Prvek, nuklid, izotop, izobar, izoton

$^{19}_{9}\mathbf{F}$

A = Nukleonové (hmotnostní) číslo
A = počet protonů + počet neutronů
A = Z + N

Z = Protonové číslo, náboj jádra

Frederick Soddy
(1877-1956)
NP za chemii 1921
(objev izotopů)

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}C-^{14}N; ^{3}H-^{3}He)
Izotony = nuklidy se stejným počtem neutronů, N = A – Z
Izomery = stejné nuklidy, liší se obsahem energie

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

Polyizotopické prvky:
^{1}H, ^{2}H (D), ^{3}H (T)
^{10}B, ^{11}B
Sn má největší počet **stabilních** izotopů – 10

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

Stabilita jader

Stabilita (vzhledem k radioaktivnímu rozpadu)
je určena počtem protonů a neutronů
Zóna stability
Lehké nuklidy stabilní pro Z ~ N (stejný počet p a n)

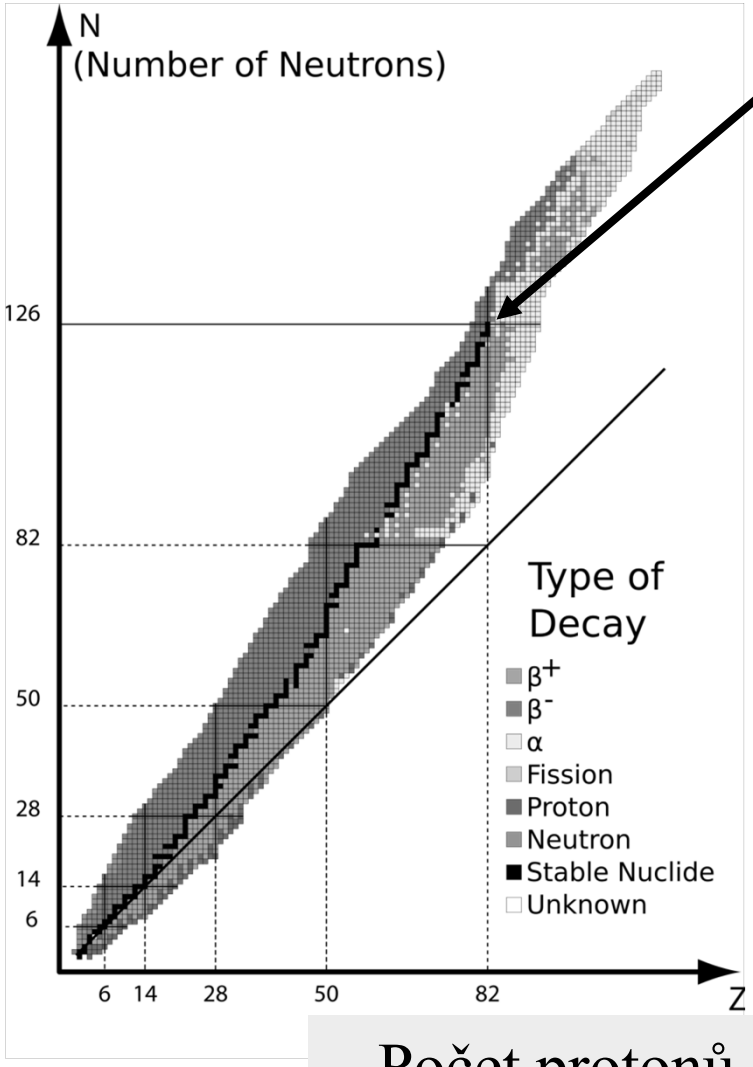
Jen ^{1}H a ^{3}He mají více p než n.
^{2}H, ^{4}He, ^{6}Li, ^{10}B, ^{12}C, ^{14}N, ^{16}O, ^{20}Ne, ^{24}Mg, ^{28}Si, ^{32}S, ^{36}Ar a ^{40}Ca
mají stejný počet p a n
Všechny ostatní nuklidy mají **více** n než p N > Z

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

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

Stabilita jader

Počet neutronů, N



$^{208}_{82}Pb$

Počet protonů, Z

Stabilita jader

U některých prvků existují v přírodě radioaktivní izotopy

s dlouhým poločasem přeměny ^{40}K, 0.012%, 1.3 10^{10} roků

Prvky s **Z ≤ 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 ≥ 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}Be, ^{19}F, ^{23}Na, ^{27}Al, ^{31}P, ^{59}Co, ^{127}I, ^{197}Au).

Jen ^{2}H, ^{6}Li, ^{10}B,^{14}N, ^{40}K, ^{50}V, ^{138}La, ^{176}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}He, ^{16}O, ^{40}Ca, ^{48}Ca a ^{208}Pb mají magický počet p i n

Hmotnost elektronu a nukleonů

Symbol	m / kg	m / u
e	$9.11\ 10^{-31}$	0.0005486
p	$1.673\ 10^{-27}$	1.007276
n	$1.675\ 10^{-27}$	1.008665

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

Hmotnostní úbytek

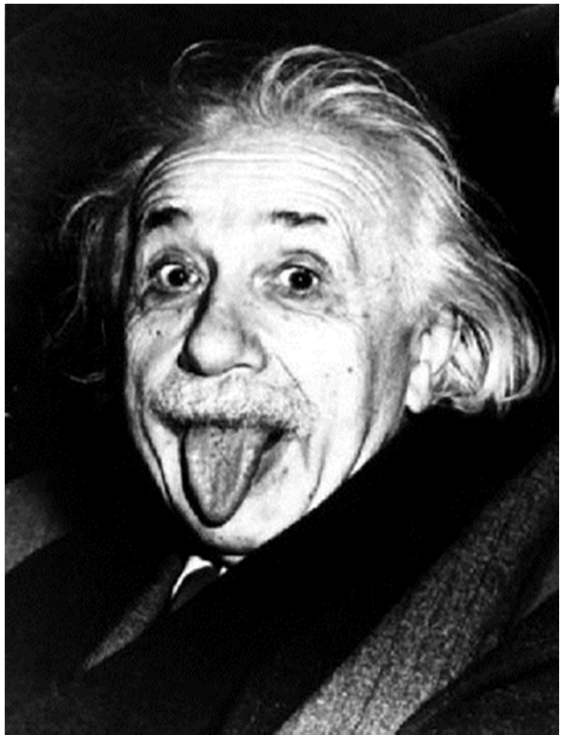
Hmotnost jádra je vždy menší než součet hmotností nukleonů

$M_j < Z\, m_p + (A–Z)\, m_n$

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

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

$E_v = – 931.5\, \Delta m$ [MeV]



NP za fyziku 1921

Vazebná energie jádra, E_v

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

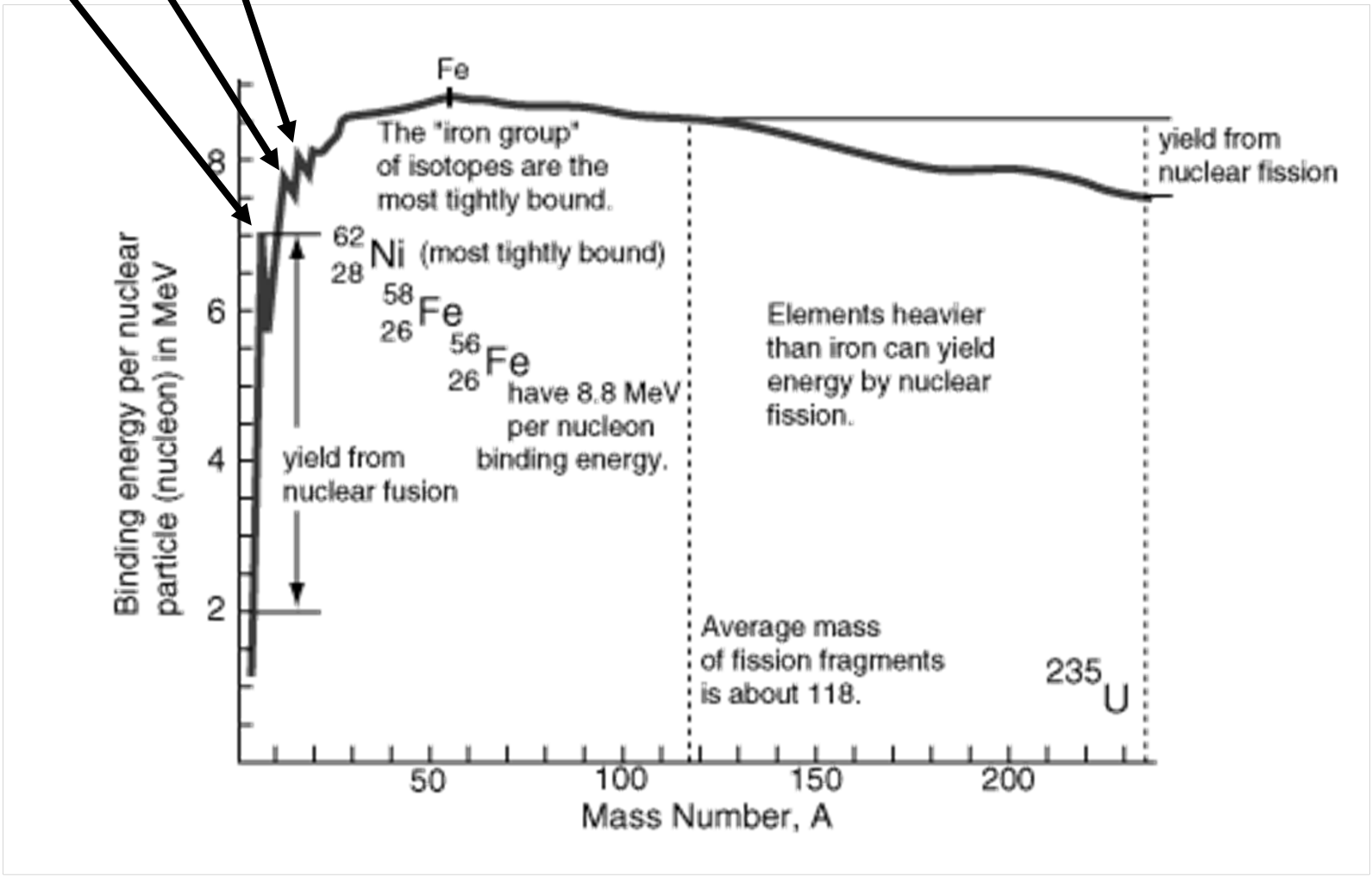
Střední vazebná energie jádra, E_v(st)

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

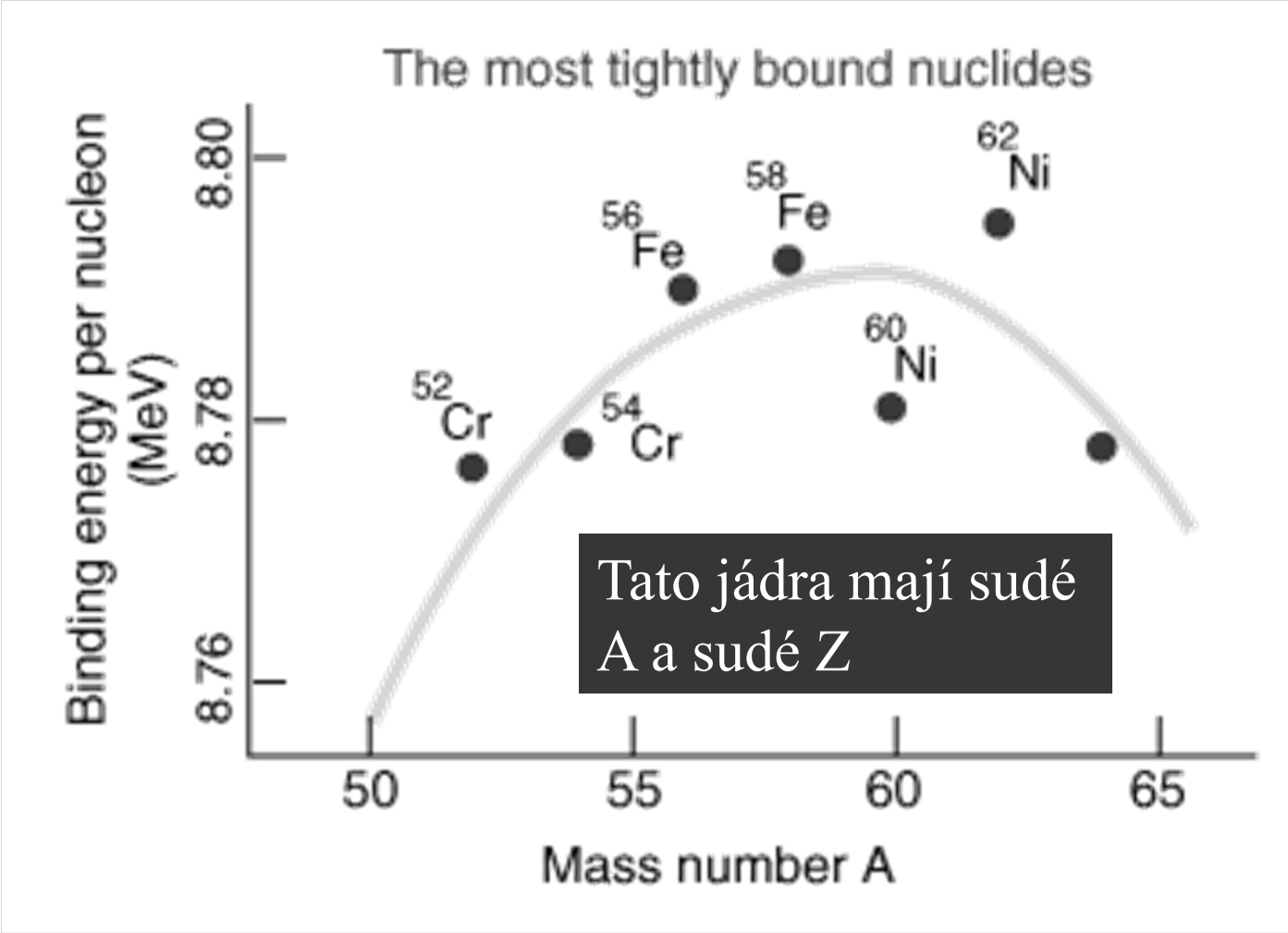
$E_v(st) = E_v / A$

Energie na odtržení 1 nukleonu

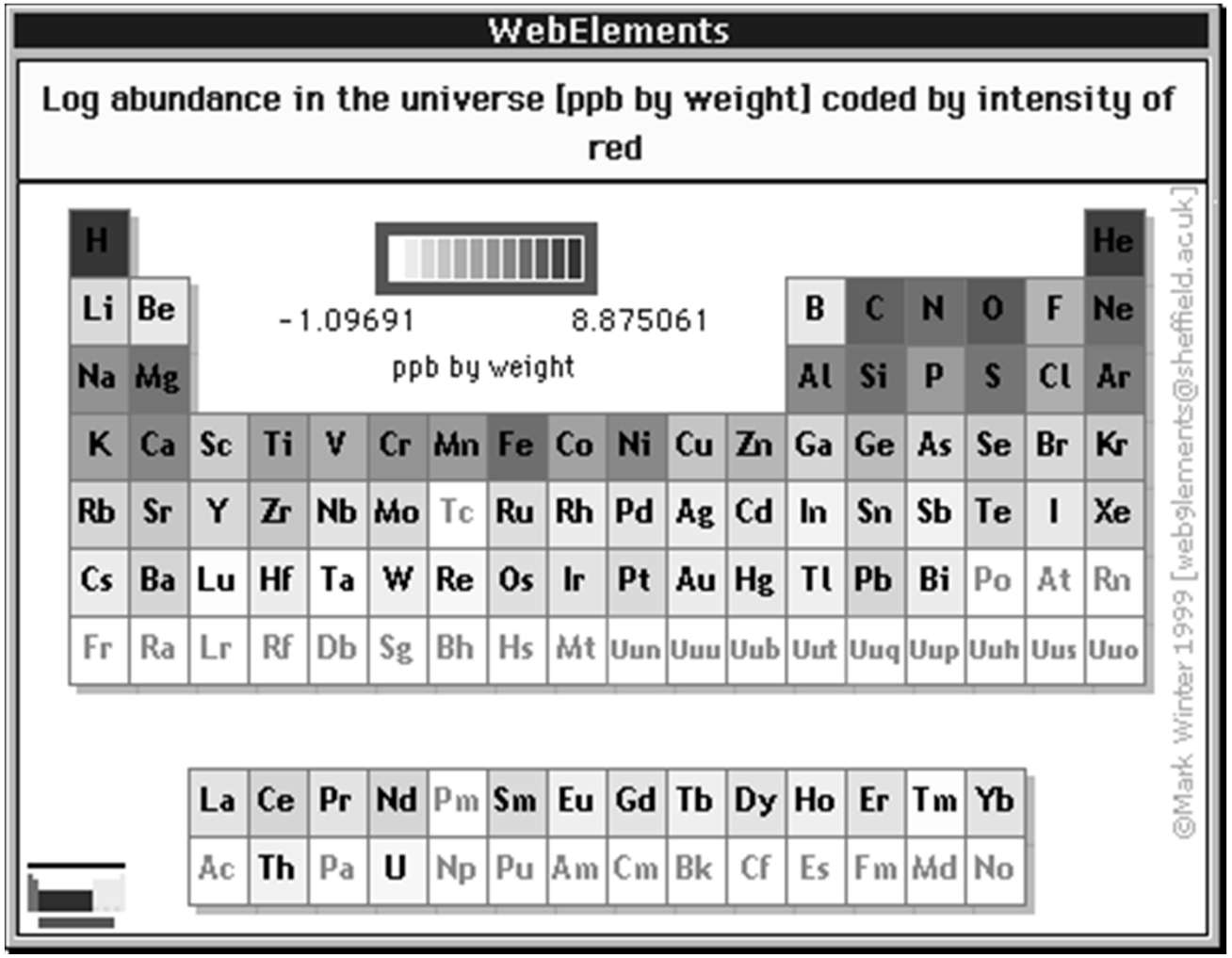
Střední vazebná energie jádra



Střední vazebná energie jádra



Výskyt prvků ve vesmíru



Vazebná energie jádra a chemické vazby

Střední vazebná energie jádra ^{58}Fe 8.792 MeV

Energie vazby C-H 411 kJ mol^{-1} = 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.

