

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. pre 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. pre Kristom - text filozofickej školy **Vaisheshika** (India),

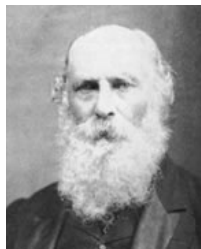
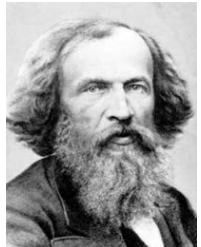
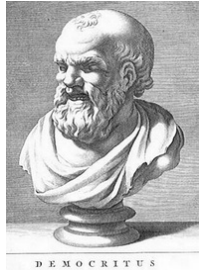
18. stor. – britský chemik a fyzik **John Dalton** – zaviedol pojem **atóm** pre základnú jednotku chemických prvkov,

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)

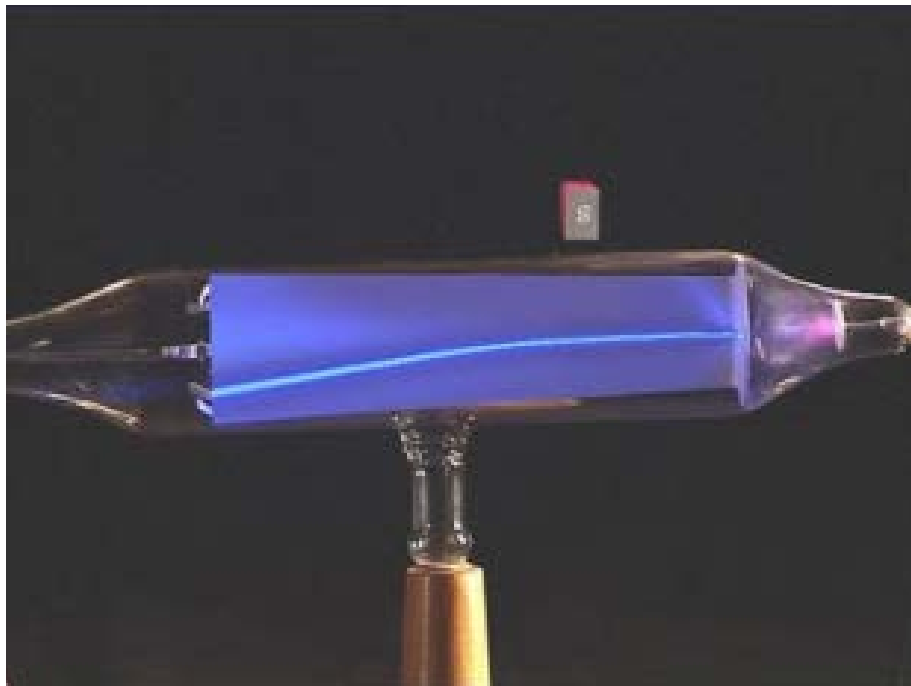
1891 – zavedenie pojmu **elektrón** - **G.J. Stoney**, anglo-írsky fyzik, ako základnej častice pre elektrinu, ako prvý odhadol jeho elementárny náboj e , (avšak si myslel, že elektrón je pevne naviazaný na atóm a nemôže sa voľne pohybovať),

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



Atómová fyzika – historický vývoj (2/11)

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



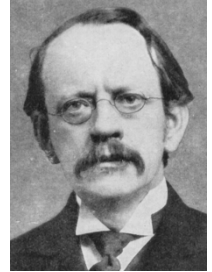
katódové lúče (voľné elektróny) menia smer pôsobením
permanentného magnetu

experiment:

