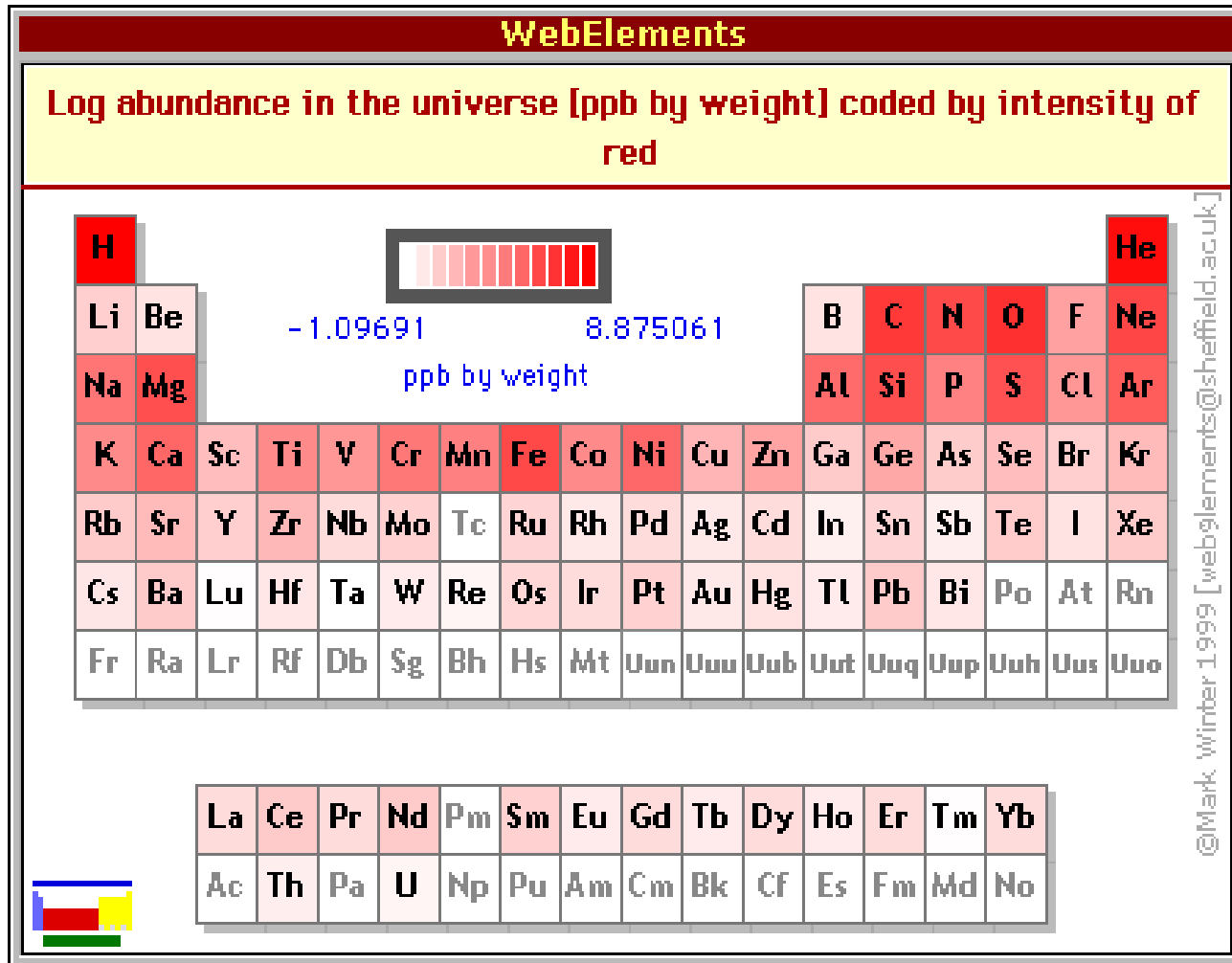
# Střední vazebná energie jádra



# 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

$$1 \text{ eV (molekula)}^{-1} = 96.485 \text{ kJ mol}^{-1}$$

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.

$$E = m c^2$$

# Objev radioaktivity



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

# 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

Radioaktivita

1 Bq (becquerel) = 1 rozpad za 1 s

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

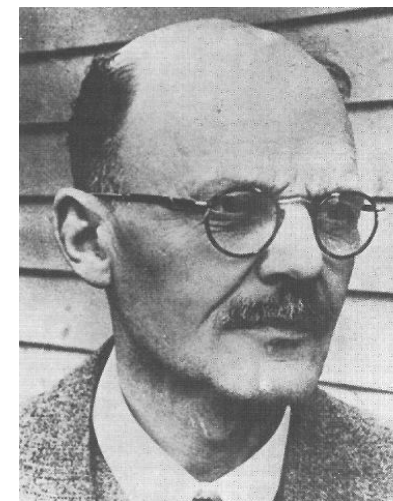
Radiační dávka 1 Gy (gray)

= absorpce 1 J v 1 kg

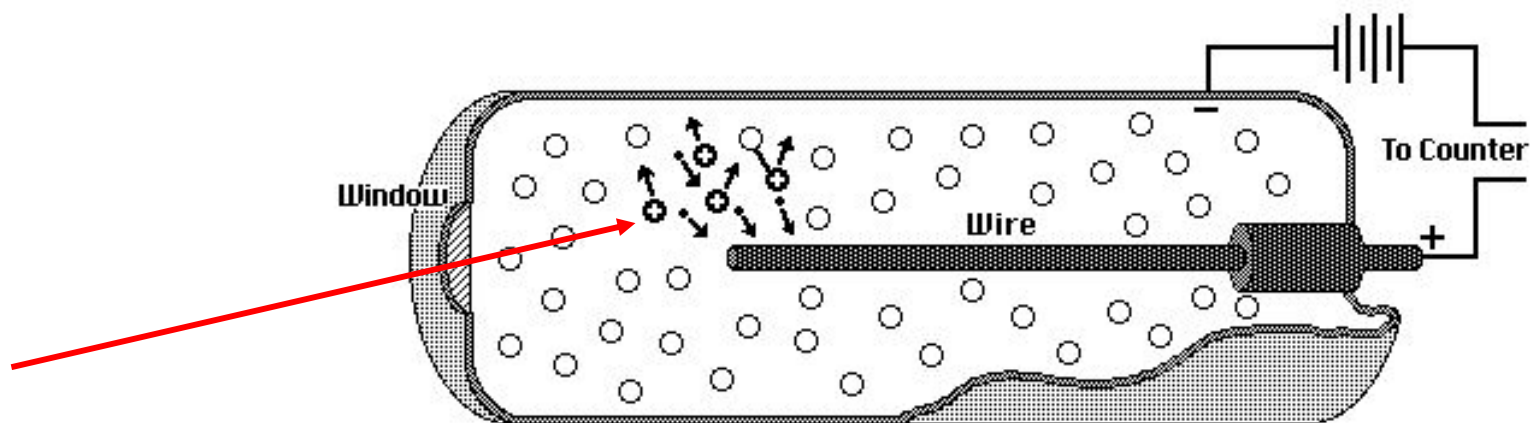
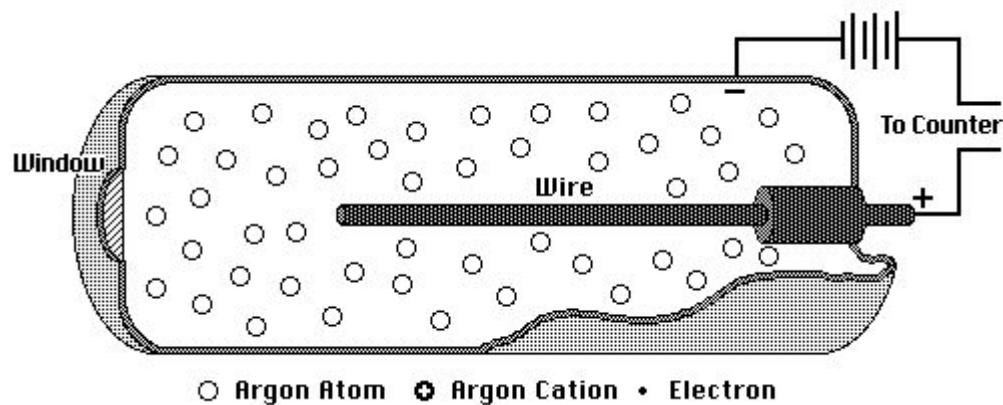
1 Gy = 100 rad



# Geigerův čítač



Hans Geiger  
(1882-1945)



# Jaderné reakce

Rutherford – odklon radioaktivního záření v elektrickém a magnetickém poli

Alfa = pozitivně nabitě částice

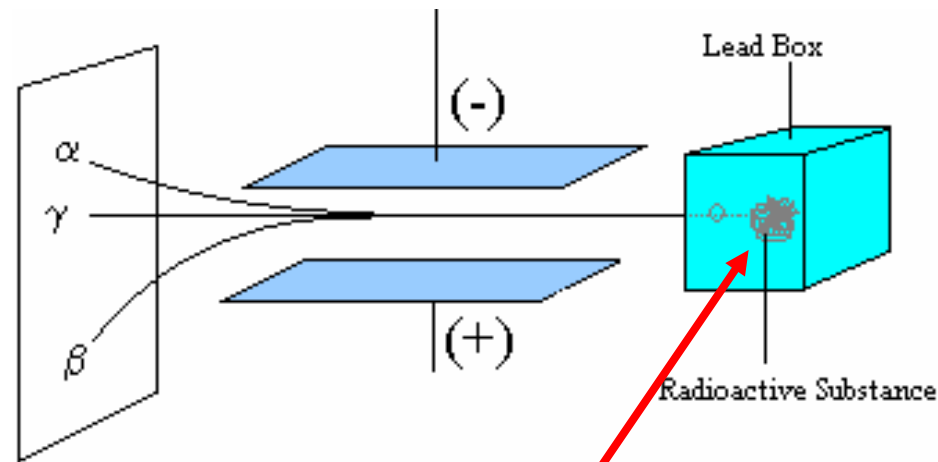
Beta = negativně nabitě částice

Gama = neutrální částice

Tvorba nového nuklidu

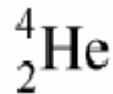
Posuvové zákony – změny v Z a N

Posun v periodické tabulce



Radioaktivní látka

# Emise alfa částice



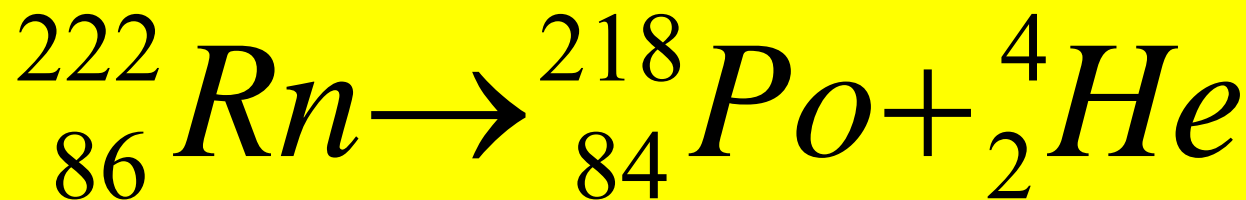
U těžkých jader

Alfa částice pouští jádro rychlostí 10% c

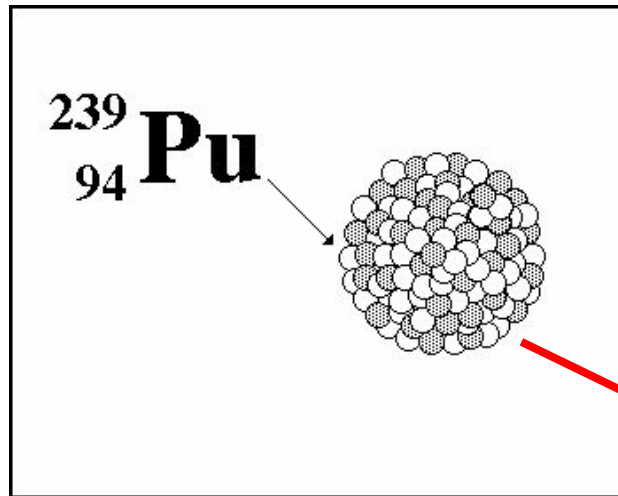
Velmi malá penetrace, několik cm ve vzduchu, zastaví je list papíru

Velmi škodlivé pro buňky

Inhalace



# Alfa emise

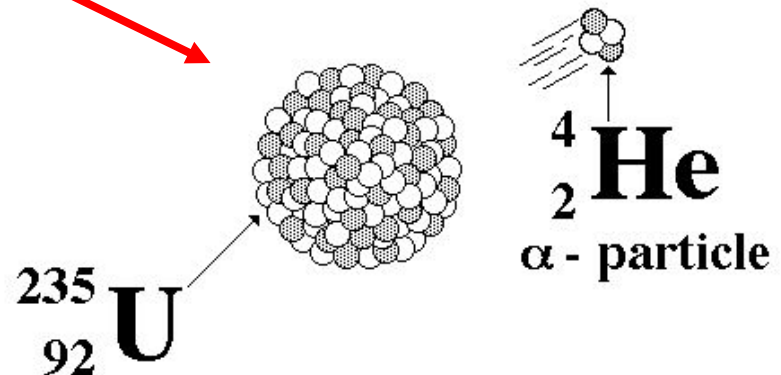


Posun v periodické tabulce o dva prvky  
doleva

$$A - 4$$

$$Z - 2 \quad \text{N}_2$$

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



# Alfa emise

Radium-226

Curium-240

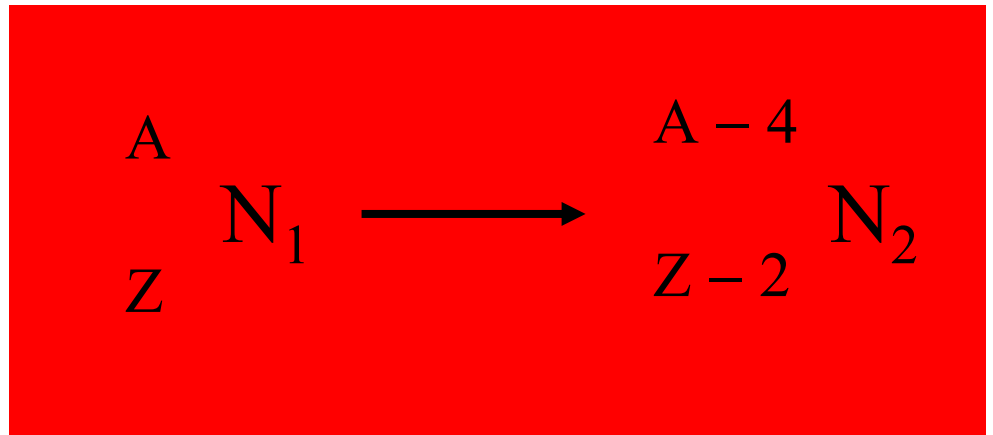
Uran-232

Zlato-185

Thorium-230

Americium-243

Polonium-210



Posun v periodické tabulce o dva prvky doleva



# Beta částice



Jádra s nadbytkem neutronů, nedostatek protonů

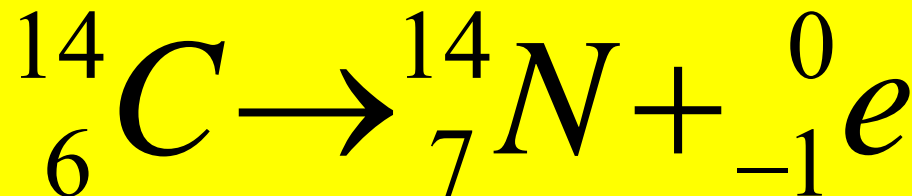
Beta částice jsou elektrony (ale ne z elektronového obalu!!!)



