

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}C - ^{14}N ; ^3H - ^3He)

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 $Z \sim N$

Jen ^1H a ^3He mají více p než n.

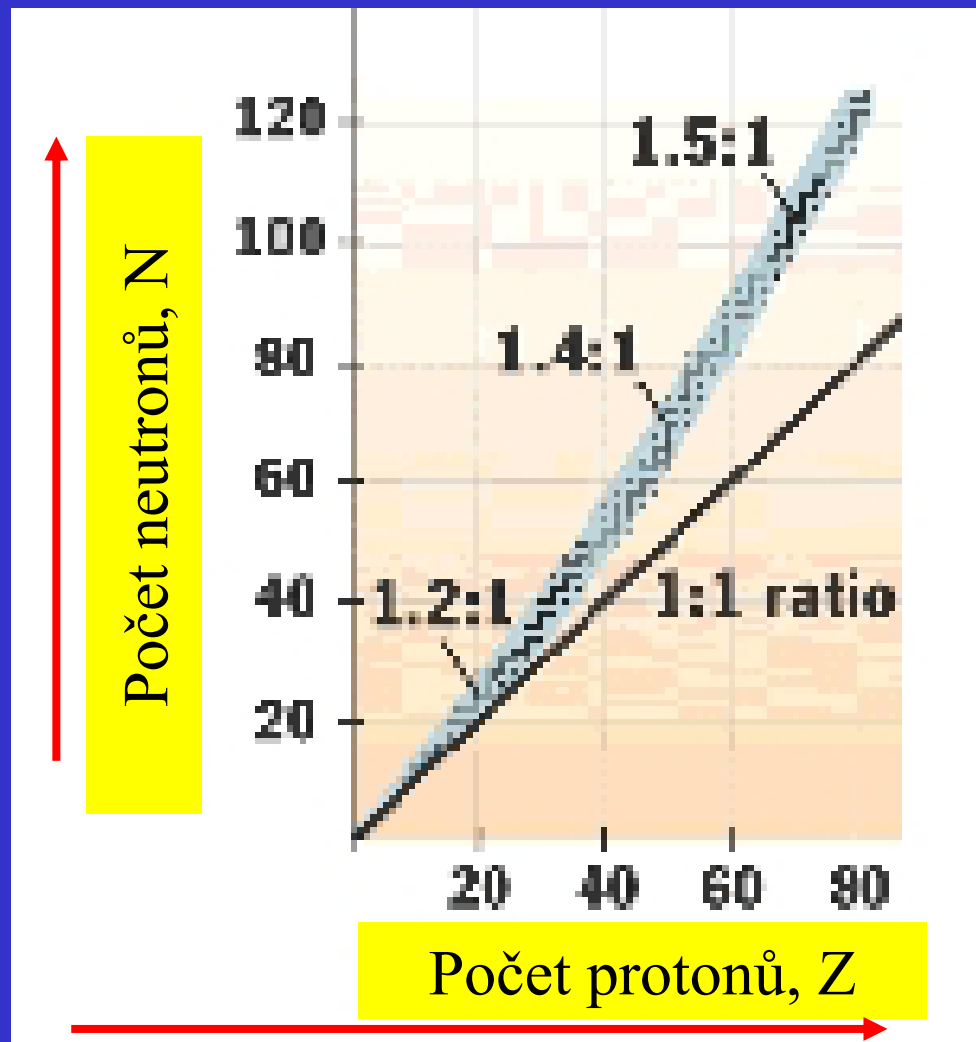
^2H , ^4He , ^6Li , ^{10}B , ^{12}C , ^{14}N , ^{16}O , ^{20}Ne , ^{24}Mg , ^{28}Si , ^{32}S , ^{36}Ar a ^{40}Ca
mají stejný počet p a n

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



7000 možných kombinací
protonů a neutronů pro jádra s
až 120 protony

Počet protonů, Z

He 2 p a max 6 n

Počet neutronů, N

Stabilita jader

U některých prvků existují v přírodě radioaktivní izotopy s dlouhým poločasem přeměny ^{40}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 ${}_7p$ 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

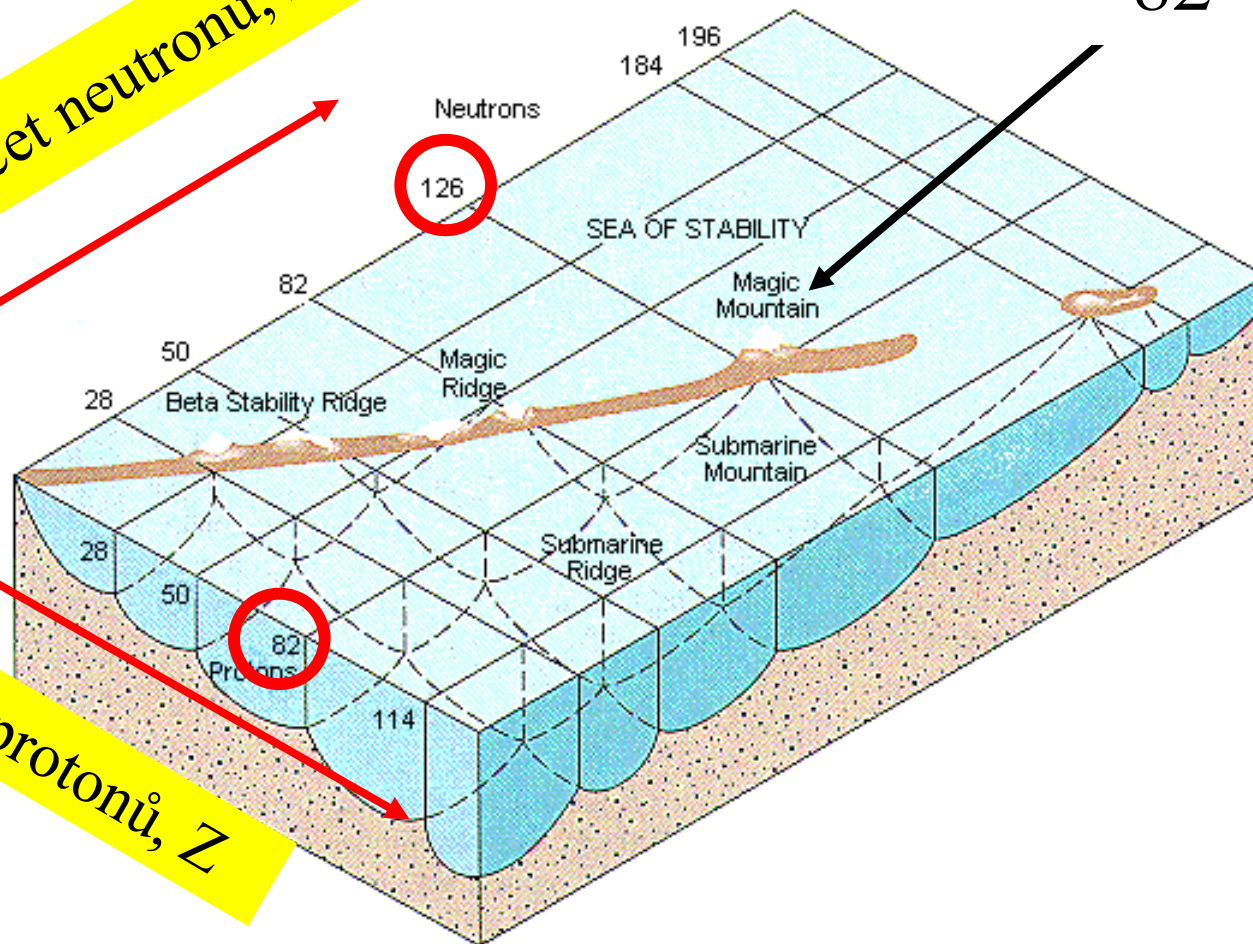
Nuklidy ${}^4\text{He}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{40}\text{Ca}$, ${}^{48}\text{Ca}$ a ${}^{208}\text{Pb}$ mají magický počet p i n

Ostrov stability

$^{208}_{82}\text{Pb}$

Počet neutronů, N

Počet protonů, Z



Hmotnost elektronu a nukleonů

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

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

Hmotnostní úbytek

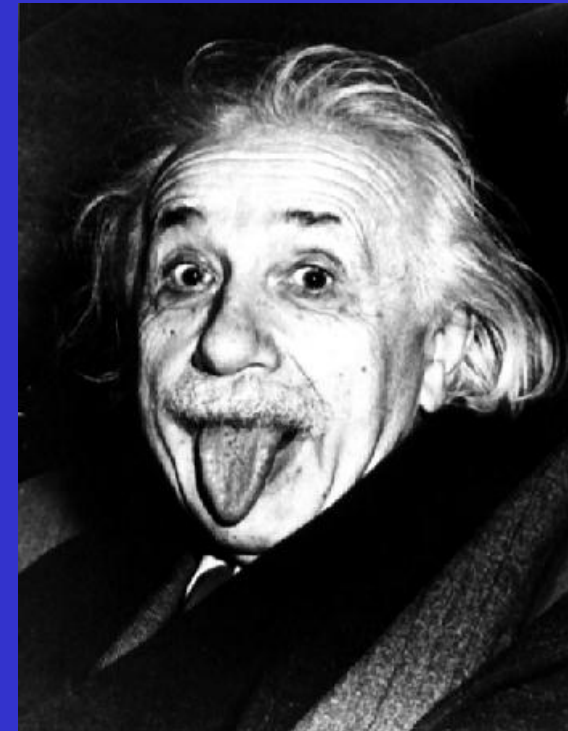
Hmotnost jádra je vždy menší než součet hmotností nukleonů

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

Hmotnostní úbytek $\Delta m < 0$
[Δm 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

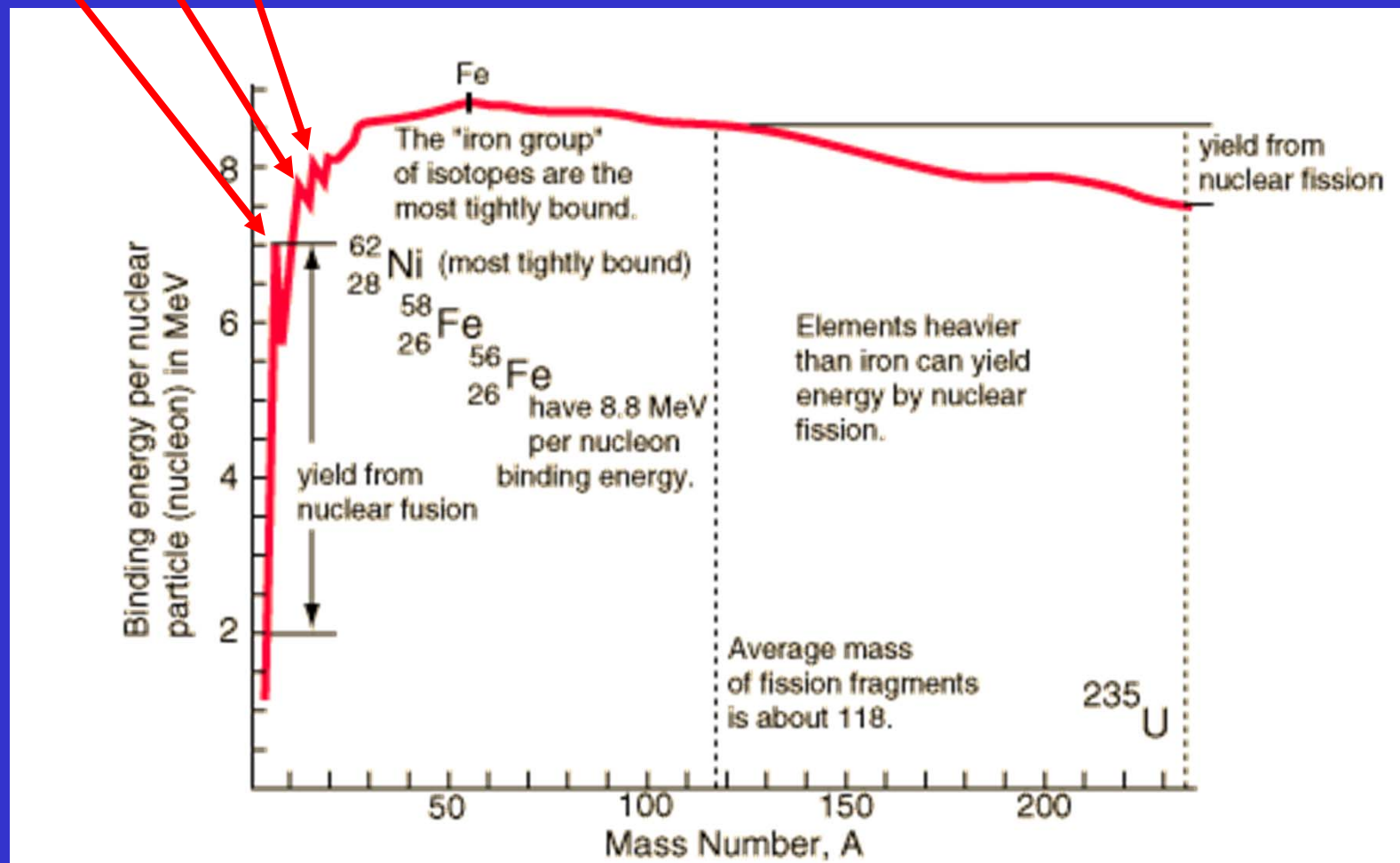
Nuklid	E_v , MeV
^2H	2.226
^4He	28.296
^{14}N	104.659
^{16}O	127.619
^{40}Ca	342.052
^{58}Fe	509.945
^{206}Pb	1622.340
^{238}U	1822.693

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

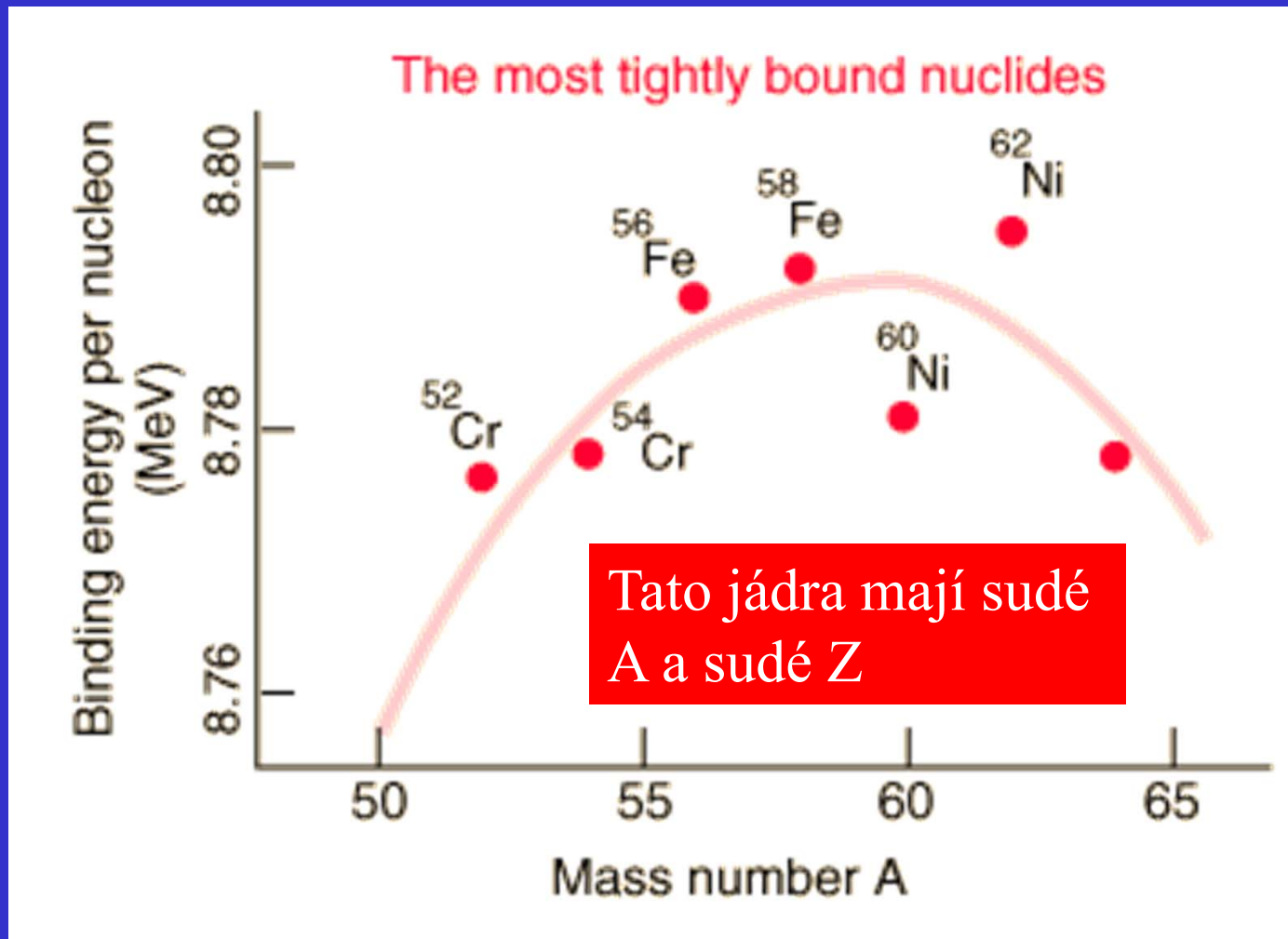
Nuklid	$E_v(\text{st}), \text{MeV}$	E_v, MeV	
^2H	1.113	2.226	
^4He	7.074	28.296	$E_v(\text{st}) = E_v / A$
^{14}N	7.476	104.659	Energie na odtržení 1
^{16}O	7.976	127.619	nukleonu
^{19}F	7.779	147.801	
^{40}Ca	8.551	342.052	
^{55}Mn	8.765	482.070	
^{58}Fe	8.792	509.945	
^{62}Ni	8.795	545.259	
^{206}Pb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