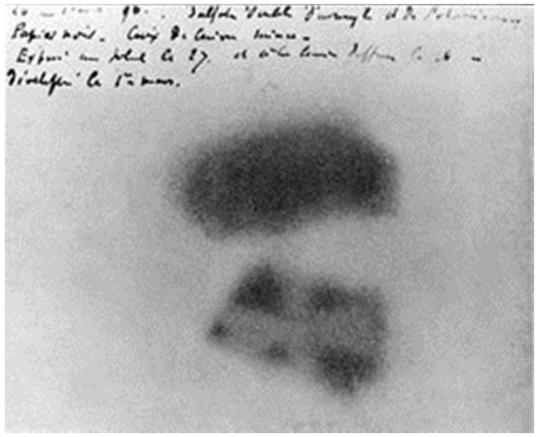
Jaderné reakce mění složení jader, elektronový obal nehraje žádnou roli. Energetické změny řádu MeV. Významné hmotnostní úbytky, platí zákon zachování energie a ekvivalence hmoty a energie.

$$\mathbf{E = m\, c^2}$$

Objev radioaktivity

Antoine Henri Becquerel
(1852-1908)

Uran, Thorium



Objev radioaktivity 1896
NP za fyziku 1903

Radium, Polonium
Marie Curie (1867-1934)
Pierre Curie (1859-1906)

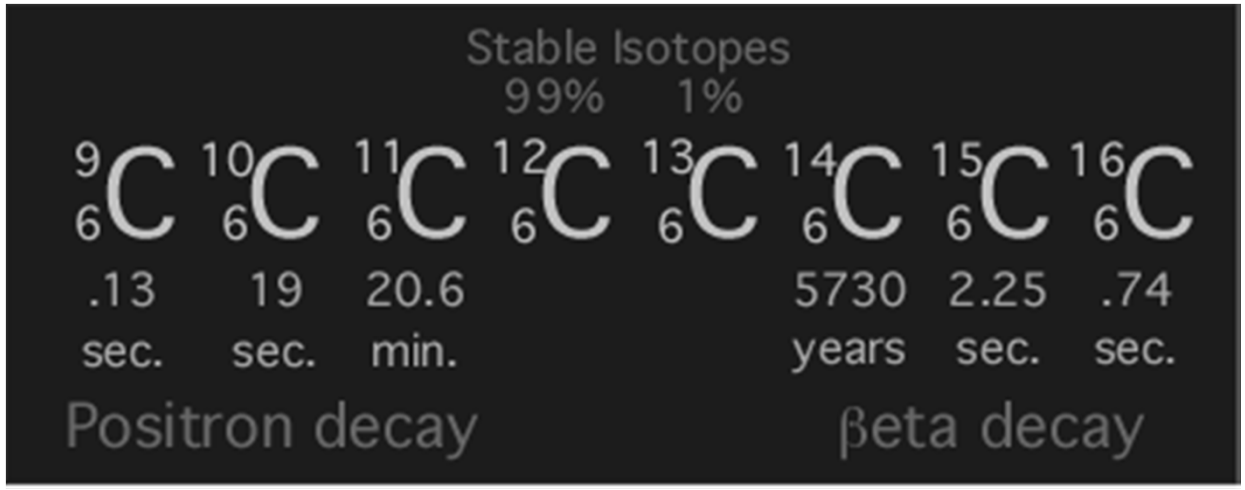
NP za fyziku 1903
M. C. NP za chemii 1911

Radioaktivita

Má-li jádro příliš málo nebo mnoho neutronů →

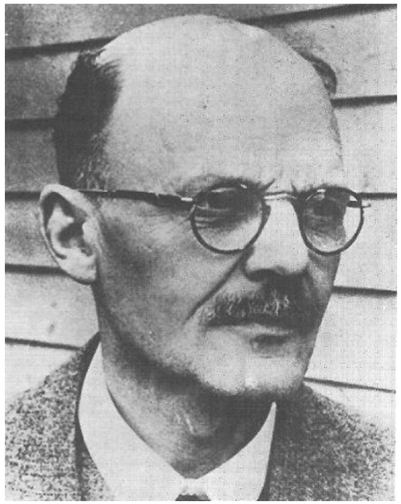
Radioaktivita = schopnost některých jader přeměňovat se na jiné jádro, emitují se menší částice a uvolňuje se energie (exo)

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

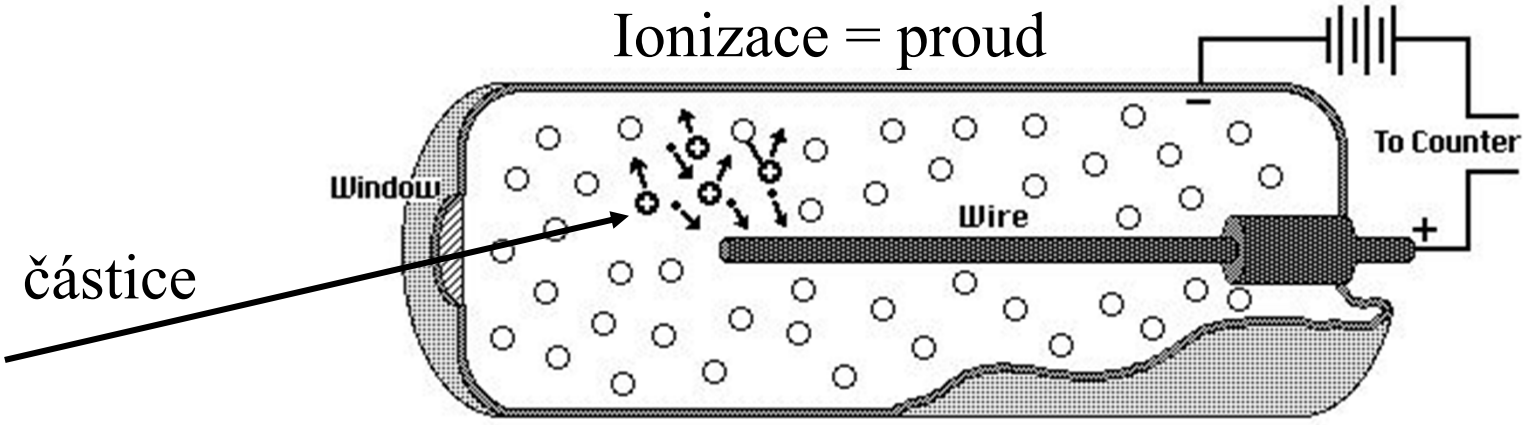


Geigerův čítač

Hans Geiger
(1882-1945)



Ionizace = proud



Měření radioaktivity

Radioaktivita

1 Bq (becquerel) = 1 rozpad za 1 s

(^{40}K v lidském těle 4 kBq) 1 Ci (curie) = 3.7 10^{10} 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**

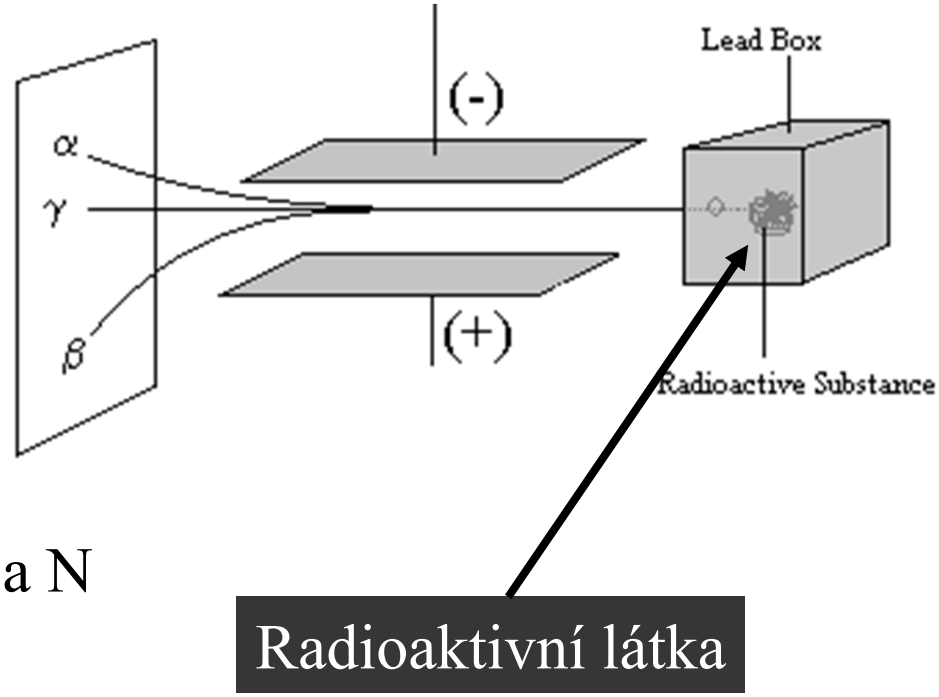
Jaderné reakce

Rutherford – odklon radioaktivního záření v elektrickém a magnetickém poli

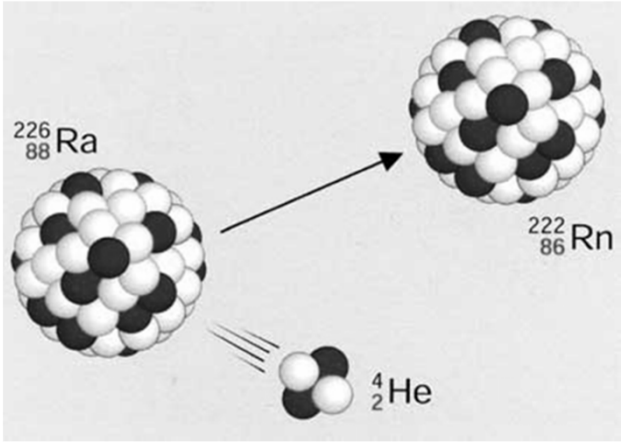
Alfa = pozitivně nabité částice
Beta = negativně nabité částice
Gama = neutrální částice

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

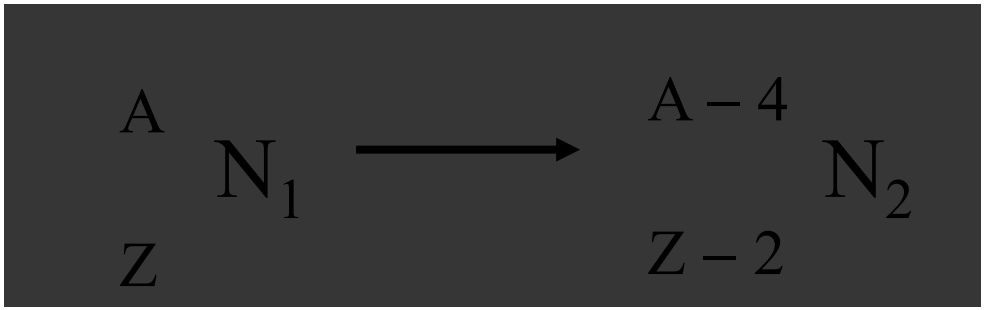
Velmi malá penetrace, několik cm ve vzduchu, zastaví je list papíru