Vznikají rozpadem neutronu

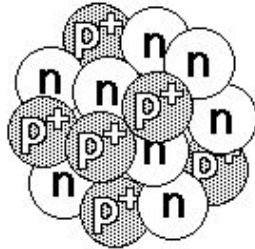
e opouští jádro rychlostí 90% c

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



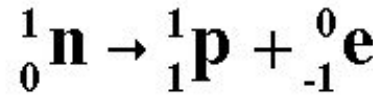
# Beta emise

$^{14}_6\text{C}$



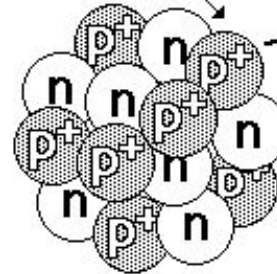
Posun v periodické tabulce o jeden prvek  
doprava

$A$   
 $Z + 1$   $\text{N}_2$



$A$   
 $Z$   $\text{N}_1$

$^{14}_7\text{N}$



$^0_{-1}\text{e}$

beta particle  
(electron)

# Beta emise

Krypton-87

Zinek-71

Křemík-32

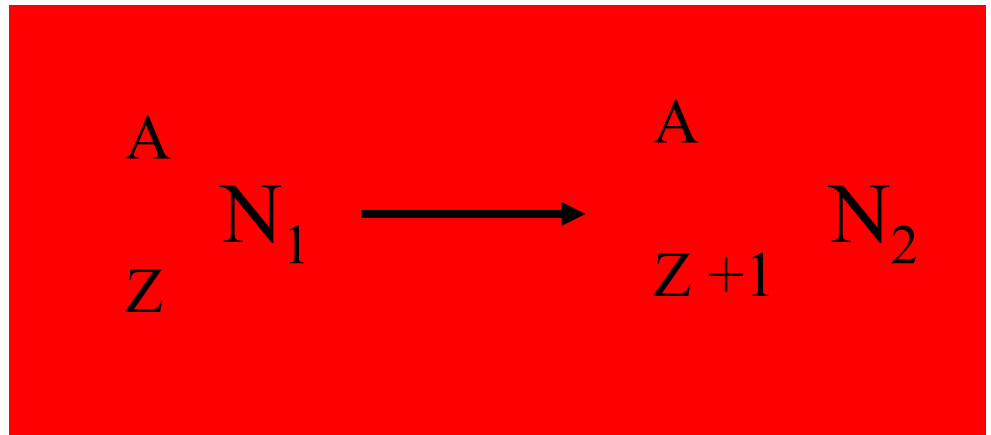
Kobalt-60

Hořčík-27

Sodík-24

Železo-59

Fosfor-32



Posun v periodické tabulce o jeden prvek  
doprava

# Gama částice

Jádra s nadbytkem energie emitují gama částice

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

Rychlost světla

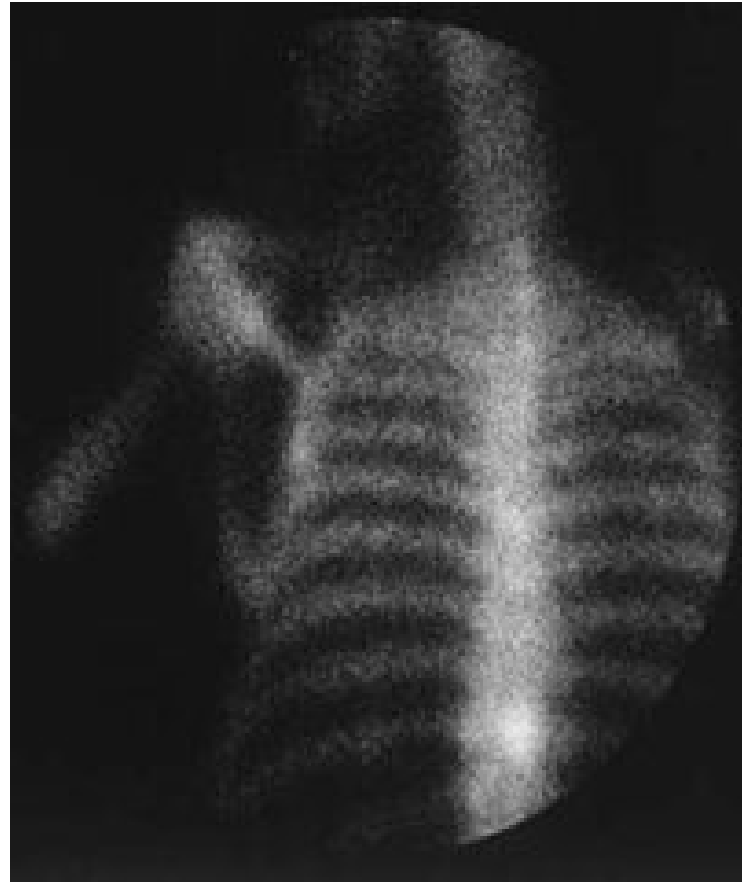
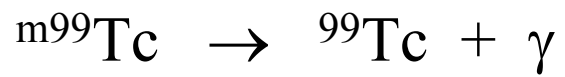
Hluboká penetrace, 500 m ve vzduchu



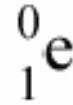
# Tracer

Gyorgy Hevesy 1913

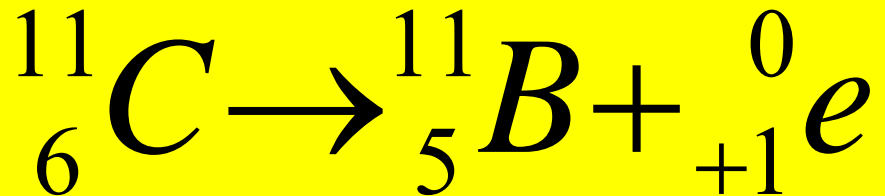
NP 1943



# Positronová emise



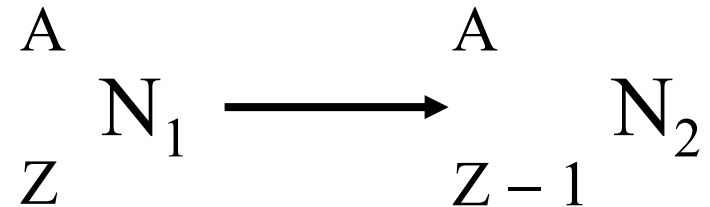
Jádra s nadbytkem protonů, nedostatek neutronů



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

Velmi malá penetrace

Anihilace  ${}^0_1e + {}^0_{-1}e \rightarrow \gamma$



Posun v periodické tabulce o jeden prvek doleva

# Positronová emise

Rubidium-81

Germanium-66

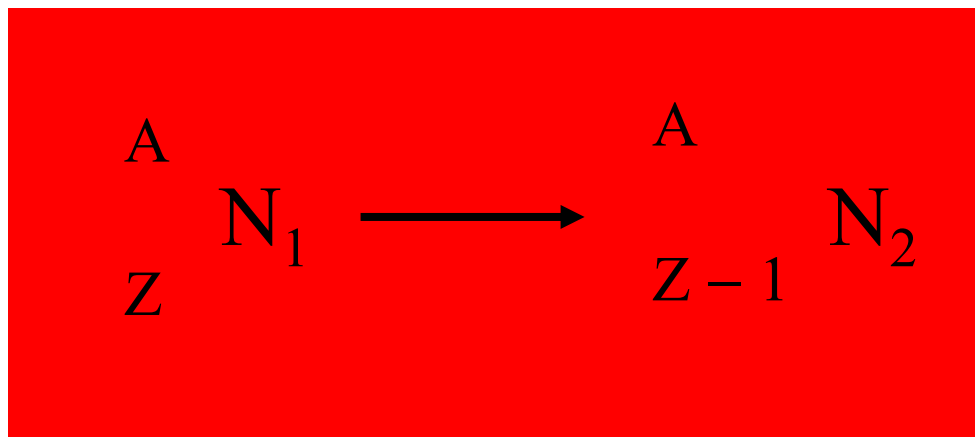
Praseodym-140

Neon-18

Kyslík-15

Dusík-13

Měď-59



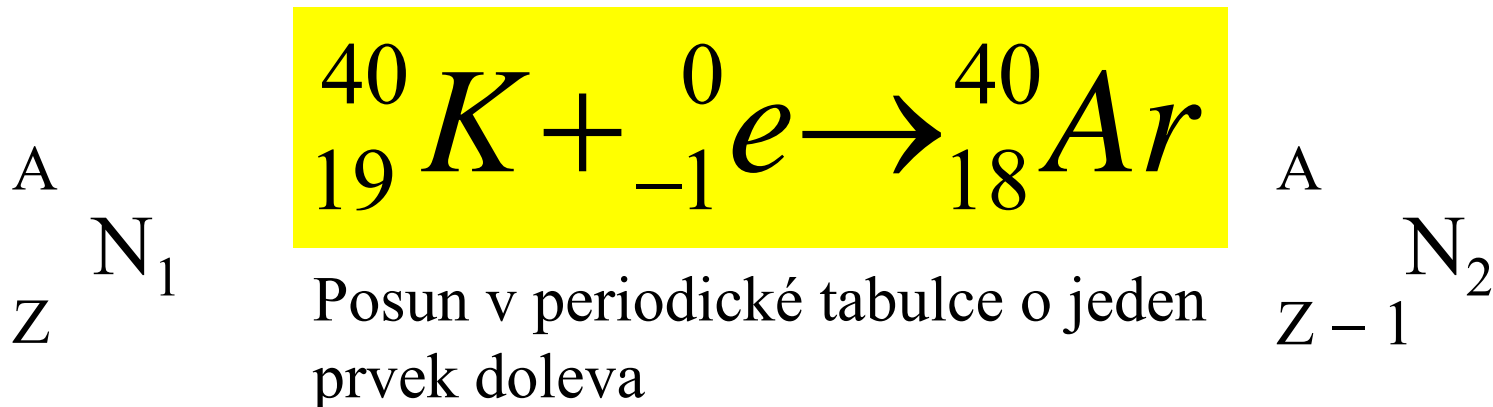
Posun v periodické tabulce o jeden prvek doleva

# Elektronový záchyt

Elektron z elektronového obalu atomu může být zachycen jádrem

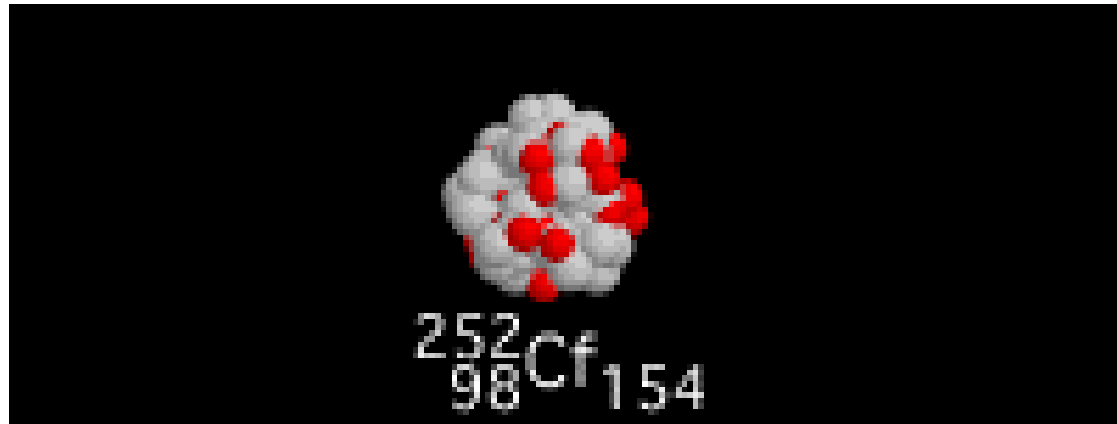
Zachycený e přemění p na n,  
e z vnější slupky klesne na volnou hladinu,  
emise rentgenového záření