^4He ^{12}C ^{16}O

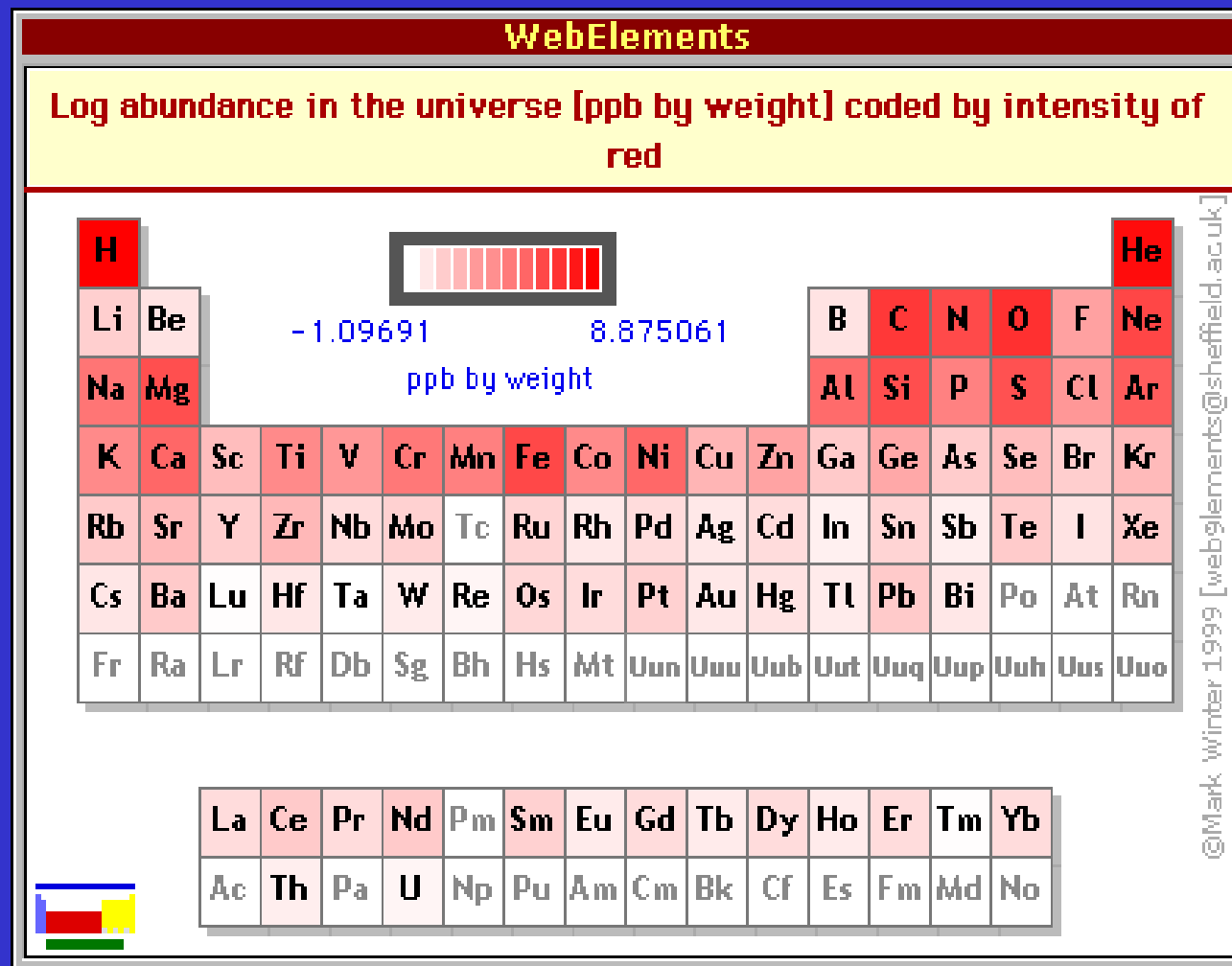
Střední vazebná energie jádra



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 $411 \text{ kJ mol}^{-1} = 4.25 \text{ eV}$

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.

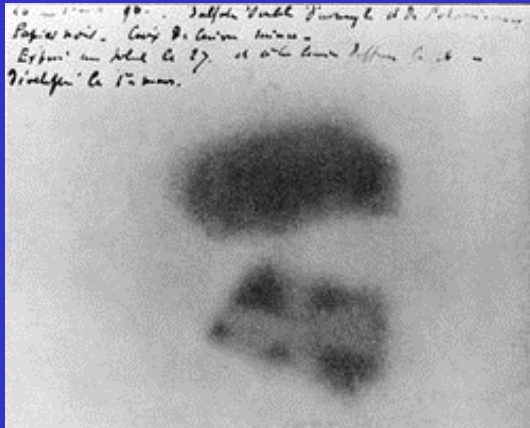
$$E = m c^2$$



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

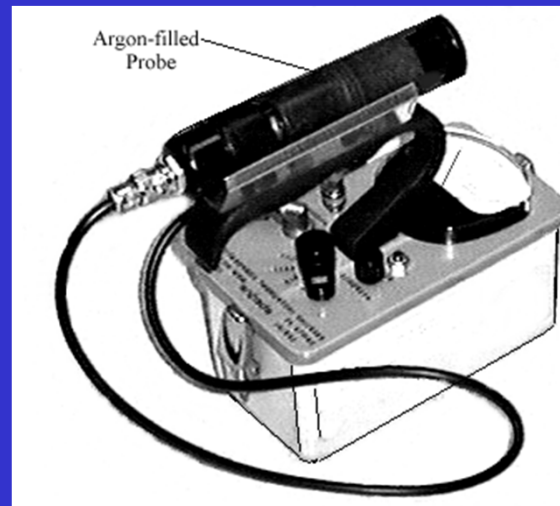
Má-li jádro příliš málo nebo mnoho neutronů →



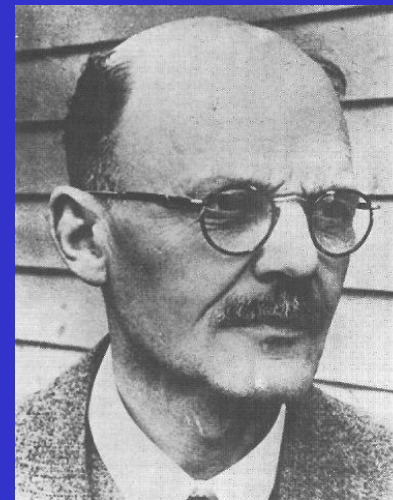
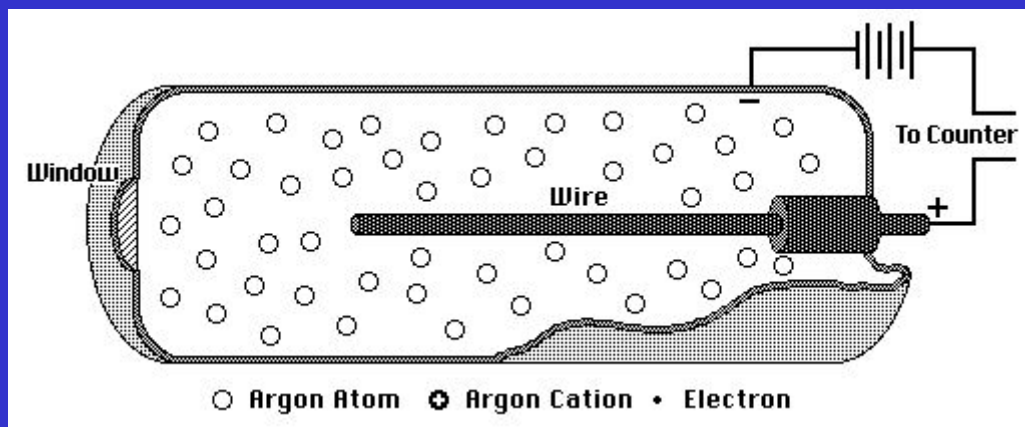
Radioaktivita = schopnost některých jader přeměňovat se na jiné jádro, emitují se menší částice a uvolňuje se energie (exo)

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

Geigerův čítač

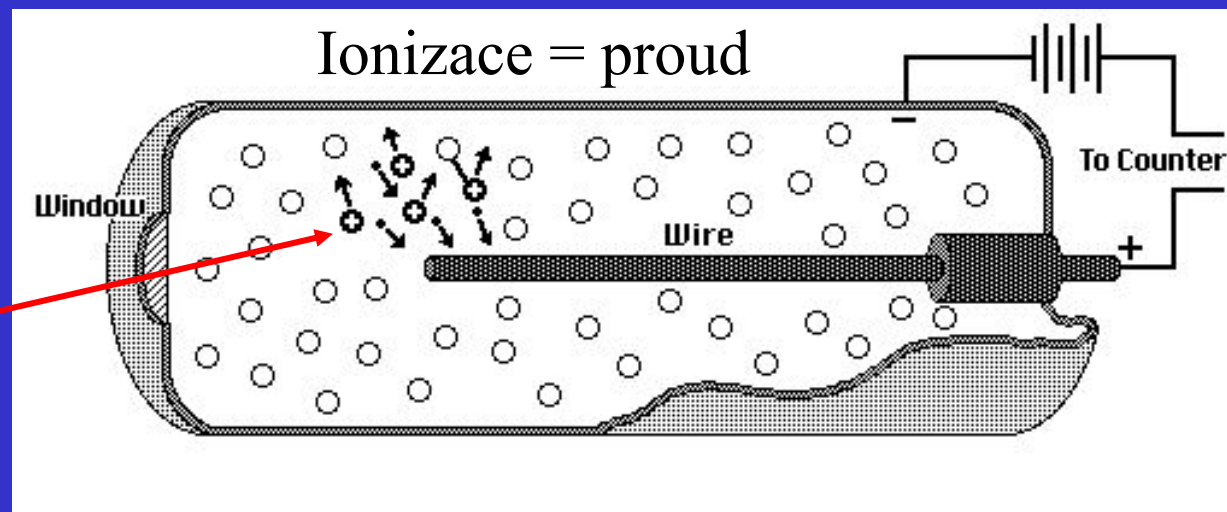


Geigerův čítač



Hans Geiger
(1882-1945)

částice



Měření radioaktivity

Radioaktivita

1 Bq (becquerel) = 1 rozpad za 1 s

(^{40}K v lidském těle 4 kBq) 1 Ci (curie) = $3.7 \cdot 10^{10}$ 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 \times 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

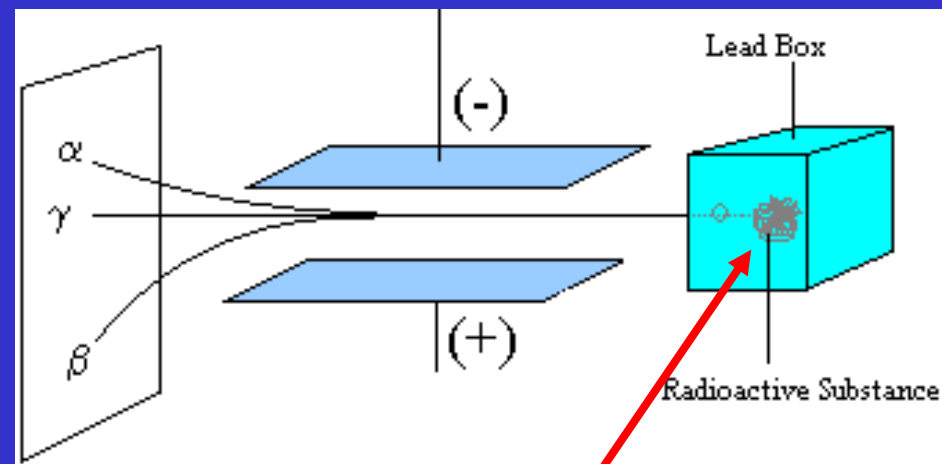
Beta = negativně nabité částice

Gama = neutrální částice

Tvorba nového nuklidu

Posuvové zákony – změny v Z a N

Posun v periodické tabulce

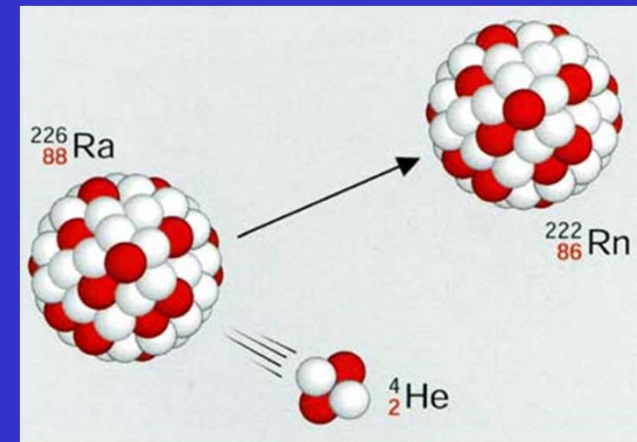


Radioaktivní látka

Emise alfa částice

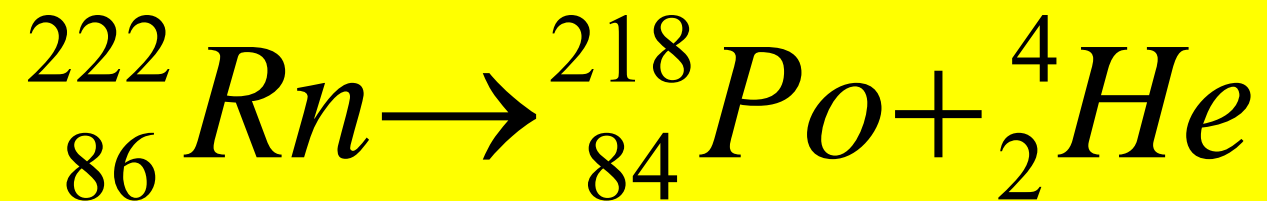
U těžkých jader

Alfa částice opouští jádro rychlostí 10% c



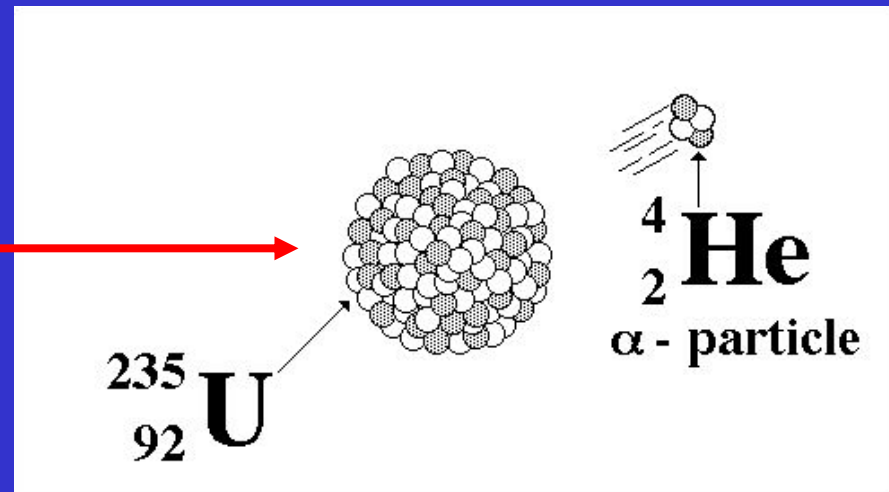
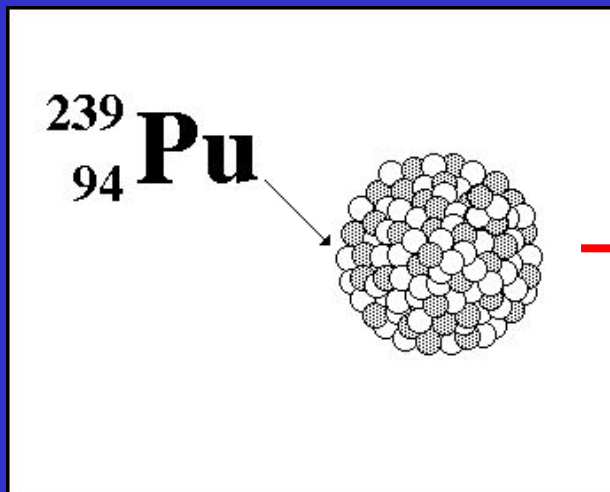
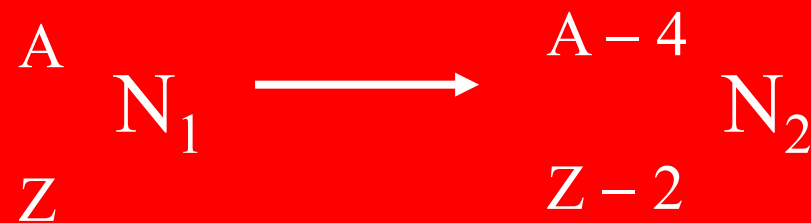
Velmi malá penetrace, několik cm ve vzduchu, zastaví je list papíru

Velmi škodlivé pro buňky
Inhalace



Alfa emise

Posun v periodické tabulce o dva prvky doleva



Alfa emise

Radium-226

Curium-240

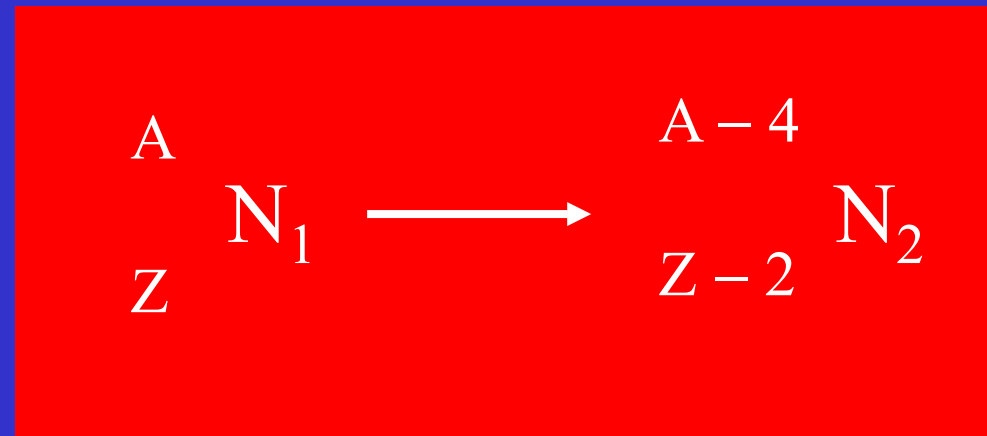
Uran-232

Zlato-185

Thorium-230

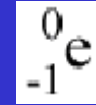
Americium-241 detektory kouře

Polonium-210



Posun v periodické tabulce o dva prvky
doleva

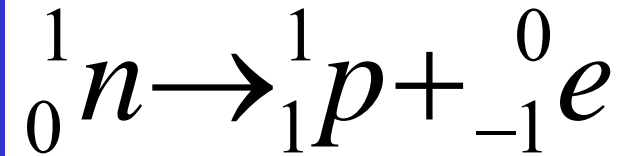
Beta částice



Jádra s nadbytkem neutronů, nedostatek protonů

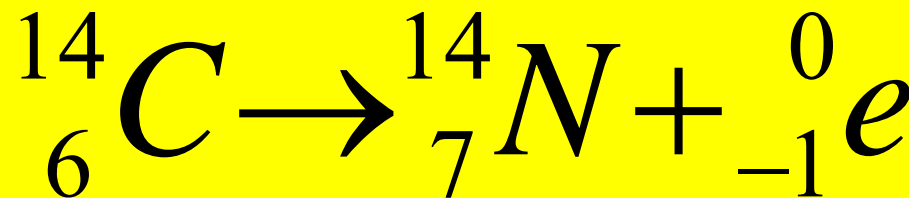
Beta částice jsou elektrony (ale ne z elektronového obalu!!!)

