

Prvek, nuklid, izotop, izobar, izoton

¹⁹₉ **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 (¹⁴C-¹⁴N; 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, 124Sn

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 ^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

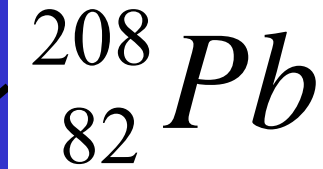
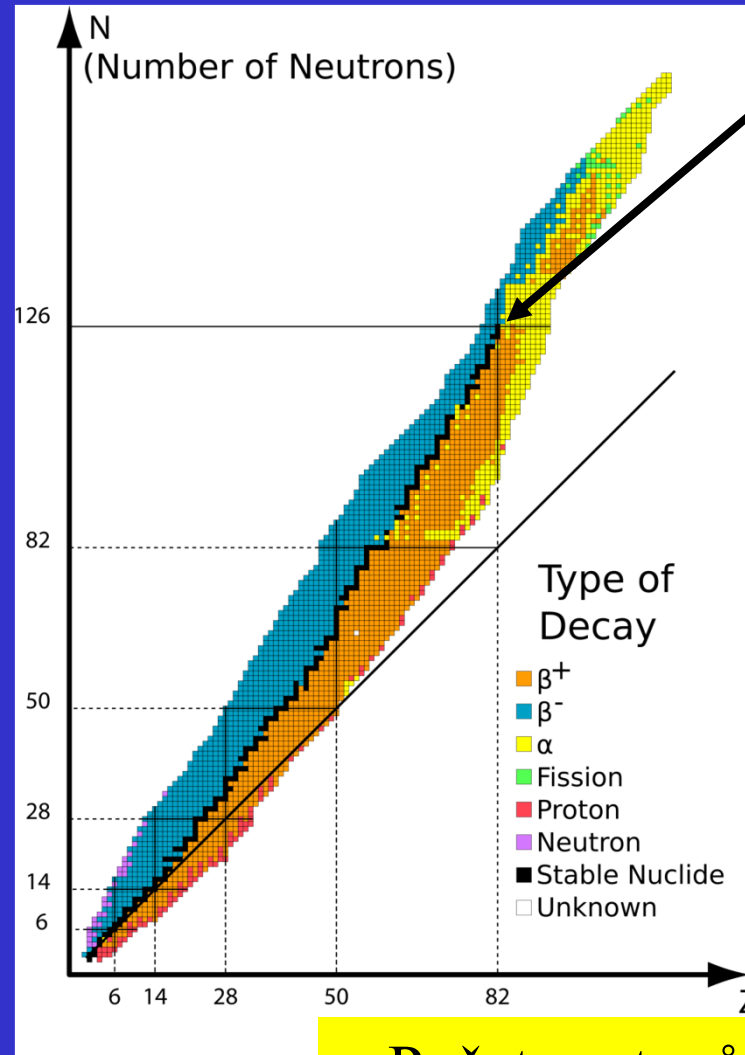
Všechny ostatní nuklidy mají **více n než p** $N > Z$

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

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}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 / kg	m / amu
e	$9,11 \cdot 10^{-31}$	0,0005486
p	$1,673 \cdot 10^{-27}$	1,007276
n	$1,675 \cdot 10^{-27}$	1,008665

$$1 \text{ amu} = 1,6606 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Hmotnostní úbytek

Hmotnost jádra je vždy menší než součet hmotností nukleonů

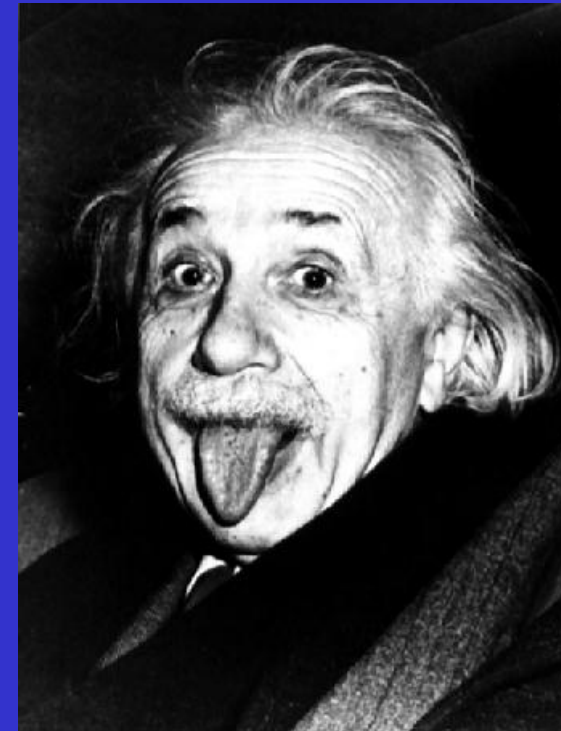
$$M_j < Z m_p + (A-Z) m_n$$

Hmotnostní úbytek $\Delta m < 0$
[Δm 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

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, $E_v(st)$

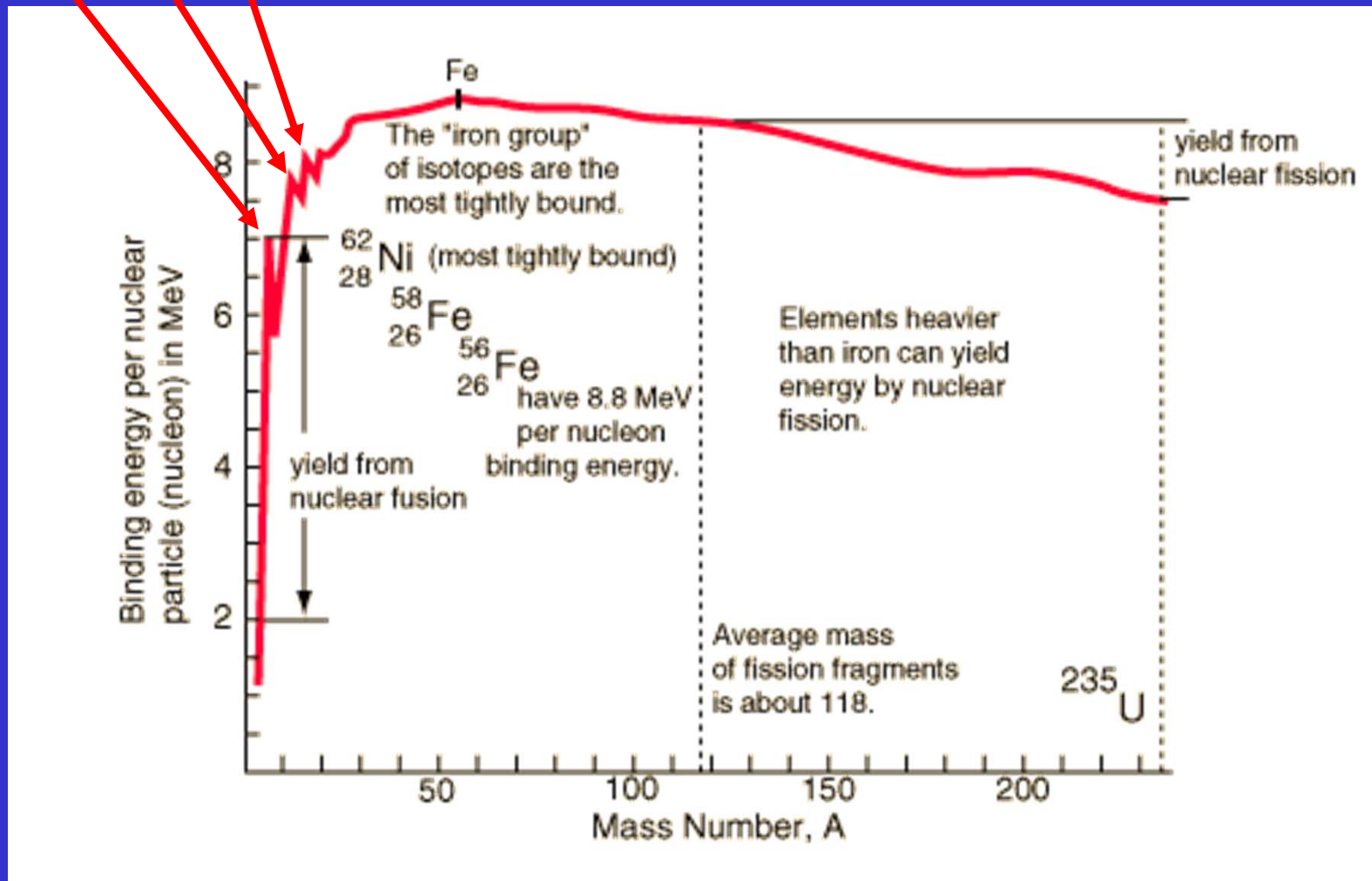
Nuklid	$E_v(st)$, MeV	E_v , MeV
^2H	1.113	2.226
^4He	7.074	28.296
^{14}N	7.476	104.659
^{16}O	7.976	127.619
^{19}F	7.779	147.801
^{40}Ca	8.551	342.052
^{55}Mn	8.765	482.070
^{58}Fe	8.792	509.945
^{62}Ni	8.795	545.259
^{206}Pb	7.875	1622.340
^{238}U	7.658	1822.693

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

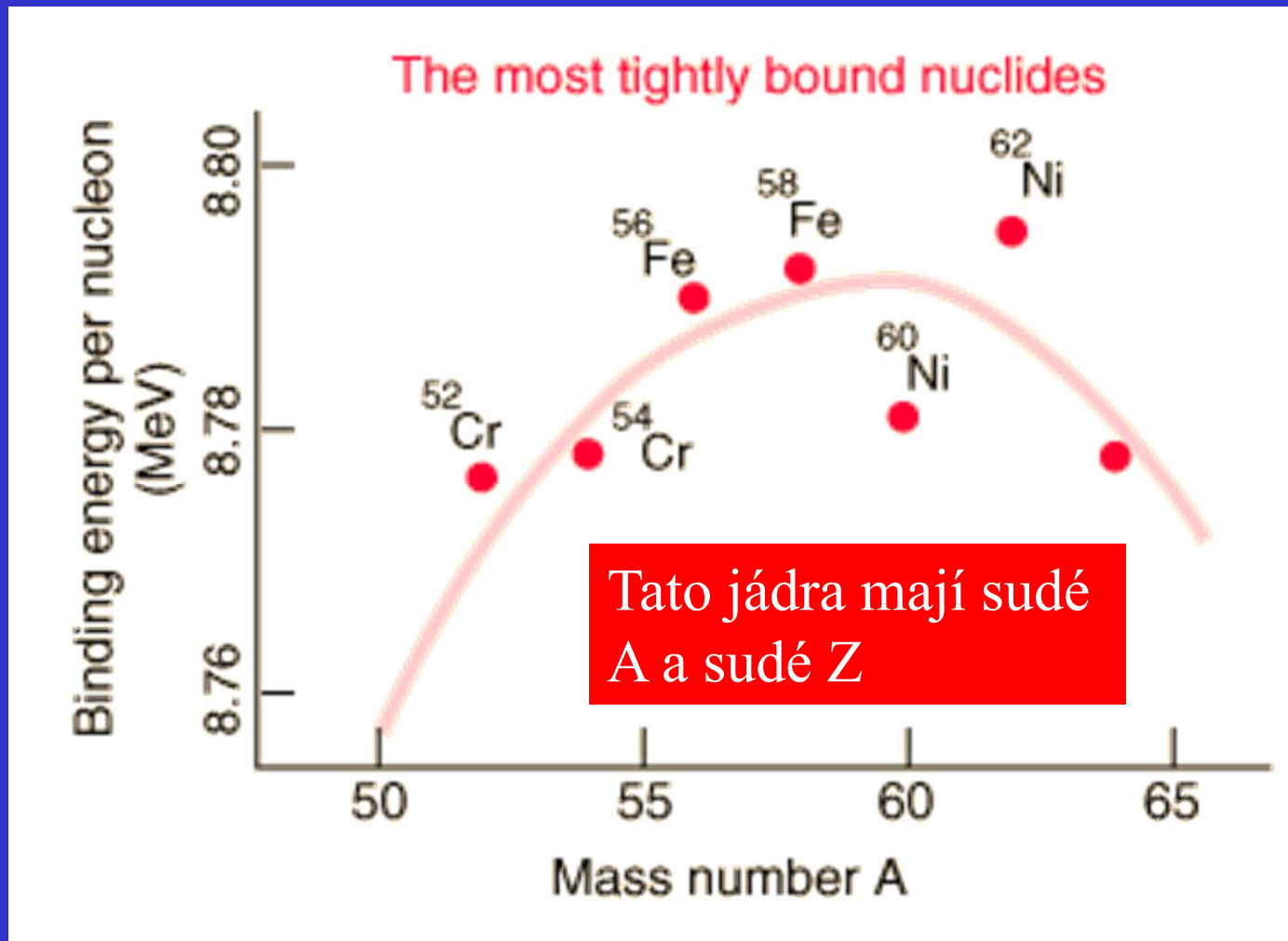
$$E_v(st) = \frac{E_v}{A}$$

Střední vazebná energie jádra

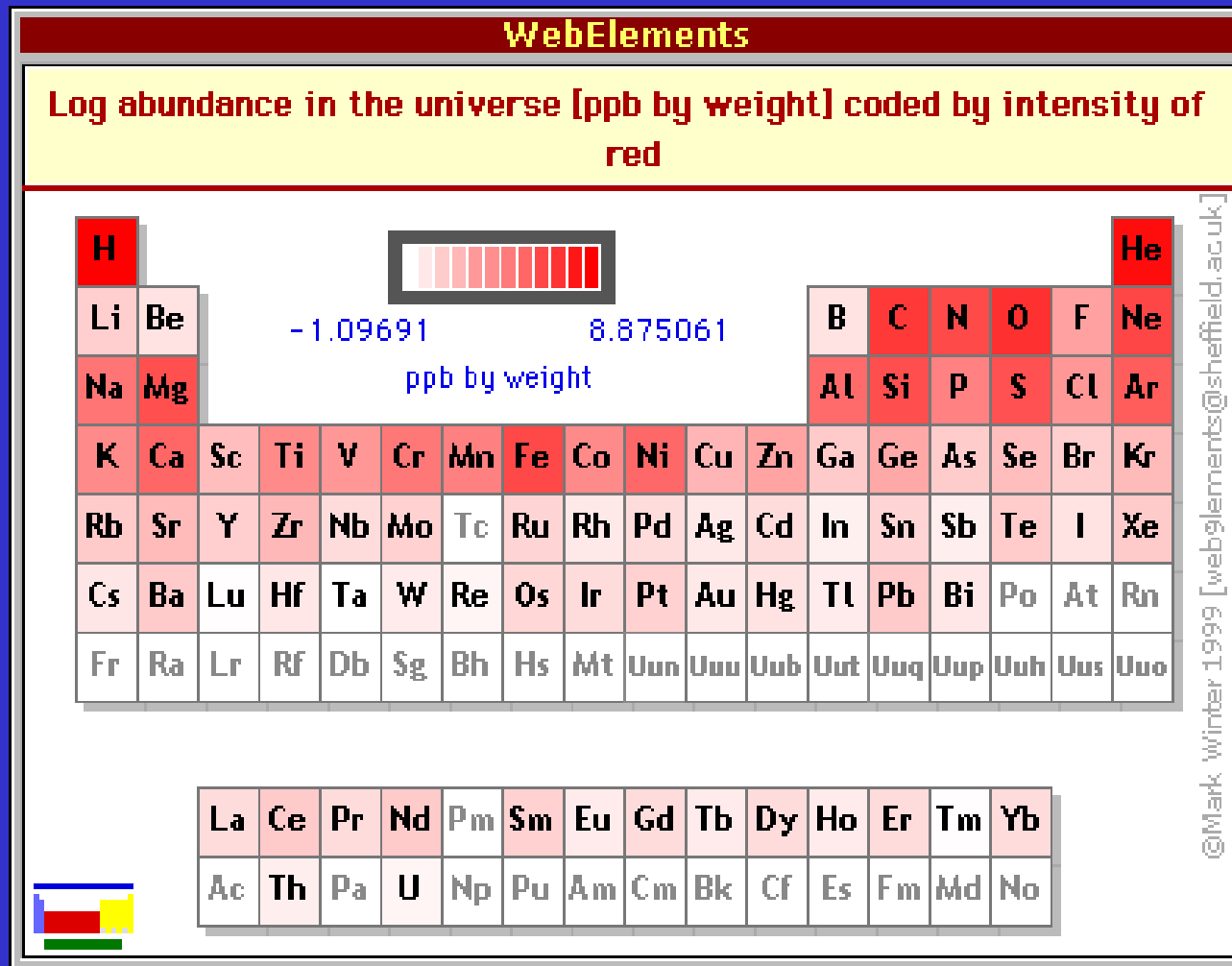
^4He ^{12}C ^{16}O



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.