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

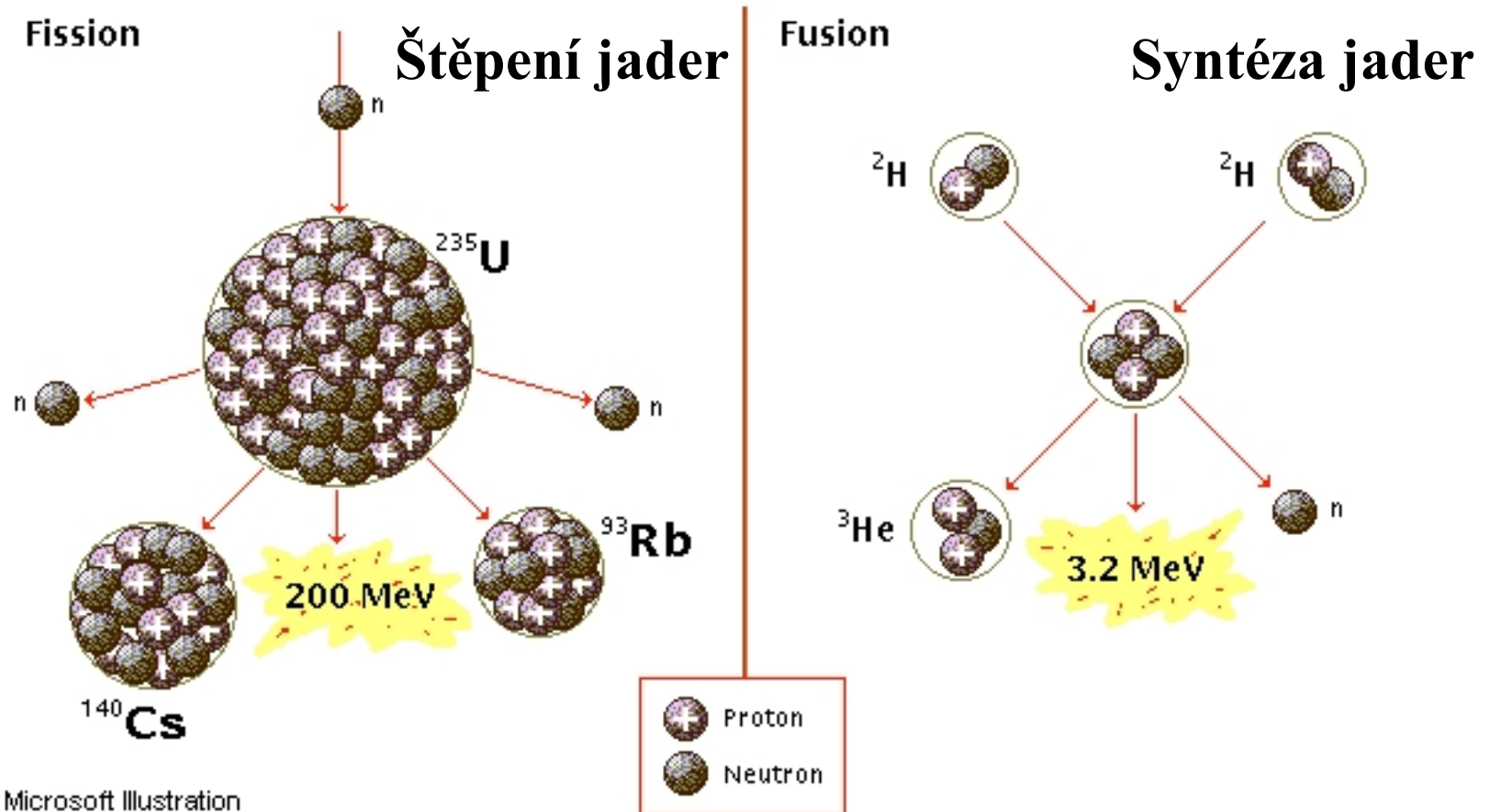




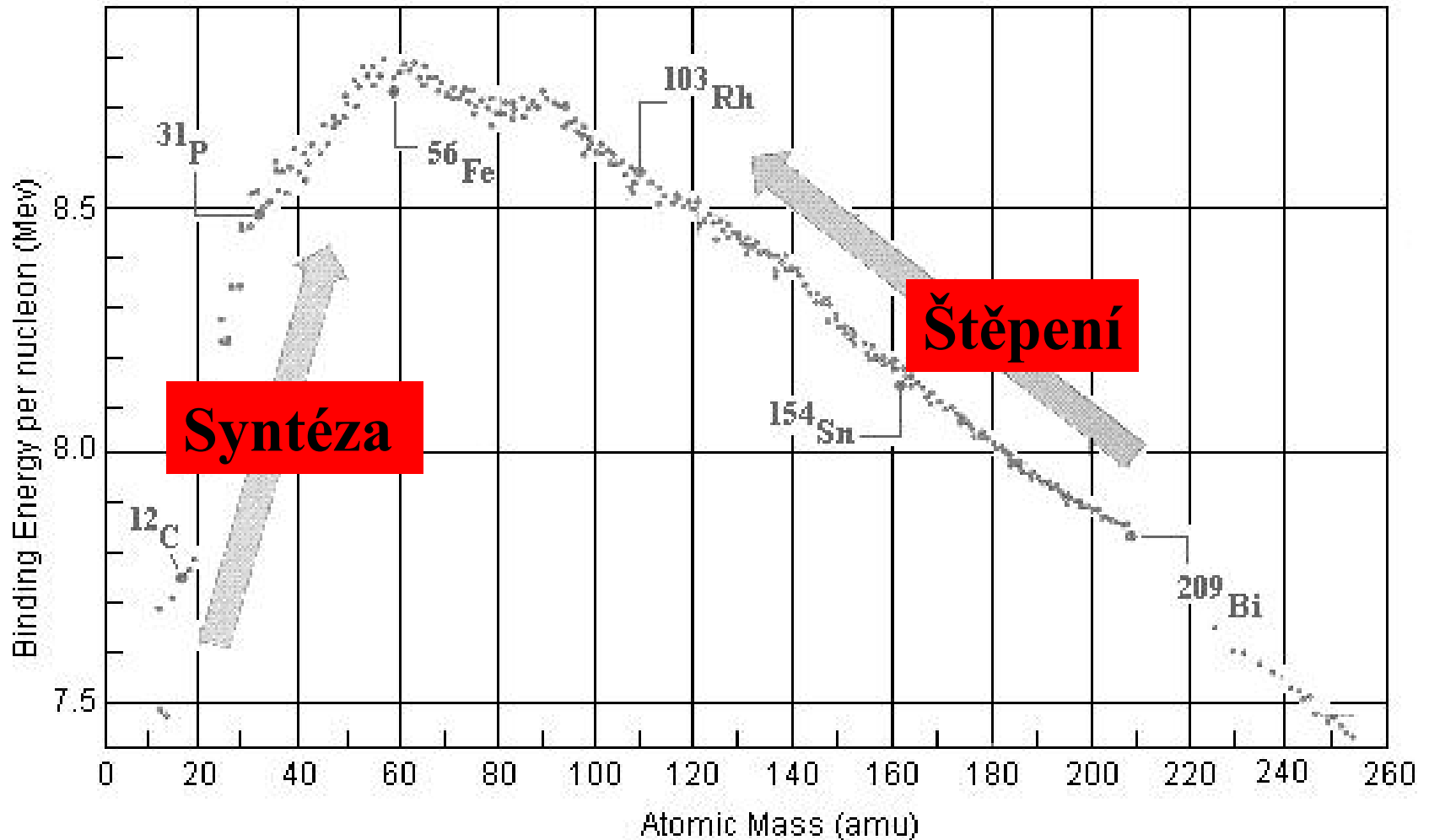
# Samovolné štěpení



# Syntéza a štěpení jader



# Vazebná energie jádra



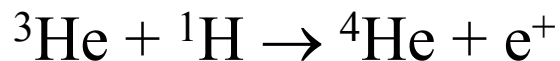
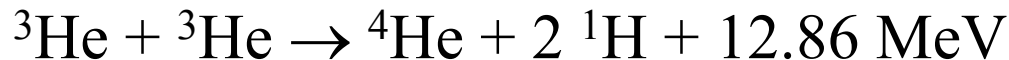
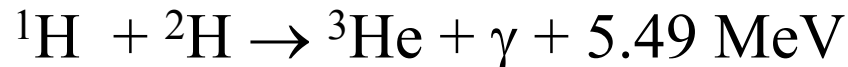
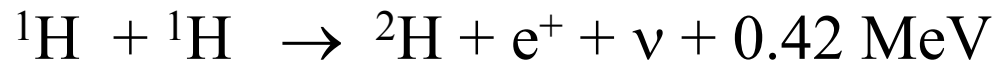
# Syntéza jader ve vesmíru

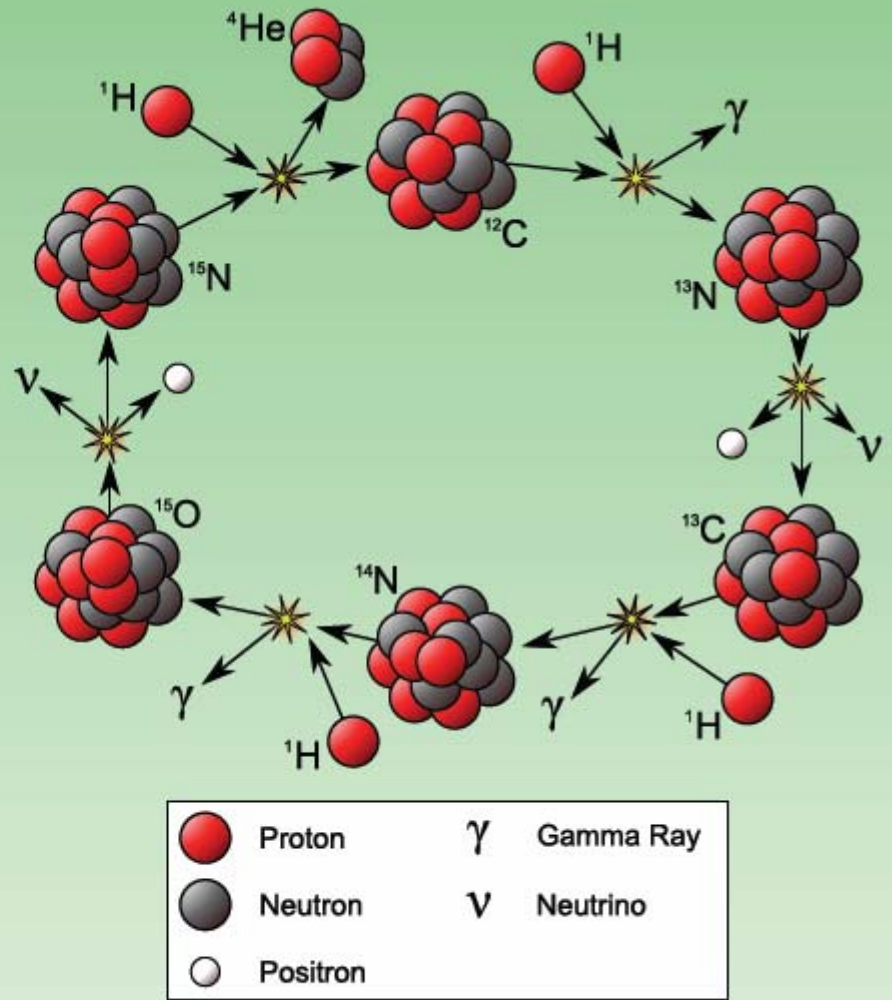
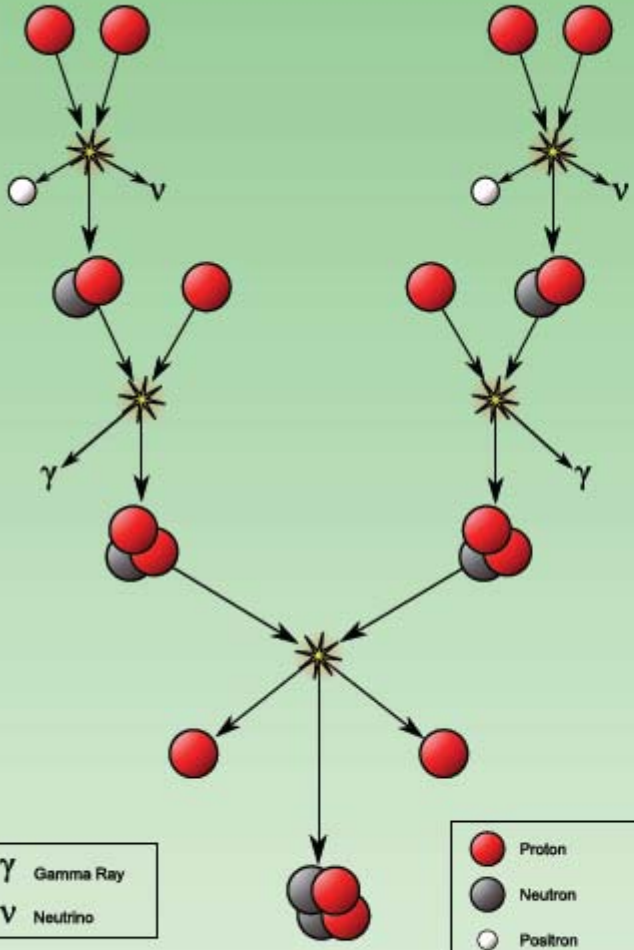
Big Bang



Slunce (teplota =  $2 \cdot 10^6$  K v nitru, energie z PP nebo CN cyklu)

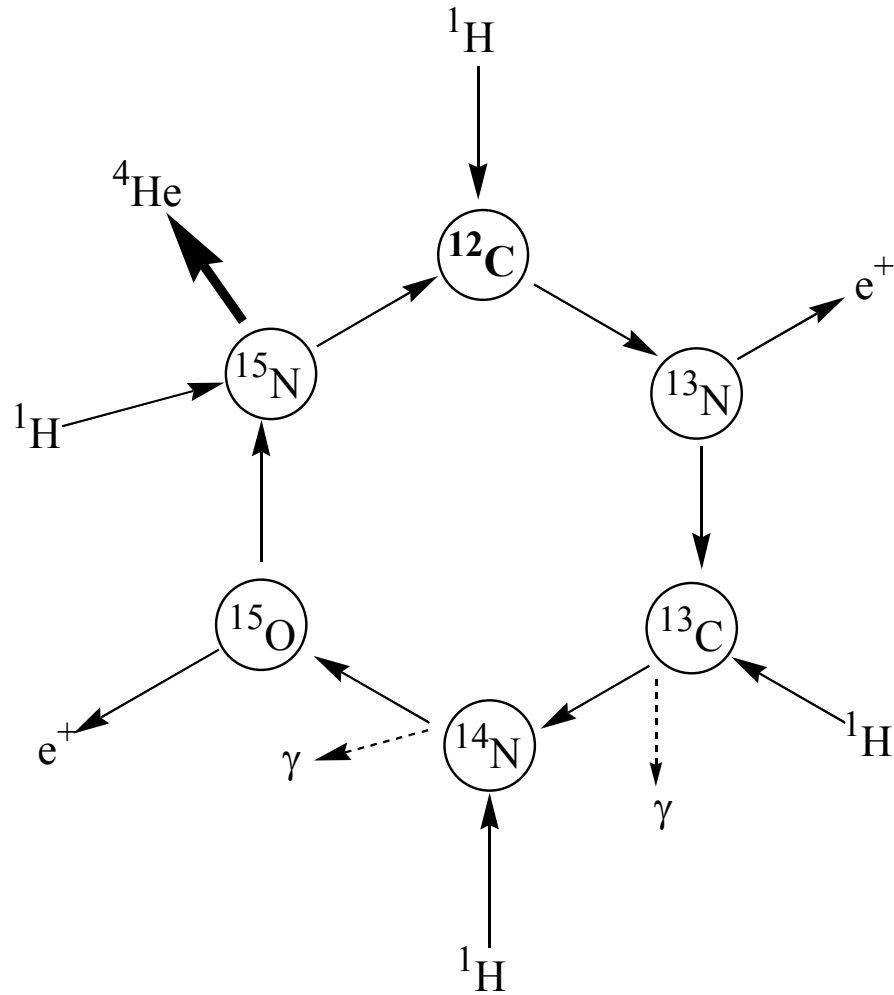
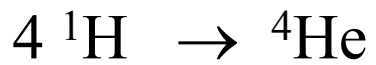
PP cyklus