Vznikají rozpadem neutronu



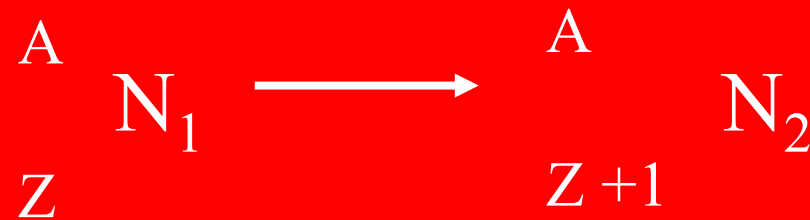
e opouští jádro rychlostí 90% c

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

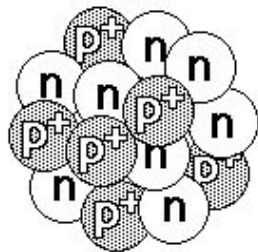


Beta emise

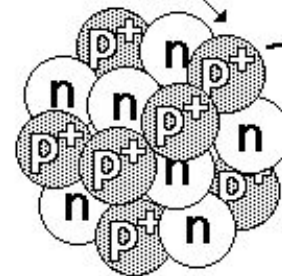
Posun v periodické tabulce o jeden prvek doprava



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



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



$^0_{-1}\text{e}$
beta particle
(electron)

Krypton-87

Beta emise

Zinek-71

Křemík-32

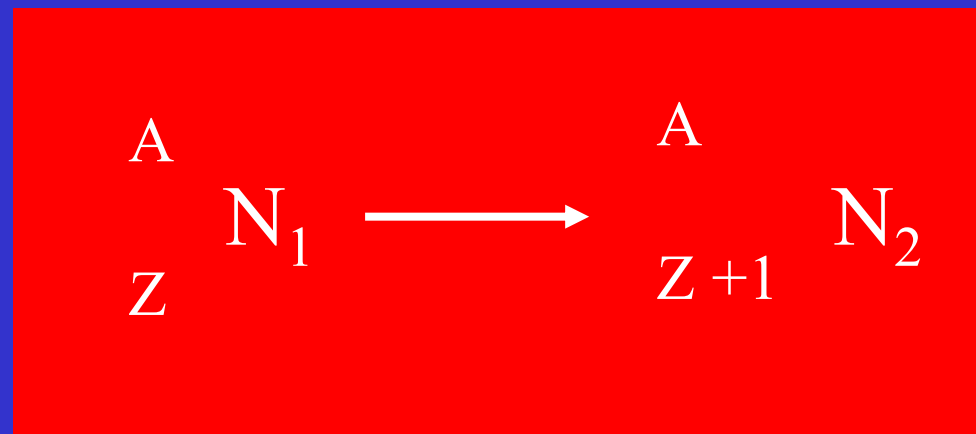
Kobalt-60

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

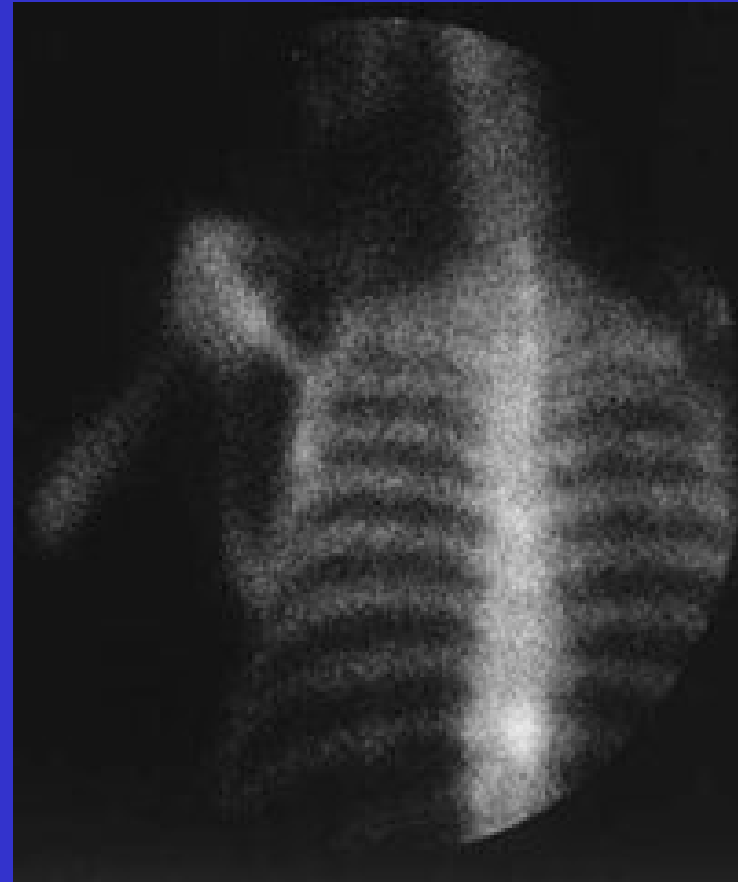
Hluboká penetrace, 500 m ve vzduchu



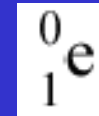
Tracer

Gyorgy Hevesy 1913

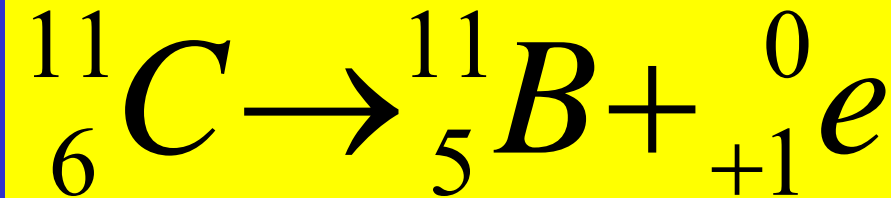
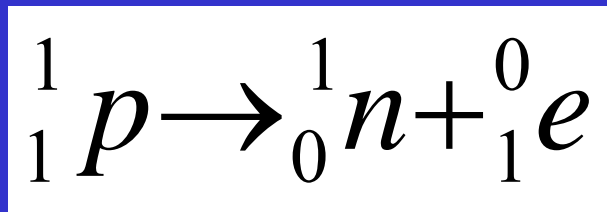
NP 1943



Positronová emise



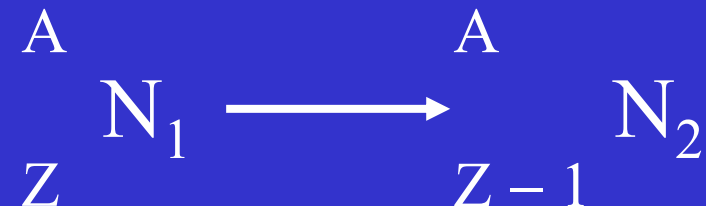
Jádra s nadbytkem protonů, nedostatek neutronů



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

Velmi malá penetrace

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



Posun v periodické tabulce o jeden prvek doleva

Positronová emise

Rubidium-81

Germanium-66

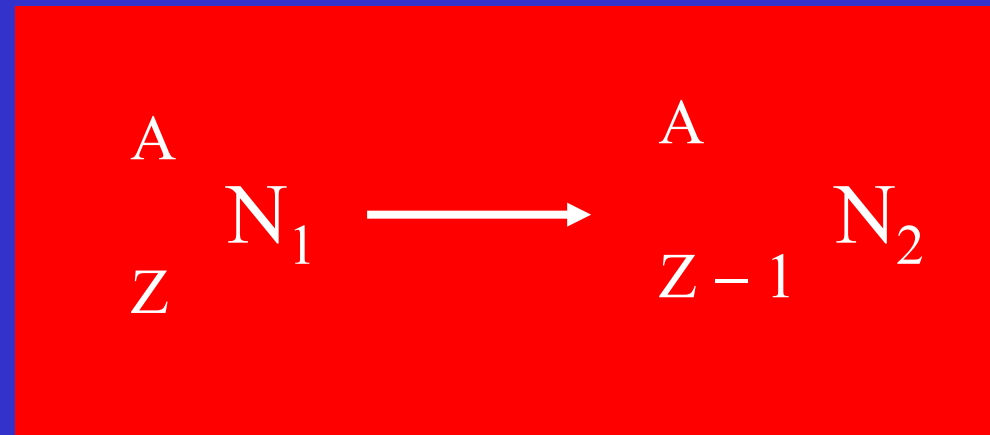
Praseodym-140

Neon-18

Kyslík-15

Dusík-13

Měď-59

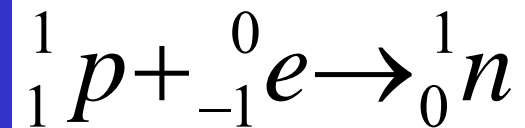


Posun v periodické tabulce o jeden prvek doleva

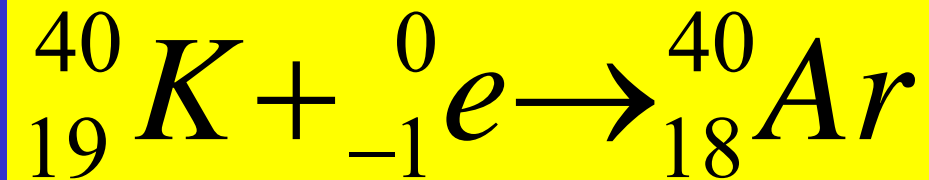
Elektronový záchyt

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



$\begin{matrix} A \\ Z \end{matrix} N_1$

Posun v periodické tabulce o jeden
prvek doleva

$\begin{matrix} A \\ Z - 1 \end{matrix} N_2$

Rubidium-83

Vanad-48

Gallium-67

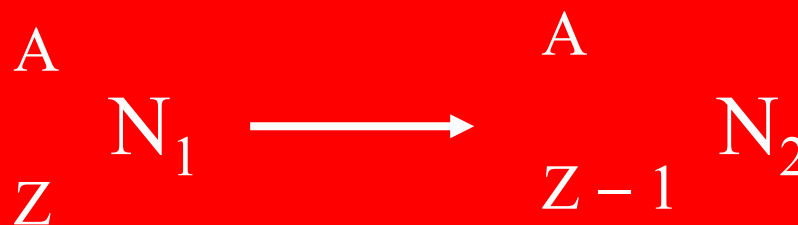
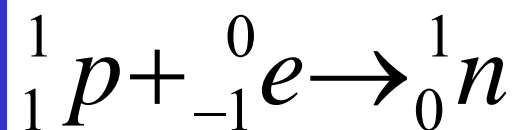
Beryllium-7