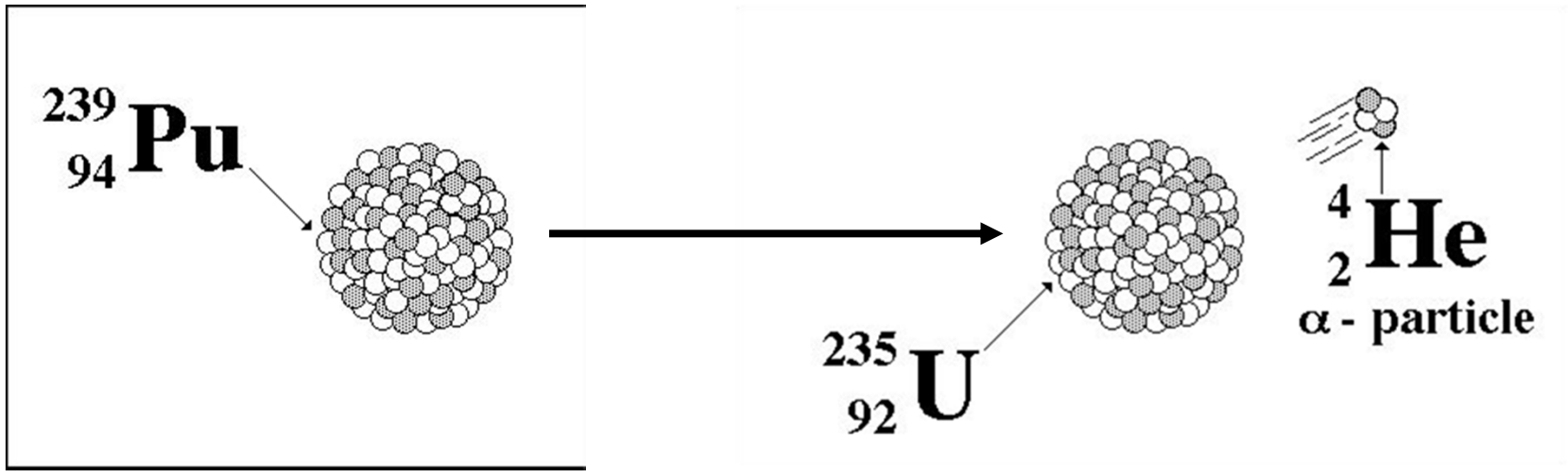
Velmi škodlivé pro buňky
Inhalace

$$^{222}_{86}Rn \rightarrow ^{218}_{84}Po + ^{4}_{2}He$$

Alfa emise

Posun v periodické tabulce o dva prvky doleva





Radium-226

Kalifornium-252

Curium-240

Uran-232

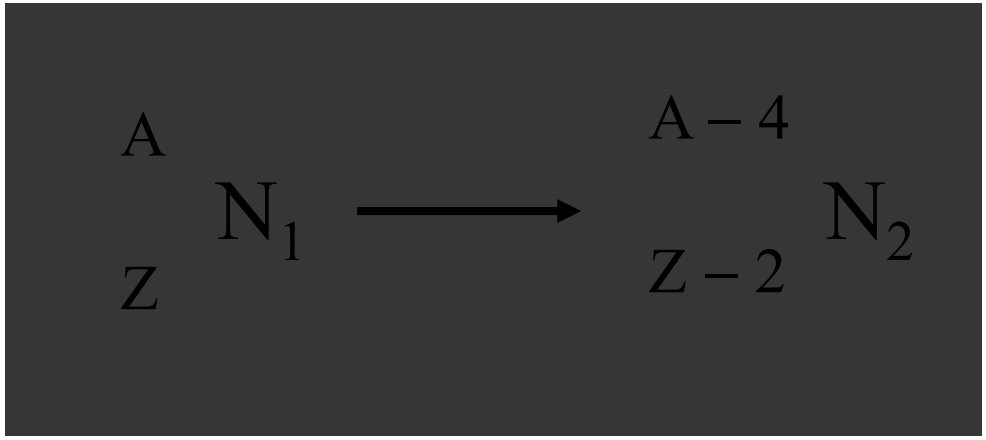
Zlato-185

Thorium-230

Americium-241 detektory kouře

Polonium-210

Alfa emise



Posun v periodické tabulce o dva prvky doleva

Beta částice $^{0}_{-1}e$

Jádra s nadbytkem neutronů, nedostatek protonů

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

Vznikají rozpadem neutronu

$$^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e$$

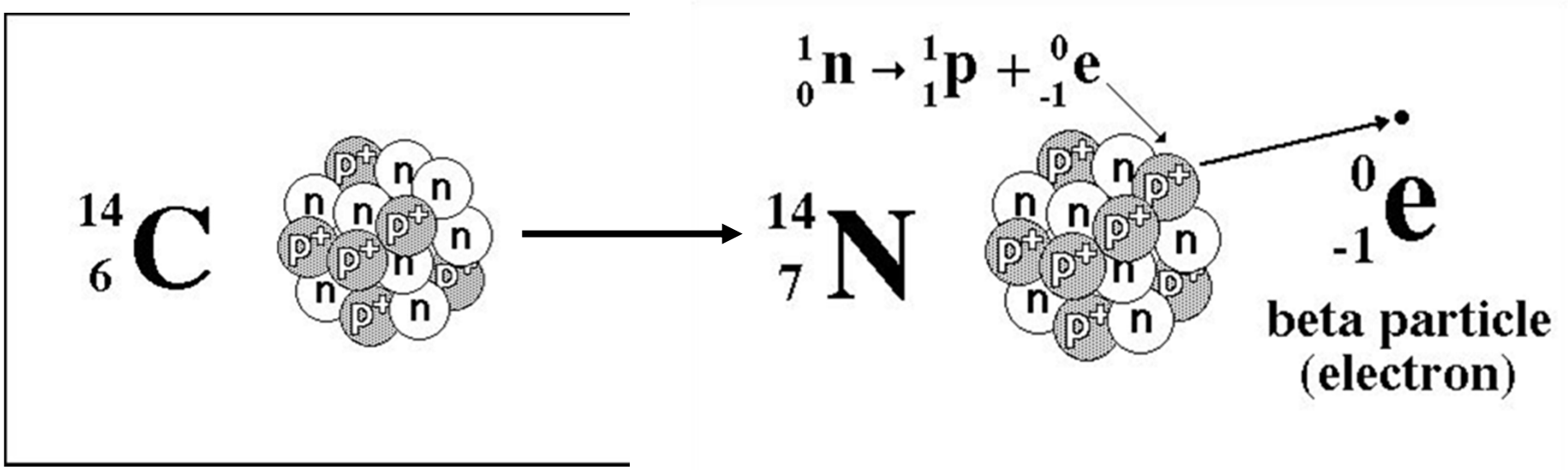
e opouští jádro rychlostí 90% c

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

$$^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + {}^{0}_{-1}e$$

Beta emise

Posun v periodické tabulce o jeden prvek doprava



Krypton-87

Zinek-71

Křemík-32

Kobalt-60

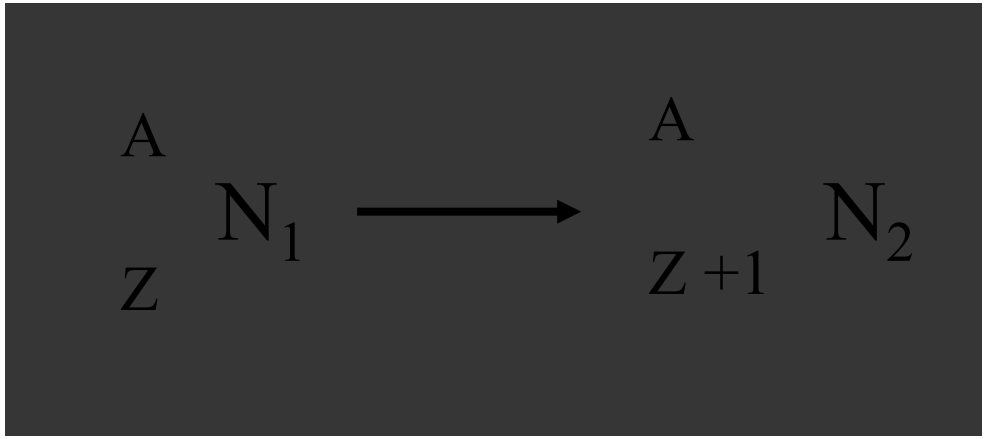
Hořčík-27

Sodík-24

Železo-59

Fosfor-32

Beta emise



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

$$^{m99}\mathbf{Tc} \rightarrow {}^{99}\mathbf{Tc} + \gamma$$

Tracer

Gyorgy Hevesy 1913

NP 1943

$^{m99}Tc \rightarrow {}^{99}Tc + \gamma$

Positronová emise $^{0}_{1}e$

Jádra s nadbytkem protonů, nedostatek neutronů

$$^{1}_{1}p \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{1}e$$

$$^{11}_{6}C \rightarrow {}^{11}_{5}B + {}^{0}_{+1}e$$

Positron (antičástice) se rekombinuje během 10^{-10} s

Velmi malá penetrace

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

$$^{A}_{Z}N_1 \longrightarrow {}^{A}_{Z-1}N_2$$

Posun v periodické tabulce o jeden prvek doleva

Positronová emise

Rubidium-81

Germanium-66

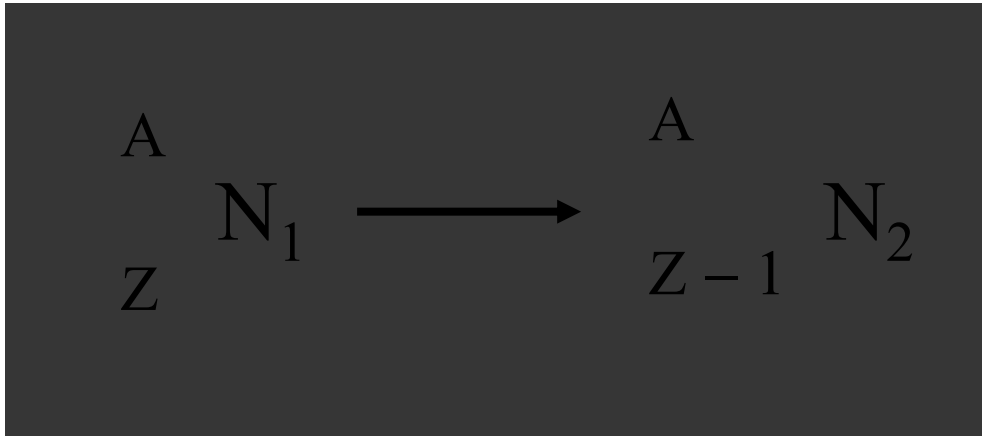
Praseodym-140

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

$$ {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e \rightarrow {}^{1}_{0}n $$

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

$$ {}^{40}_{19}K + {}^{0}_{-1}e \rightarrow {}^{40}_{18}Ar $$

$$ {}^{A}_{Z}N_1 \qquad {}^{A}_{Z-1}N_2 $$

Posun v periodické tabulce o jeden prvek doleva

Rubidium-83

Elektronový záchyt

Vanad-48

Gallium-67

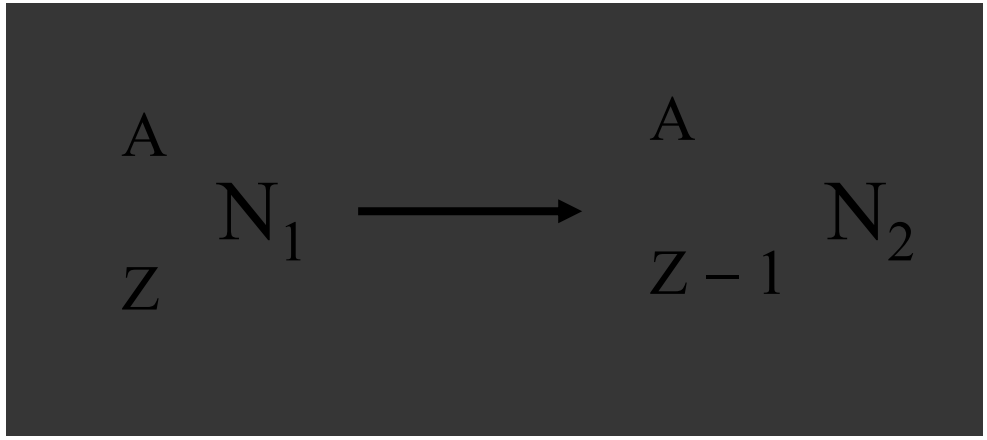
$$ {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e \rightarrow {}^{1}_{0}n $$

Beryllium-7

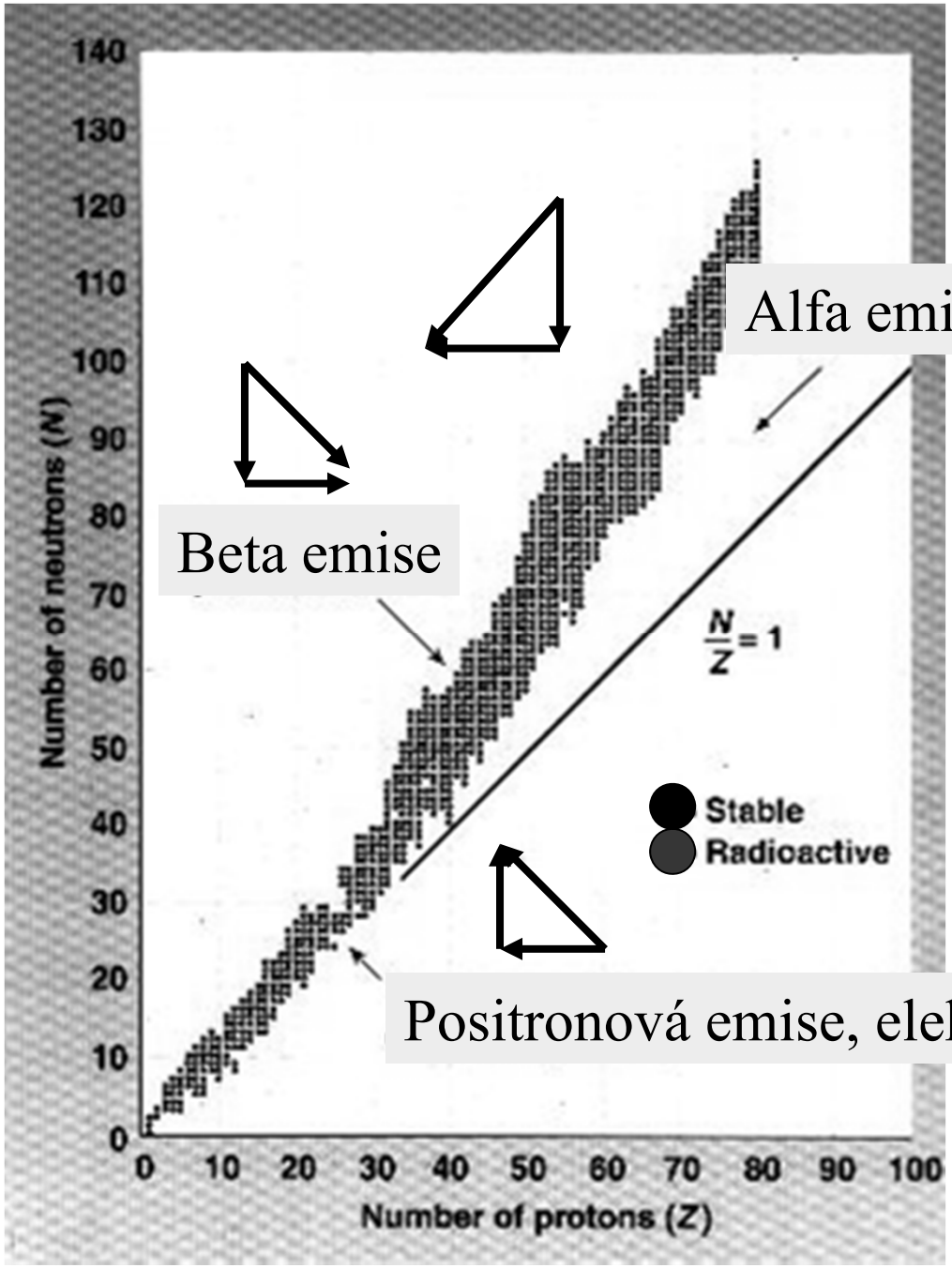
Vápník-41

Kobalt-57

Selen-72



Posun v periodické tabulce o jeden prvek doleva


Alfa emise
Beta emise
Positronová emise, elektronový záchyt
N/Z = 1
Stable
Radioactive
Number of neutrons (N)
Number of protons (Z)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
130
140