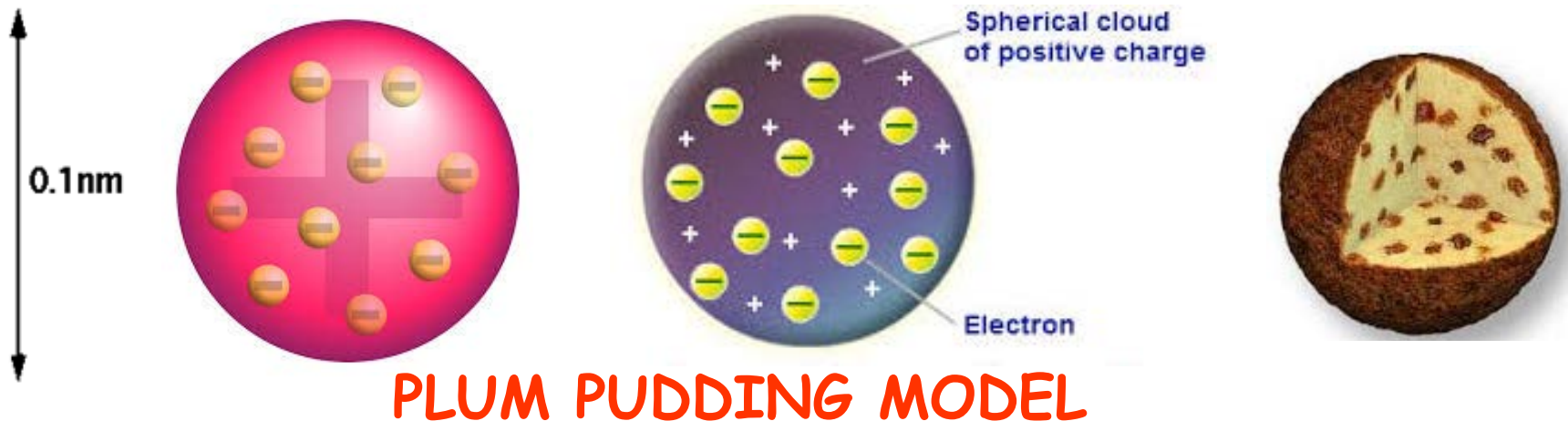
<https://www.youtube.com/watch?v=O9Goyscbazk>

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.



PLUM PUDDING MODEL

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

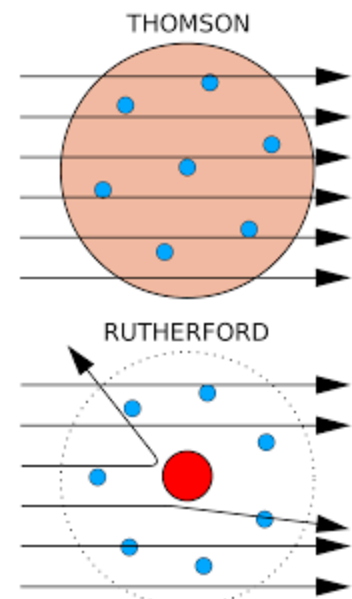
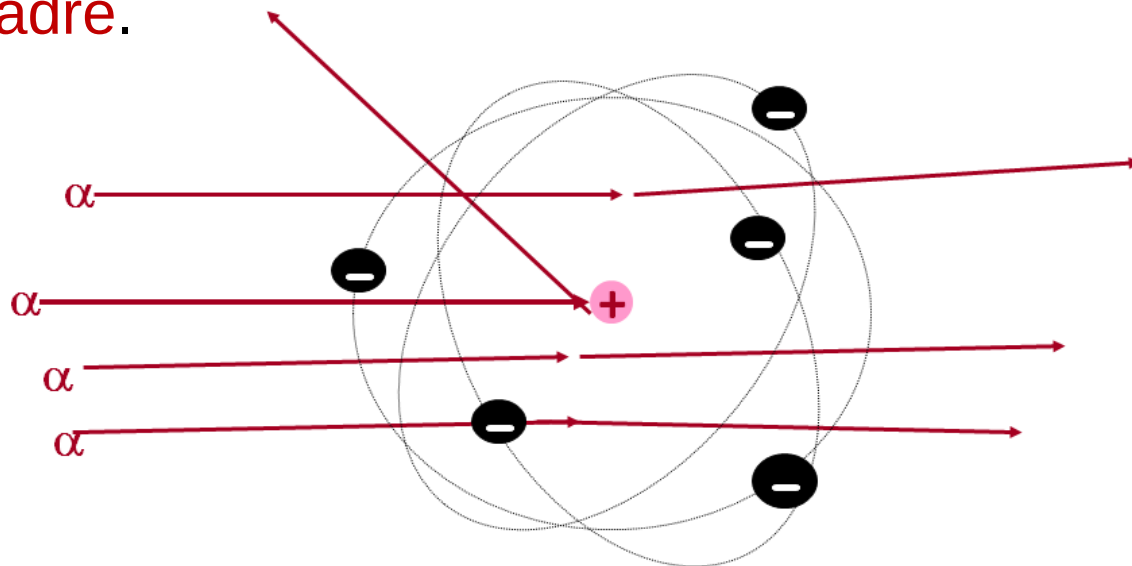
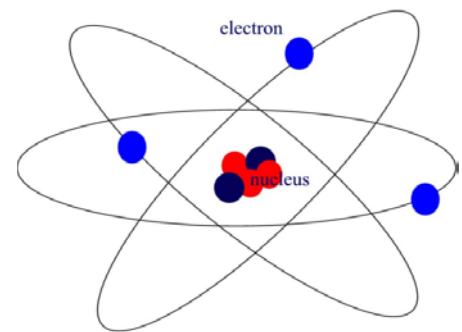
Atómová fyzika – historický vývoj (4/11)