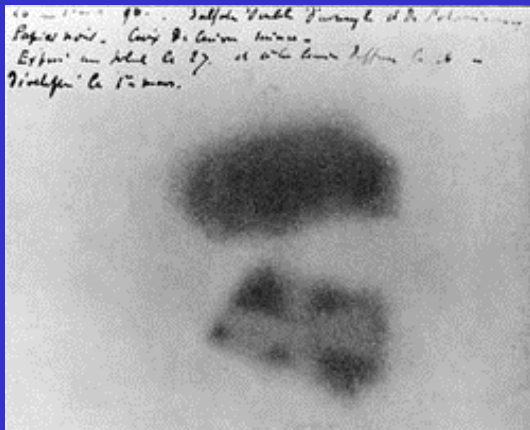
$$E = m \times c^2$$

Objev radioaktivity

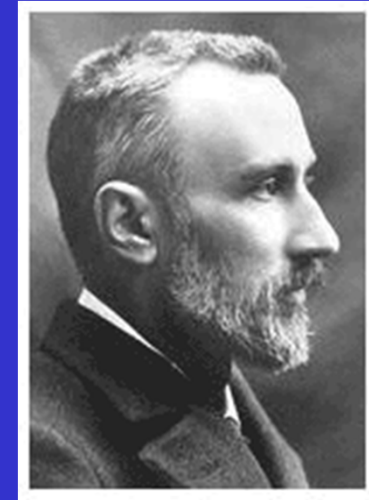


Uran, Thorium

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 POUDDRE
THO-RADIA
EMBELLISSANTES PARCE QUE CURATIVES
à base de thorium et de radium selon la formule du
DOCTEUR ALFRED CURIE
EXCLUSIVEMENT CHEZ LES PHARMACIENS
POURNE
BROCHURE GRATUITE SUR DEMANDE 4 THO-RADIA, 20 RUE DES CAPUCINES, PARIS
1922-23-24

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 Ubrigen 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)

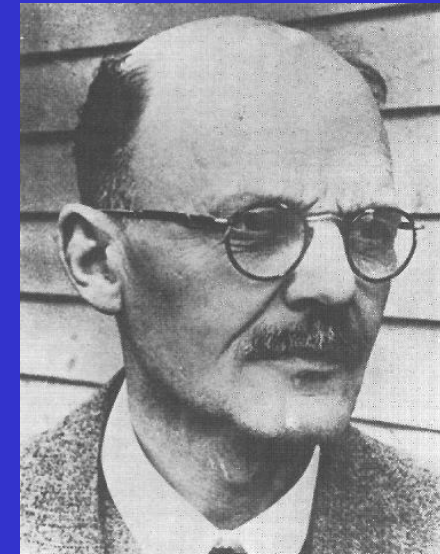
Radioaktivita = samovolný děj, produkty mají nižší obsah energie a jsou stabilnější

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				β decay			

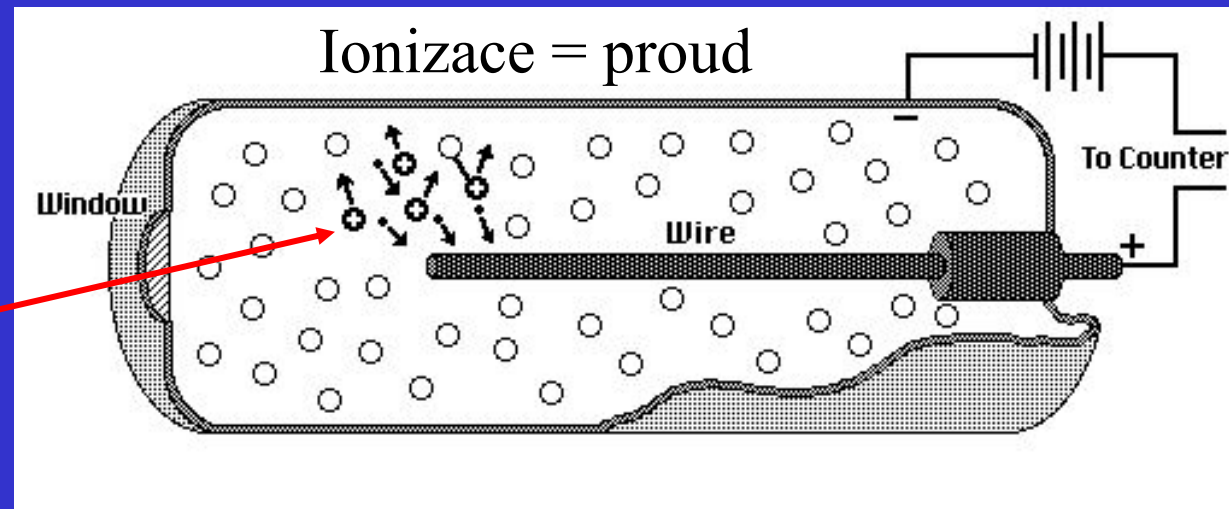
Geigerův čítač



Hans Geiger
(1882-1945)



částice



Měření radioaktivity

Radioaktivita

1 Bq (becquerel) = 1 rozpad za 1 s

(⁴⁰K v lidském těle 4 kBq) 1 Ci (curie) = 3,7 · 10¹⁰ 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

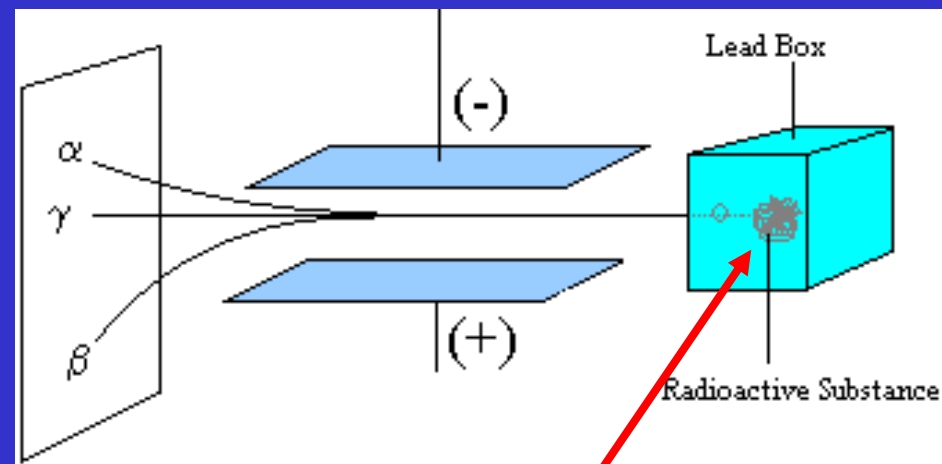
Beta = negativně nabitě částice

Gama = neutrální částice

Tvorba nového nuklidu

Posuvové zákony – změny v **Z** a **N**

Posun v periodické tabulce



Radioaktivní látka

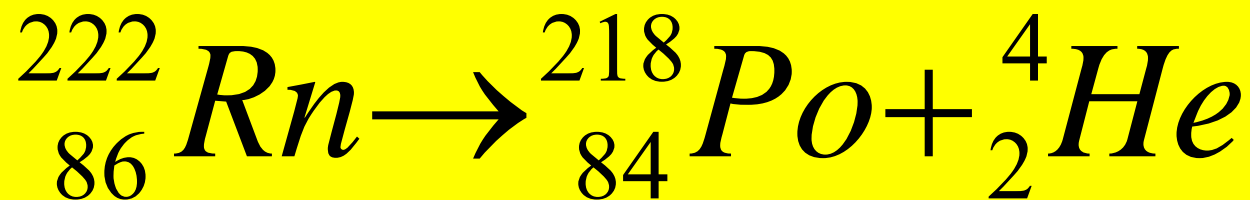
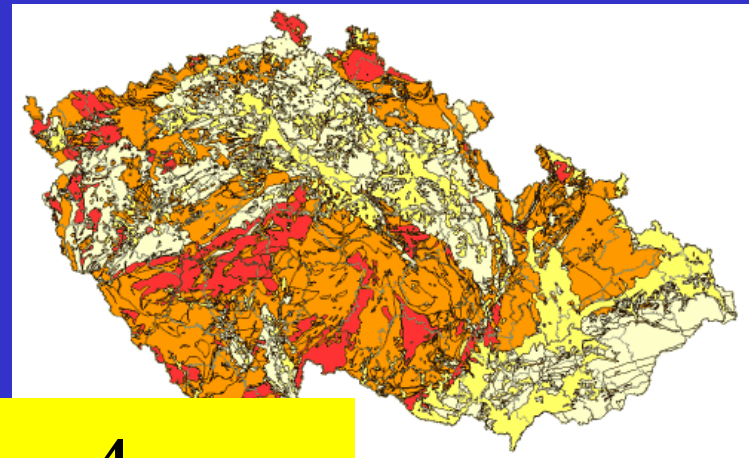
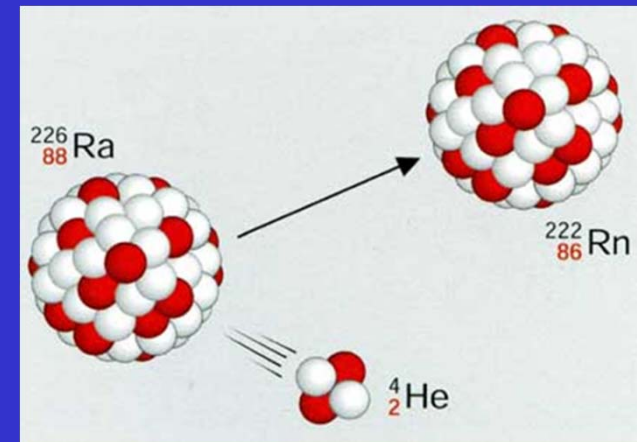
Emise alfa částice

U těžkých jader

Alfa částice opouští jádro rychlostí 10% c

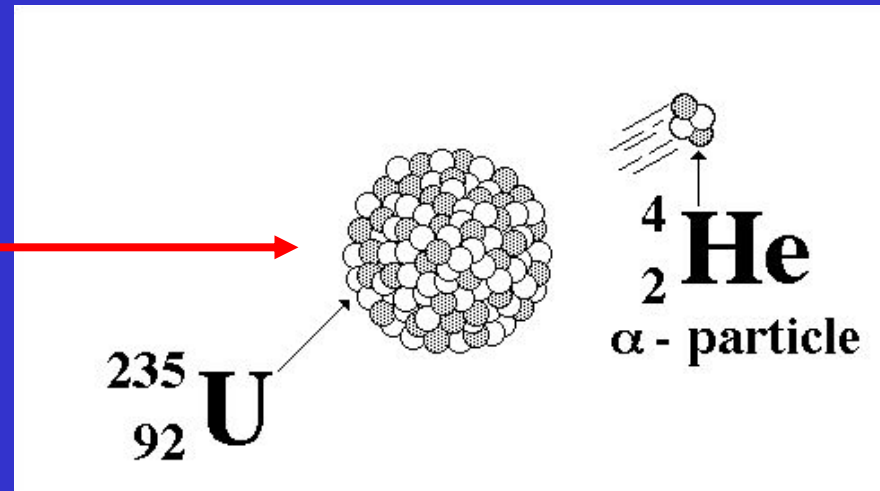
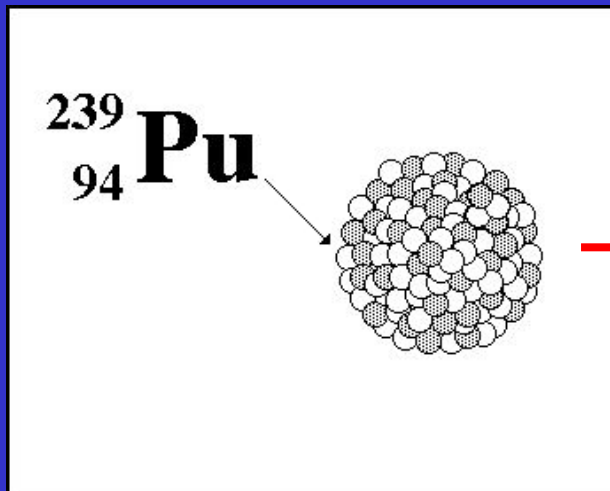
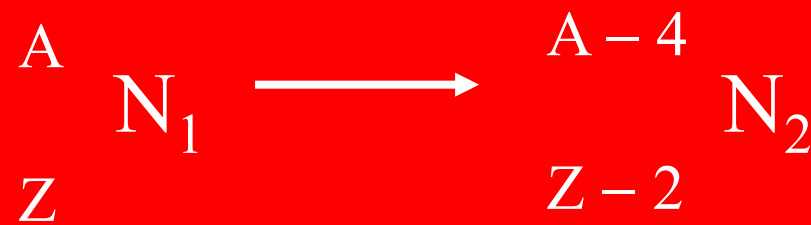
Velmi malá penetrace, několik cm ve vzduchu, zastaví je list papíru

Velmi škodlivé pro buňky
Inhalace



Alfa emise

Posun v periodické tabulce o dva prvky doleva



Radium-226

Alfa emise

Kalifornium-252

Curium-240

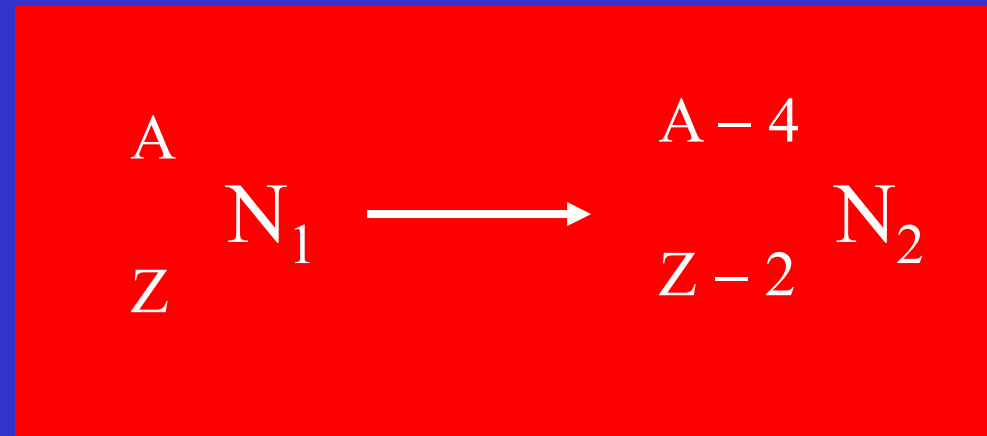
Uran-232

Zlato-185

Thorium-230

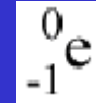
Americium-241 detektory kouře

Polonium-210



Posun v periodické tabulce o dva prvky doleva

Beta částice



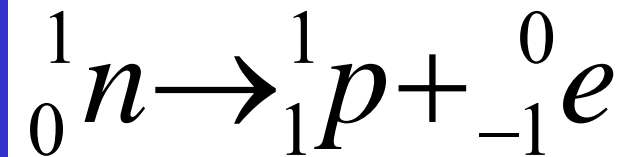
Jádra s nadbytkem neutronů, nedostatek protonů



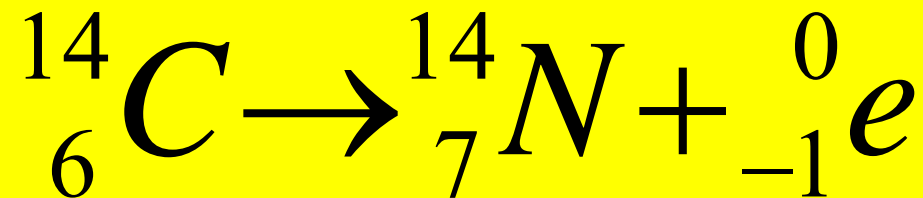
Beta částice jsou elektrony (ale ne z elektronového obalu!!!)

