

## Prvek, nuklid, izotop, izobar, izoton

<sup>19</sup>  
9 **F**

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 (<sup>14</sup>C-<sup>14</sup>N; <sup>3</sup>H-<sup>3</sup>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**

Zóna stability

Lehké nuklidy stabilní pro  $Z \sim N$  (stejný počet p a 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

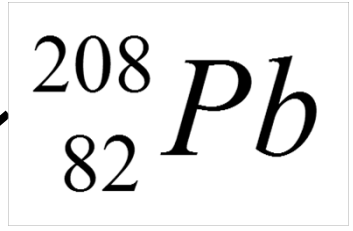
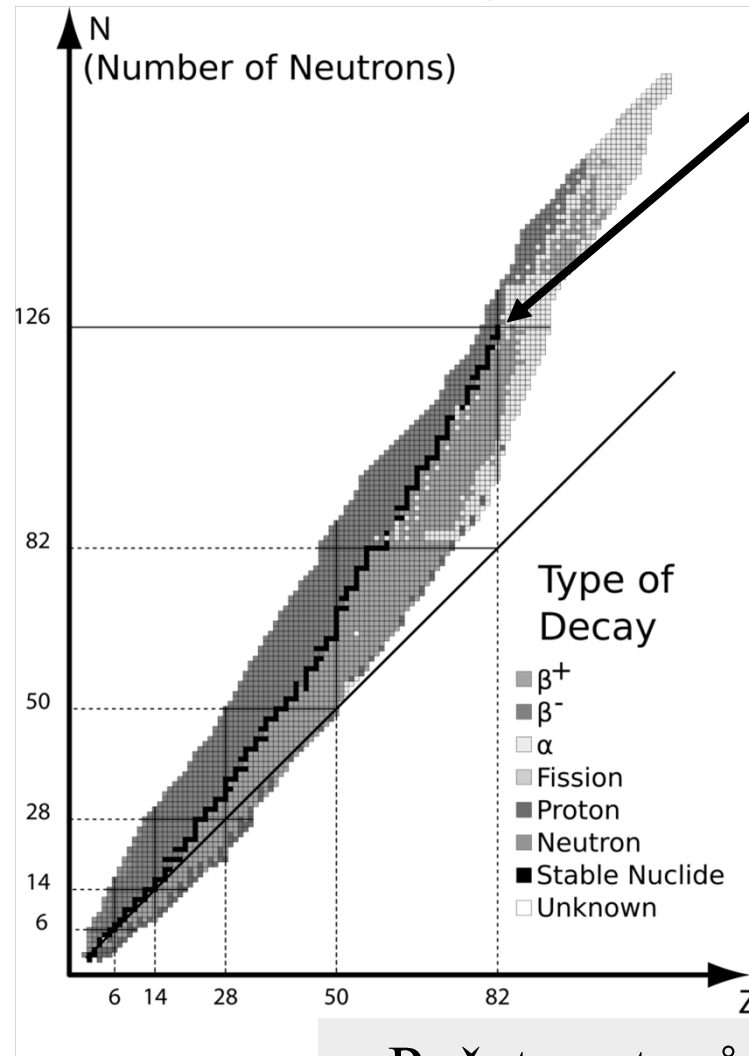
Všechny ostatní nuklidy mají **více n než p**  $N > Z$

**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

Počet neutronů, N



2600 nuklidů  
270 stabilních

Počet protonů, Z



## 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  $Z \leq 83$  (po Bi) mají alespoň jeden stabilní izotop

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

Umělé radioaktivní izotopy připravené jadernými reakcemi

Nuklidy s  $Z \geq 84$  (od Po dále) 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 ( ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^{19}\text{F}$ ,  ${}^{23}\text{Na}$ ,  ${}^{27}\text{Al}$ ,  ${}^{31}\text{P}$ ,  ${}^{59}\text{Co}$ ,  ${}^{127}\text{I}$ ,  ${}^{197}\text{Au}$ ).

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

Sn  $Z = 50$ , 10 stabilních izotopů

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	$m / \text{kg}$	$m / \text{amu}$
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**

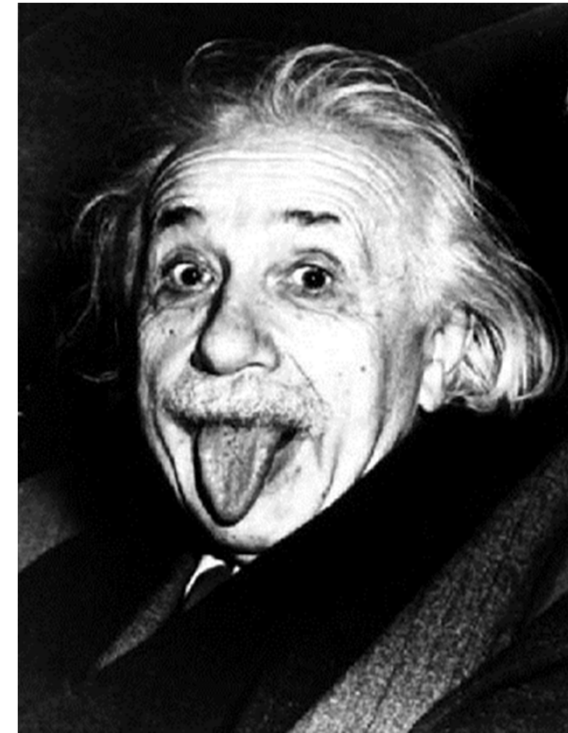
$$M_j < Z m_p + (A-Z) m_n$$

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

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

$$E_v = - 931,5 \Delta m \text{ [MeV]}$$

$$1 \text{ eV} = 1,60210 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$



NP za fyziku 1921

## Vazebná energie jádra, $E_v$

<b>Nuklid</b>	<b><math>E_v</math>, MeV</b>
${}^2\text{H}$	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

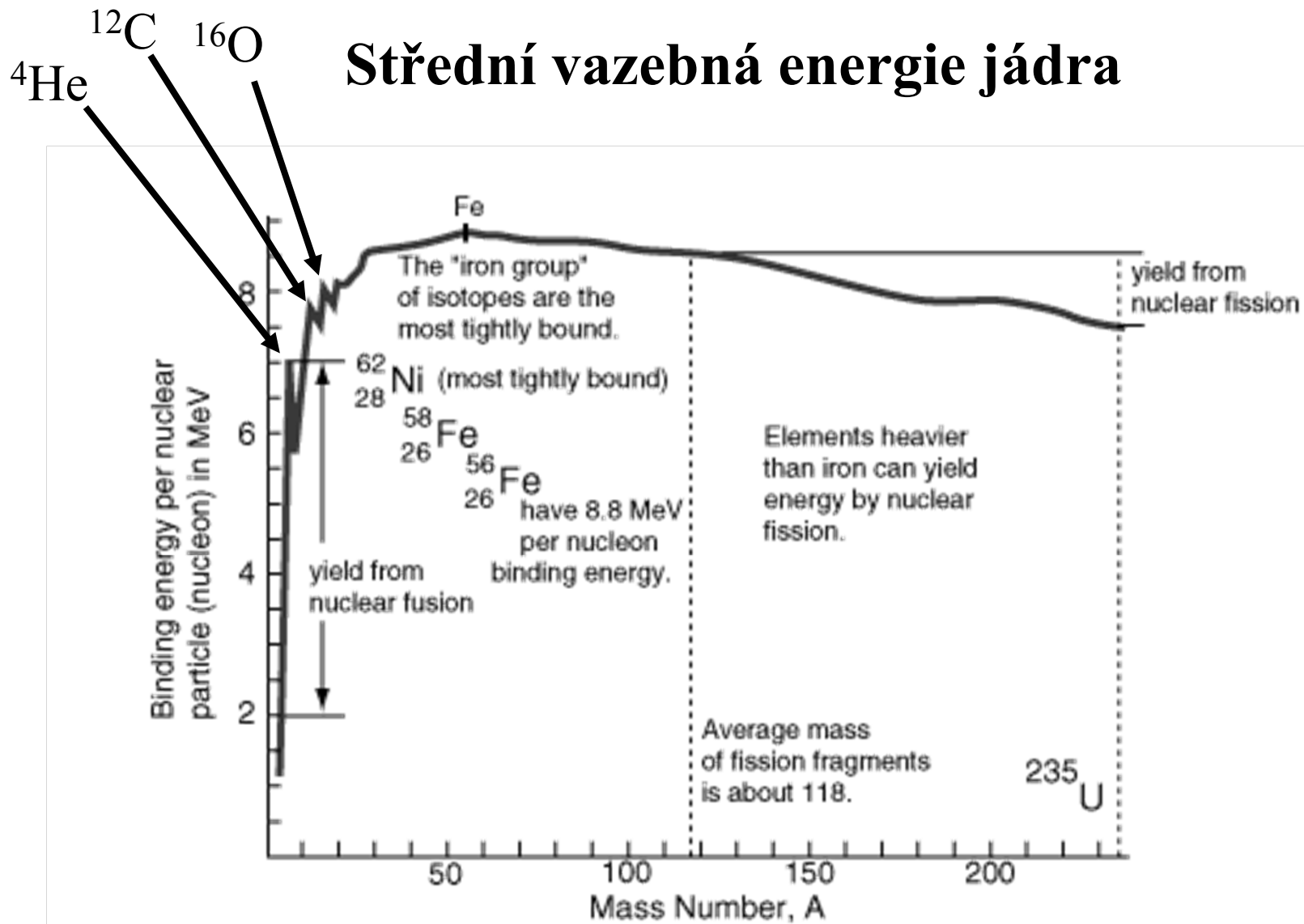
## Střední vazebná energie jádra, $E_v(st)$

Nuklid	$E_v(st)$ , MeV	$E_v$ , MeV
$^2\text{H}$	1.113	2.226
$^4\text{He}$	7.074	28.296
$^{14}\text{N}$	7.476	104.659
$^{16}\text{O}$	7.976	127.619
$^{19}\text{F}$	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

$E_v(st)$  = Energie na  
odtržení 1 nukleonu

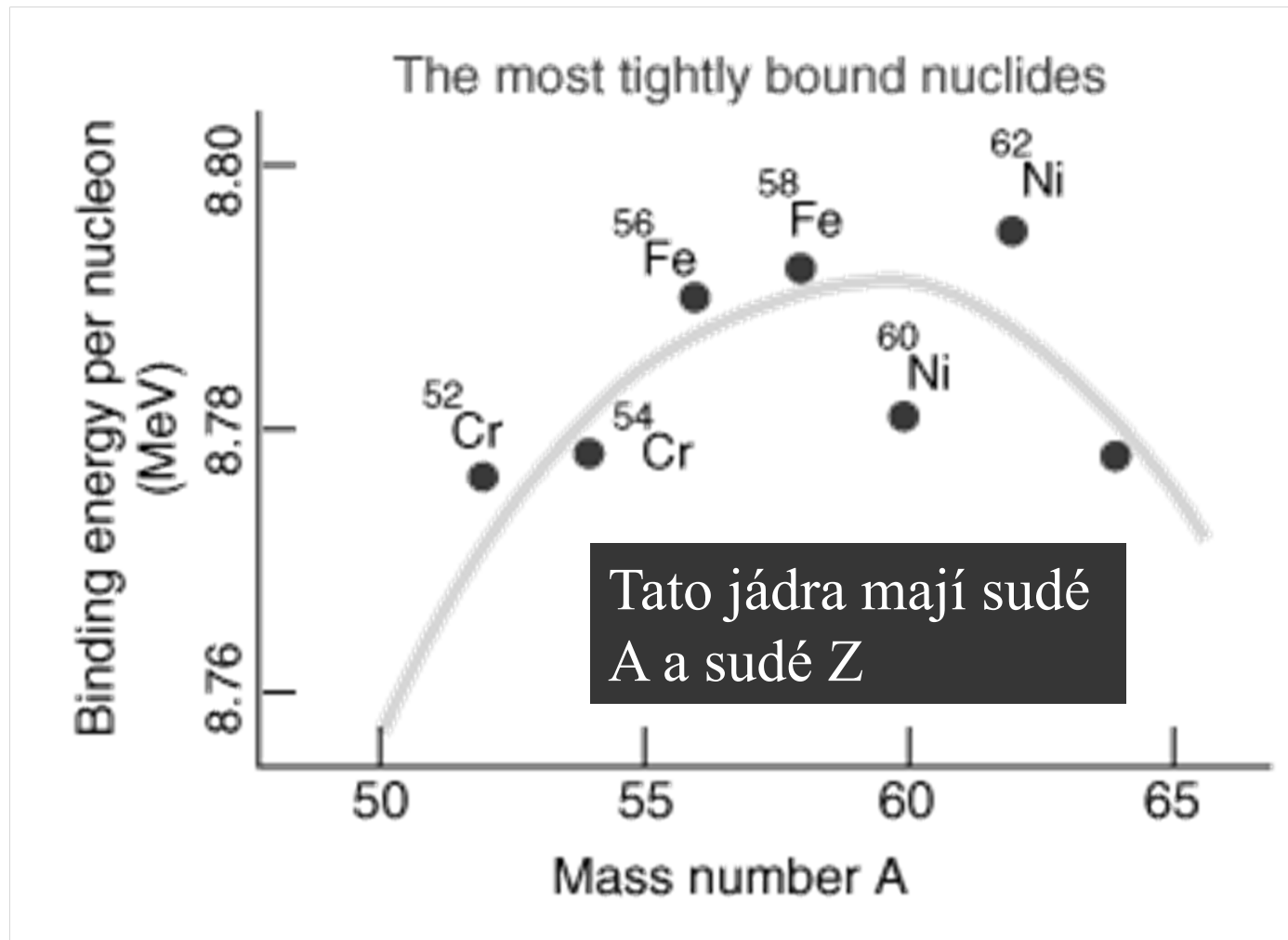
$$E_v(st) = \frac{E_v}{A}$$

# Střední vazebná energie jádra

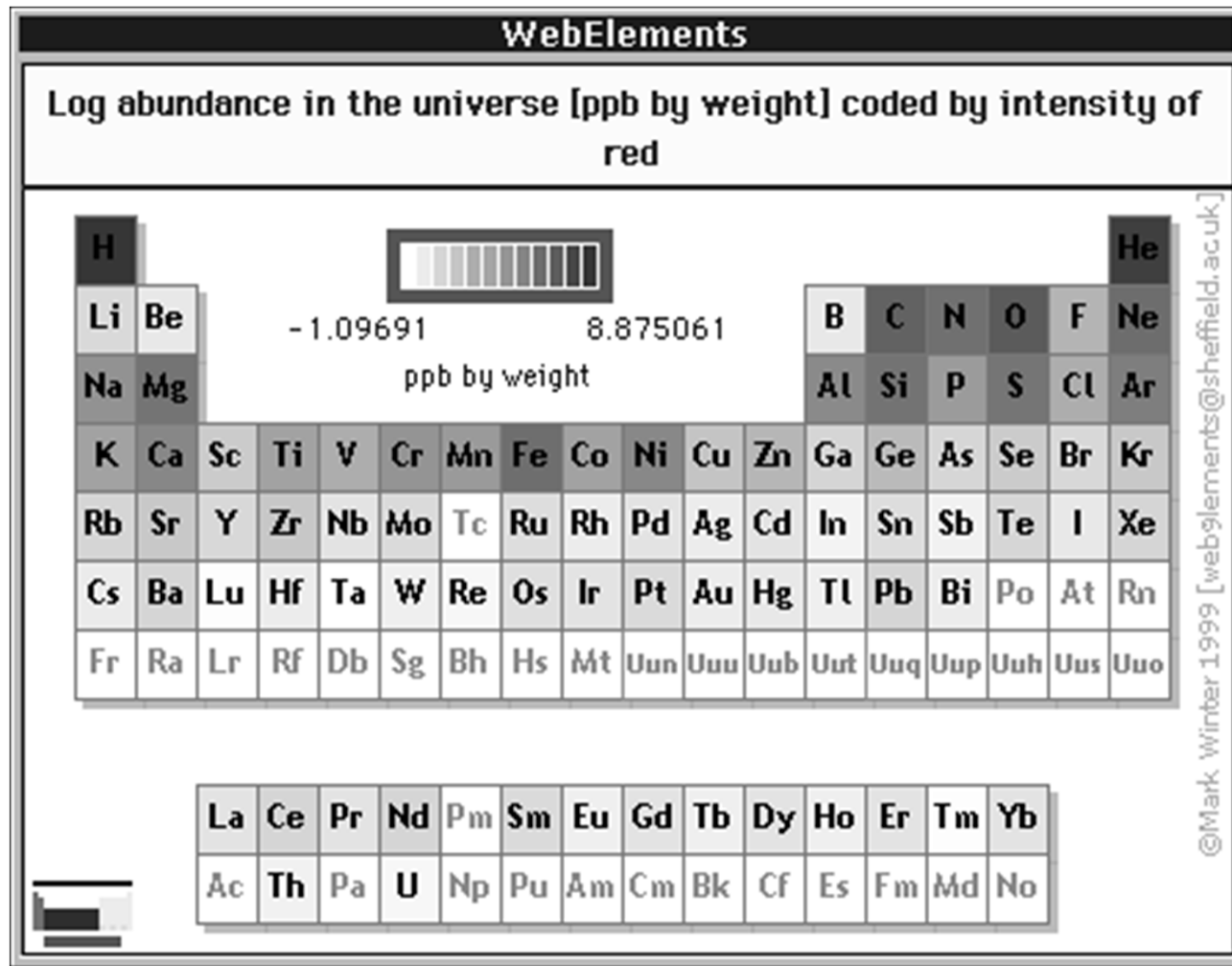




## Střední vazebná energie jádra



# 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 kJ mol<sup>-1</sup> = 4.25 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.