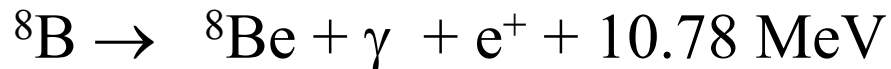
# Uhlíkový cyklus

CN cyklus



# Syntéza jader ve vesmíru

Slunce → rudý obr → bílý trpaslík



# Syntéza jader ve vesmíru

Těžké hvězdy

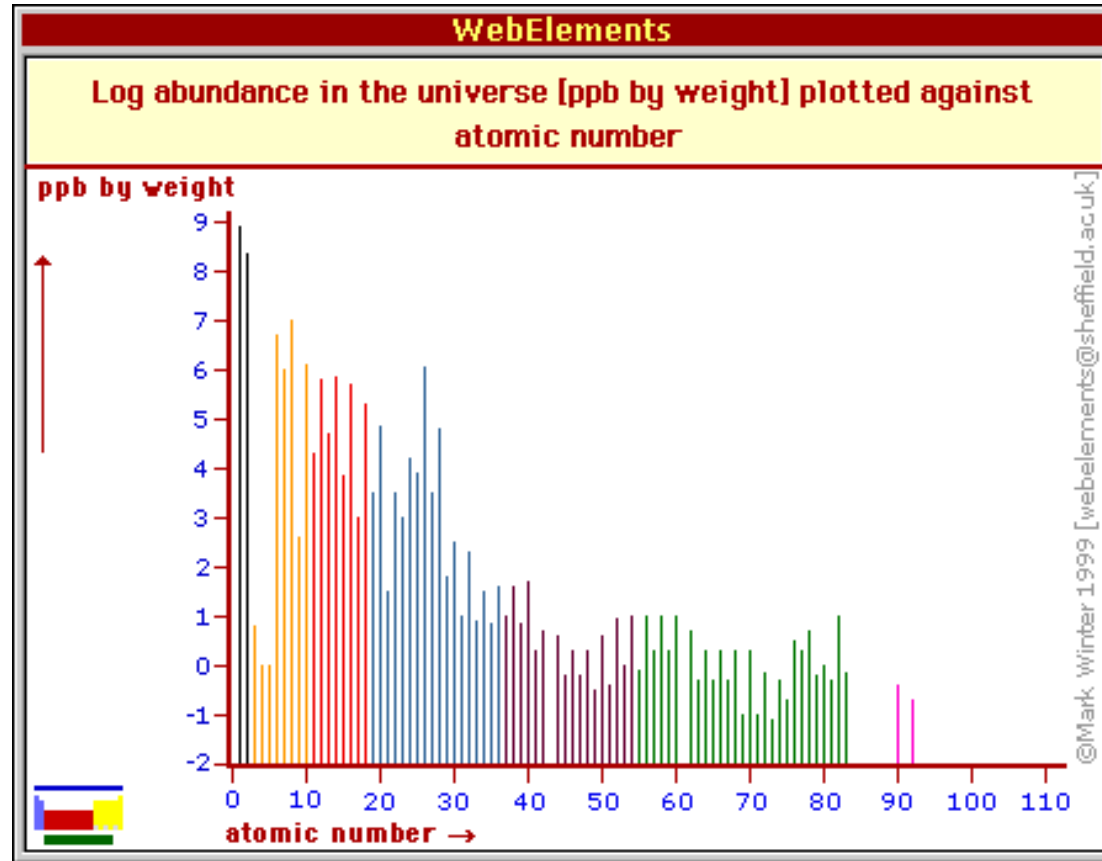
$^{12}\text{C} \rightarrow \text{Ne, Mg}$

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

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

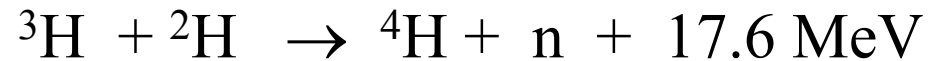
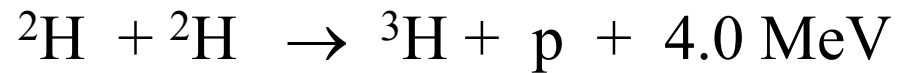
Výbuch supernovy  
vysoké toky neutronů

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



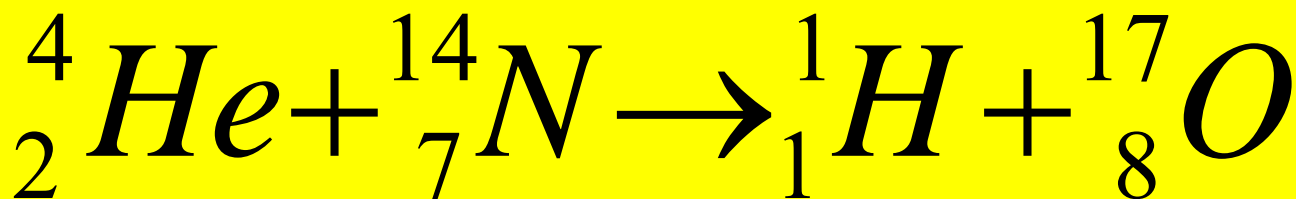


# Termojaderné reakce

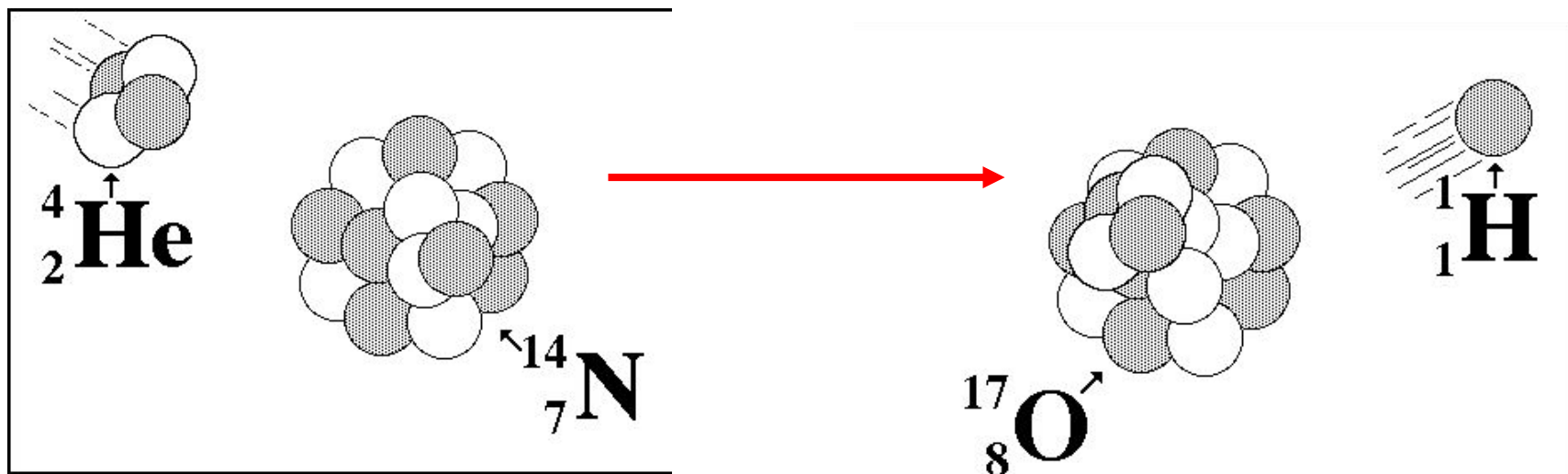


# Transmutace

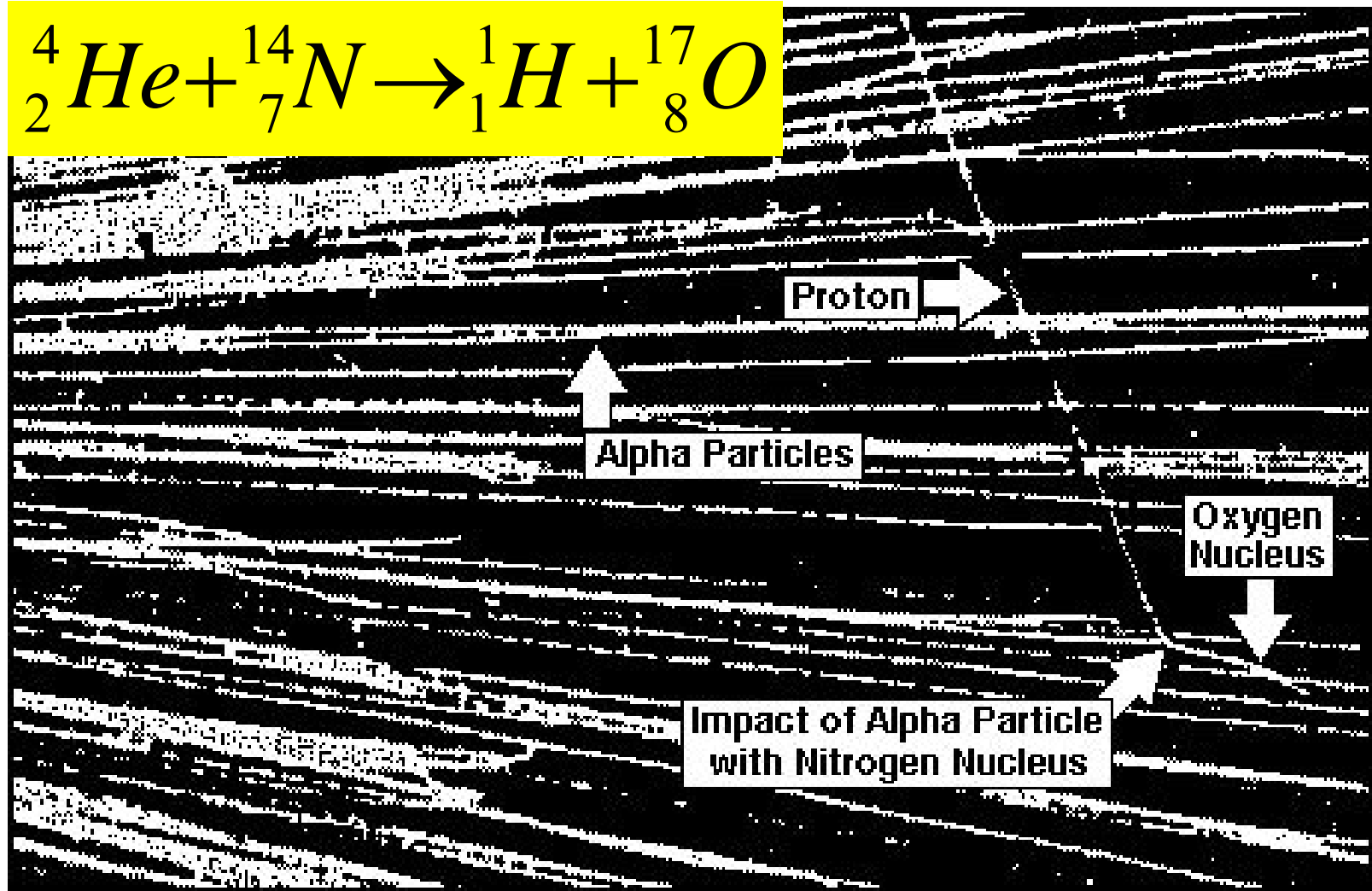
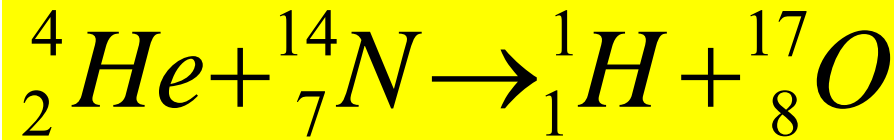
1919, Rutherford, první umělá příprava prvku



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



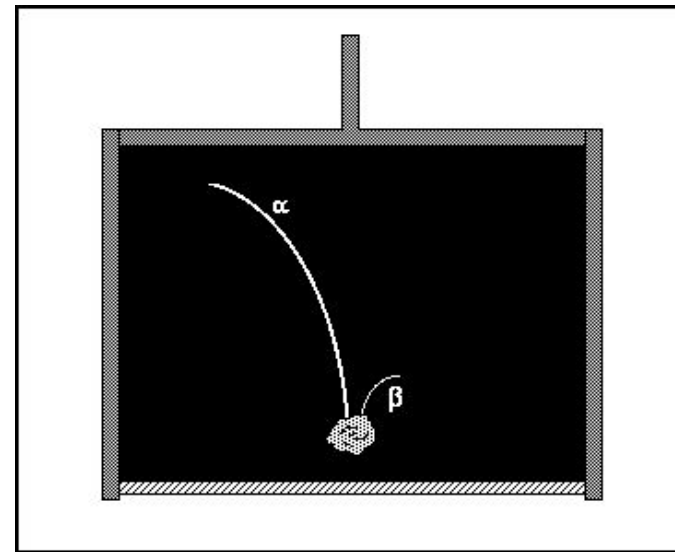
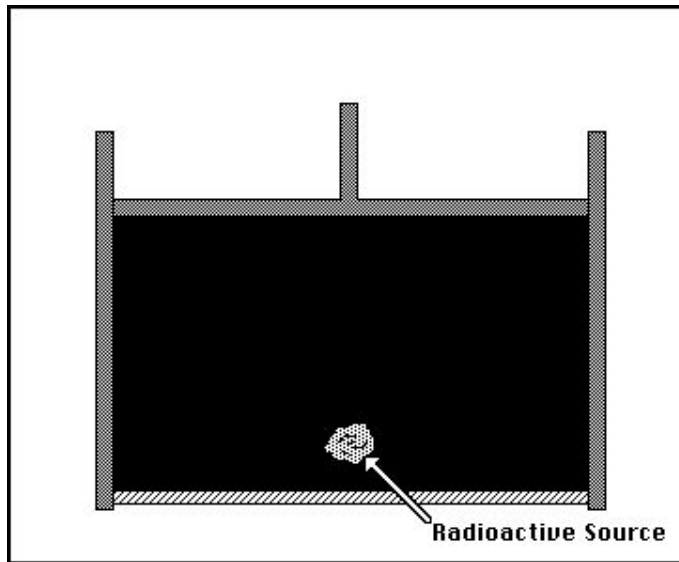
# Transmutace