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



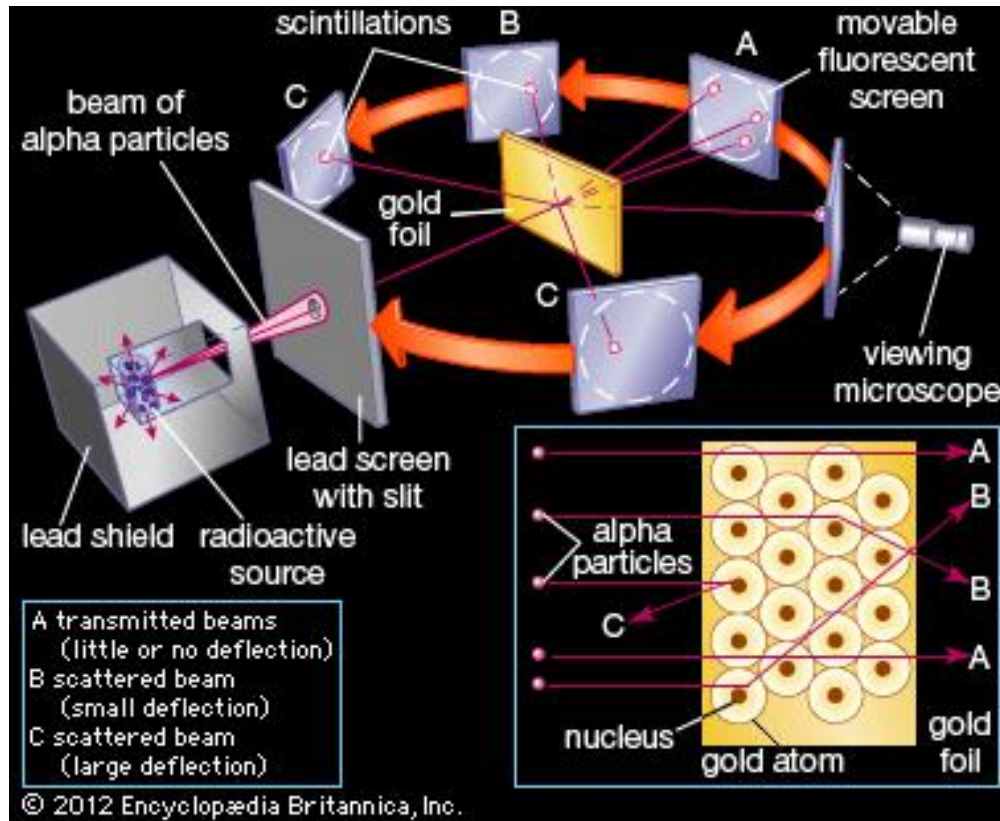
1911 **Ernest Rutherford** prezentoval známy **pokus so zlatou fóliou**, ktorú ostreloval prúdom alfa-častíc, pričom niekoľko z nich sa odrazilo späť (tým vyvrátil Thomsonov model atómu).

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 častice 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



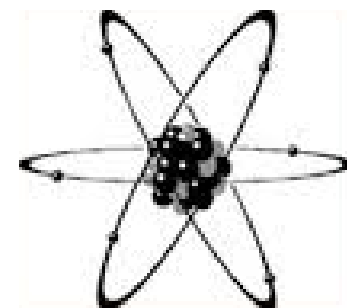
$\times 10^{-4}$

jadro

(99.97% hmotnosti atómu)

Atómová fyzika – historický vývoj (7/11)