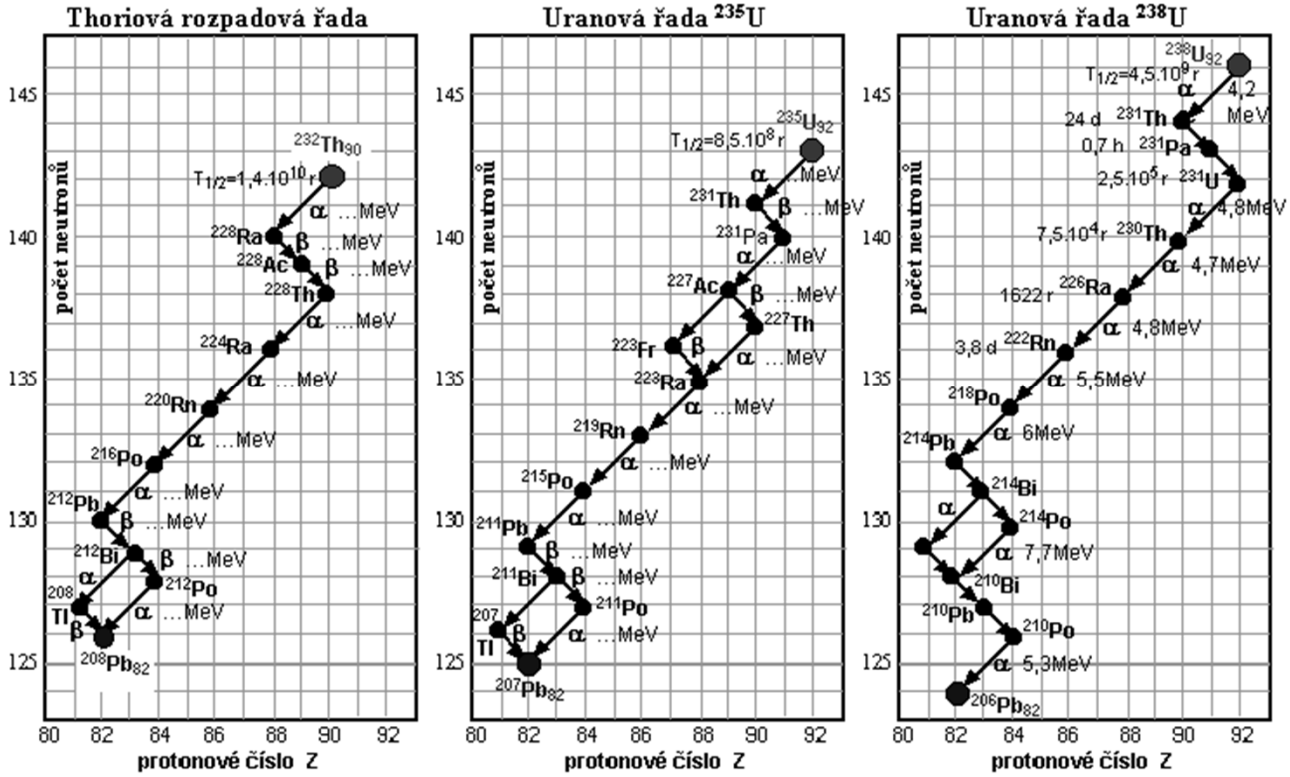
Rozpadové řady

Thoriová ^{232}Th - ^{208}Pb A = 4n

Neptuniová (umělá) ^{241}Pu - ^{209}Bi A = 4n+1

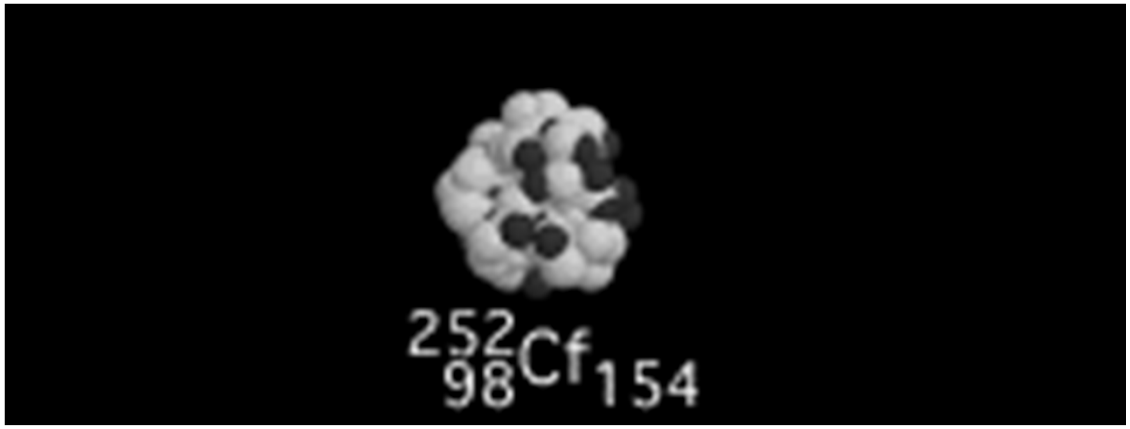
Uranová ^{238}U - ^{206}Pb A = 4n+2

Aktinuranová ^{235}U - ^{207}Pb A = 4n+3



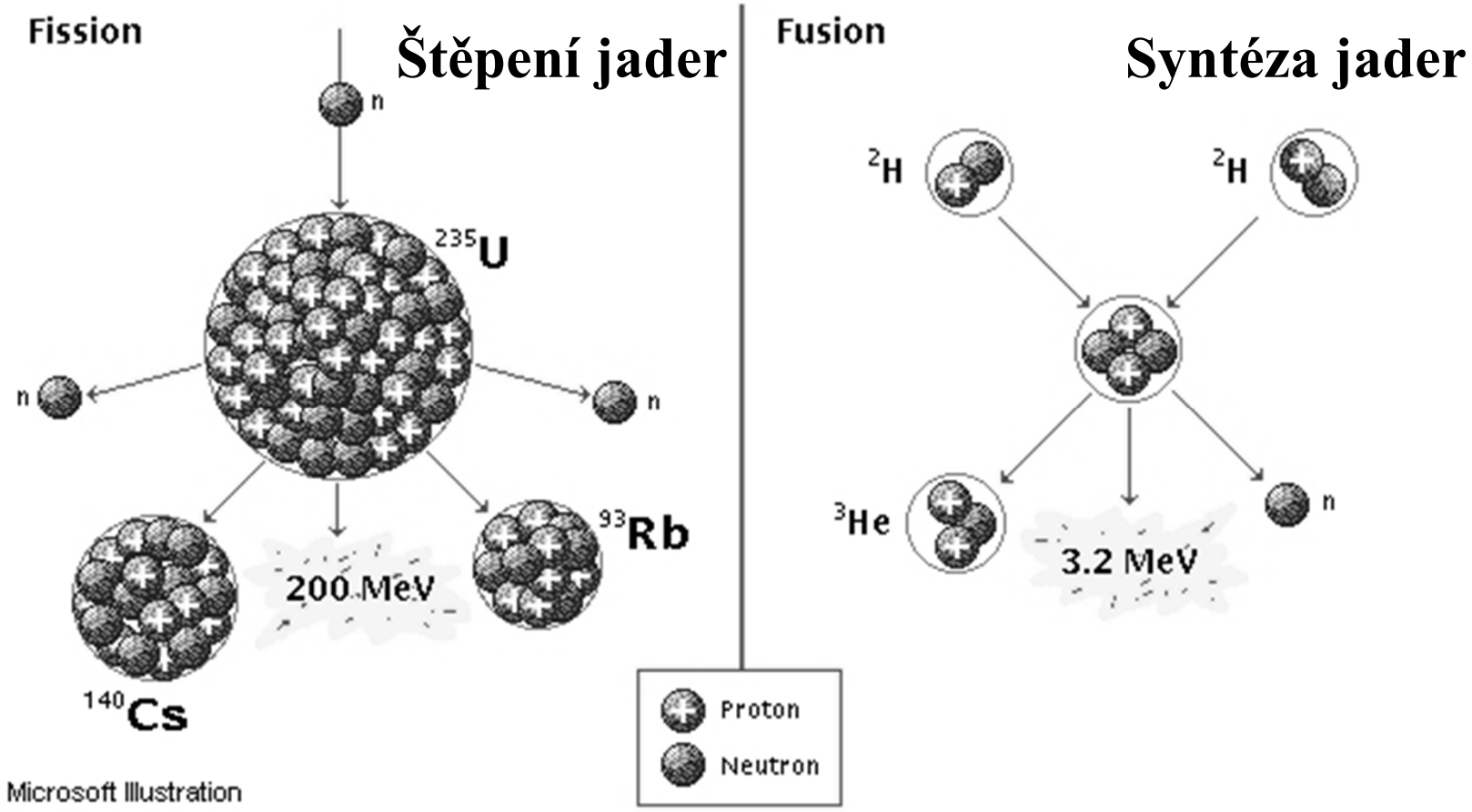
Samovolné štěpení

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

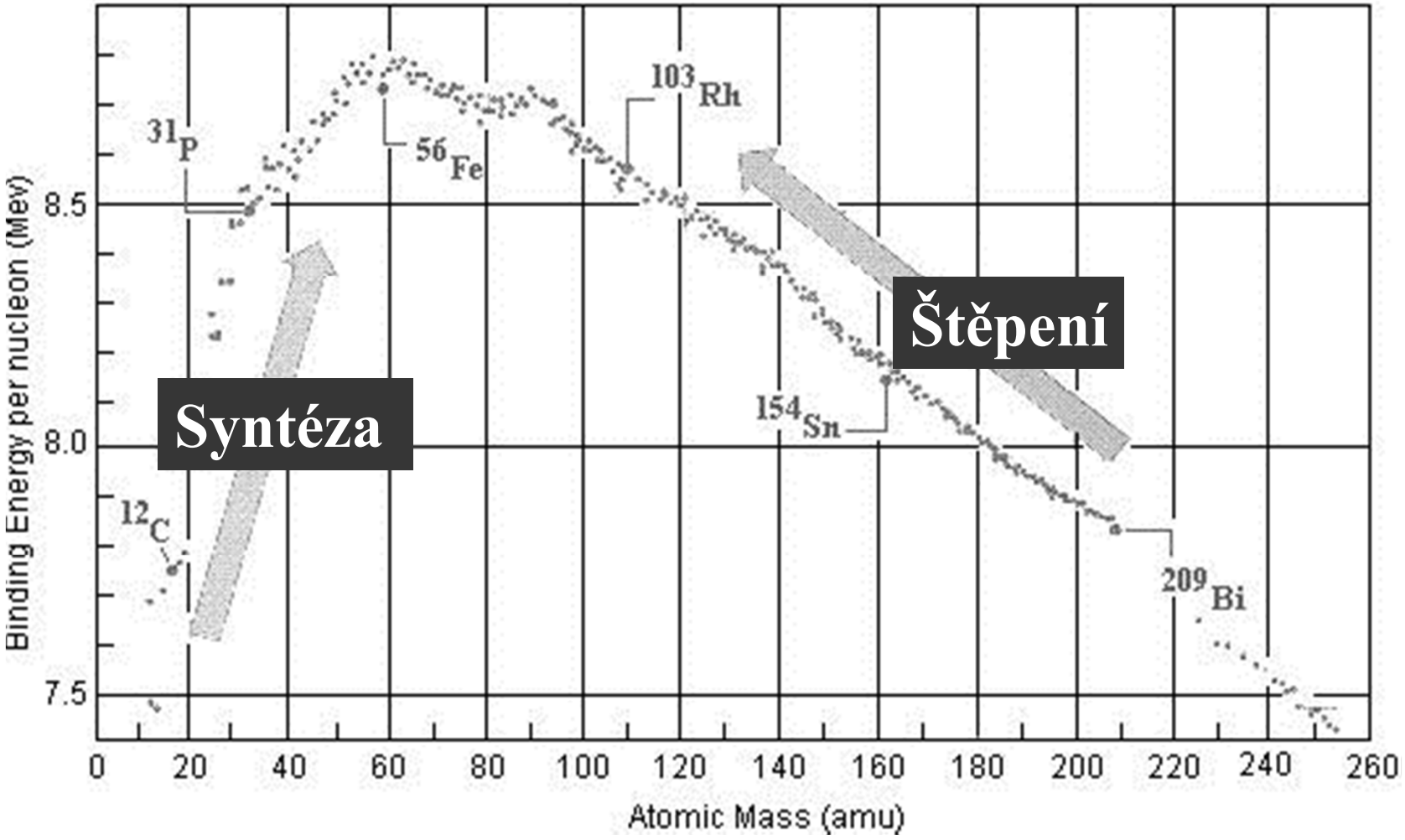


^{252}Cf - průmyslová výroba (ORNL: 0,25 g/rok) a využití
α-emise 97 %
Samovolné štěpení 3 % (~3,7 neutronu)
Poločas rozpadu 2,65 let
Zdroj neutronů pro start reaktorů, aktivační analýzu, difrakci,
detektory zlata, výbušnin, vody a ropy, terapii rakoviny, BNCT

Syntéza a štěpení jader



Syntéza a štěpení jader - vazebná energie jádra



Syntéza jader ve vesmíru

Big Bang

$^{1}n \rightarrow {}^{1}H + e^{-}$

Slunce (teplota = 2×10^{6} K v nitru, energie z PP nebo CN cyklu)

PP cyklus

$^{1}H + {}^{1}H \rightarrow {}^{2}H + e^{+} + \nu + 0.42$ MeV

$^{1}H + {}^{2}H \rightarrow {}^{3}He + \gamma + 5.49$ MeV

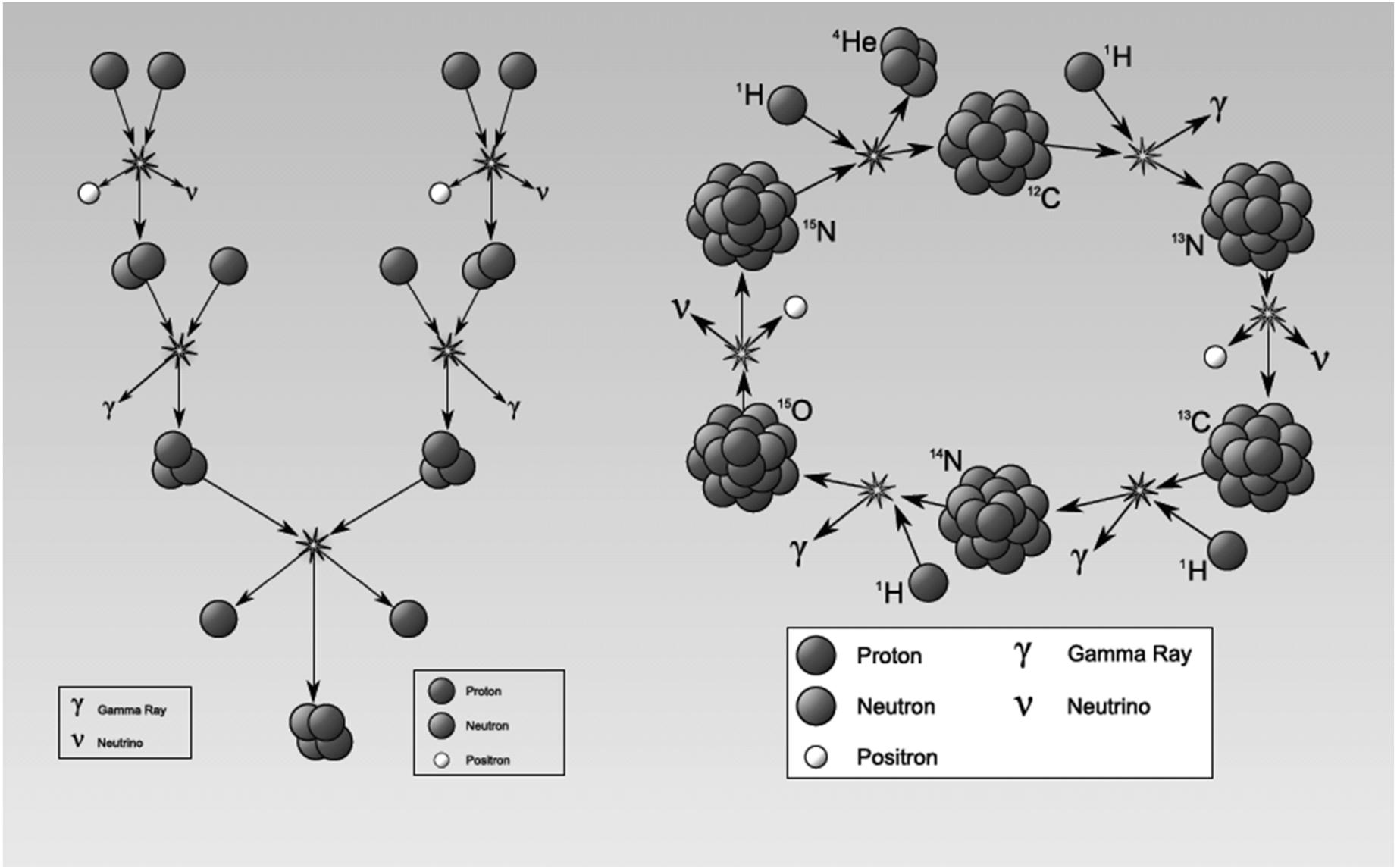
$^{3}He + {}^{3}He \rightarrow {}^{4}He + 2\ {}^{1}H + 12.86$ MeV

$^{3}He + {}^{1}H \rightarrow {}^{4}He + e^{+}$

$e^{+} + e^{-} \rightarrow \gamma + 1.02$ MeV

PP cyklus

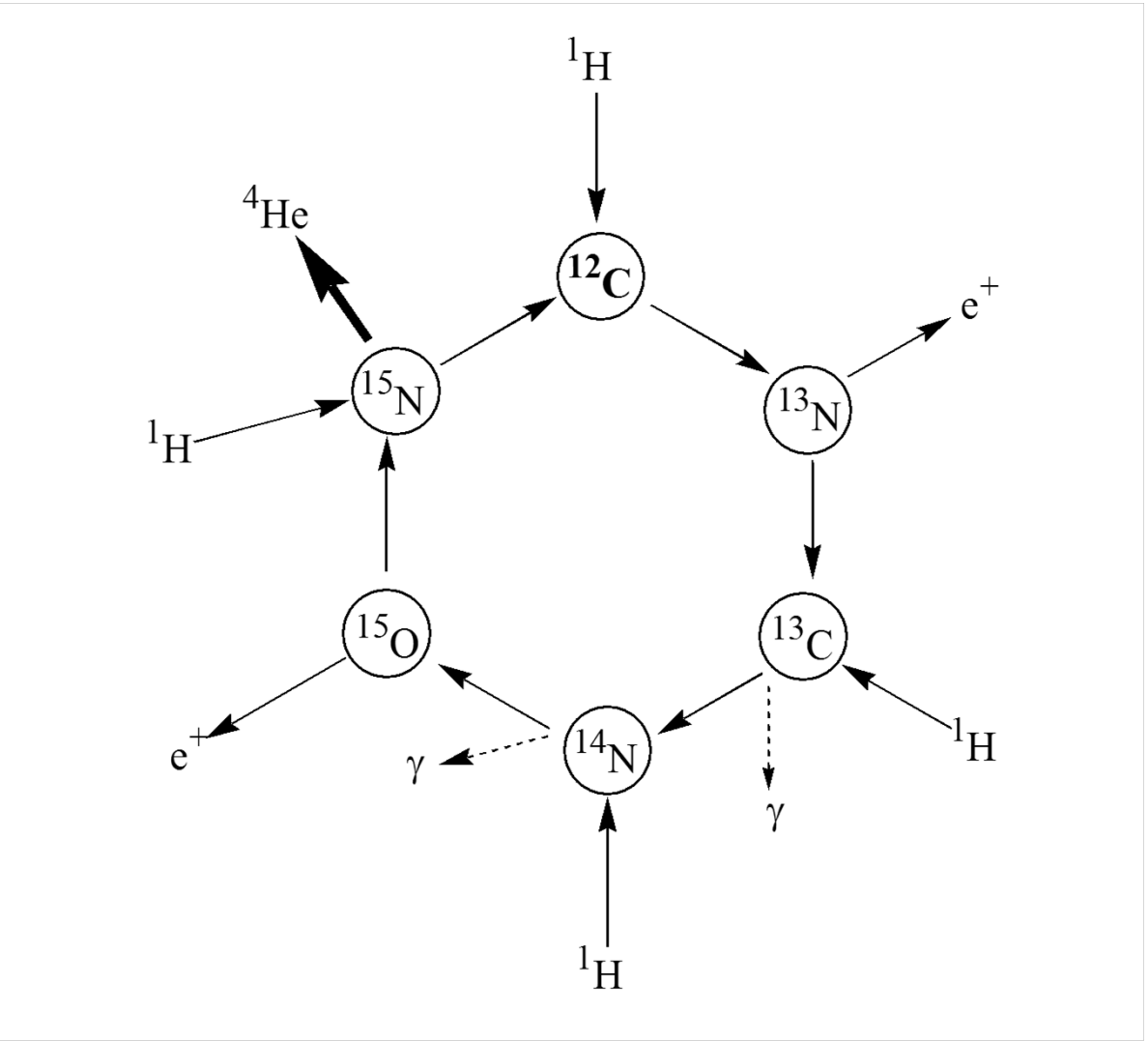
CN cyklus



Uhlíkový cyklus

CN cyklus

$4\ {}^{1}H \rightarrow {}^{4}He$



Syntéza jader ve vesmíru

Slunce $\rightarrow$ rudý obr $\rightarrow$ bílý trpaslík

$^{3}He + {}^{4}He \rightarrow {}^{7}Be + \gamma + 1.59\ MeV$

$^{4}He + {}^{4}He \rightarrow {}^{8}Be$

$^{7}Be + p \rightarrow {}^{8}B + \gamma + 13\ MeV$

$^{8}B \rightarrow {}^{8}Be + \gamma + e^{+} + 10.78\ MeV$

$^{8}Be + {}^{4}He \rightarrow {}^{12}C$

$^{12}C + {}^{4}He \rightarrow {}^{16}O$

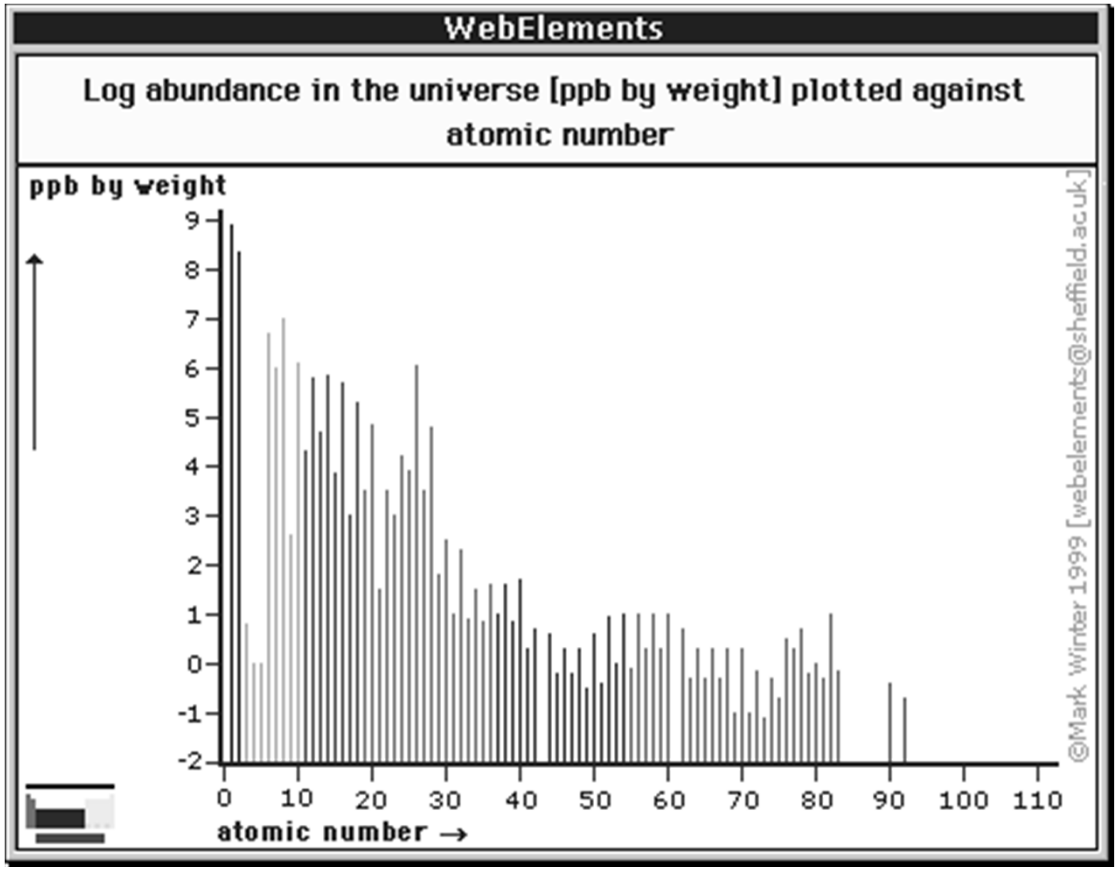
Syntéza jader ve vesmíru

Těžké hvězdy
$^{12}C \rightarrow Ne, Mg$
$^{16}O \rightarrow Si, S$
$Si \rightarrow {}^{58}Fe$

Fe jádra nejstabilnější
Jak dál?

