

Fyzika

- Úvodný kurz pre poslucháčov prvého ročníka bakalárskych programov v rámci odboru geológie
- 11. prednáška – atómová fyzika a rádioaktivita

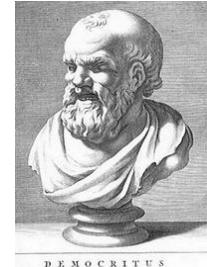


Obsah prednášky:

- stavba atómu: historický vývoj
- elementárne častice, jadrové sily
- jadrové reakcie, väzbová energia jadra
- rádioaktivita – rádioaktívne premeny, žiarenie
- zákon rádioaktívnej premeny, rozpadové rady
- využitie merania rádioaktivity v geológii

Atómová fyzika – historický vývoj (1/11)

6.stor. pred Kristom - Democritus, spolu s Leucippusom a Epicurusom (starí grécki filozofi spred Sokrata) - pohľad na štruktúru hmoty; kde prvý krát použili pojem atoma, (grécke slovo pre „nedeliteľný“),



2. stor. pred Kristom - text filozofickej školy Vaisheshika (India),

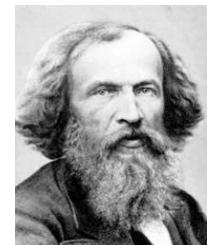
18. stor. – britský chemik a fyzik John Dalton – zaviedol pojem atóm pre základnú jednotku chemických prvkov,

19. stor. – viaceré dôležité objavy: atómy sú stabilné objekty; majú svoju vnútornú štruktúru ; boli odhadnuté ich rozmery,

1869 – periodický systém prvkov - Dmitriev Mendeleev (veľký krok)



1891 – zavedenie pojmu elektrón - G.J. Stoney, anglo-írsky fyzik, ako základnej častice pre elektrinu, ako prvý odhadol jeho elementárny náboj e , (avšak si mysel, že elektrón je pevne naviazaný na atóm a nemôže sa voľne pohybovať),

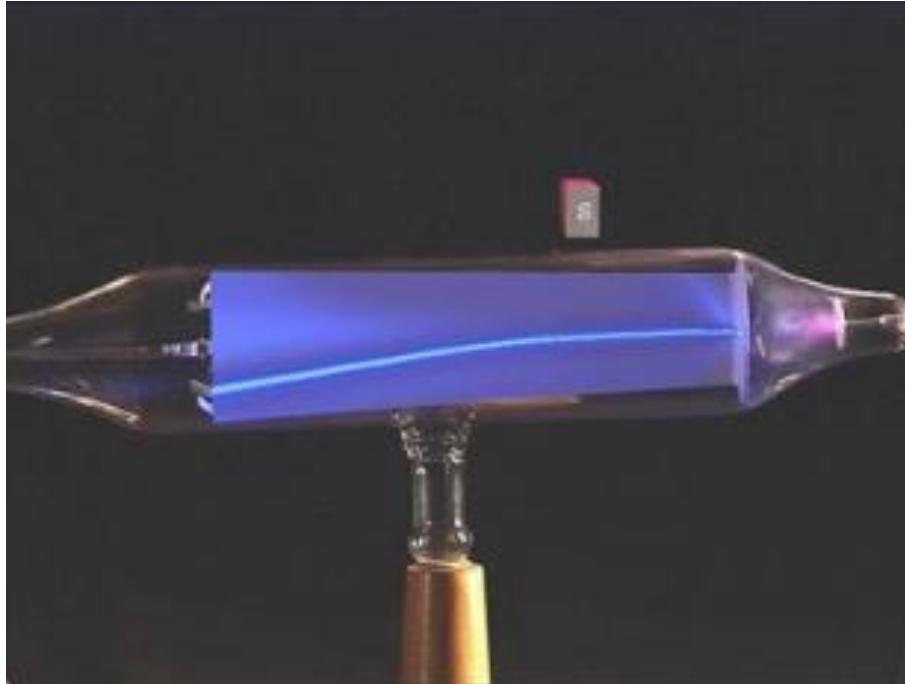
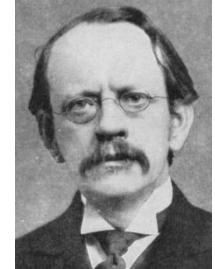


1897 – britský fyzik J.J. Thomson ukázal, že katódové lúče sú zložené z negatívne nabitých častic a taktiež ich nazval elektrónmi (kedže atómy sú elektricky neutrálne, musia obsahovať aj kladne nabité zložku).



Atómová fyzika – historický vývoj (2/11)

J. J. Thomsonov pokus z 1897:
(okrem iného aj odhadol hmotnosť elektrónu)



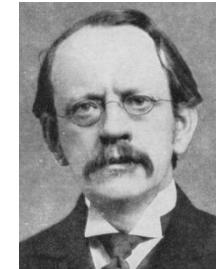
katódové lúče (volné elektróny) menia smer pôsobením permanentného magnetu

experiment:

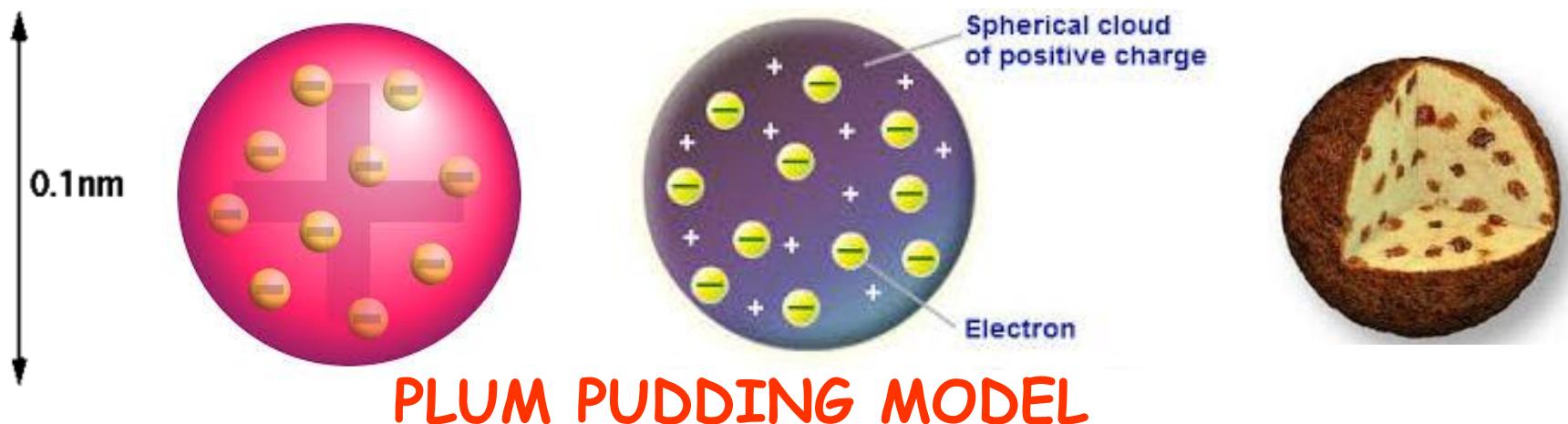
<https://www.youtube.com/watch?v=O9Goyscbazk>

Atómová fyzika – historický vývoj (3/11)

J. J. Thomsonov model atómu z 1904:
tzv. plum pudding model (pudingový)



Jeden z prvých modelov atómu – v elastickej guli sú rovnomerne rozmiestnené elektróny, okolo ktorých sa nachádza kladne nabitá „polievka“ – ako hrozienka v pudingu alebo koláči.



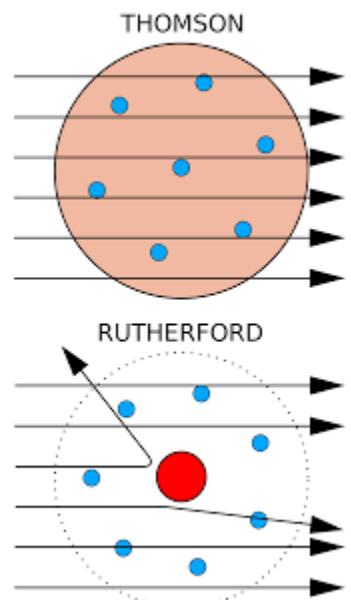
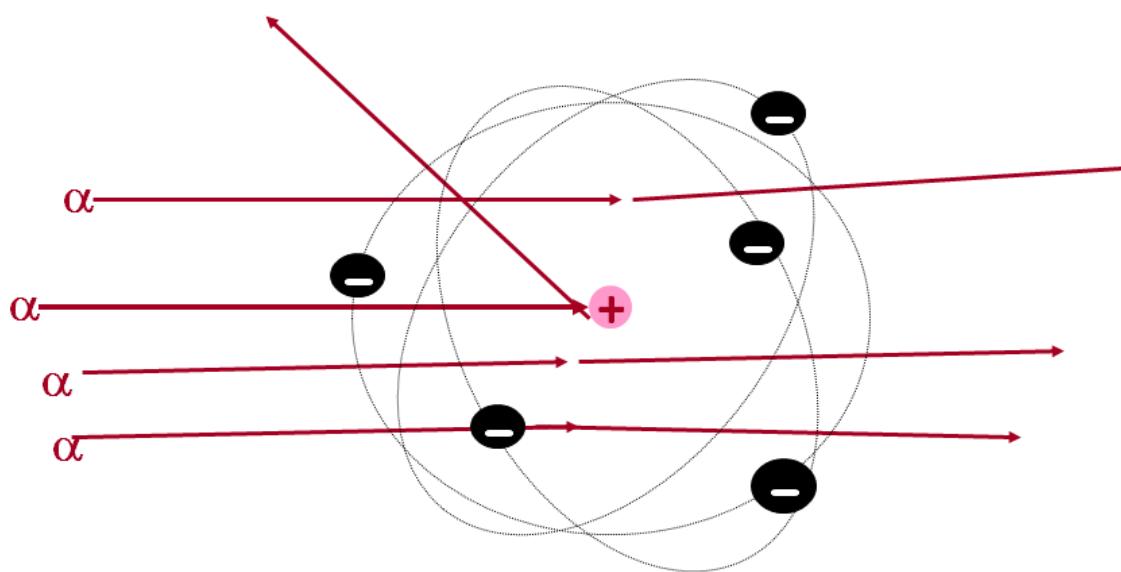
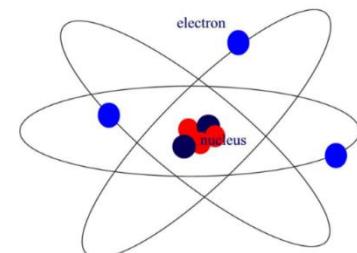
prvé odhady rozmeru atómu: na úrovni $0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$

Atómová fyzika – historický vývoj (4/11)