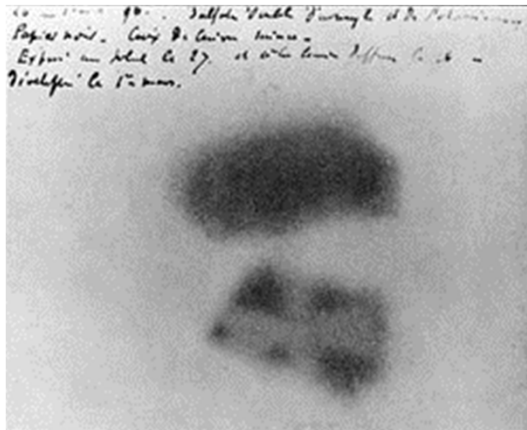
$$E = m \times c^2$$

## 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

# Musée Curie



# Radium



CRÈME THO-RADIA POUDRE

**THO-RADIA**

EMBELLISSANTES PARCE QUE CURATIVES  
à base de thorium et de radium selon la formule du

DOCTEUR ALFRED CURIE  
EXCLUSIVEMENT CHEZ LES PHARMACIENS

CRÈME  
POUDRE

PROCHURE GRATUITE SUR DEMANDE A THO-RADIA, 20 RUE DES CAPUCINES, PARIS

*Burkbraun*  
**RADIUM**  
SCHOKOLADE

zum Essen und Trinken  
(NACH Dr. SENFTNER D.R.P.)

Sind Sie gesund, so erhalten Sie dadurch Ihr kostbares Gut, sind Sie leidend, so erhöhen Sie Ihre Aussicht, wieder gesund zu werden!

Versuchen Sie auch die übrigen Burkbraun-Edelerzeugnisse: Kakao, Schokolade, Pralinen, Sie werden darin Ihre Marke finden, denn alles, was den Namen *Burkbraun* trägt, ist einzigartig köstlich!

**BURK & BRAUN**  
KAKAO-U.SCHOKOLADENFABRIK  
COTTBUS

# Radioaktivita

Má-li jádro příliš málo nebo mnoho neutronů →



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

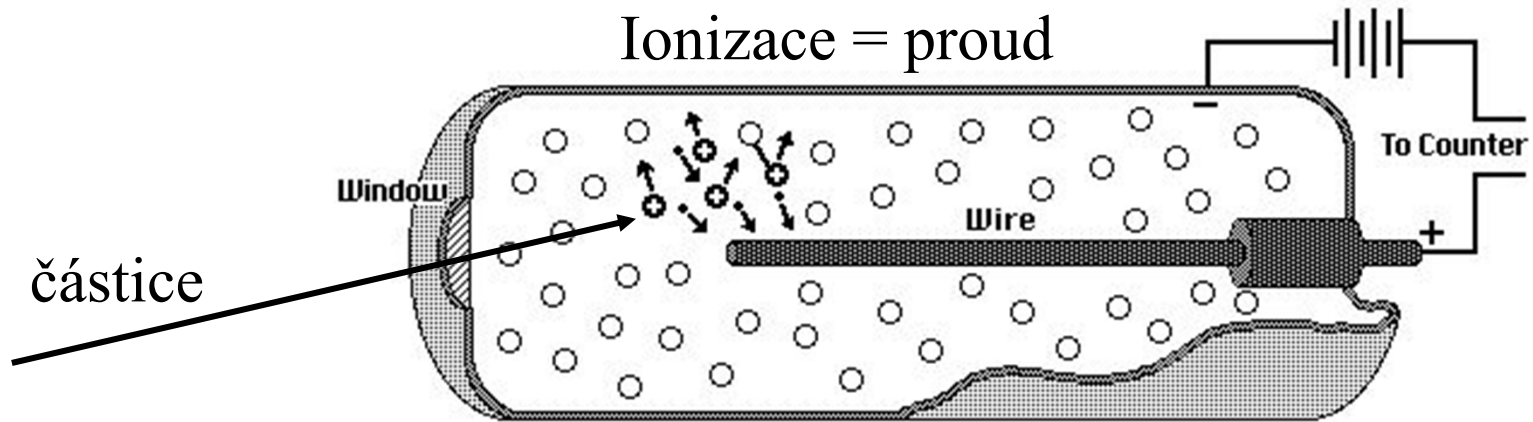
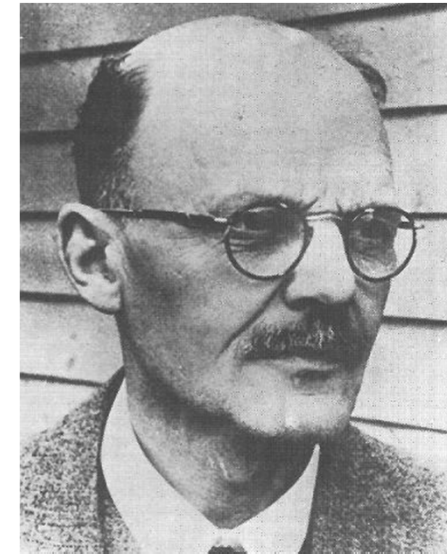
**Radioaktivita** = samovolný děj, produkty mají nižší obsah energie a jsou stabilnější

Stable Isotopes							
99%				1%			
${}^9_6\text{C}$	${}^{10}_6\text{C}$	${}^{11}_6\text{C}$	${}^{12}_6\text{C}$	${}^{13}_6\text{C}$	${}^{14}_6\text{C}$	${}^{15}_6\text{C}$	${}^{16}_6\text{C}$
.13	19	20.6			5730	2.25	.74
sec.	sec.	min.			years	sec.	sec.
Positron decay				beta decay			

# Geigerův čítač



Hans Geiger  
(1882-1945)





## Měření radioaktivity

### Radioaktivita

1 Bq (becquerel) = 1 rozpad za 1 s

(<sup>40</sup>K v lidském těle 4 kBq)      1 Ci (curie) = 3,7 · 10<sup>10</sup> Bq = 37 GBq

### Radiační dávka

1 Gy (gray) = absorpce 1 J v 1 kg

1 Gy = 100 rad

### Ekvivalentní dávka

1 Sv (sievert) = 1 Gy × Q faktor

1 Sv = 100 rem

3 Sv = LD 50/30

2 mSv/rok = dávka od kosmického záření a přirozeného  
radiačního pozadí v ČR

Fotony a elektrony všech energií	Q = 1
Protony	Q = 2
Neutrony	Q je funkcí energie
Alfa částice a jiná jádra	Q = 20

# Jaderné reakce

**Rutherford** – odklon radioaktivního záření v elektrickém a magnetickém poli

Alfa = pozitivně nabitě částice

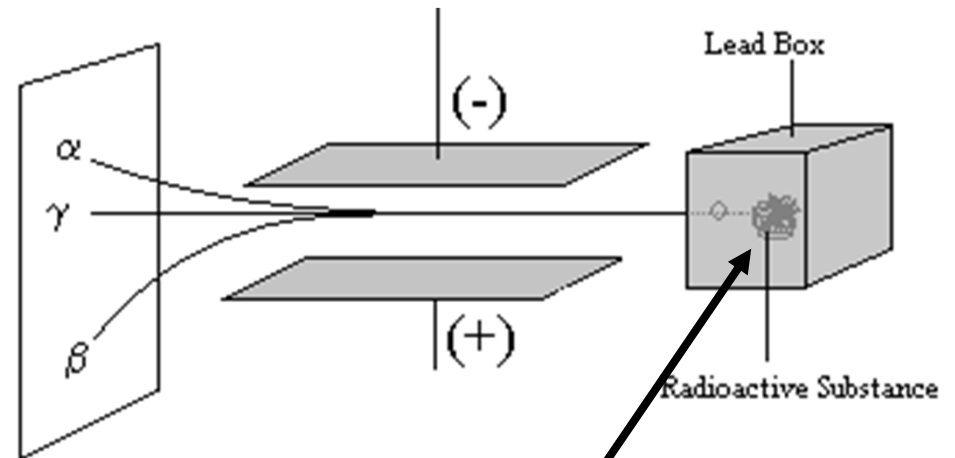
Beta = negativně nabitě částice

Gama = neutrální částice

Tvorba nového nuklidu

**Posuvové zákony – změny v Z a N**

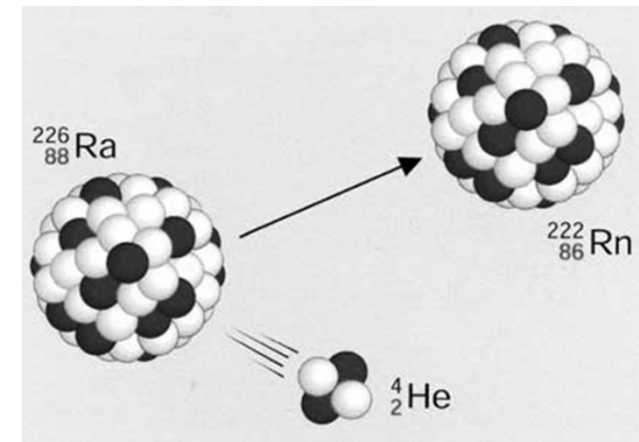
**Posun v periodické tabulce**



## Emise alfa částice

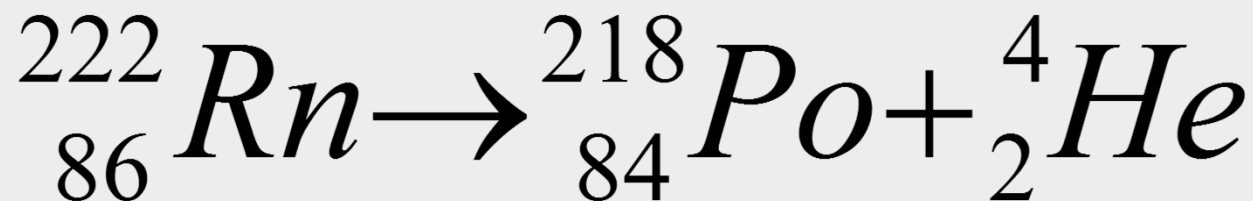
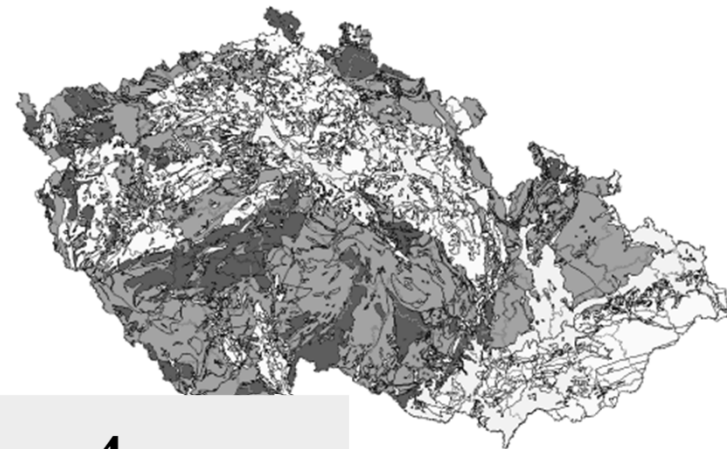
U těžkých jader

Alfa částice opouští jádro rychlostí 10% c



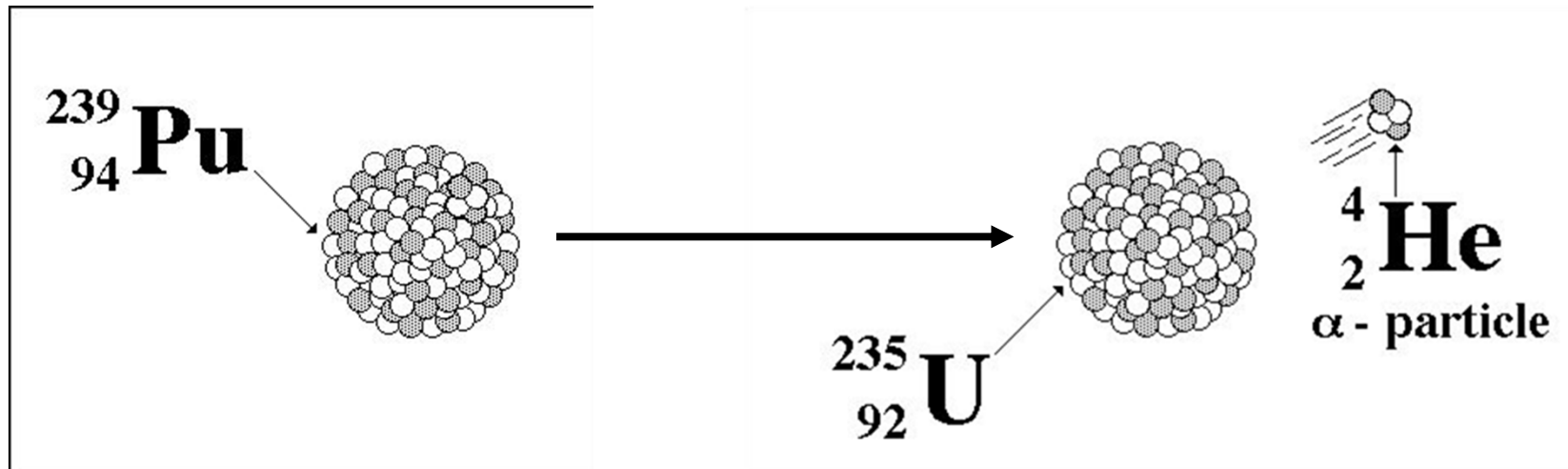
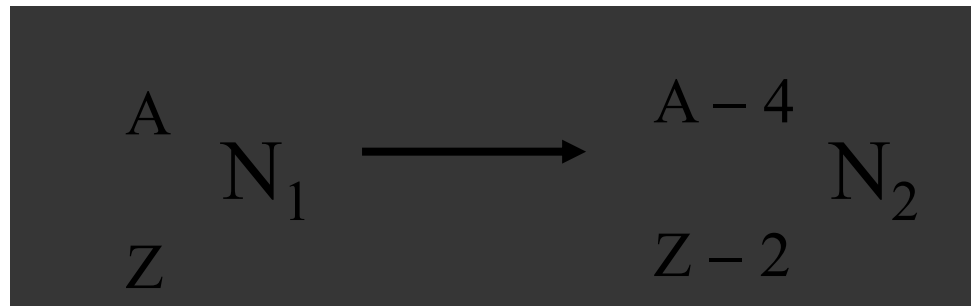
Velmi malá penetrace, několik cm ve vzduchu, zastaví je list papíru

Velmi škodlivé pro buňky  
Inhalace



# Alfa emise

Posun v periodické tabulce o dva prvky doleva



Radium-226

## Alfa emise

Kalifornium-252

Curium-240

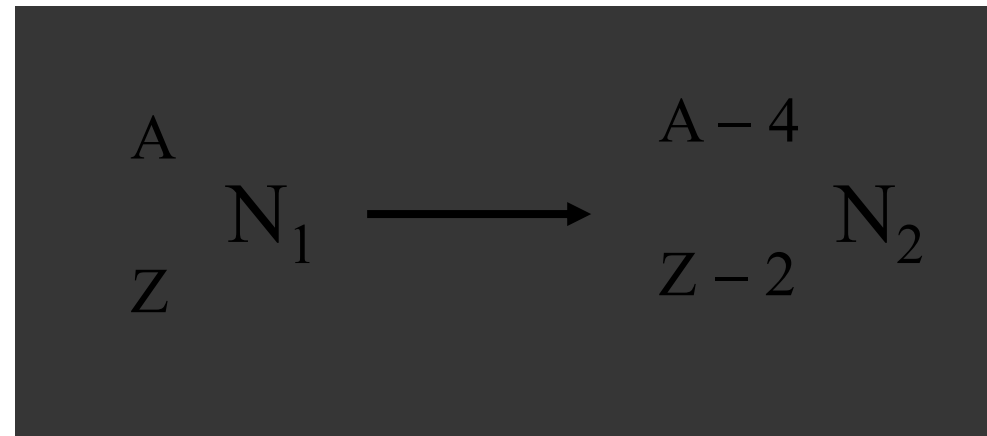
Uran-232

Zlato-185

Thorium-230

Americium-241 detektory kouře

Polonium-210



Posun v periodické tabulce o dva prvky doleva

## Beta částice



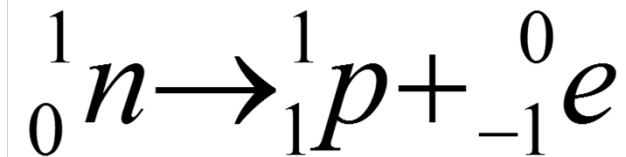
Jádra s nadbytkem neutronů, nedostatek protonů



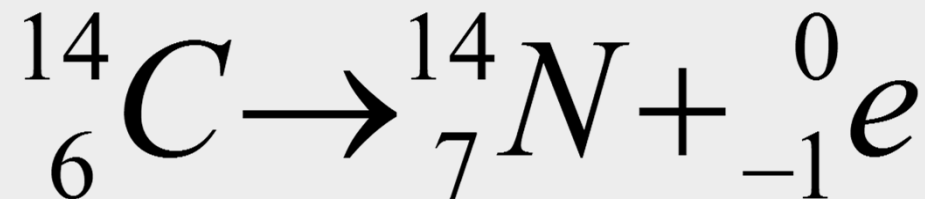
Beta částice jsou elektrony (ale ne z elektronového obalu!!!)