Vápník-41

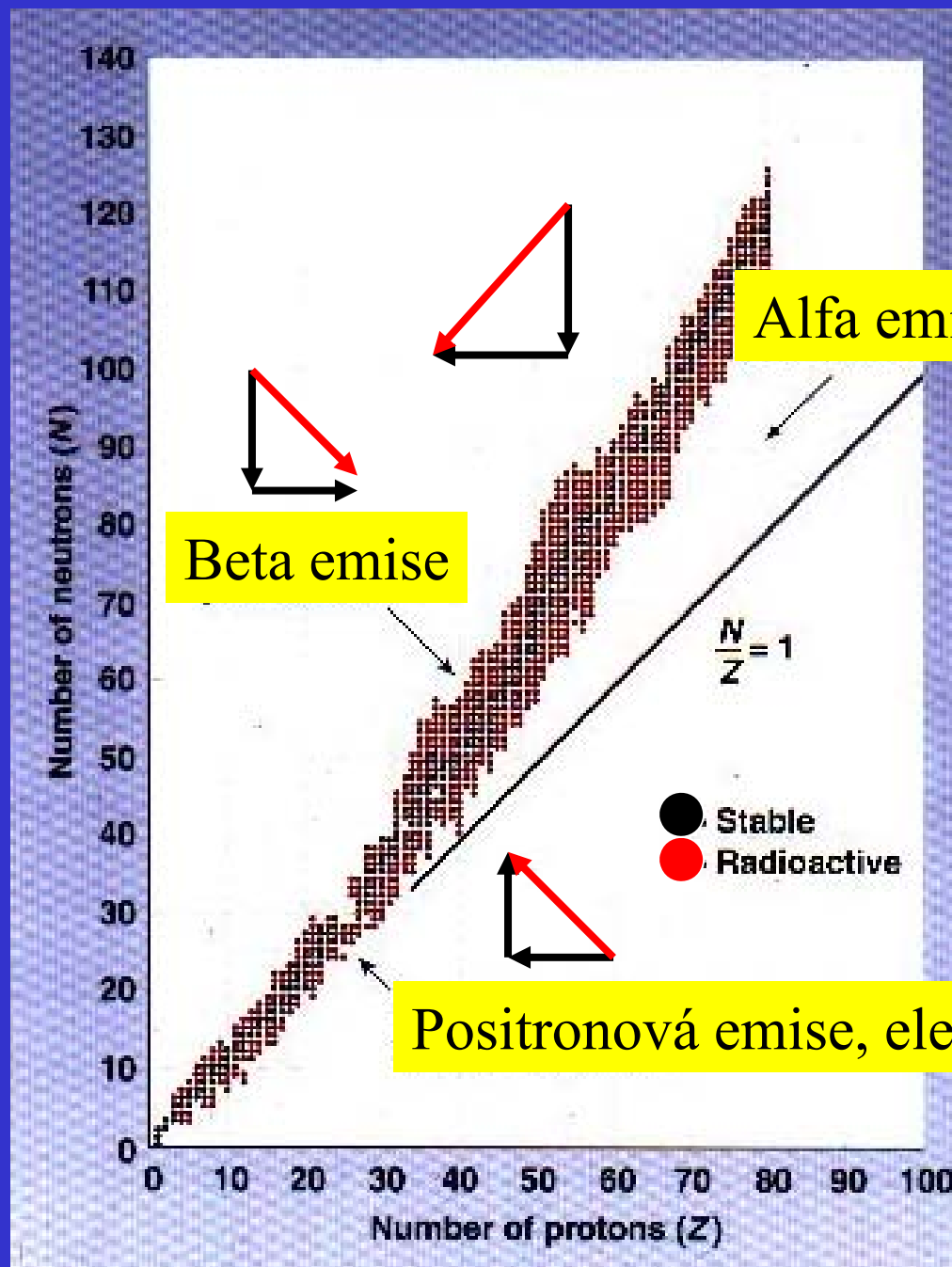
Kobalt-57

Selen-72

Elektronový záchyt



Posun v periodické tabulce o jeden prvek doleva



Rozpadové řady

Thoriová ^{232}Th - ^{208}Pb

$$A = 4n$$

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

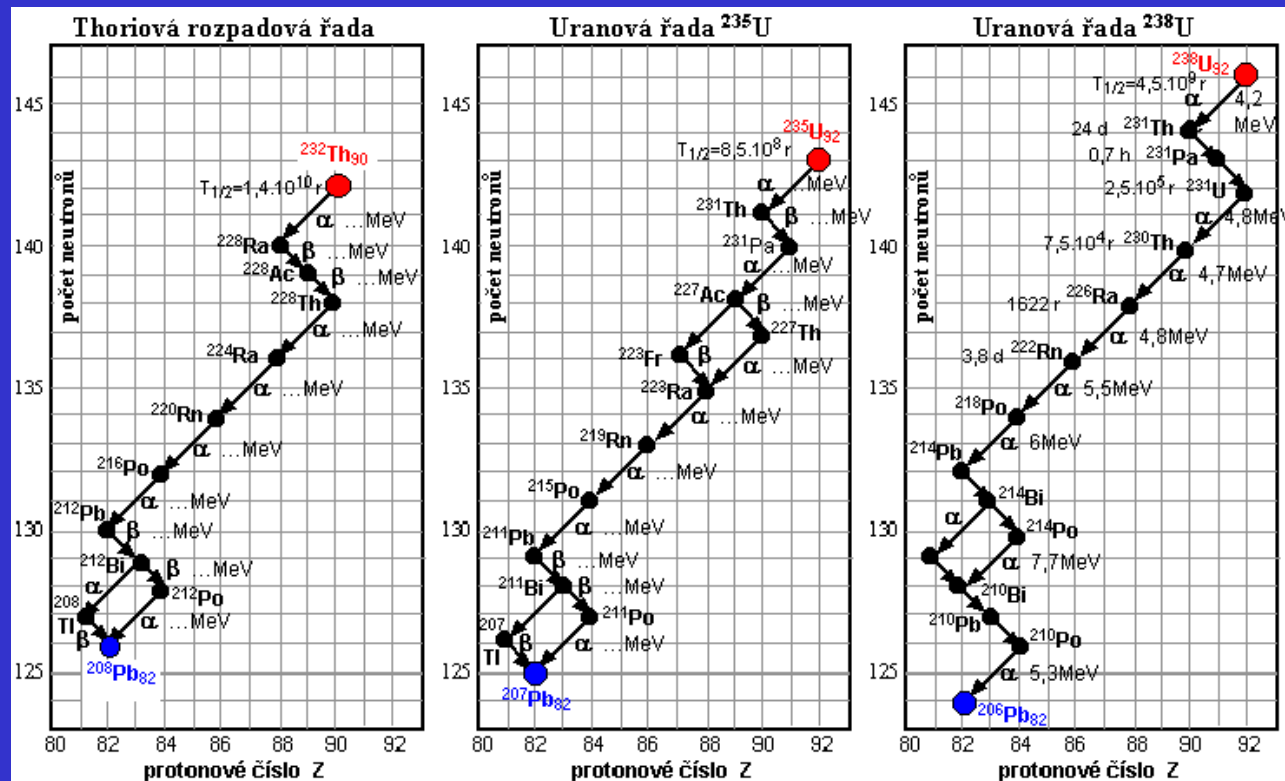
$$A = 4n+1$$

Uranová ^{238}U - ^{206}Pb

$$A = 4n+2$$

Aktinuranová ^{235}U - ^{207}Pb

$$A = 4n+3$$

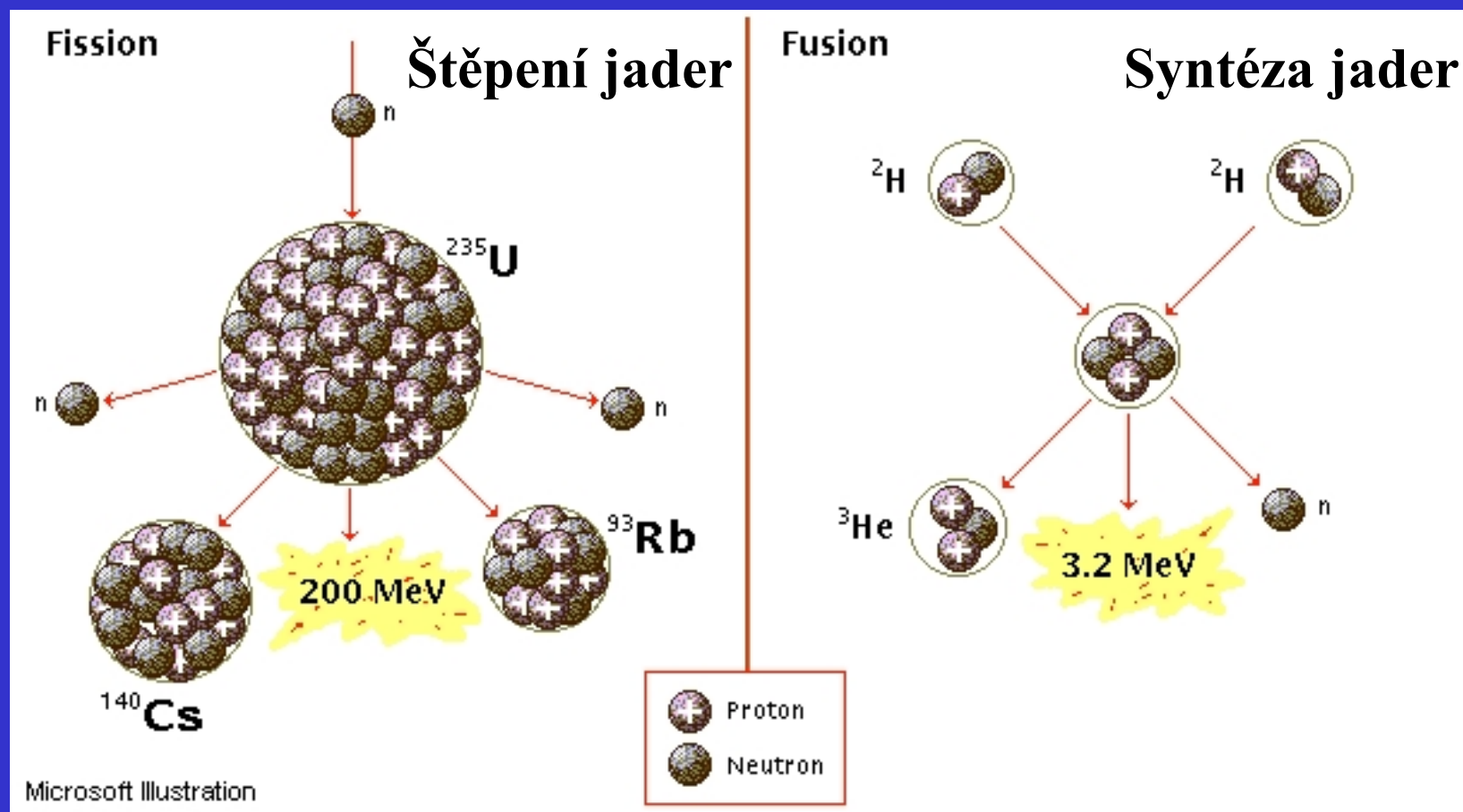


Samovolné štěpení

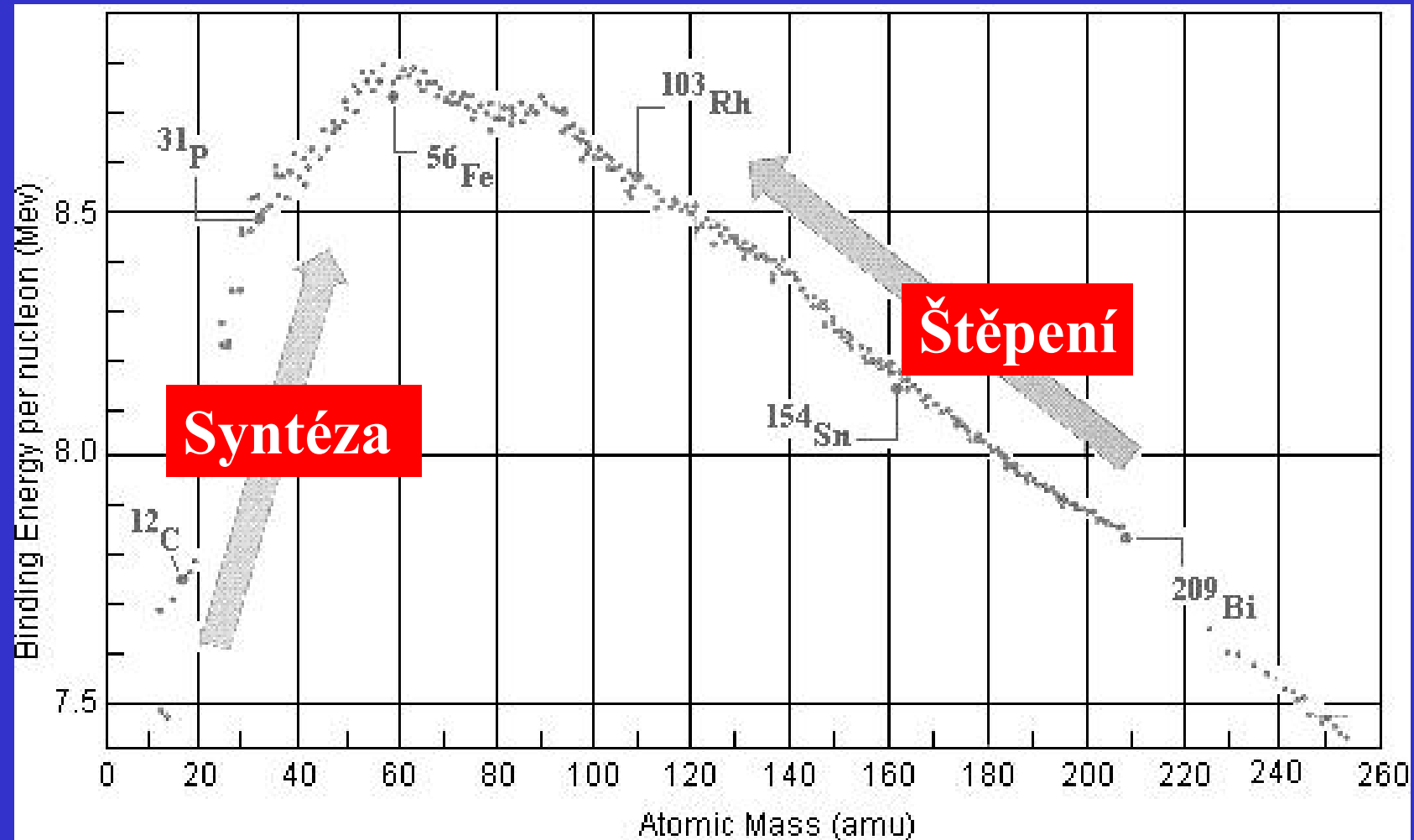
Těžké jádro se rozpadá na dva nebo tři fragmenty
a jeden nebo více neutronů



Syntéza a štěpení jader



Syntéza a štěpení jader - vazebná energie jádra



Syntéza jader ve vesmíru

Big Bang

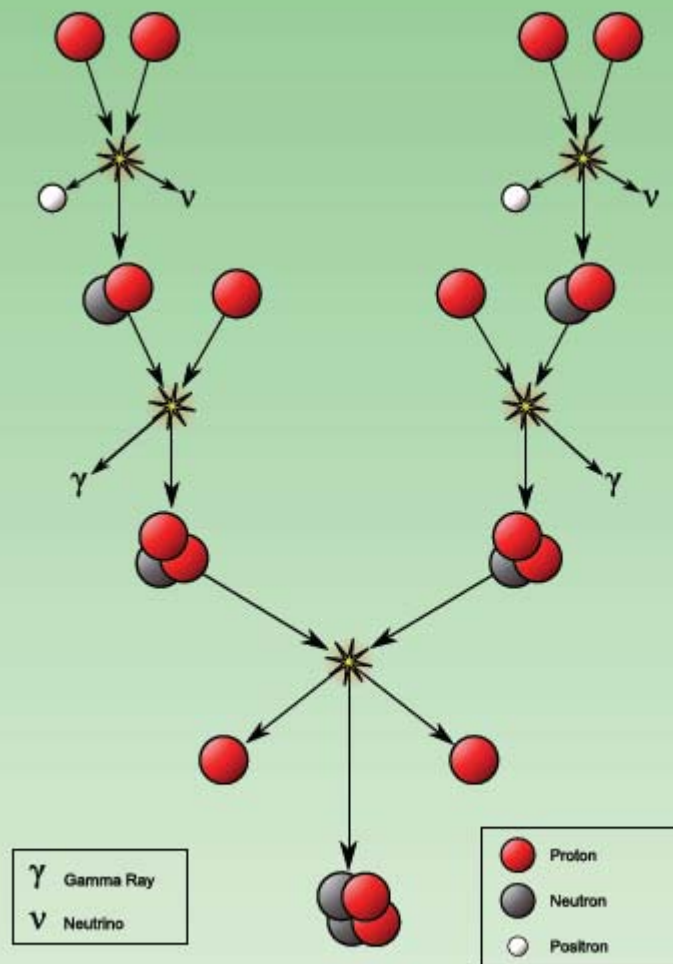


Slunce (teplota = 2×10^6 K v nitru, energie z PP nebo CN cyklu)