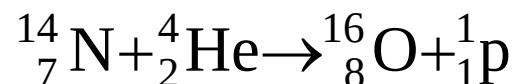
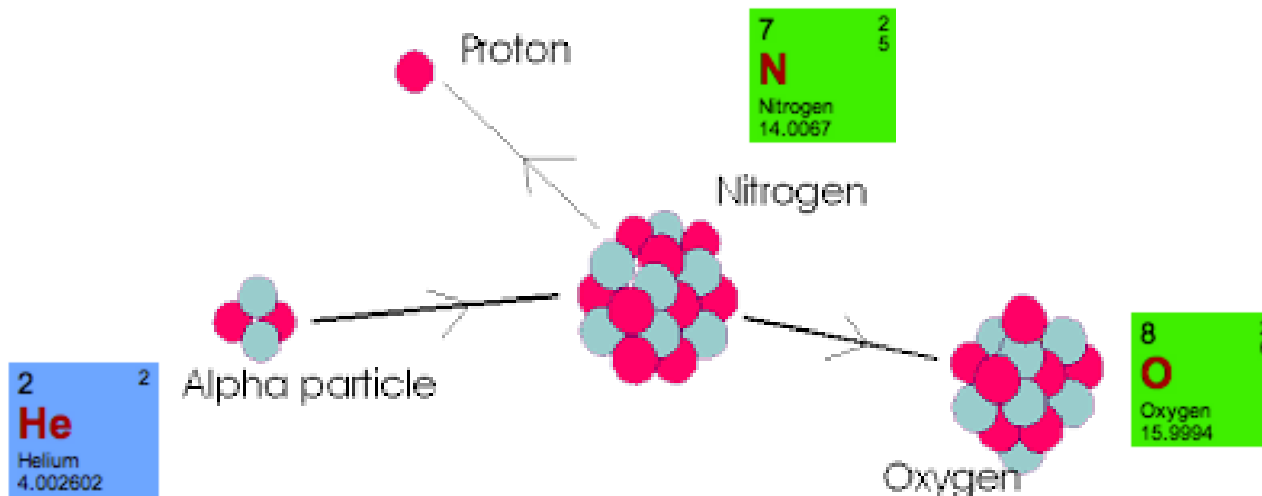
- rádioaktivita prvkov naznačovala, že jadro nie je jednoduché, ale má vnútornú štruktúru,
- 1904: Rutherford a Sody zistili, že rádioaktivita je spojená s premenou prvkov, začalo byť zrejmé, že **rádioaktivita je vlastnosťou jadier**,
- 1911: Rutherford zavádza pojem atómového jadra,
- 1919-1920: Rutherford zistil, že pri ostreľovaní jadier časticami α vznikajú častice ľahšie ako α 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**.

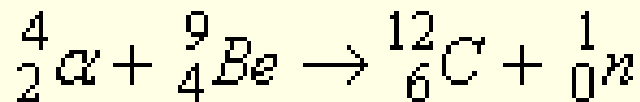
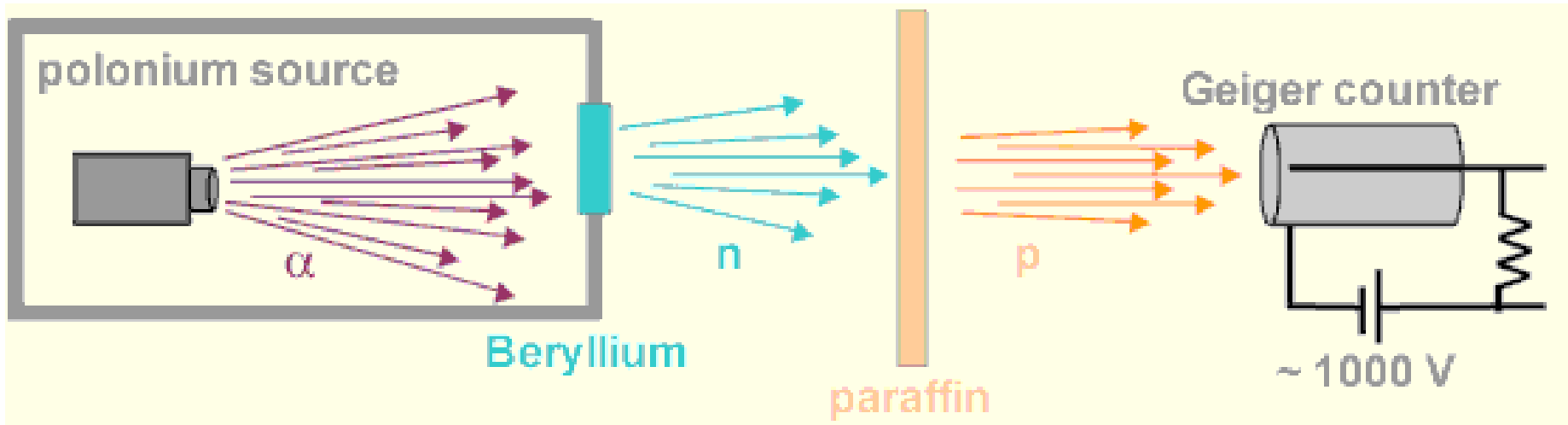


Atómová fyzika – historický vývoj (9/11)

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.