Vznikají rozpadem neutronu

e opouští jádro rychlostí 90% c

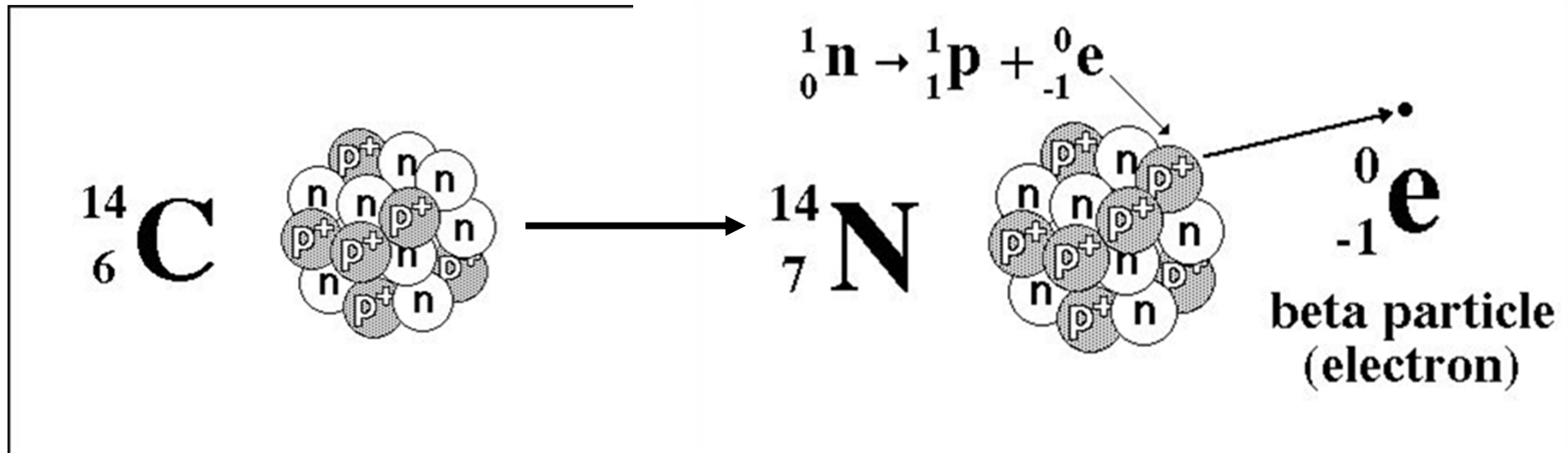
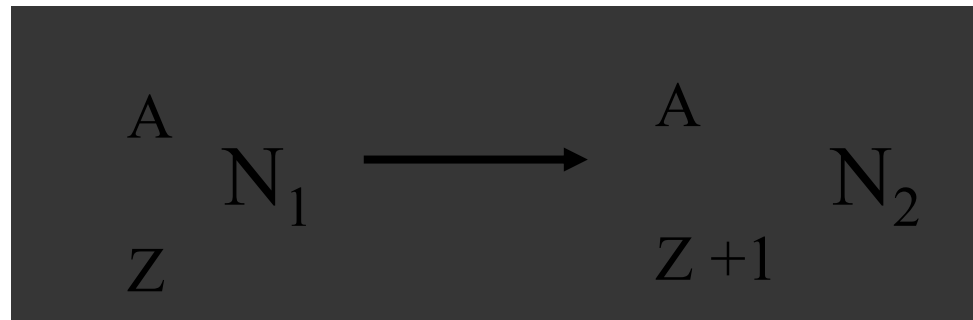


Penetrace větší než alfa, několik m ve vzduchu,  
zastaví je 1 cm Al folie



# Beta emise

Posun v periodické tabulce o jeden prvek doprava



Krypton-87

## Beta emise

Zinek-71

Křemík-32

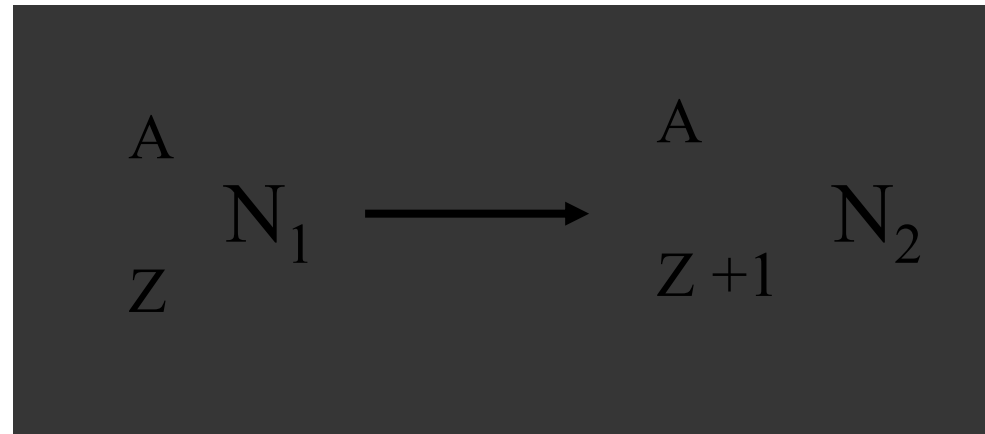
Kobalt-60

Hořčík-27

Sodík-24

Železo-59

Fosfor-32



Posun v periodické tabulce o jeden prvek  
doprava



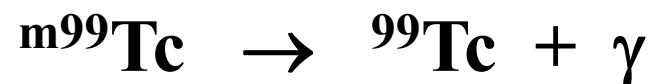
# Gama částice

Jádra s nadbytkem energie emitují gama částice

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

Rychlost světla

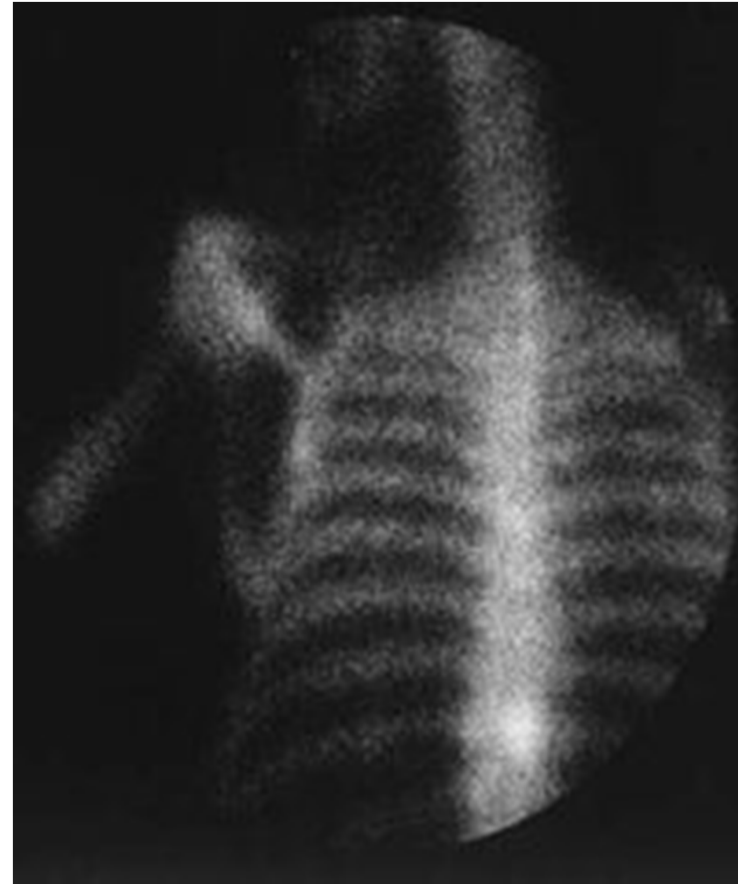
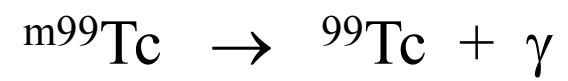
Hluboká penetrace, 500 m ve vzduchu



# Tracer

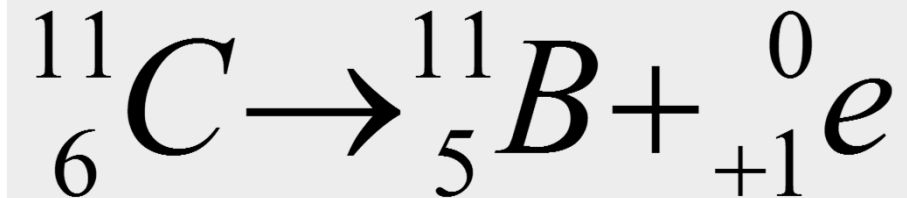
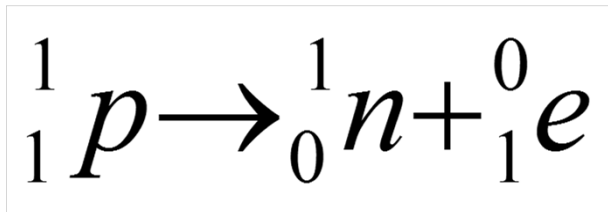
Gyorgy Hevesy 1913

NP 1943



# Positronová emise ${}^0_1e$

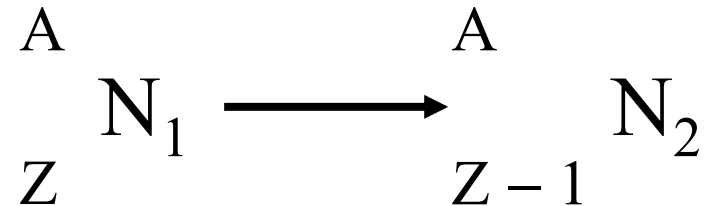
Jádra s nadbytkem protonů, nedostatek neutronů