Výbuch supernovy
vysoké toky neutronů

$Fe + n \rightarrow Au \rightarrow Pb \rightarrow U$



Termojaderné reakce

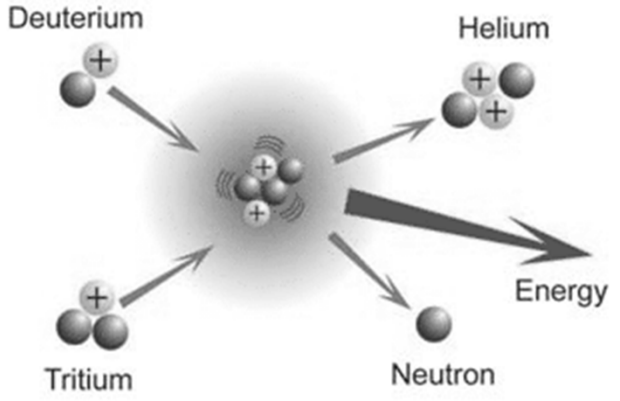
$^{2}H + {}^{2}H \rightarrow {}^{3}He + n + 3.3\ MeV$

$^{2}H + {}^{2}H \rightarrow {}^{3}H + p + 4.0\ MeV$

$^{3}H + {}^{2}H \rightarrow {}^{4}He + n + 17.6\ MeV$ A další…

ITER Cadarache, Francie

National Ignition Facility, USA

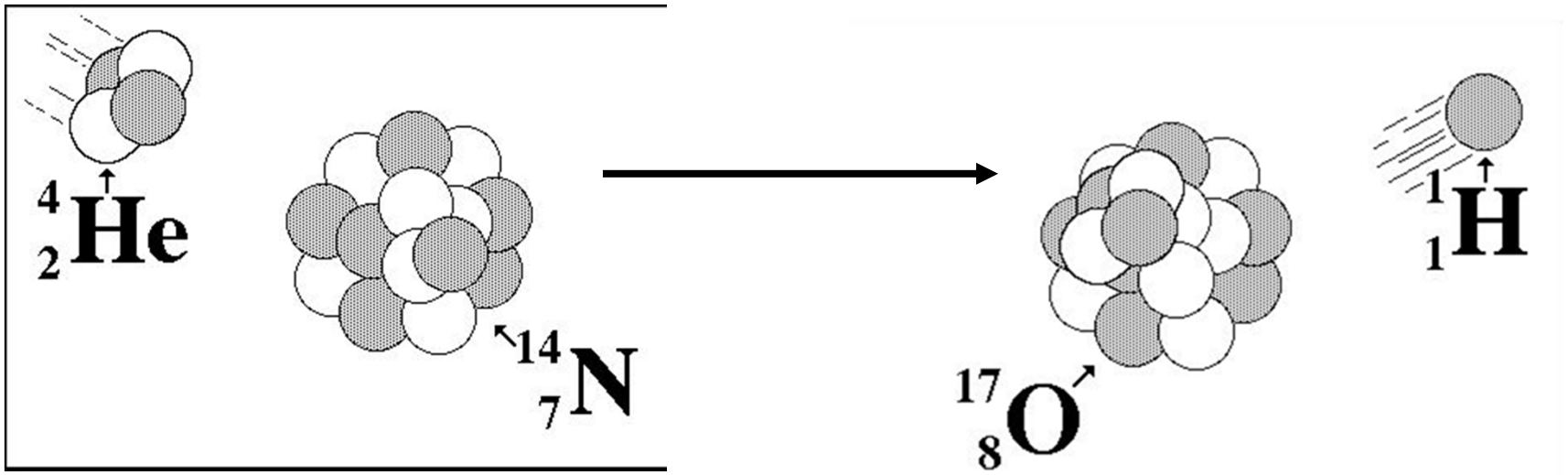


Transmutace

1919, Rutherford, první umělá příprava prvku

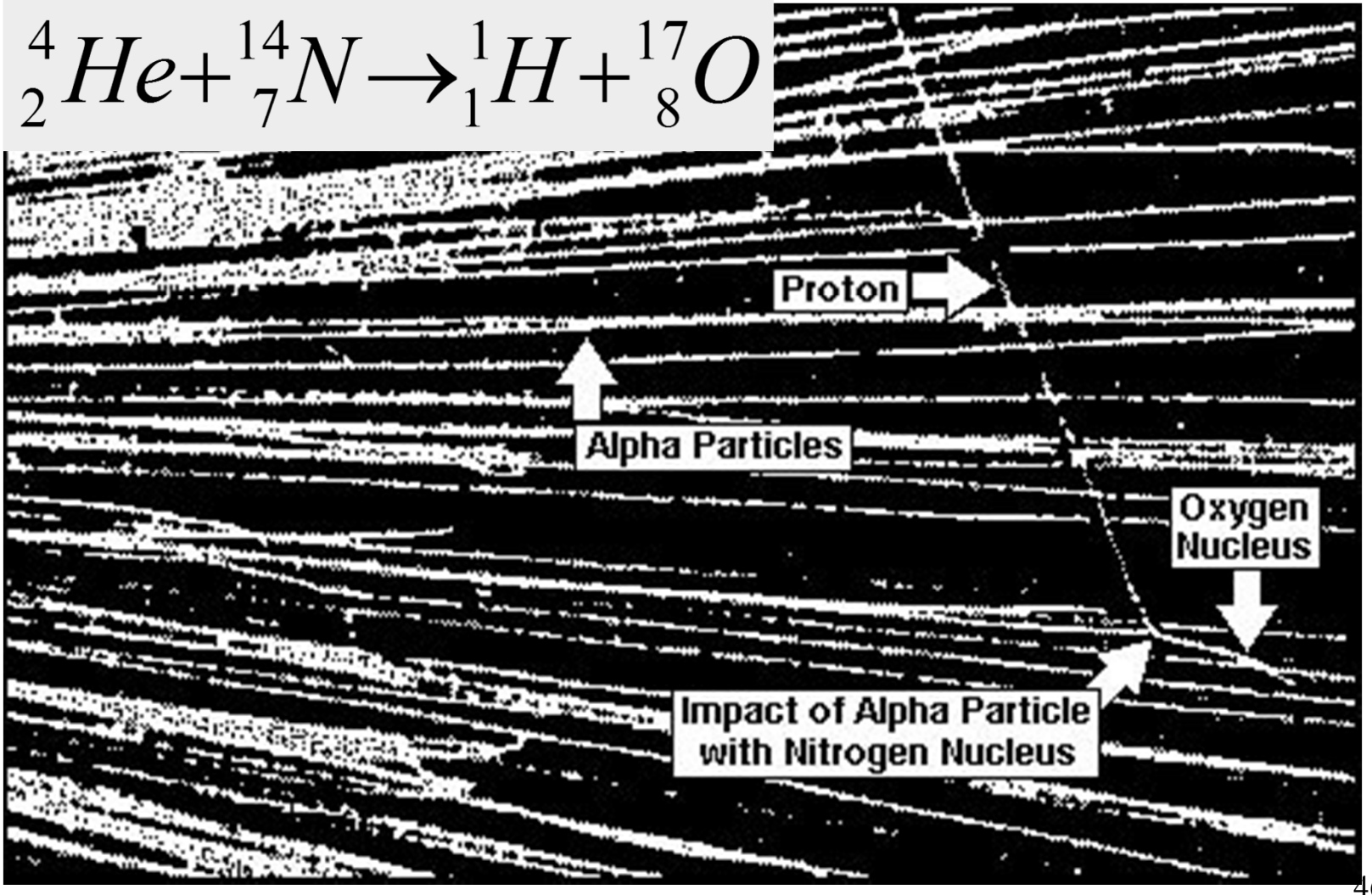
$$ {}^{4}_{2}He + {}^{14}_{7}N \rightarrow {}^{1}_{1}H + {}^{17}_{8}O $$

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



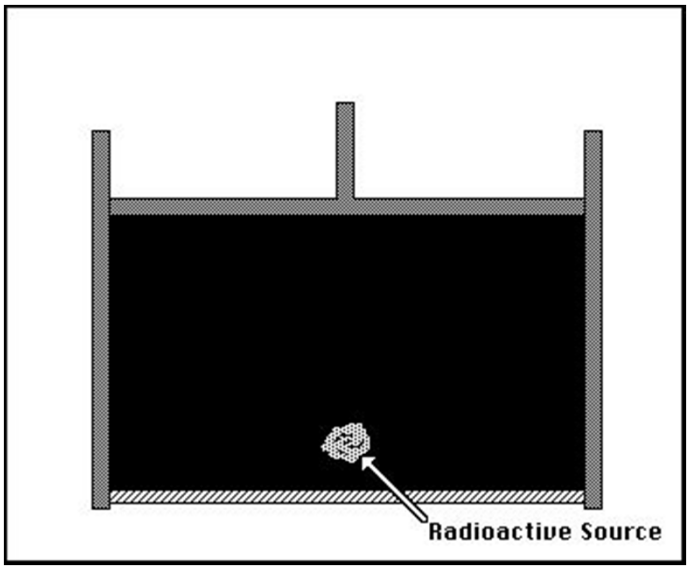
Transmutace

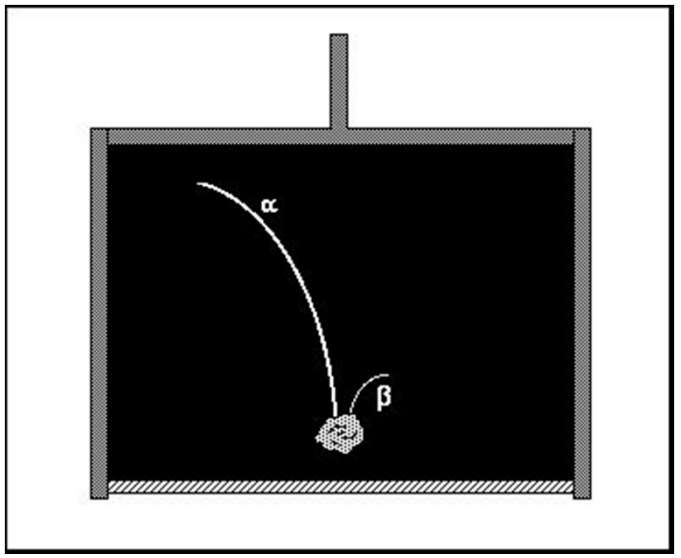
$$^{4}_{2}He + ^{14}_{7}N \rightarrow ^{1}_{1}H + ^{17}_{8}O$$



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

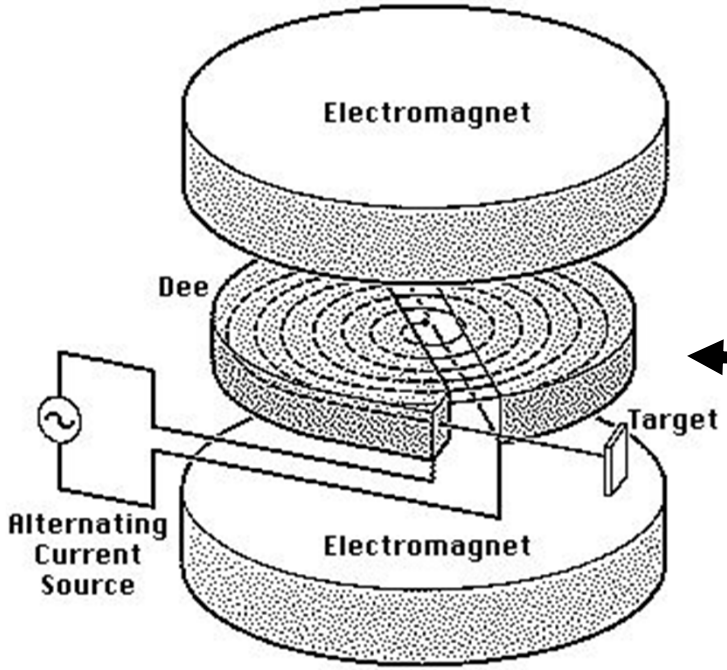
Expanze, ochlazení, vznik přesycené páry, částice při průletu ionizují okolní atomy, kondenzace na ionizovaných atomech – kondenzační stopa

Cyklotron

1929

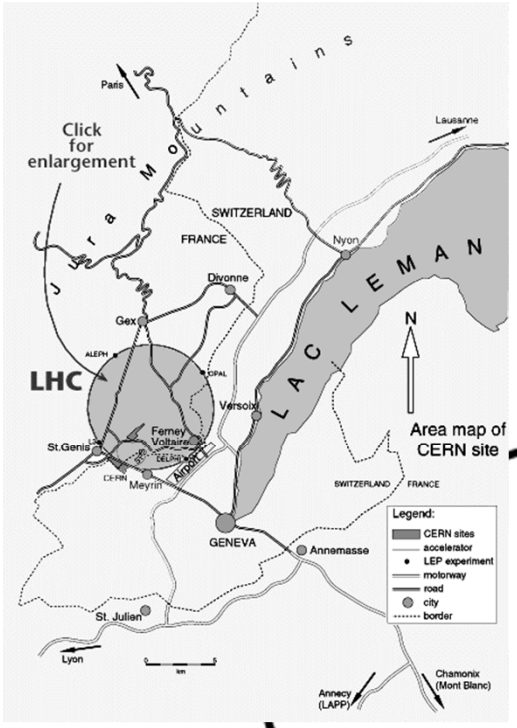
urychlovač pozitivních iontů (H^+, D^+, ...)
průchod potenciálovým rozdílem,
střídavé poz/neg nabíjení D elektrod,
kruhový pohyb v magnetickém poli,
energie do 100 MeV