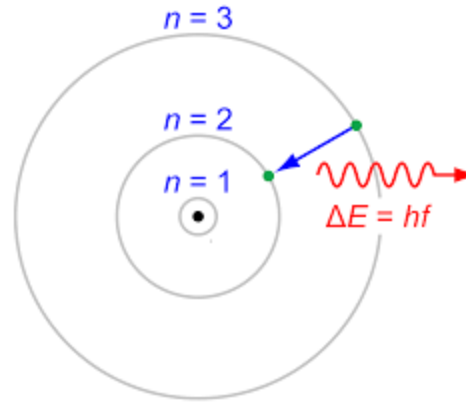
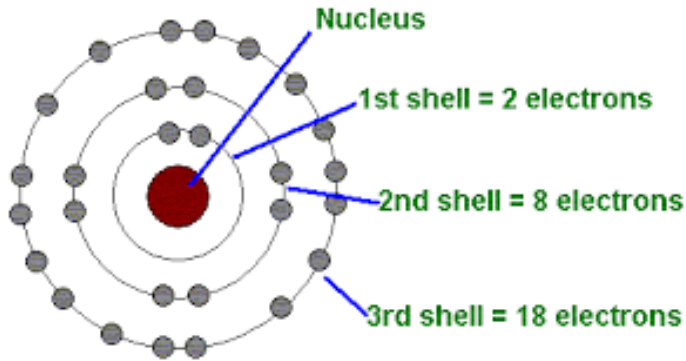
Experiment v 1930 ukázal, že berýlium, bombardované alfa časticami emituje prúd častíc s vysokou energiou. V roku 1932 J. Chadwick nazval túto časticu ako Rutherfordov **neutrón**.



Atómová fyzika – historický vývoj (10/11)

Dôležitý posun – Bohrov model atómu:

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

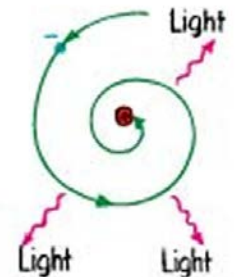


Základné vlastnosti Bohrovho modelu:

1. Elektróny sa pohybujú po stacionárnych dráhach (v diskretných vzdialenostiach od jadra) bez straty energie.
2. Elektrón stráca alebo získava energiu po kvantách a to iba pri prechode z jednej energetickej hladiny na inú.
3. Je presne určené, ktorá hladina môže obsahovať koľko elektrónov.
4. Spoľahlivo 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 pritiahnutý kladne nabitým jadrom...)

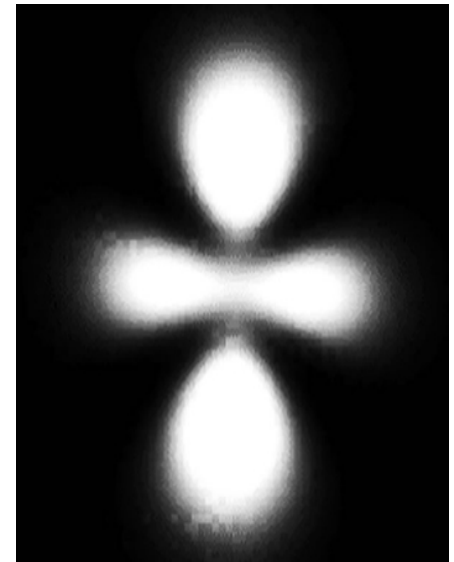
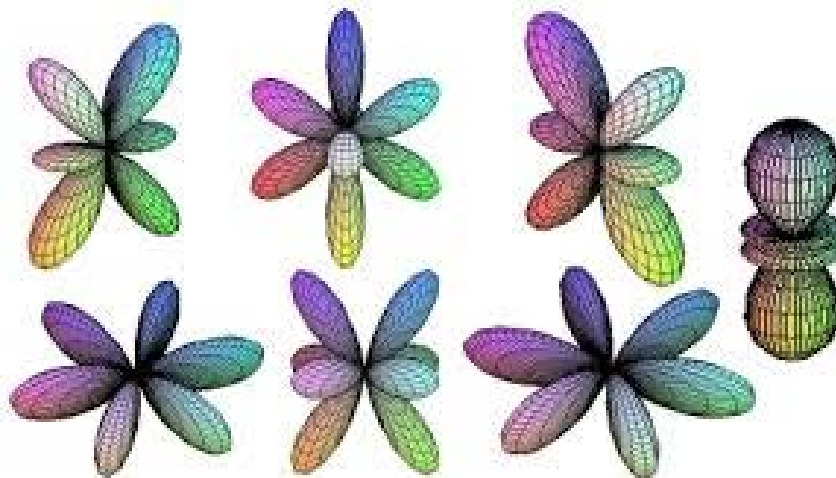


Atómová fyzika – historický vývoj (11/11)

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

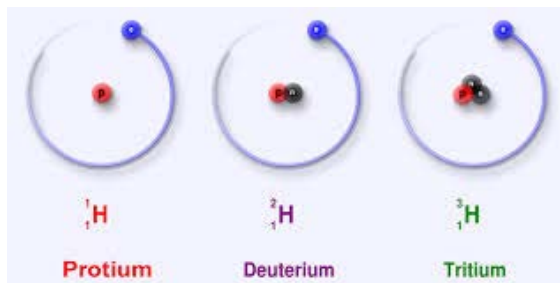
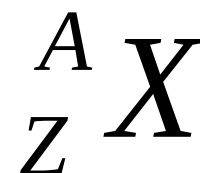