Model atómu od Ernesta Rutherforda z 1911: tzv. planetárny (nukleárny) model

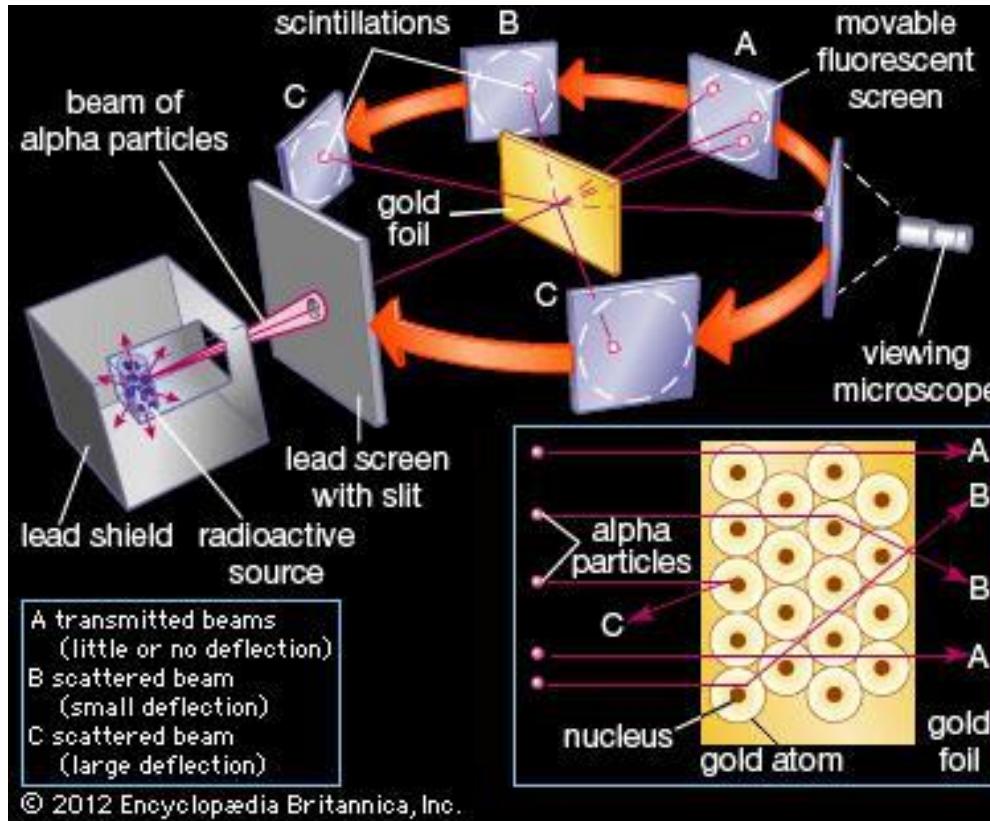


1911 Ernest Rutherford prezentoval známy **pokus so zlatou fóliou** (pokus realizovali jeho spolupracovníci Hans Geiger a Ernest Marsden), ktorú ostrelovali prúdom alfa-častíc, pričom niekoľko z nich sa odrazilo späť (tým vyvrátili Thomsonov model atómu). Rutherford interpretoval výsledok tohto pokusu tak, že atóm musí mať hmotu skoncentrovanú v jeho strede – **v jadre**.



Atómová fyzika – historický vývoj (5/11)

Model atómu od Ernesta Rutherforda z 1911:
tzv. planetárny (nukleárny) model



Rutherford zistil, že približne alfa čästice s násobkami 10,000 sú odrážané späť, a tak odhadol veľkosť jadra na cca 10^{-14} m.

experiment reconstruction:

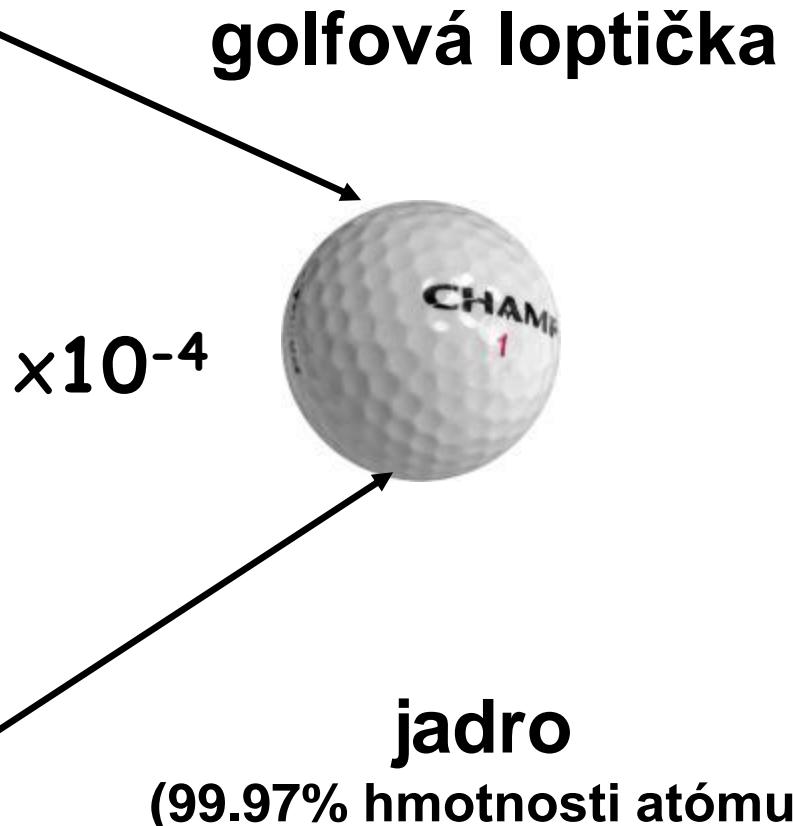
<https://www.youtube.com/watch?v=XBqHkraf8iE>

Atómová fyzika – historický vývoj (6/11)

štadión amerického futbalu

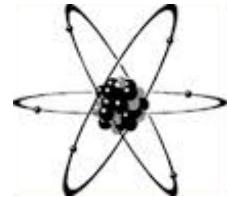


atóm



golfová loptička
 $\times 10^{-4}$
jadro
(99.97% hmotnosti atómu)

Atómová fyzika – historický vývoj (7/11)

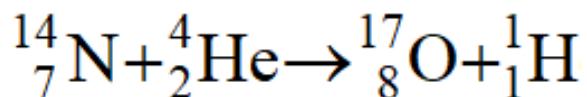
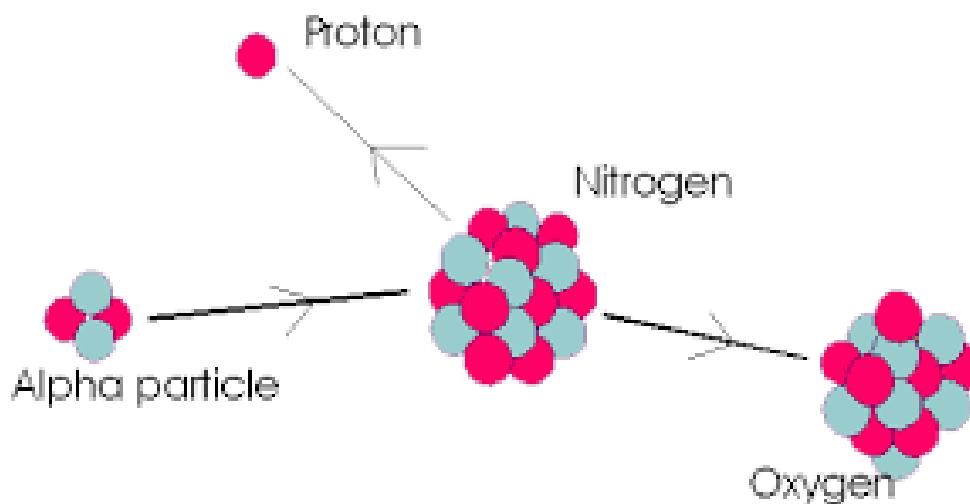


- rádioaktivita prvkov naznačovala, že jadro nie je jednoduché, ale má vnútornú štruktúru,
- 1904: Rutherford a Sody zistili, že rádioaktivita je spojená s premenou prvkov, začalo byť zrejmé, že rádioaktivita je vlastnosťou jadier,
- 1911: Rutherford zavádza pojem atómového jadra,
- 1919-1920: Rutherford zistil, že pri ostreľovaní jadier časticami a vznikajú častice ľahšie ako a nazval ich **PROTÓNY**,
- 1920: Rutherford vyslovil hypotézu, že v jadrách sú okrem protónov aj neutrálne častice a dal im názov **NEUTRÓNY** – dokázané boli neskôr angl. fyzikom Chadwickom v r. 1932,
- 1932: Heisenberg a Ivanenko vyslovili hypotézu, že jadrá sú tvorené protónmi a neutrónmi – dostali spoločný názov **NUKLEÓNY**.

Atómová fyzika – historický vývoj (8/11)

Protóny:

Začiatkom roku 1920 Rutherford a ďalší vykonali množstvo pokusov s transmutáciou (vznik iného atómu po ostreľovaní alfa časticami – jadrami hélia). Vo väčšine prípadov boli popri tom emitované vodíkové jadrá. Tieto museli teda hrať v stavbe atómov veľmi dôležitú úlohu (boli **kladne nabité**) – neskôr ich v tomto roku nazvali ako **protóny**.

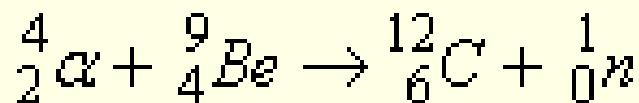
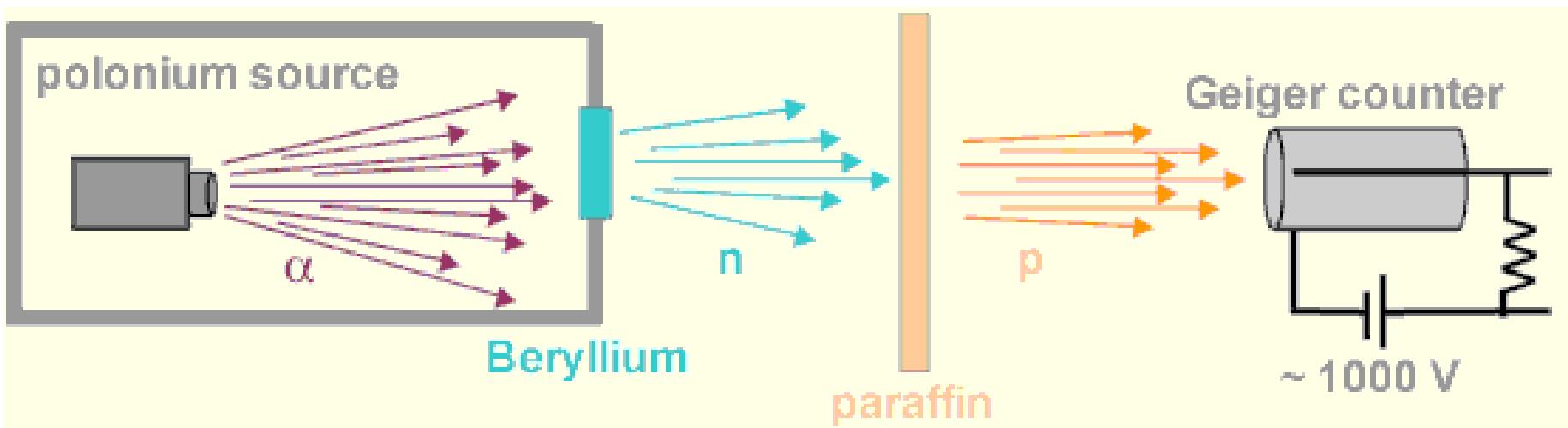


Atómová fyzika – historický vývoj (9/11)

Neutróny:

V roku 1920, Ernest Rutherford vyslovil tóriu, že v jadre sa musia nachádzať aj ďalšie častice, ale bez náboja (neutrálne). Vyplývalo to z nezrovnalosti medzi rovnosťou počtu elektrónov = protónov a celkovou atómovou hmotnosťou niektorých atómov.