Positron (antičástice) 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

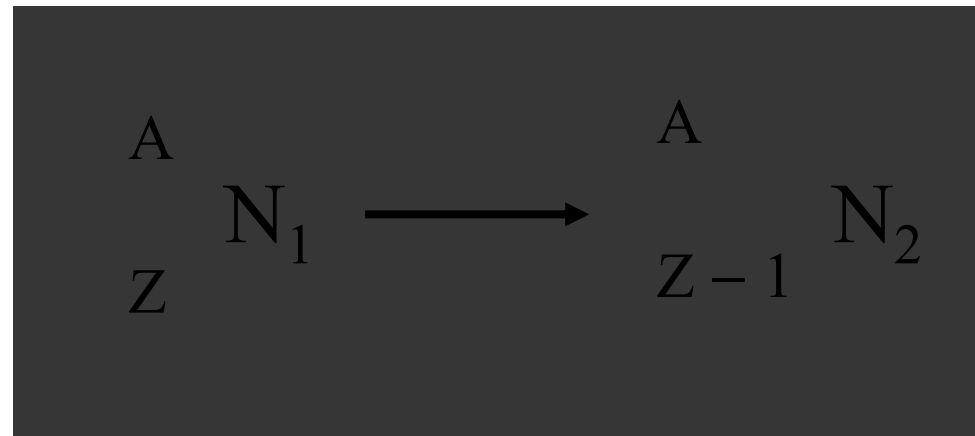
Praseodym-140

Neon-18

Kyslík-15

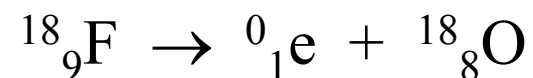
Dusík-13

Měď-59



Posun v periodické tabulce o jeden prvek doleva

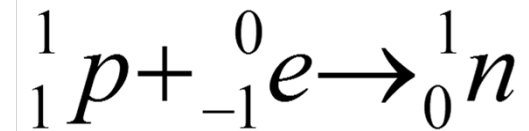
PET



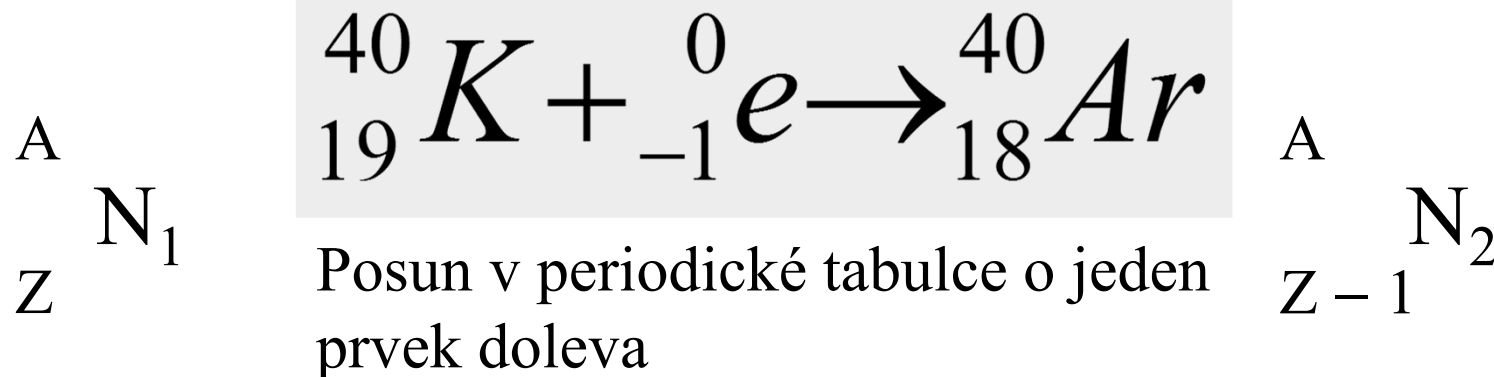
## Elektronový záchyt

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

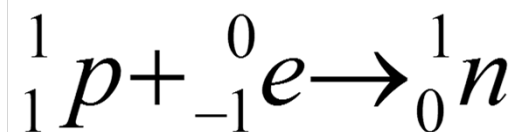


Rubidium-83

## Elektronový záchyt

Vanad-48

Gallium-67

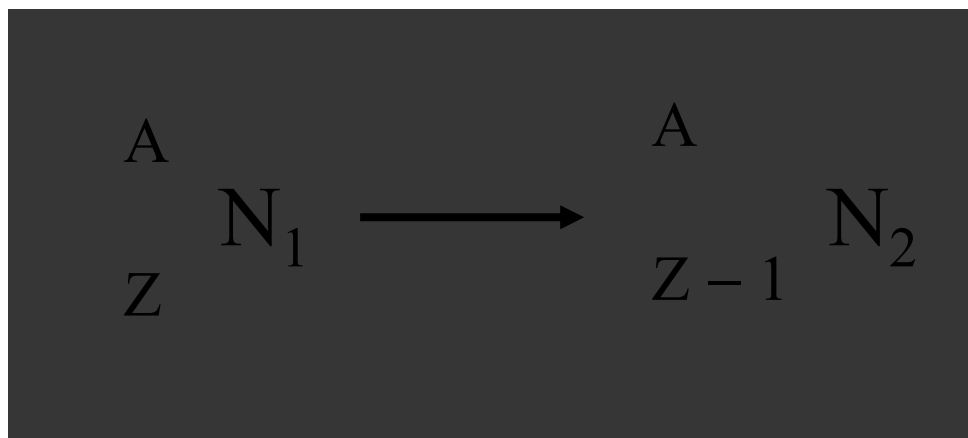


Beryllium-7

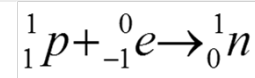
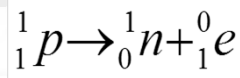
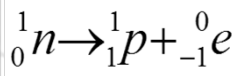
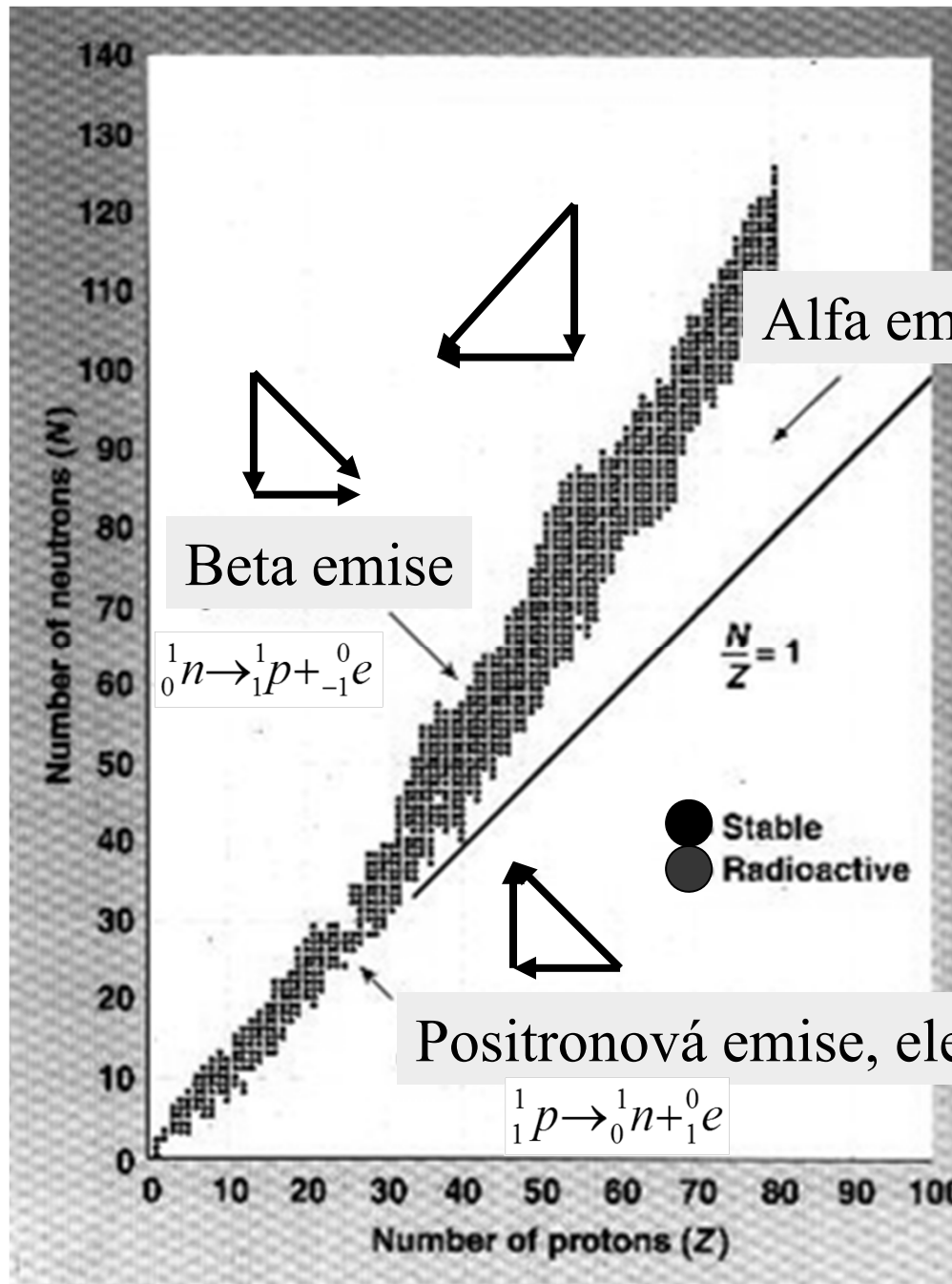
Vápník-41

Kobalt-57

Selen-72



Posun v periodické tabulce o jeden prvek doleva



# Rozpadové řady

Thoriová  $^{232}\text{Th}$  -  $^{208}\text{Pb}$

$$A = 4n$$

Neptuniová (umělá)  $^{241}\text{Pu}$  -  $^{209}\text{Bi}$

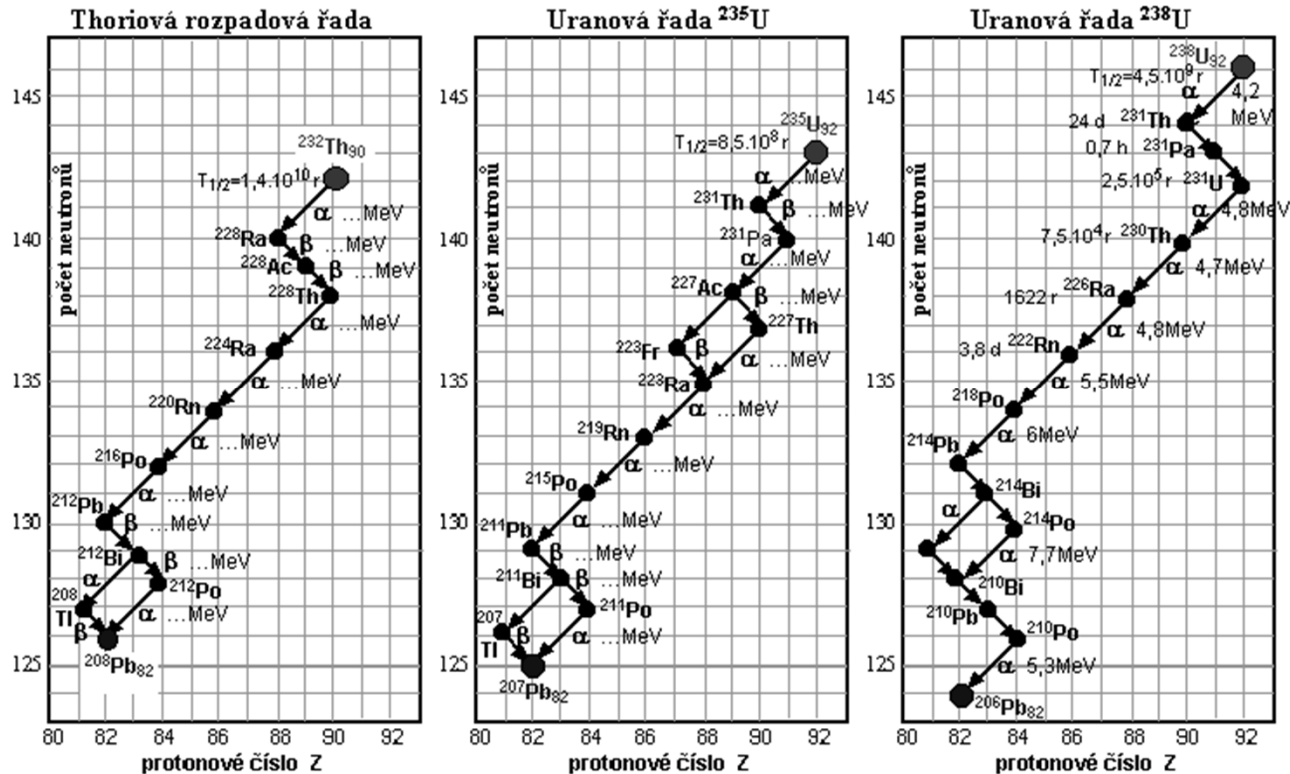
$$A = 4n + 1$$

Uranová  $^{238}\text{U}$  -  $^{206}\text{Pb}$

$$A = 4n + 2$$

Aktinuranová  $^{235}\text{U}$  -  $^{207}\text{Pb}$

$$A = 4n + 3$$





## Samovolné štěpení

Těžké jádro se rozpadá na dva nebo tři fragmenty a jeden nebo více neutronů



$^{252}\text{Cf}$  - průmyslová výroba (ORNL: 0,25 g/rok) a využití

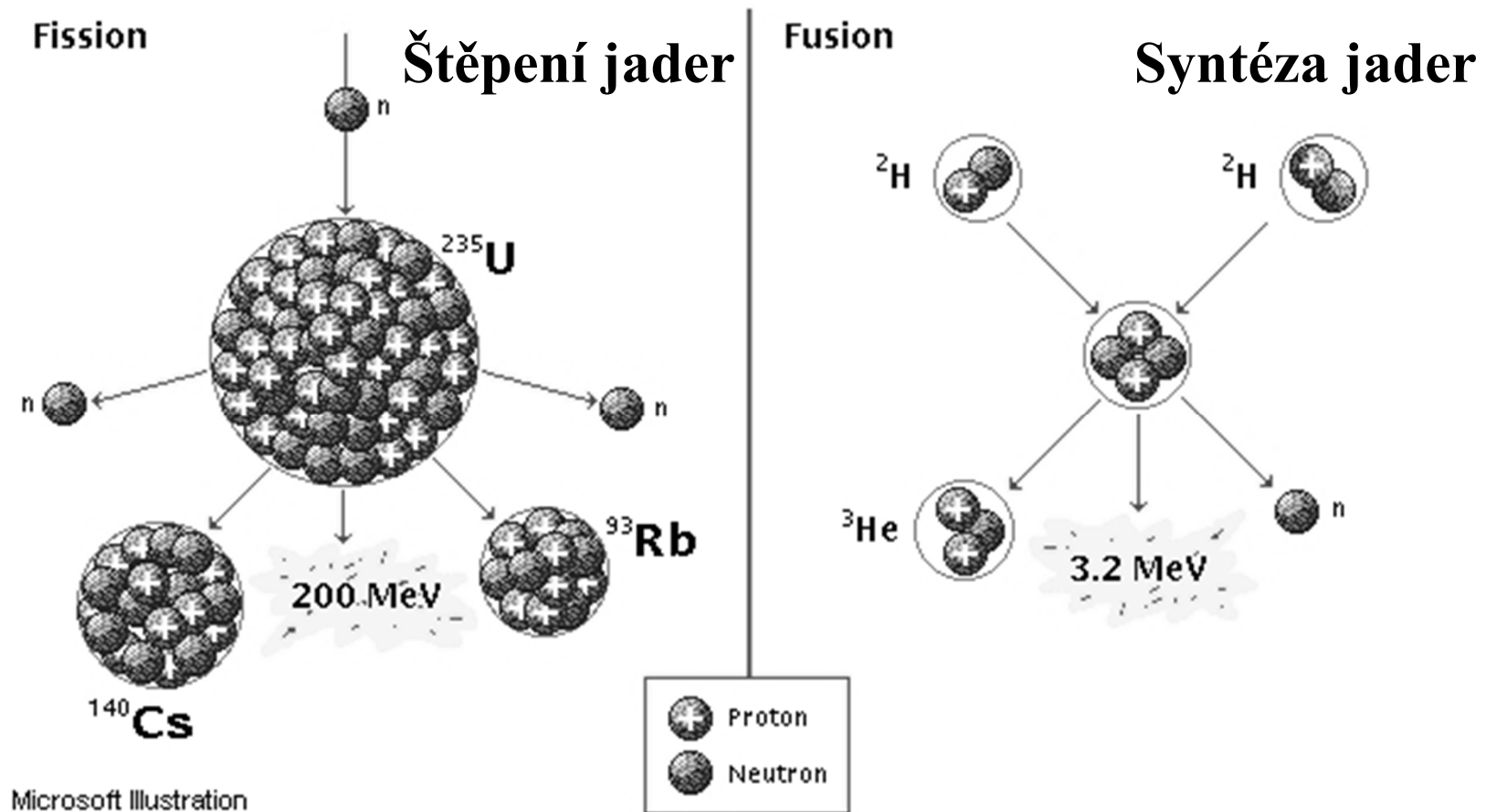
- Alfa-emise 97 %
- Samovolné štěpení 3 % (~3,7 neutronu)

Poločas rozpadu 2,65 let

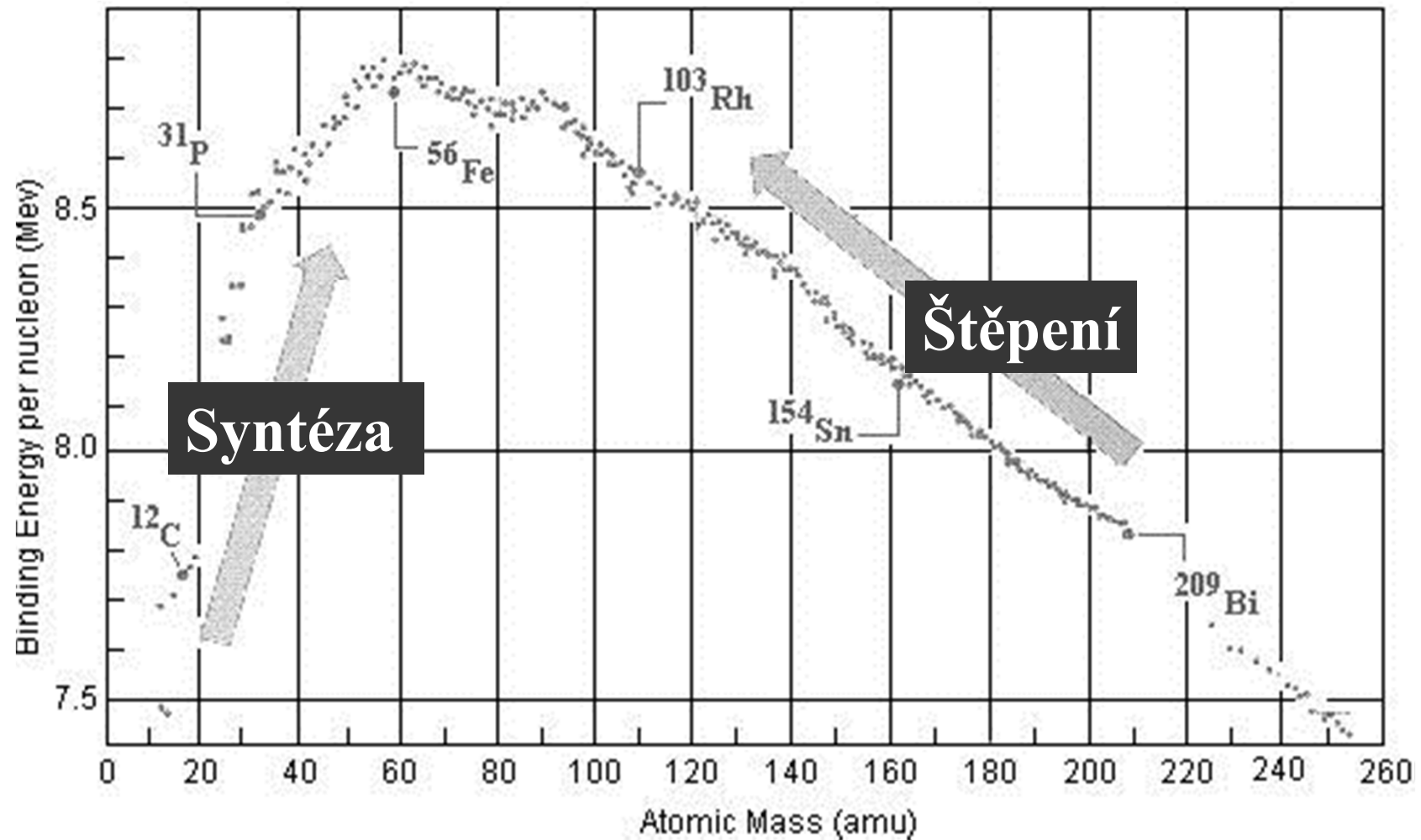
Zdroj neutronů pro start reaktorů, aktivační analýzu, difrakci, detektory zlata, výbušnin, vody a ropy, terapii rakoviny, BNCT<sup>37</sup>

# Syntéza a štěpení jader

Pro získání energie



# Syntéza a štěpení jader - vazebná energie jádra



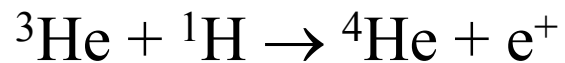
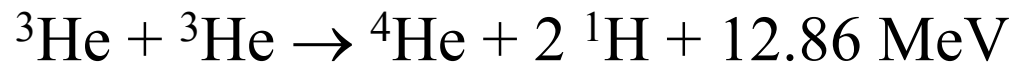
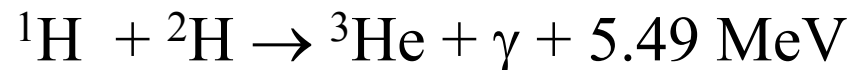
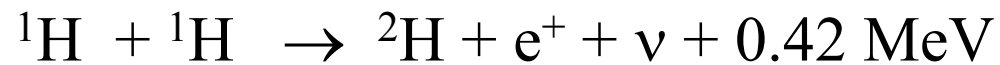
# Syntéza jader ve vesmíru