Vznikají rozpadem neutronu

e opouští jádro rychlostí 90% c

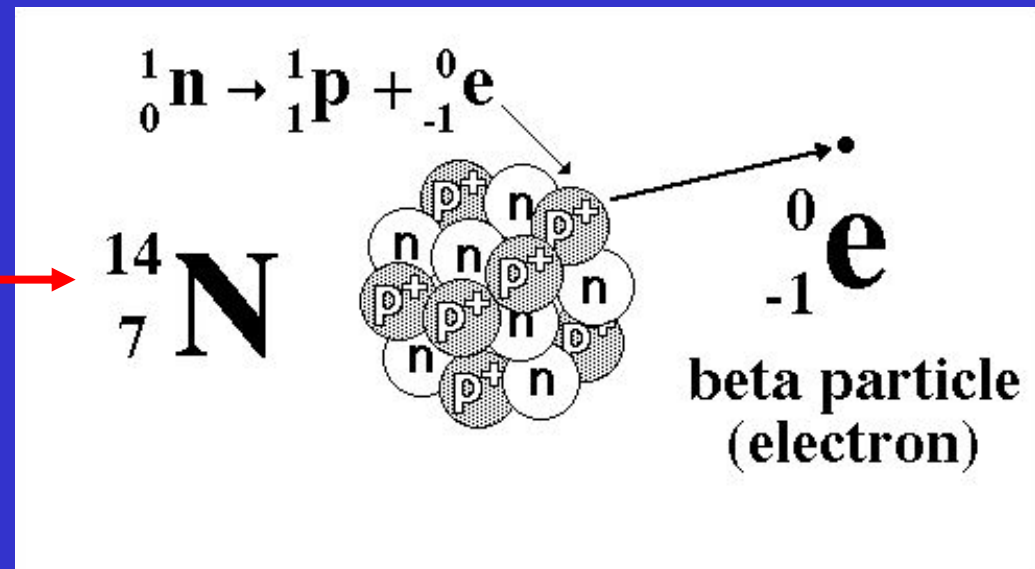
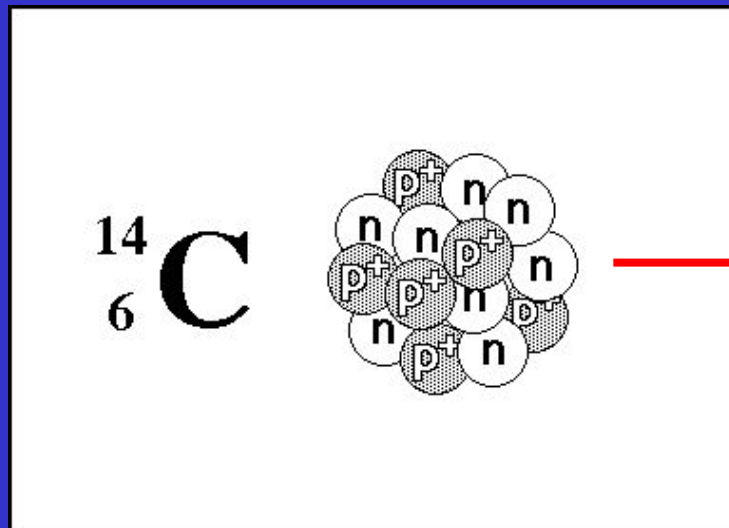
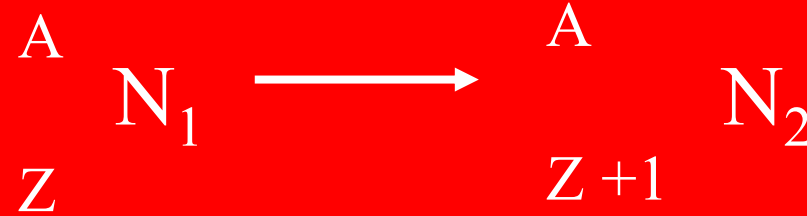


Penetrace větší než alfa, několik m ve vzduchu,
zastaví je 1 cm Al folie



Beta emise

Posun v periodické tabulce o jeden prvek doprava



Krypton-87

Beta emise

Zinek-71

Křemík-32

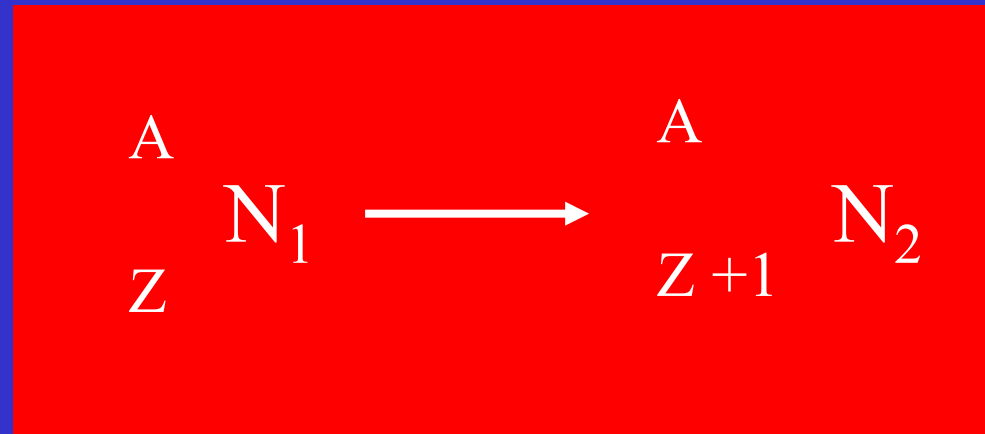
Kobalt-60

Hořčík-27

Sodík-24

Železo-59

Fosfor-32



Posun v periodické tabulce o jeden prvek
doprava

Gama částice

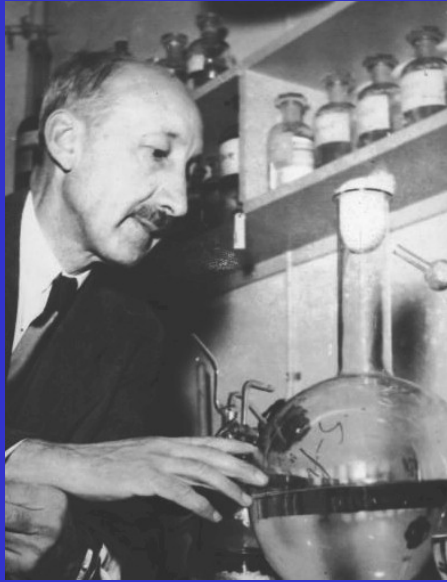
Jádra s nadbytkem energie emitují gama částice

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

Rychlost světla

Hluboká penetrace, 500 m ve vzduchu





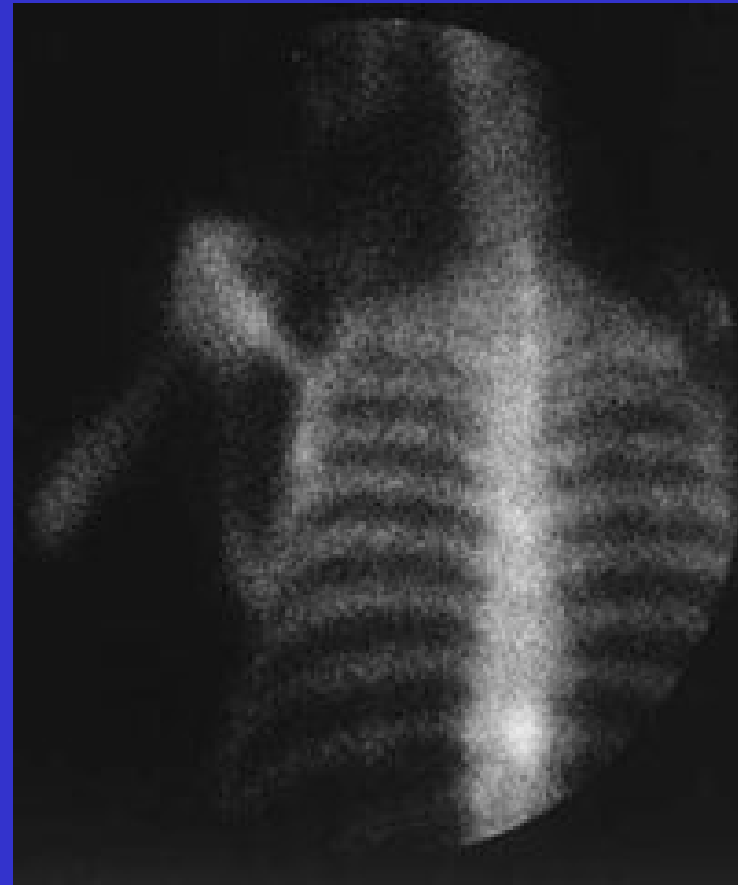
Tracer

Gyorgy Hevesy

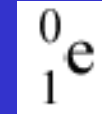
(1885 – 1966)

1913 radioaktivní tracer

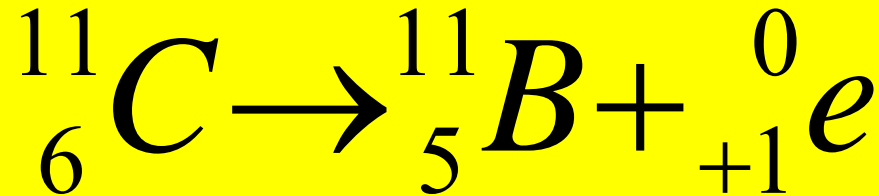
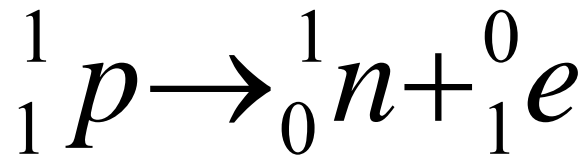
NP za chemii 1943



Positronová emise



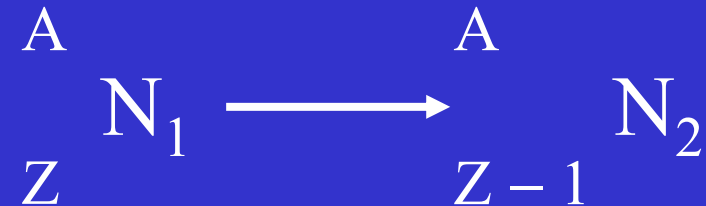
Jádra s nadbytkem protonů, nedostatek neutronů



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

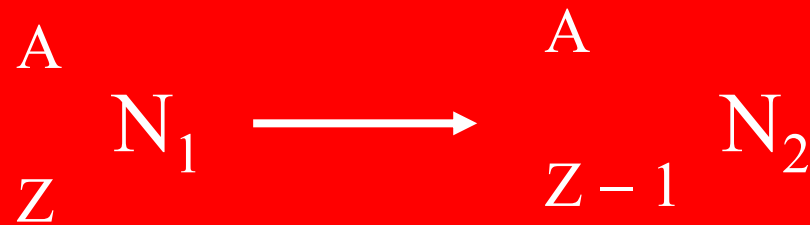
Praseodym-140

Neon-18

Kyslík-15

Dusík-13

Měď-59



Posun v periodické tabulce o jeden prvek doleva

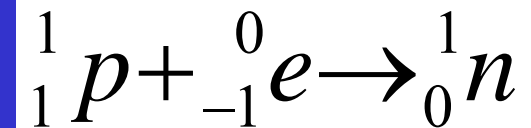
PET



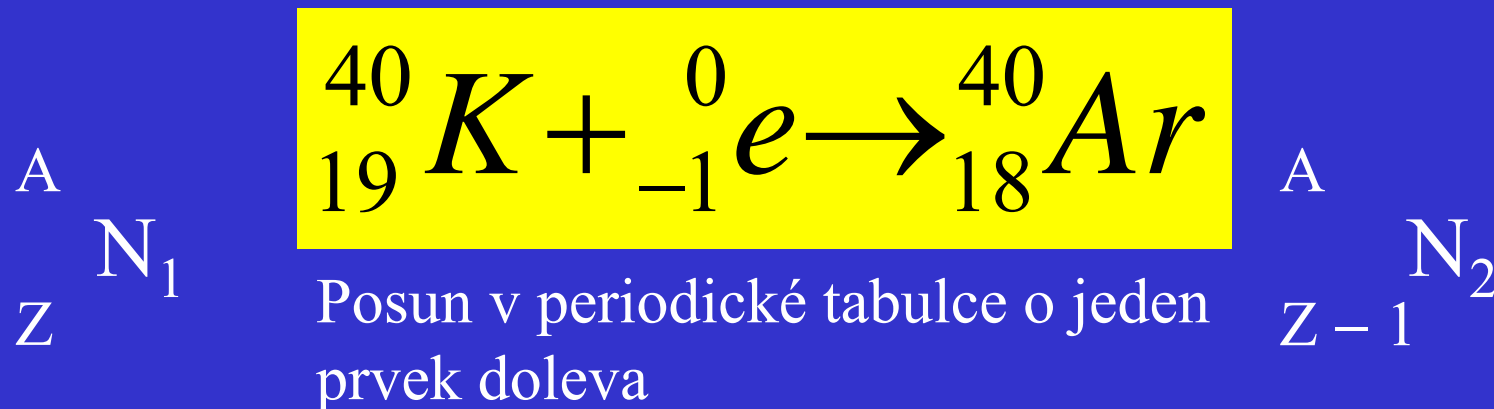
Elektronový záchyt

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

Vanad-48

Gallium-67

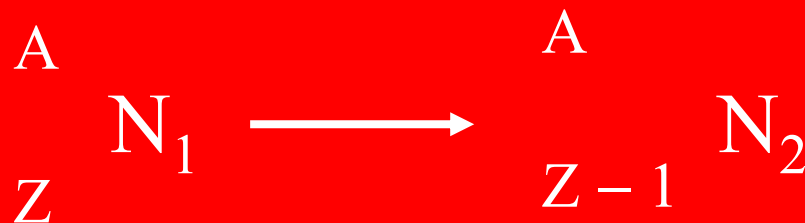
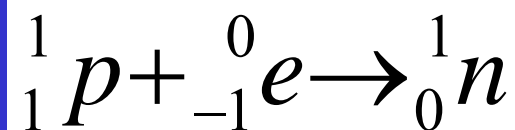
Beryllium-7