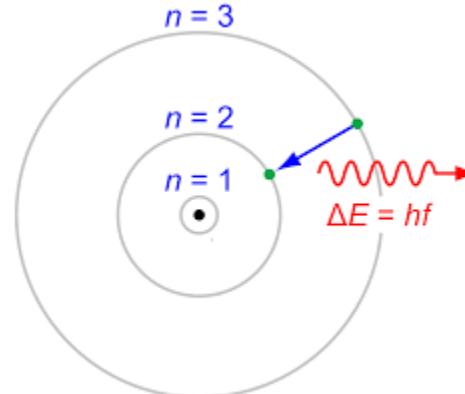
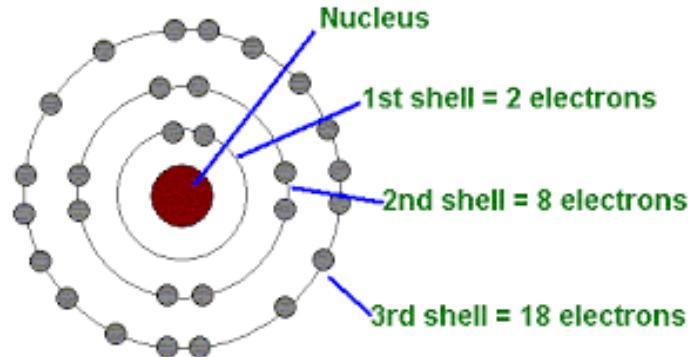
Experiment v 1930 ukázal, že berýlium, bombardované alfa časticami emituje prúd častíc s vysokou energiou. V roku 1932 **J. Chadwick** nazval túto časticu ako Rutherfordov neutrón.



Atómová fyzika – historický vývoj (10/11)

Dôležitý posun – Bohrov model atómu:

1913: Niels Bohr prezentoval model atómu (s kvantovými vlastnosťami). Tento model vvriešil hlavné protiklady, vyplývajúce z EM interpretácie Rutherfordovho modelu.

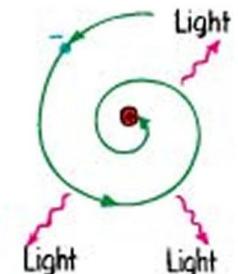


Základné vlastnosti Bohrovoho modelu:

1. Elektróny sa pohybujú po stacionárnych dráhach (v diskrétnych vzdialenosťach od jadra) bez straty energie.
2. Elektrón stráca alebo získava energiu po kvantoch a to iba pri prechode z jednej energetickej hladiny na inú.
3. Je presne určené, ktorá hladina môže obsahovať koľko elektrónov.
4. Spoločne s Rutherfordom vysvetlil atóm vodíka, bol však použitý aj na ďalšie.

A čo bol vlastné problém pri EM interpretácii...?

Že Rutherfordov model by vydržal asi tak 10^{-12} sekundy...
(a elektrón by bol pritiahanutý kladne nabitém jadrom...)

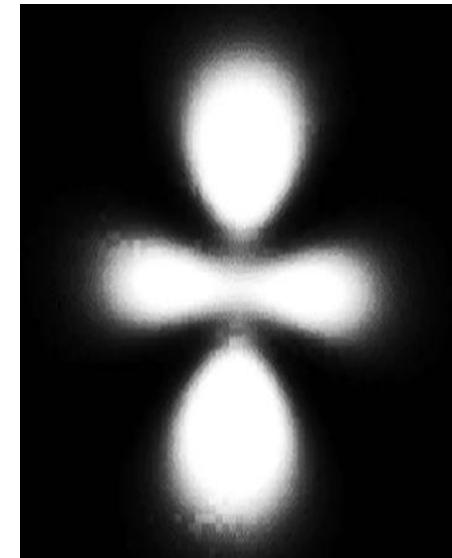
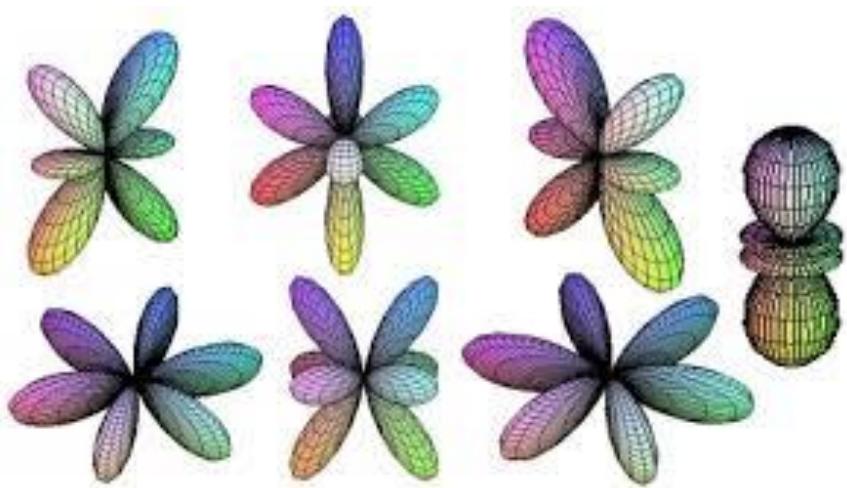


Atómová fyzika – historický vývoj (11/11)

Kvantovo-mechanický model atómu:

- 1925-1926 – nemecký fyzik [W. Heisenberg](#) a rakúsky fyzik [E. Schrödinger](#) založili novú fyzikálnu teóriu – tzv. kvantovú mechaniku:

- existujú mikroobjekty, ktoré majú aj časticové aj vlnové vlastnosti a ich stav popisuje tzv. vlnová funkcia $\psi(x,y,z,t)$,
- kvantovo-mechanický model: je to vlastne matematický pravdepodobnostný model

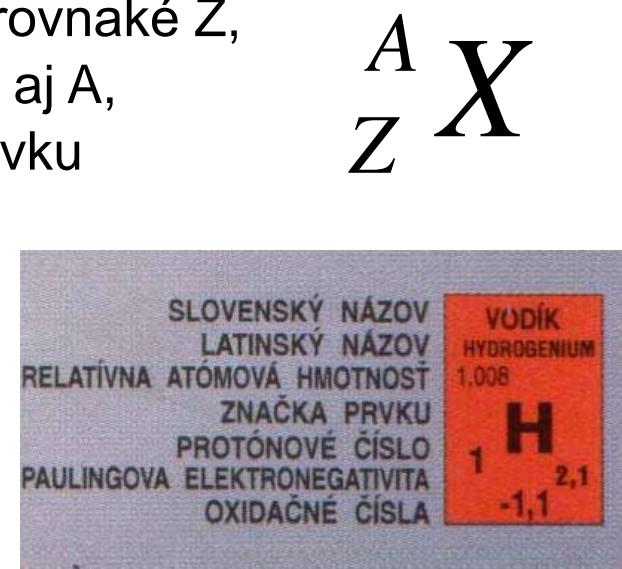
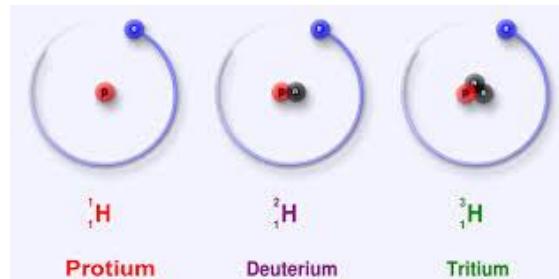


Atóm - základné charakteristiky:

| | atóm | jadro | protón | neutrón | elektrón |
|----------|---------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| priemer | 10^{-10} m | 10^{-15} m | - | - | - |
| hmotnosť | 10^{-27} kg | $\approx 10^{-27}$ kg | $\approx 1,673 \cdot 10^{-27}$ kg | $\approx 1,675 \cdot 10^{-27}$ kg | $\approx 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg |
| náboj | 0 | $+ Z \cdot e$ | $+1,602 \cdot 10^{-19}$ C | 0 | $-1,602 \cdot 10^{-19}$ C |

Počet protónov v jadre udáva **protónové číslo** Z, počet neutrónov v jadre udáva **neutrónové číslo** N a počet nukleónov v jadre je **nukleónové číslo** A.

- chemický prvok – látka, ktorej všetky atómy majú rovnaké Z,
- nuklid – látka, ktorej všetky atómy majú rovnaké Z aj A,
- izotopy – rôzne nuklidy toho istého chemického prvku s rovnakým protónovým, ale rozdielnym neutrónovým číslom (napr. ^{12}C a ^{14}C),



Jadrové sily:

- 1) odpudivé elektrické sily medzi + protónmi (vychádza z elektromagn. interakcie)
 - sú slabé,
- 2) príťažlivé (gravitačné) sily medzi nukleónmi:
 - sú krátkodosahové (do vzdialenosťi 10^{-15} m),
 - sú nezávislé od elektrického náboja, t.j. sú rovnaké medzi p-p, n-n aj p-n,
 - sú nasýtené – nukleón pôsobí iba na istý počet najbližších nukleónov, nie na všetky,
- 3) silná interakcia - drží pohromadé nukleóny, pôsobí iba v jadre atómov – na relatívne malé vzdialenosťi (femtometre, 10^{-15} m)
 - 1932: Heisenberg – hypotéza, že sily sú výmenné = nukleóny si vymieňajú isté častice (menšie ako nukleóny),
 - 1960: Začala sa „nabúravat“ teória o tom, že nukleóny sú elementárne častice (nedeliteľné). A začala sa éra kvarkov... a zavedenie tzv. silnej interakcie.