# Wilsonova mlžná komora



Charles Wilson (1869-1959) NP za fyziku 1923



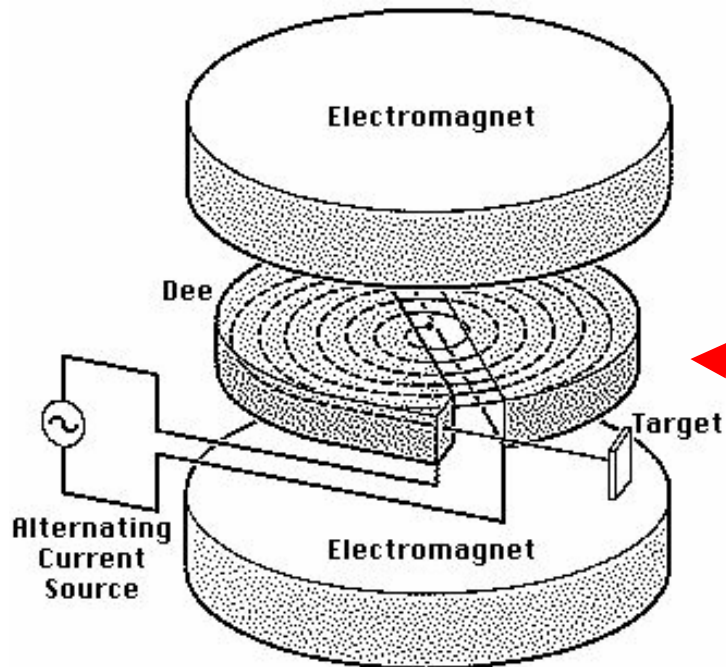
Plyn (vzduch, He, Ar,...)  
a páry vody nebo alkoholu v  
komoře se zářičem, píst pro  
změnu objemu

Expanze, ochlazení, vznik  
přesycené páry, částice při  
průletu ionizují okolní atomy,  
kondenzace na ionizovaných  
atomech

# Cyklotron

1929

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

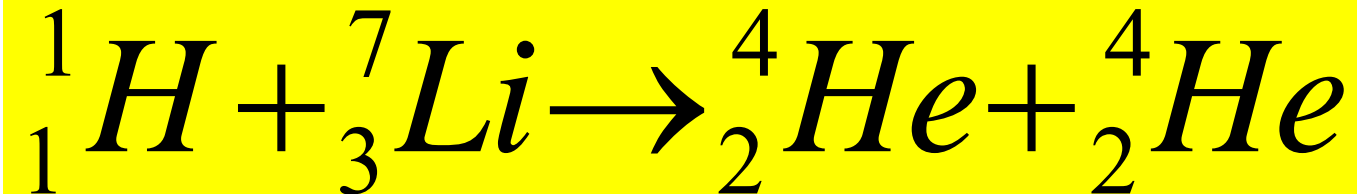
# Štěpení jader

1932

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

Kaskádový urychlovač, protony 800 keV

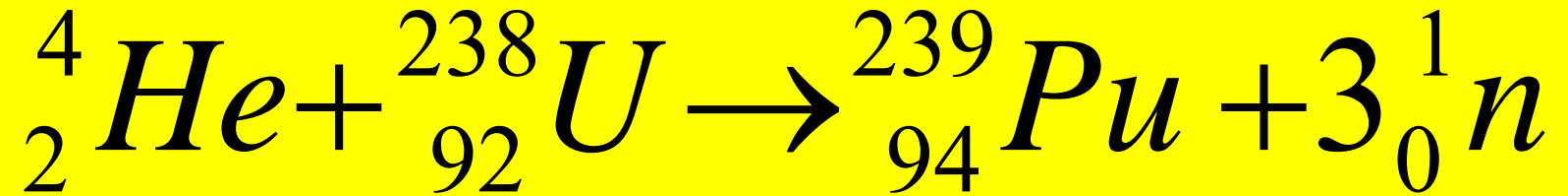
První štěpení stabilního jádra urychlenou částicí



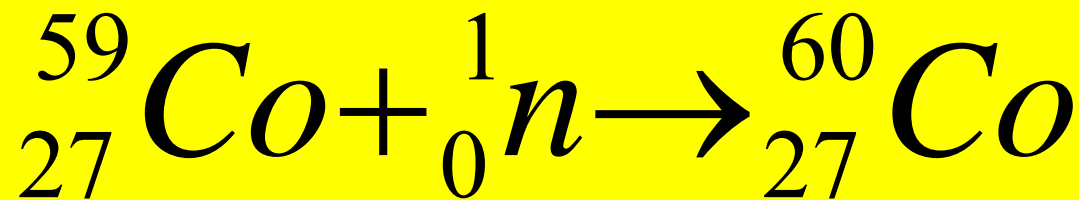
1951 společně NP za fyziku

# Transmutace

Cyklotron

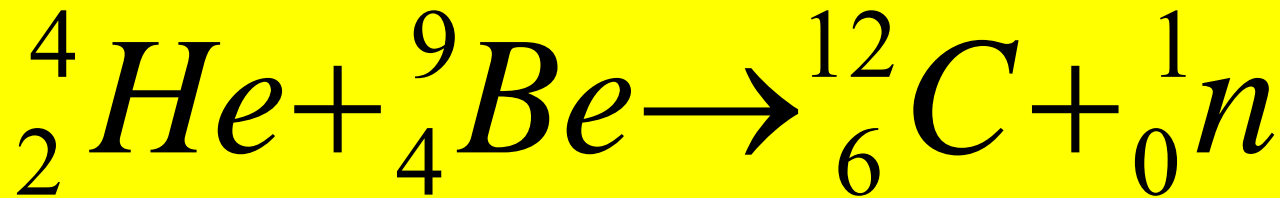


Bombardování neutrony



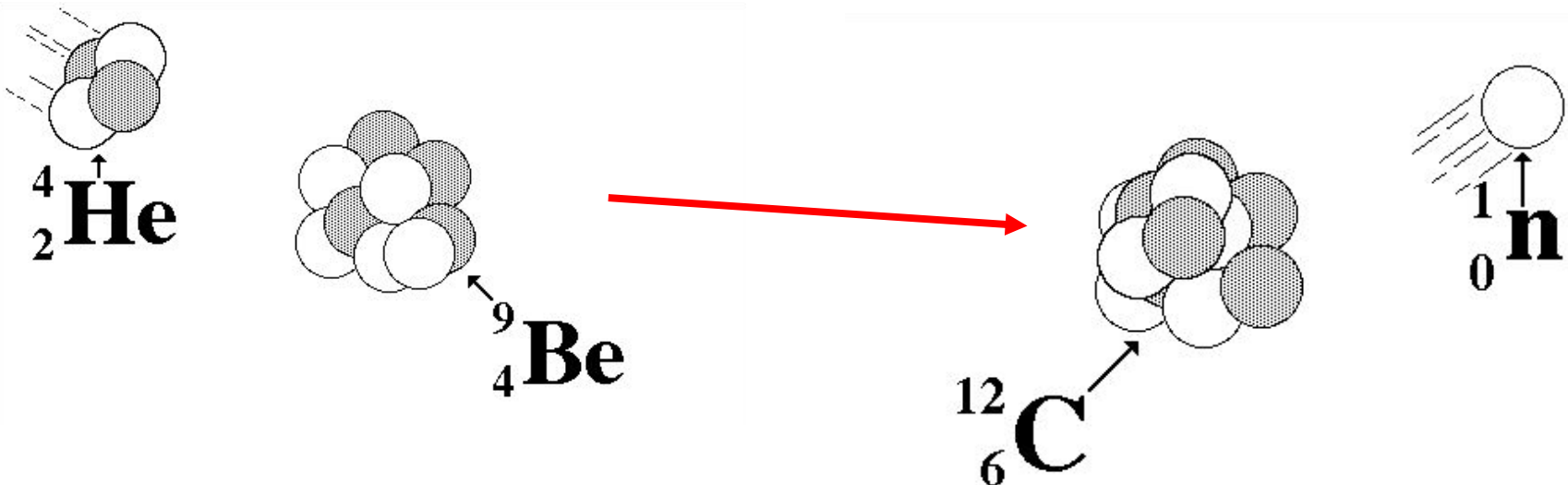
# Objev neutronu

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

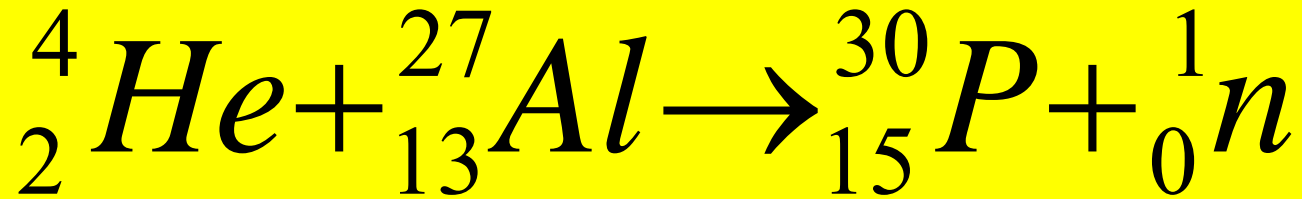


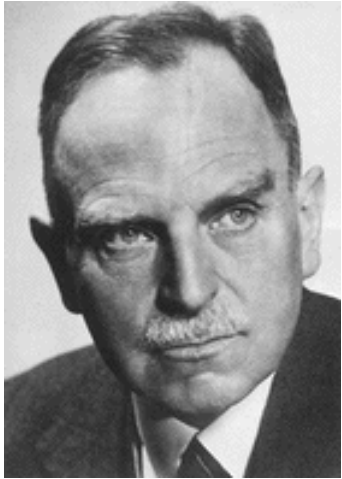


# Umělá radioaktivita

1933

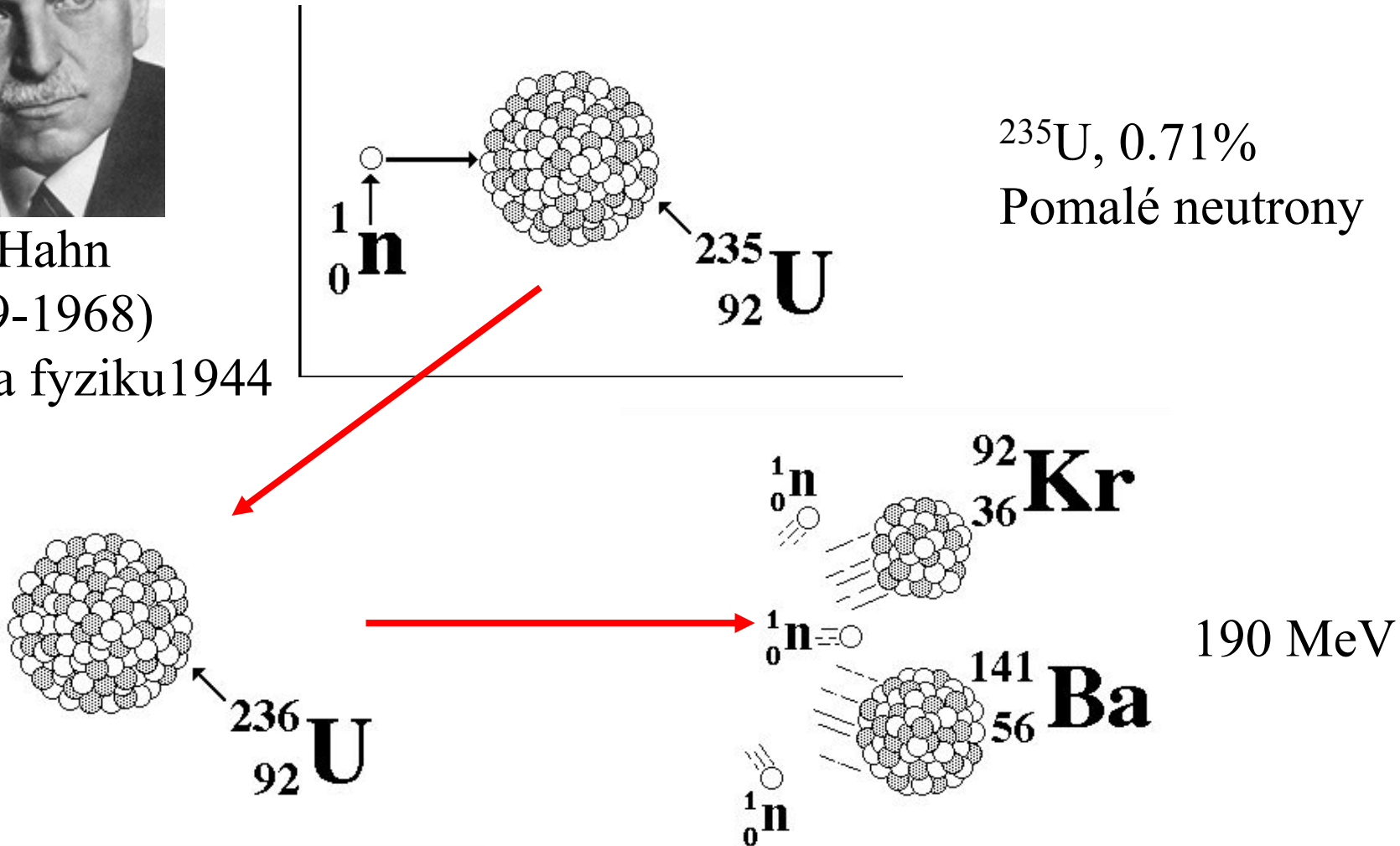
Frederic and Irene Joliot-Curie  
(1900-1958) (1897-1956)