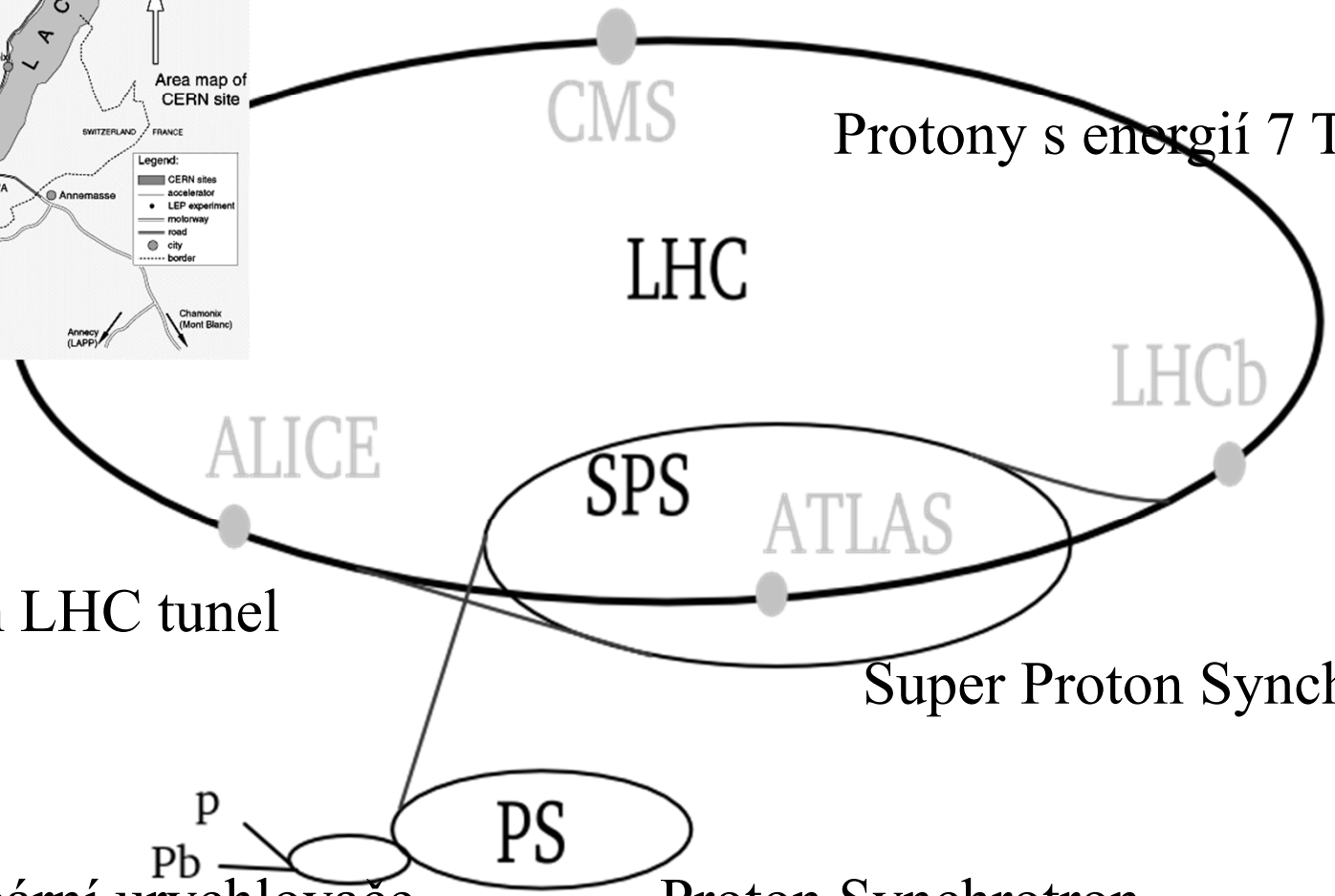
Ernest O. Lawrence
(1901-1958)
NP za fyziku 1939



duté elektrody tvaru D

Large Hadron Collider





Protony s energií 7 TeV

27 km LHC tunel

Super Proton Synchrotron

Lineární urychlovače (protony a ionty)

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

$$ {}_{1}^{1}H + {}_{3}^{7}Li \rightarrow {}_{2}^{4}He + {}_{2}^{4}He $$

1951 společně NP za fyziku

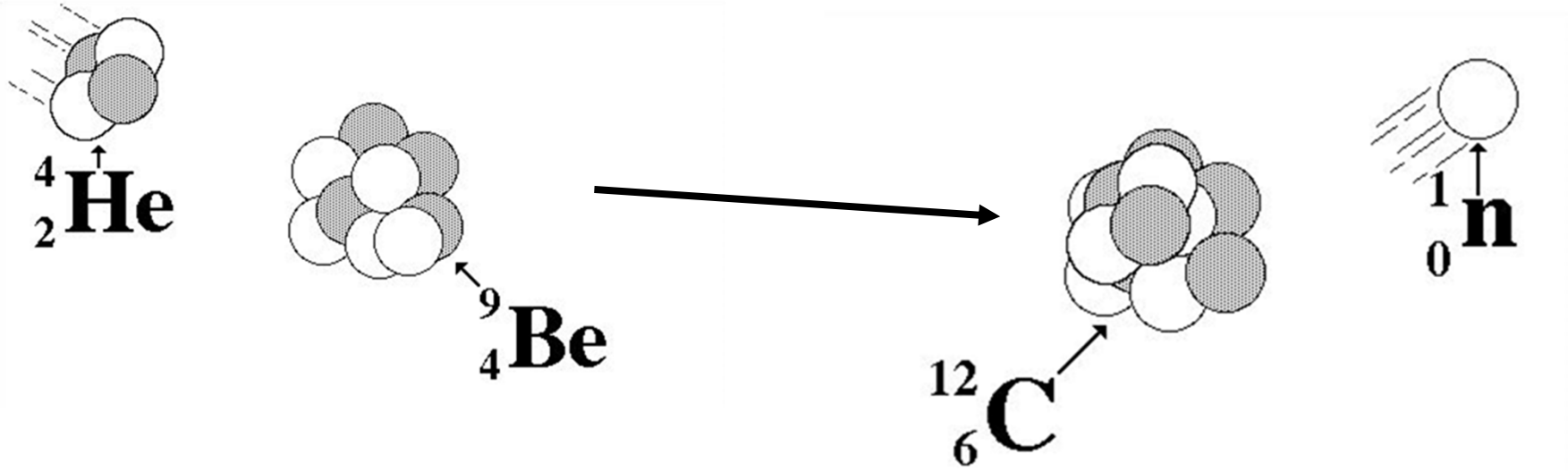
1932

Objev neutronu

$$ {}^{4}_{2}He + {}^{9}_{4}Be \rightarrow {}^{12}_{6}C + {}^{1}_{0}n $$

neutron = částice s nulovým nábojem, spin ½
m = 1.67470 10^{-27} kg

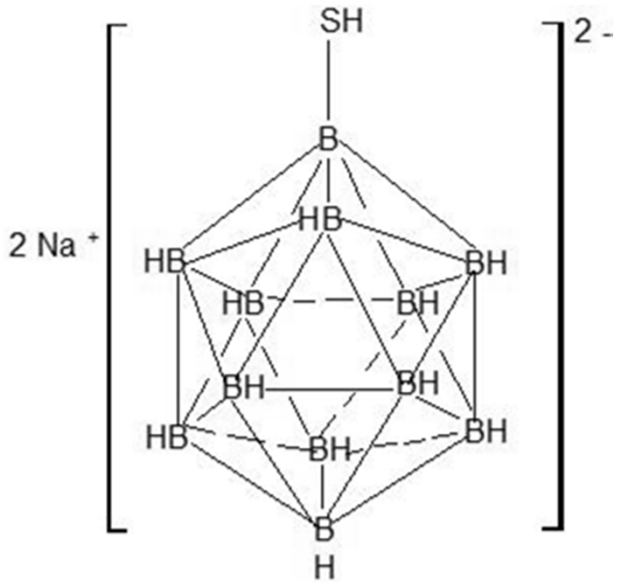
James Chadwick
(1891-1974)
NP za fyziku 1935

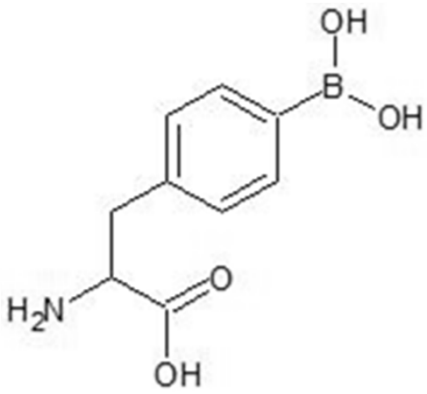


BNCT = Boron Neutron Capture Therapy

$$^{10}B + {}^{1}n_{th} = {}^{7}Li + {}^{4}He + \gamma + 2.4\ MeV$$

Dolet v tkáni asi 12 μm – průměr buňky





Akumulace v tumoru
(20 μg/g tumoru)

Transmutace

Cyklotron

$$^{4}_{2}He + ^{238}_{92}U \rightarrow ^{239}_{94}Pu + 3\,^{1}_{0}n$$

Bombardování neutrony

$$^{59}_{27}Co + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{60}_{27}Co$$

1933

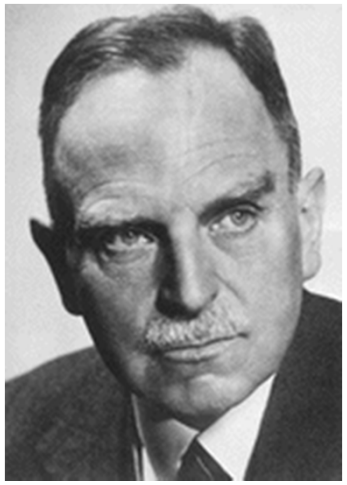
Umělá radioaktivita

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

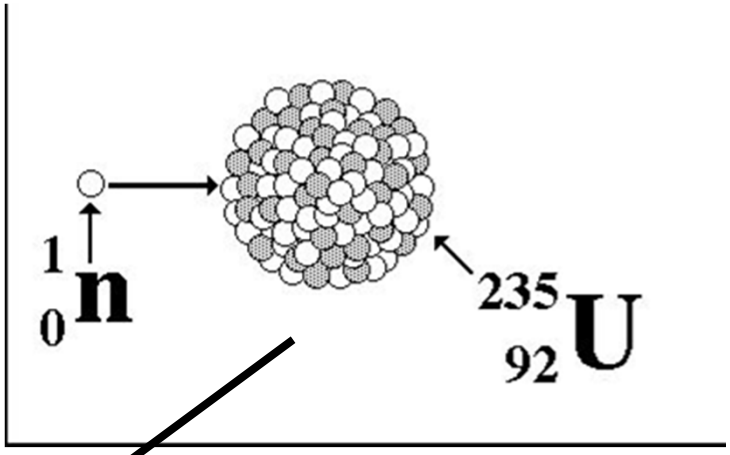
$$^{4}_{2}He + ^{27}_{13}Al \rightarrow ^{30}_{15}P + ^{1}_{0}n$$

$$^{30}_{15}P \rightarrow ^{30}_{14}Si + ^{0}_{+1}e$$

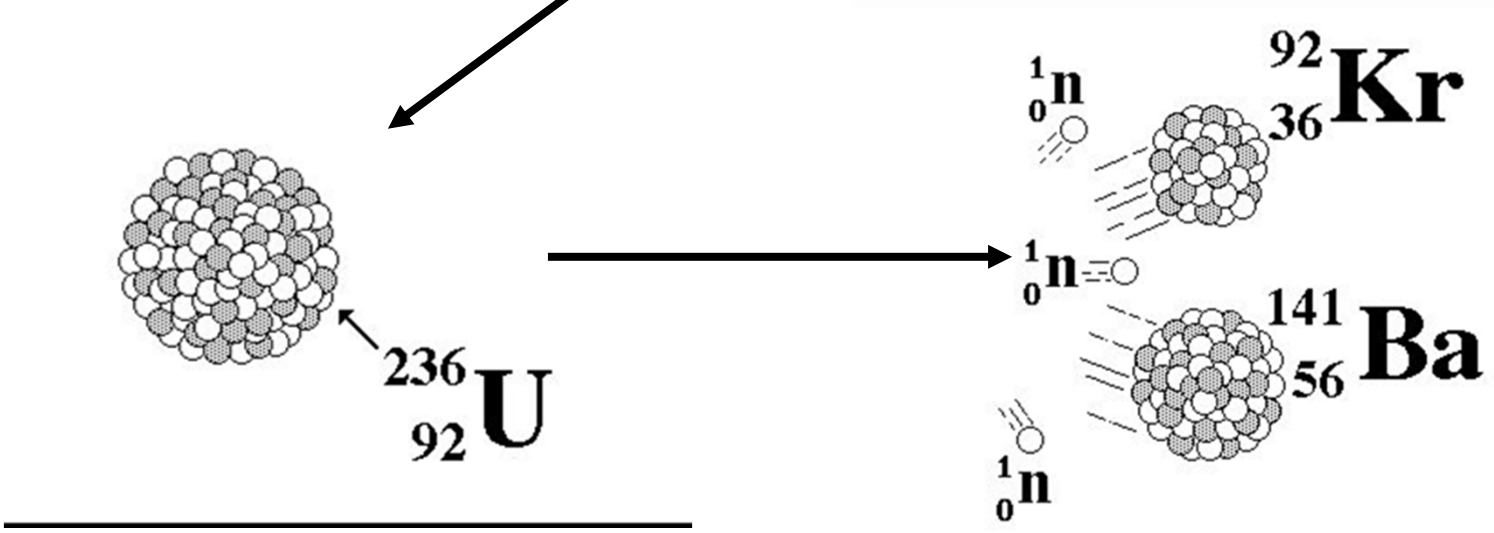
Štěpení jader



Otto Hahn
(1879-1968)
NP za fyziku1944



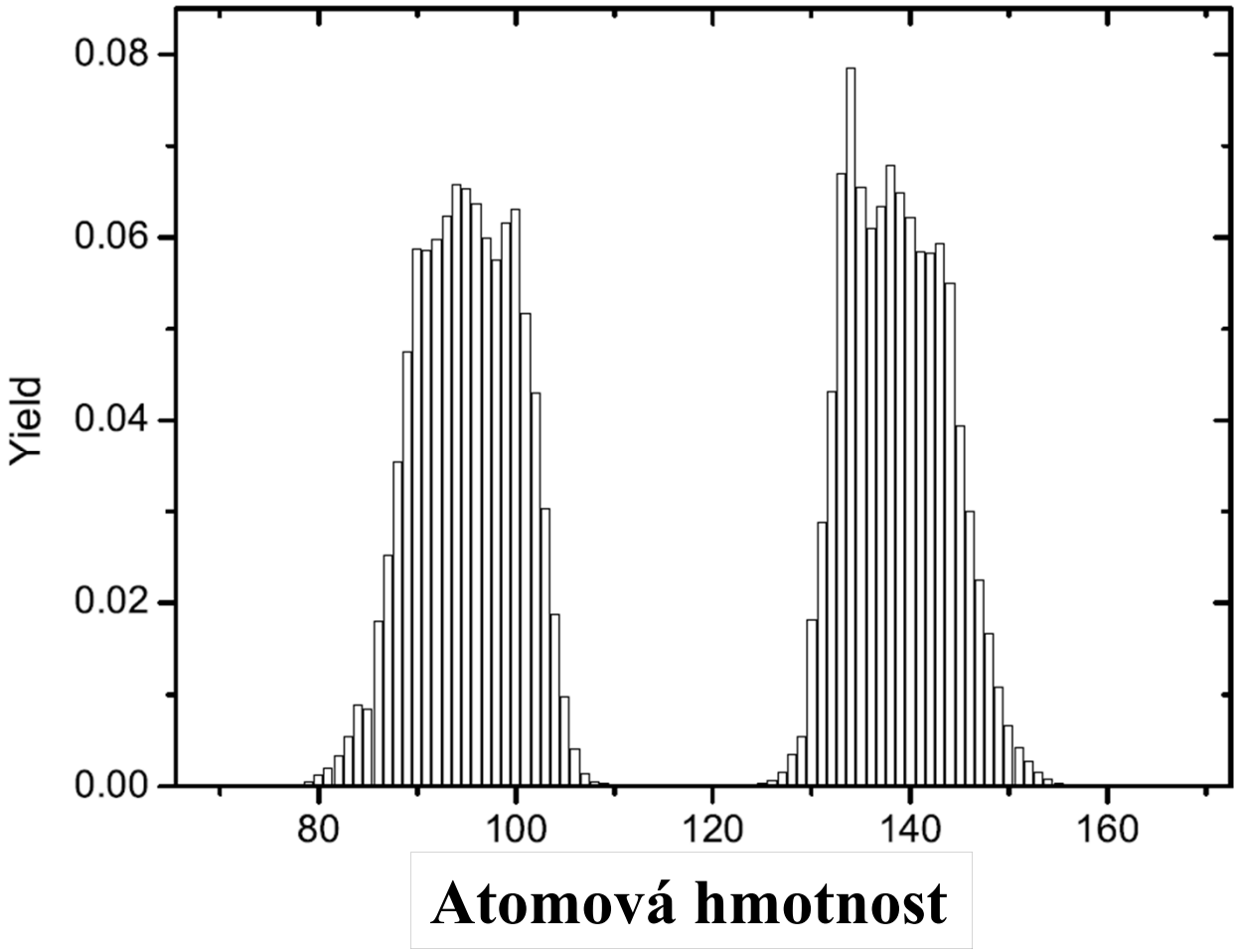
^{235}U, 0.71%
Pomalé neutrony



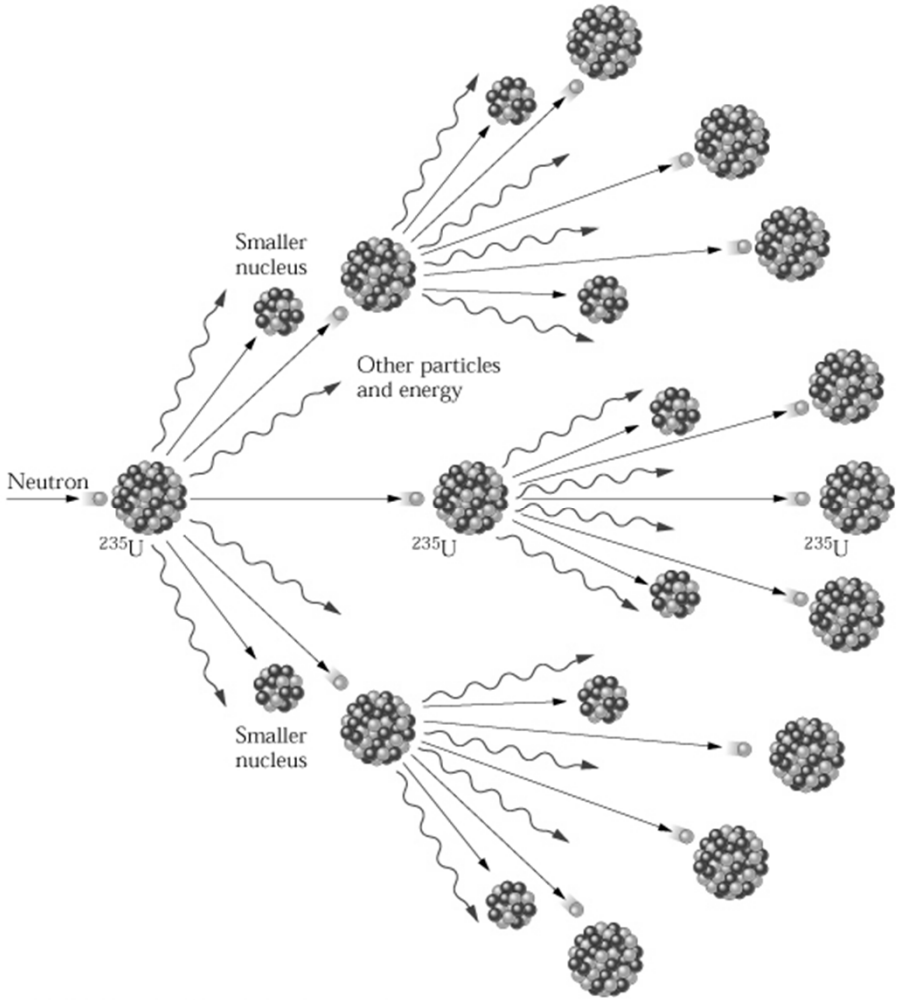
190 MeV

Štěpení ^{235}U

Rozložení výtěžku štěpných produktů pro ^{235}U.