Big Bang

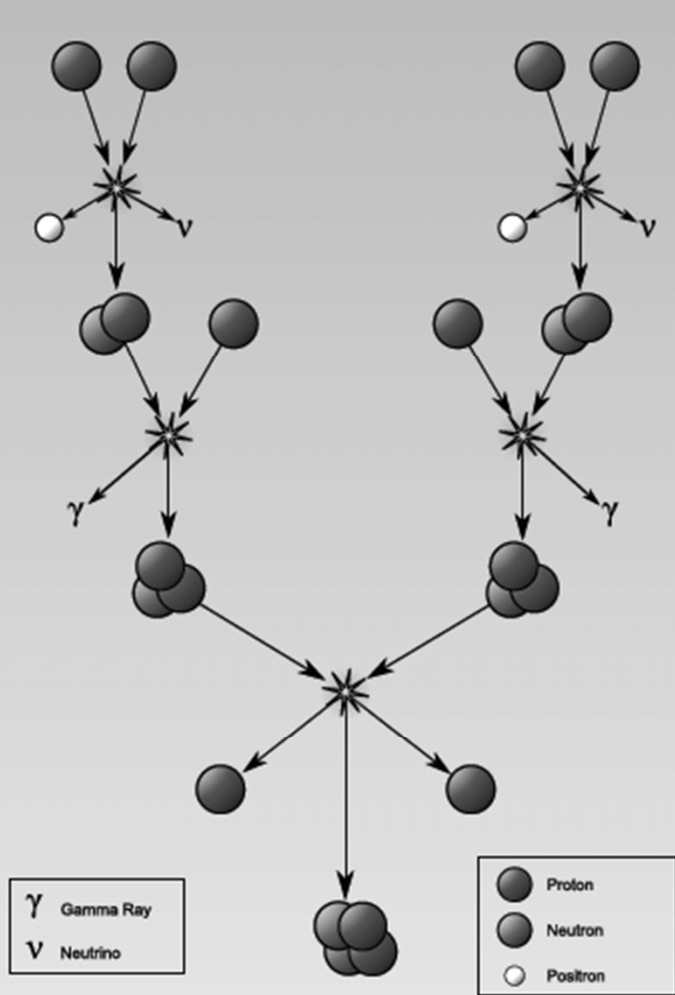


Slunce (teplota =  $2 \times 10^6$  K v nitru, energie z PP nebo CN cyklu)

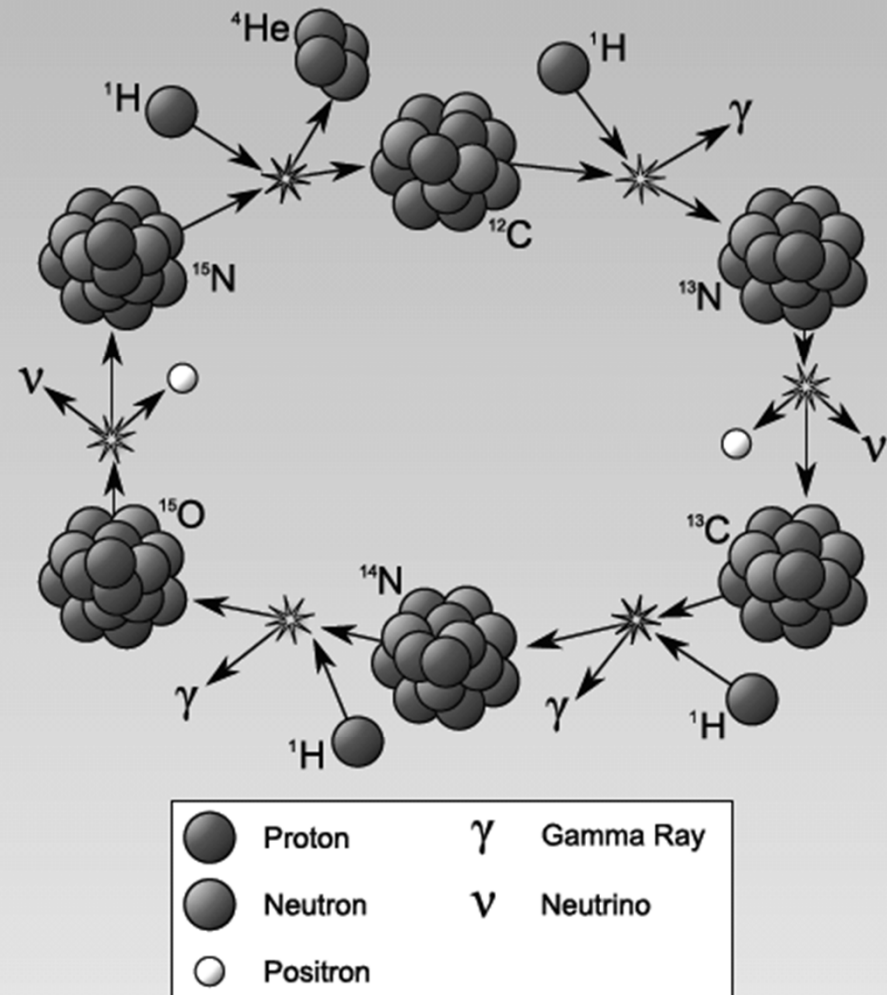
PP cyklus



## PP cyklus

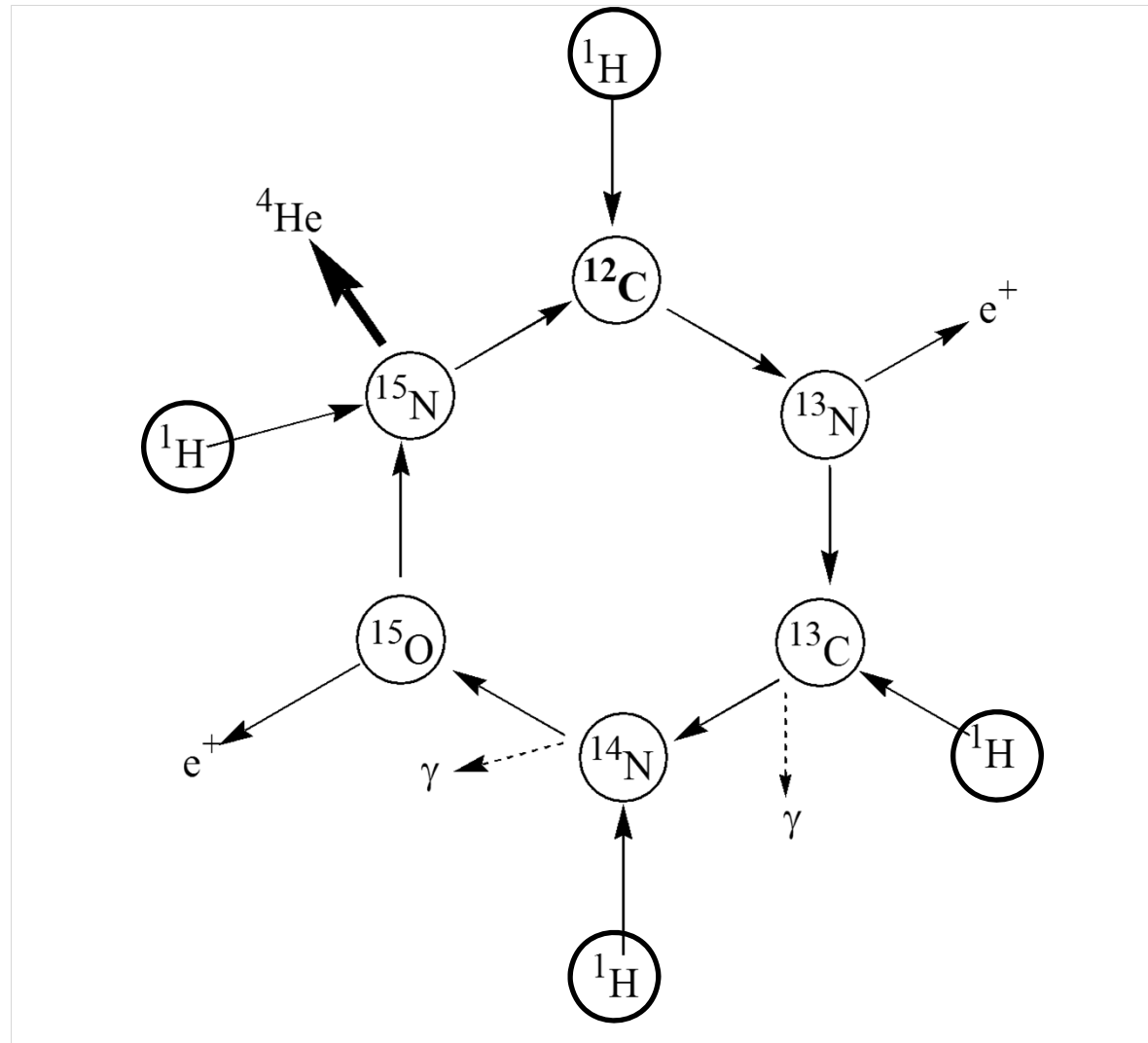
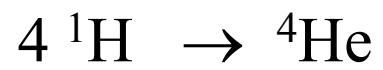


## CN cyklus



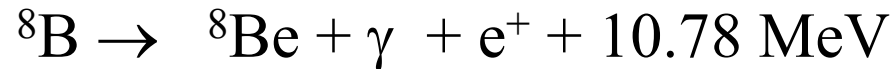
# Uhlíkový cyklus

CN cyklus



## Syntéza jader ve vesmíru

Slunce → rudý obr → bílý trpaslík



# Syntéza jader ve vesmíru

Těžké hvězdy

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

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

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

Fe jádra nejstabilnější

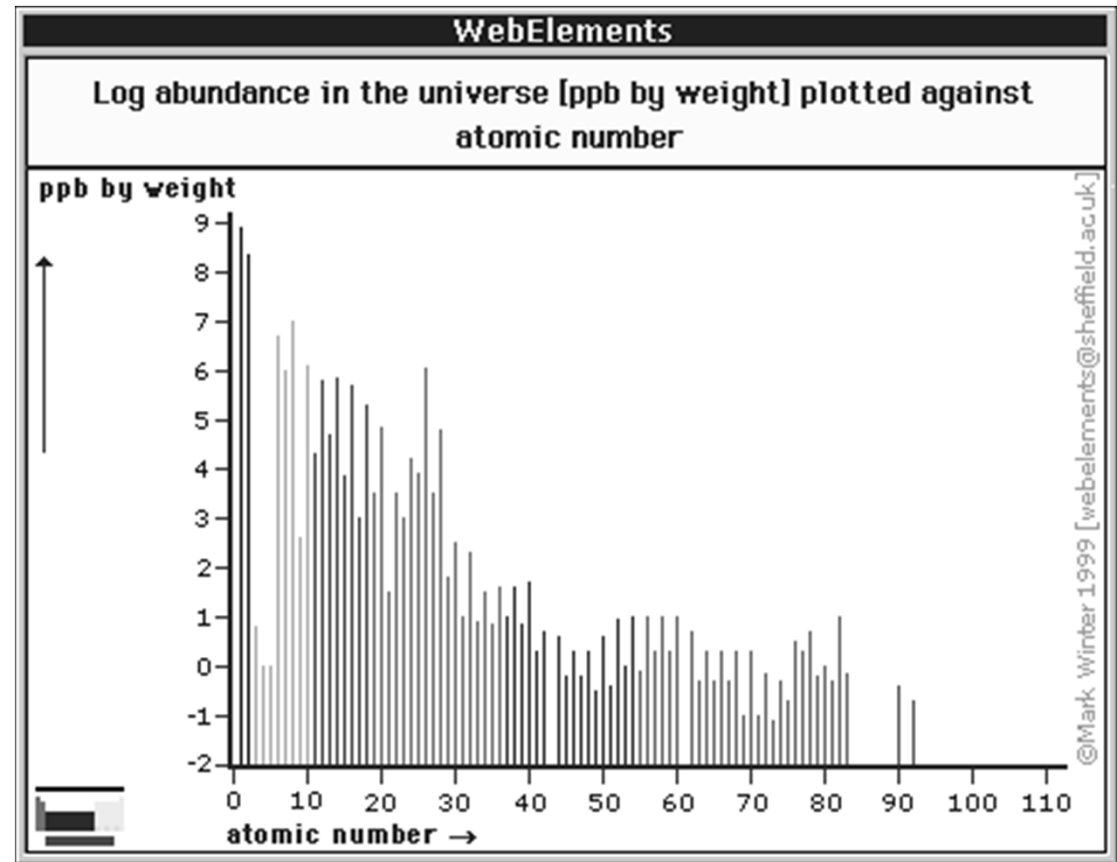
Jak dál?

Vysoké toky neutronů

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

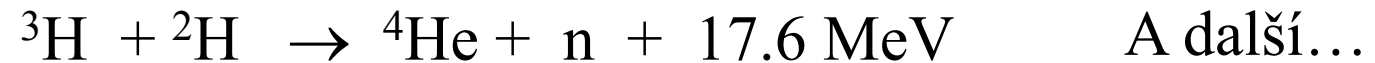
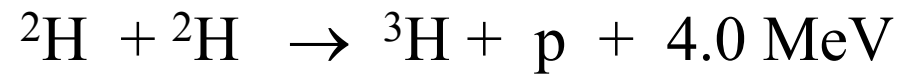
Výbuch supernovy

$\text{Pb} \rightarrow \text{Bi} \rightarrow \text{U}$





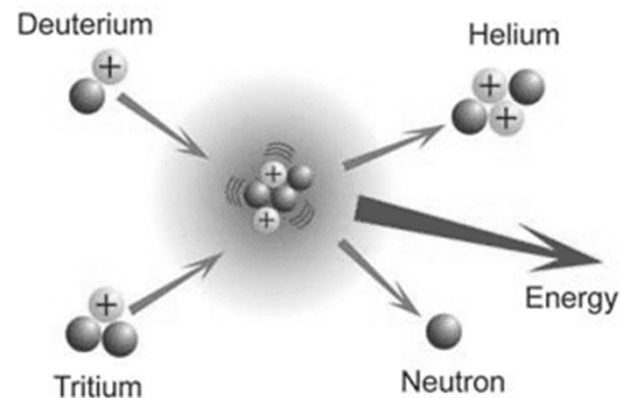
## Termojaderné reakce



ITER Cadarache, Francie

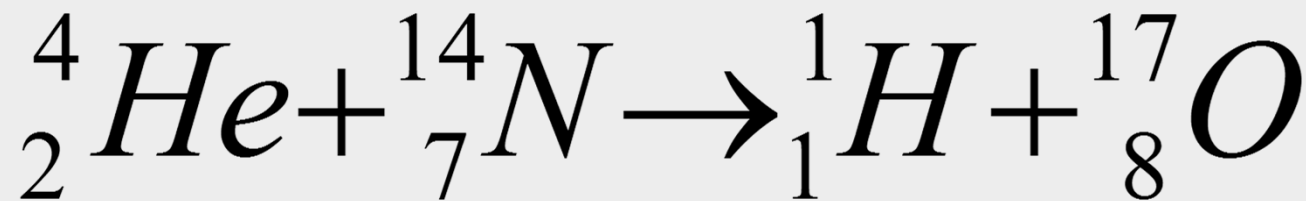
National Ignition Facility, USA

1952 H-bomba Eniwetok



# Transmutace

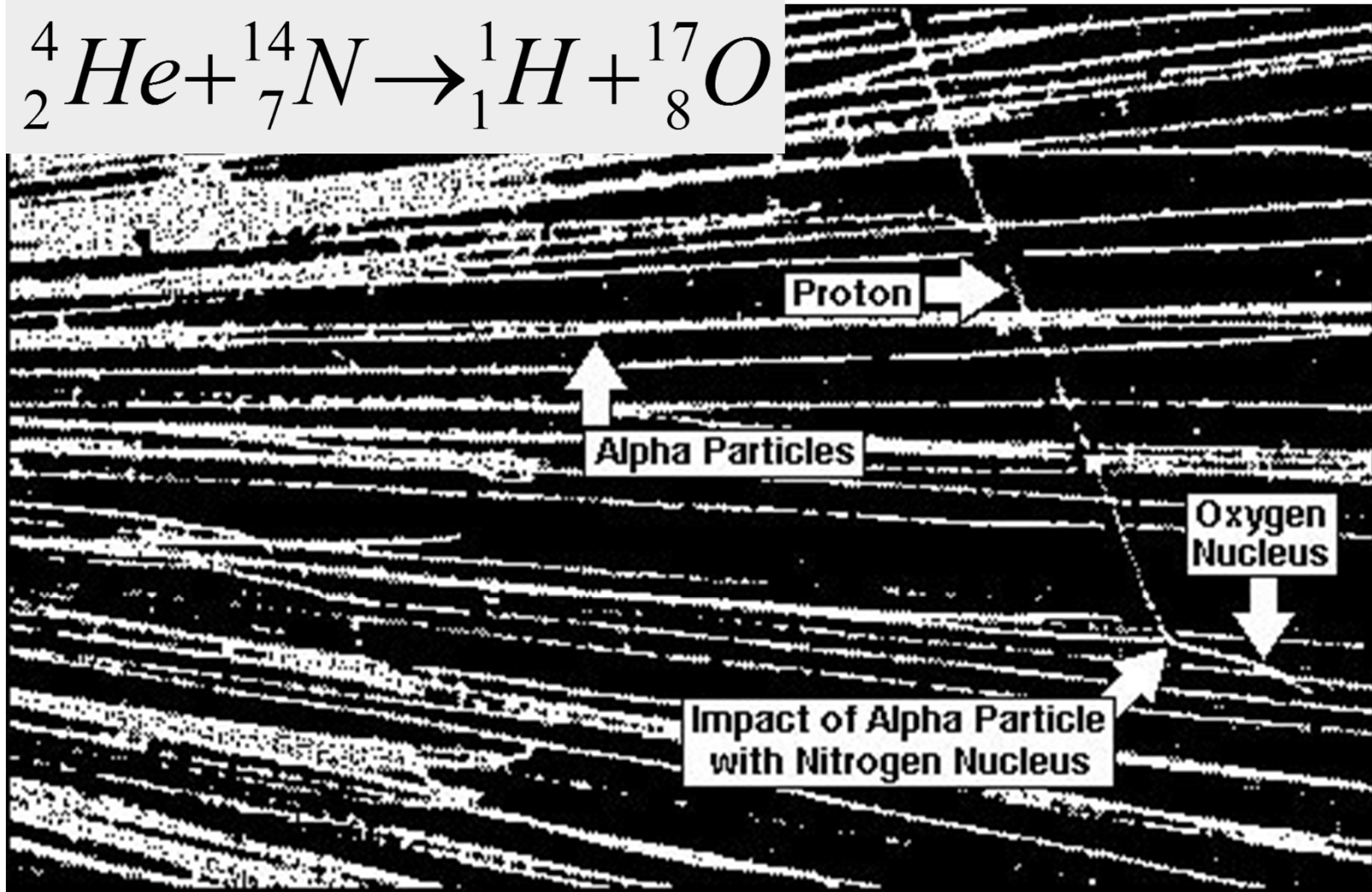
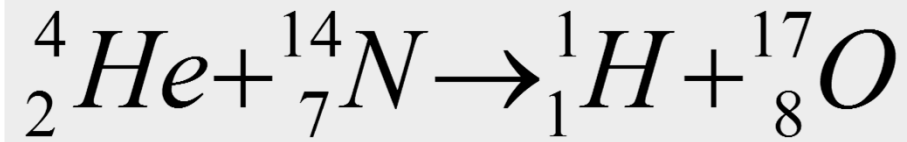
1919, Rutherford, první umělá příprava prvku