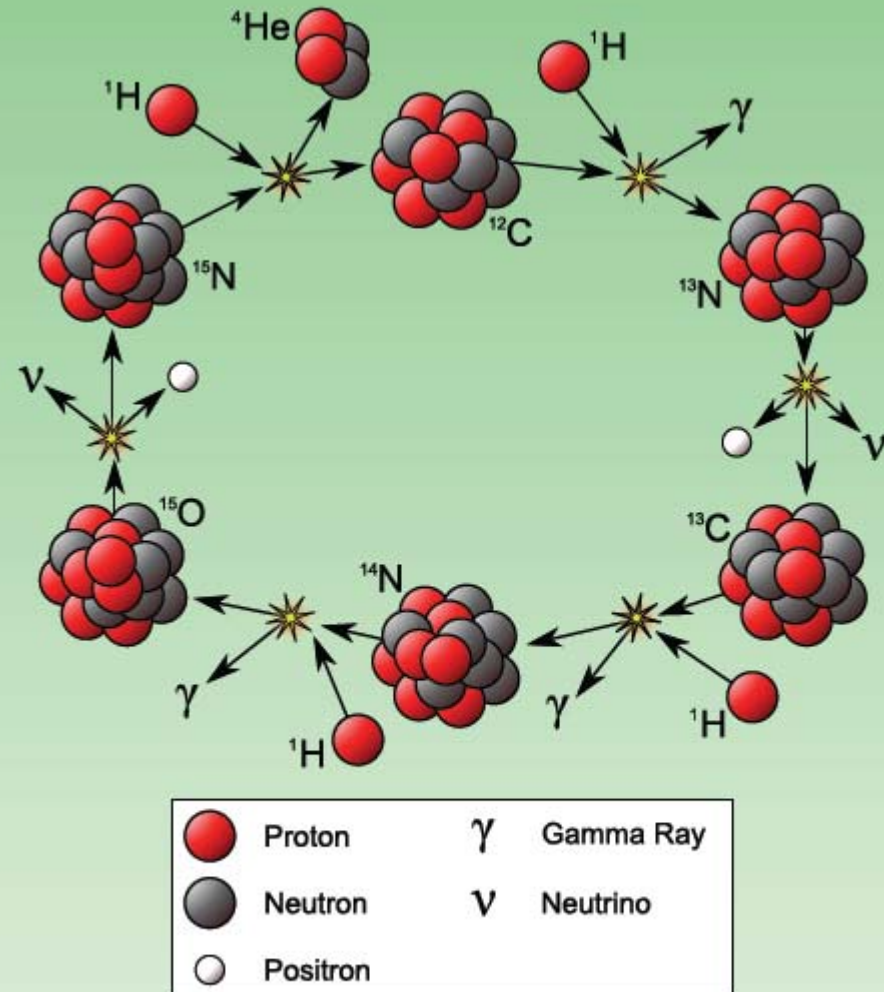
PP cyklus



PP cyklus

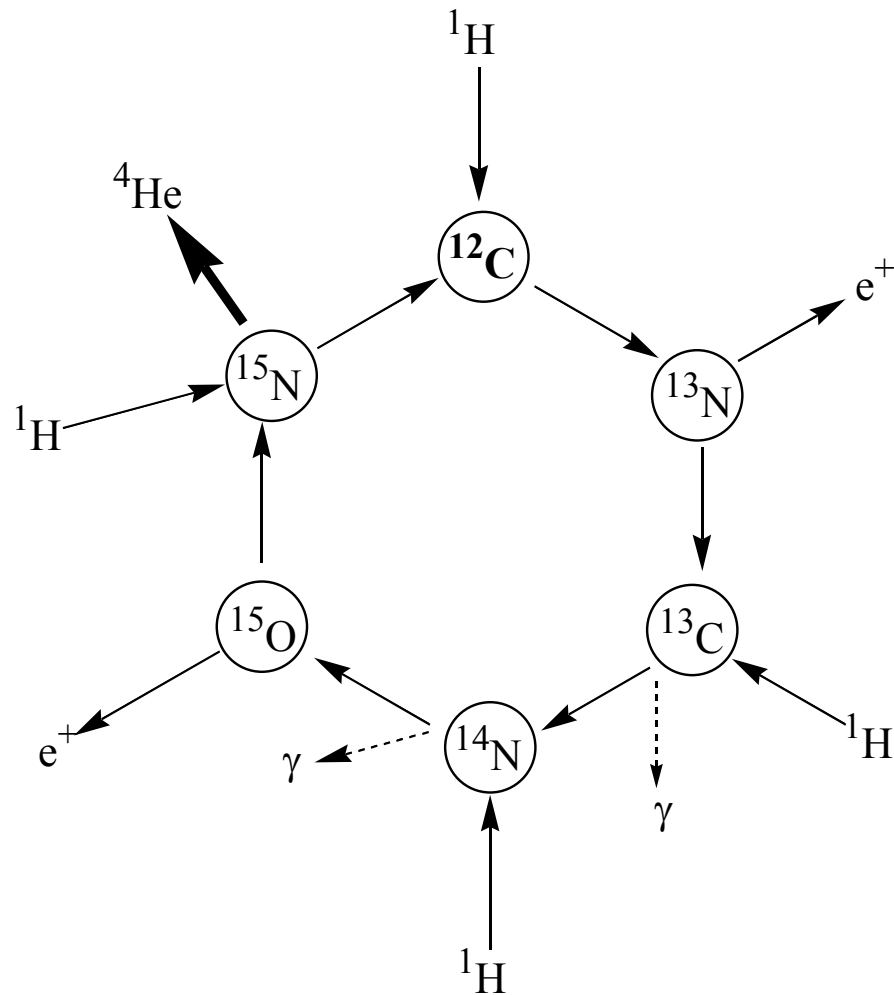


CN cyklus



Uhlíkový cyklus

CN cyklus



Syntéza jader ve vesmíru

Slunce \rightarrow rudý obr \rightarrow bílý trpaslík



Syntéza jader ve vesmíru

Těžké hvězdy

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

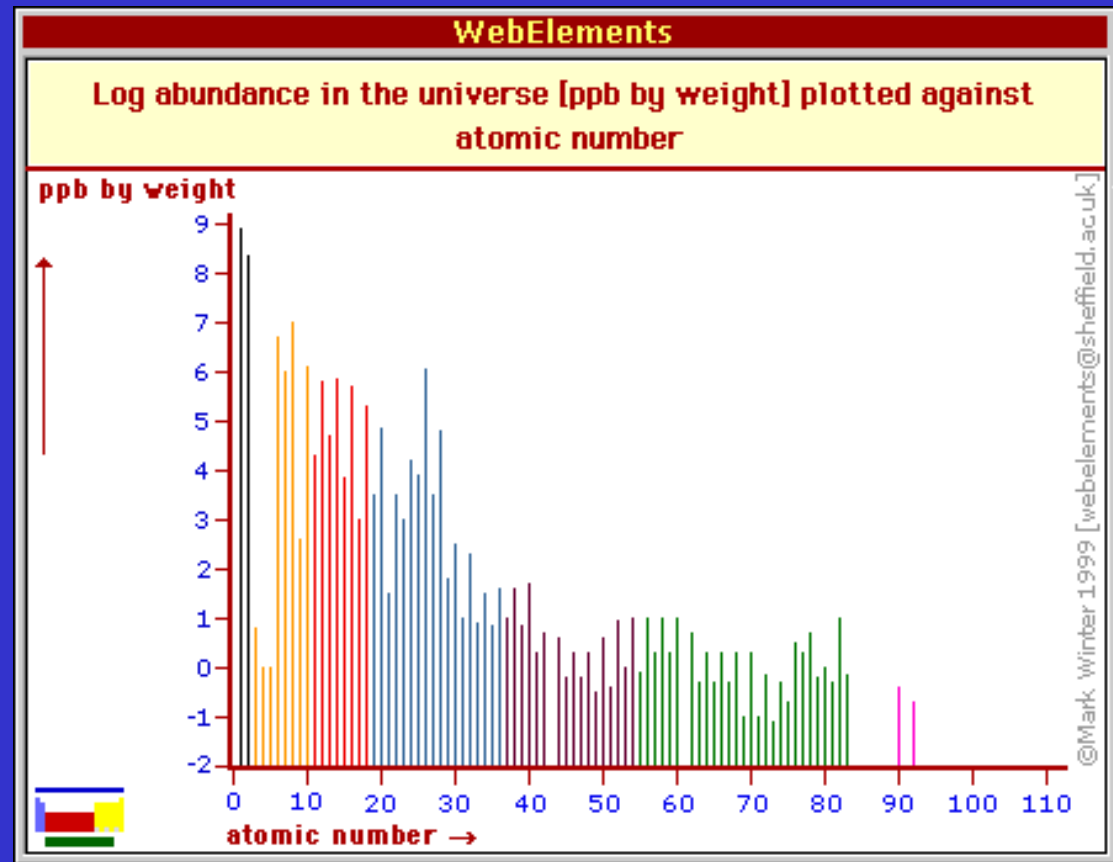
$^{16}\text{O} \rightarrow \text{Si, S}$

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

Fe jádra nejstabilnější
Jak dál?

Výbuch supernovy
vysoké toky neutronů

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

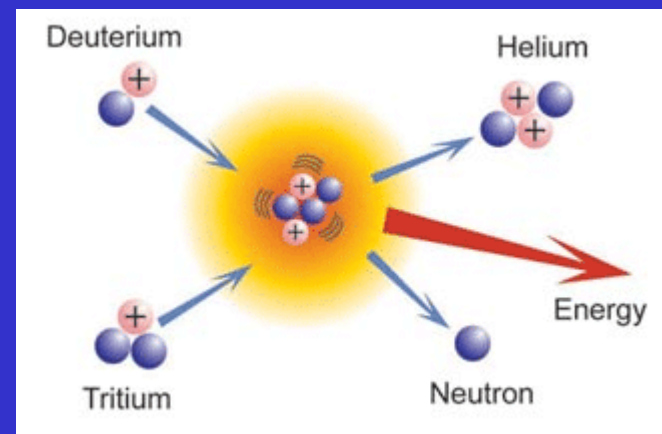


Termojaderné reakce



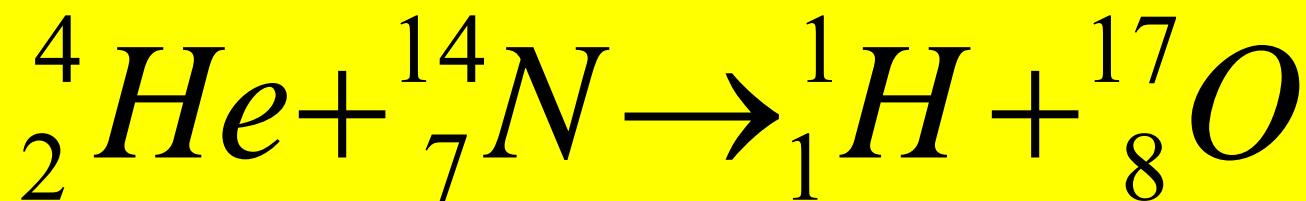
ITER Cadarache, Francie

National Ignition Facility, USA

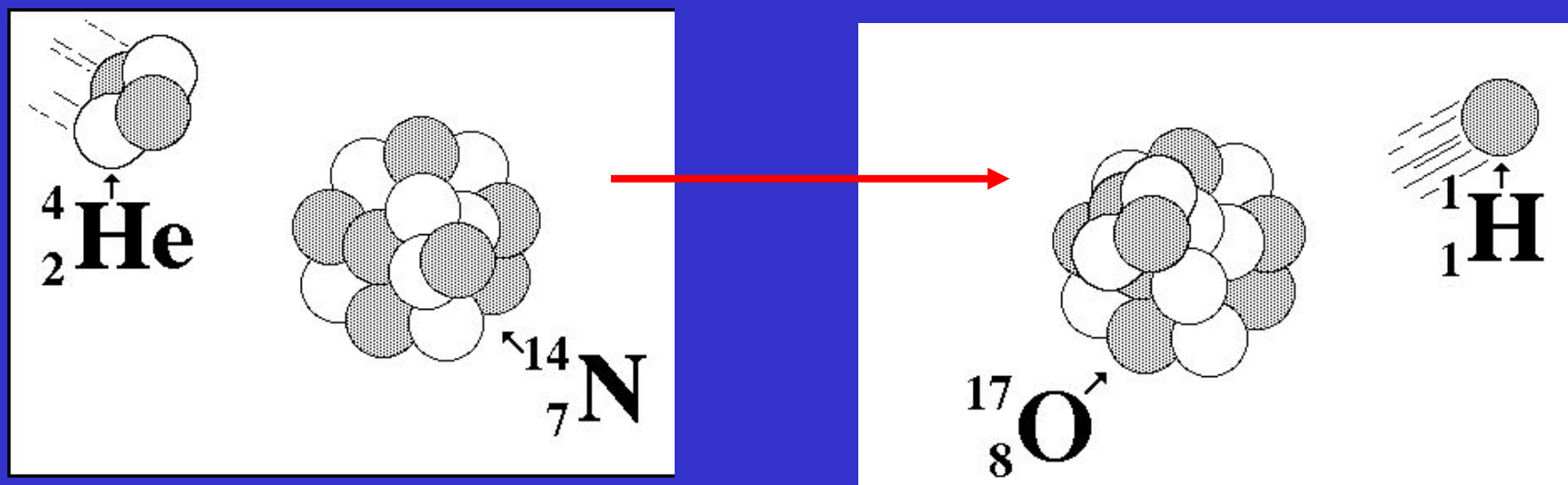


Transmutace

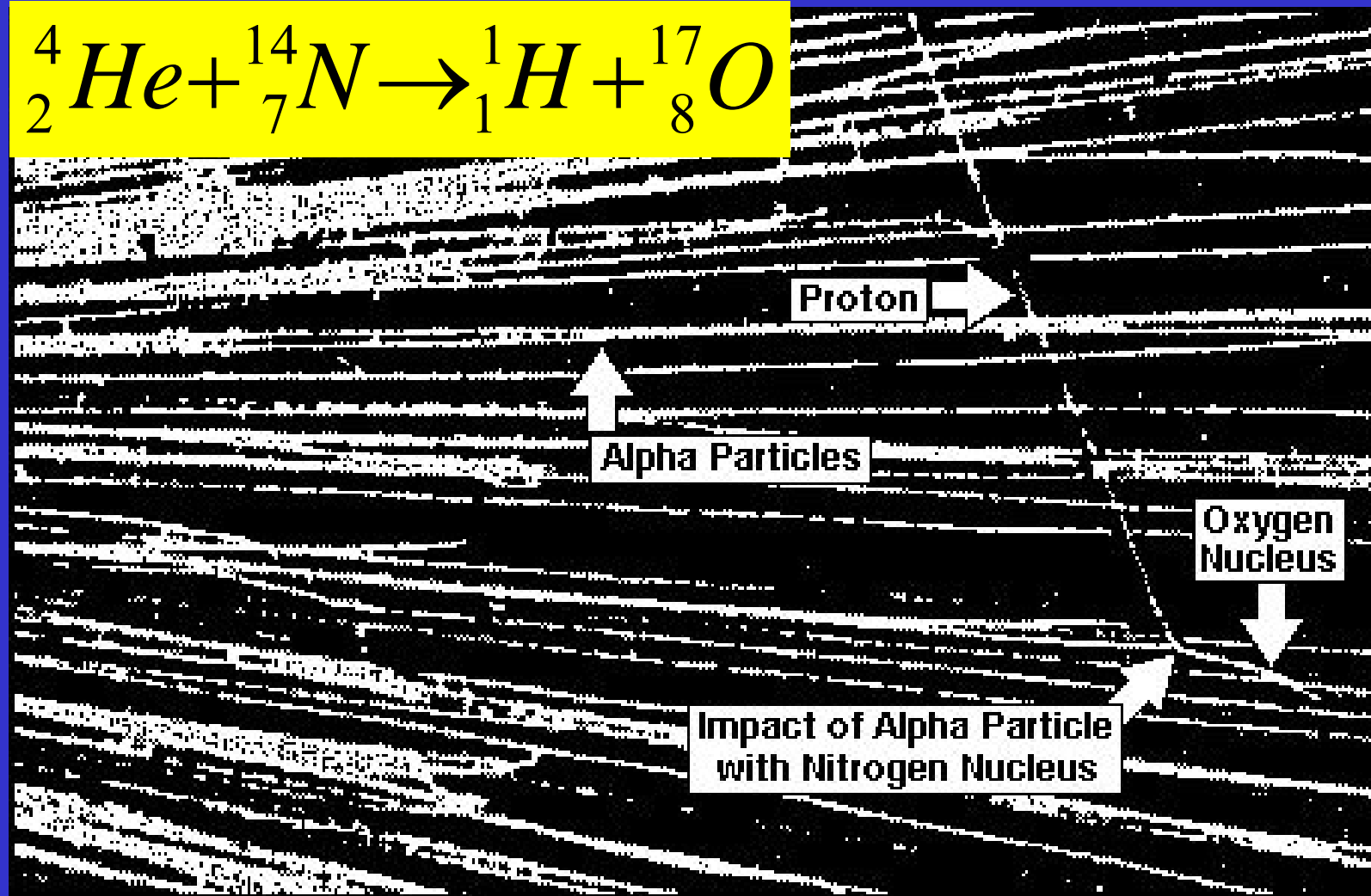
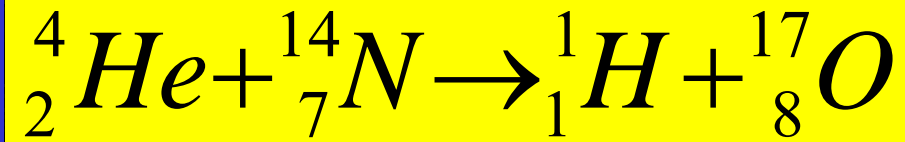
1919, Rutherford, první umělá příprava prvku



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



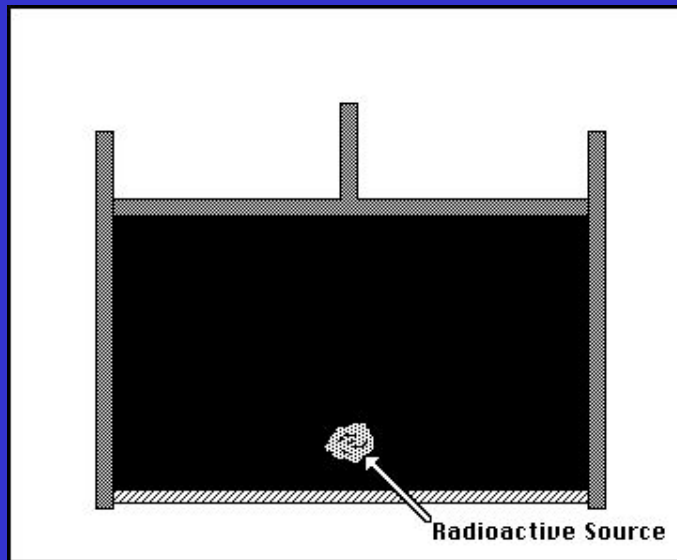
Transmutace



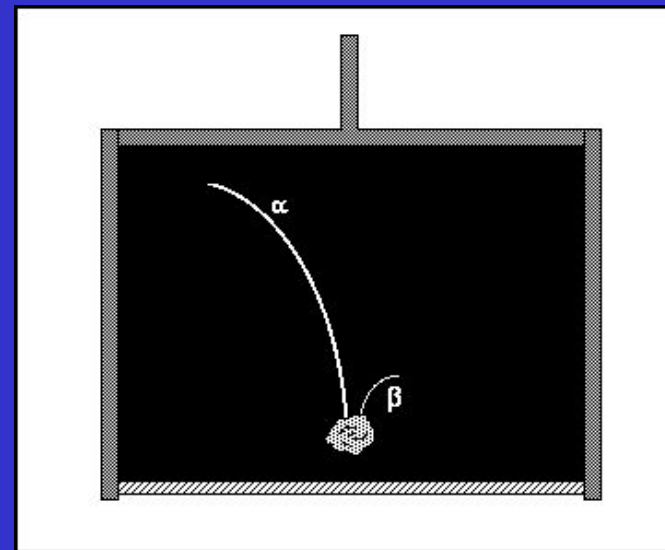


Wilsonova mlžná komora

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

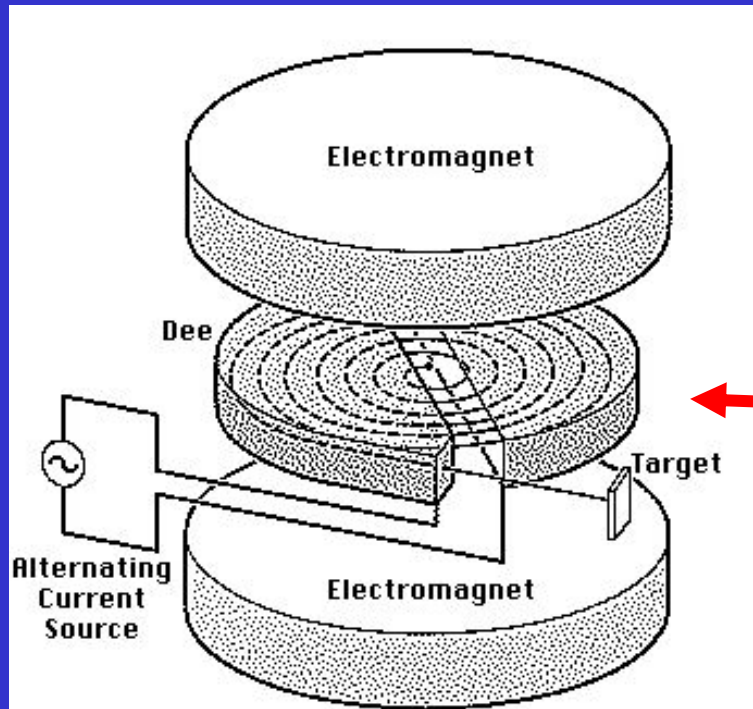


Expanze, ochlazení, vznik
přesycené páry, částice při
průletu ionizují okolní atomy,
kondenzace na ionizovaných₄₉
atomech – kondenzační stopa