Atóm - základné charakteristiky:

	atóm	jadro	protón	neutrón	elektrón
priemer	10^{-10} m	10^{-15} m	-	-	-
hmotnosť	10^{-27} kg	$\approx 10^{-27}$ kg	$\cong 1,673 \cdot 10^{-27}$ kg	$\cong 1,675 \cdot 10^{-27}$ kg	$\cong 9,1 \cdot 10^{-31}$ 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),



SLOVENSKÝ NÁZOV	VODÍK
LATINSKÝ NÁZOV	HYDROGENIUM
RELATÍVNA ATÓMOVÁ HMOTNOSŤ	1,008
ZNAČKA PRVKU	H
PROTÓNOVÉ ČÍSLO	1
PAULINGOVA ELEKTRONEGATIVITA	2,1
OXIDAČNÉ ČÍSLA	-1,1

Jadrové sily:

- 1) odpudivé elektrické sily medzi + protónmi
- 2) príťažlivé (gravitačné) sily medzi nukleónmi:
 - sú krátkodosahové (do vzdialenosti 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,
- 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 nukleónmi (protóny, neutróny)
4. Slabá interakcia: sily, ktorými pôsobia ľahké elementárne častice (leptóny) medzi sebou

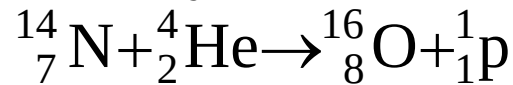
Ktorá z týchto silových interakcií je najdominantnejšia?

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

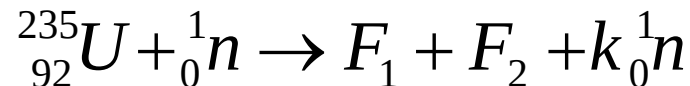
Jadrové reakcie:

- **jadrová premena** = proces zmeny v jadre, ktorý nastáva samovoľne 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 reakcií podľa priebehu:

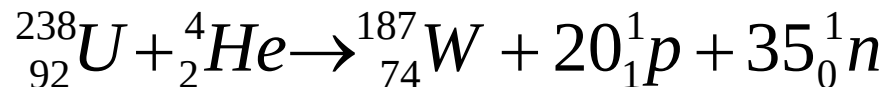
transmutácia = Z a A nového vzniknutého jadra sa iba málo líši od terčového jadra



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 energia sústavy nukleónov zmenší,
- zmenšeniu energie ΔE zodpovedá podľa Einsteinovho vzťahu 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 sa uvoľňuje energia** $\rightarrow$ celková energia E_j , ktorá sa uvoľní pri vytváraní jadra, sa nazýva **väzbová energia jadra**:

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

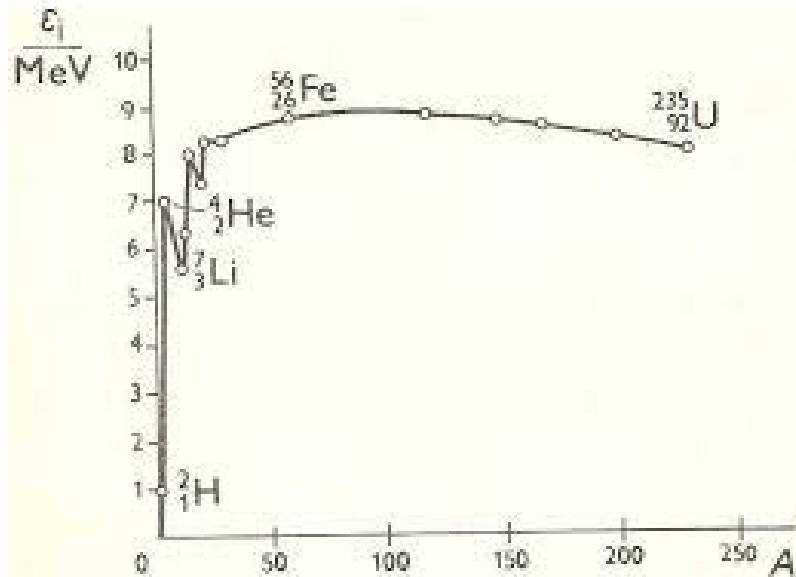
- Platí aj opačne, že túto energiu treba dodať na rozloženie jadra na jednotlivé nukleóny
- veľkosť väzbovej energie: od 2,23 MeV u najľahšieho deuterónu do 1640 MeV pre najťažšie stabilné jadro ${}_{83}\text{Bi}^{209}$ (väzbová energia pre H je 13,6 MeV)
- **väzbová energia pripadajúca na jeden nukleón**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

$$\epsilon_j = E_j / A$$

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 eV = $1,602\,176\,53 \cdot 10^{-19}$ 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 konštanta $m_u = 1,6605402 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ a každý nukleón v jadre má hmotnosť približne rovnakú ako je m_u