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



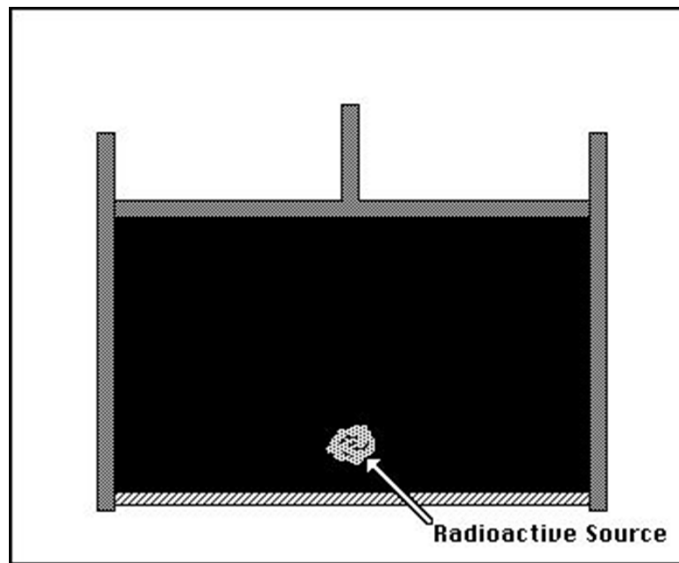
## Transmutace



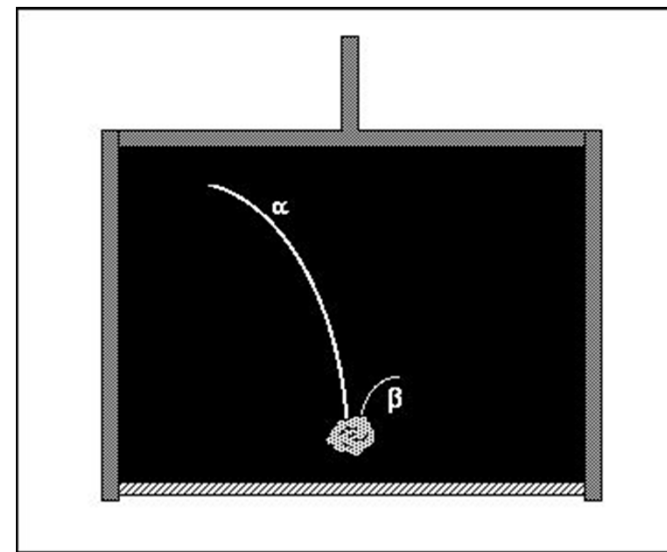


# Wilsonova mlžná komora

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>48</sub>  
atomech – kondenzační stopa

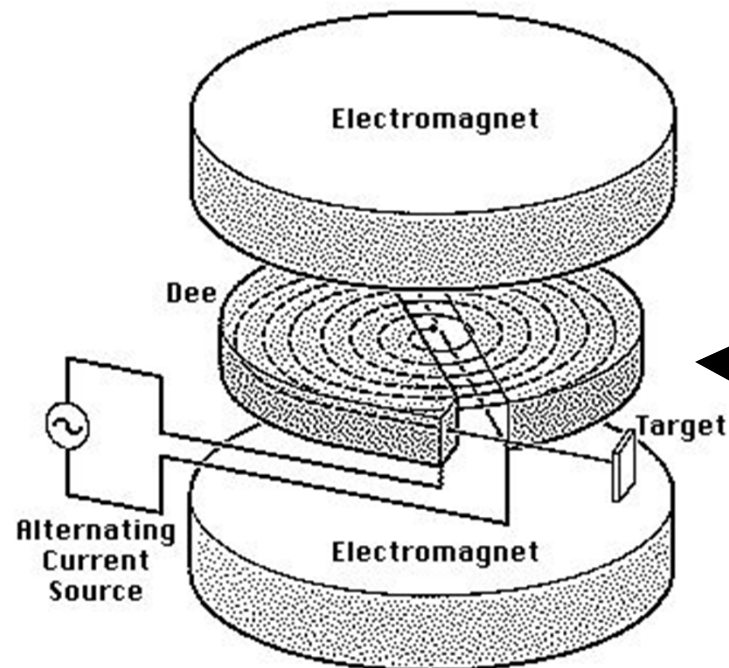
1929

## Cyklotron

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

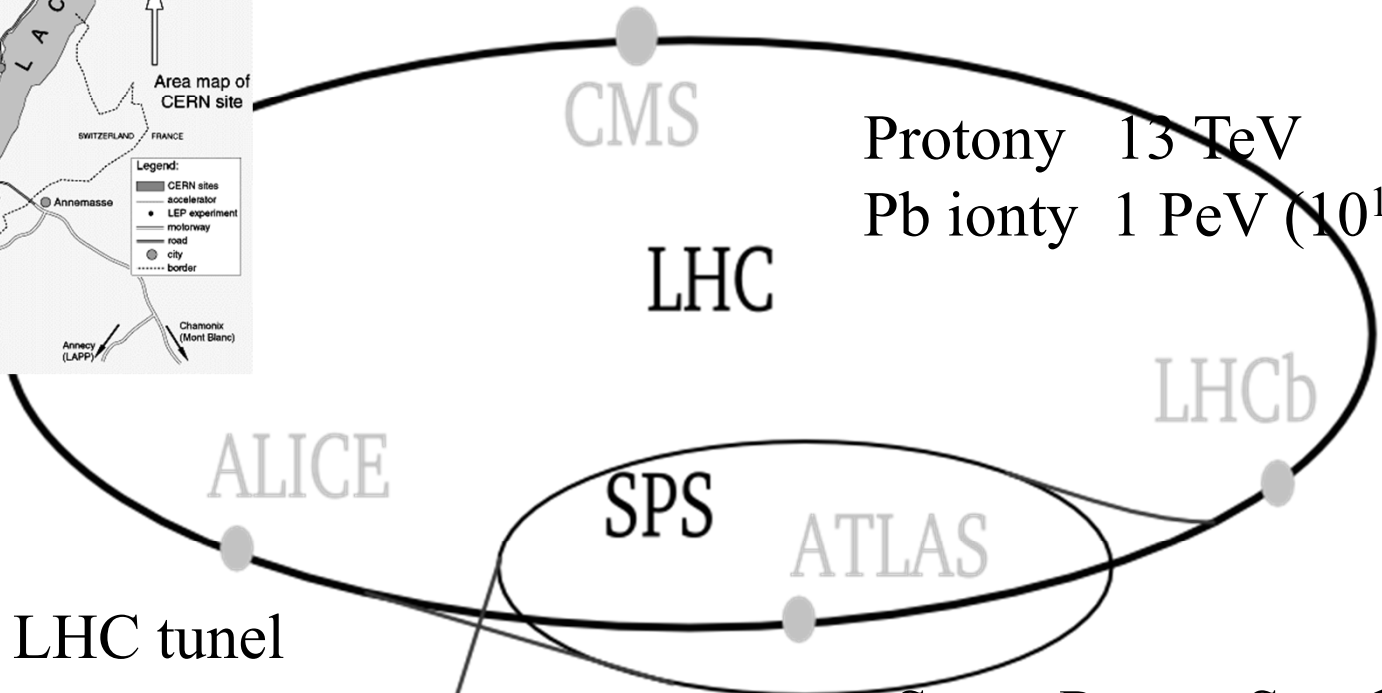


Ernest O. Lawrence  
(1901-1958)  
NP za fyziku 1939



← duté elektrody tvaru D

# Large Hadron Collider



Protony 13 TeV  
 Pb ionty 1 PeV ( $10^{15}$  eV)

27 km LHC tunel

Super Proton Synchrotron

Lineární urychlovače  
 (protony a ionty)

PS  
 Proton Synchrotron

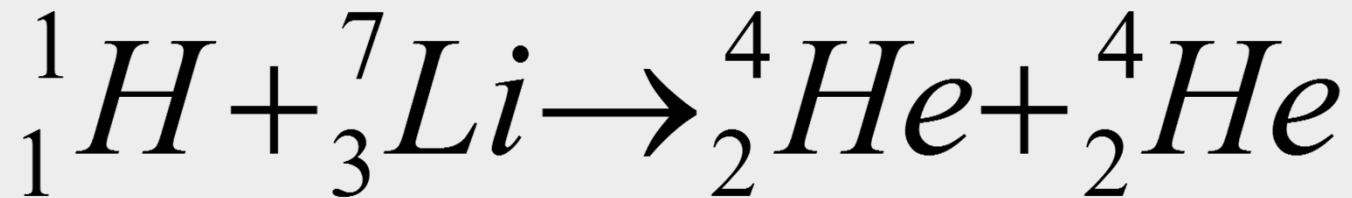
## Štěpení jader

1932

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

Kaskádový urychlovač, protony 800 keV

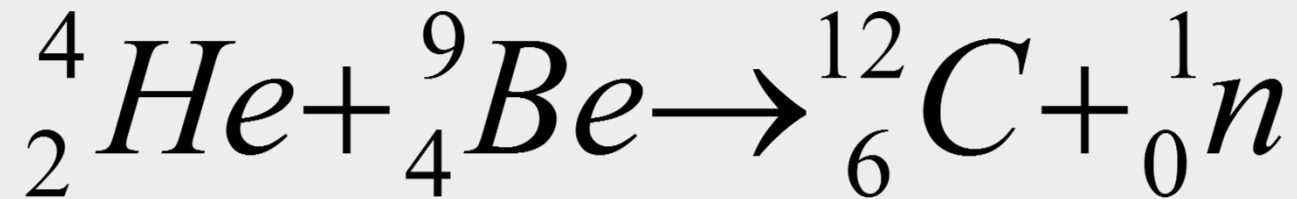
První štěpení stabilního jádra urychlenou částicí



1951 společně NP za fyziku

1932

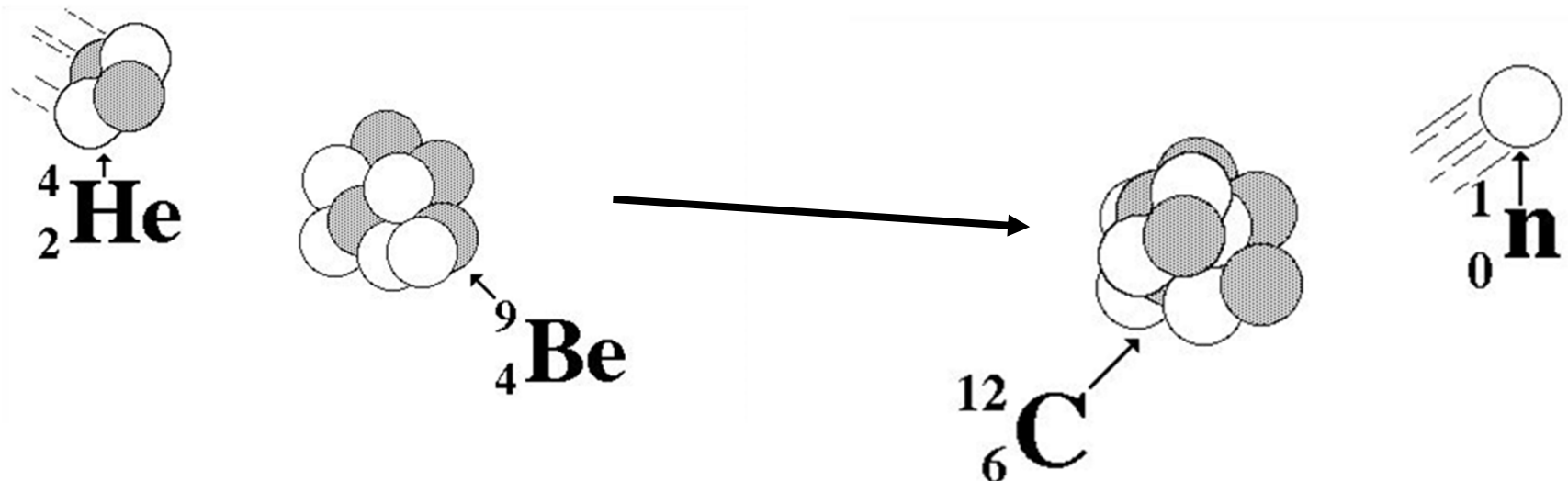
## Objev neutronu



neutron = částice s nulovým nábojem, spin  $\frac{1}{2}$   
 $m = 1,67470 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

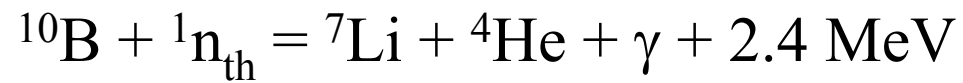
James Chadwick  
(1891-1974)

NP za fyziku 1935

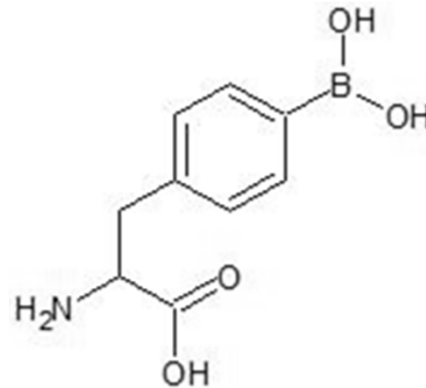
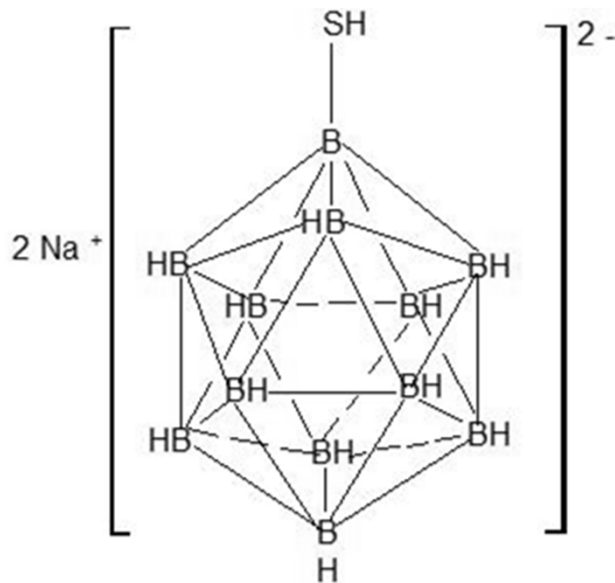