Poznámka: Silové interakcie definované v súčasnej fyzike

1. Gravitačná interakcia: pôsobenie hmotných telies navzájom
2. Elektro-magnetická interakcia: pôsobenie elektricky nabitých a zmagnetizovaných častíc (telies)
3. Silná interakcia: vzájomné pôsobenie medzi protónmi a neutrónmi (väčšia mierka) a kvarky a gluóny (menšia mierka)
4. Slabá interakcia: sily, ktorými pôsobia ľahké elementárne čästice (leptóny) medzi sebou, má krátke dosah

Ktorá z týchto silových interakcií je najdominantnejšia?

| | | | |
|-----------------|-------------------|-----------------|----------------------|
| silná inter. | el-mag. inter. | slabá inter. | gravitačná inter. |
| 1 | 10^{-4} | 10^{-13} | 10^{-40} |

Jadrové reakcie:

- **jadrová premena** = proces zmeny v jadre, ktorý nastáva samovolne alebo vonkajším zásahom,
- **jadrová reakcia** = jadrová premena vyvolaná interakciou jadier navzájom alebo s inými mikročasticami (napr. ostreľovaním jadra urýchlenými mikročasticami),
 - platia zákony zachovania:

zákon zachovania hmotnosti a energie,

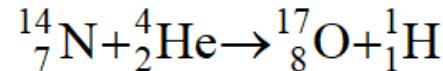
zákon zachovania elektrického náboja,

zákon zachovania počtu nukleónov,

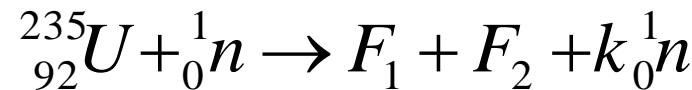
zákon zachovania hybnosti,

- delenie jadrových reakcii podľa priebehu:

transmutácia = Z a A nového vzniknutého jadra sa iba málo líši od terčového jadra



štiepenie = terčové jadro sa rozštiepi na 2 jadrá, ktorých Z a A sa výrazne odlišujú od terčového



trieštenie = terčové jadro sa rozpadne na veľa častíc a nové jadro, ktoré sa podstatne líši od terčového



Väzbová energia jadra:

- pri vzniku jadra pôsobia medzi nukleónmi príťažlivé sily, ktoré konajú prácu, preto sa pri zmene energie sústavy nukleónov zmenší,
- zmenšeniu energie ΔE zodpovedá podľa Einsteinovho vztahu zmenšenie hmotnosti Δm :
$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$
, kde c je rýchlosť svetla (bolo dokázané presnými meraniami),
- presné merania dokázali, že existuje **hmotnostný úbytok jadra** B_j , t.j. že pokojová hmotnosť jadra m_j je vždy menšia ako súčet pokojových hmotností nukleónov:

$$B_j = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n) - m_j$$

- z toho vyplýva, že **pri vzniku jadra z jednotlivých nukleónov sa uvolňuje energia** → celková energia E_j , ktorá sa uvoľní pri vytváraní jadra, sa nazýva **väzbová energia jadra**:

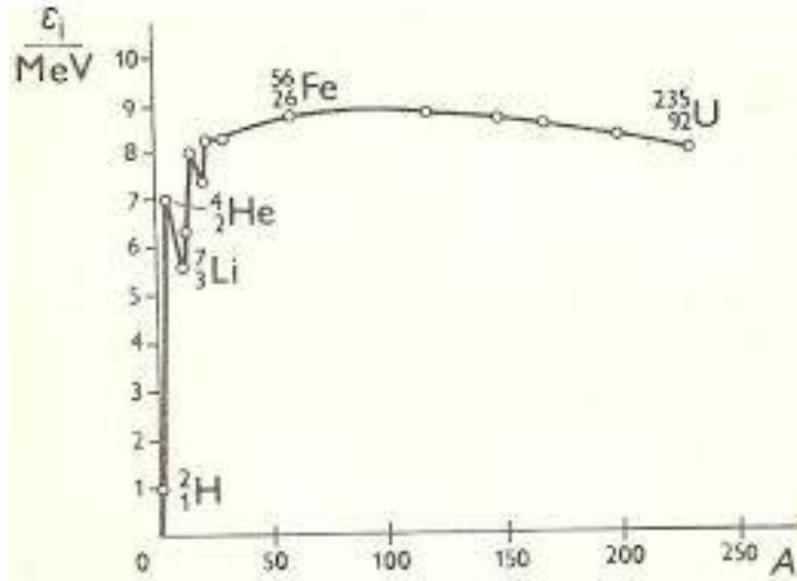
$$E_j = B_j \cdot c^2$$

- Platí aj opačne, že túto energiu treba dodať na rozloženie jadra na jednotlivé nukleóny
- veľkosť väzbovej energie: od 2,23 MeV u najľahšieho deuterónu do 1640 MeV pre najťažšie stabilné jadro $^{83}_{\Lambda}Bi^{209}$ (väzbová energia pre H je 13,6 MeV)
- **väzbová energia pripadajúca na jeden nukleón** ε_j

$$\varepsilon_j = E_j / A$$

Pozn.: **Elektrónvolt** (značka eV) je fyzikálna jednotka energie. Jeden elektrónvolt je rovný kinetickej energii, ktorú získa jeden neviazaný elektrón pri prechode medzi dvomi bodmi s rozdielom elektrostatického potenciálu rovným jednému voltu, vo vákuu.
 $1 \text{ eV} = 1,602 \ 176 \ 53 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ (veľmi malé množstvo energie).

Väzbová energia jadra:



Prirovnanie veľkosti väzobnej energie k uvoľnenému teplu:

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}, 1 \text{ J} = 2,39 \cdot 10^{-4} \text{ kcal}, 1 \text{ MeV} = 3,83 \cdot 10^{-17} \text{ kcal}$$

atómová hmotnostná konšanta $m_u = 1,6605402 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ a každý nukleón v jadre má hmotnosť približne rovnakú ako je m_u

$$1 \text{ MeV/nukleón} = \frac{3,83 \cdot 10^{-17} \text{ kcal}}{1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} = 2,31 \cdot 10^{10} \text{ kcal/kg}$$

väzobná energia 8 MeV/nukleón – čo je typická hodnota $= 1,85 \cdot 10^{11} \text{ kcal/kg}$

pre porovnanie: výparné teplo vody $= 540 \text{ kcal/kg}$,

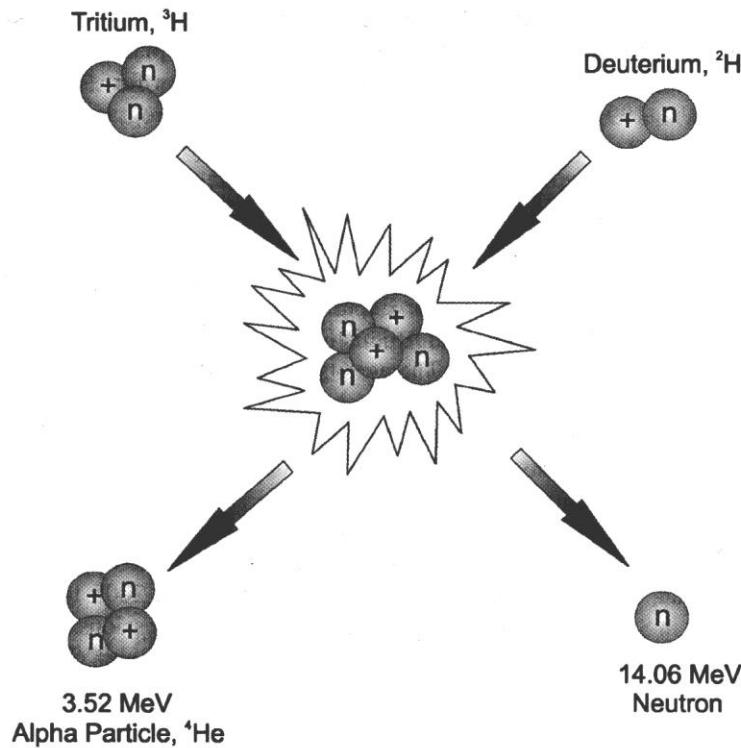
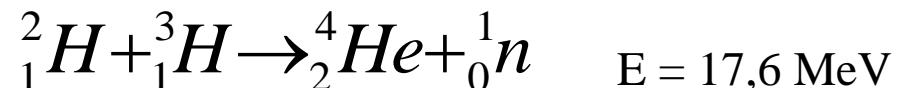
teplota zo spaľovania benzínu $= 1,13 \cdot 10^4 \text{ kcal/kg}$.

Jadrové premeny ako zdroj energie:

- jadrová energia = energia uvoľnená pri jadrovej reakcii, čo nastáva vtedy, ak vznikajúce jadrá majú väčšie väzbové energie ako jadrá vstupujúce do reakcie,

Spôsoby uvoľnenia jadrovej energie:

1. Syntéza ľahkých jadier (fussion) = jadrová reakcia, pri ktorej sa spoja jadrá s malým A, pričom vznikne jadro s väčším A.



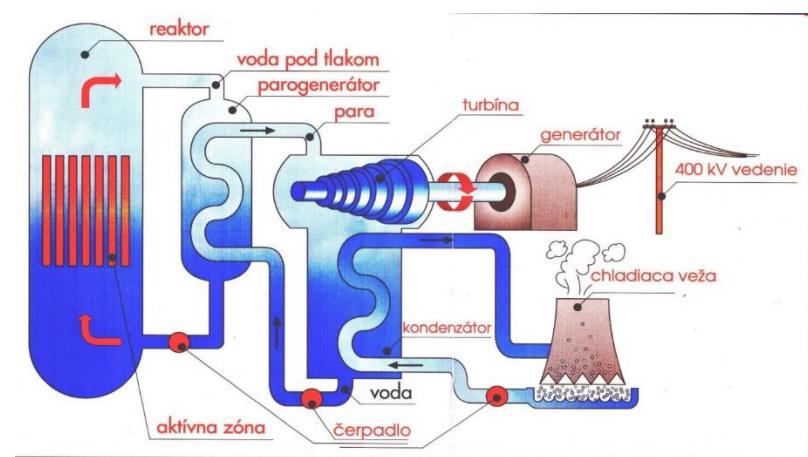
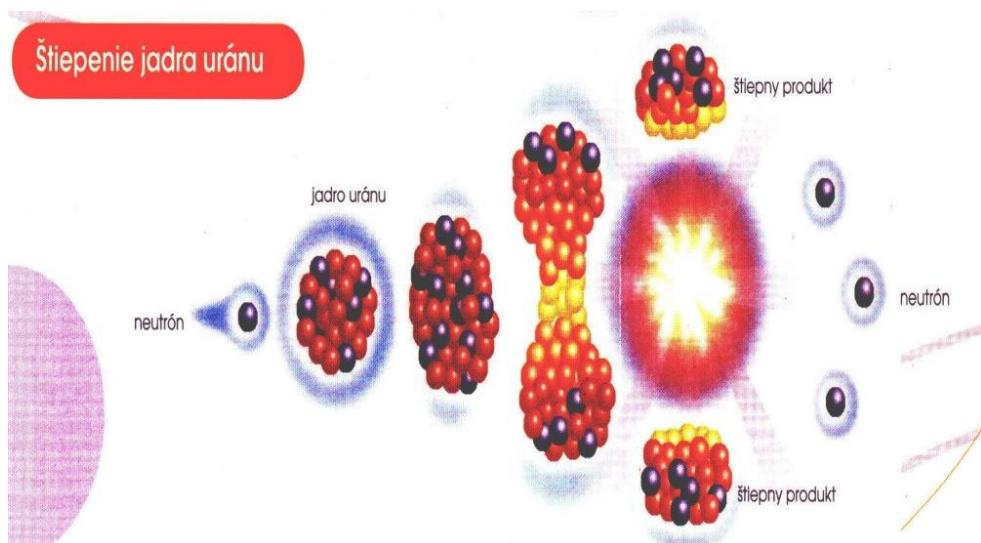
- energia na prekonanie odpudivých elektrostatických síl jadier pri priblížení na vzdialenosť 10^{-15} m sa dodá zvýšením teploty na 10^7 K a viac = **termojadrová reakcia** (zdroj energie hviezd)
- neriadená = vodíková bomba
- riadená – perspektívny zdroj energie (ešte nerealizovaná v praxi)

Jadrové premeny ako zdroj energie:

2. štiepenie ľažkých jadier (jadrový rozpad, fission) = jadrová reakcia, pri ktorej sa jadro s veľkým A premení na 2 stredne ľažké jadrá (štiepne produkty – väčšinou rádioaktívne).