1929

Cyklotron

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

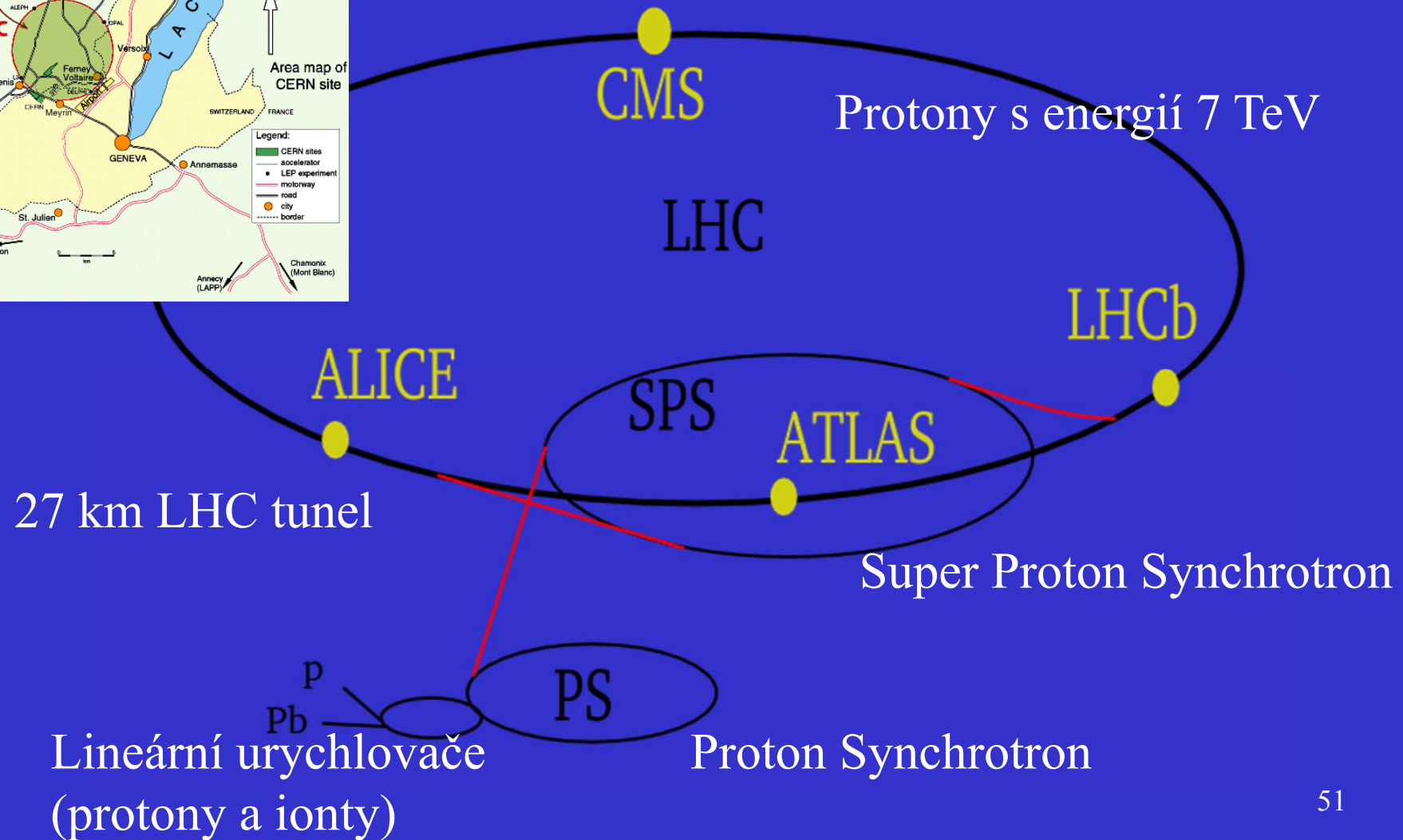


Ernest O. Lawrence
(1901-1958)
NP za fyziku 1939

← duté elektrody tvaru D



Large Hadron Collider



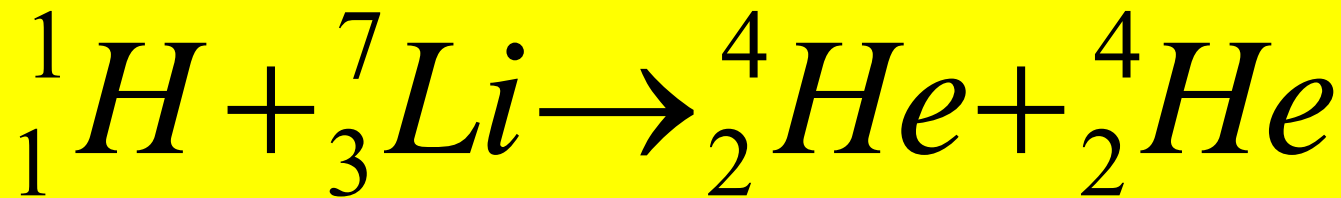
Štěpení jader

1932

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

Kaskádový urychlovač, protony 800 keV

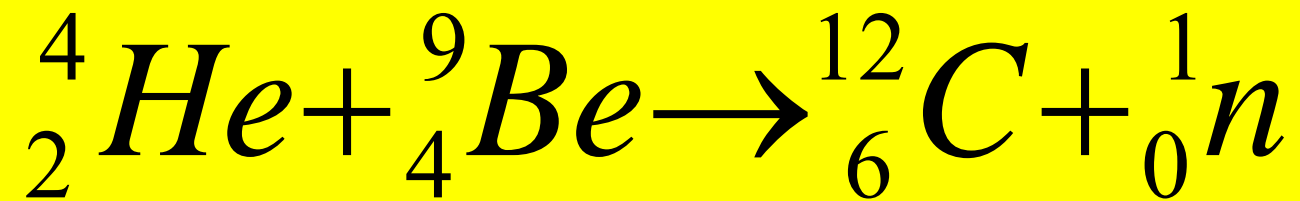
První štěpení stabilního jádra urychlenou částicí



1951 společně NP za fyziku

1932

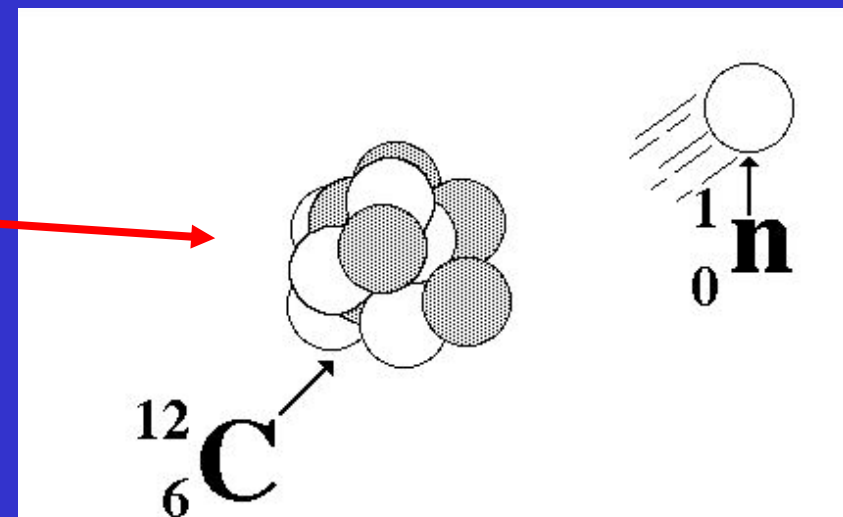
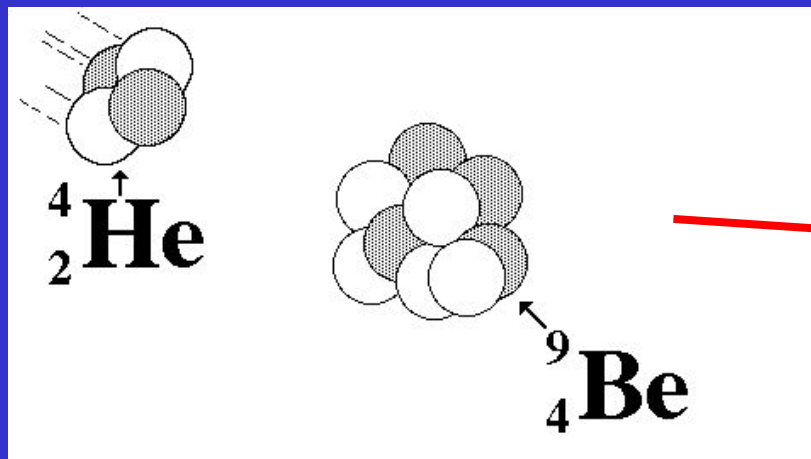
Objev neutronu



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

James Chadwick
(1891-1974)

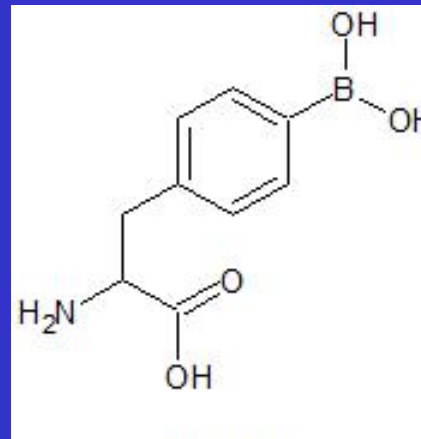
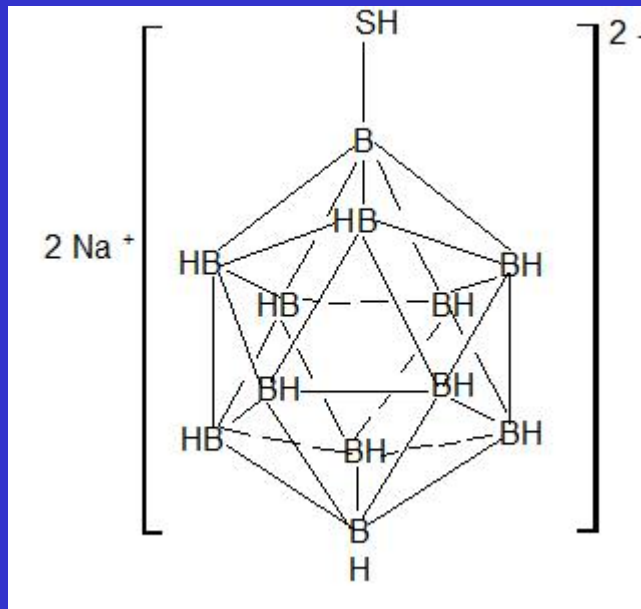
NP za fyziku 1935



BNCT = Boron Neutron Capture Therapy



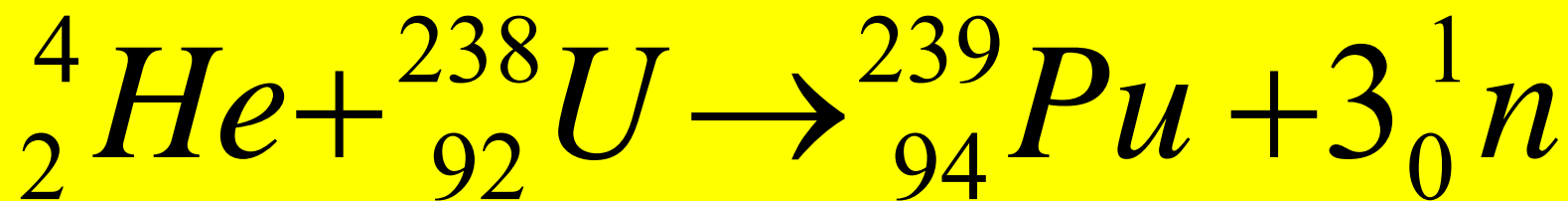
Dolet v tkáni asi 12 μm – průměr buňky



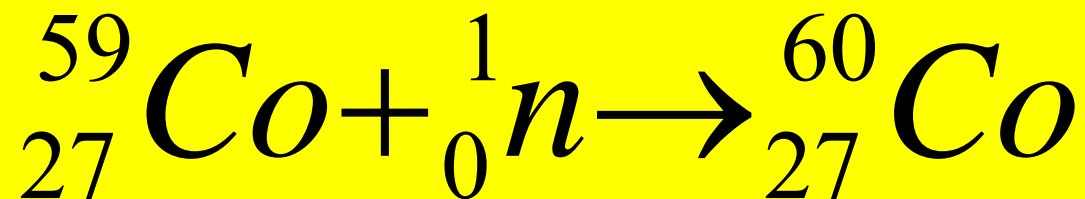
Akumulace v tumoru
(20 $\mu\text{g/g}$ tumoru)

Transmutace

Cyklotron



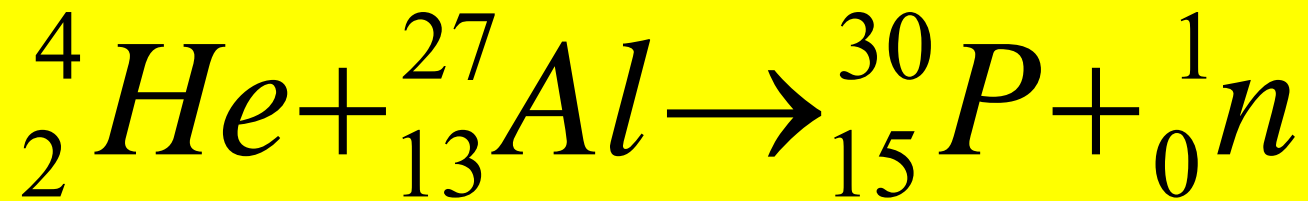
Bombardování neutrony

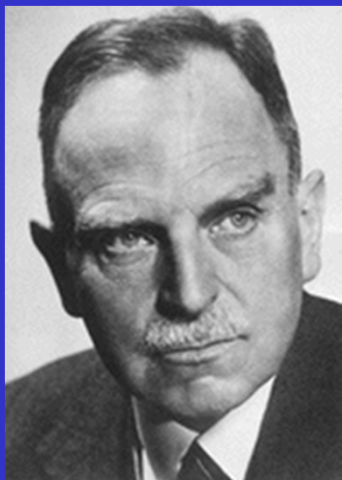


1933

Umělá radioaktivita

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

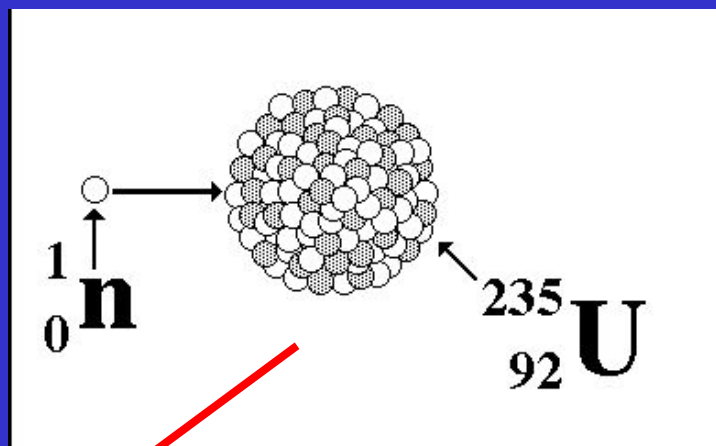




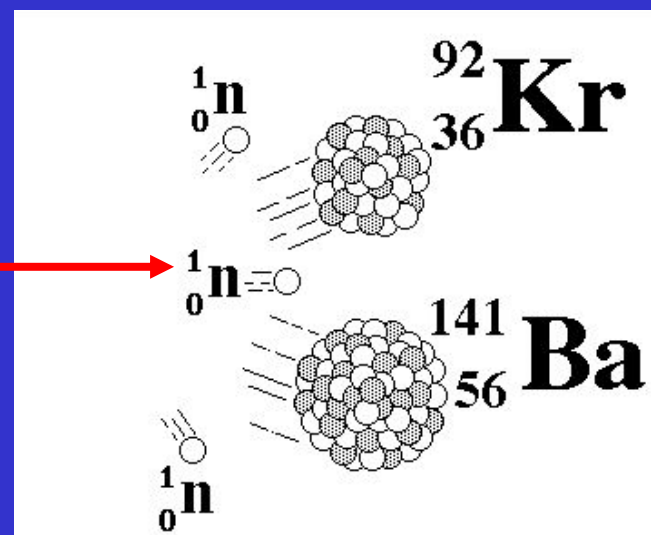
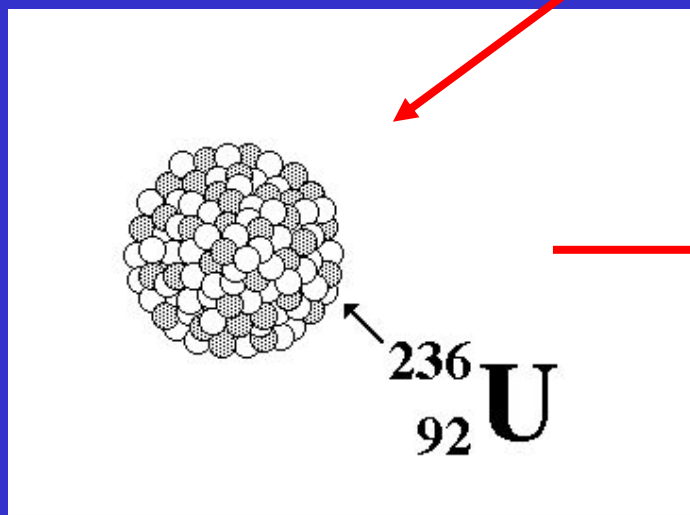
Otto Hahn
(1879-1968)