Řetězová reakce neřízená

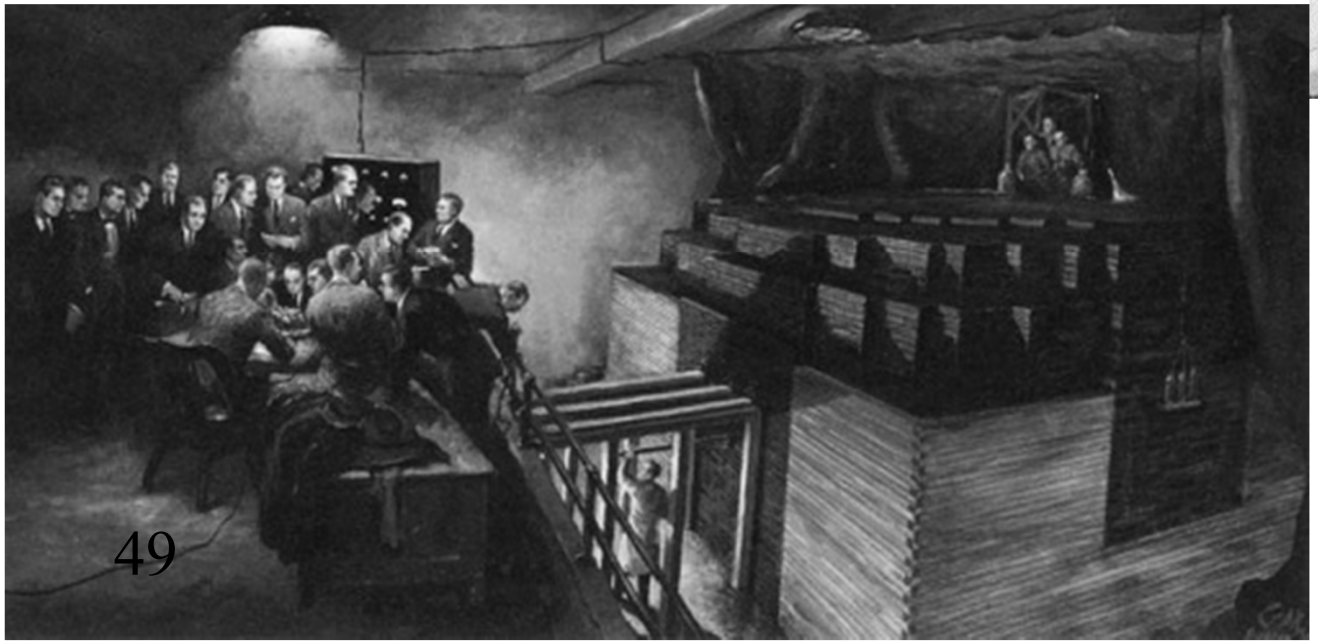


Copyright 1999 John Wiley and Sons, Inc. All rights reserved.

Jaderný reaktor

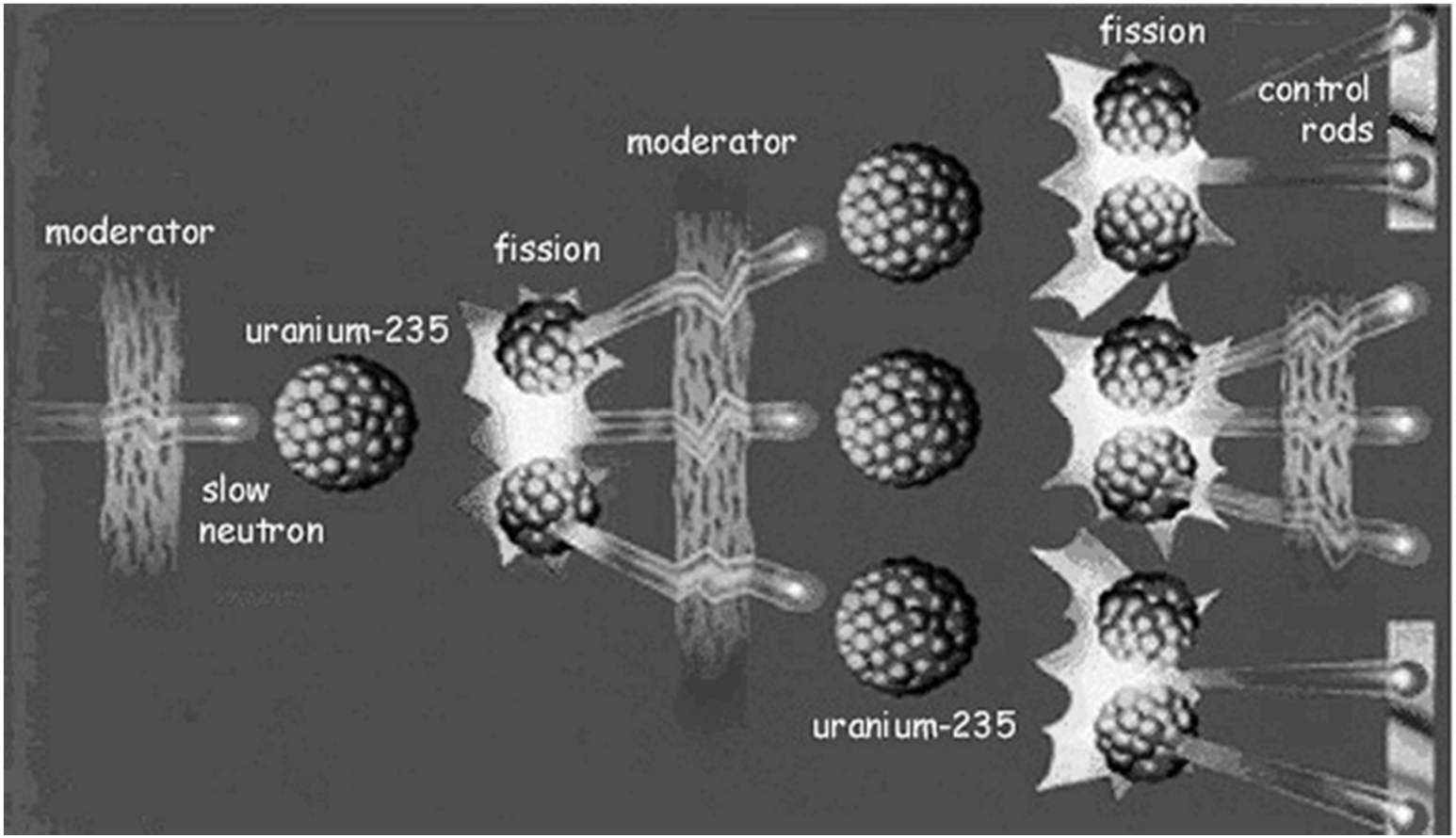
1942 Chicago Pile - 1

První řízená štěpná reakce ^{235}U



Enrico Fermi
(1901-1954)
NP za fyziku 1938

Řízená štěpná reakce ^{235}U



Moderátor = zpomalení neutronů – grafit

Cd dobře pohlcuje neutrony – zachycení n

Transurany

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

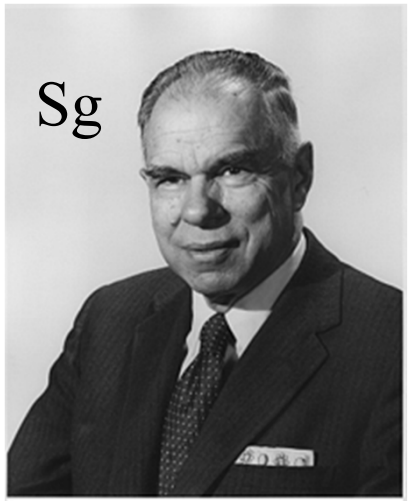
1940 První umělý transuran = $^{239}_{93}Np$

bombardování neutrony

$^{238}U + n \rightarrow {}^{239}U \rightarrow {}^{239}Np + e$

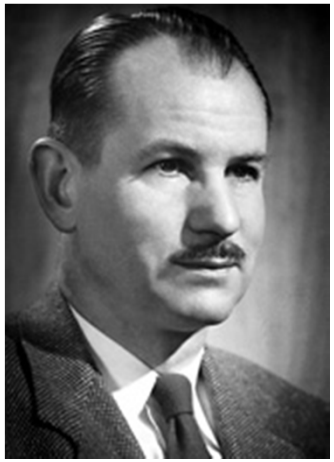
$^{239}_{94}Pu$

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



Glenn T. Seaborg
(1912- 1999)

Sdílená NP
za chemii 1951



Edwin M. McMillan
(1907- 1991)

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

Syntéza transuranů

Bombardování kladnými ionty

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

připraveny transurany po Z = 118

$$^{208}_{82}Pb + ^{62}_{28}Ni \rightarrow ^{269}_{110}Ds + ^{1}n \qquad t_{½} = 270\ \mu s$$

$$^{208}_{82}Pb + ^{64}_{28}Ni \rightarrow ^{271}_{110}Ds + ^{1}n$$

$$^{209}_{83}Bi + ^{54}_{24}Cr \rightarrow ^{262}_{108}Bh + ^{1}n$$

- Spojený ústav jaderných výzkumů, Dubna, Rusko
- GSI (Gesellschaft fur Schwerionenforschung), Německo
- Lawrence Berkeley and Livermore National Laboratories, CA, USA

Syntéza transuranů

Bombardování kladnými ionty
^{4}He, ^{12}C, ^{15}N, ^{18}O, ... ^{70}Zn

připraveny transurany po Z = 118

$$^{249}_{97}Bk + {}^{48}_{20}Ca \rightarrow {}^{293}_{117}X + 3\ {}^{1}n$$

$$^{208}_{82}Pb + {}^{70}_{30}Zn \rightarrow {}^{278}_{112}Cn \rightarrow {}^{277}_{112}Cn + {}^{1}n$$

$$^{48}_{20}Ca + {}^{248}_{96}Cm \rightarrow {}^{296}_{116}Lv \rightarrow {}^{293}_{116}Lv + 3\ {}^{1}_{0}n$$