Vápník-41

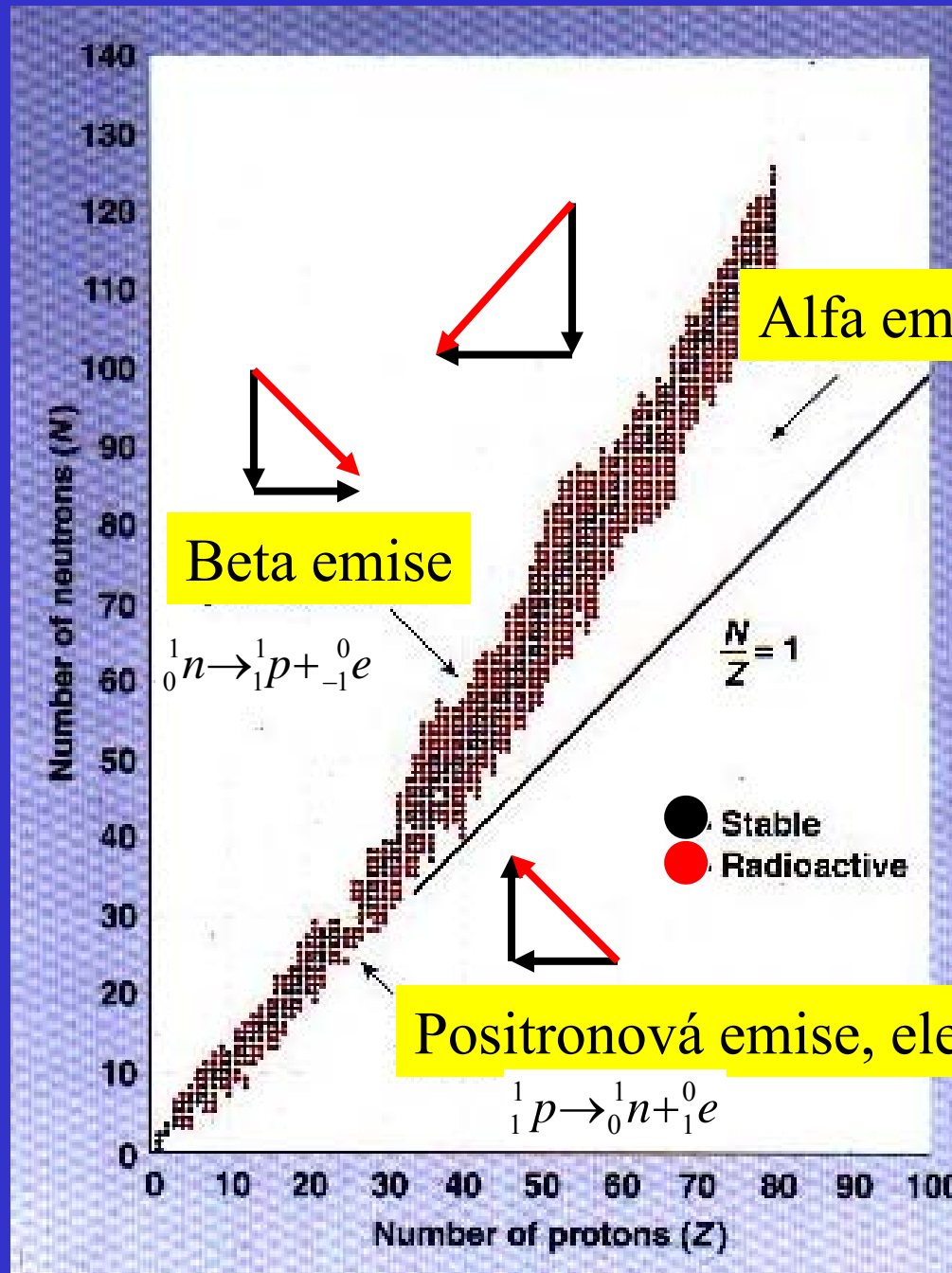
Kobalt-57

Selen-72

Elektronový záchyt



Posun v periodické tabulce o jeden prvek doleva



Beta emise

Alfa emise

Positronová emise, elektronový záchyt

Rozpadové řady

Thoriová ^{232}Th - ^{208}Pb

$$A = 4n$$

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

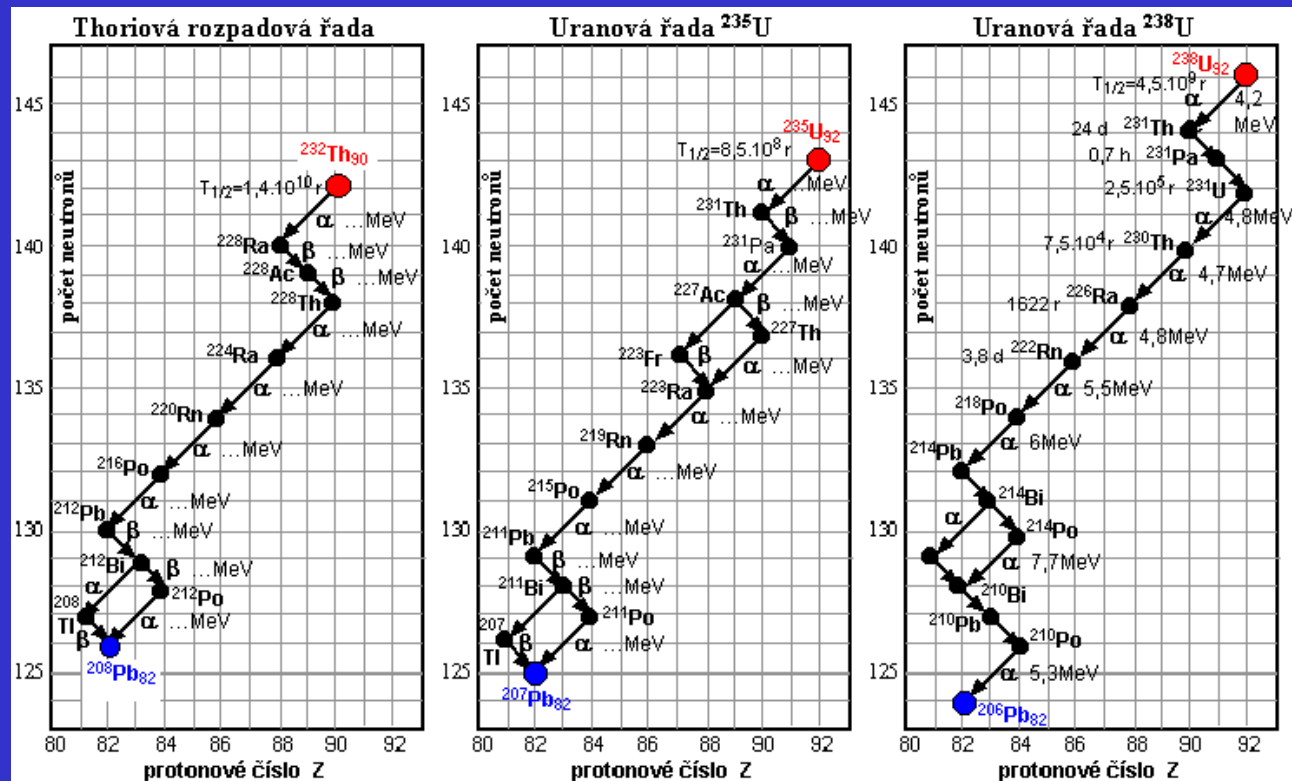
$$A = 4n + 1$$

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

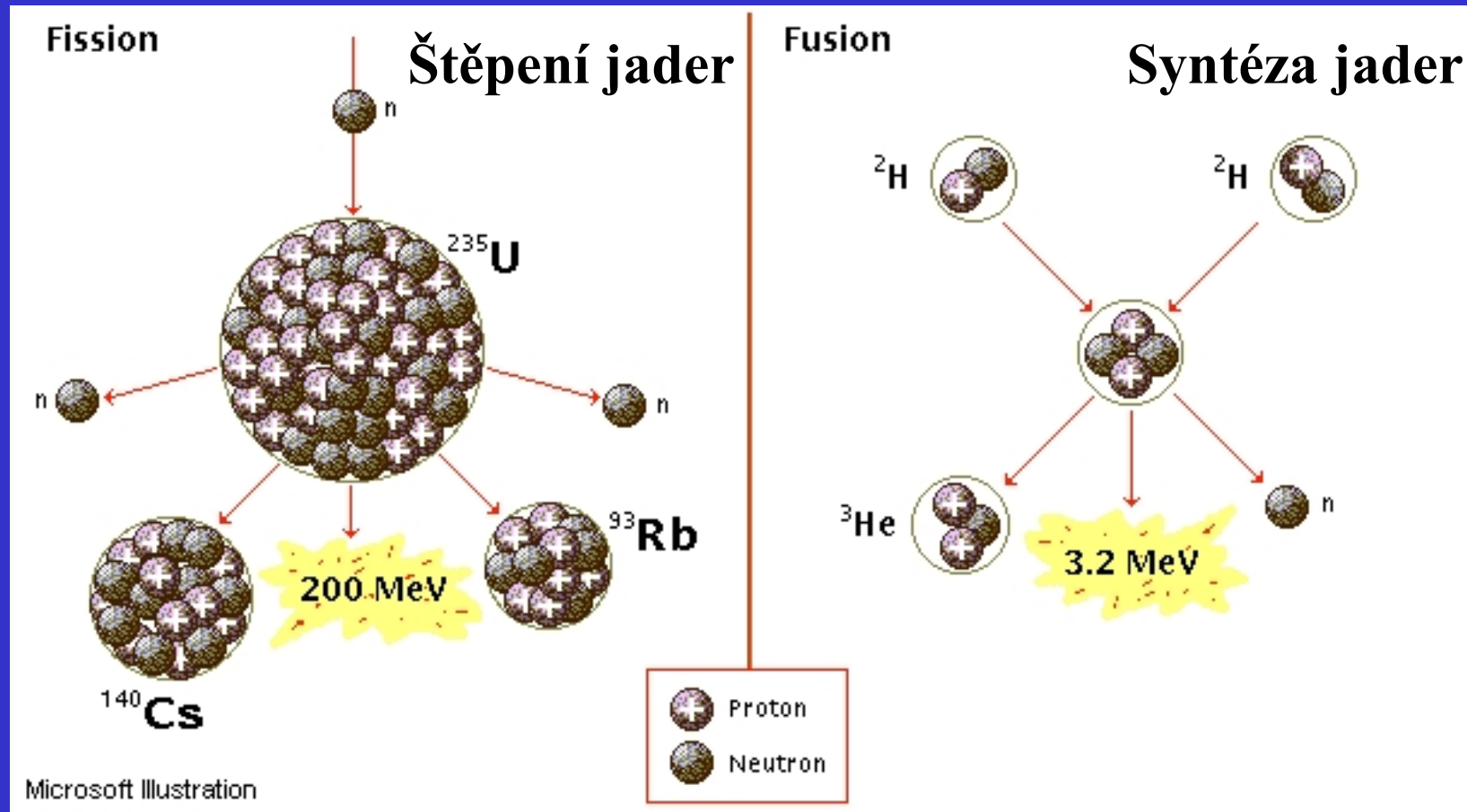
- Alfa-emise 97 %
- Samovolné štěpení 3 % (~3,7 neutronu)

Poločas rozpadu 2,65 let

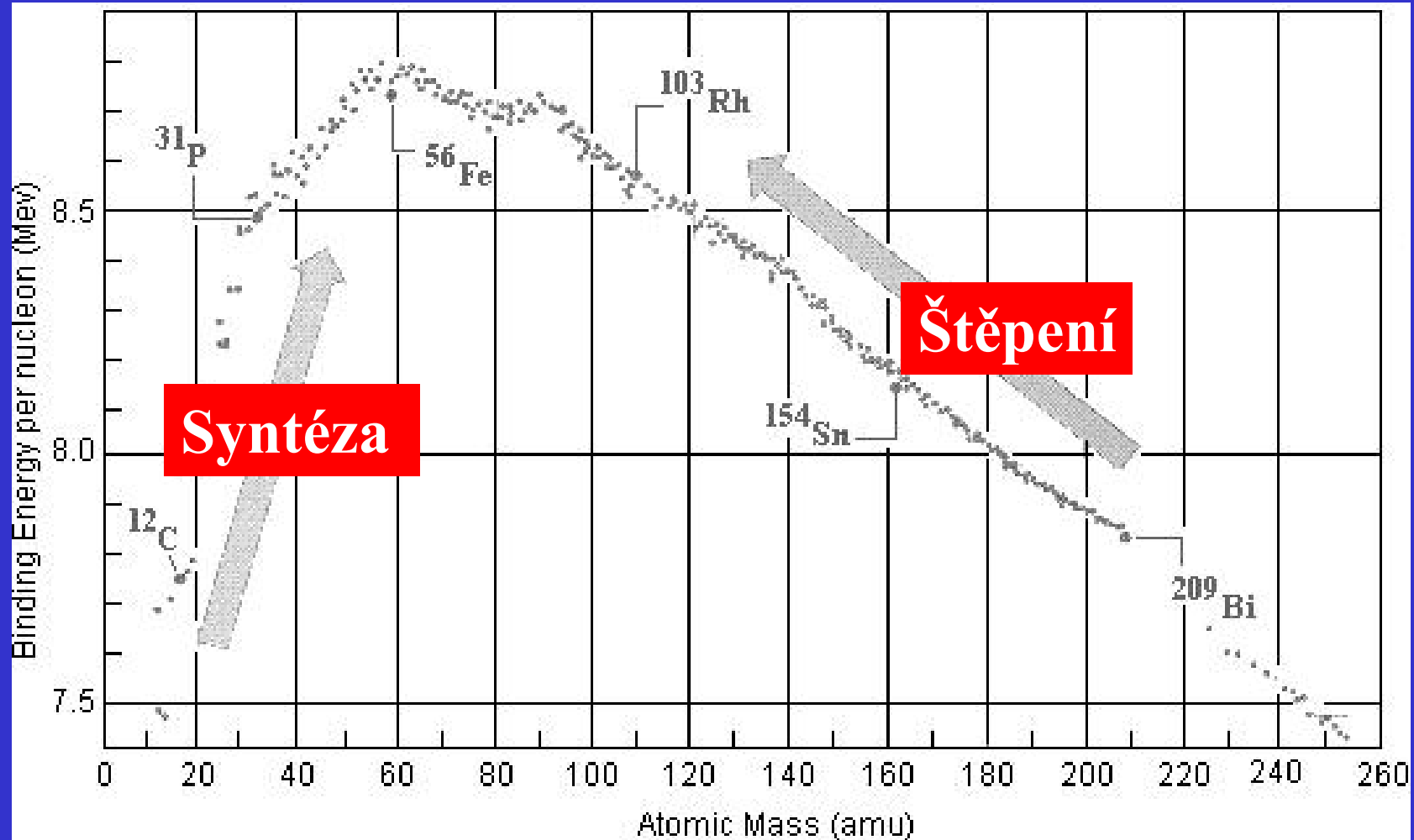
Zdroj neutronů pro start reaktorů, aktivační analýzu, difrakci, detektory zlata, výbušnin, vody a ropy, terapii rakoviny, BNCT³⁷

Syntéza a štěpení jader

Pro získání energie



Syntéza a štěpení jader - vazebná energie jádra



Syntéza jader ve vesmíru

Big Bang

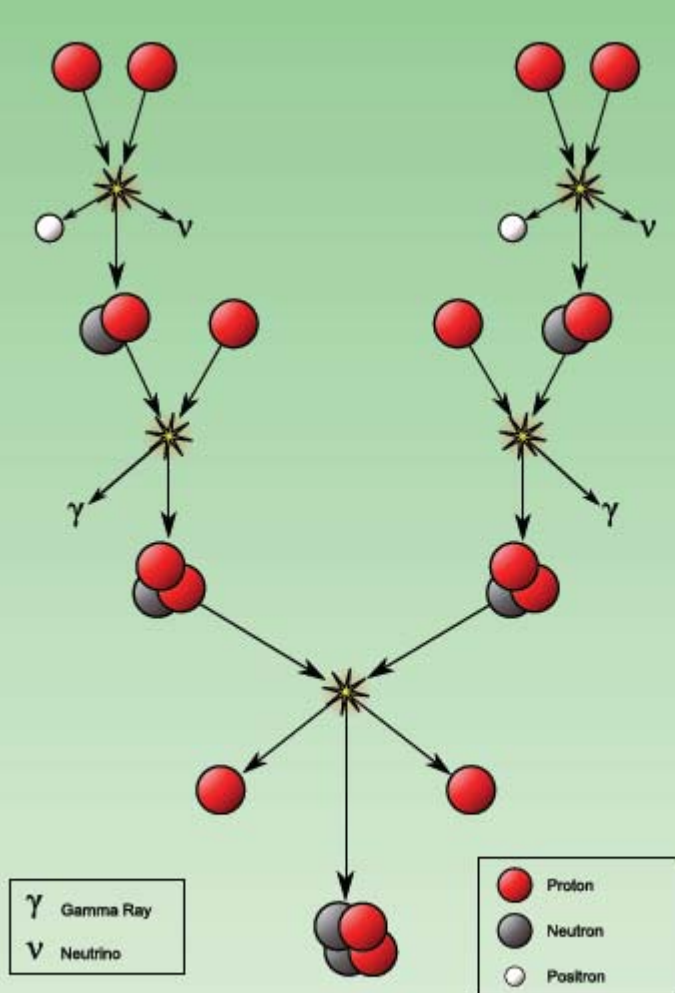


Slunce (teplota = 2×10^6 K v nitru, energie z PP nebo CN cyklu)