- z jadra uránu sa uvoľní asi 200 MeV,
- vznikajúce neutróny môžu vyvolať ďalšie štiepenie = **ret'azová štiepna reakcia**
- riadená ret'azová štiepna reakcia prebieha v jadrovom reaktore jadrovej elektrárne; neriadená v jadrovej (atómovej) bombe



Rádioaktivita:

Rádioaktivita = proces, pri ktorom nestabilné atómové jadro samovoľne podlieha premene (rozpadu), ktorá je sprevádzaná vysielaním (emisiou) jadrových častíc a/alebo elektromagnetického žiarenia do okolia.

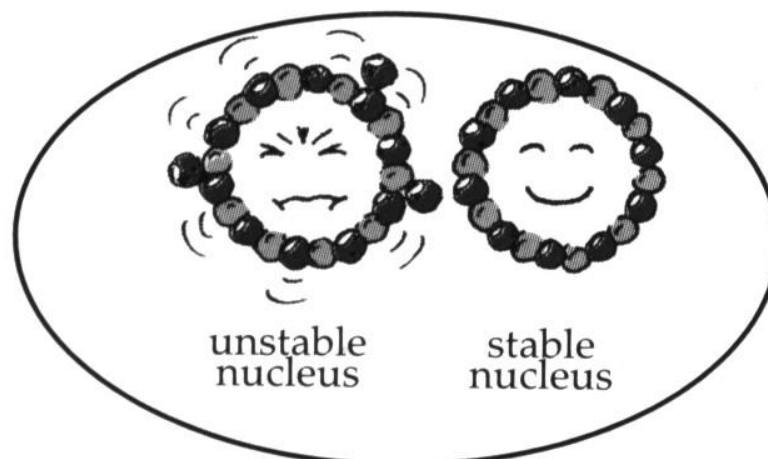
Prirodzená (prírodná) rádioaktivita = ak sa príslušné nestabilné rádioaktívne izotopy chemických prvkov vyskytujú v prírode,

- 1896 – objavil ju H. Becquerel,
- intenzívne ju skúmali manželia Mária Skłodowská-Curie a Pierre Curie.

Umelá rádioaktivita = ak rádioaktívne jadra vznikajú umelou cestou pri jadrových reakciach

- 1934 – objavili ju manželia Joliot-Curie.

Rádioaktívne (jadrové) žiarenie = tok jadrových častíc (korpuskulárne, časticové) a/alebo tok elektromagnetického žiarenia uvoľnených pri jadrových premenách.

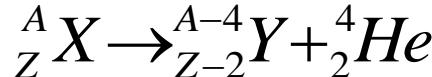


Rádioaktívne (jadrové) premeny:

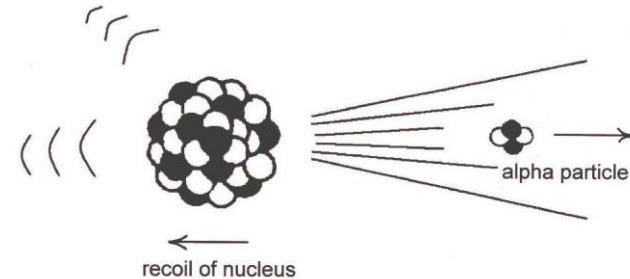
Jadrové premeny – vznikajú v dôsledku vnútornej nestability jadier atómov alebo pôsobením externého žiarenia na atómy hmoty.

Typy jadrových premení:

1. premena (rozpad, emisia) **alfa** (α)

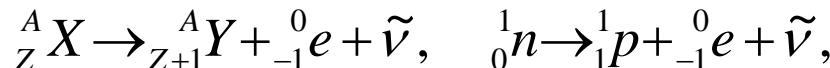


žiarenie sú alfa čästice (héliové jadrá)



2. premena (rozpad, emisia) **beta** (β)

žiarenie sú emitované elektróny plus antineutrína

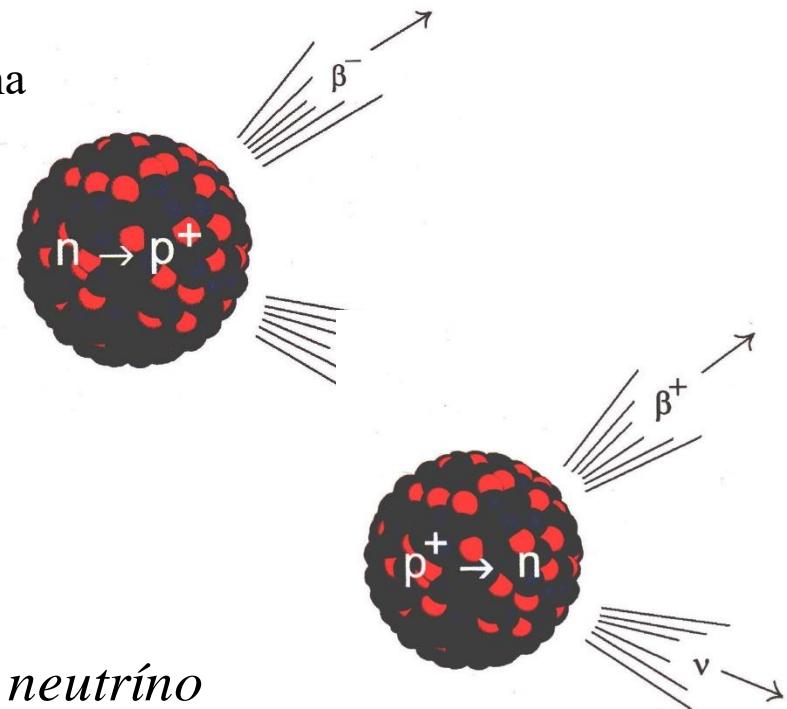


kde $\tilde{\nu}$ je antineutríno

- premena β^+

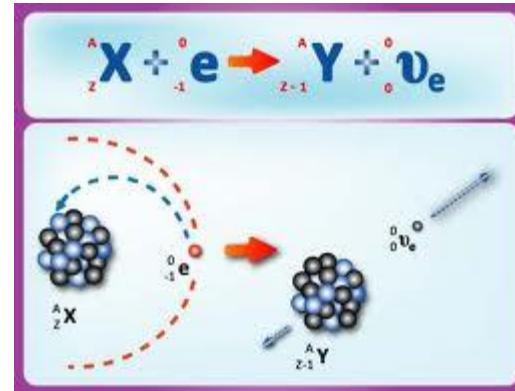
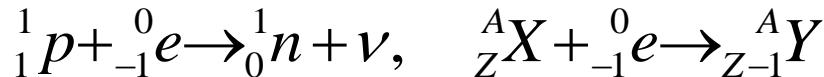


kde ${}^0_1 e$ je pozitrón(anti-elektrón) a ν je neutríno

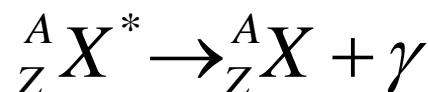


Rádioaktívne (jadrové) premeny:

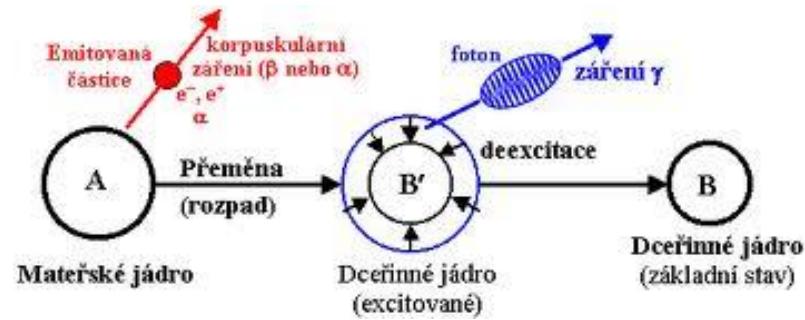
3. K-záchyt elektrónu



4. **izomérny prechod** = je to rozpad izomérneho stavu, t.j. vzbudeného stavu s dlhou dobou života u jadier niektorých nuklidov
5. **štiepenie jadier** = je to rozštiepenie jadra na dve časti s nerovnakou hmotnosťou, pričom dochádza k uvoľneniu neutrónov alebo iných častíc
6. **premena gama (γ)** – môže sprevádzat' ostatné premeny



kde X je jadro v nižšom energetickom stave ako X^*



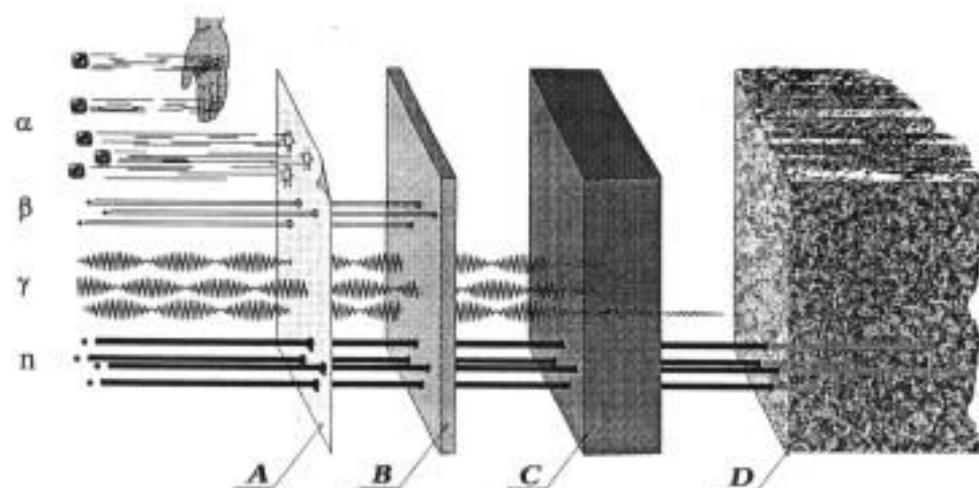
Rádioaktívne (jadrové) žiarenie:

Rádioaktívne (jadrové) žiarenie = prúd (tok) nabitých častíc, neutrónov alebo kvánt gama žiarenia, ktoré doprevádzajú premeny rádionuklidov.