# BNCT = Boron Neutron Capture Therapy



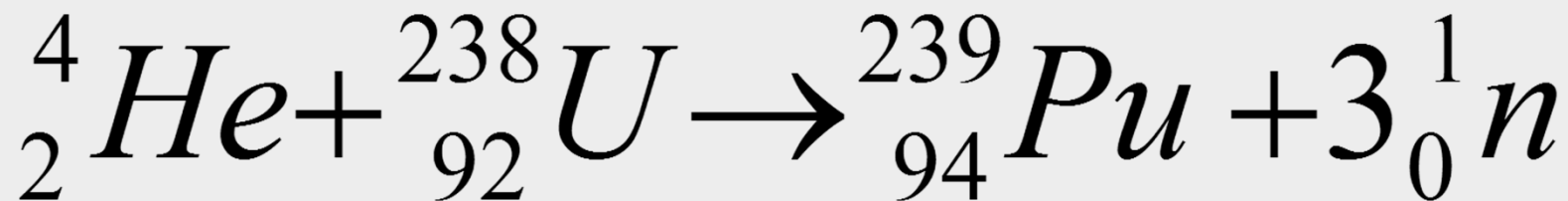
Dolet v tkáni asi 12  $\mu\text{m}$  – průměr buňky



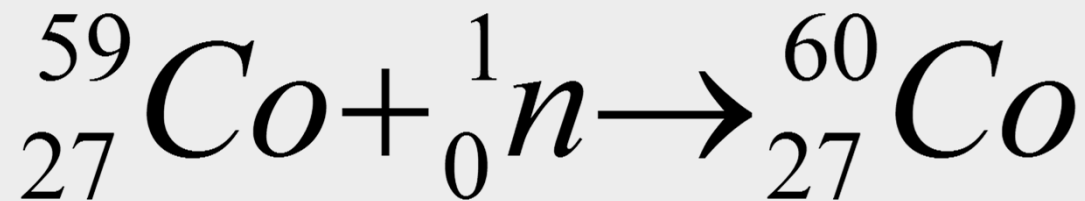
Akumulace v tumoru  
(20  $\mu\text{g/g}$  tumoru)

## Transmutace

Cyklotron



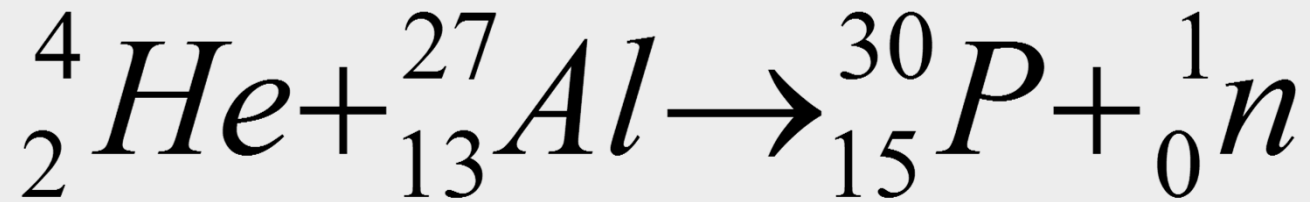
Bombardování neutrony

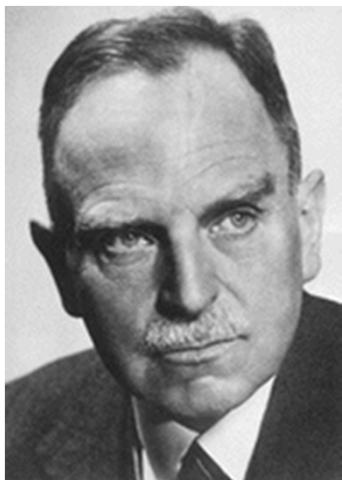


1933

## Umělá radioaktivita

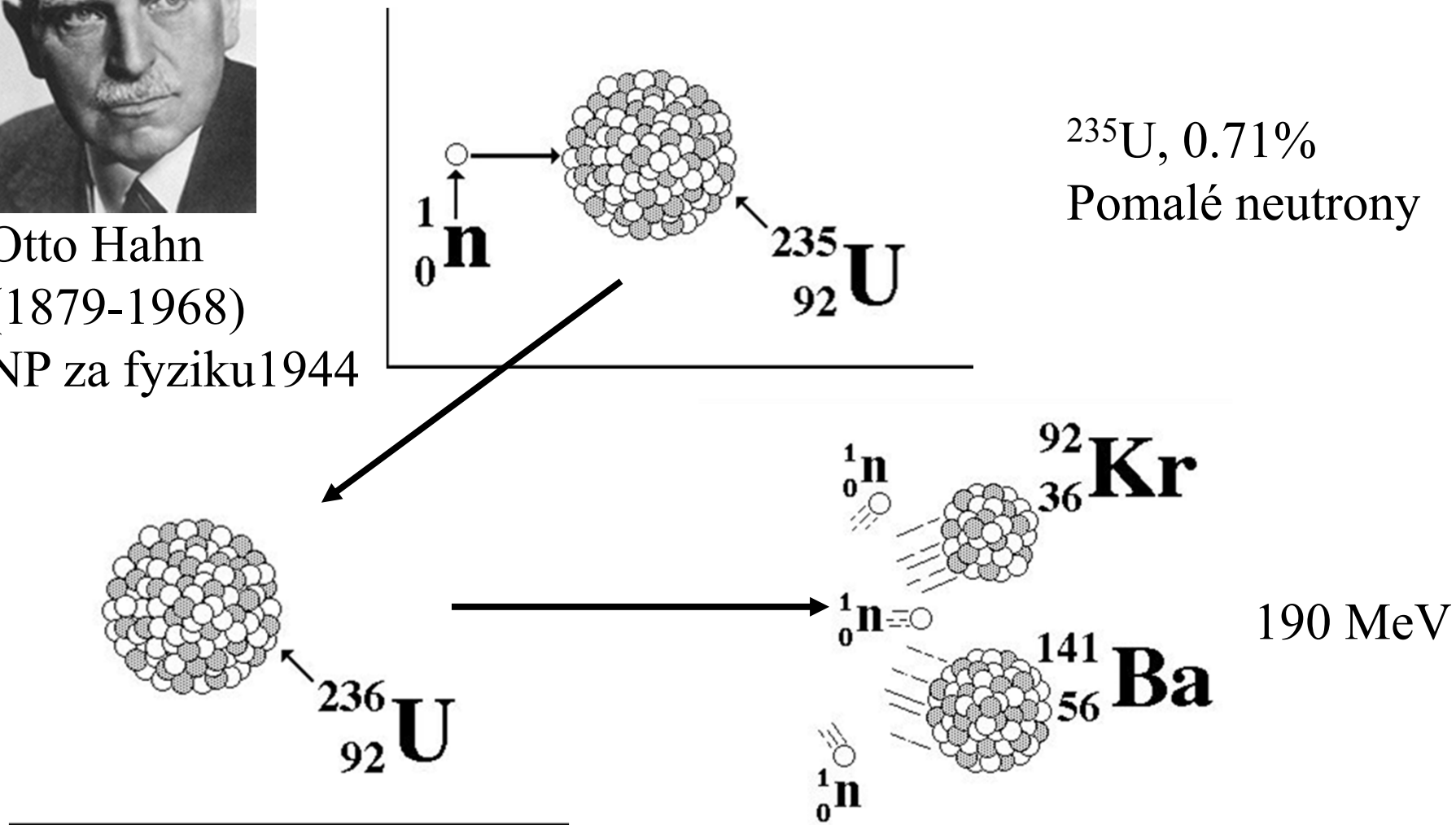
Frederic and Irene Joliot-Curie  
(1900-1958) (1897-1956)





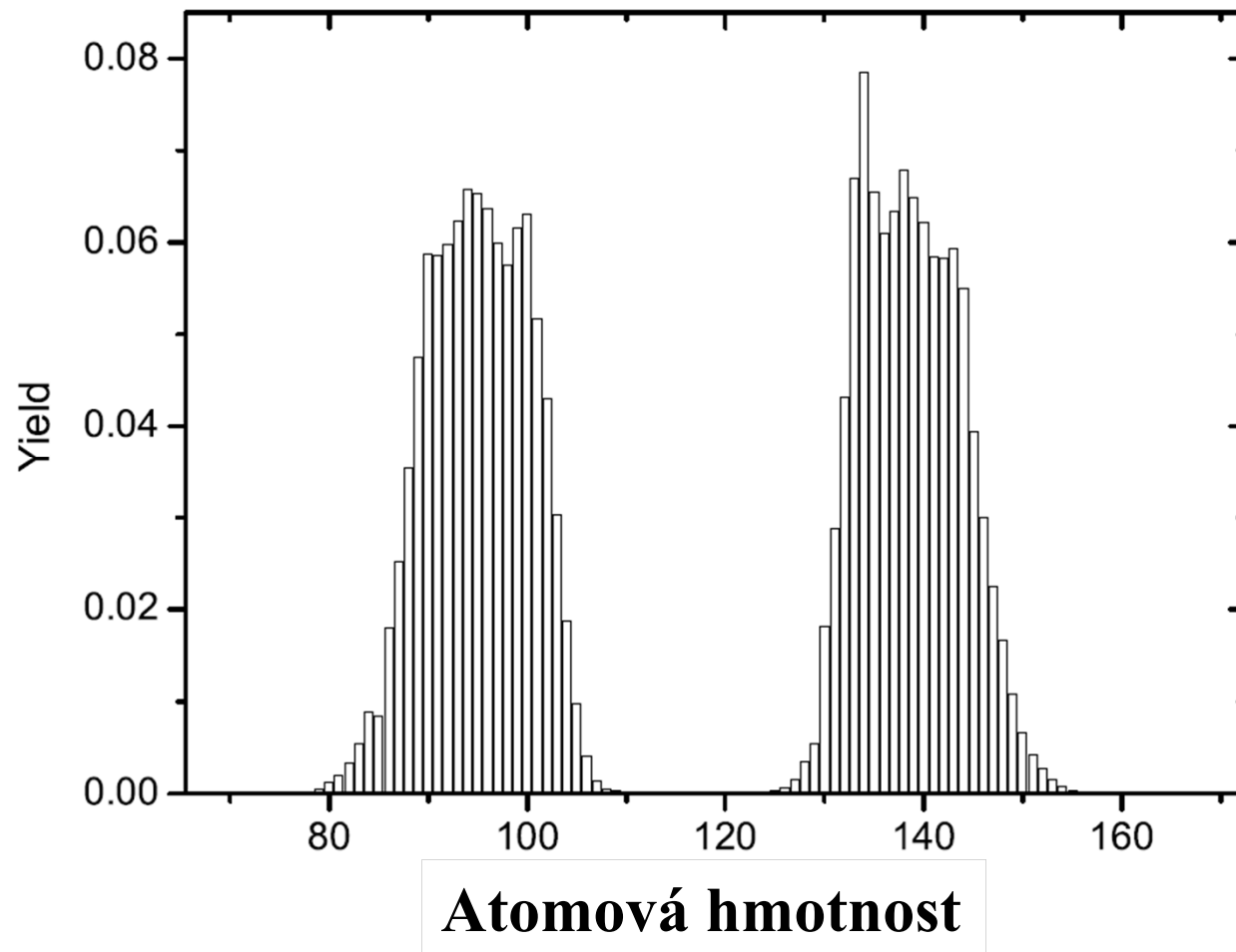
Otto Hahn  
(1879-1968)  
NP za fyziku 1944

# Štěpení jader

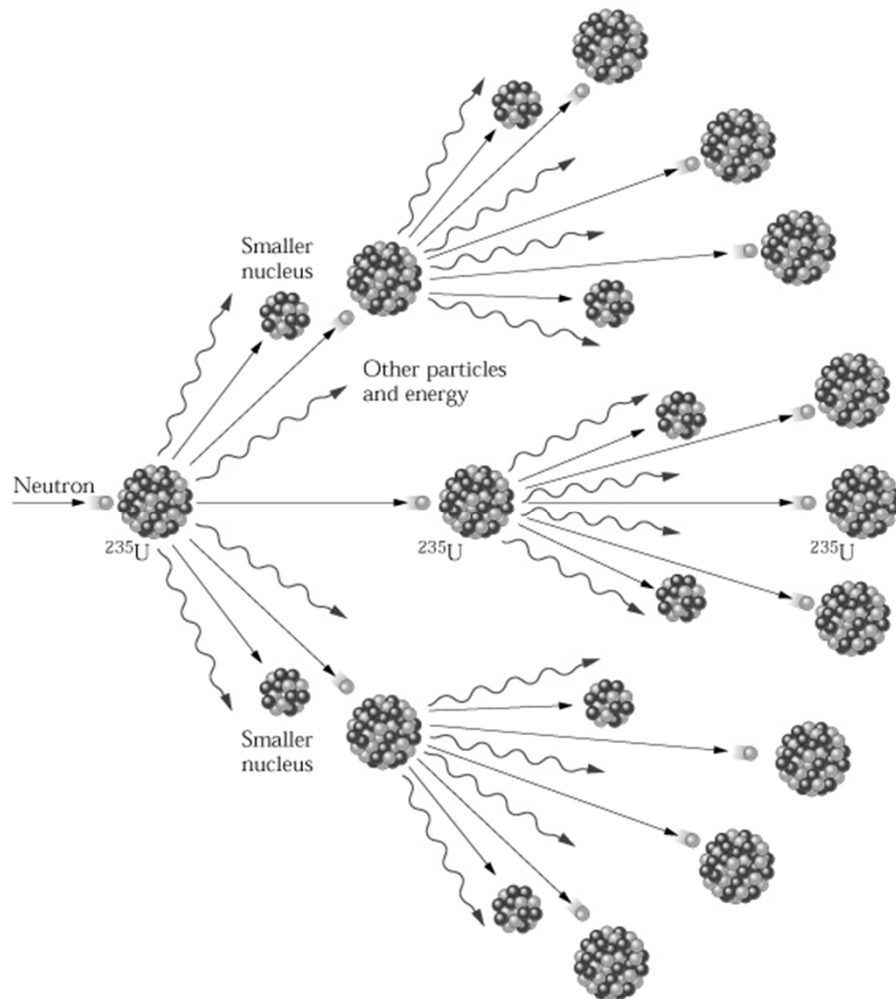


# Štěpení $^{235}\text{U}$

Rozložení výtěžku štěpných produktů pro  $^{235}\text{U}$ .



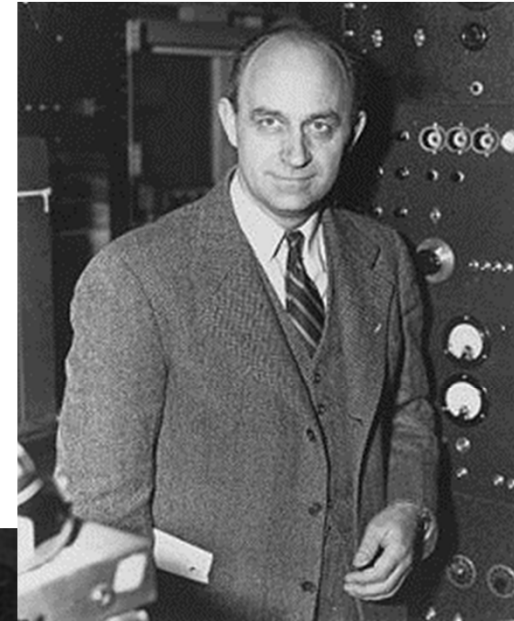
# Řetězová reakce neřízená



# Jaderný reaktor

1942 Chicago Pile - 1

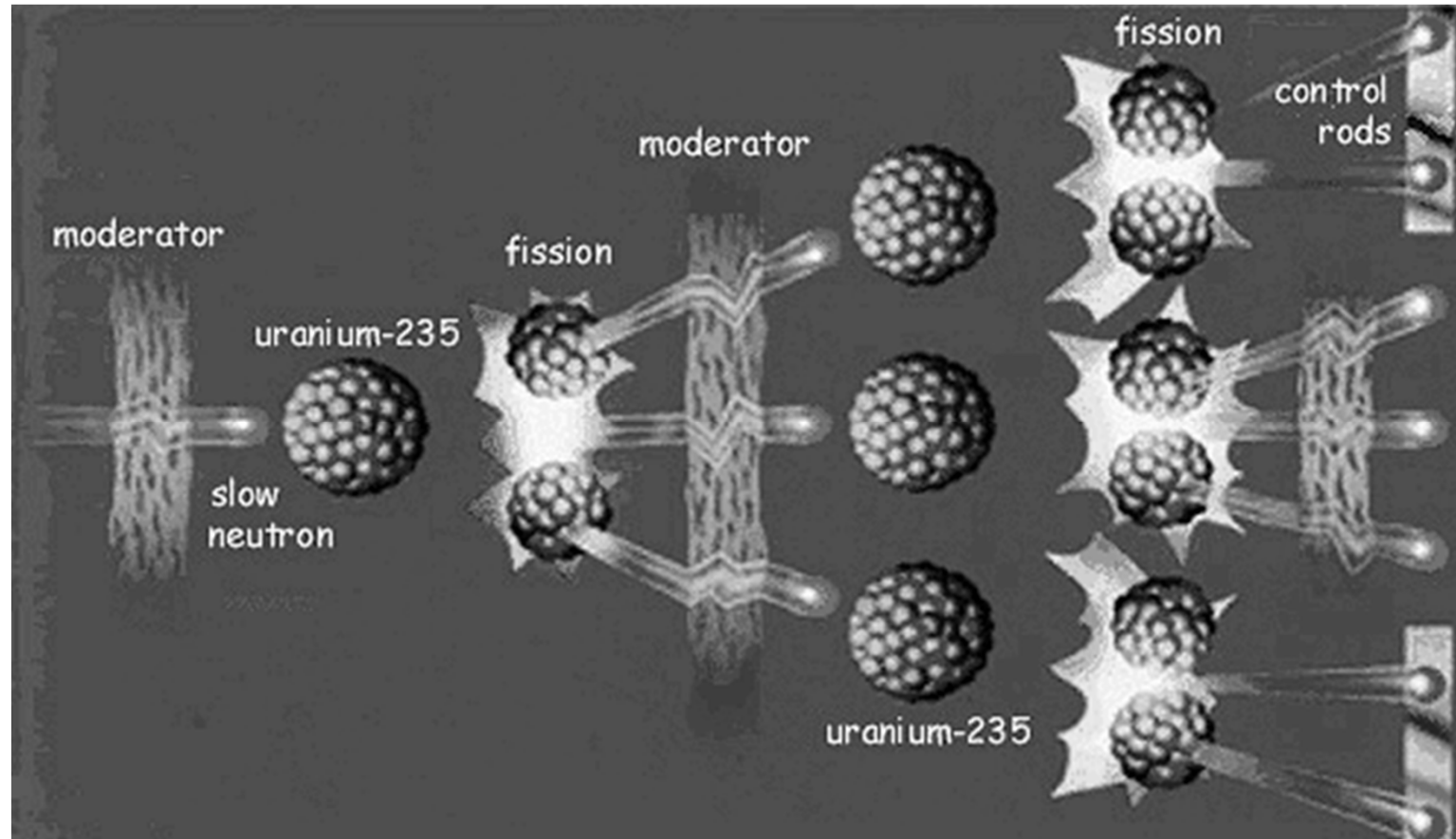
První řízená štěpná reakce  $^{235}\text{U}$