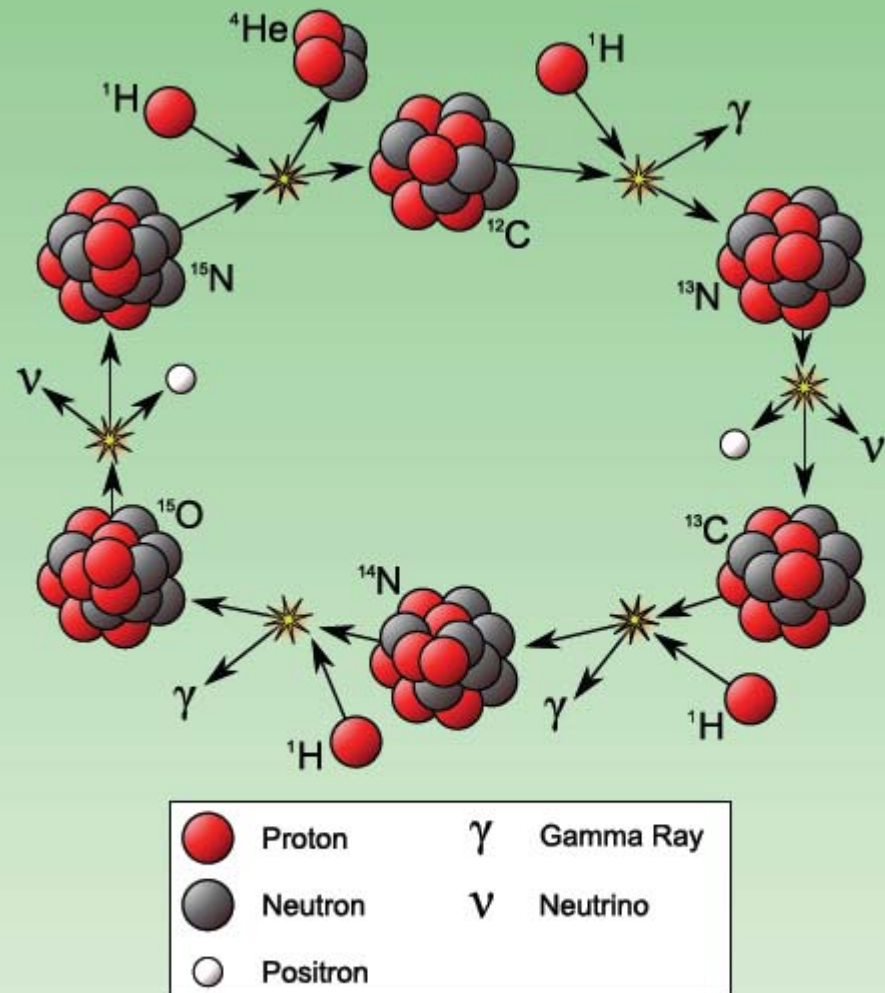
PP cyklus



PP cyklus



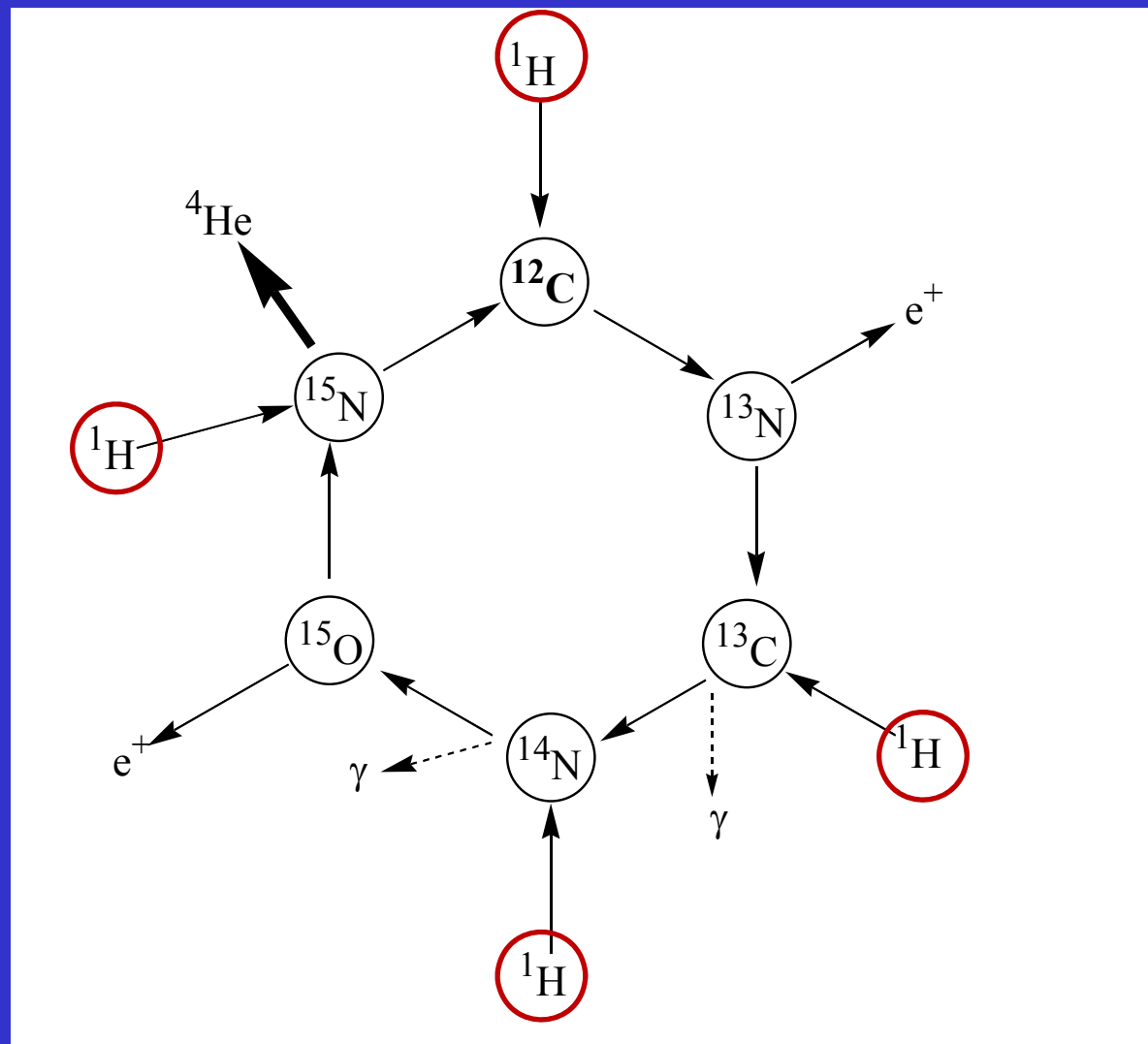
CN cyklus



Uhlíkový cyklus

CN cyklus

Sumární rovnice



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

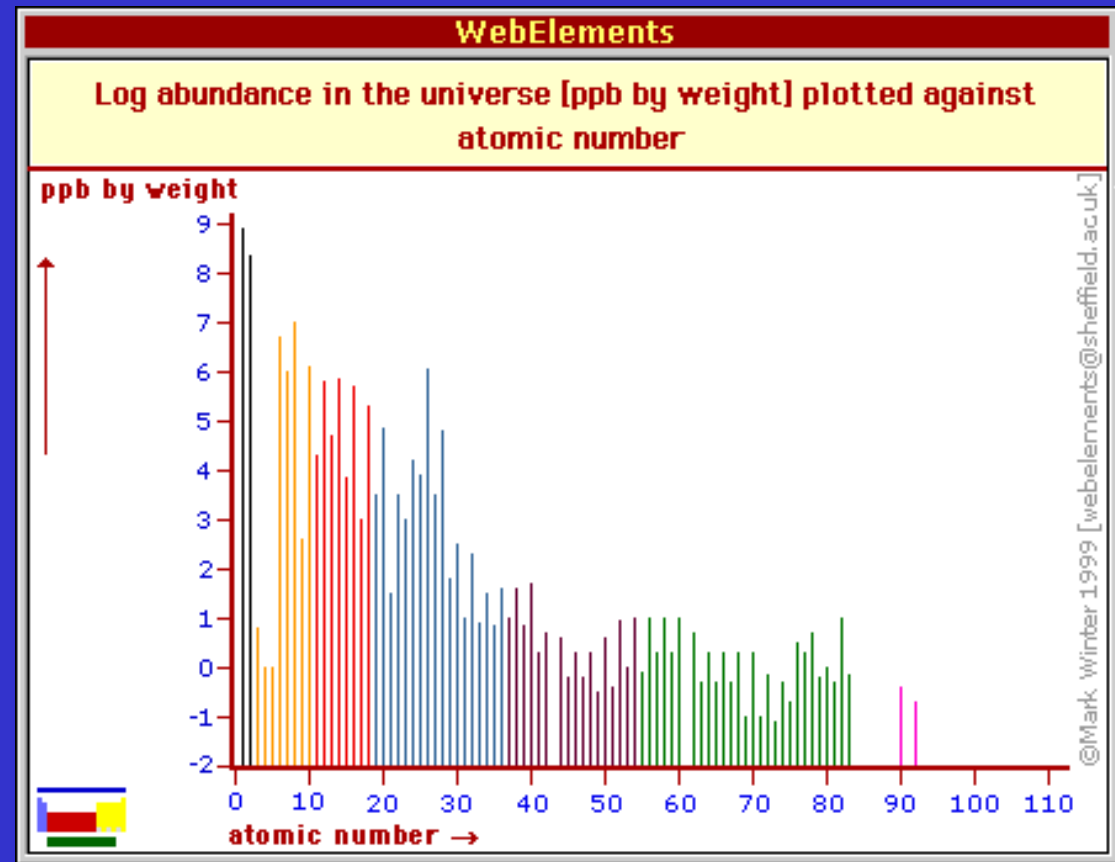
Jak dál?

Vysoké toky neutronů

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

Výbuch supernovy

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



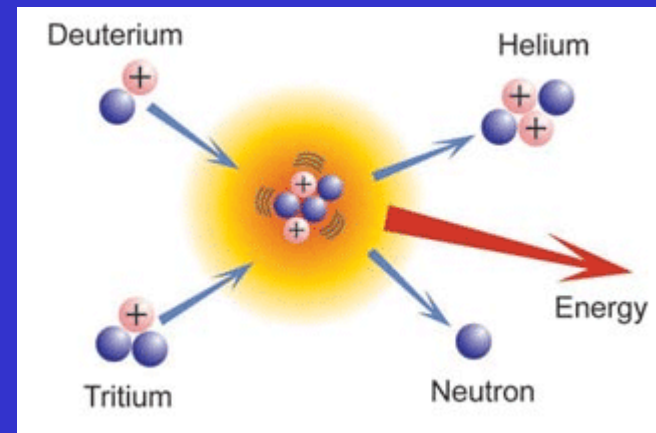
Termojaderné reakce



ITER Cadarache, Francie

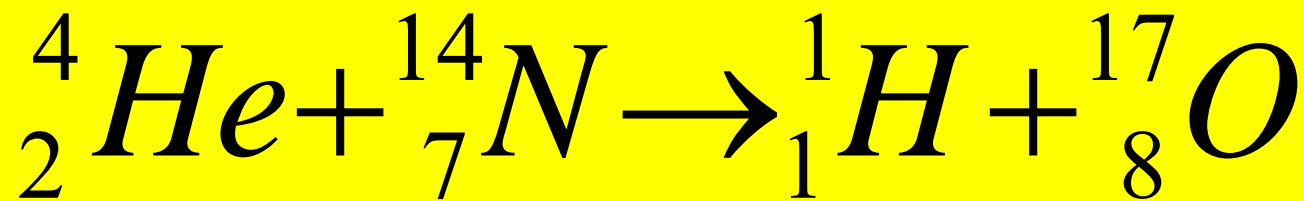
National Ignition Facility, USA

1952 H-bomba Eniwetok

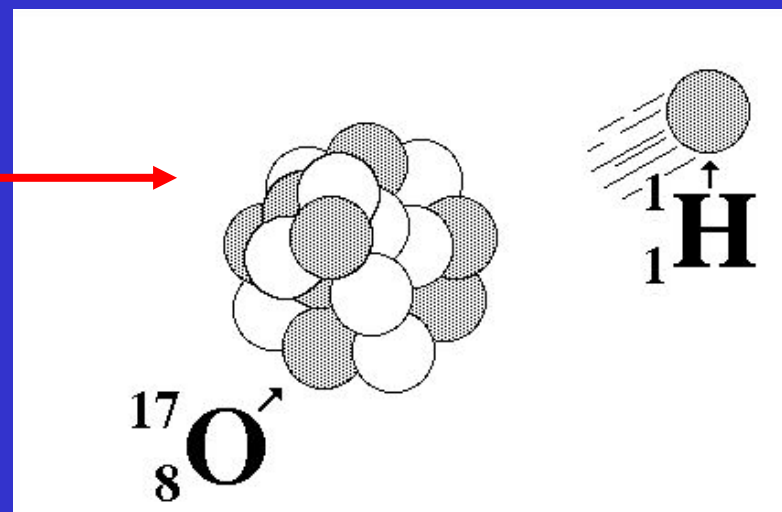
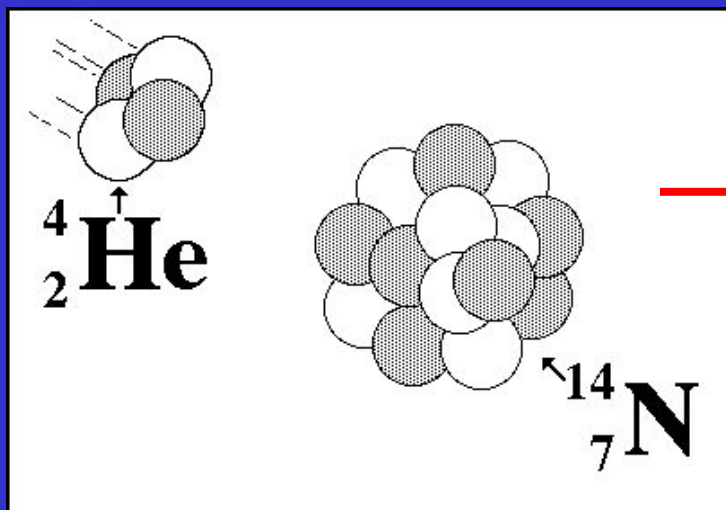


Transmutace

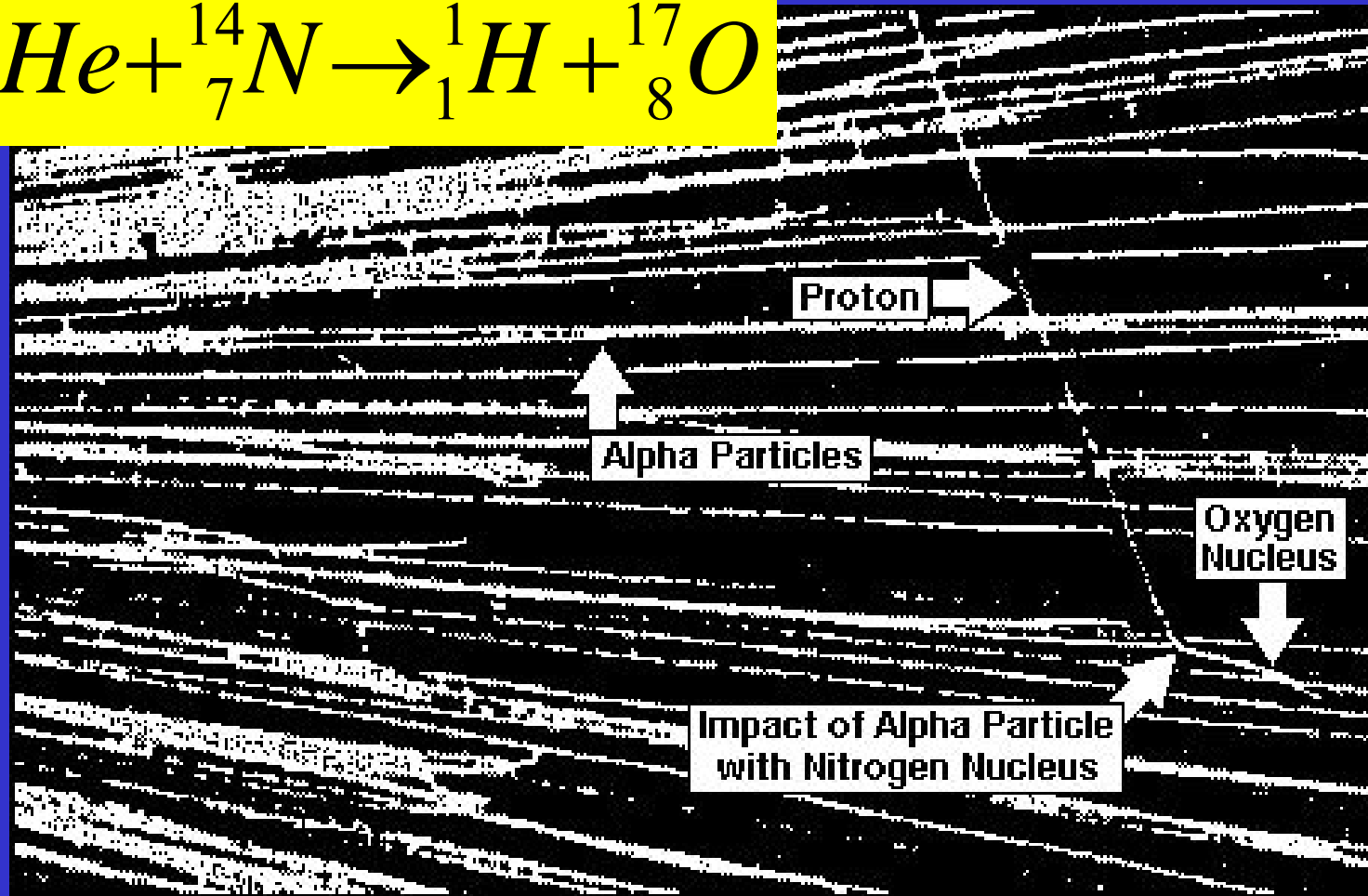
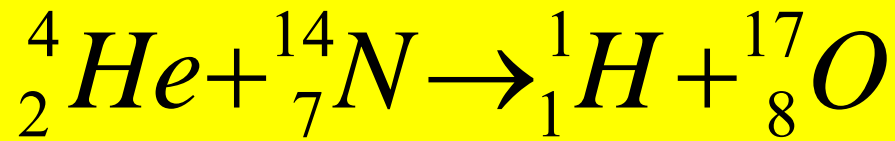
1919, Rutherford, první umělá příprava prvku