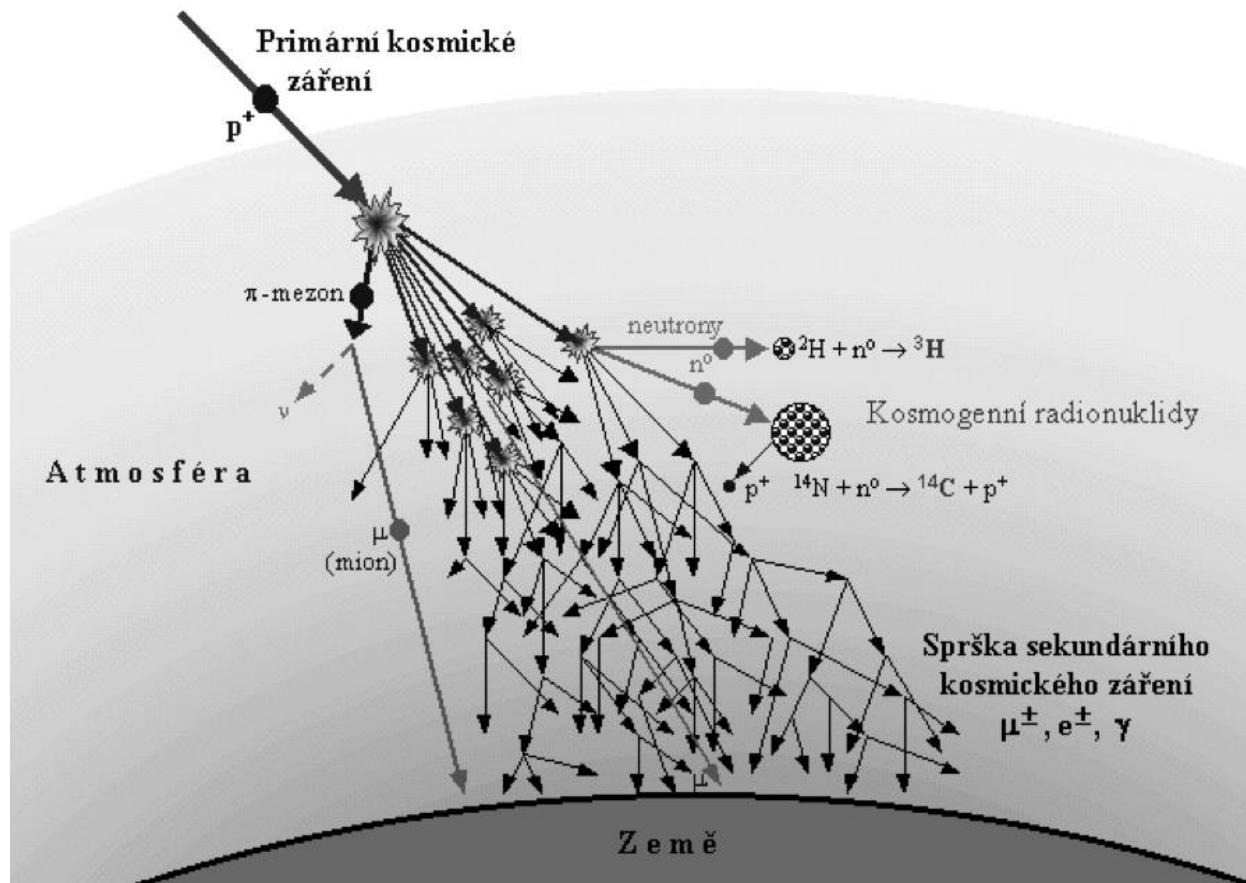
Druhy jadrového žiarenia:

1. **žiarenie alfa (α)** (1899, Rutherford) – časticové žiarenie tvorené kladnými jadrami hélia
- veľká hmotnosť, veľké rozmery, veľký kladný náboj ($2+$), silná ionizácia okolia, malý dolet
2. **žiarenie beta (β)** (1899, Rutherford) – časticové žiarenie tvorené bud' elektrónmi e^- (β^-) alebo pozitrónmi e^+ (β^+)
- malá hmotnosť, malé rozmery, jednotkový – alebo + náboj, slabšia ionizácia prostredia, až rýchlosť svetla, väčší dolet
3. **žiarenie gama (γ)** (1900, Villard) – elektromagnetické žiarenie, bez náboja, rýchlosť svetla, slabá ionizácia prostredia, veľký dolet a dobrá priechodnosť hmotou



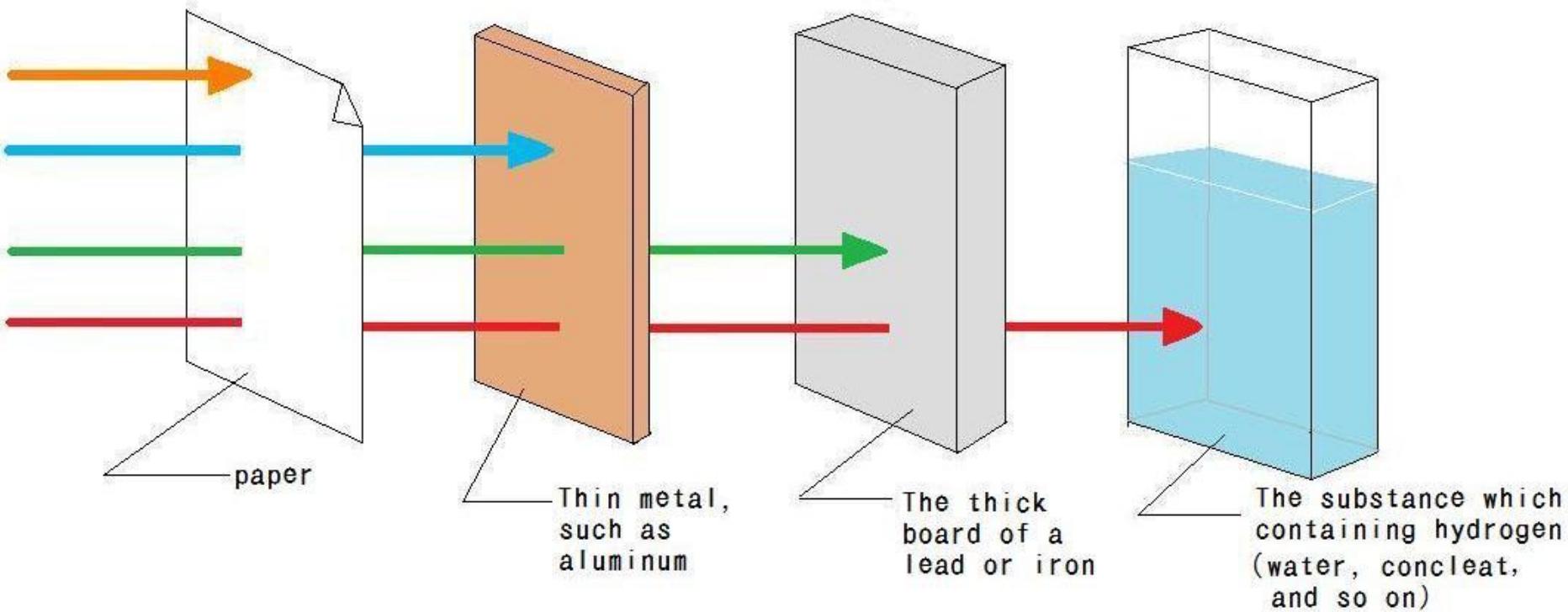
Rádioaktívne (jadrové) žiarenie:

4. žiarenie neutrónové (1932, Chadwick) – časticové žiarenie tvorené neutrálnymi neutrónmi - väčšia hmotnosť ako u β , malé rozmery, bez náboja, energetické vybudenie (excitácia) prostredia, široký interval rýchlosí a energií, veľký dolet a dobrá priechodnosť hmotou
5. žiarenie kozmické – prúd nabitych častíc (α , p), ktoré podmieňujú pri prechode zemskou atmosférou vznik sekundárneho žiarenia rôzneho druhu.

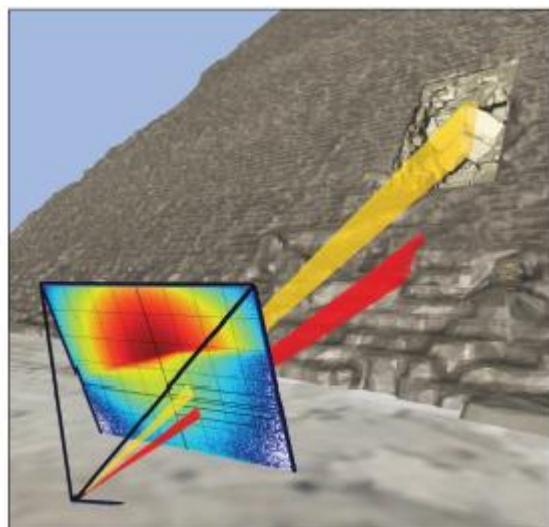
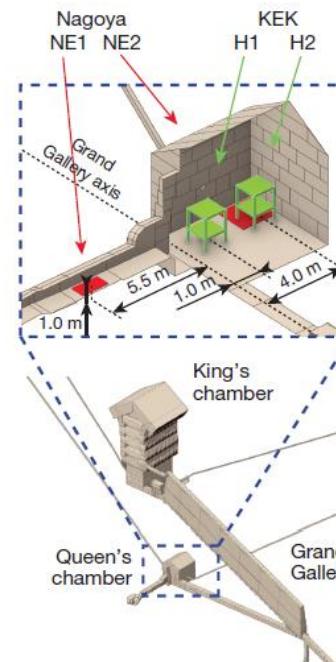


Prienik rôznych druhov rádioaktívneho žiarenia:

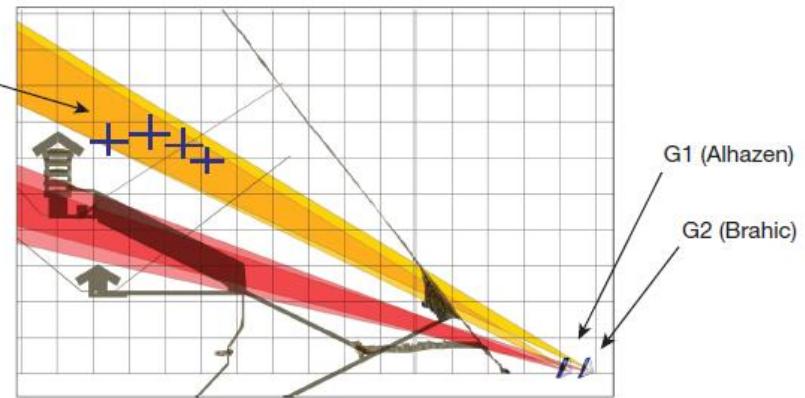
- Orange arrow: Alpha rays
- Blue arrow: Beta rays
- Green arrow: Gamma rays and X-ray
- Red arrow: Neutron radiation