Enrico Fermi  
(1901-1954)  
NP za fyziku 1938



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



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

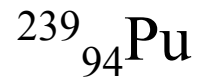


# Transurany

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

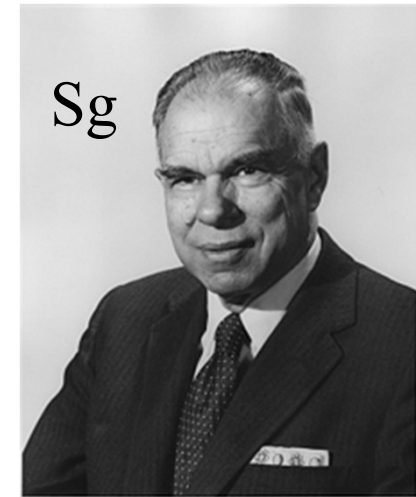
1940 První umělý transuran =  $^{239}_{93}\text{Np}$

## bombardování neutrony

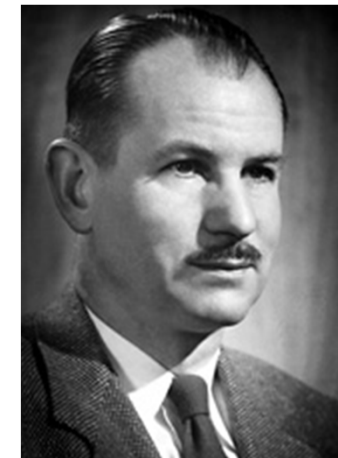


Adresa Glenna Seaborga  
Sg, Lr, Lv, Bk, Cf, Am

90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
Thorium	Protactinium	Uranium	Neptunium	Plutonium	Americium	Curium	Berkelium	Californium	Einsteinium	Fermium	Mendelevium	Nobelium	Lanthanum



Glenn T. Seaborg  
(1912-1999)



Sdílená NP  
za chemii 1951

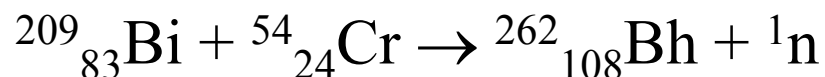
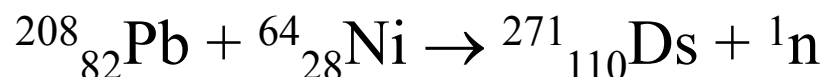
Edwin M. McMillan  
(1907-1991) 61

## Syntéza transuranů

### Bombardování kladnými ionty

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

připraveny transurany po  $Z = 118$



- Spojený ústav jaderných výzkumů, Dubna, Rusko
- GSI (Gesellschaft für Schwerionenforschung), Německo
- Lawrence Berkeley and Livermore National Laboratories, CA, USA
- RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science, Japonsko

## Syntéza transuranů

### Bombardování kladnými ionty

${}^4\text{He}$ ,  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{15}\text{N}$ ,  ${}^{18}\text{O}$ , ...  ${}^{70}\text{Zn}$

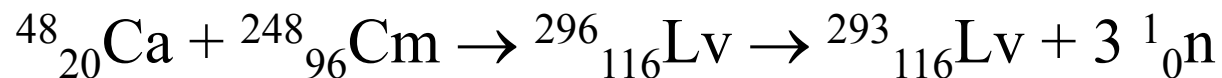
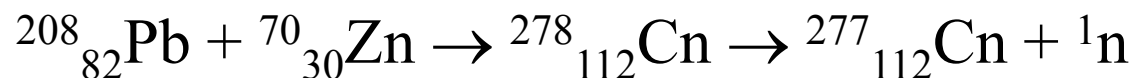
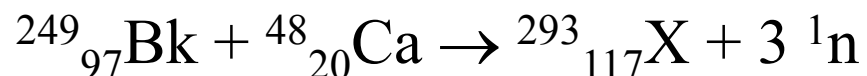
připraveny transurany po  $Z = 118$

Nihonium Nh, 113

Moscovium Mc, 115

Tennessine Ts, 117

Oganesson Og, 118



# Kinetika radioaktivního rozpadu

$$-dN/dt = k N$$

$$dN/N = -k dt$$

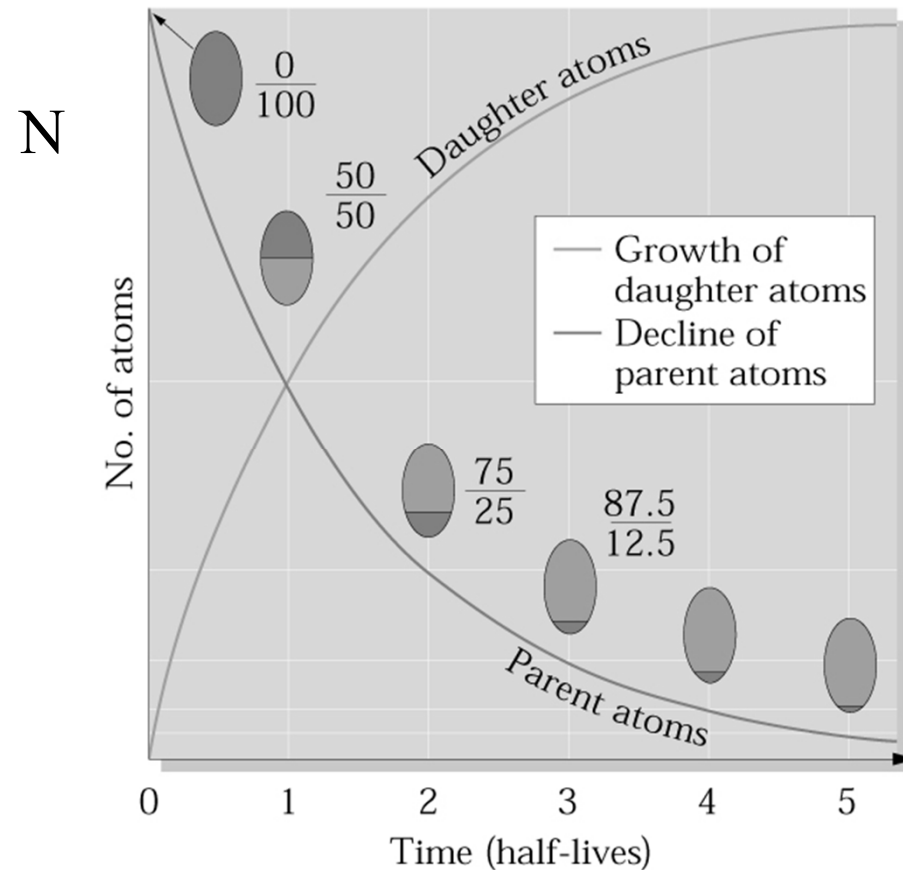
Integrace

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

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

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

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



Copyright 1999 John Wiley and Sons, Inc. All rights reserved.

## Poločas rozpadu, $t_{1/2}$

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

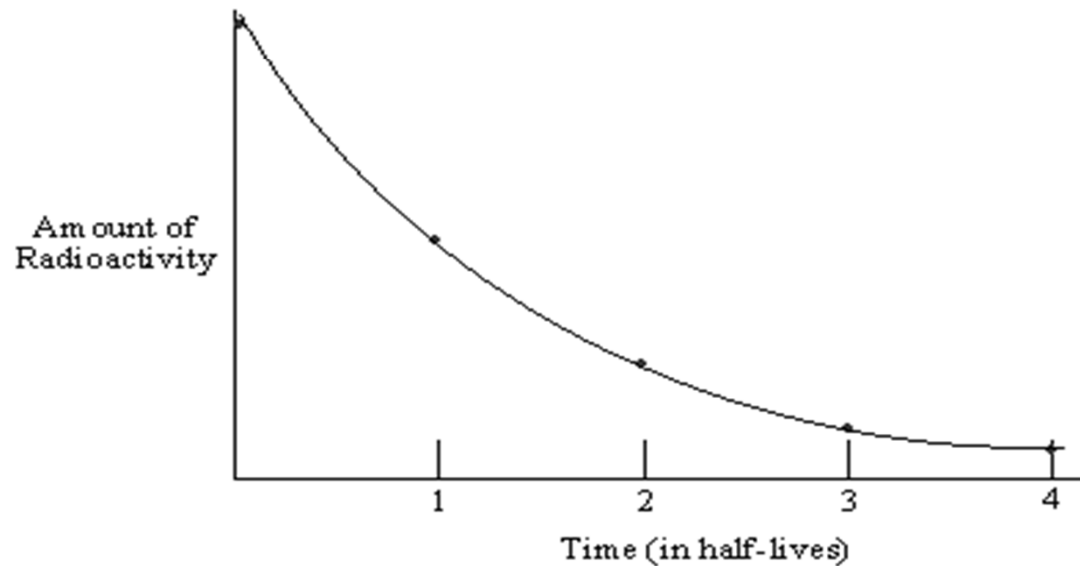
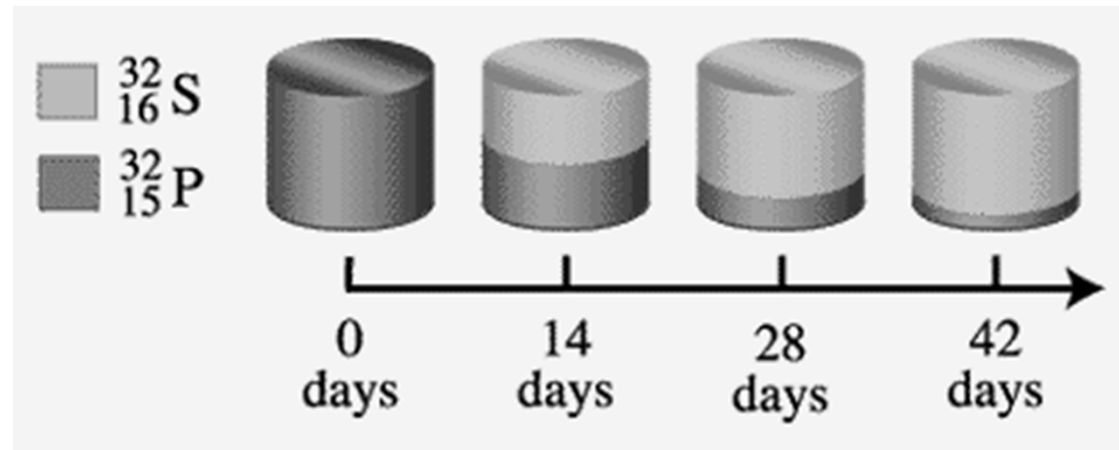
$$\ln(N/N_0) = -k t$$

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

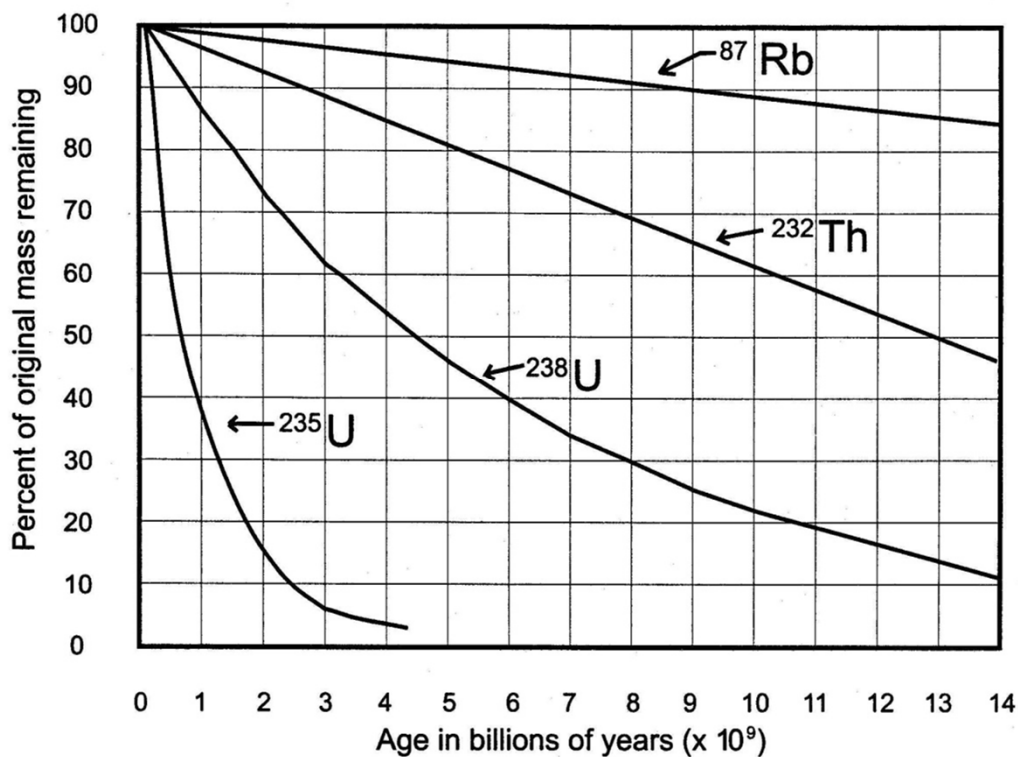
$$t_{1/2} = \ln(2) / k$$

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

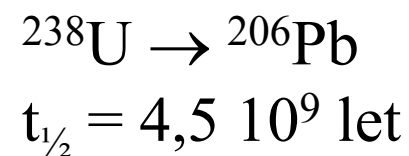
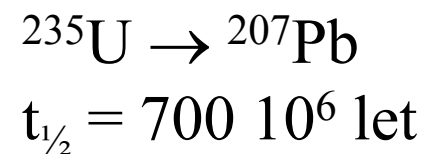
$$\ln(N/N_0) = -t \ln(2) / t_{1/2}$$



## Poločas rozpadu - Radiometrické datování

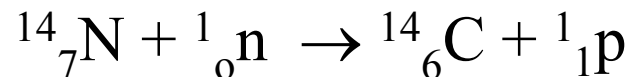


Radiometrické  
datování stáří  
hornin v geologii a  
paleontologii

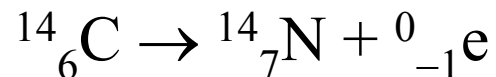


## Datování pomocí $^{14}\text{C}$

$^{14}\text{C}$  vzniká kontinuálně vysoko v atmosféře (15 km) dopadem kosmického záření



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



V atmosféře (oxidace na  $\text{CO}_2$ ) a živých rostlinách (fotosyntéza) se ustaví rovnovážná koncentrace  $^{14}\text{C} - N_0$  (známe)

Po smrti organismu koncentrace  $^{14}\text{C}$  klesá:  $N = N_0 e^{-kt}$

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

Stáří vzorku  $t$  lze určit z rovnice:

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

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

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



Willard Libby  
(1908 - 1980)

NP za chemii 1960