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



Transmutace

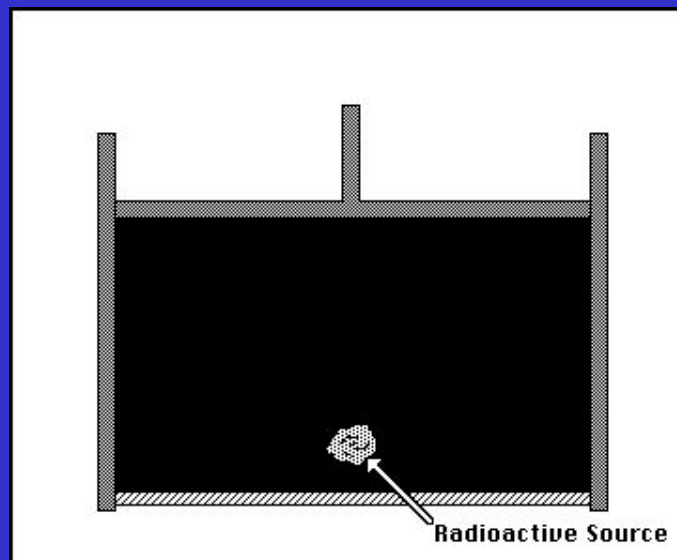


Mlžná komora - kondenzační stopy

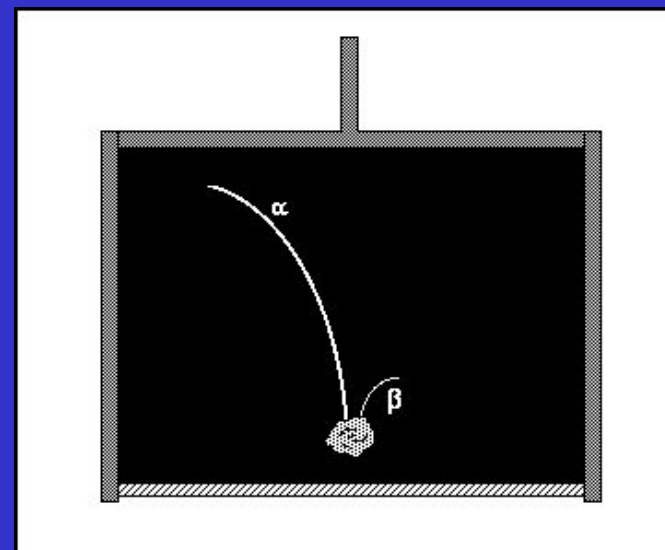


Wilsonova mlžná komora

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

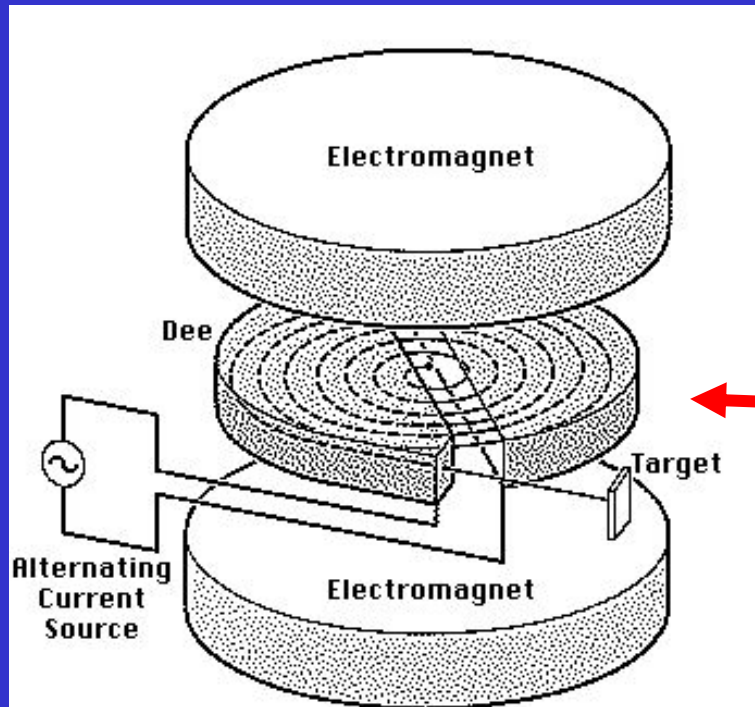


Expanze, ochlazení, vznik
přesycené páry, částice při
průletu ionizují okolní atomy,
kondenzace na ionizovaných₄₈
atomech – kondenzační stopa

1929

Cyklotron

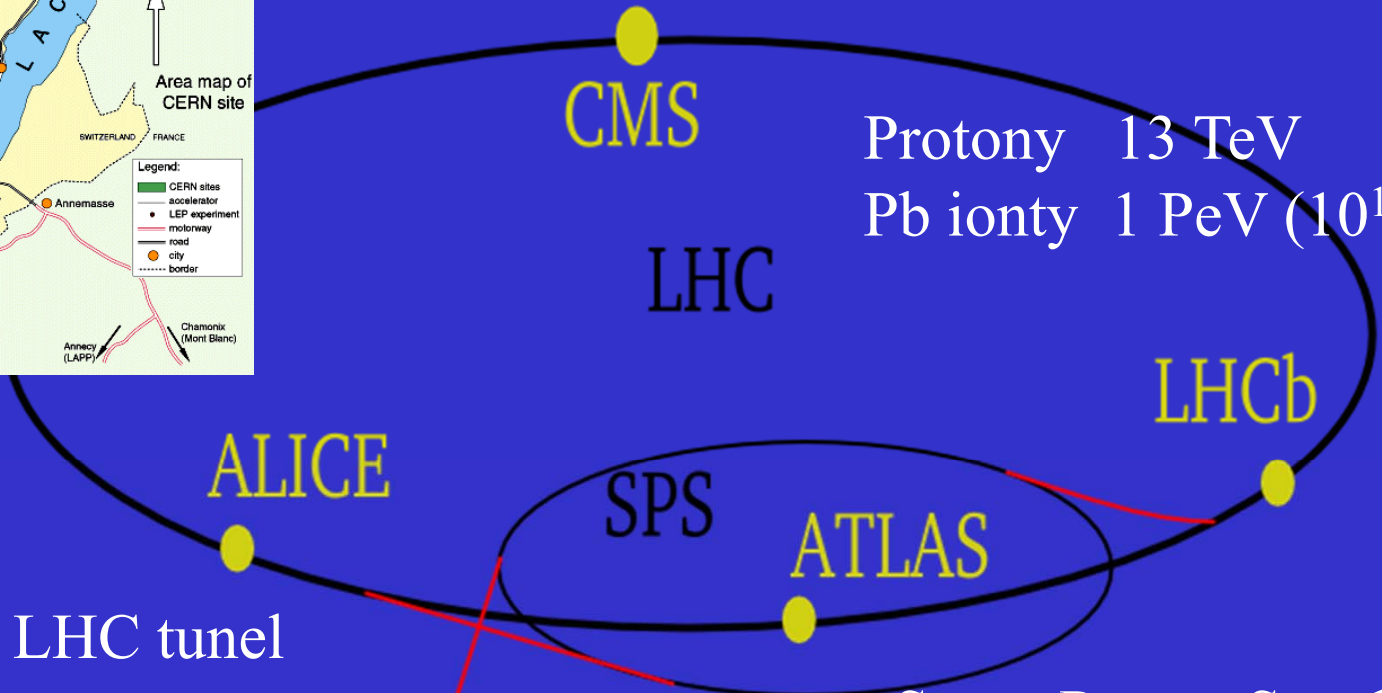
urychlovač pozitivních iontů (H^+ , D^+ , ...)
průchod potenciálovým rozdílem,
střídavé poz/neg nabíjení D elektrod,
kruhový pohyb v magnetickém poli,
energie do 100 MeV



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

← duté elektrody tvaru D

Large Hadron Collider



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

27 km LHC tunel

Super Proton Synchrotron

Lineární urychlovače
 (protony a ionty)



Proton Synchrotron

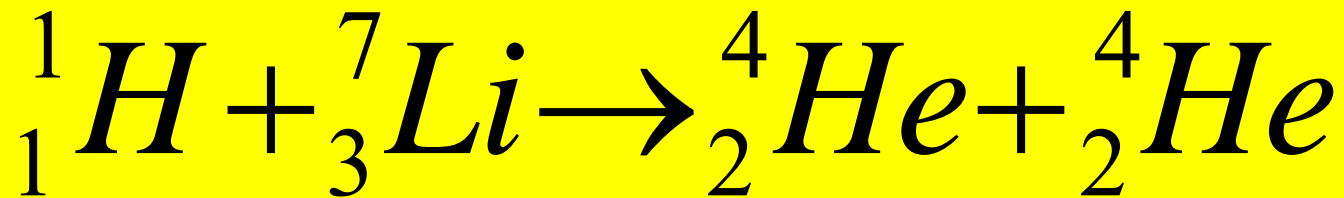
Štěpení jader

1932

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

Kaskádový urychlovač, protony 800 keV

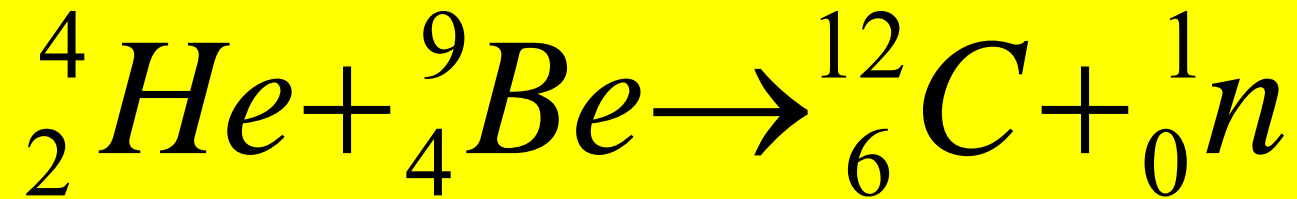
První štěpení stabilního jádra urychlenou částicí



1951 společně NP za fyziku

1932

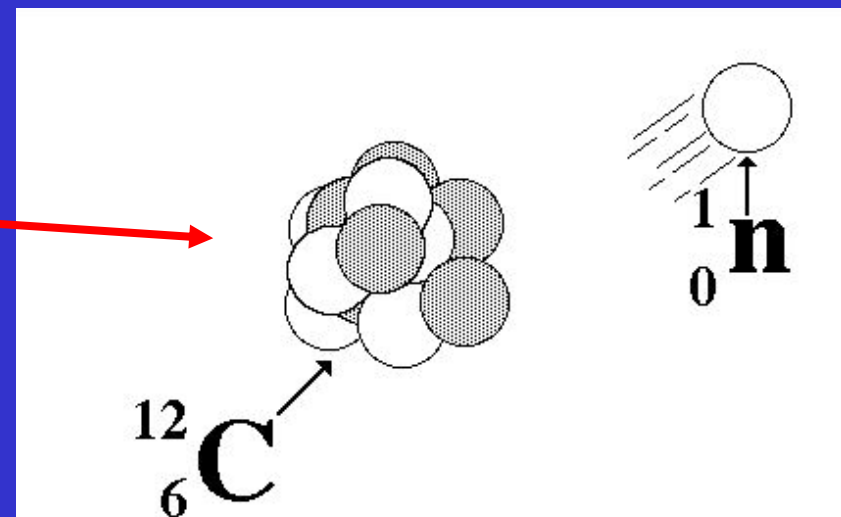
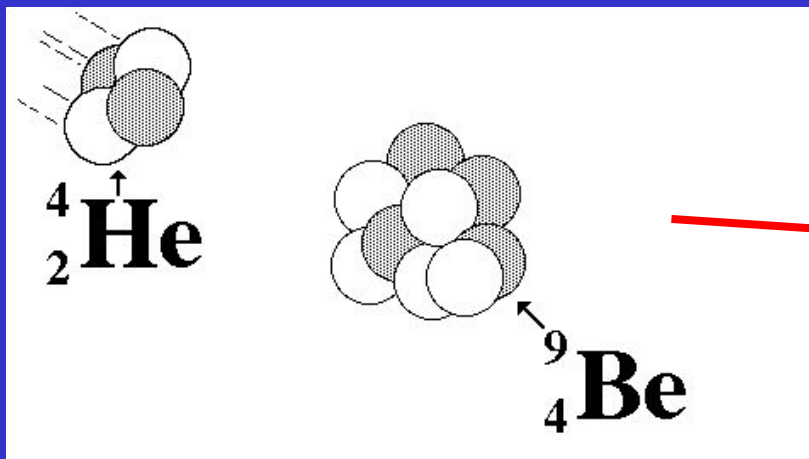
Objev neutronu



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

James Chadwick
(1891 - 1974)

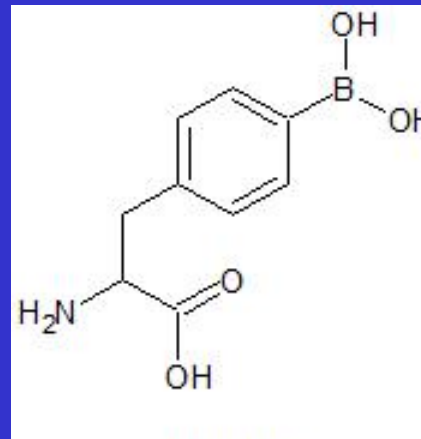
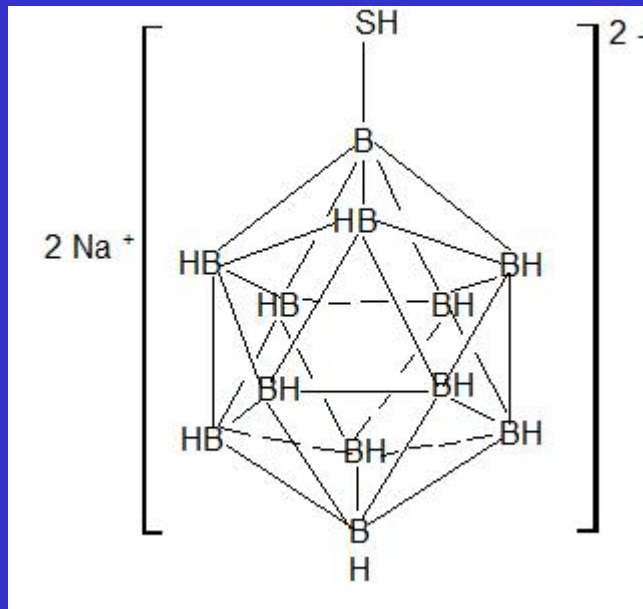
NP za fyziku 1935