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

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

pre porovnanie: výparné teplo vody = 540 kcal/kg,

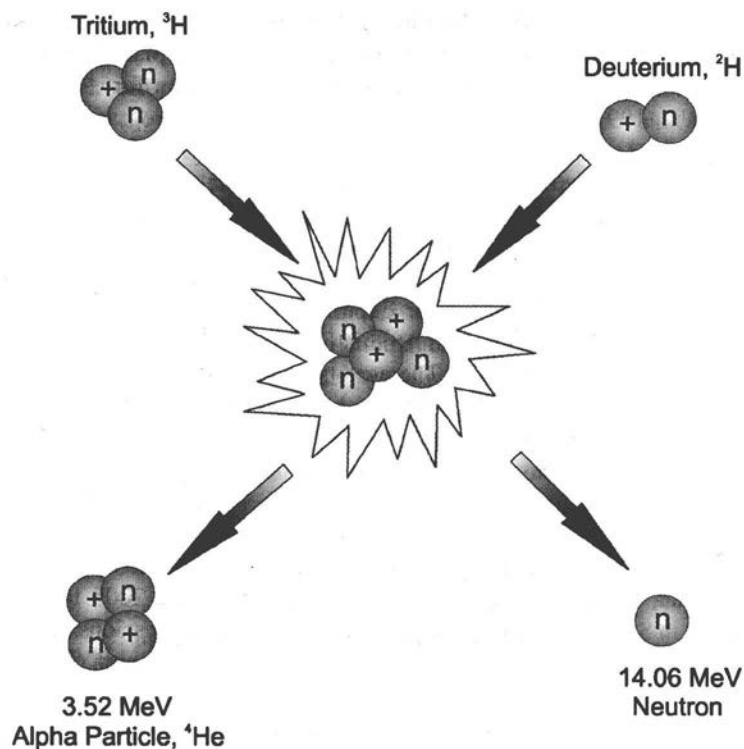
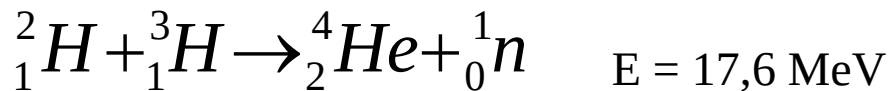
teplo zo spaľovania benzínu = $1,13 \cdot 10^4 \text{ kcal/kg}$.

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,

Spôsobu uvoľnenia jadrovej energie:

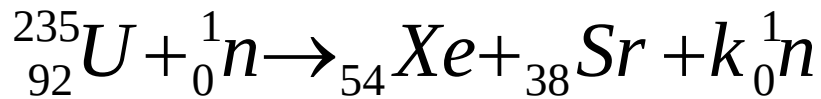
1. **Syntéza ľahkých jadier (fusion)** = jadrová reakcia, pri ktorej sa spoja jadrá s malým A, pričom vznikne jadro s väčším A.



- 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 (zatiaľ ešte nerealizovaná)