Kinetika radioaktivního rozpadu

$-dN/dt = k\,N$ N

$dN/N = -k\,dt$

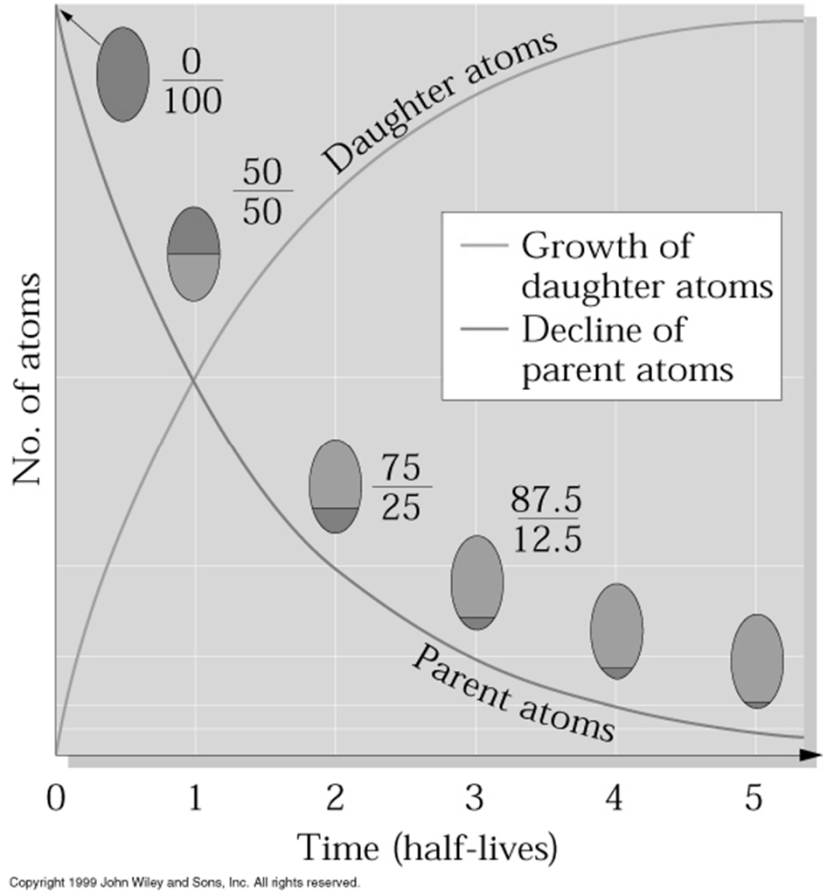
Integrace

$t = 0 \quad N = N_0$

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

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

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



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

Poločas rozpadu, $t_{1/2}$

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

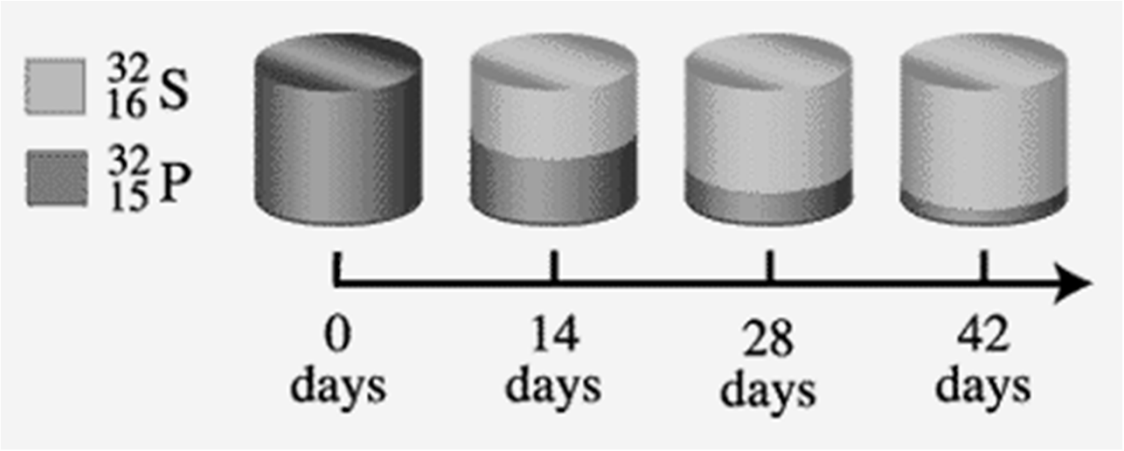
$\ln(N/N_0) = -k\,t$

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

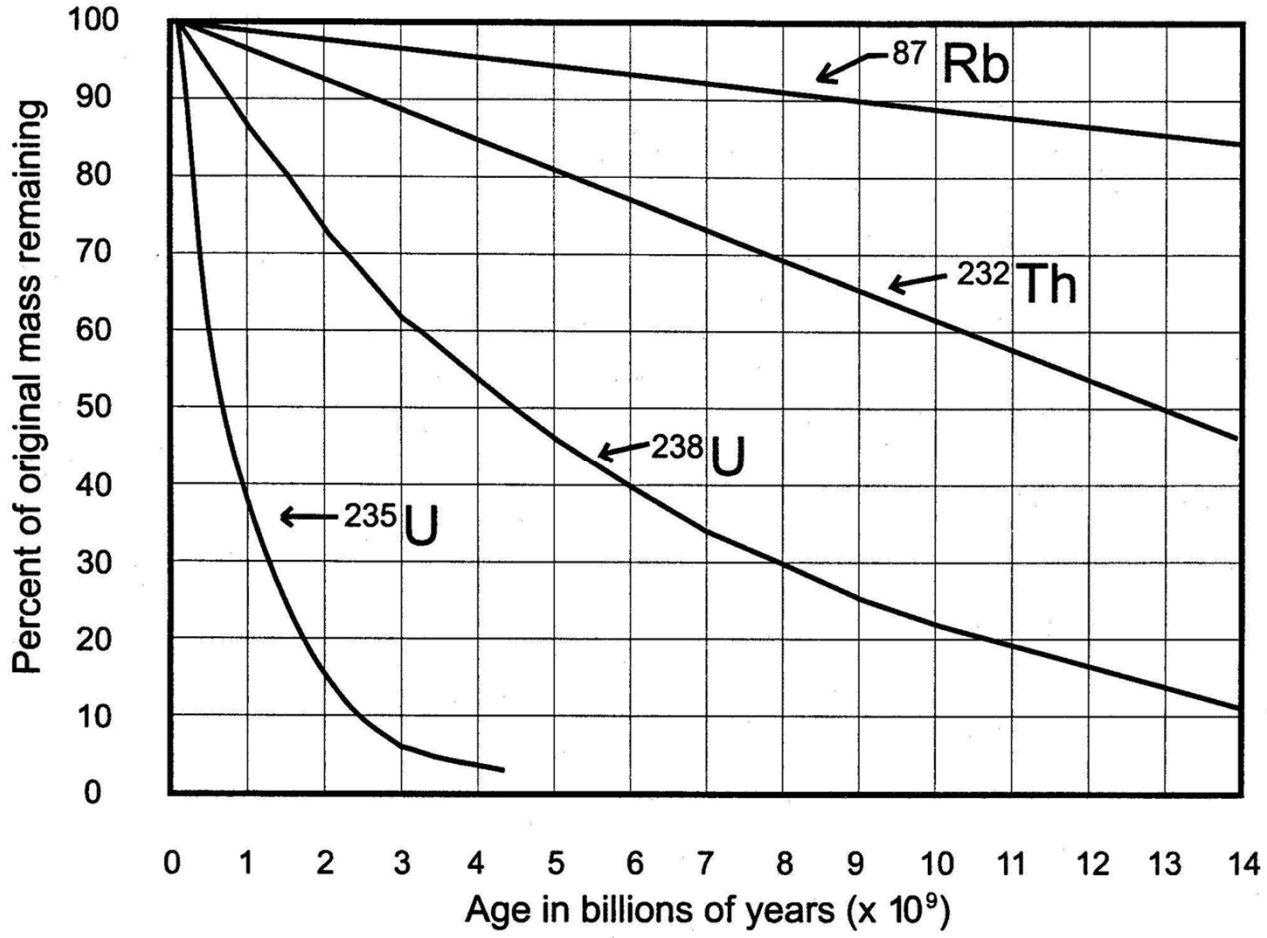
$t_{1/2} = \ln(2) / k$

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

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



Poločas rozpadu



Datování pomocí ^{14}C

Willard Libby
(1908 - 1980)
NP za chemii 1960

^{14}C vzniká kontinuálně vysoko v atmosféře

$^{14}_{7}N + {}^{1}_{o}n$ (kosmické záření) $\rightarrow {}^{14}_{6}C + p^{+}$

Rozpadá se beta rozpadem s poločasem $t_{½} = 5730$ let

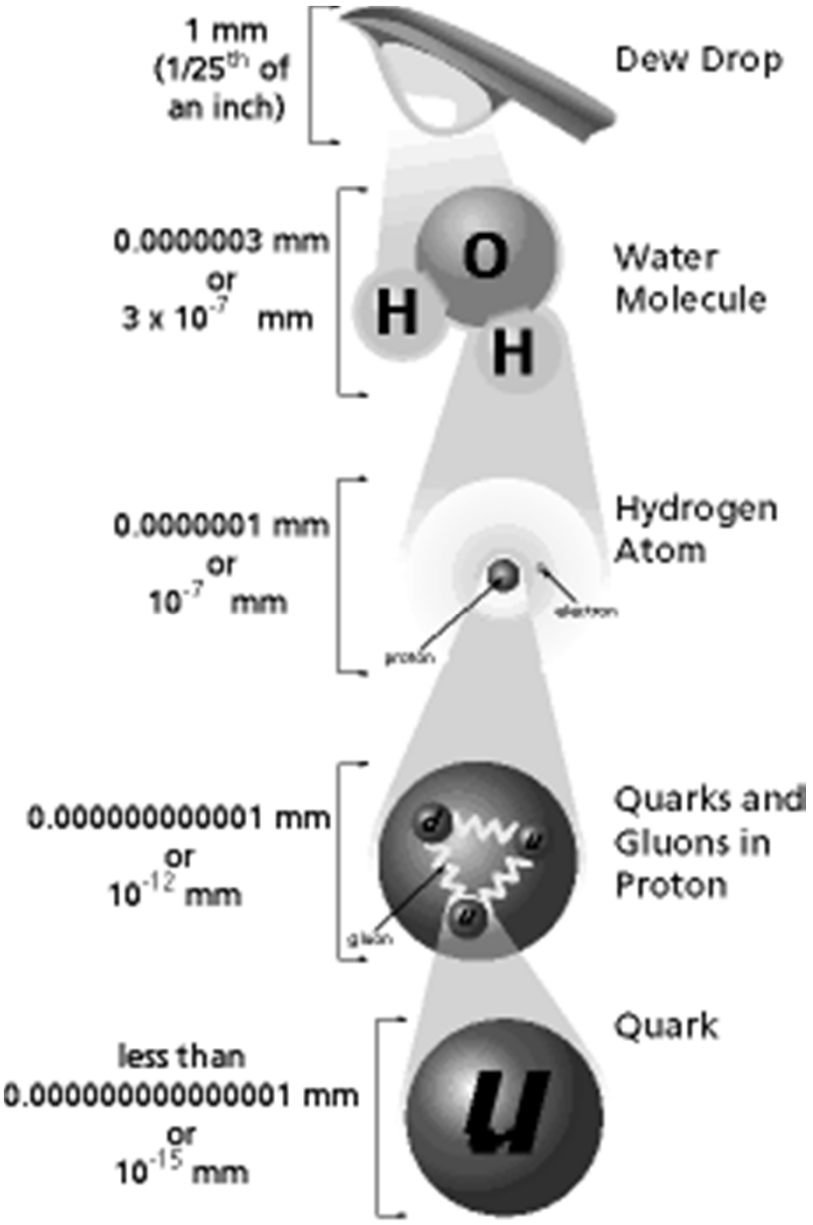
$^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + {}^{0}_{-1}e$

V atmosféře a živých rostlinách (CO_2, fotosyntéza) se ustaví rovnovážná koncentrace ^{14}C. Po smrti organismu koncentrace ^{14}C klesá.

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

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

$k = \ln(2) / t_{½}$ $\qquad$ $\ln(N/N_0) = -t\,\ln(2) / t_{½}$



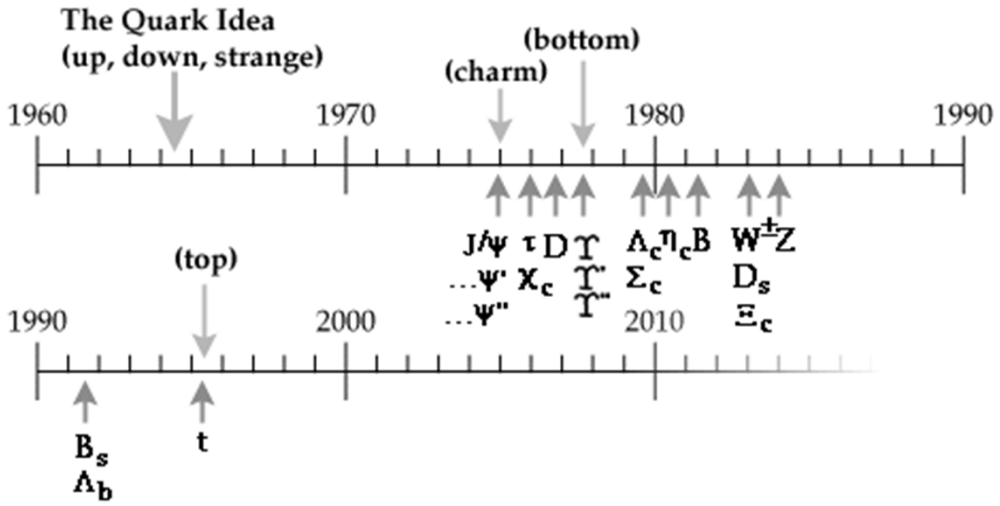
3 Å

$1\ \text{Å} = 10^{-10}\ \text{m}$

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

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

Elementární částice



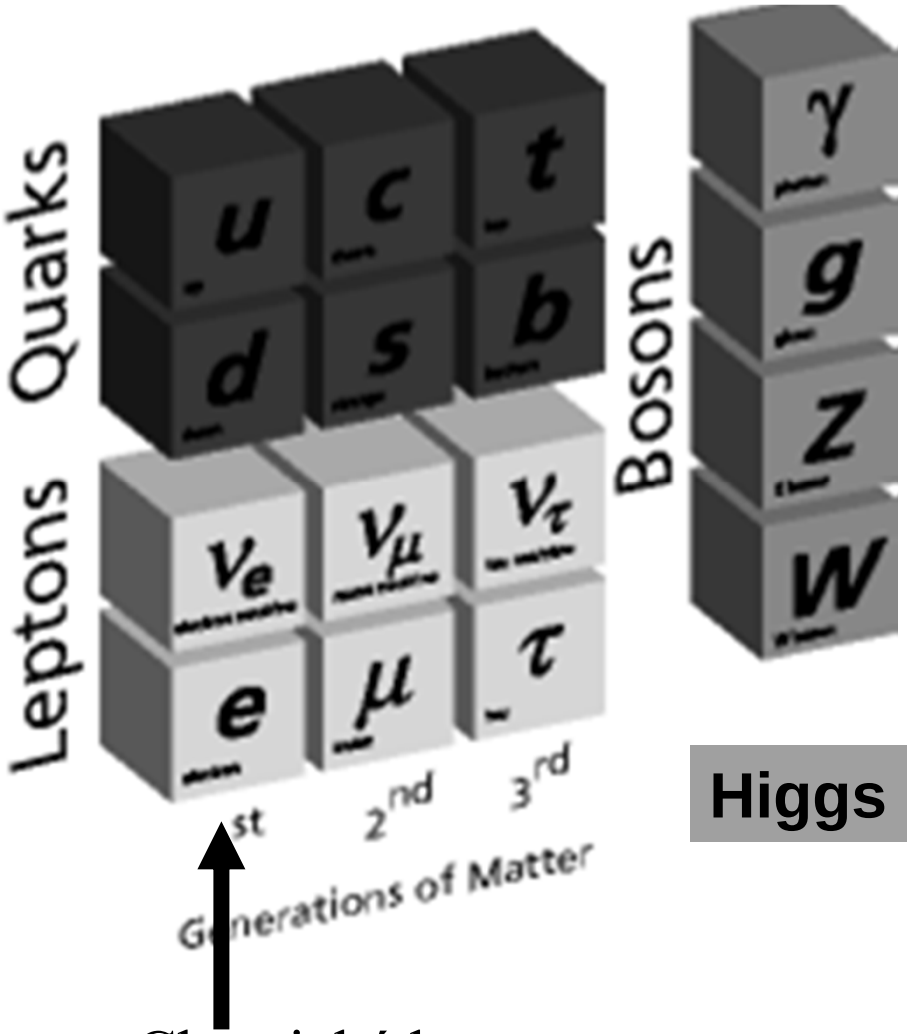
Zoologická zahrada částic

Quarky
- Spin
- Zlomkový náboj

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

Elementární částice – Standardní Model

Astrofyzika a částicová fyzika



Chemická hmota

Přenašeče interakcí

← Elmagn.

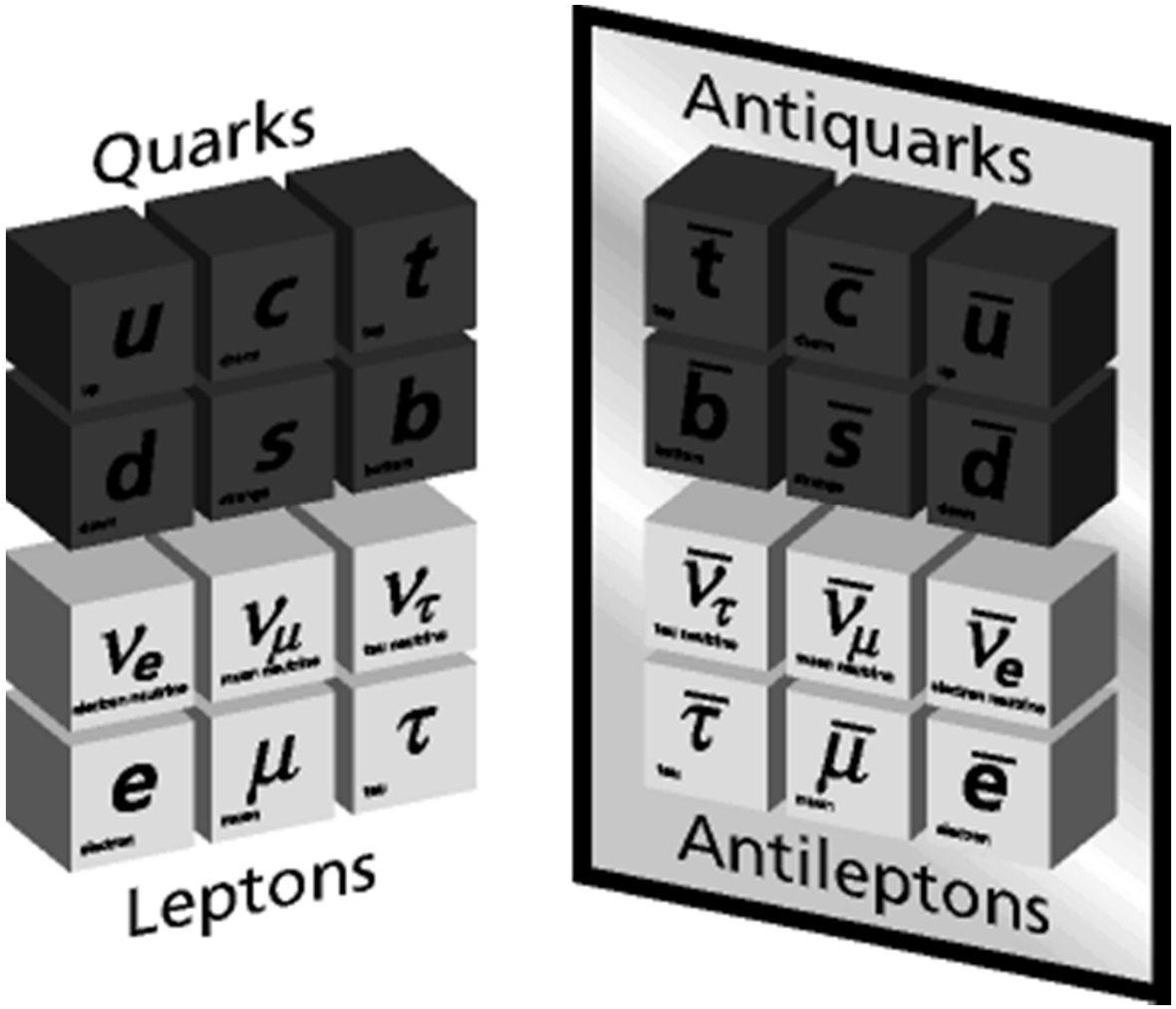
← Silné inter.

← Slabé inter.

γ a g nemají hmotnost
Z a W mají hmotnost

Higgs dodává hmotnost Z a W bosonům

Antičástice



Leptony

lepton	značka	el. náboj	m [amu]
elektron	e^-	–1	$5.5\ 10^{-4}$
elektronické neutrino	ν_e	0	
mion	μ	–1	0.1144
mionické neutrino	ν_μ	0	
tauon	τ	–1	1.915
tauonické neutrino	ν_τ	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

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

Chemická hmota

Quarky

Quarky nejsou známy volné, nemají hmotnost
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 volné)

Hadrony

Hadron	**značka**	**el. náboj**	**složení**
pozitivní pion	Π^+	+1	ud
pozitivní kaon	K^+	+1	us
proton	p	+1	uud
neutron	n	0	udd
lambda	Λ	0	uds

Bosony

Zprostředkovatelé interakcí

Boson	**značka**	**el. náboj**	**interakce**
foton	γ	0	elektromagnetická
gluon	g	0	silná
W-boson	W^+ W^-	+1 –1	slabá
Z-boson	Z	0	slabá

Zákon zachování B a L čísla

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

např.

	$_{-1}e$	$+$ $_{1}e$	$\rightarrow$	$2\,\gamma$
L	1	-1		0
	p^{+}	$+$ $_{-1}e$	$\rightarrow$	n
B	1			1