BNCT = Boron Neutron Capture Therapy



Dolet v tkáni asi 12 μm – průměr buňky

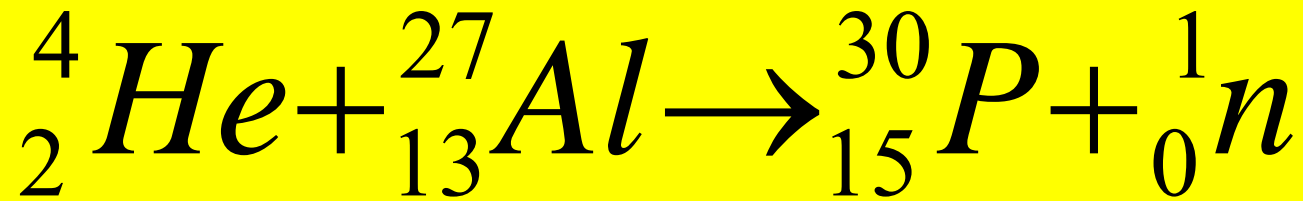


Akumulace v tumoru
(20 $\mu\text{g/g}$ tumoru)

1933

Umělá radioaktivita

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



Radioaktivní
isotop



První uměle připravený prvek - Tc

1937 Tc - první uměle připravený prvek

Předpovězen D. I. Medělejevem
Hledán chemiky v přírodě

Identifikován na Universitě v Palermu
Carlo Perrier a Emilio Segrè

Mo součástka z cyklotronu od E. O.
Lawrence
Lawrence Berkeley National Laboratory,
California

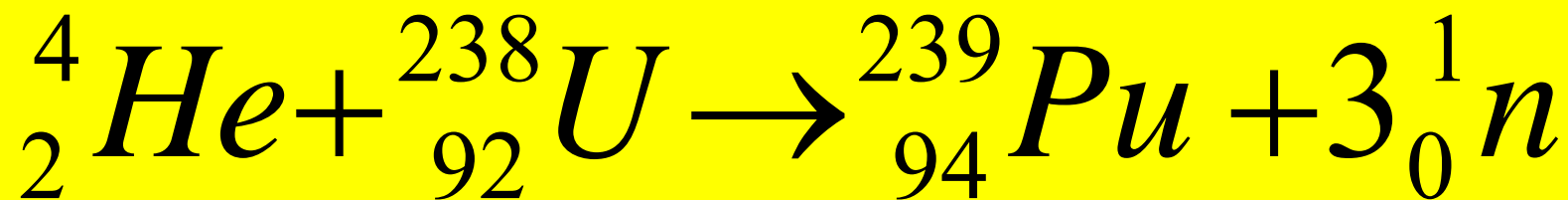


Emilio Gino Segrè
(1905 - 1989)
NP za fyziku 1959
antiproton

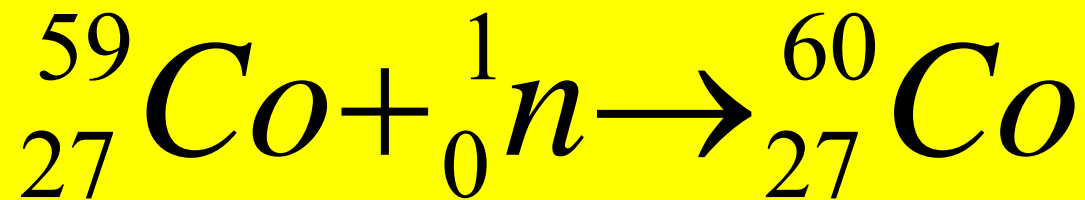


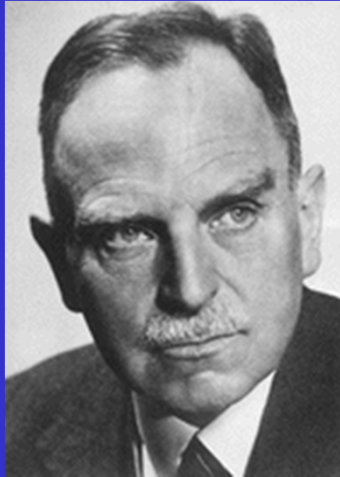
Transmutace

Cyklotron



Bombardování neutrony

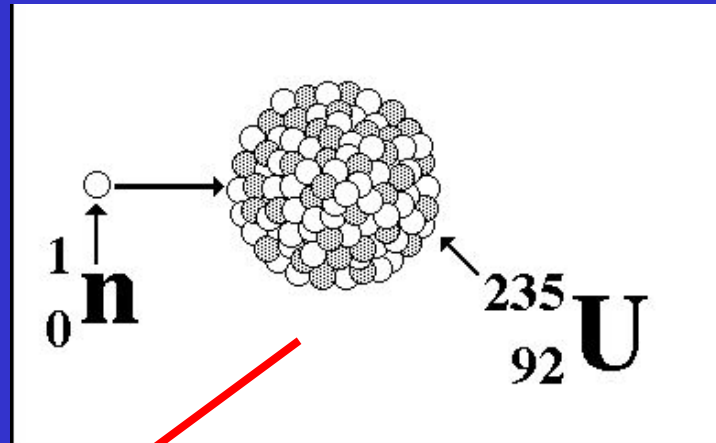




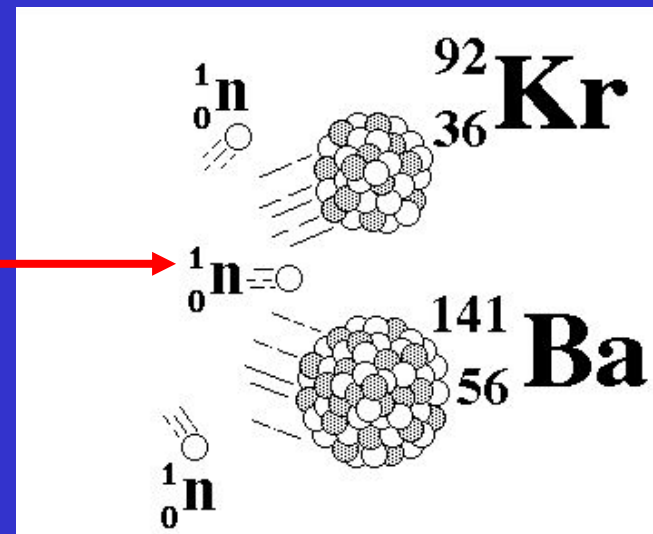
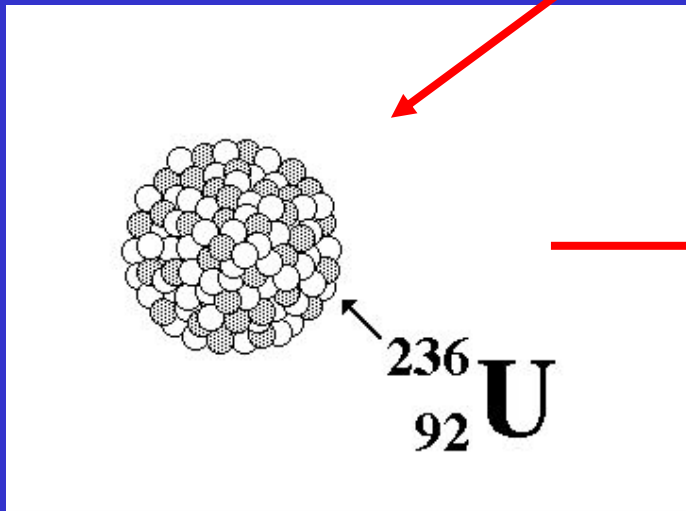
Otto Hahn
(1879-1968)

NP za fyziku 1944

Štěpení jader



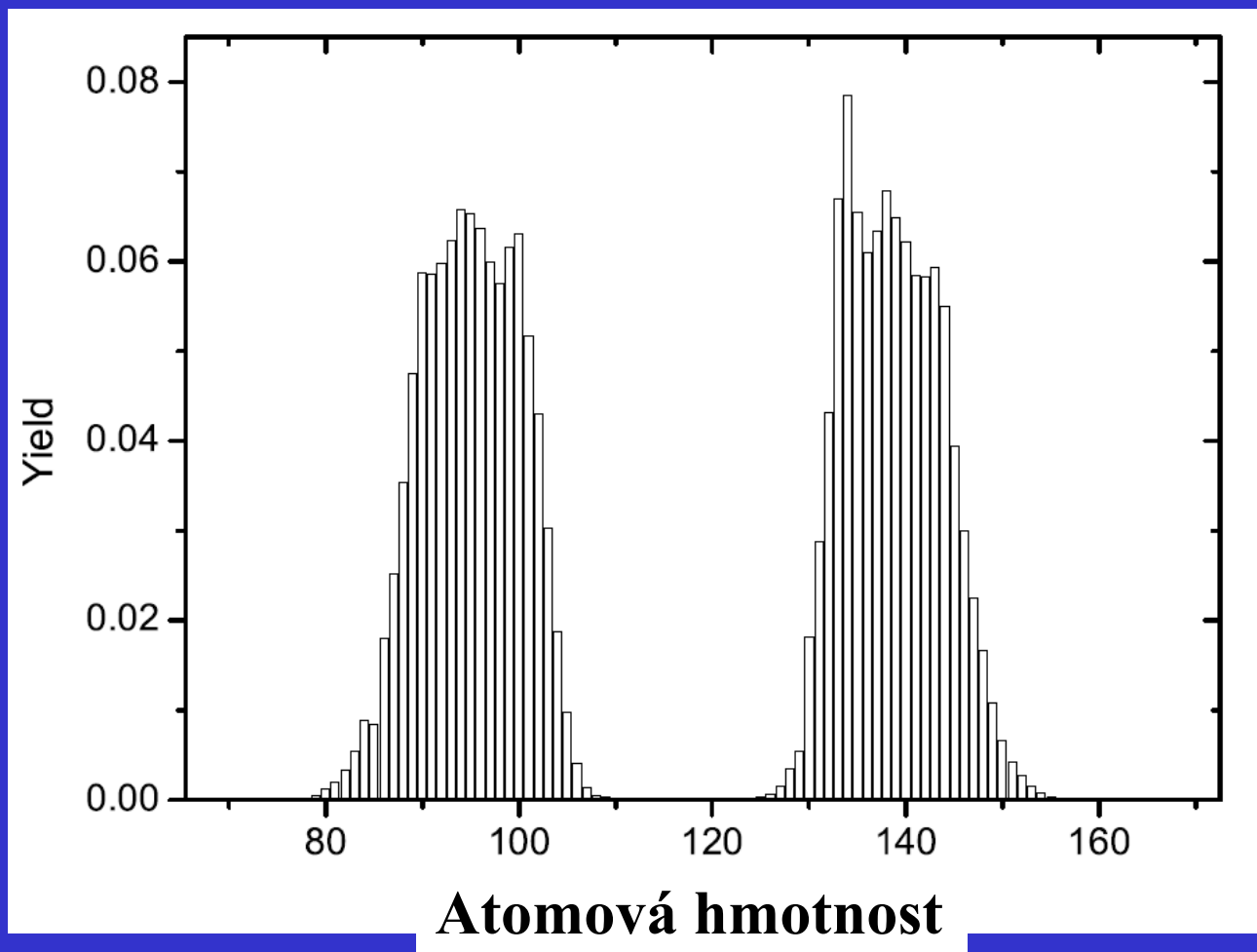
${}^{235}\text{U}$, 0.71%
Pomalé neutrony



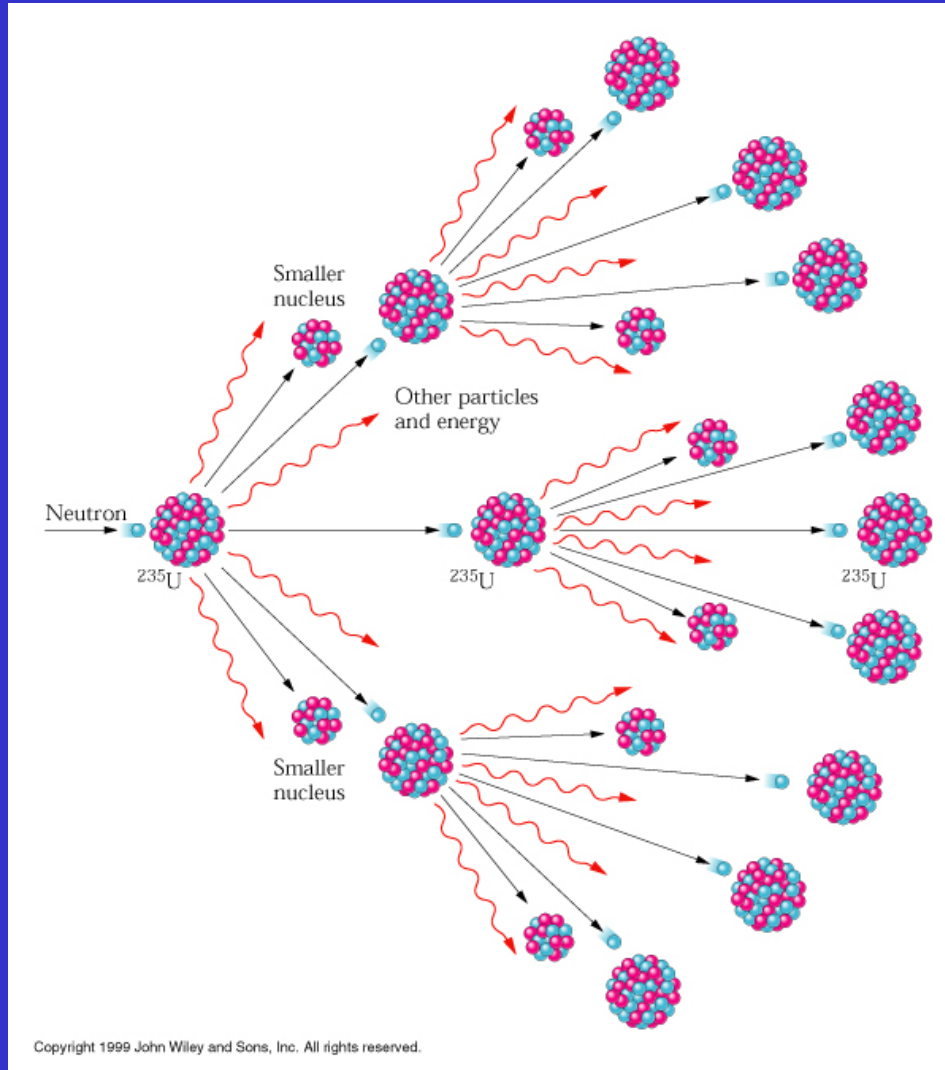
190 MeV

Štěpení ^{235}U

Rozložení výtěžku štěpných produktů pro ^{235}U .