NP za fyziku 1944

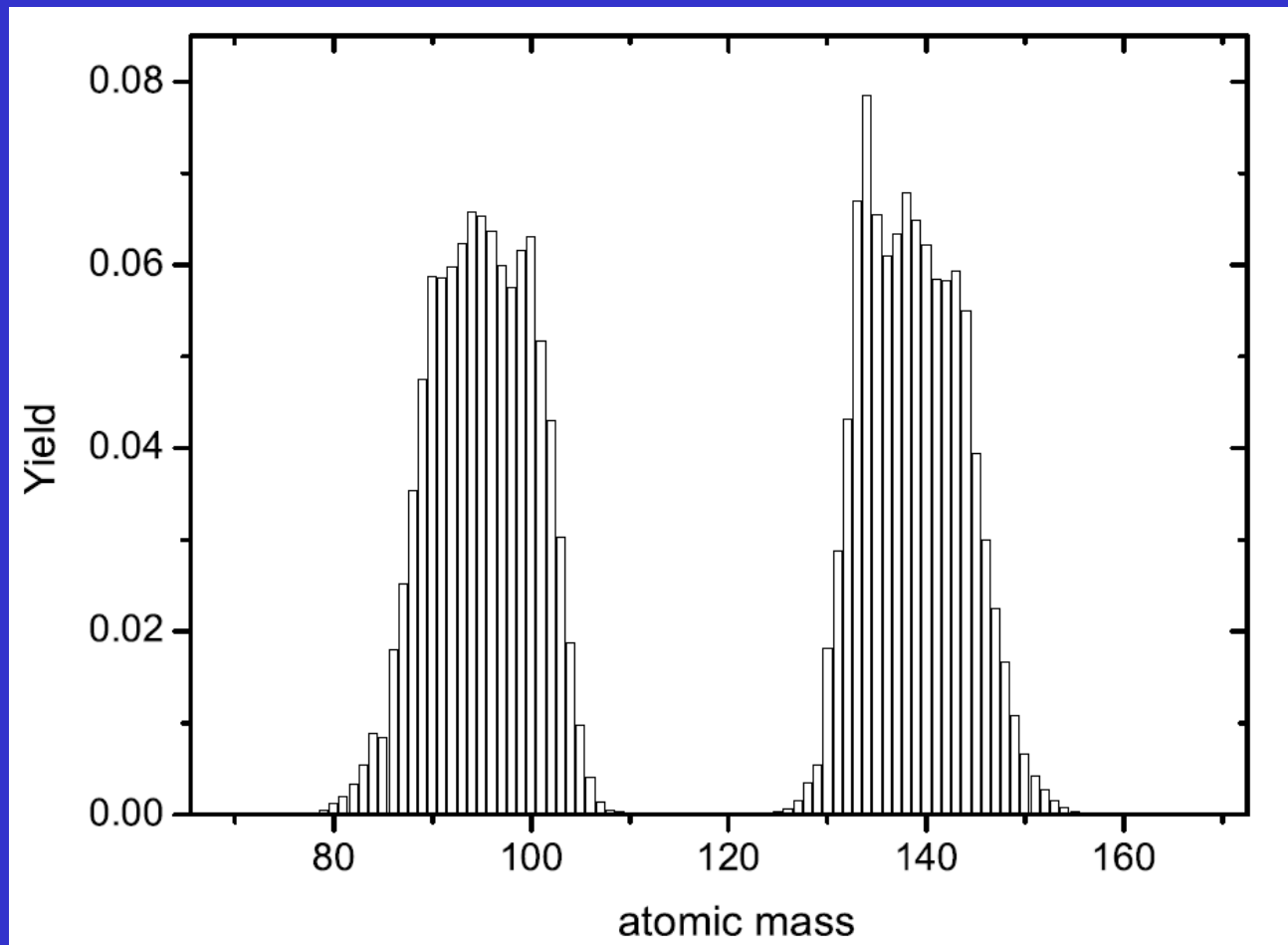
Štěpení jader



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

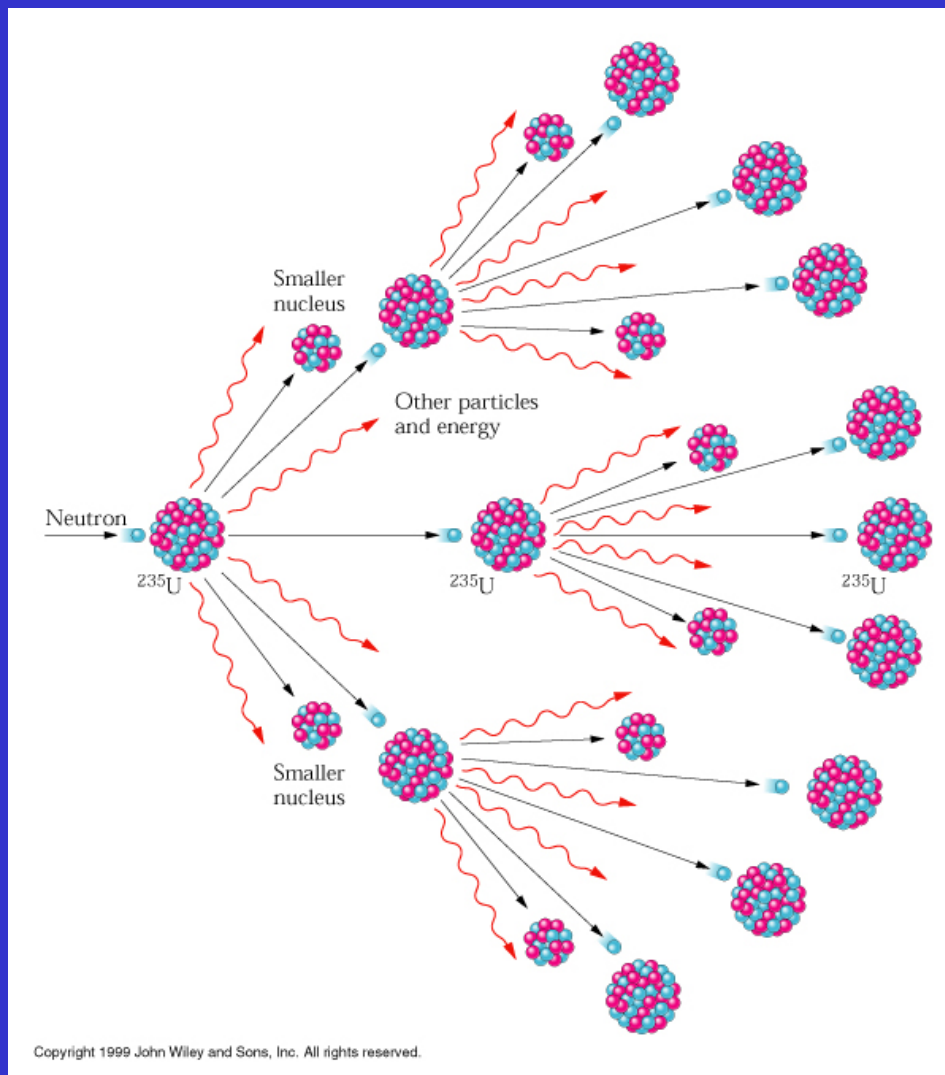


190 MeV



Fission product yield distribution after thermal fission of ^{235}U .

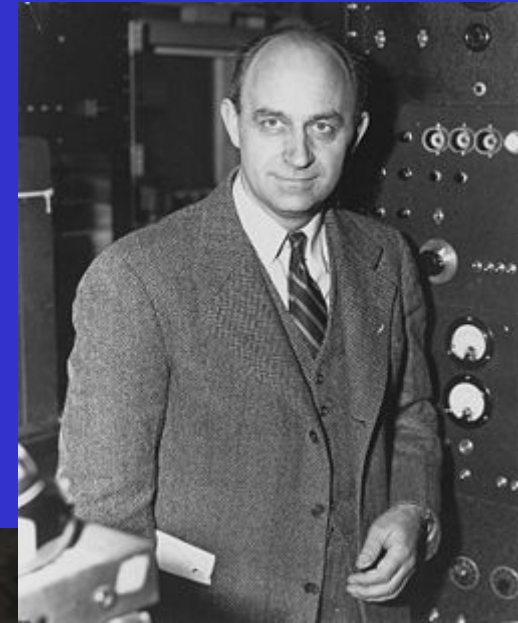
Řetězová reakce neřízená



Jaderný reaktor

1942 Chicago Pile - 1

První řízená štěpná reakce ^{235}U

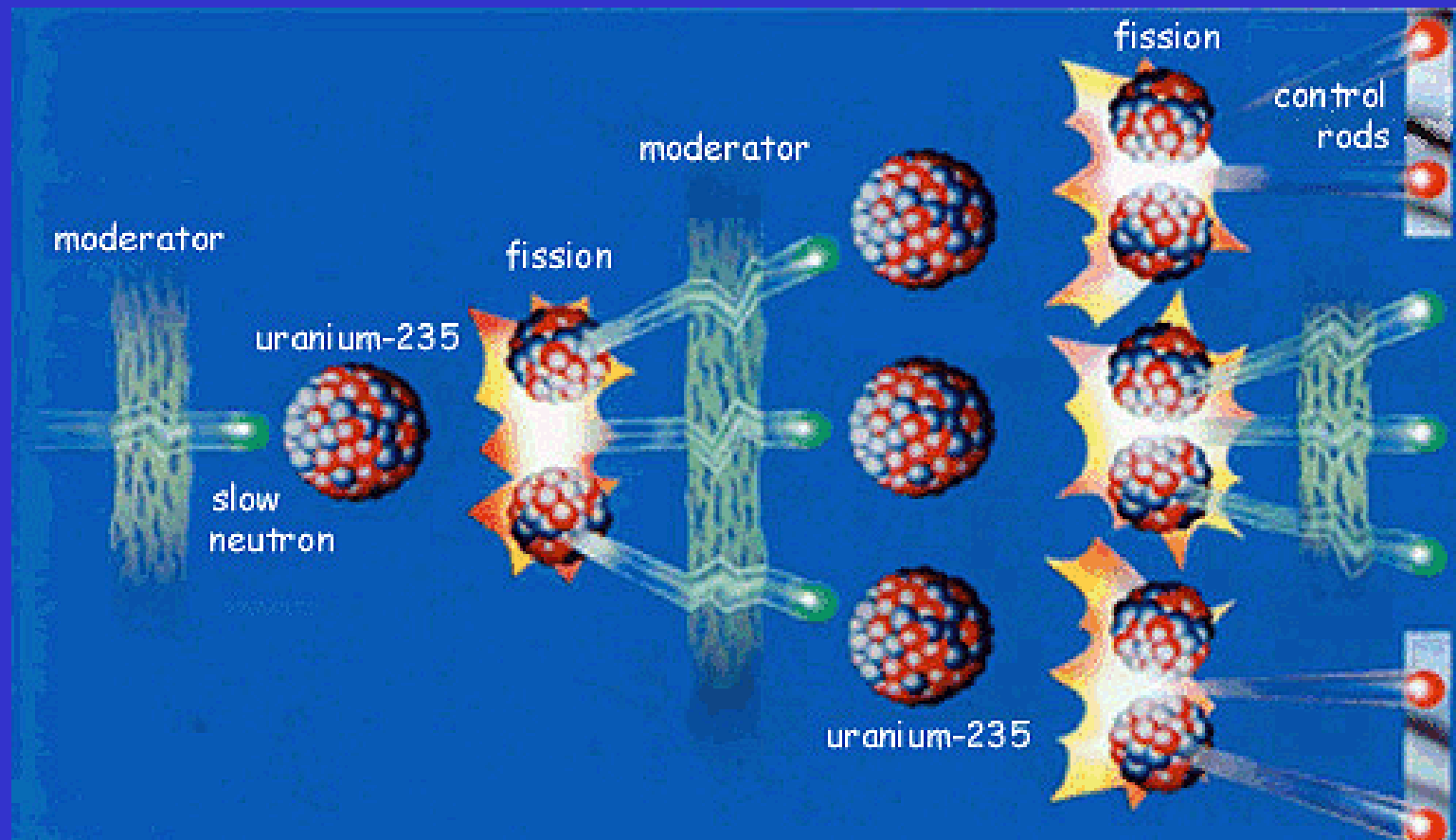


Enrico Fermi
(1901-1954)
NP za fyziku 1938



49

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 $Z \geq 93$ (Np) transurany pouze umělé

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

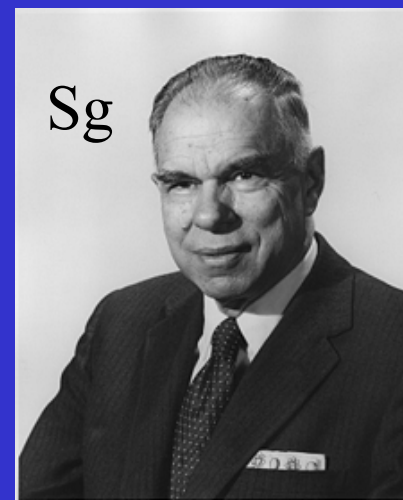
bombardování neutrony



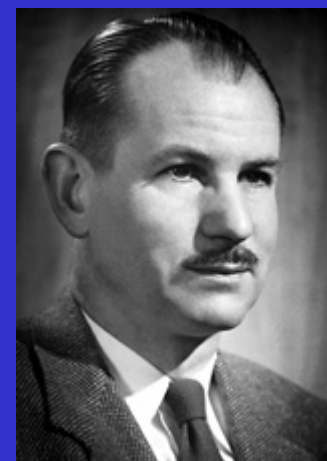
$^{239}_{94}\text{Pu}$

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	Lawrencium



Glenn T. Seaborg
(1912- 1999)



Edwin M. McMillan
(1907- 1991)

Sdílená NP
za chemii 1951

Syntéza transuranů

bombardování kladnými ionty

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

Syntéza transuranů

bombardování kladnými ionty

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

připraveny transurany po $Z = 118$



Kinetika radioaktivního rozpadu

$$-dN/dt = k N$$

$$dN/N = -k dt$$

Integrace

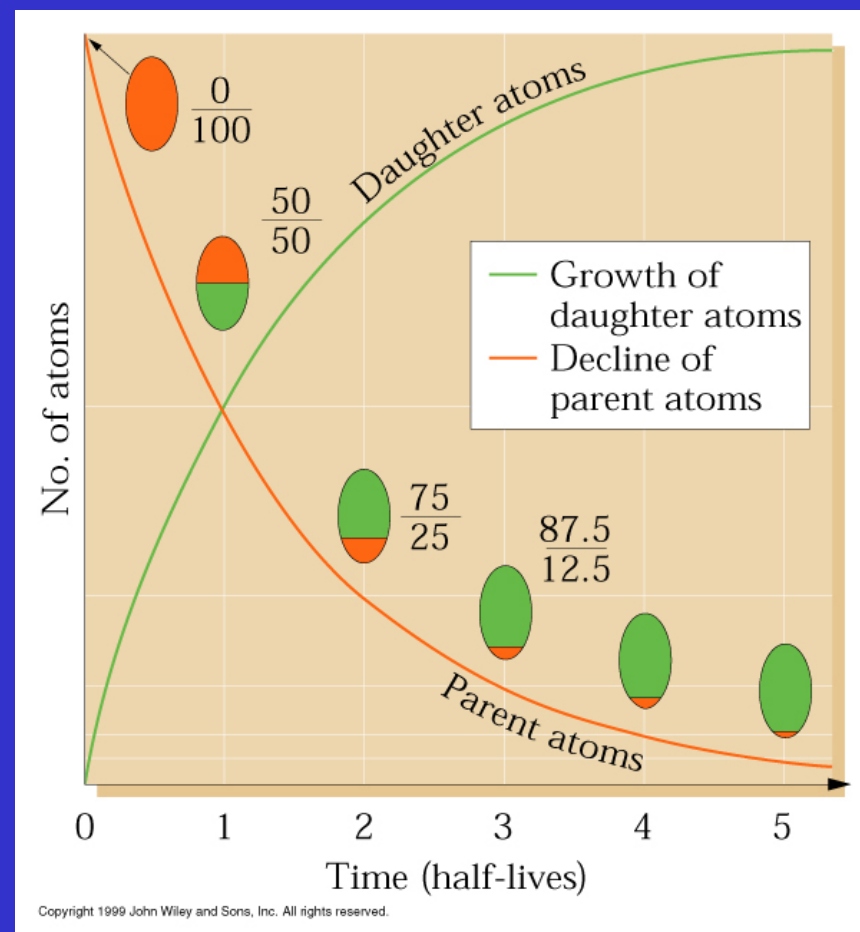
$$t = 0 \quad N = N_0$$

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

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

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

N



t

Poločas rozpadu, $t_{1/2}$

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

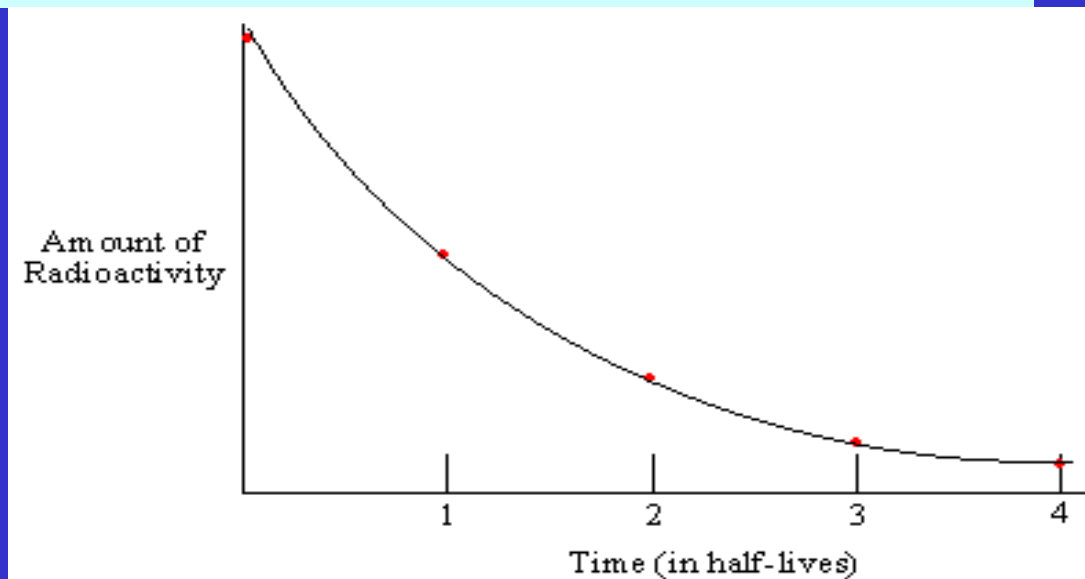
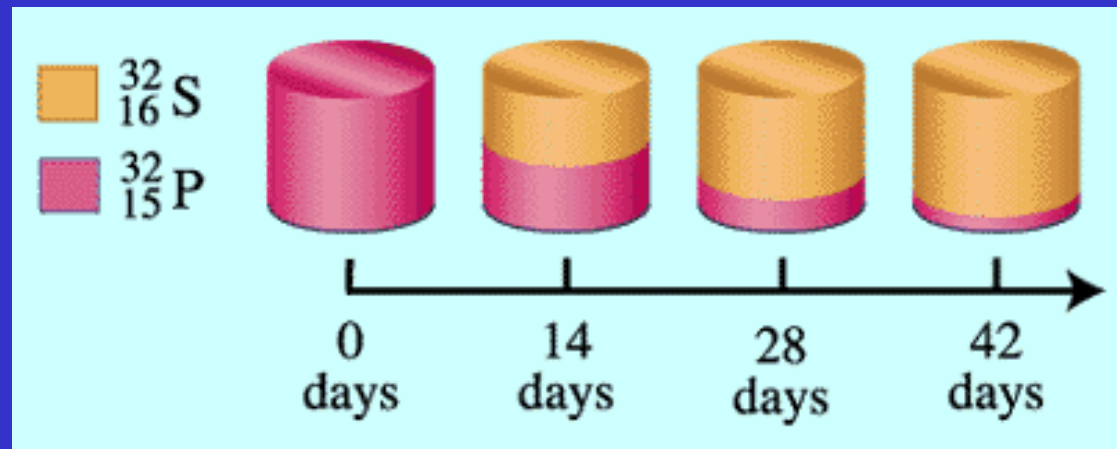
$$\ln(N/N_0) = -k t$$