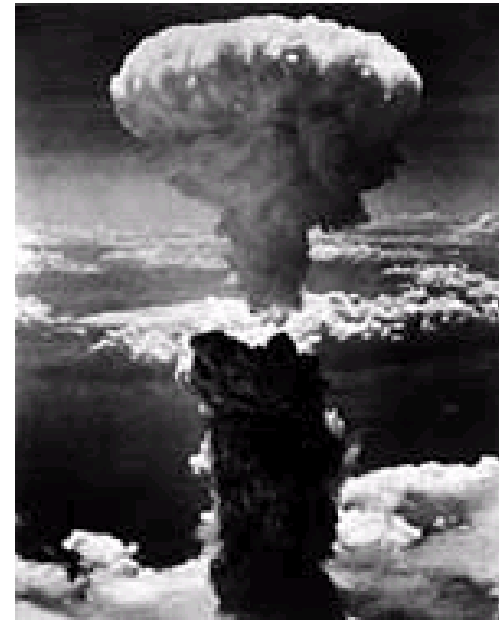
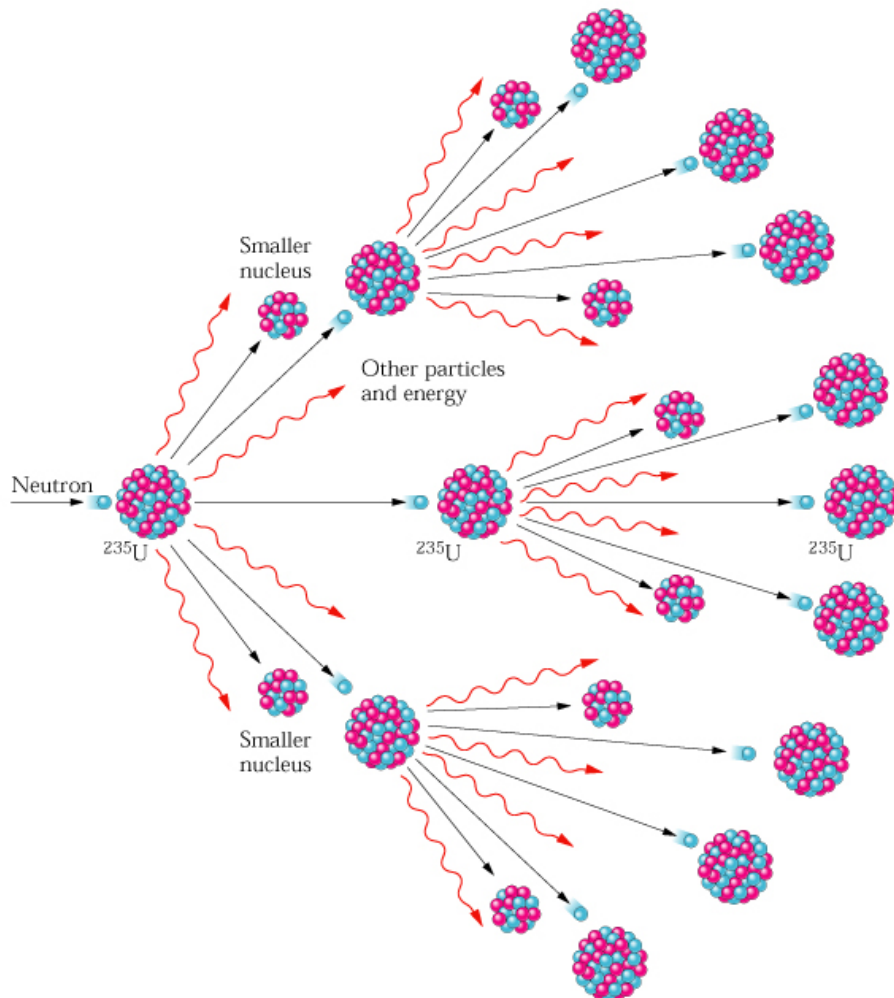


Otto Hahn  
(1879-1968)  
NP za fyziku 1944

# Štěpení jader



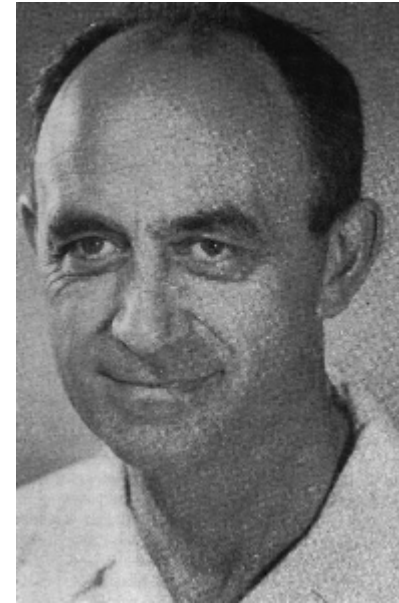
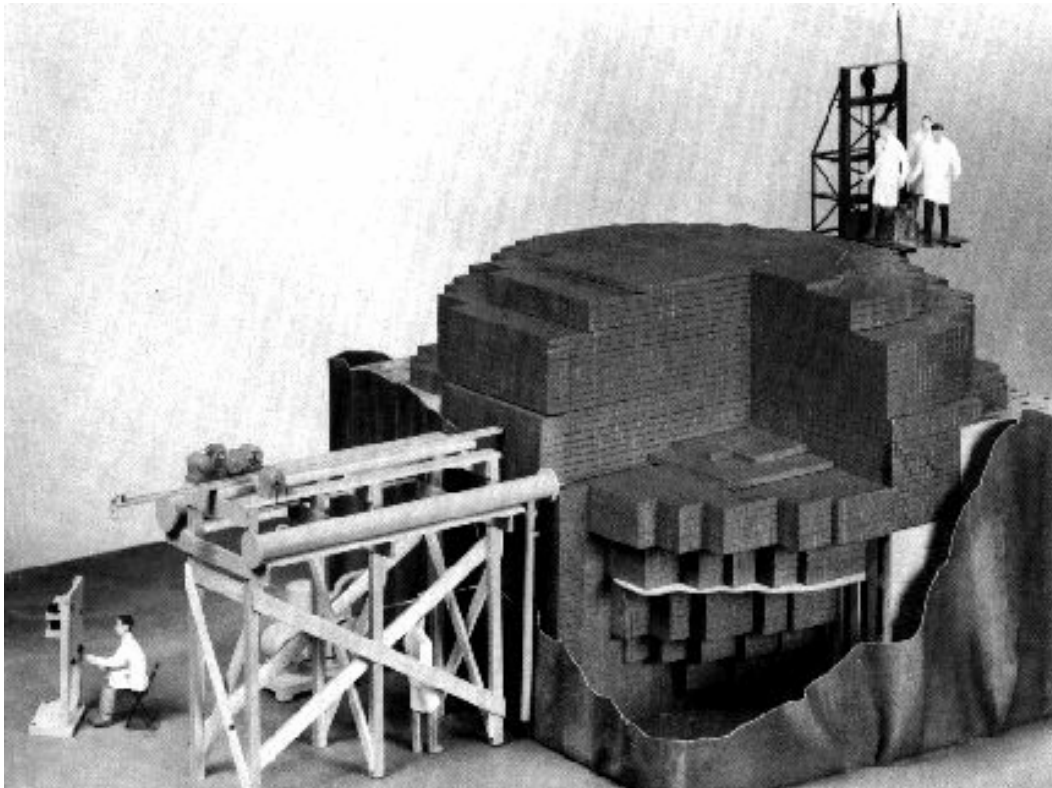
# Řetězová reakce neřízená



# Jaderný reaktor

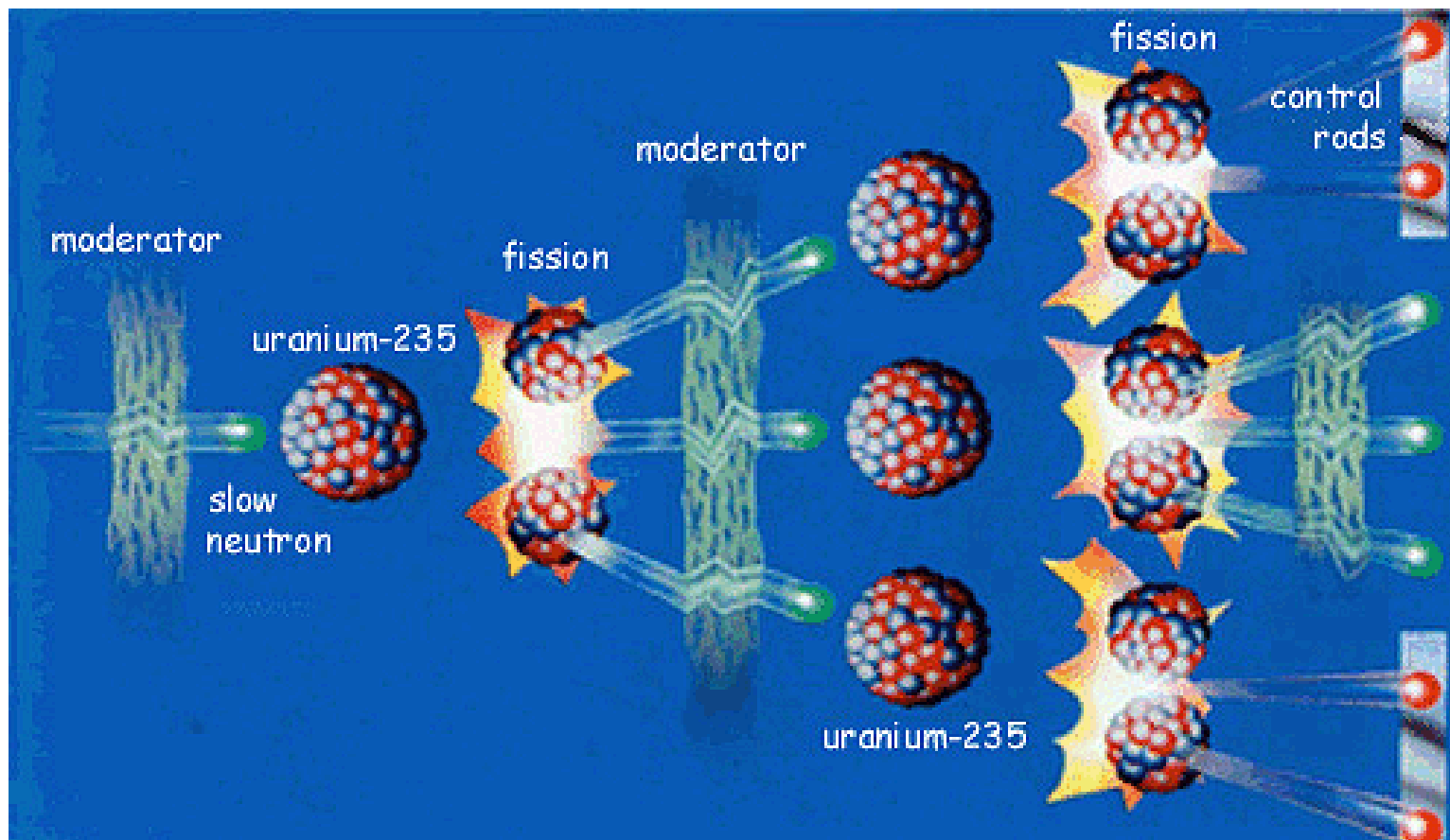
1942 Chicago

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



Enrico Fermi  
(1901-1954)  
NP za fyziku 1938

# Řízená štěpná reakce $^{235}\text{U}$



Moderátor = zpomalení neutronů – grafit  
Cd dobře pohlcuje neutrony – zachycení n

# Transurany

Do 1940 nejtěžší přírodní prvek  $Z = 92$  (U) radioaktivní  
Prvky  $Z \geq 93$  (Np) transurany pouze umělé

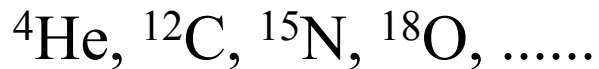
1940 První umělý transuran

bombardování neutrony

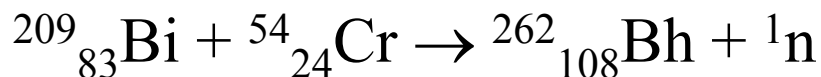
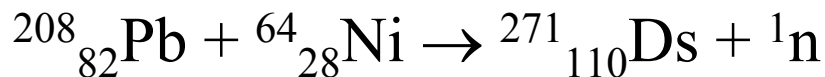
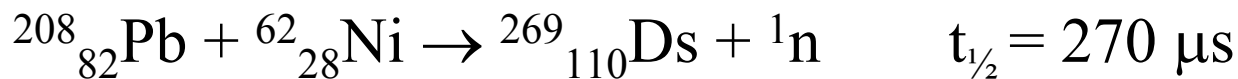


po  $Z = 95$  (Am)