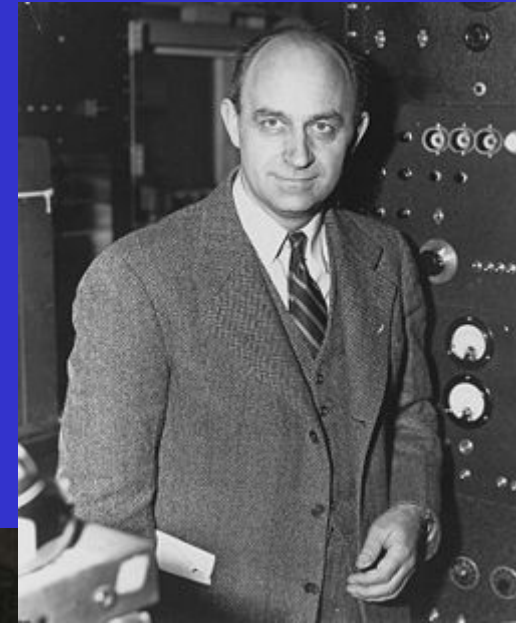
Řetězová reakce neřízená



Jaderný reaktor

1942 Chicago Pile - 1

První řízená štěpná reakce ^{235}U

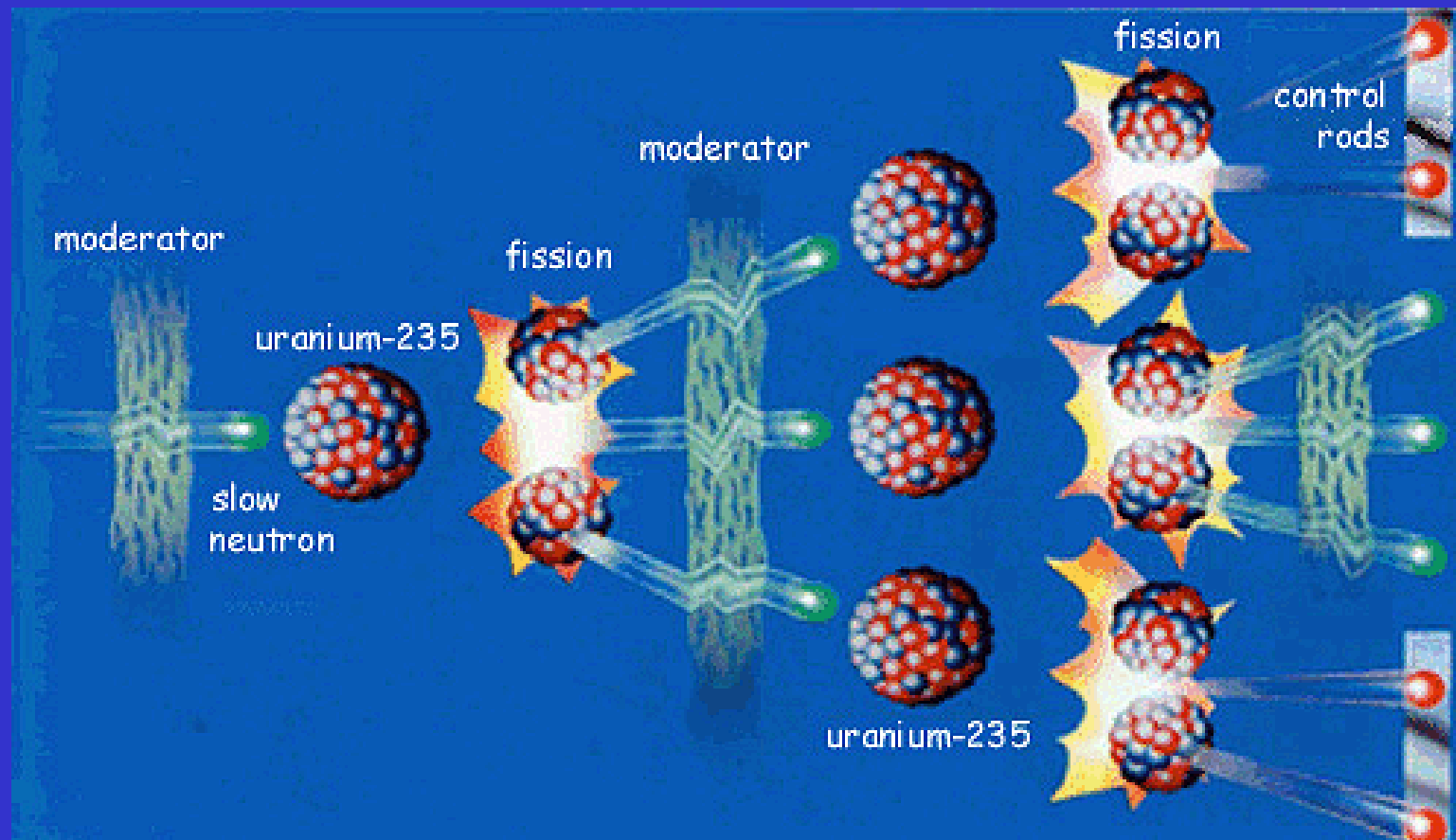


Enrico Fermi
(1901 - 1954)
NP za fyziku 1938



49

Řízená štěpná reakce ^{235}U



Moderátor = zpomalení neutronů – grafit

Řídící tyče = Cd dobře pohlcuje neutrony – zachycení n

Transurany

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

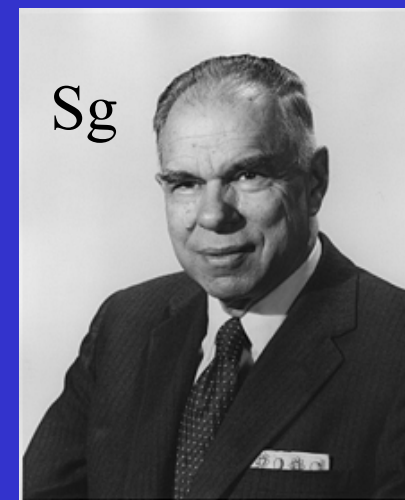
1940 První umělý transuran = $^{239}_{93}\text{Np}$

bombardování neutrony

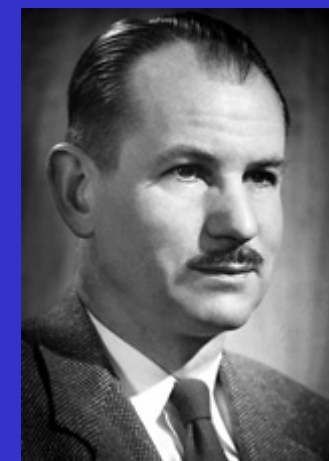


Adresa Glenna Seaborga
Sg, Lr, Lv, Bk, Cf, Am

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	Lawrencium



Glenn T. Seaborg
(1912 - 1999)



Sdílená NP
za chemii 1951

Edwin M. McMillan
(1907 - 1991) ⁶²

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
- 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

Rychlost rozpadu

$$-dN/dt = k N$$

$$dN/N = -k dt$$

Integrace

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

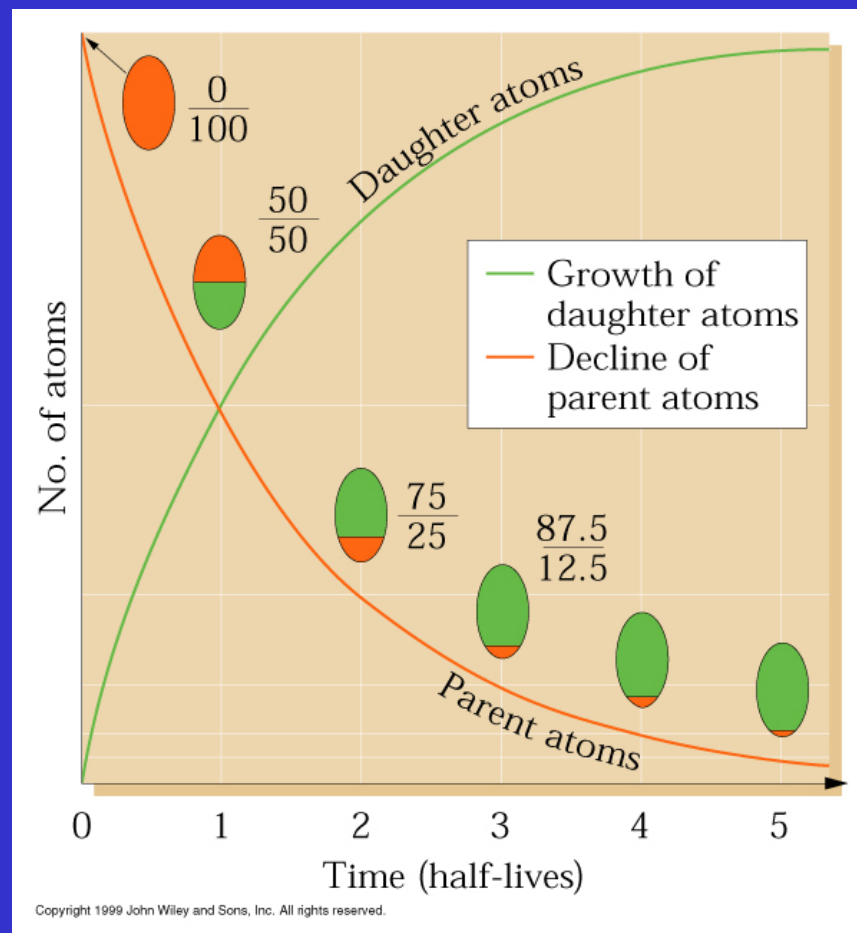
$$\ln(N/N_0) = -k t$$

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

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

N

Počet
jader



t, Čas

Poločas rozpadu, $t_{1/2}$

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

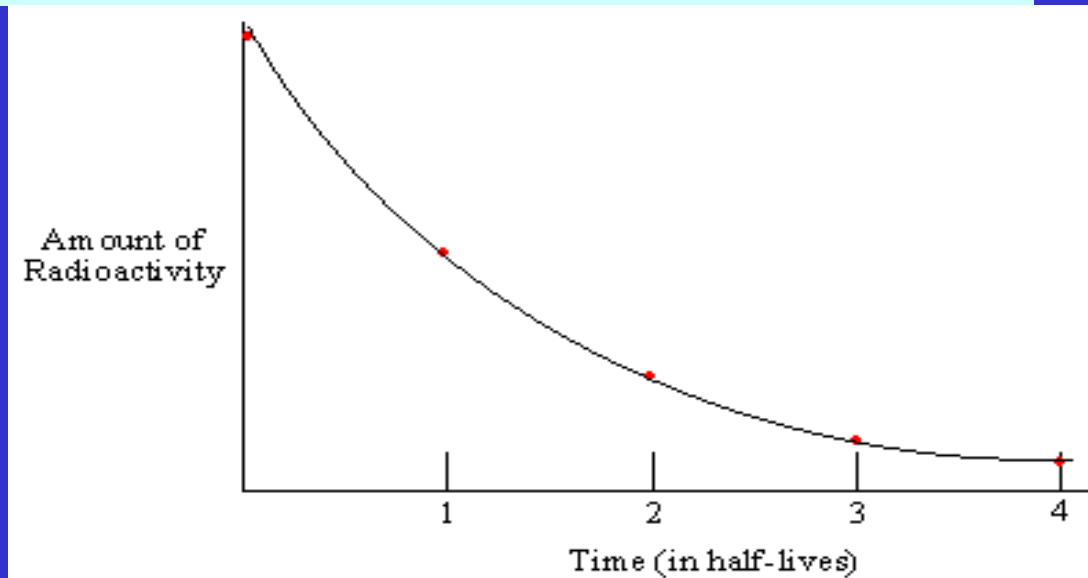
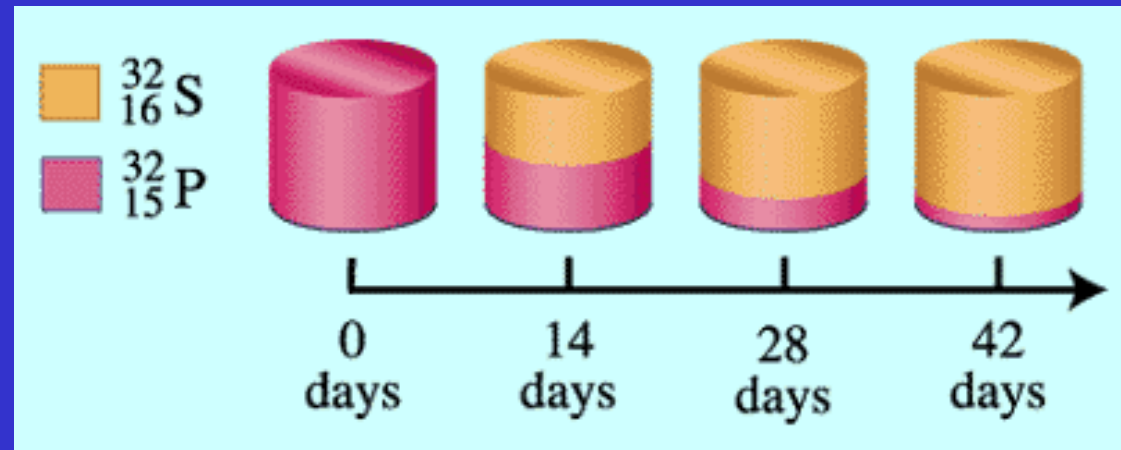
$$\ln(N/N_0) = -k t$$

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

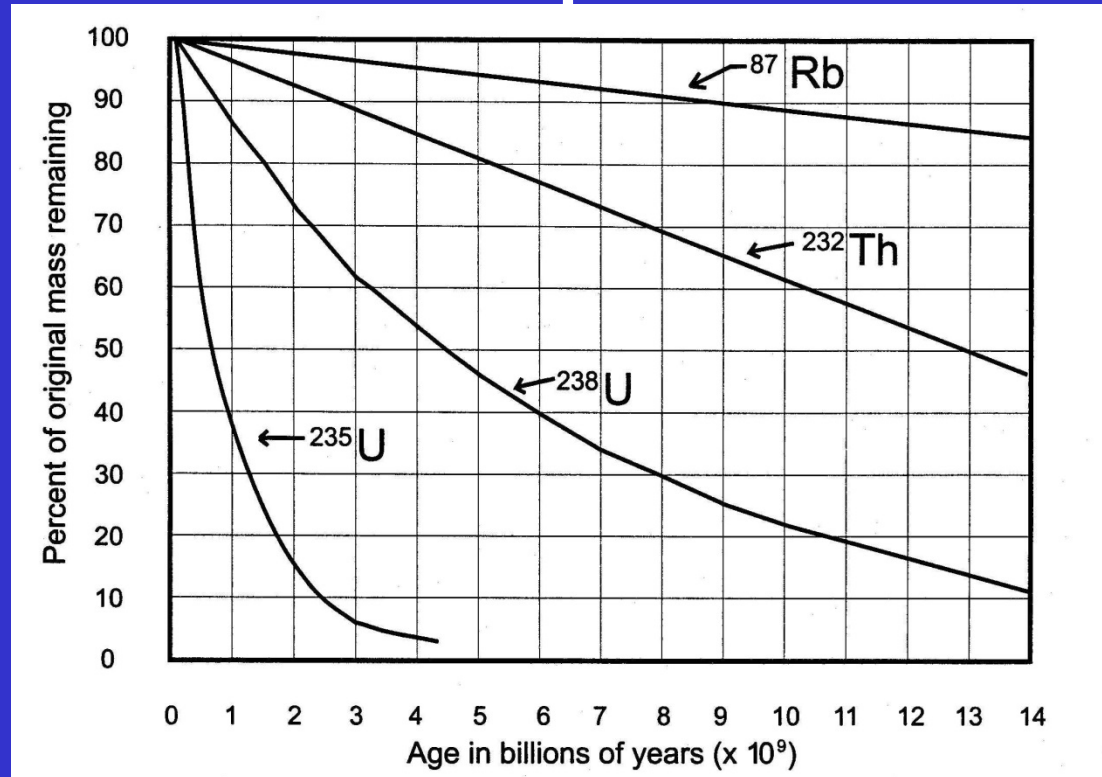
$$t_{1/2} = \ln(2) / k$$

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

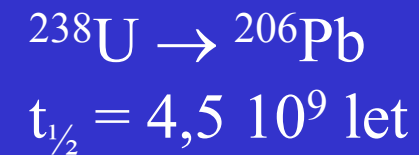
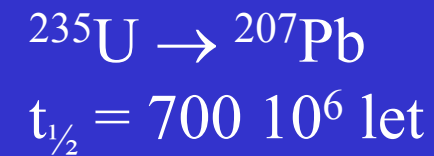
$$\ln(N/N_0) = -t \ln(2) / t_{1/2}$$



Poločas rozpadu - Radiometrické datování



Radiometrické
datování stáří
hornin v geologii a
paleontologii



Datování pomocí ^{14}C



Willard Libby
(1908 - 1980)

NP za chemii 1960

^{14}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 CO_2) a živých rostlinách (fotosyntéza) se ustaví rovnovážná koncentrace $^{14}\text{C} - N_0$ (známe)

Po smrti organismu koncentrace ^{14}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:

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

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

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