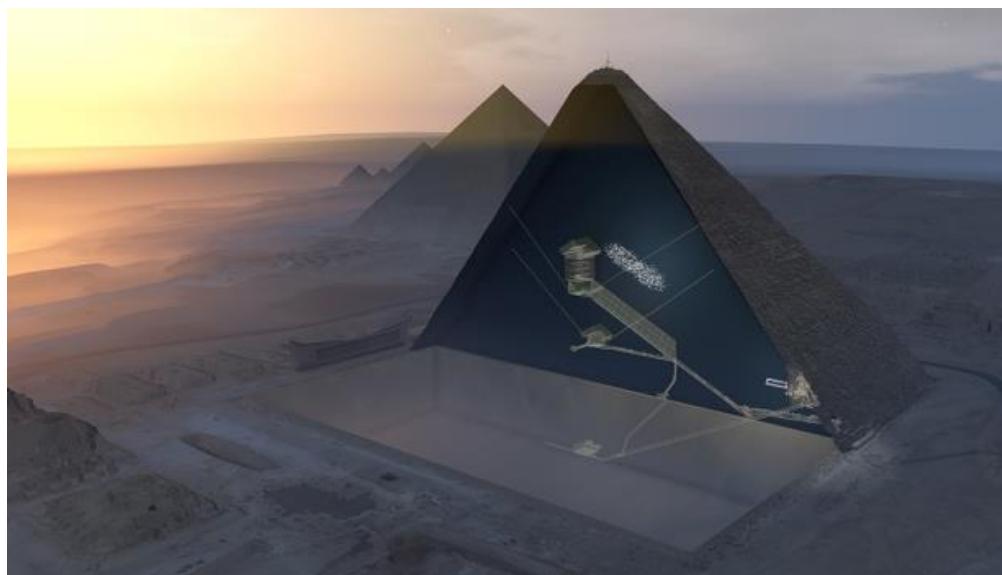
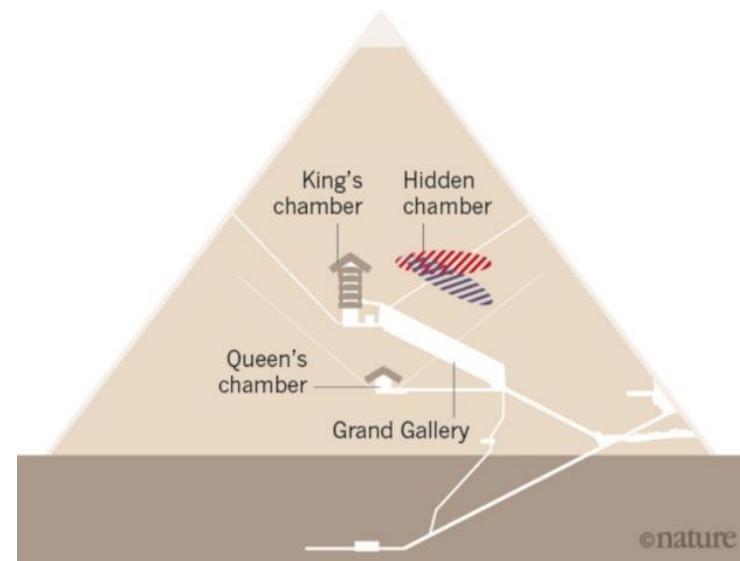
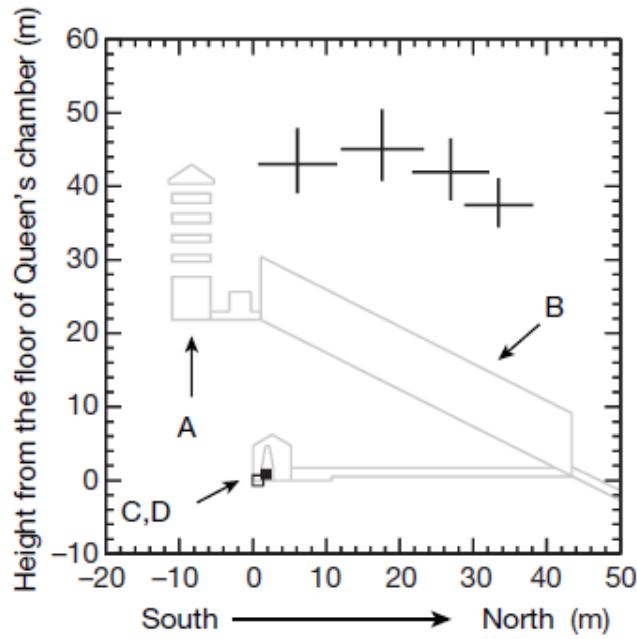
Zaujímavosť – objavenie novej dutiny (tzv. Big Void) v Cheopsovej pyramíde pomocou registrácie kozmického žiarenia (muóny).



Triangulation positions from Nagoya University



Zaujímavosť – objavenie novej dutiny (tzv. Big Void) v Cheopsovej pyramíde pomocou registrácie kozmického žiarenia (muóny).



Zákon rádioaktívneho rozpadu (premeny):

- rádioaktívna premena je náhodný proces = nedá sa určiť, ktoré jadro sa v danom okamihu premení, ale možno určiť, koľko jadier sa premení v istom časovom intervale
- 1900 – E. Rutherford a F. Soddy formulovali **ZÁKON RÁADIOAKTÍVNEJ PREMENY (ROZPADU)**

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

kde $N(t)$ je počet nepremenených jadier v čase t ,

N_0 je počet nepremenených jadier na začiatku v čase $t = 0$,

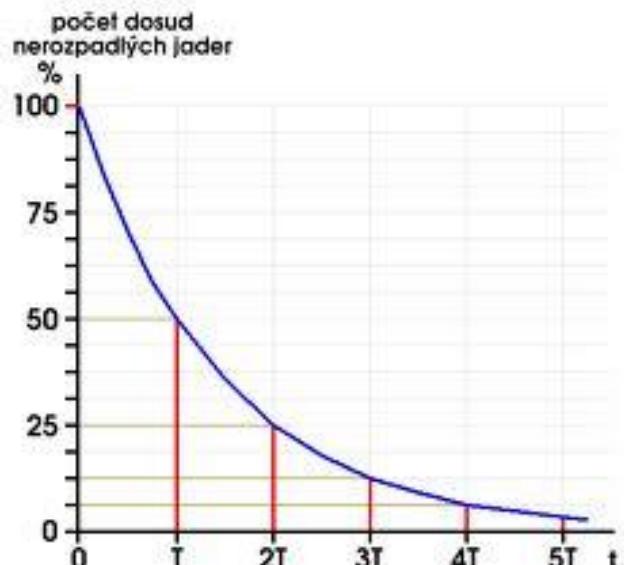
λ je tzv. prenová (rozpadová) konštantá konkrétneho nuklidu.

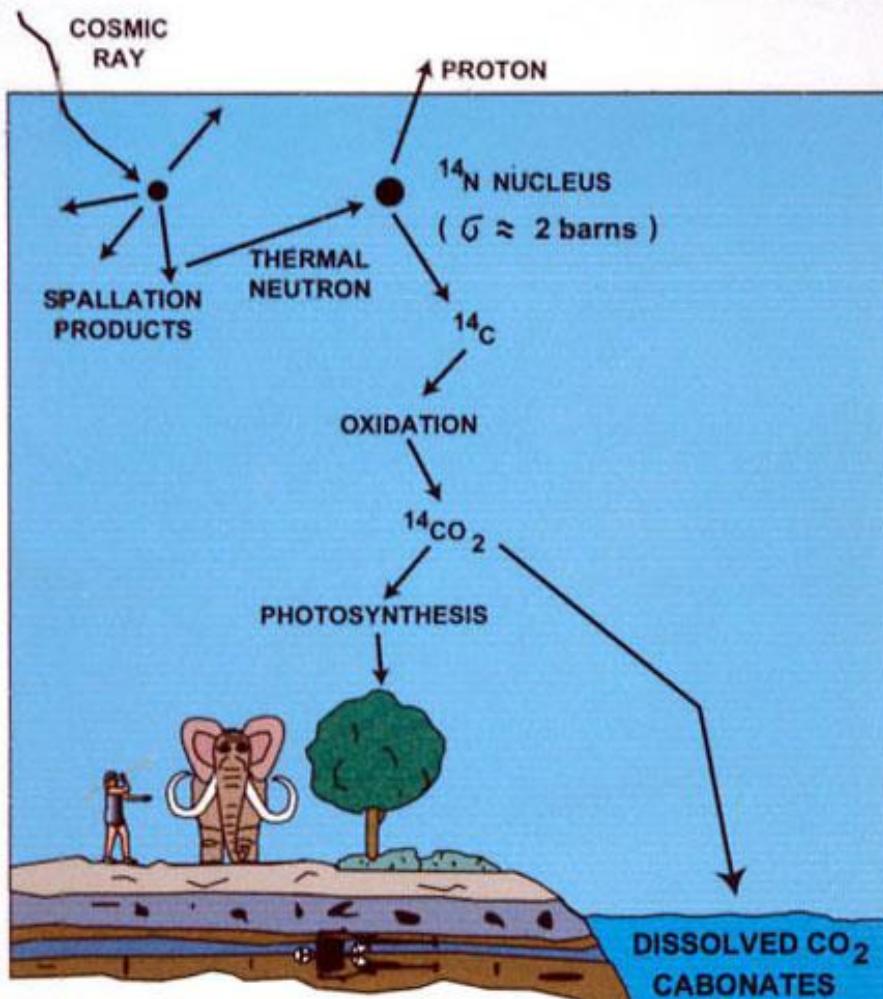
Polčas premeny (rozpadu) T alebo $T_{1/2} =$ je doba potrebná na premenu polovice z počiatočného počtu jadier daného nuklidu:

$$T = \ln 2 / \lambda = 0,693 / \lambda .$$

Polčas rozpadu sa mení od $3 \cdot 10^{-7}$ s do $5 \cdot 10^{15}$ r.

Táto skutočnosť sa využíva pri časovom datovaní látky.



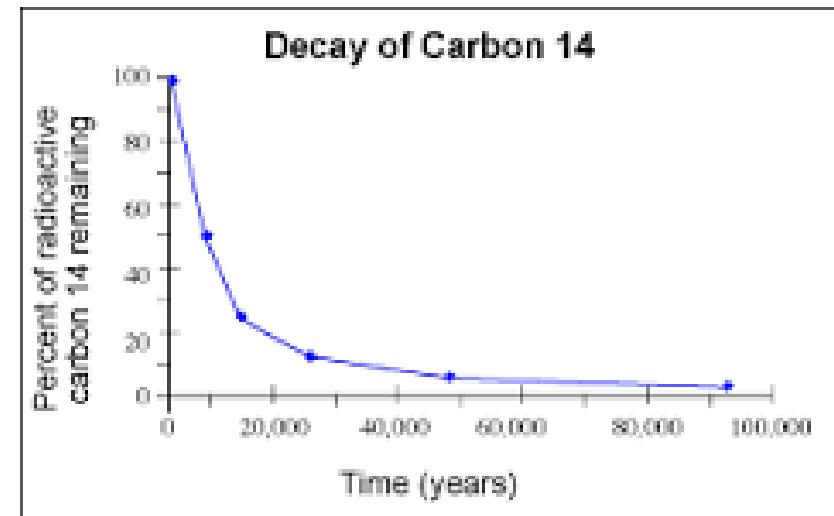
P
R
O
D
U
C
T
I
O
ND
I
S
T
R
I
B
U
T
I
O
ND
E
C
A
Y

Princíp datovania metódou ^{14}C (tzv. rádiokarbónová metóda)

koncentrácie izotopov uhlíka v prírode:

^{12}C – 98.89 %, ^{13}C – 1.11 % a

^{14}C – 0.00000000010 %



polčas rozpadu ^{14}C : 5700 rokov,
vhodná pre materiály mladšie ako
50,000 rokov
(len pre organické materiály)

V geológii:
urán-tóriová metóda (U-Th)
draslík-argónová metóda (K-Ar),
rubídium-stronciová m. (Rb-Sr)

Rádioaktívne prvky:

Prírodné rádionuklidy = vyskytujú sa vo všetkých prírodných sférach, ich jadra sa samovoľne premieňajú v dôsledku vnútornej nestability, bez vonkajšieho zásahu

- cca 230: v troch prírodných rádioaktívnych rozpadových radoch alebo samostatne

| Rad | Materské jadro | Polčas premeny (roky) | Stabilný konečný produkt |
|-----------|------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Tóriový | $_{90}\text{Th}^{232}$ | $1,39 \cdot 10^{10}$ | $_{82}\text{Pb}^{208}$ |
| Uránový | $_{92}\text{U}^{238}$ | $4,51 \cdot 10^9$ | $_{82}\text{Pb}^{206}$ |
| Aktíniový | $_{92}\text{U}^{235}$ | $7,07 \cdot 10^8$ | $_{82}\text{Pb}^{207}$ |

- samostatne: ^{40}K , ^{48}Ca , ^{87}Rb a ďalšie

Umelé (antropogénne) rádionuklidy = vznikajú ako dôsledok činnosti človeka pôsobením neutrónov, nabitych častíc a žiarenia gama na jadra stabilných prvkov alebo pri štiepení jadier tăžkých prvkov