bombardování kladnými ionty



po  $Z = 114$

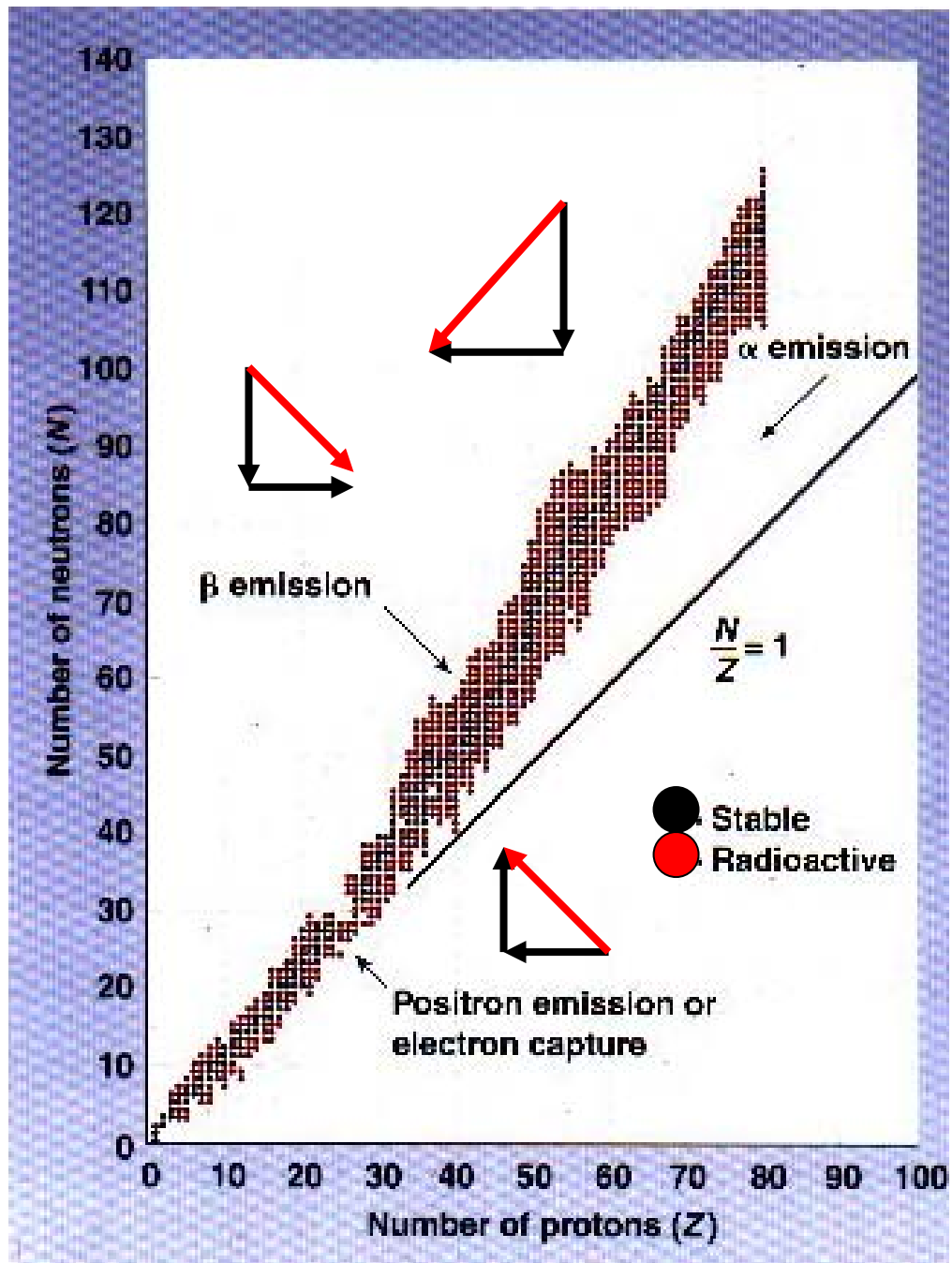


# Syntéza transuranů

Spojený institut jaderného výzkumu, Dubna, Rusko

GSI (Gesellschaft für Schwerionenforschung), Německo

LBL (Lawrence Berkeley Lab), USA





# Kinetika radioaktivního rozpadu

$$-dN/dt = k N$$

$$dN/N = -k dt$$

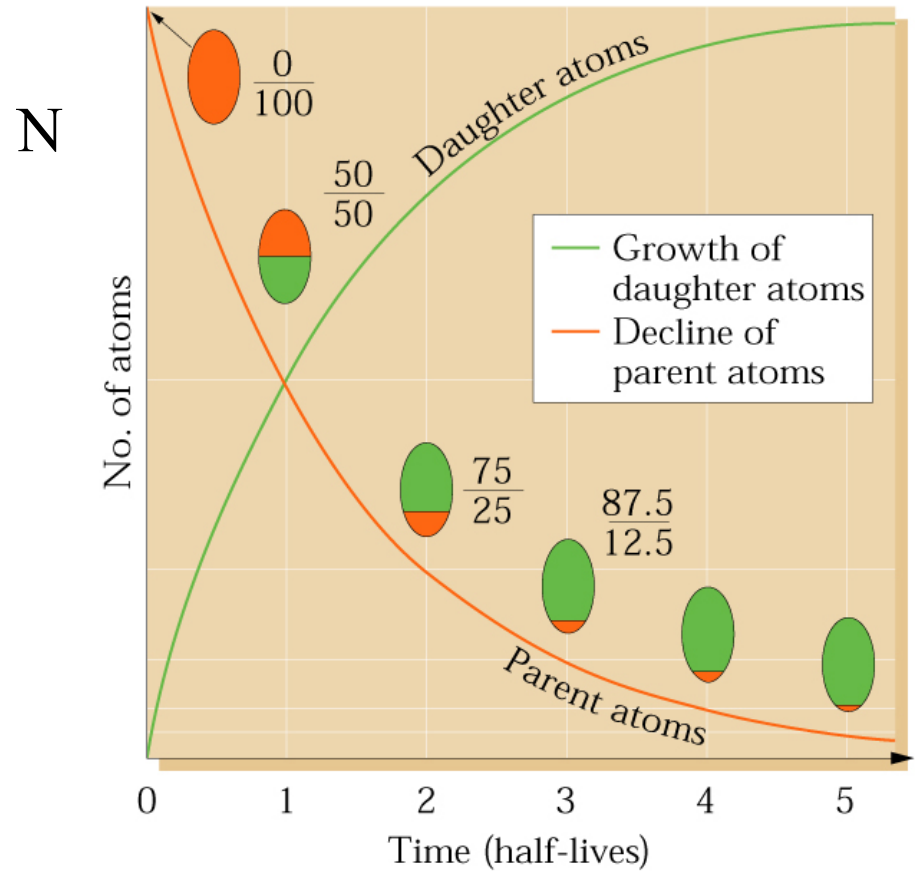
Integrace

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

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

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

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



t

# Poločas rozpadu, $t_{1/2}$

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

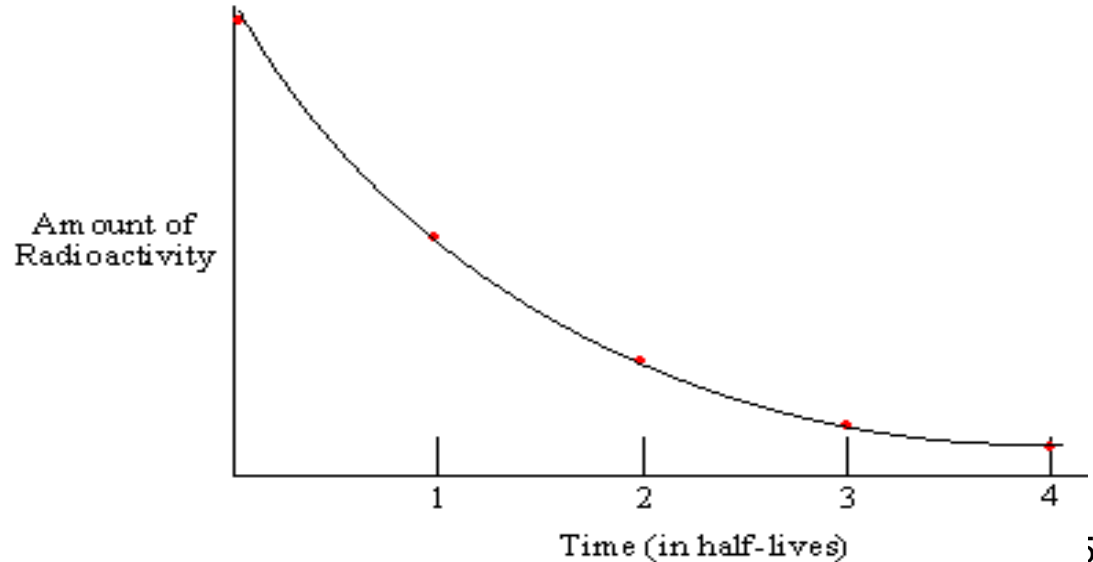
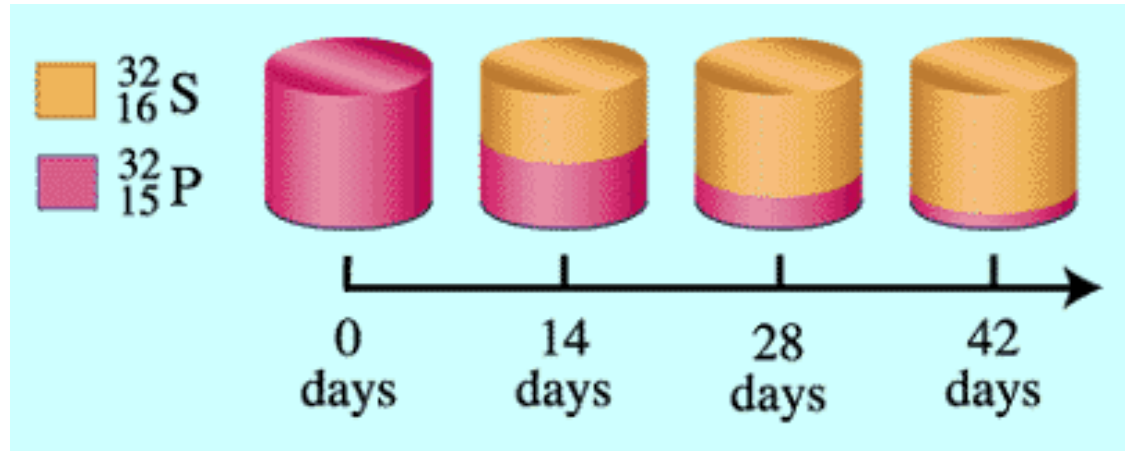
$$\ln(N/N_0) = -k t$$

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

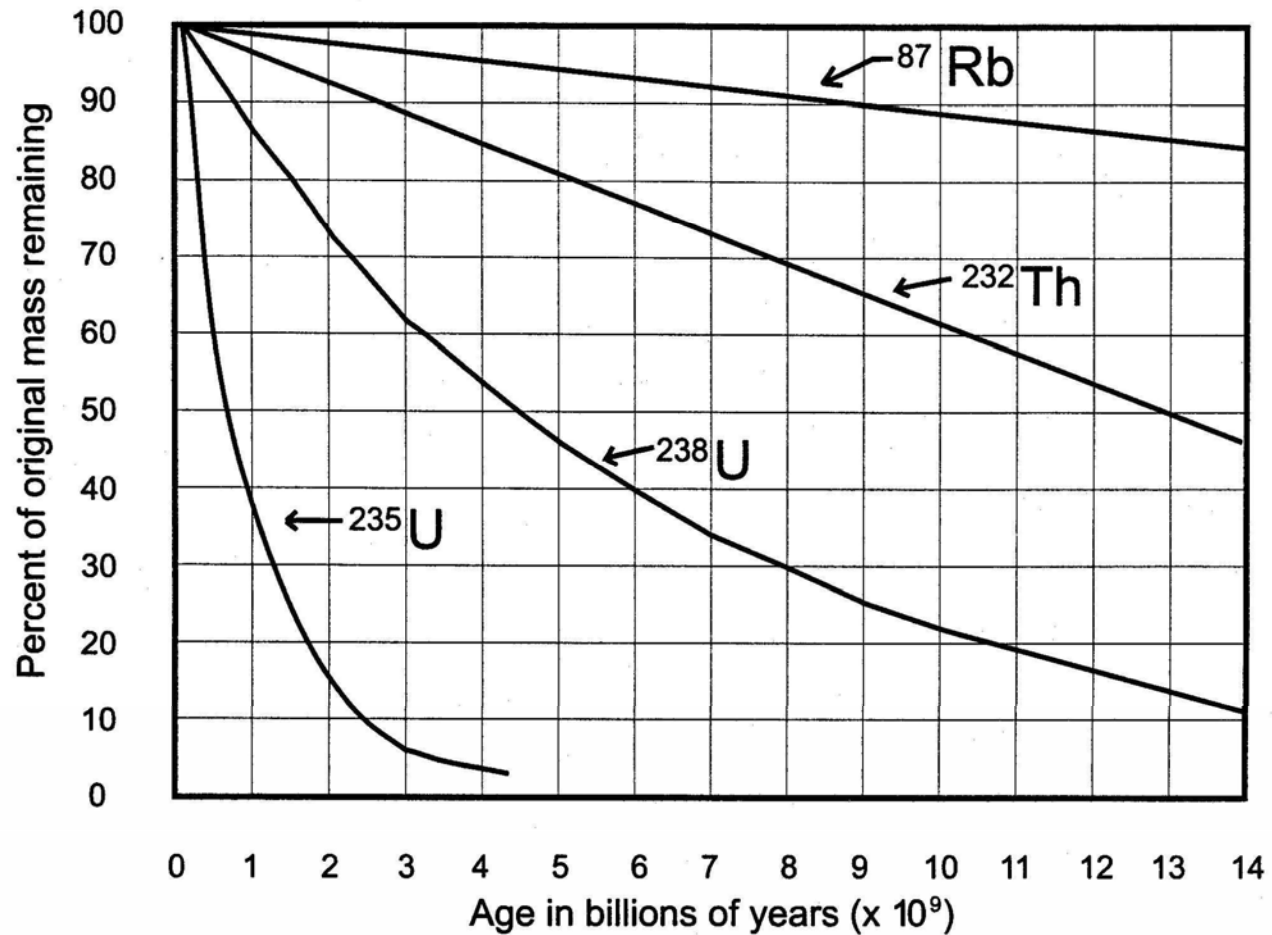
$$t_{1/2} = \ln(2) / k$$

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

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



# Poločas rozpadu

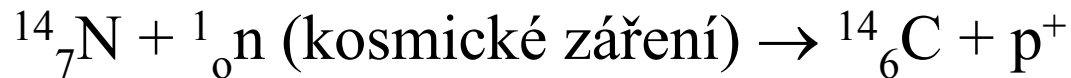


# Datování pomocí $^{14}\text{C}$

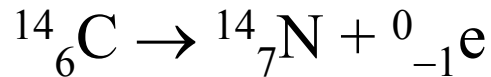


Willard Libby  
(1908-1980)  
NP za chemii 1960

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



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



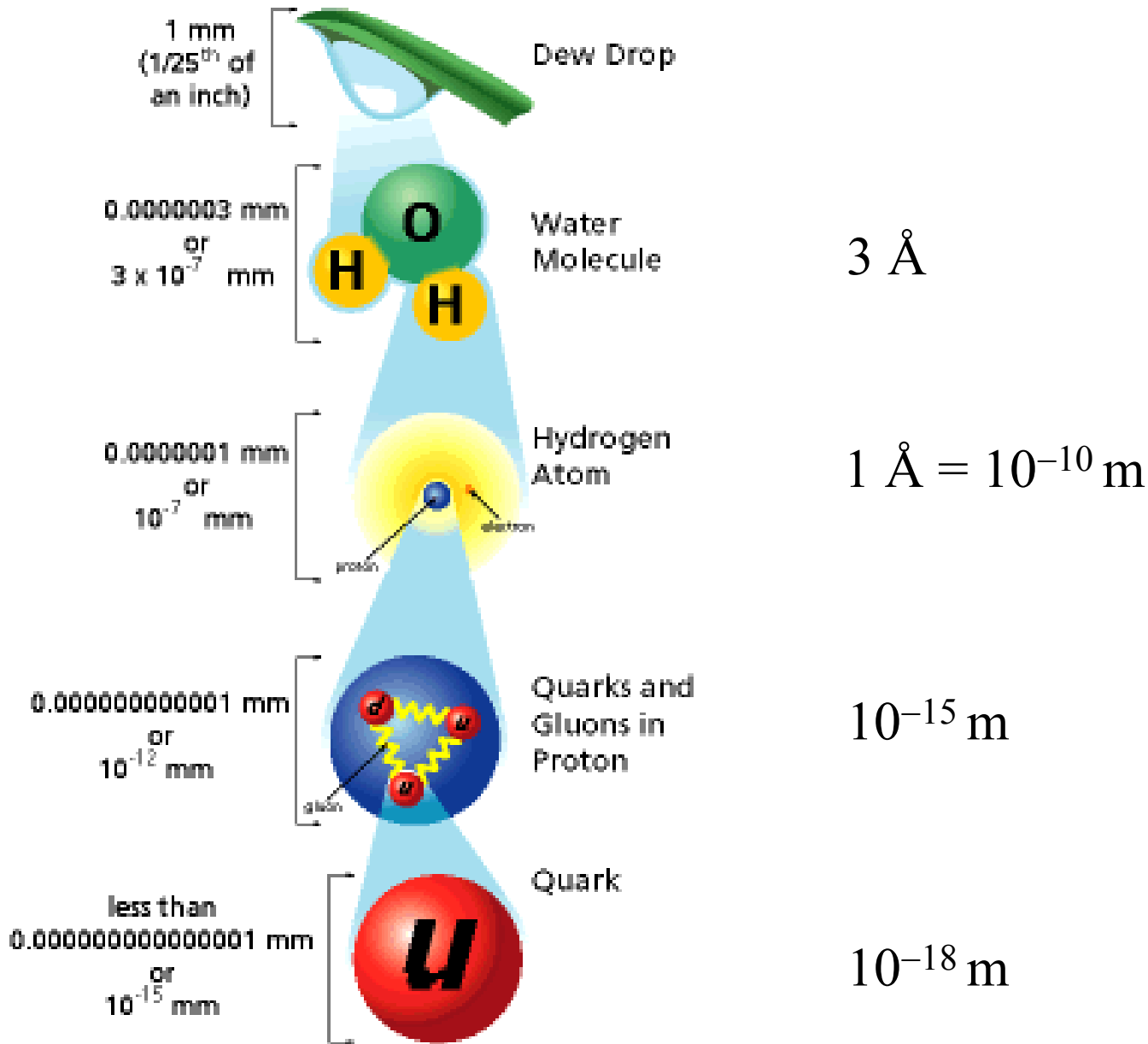
V atmosféře a živých rostlinách ( $\text{CO}_2$ , fotosyntéza) se ustaví rovnovážná koncentrace  $^{14}\text{C}$ . Po smrti organismu koncentrace  $^{14}\text{C}$  klesá.