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

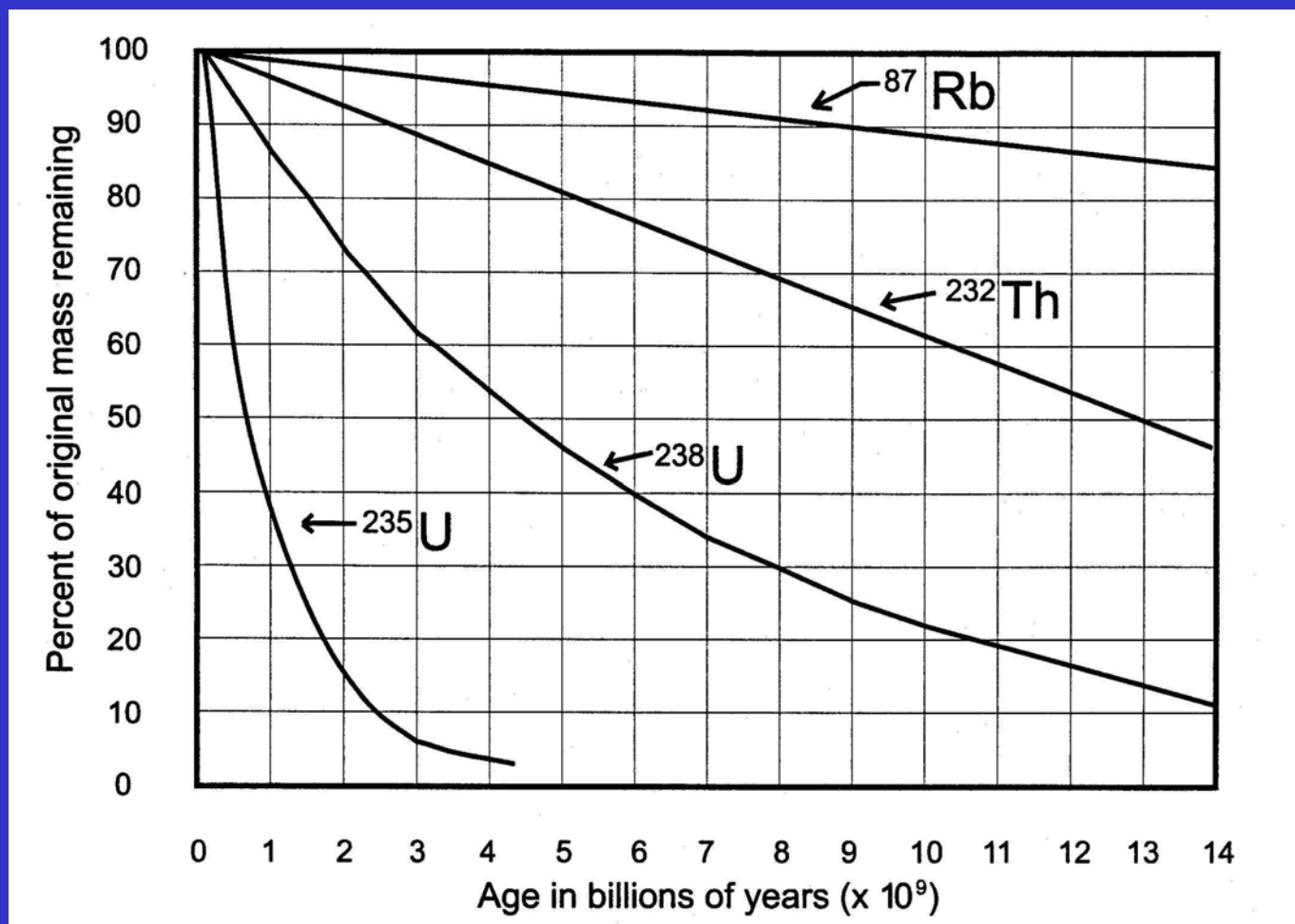
$$t_{1/2} = \ln(2) / k$$

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

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



Poločas rozpadu



Datování pomocí ^{14}C



Willard Libby
(1908-1980)
NP za chemii 1960

^{14}C vzniká kontinuálně vysoko v atmosféře



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



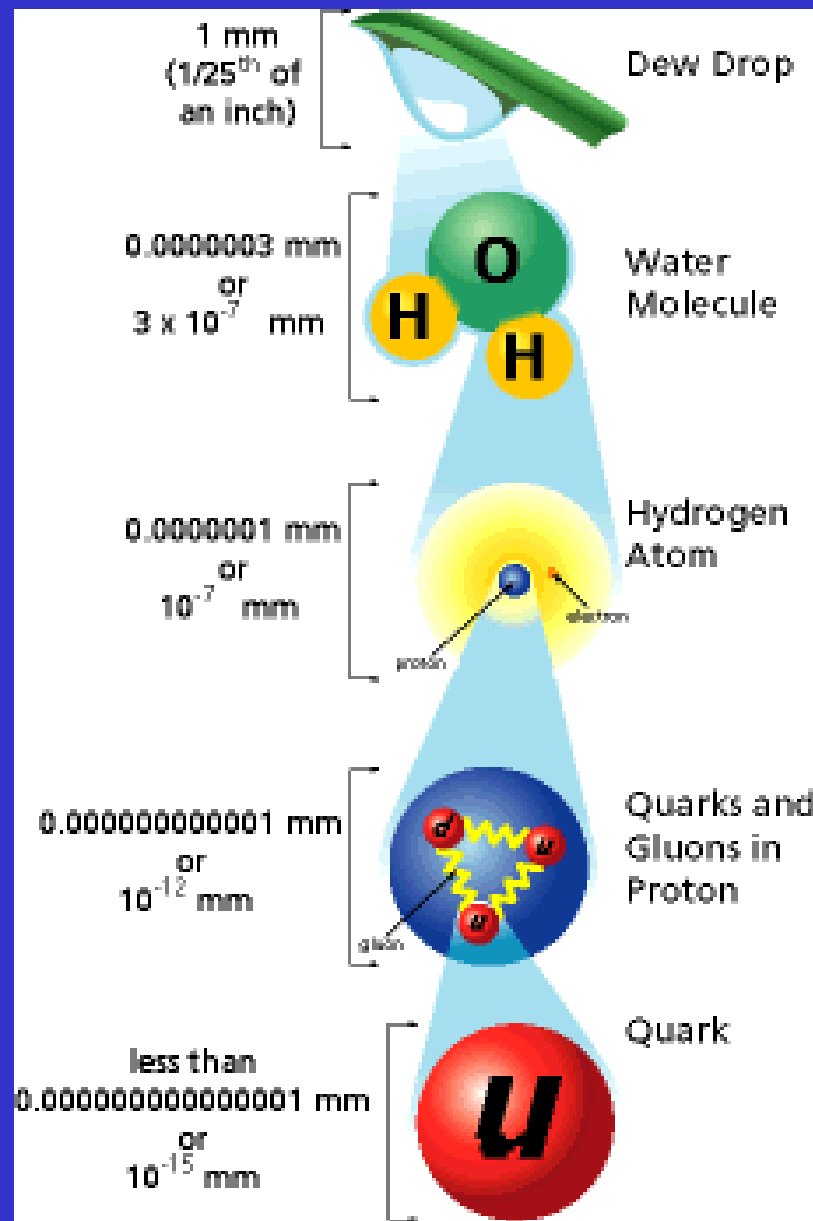
V atmosféře a živých rostlinách (CO_2 , fotosyntéza) se ustaví rovnovážná koncentrace ^{14}C . Po smrti organismu koncentrace ^{14}C klesá.

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

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

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

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



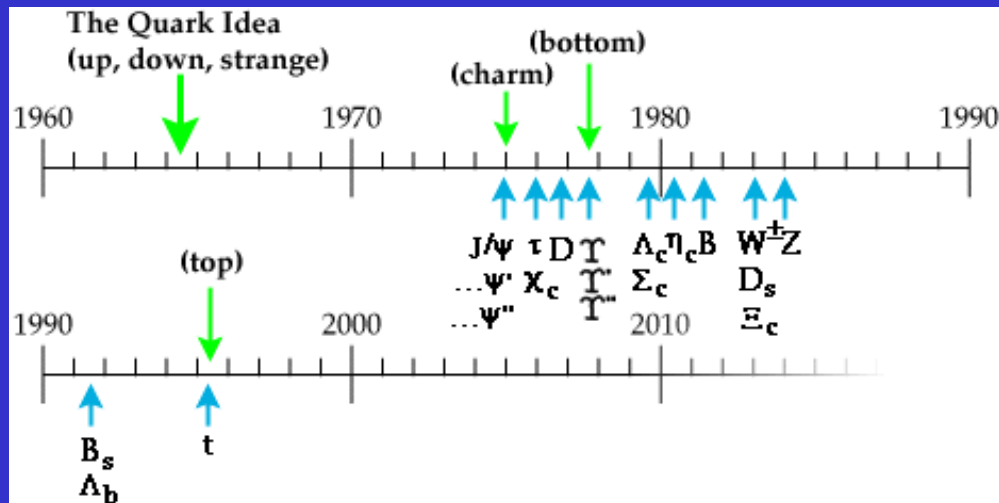
3 Å

1 Å = 10^{-10} m

10^{-15} m

10^{-18} m

Elementární částice



Zoologická zahrada částic

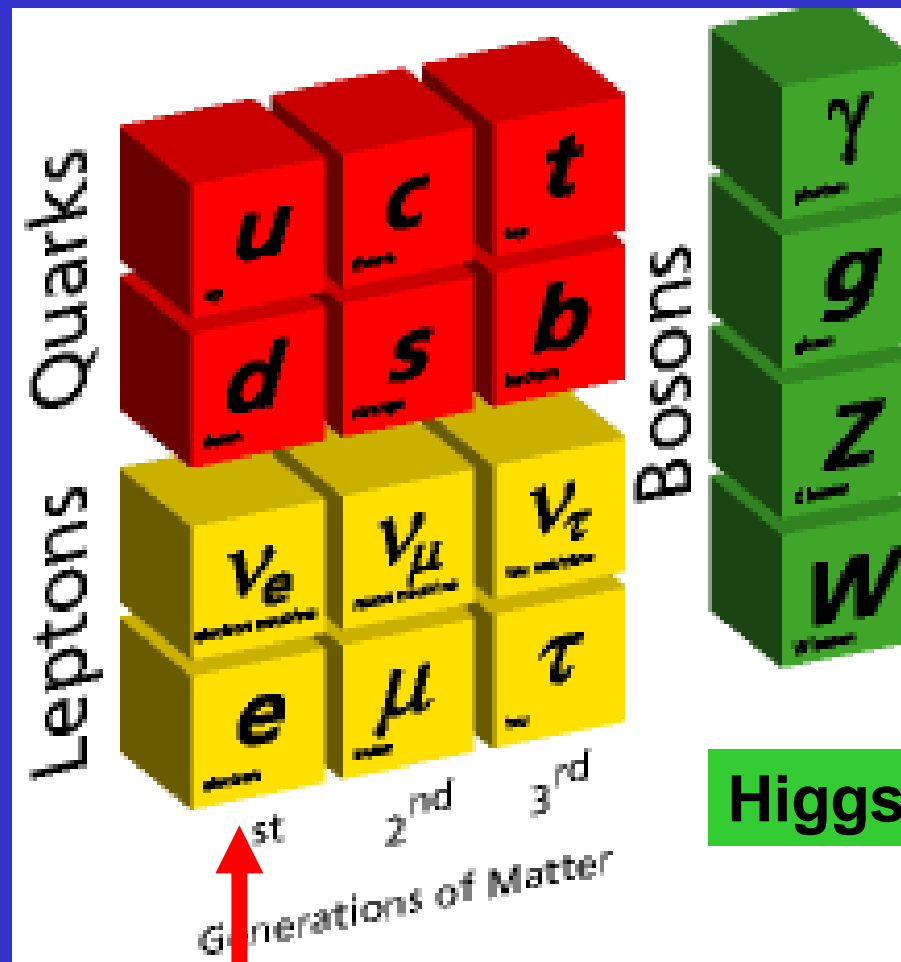
Quarky

- Spin
- Zlomkový náboj

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

Elementární částice – Standardní Model

Astrofyzika a
částicová
fyzika



Chemická hmota

Přenašeče interakcí

← Elmagn.

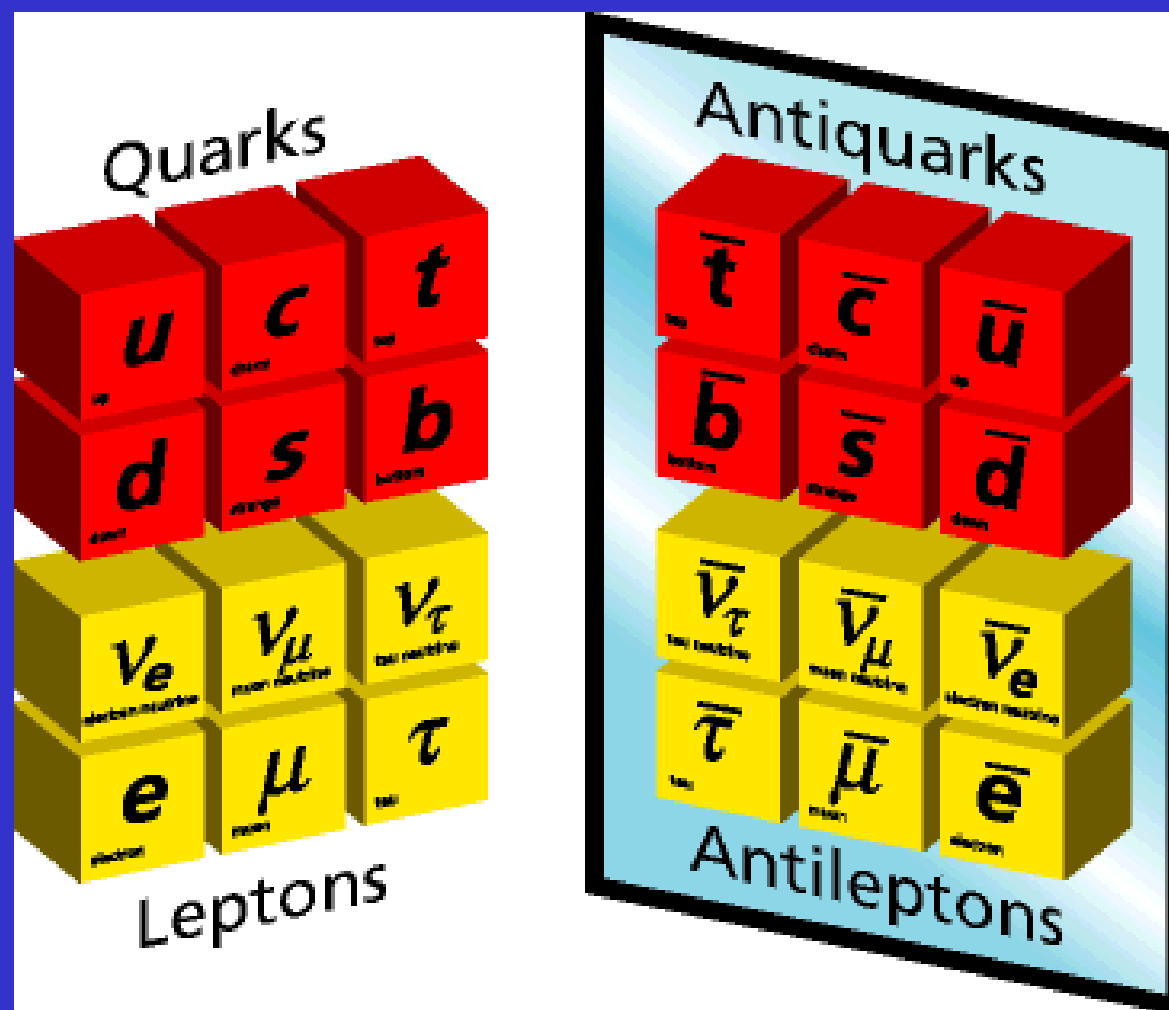
← Silné inter.

← Slabé inter.

γ a g nemají hmotnost
 Z a W mají hmotnost

Higgs dodává
hmotnost Z a W
bosonům

Antičástice



Chemická hmota

Leptony

lepton	značka	el. náboj	m [amu]
elektron	e^-	-1	$5.5 \cdot 10^{-4}$
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^+	+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.



$$L \quad 1 \quad -1 \quad 0$$



$$B \quad 1 \quad 1$$