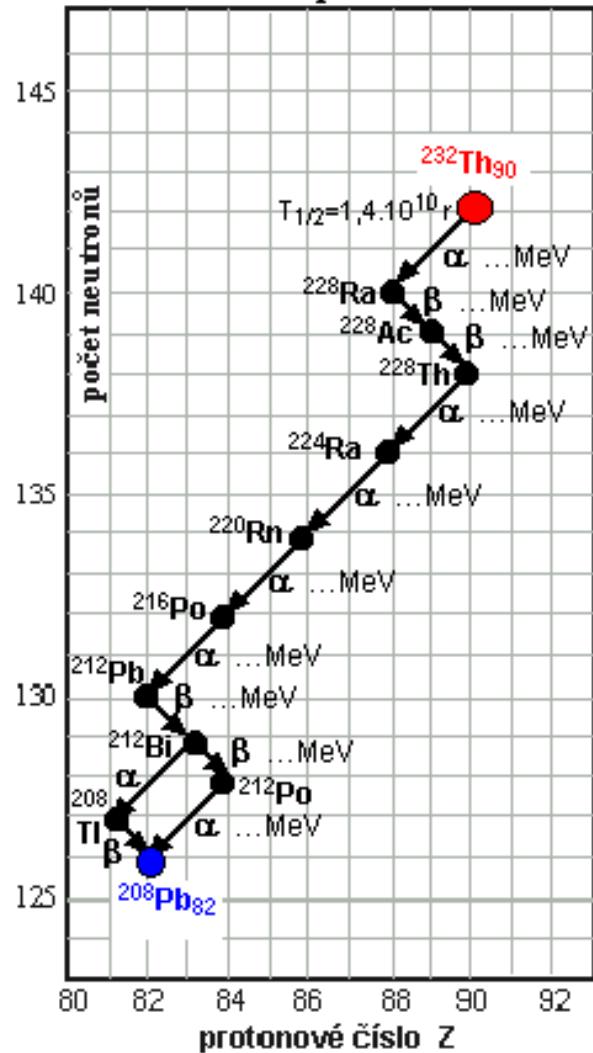
- cca 800: jeden rozpadový rad alebo samostatne

| Rad | Materské jadro | Polčas premeny (roky) | Stabilný konečný produkt |
|------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Neptúniový | $_{93}\text{Np}^{237}$ | $2,25 \cdot 10^6$ | $_{83}\text{Bi}^{209}$ |

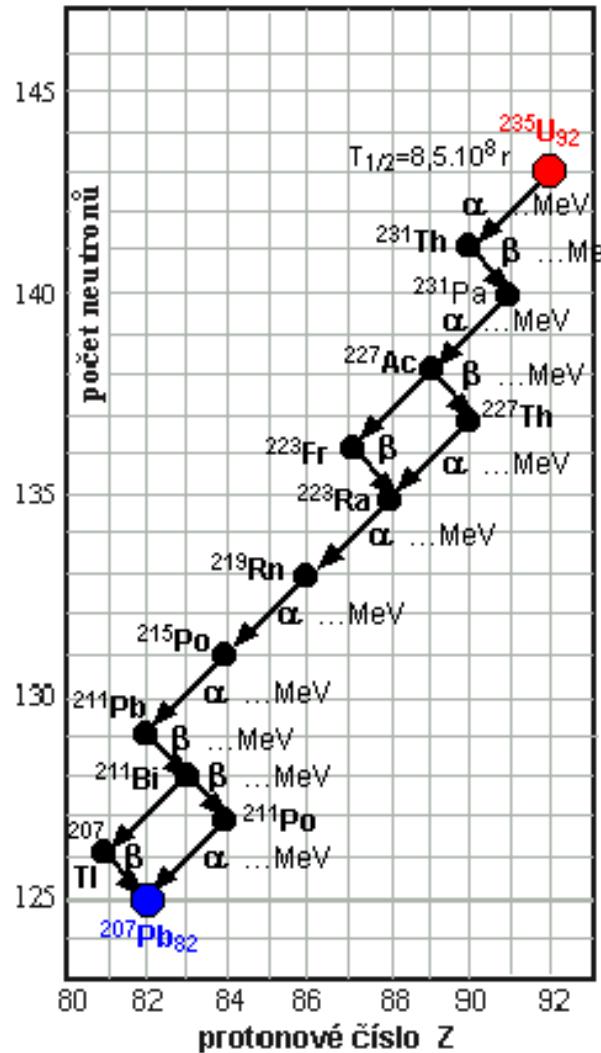
- samostatne: ^{238}Pu , ^{14}C , ^{137}Cs a ďalšie

3 prirodzené rozpadové rádioaktívne rady: ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U

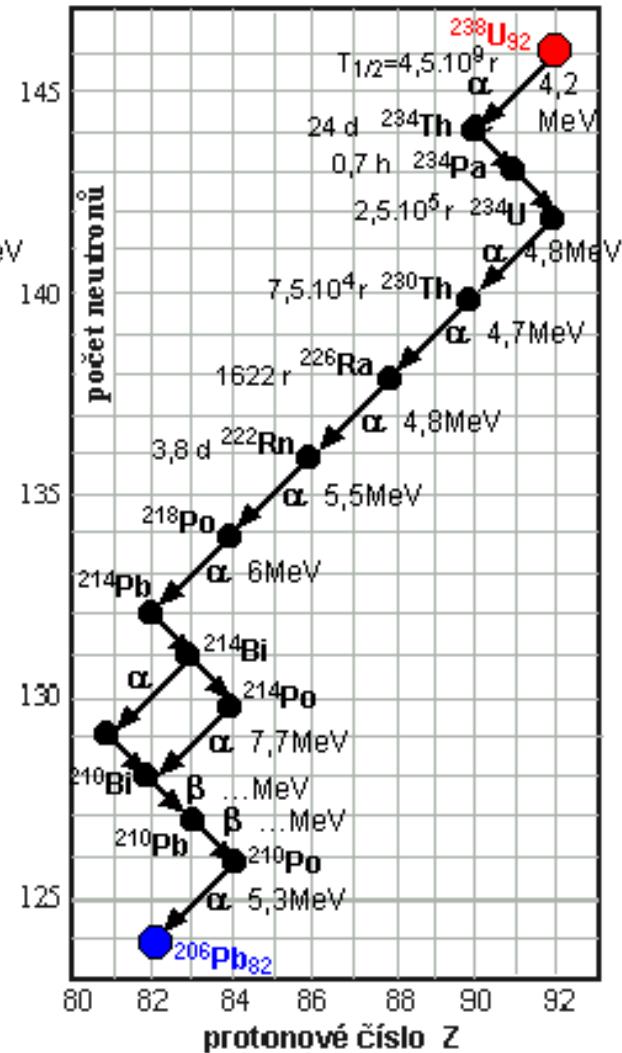
Thoriová rozpadová řada



Uranová řada ^{235}U



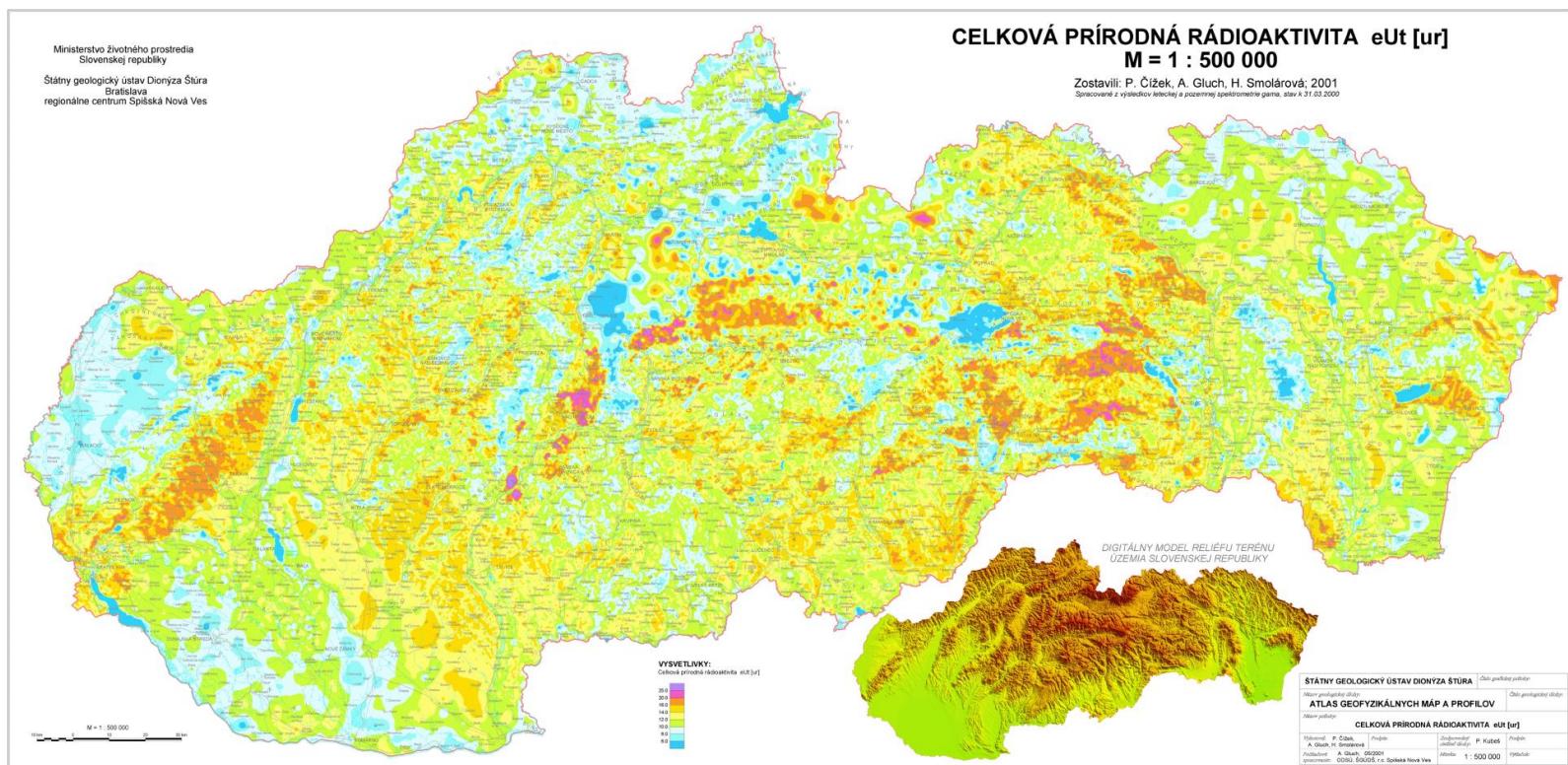
Uranová řada ^{238}U



Využitie merania rádioaktivity v geológii:

- Vyhľadávanie a prieskum rádioaktívnych surovín
 - Geologické mapovanie
 - Vyhľadávanie a prieskum ložísk nerastných surovín
 - Štúdium genézy a datovanie hornín
 - V hydrogeologii a inžinierskej geológii
 - Banské prevádzky a úpravne rúd
 - Hodnotenie kvality životného prostredia

Najdôležitejšie prírodné rádionuklidy (mapovanie): ^{40}K , ^{238}U a ^{232}Th



prognóza radónového rizika oblast' Hornej Nitry