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

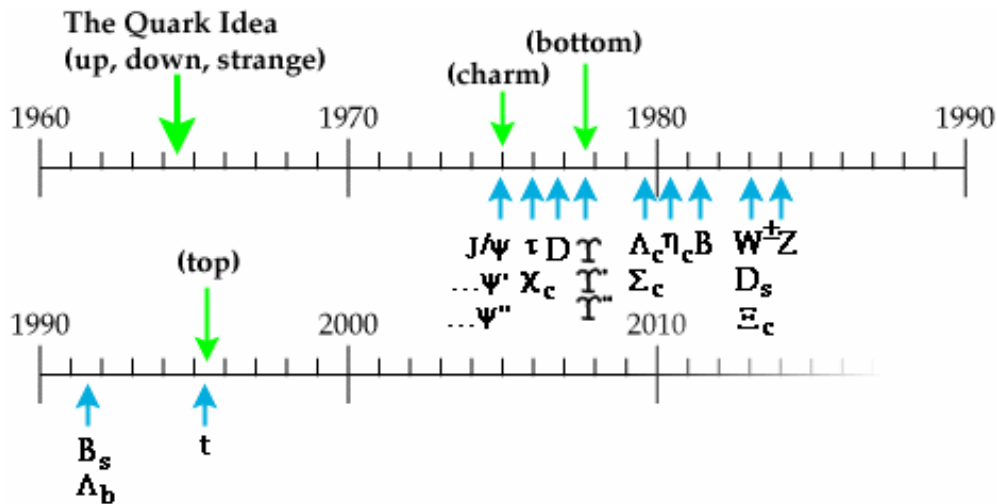
$$\ln(\text{N}/\text{N}_0) = -k t$$

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

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



# Elementární částice



Zoologická zahrada částic

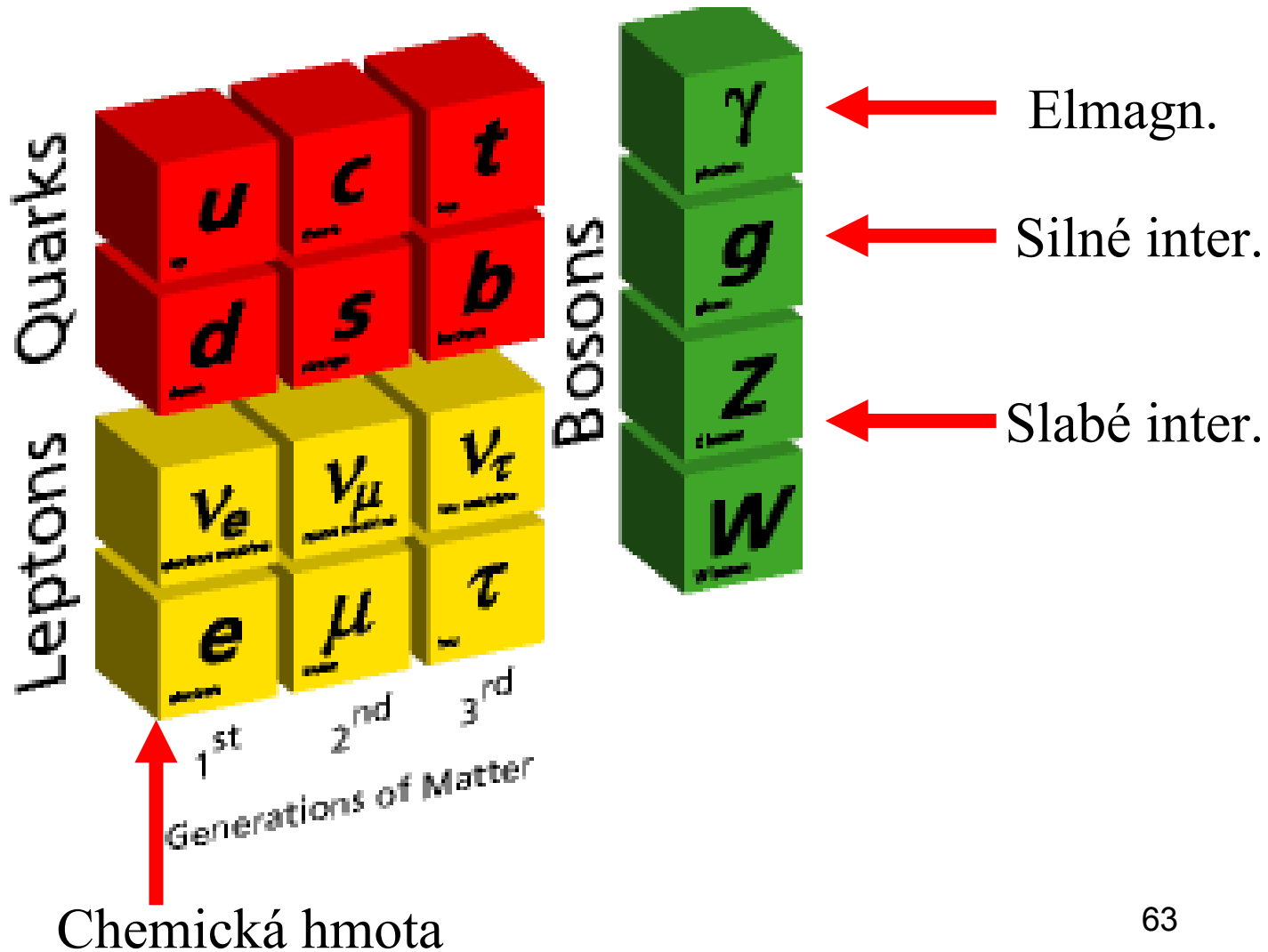
Quarky

- Spin
- Zlomkový náboj

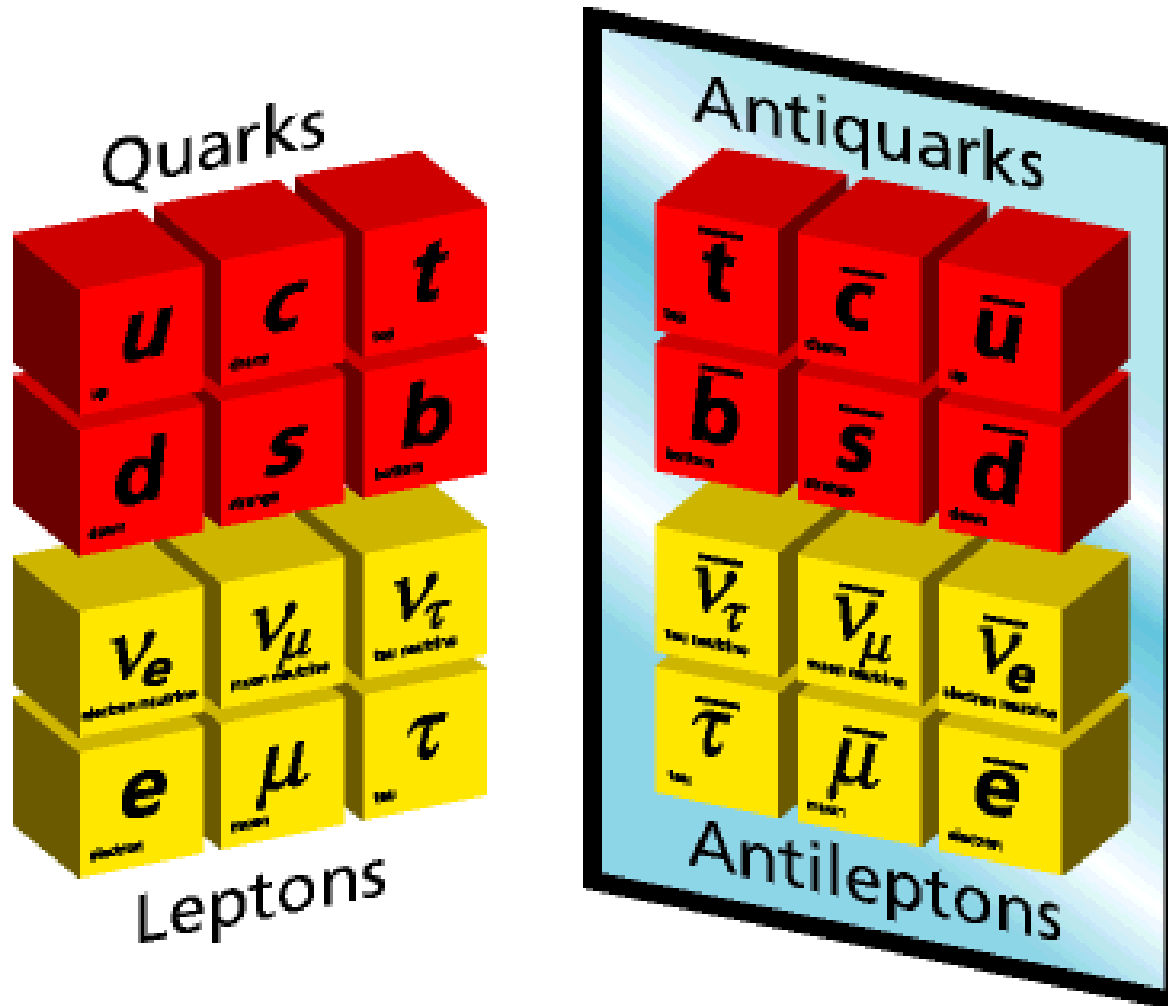
Murray Gell-Mann  
(1929 -)  
NP za fyziku 1969

# Elementární částice – Standardní Model

Astrofyzika a  
částicová  
fyzika



# 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

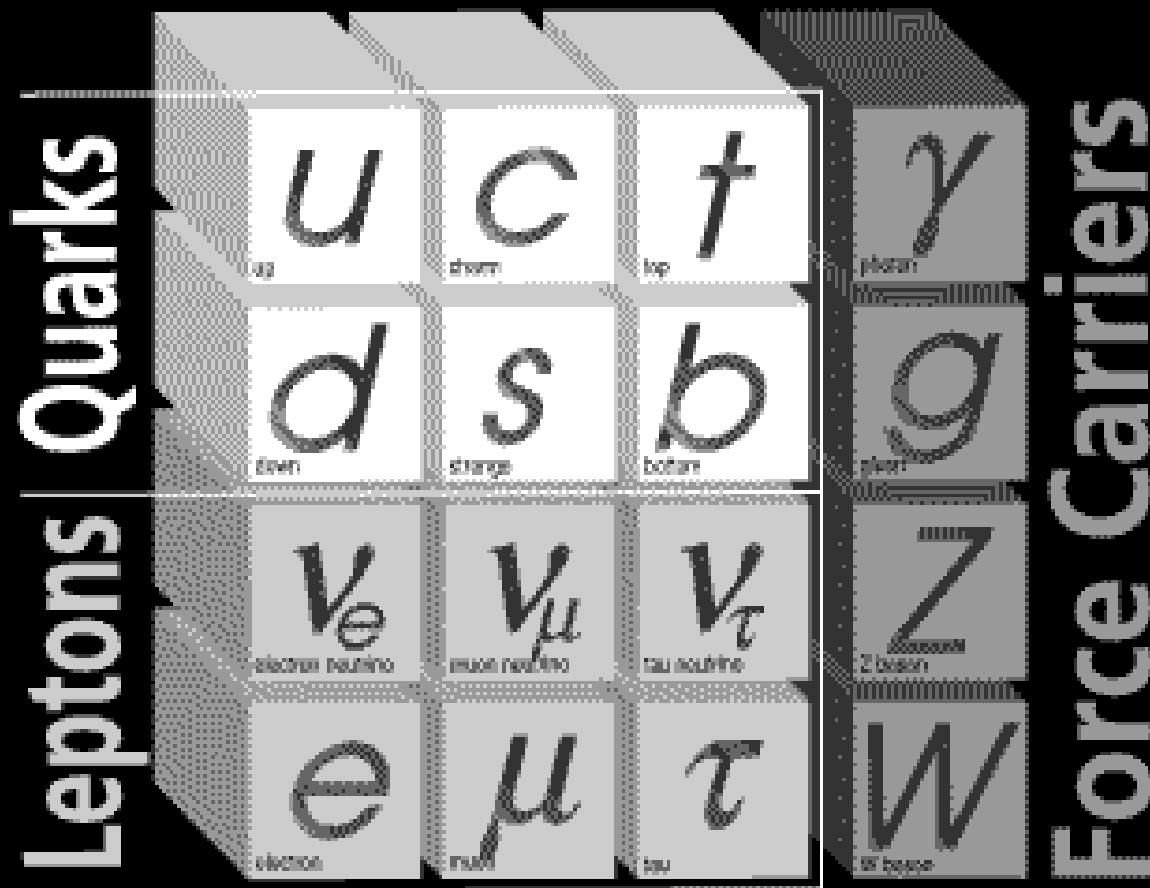
Leptonové číslo  $L$

$L = 1$  pro leptony

$L = -1$  pro antileptony

$L = 0$  pro ostatní

# ELEMENTARY PARTICLES




  
 Three Generations of Matter

# Quarky

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

# 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

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



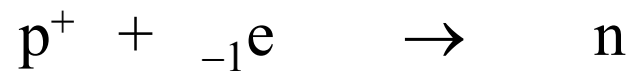
# Zákon zachování B a L čísla

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

např.



L	1	-1	0
---	---	----	---



B	1	1
---	---	---