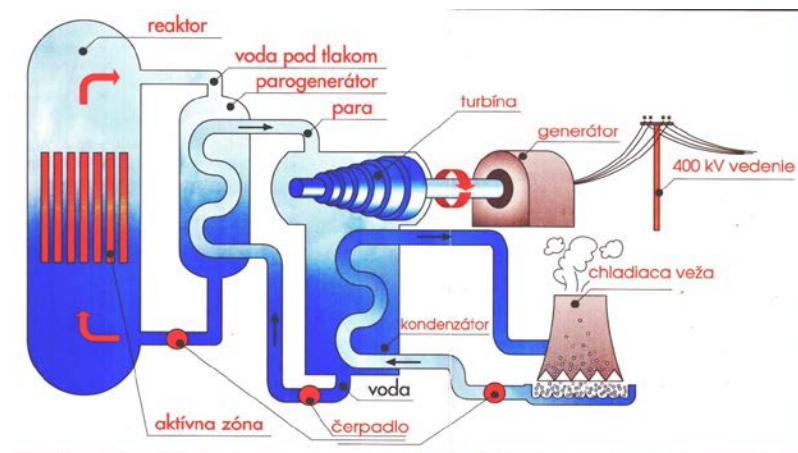
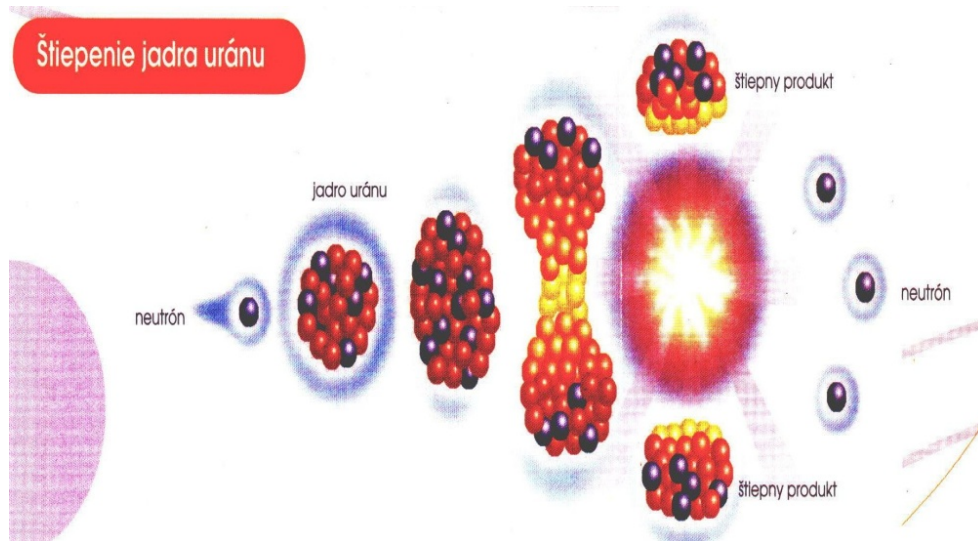
Jadrové premeny ako zdroj energie:

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



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

Štiepenie jadra uránu



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.

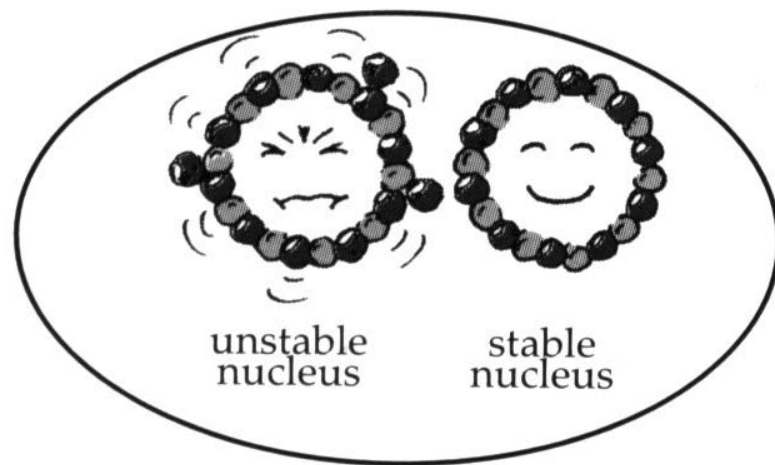
Prirodzená (prírodná) rádioaktivita = ak sa príslušné nestabilné rádioaktívne izotopy chemických prvkov vyskytujú v prírode,

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

Umelá rádioaktivita = ak rádioaktívne jadrá vznikajú umelou cestou pri jadrových reakciách

- 1934 – objavili ju manželia Joliot-Curie.

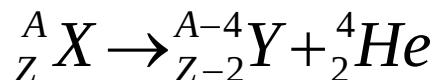
Rádioaktívne (jadrové) žiarenie = tok jadrových častíc (korpuskulárne, časticové) a/alebo tok elektromagnetického žiarenia uvoľnených pri jadrových premenách.



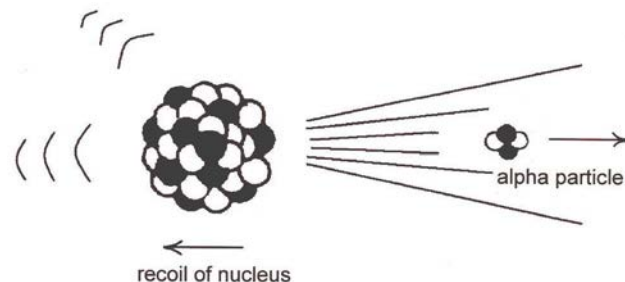
Jadrové premeny – vznikajú v dôsledku vnútornej nestability jadier atómov alebo pôsobením externého žiarenia na atómy hmoty.

Typy jadrových premien:

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

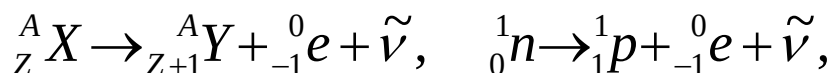


žiarenie sú alfa častice (héliové jadrá)

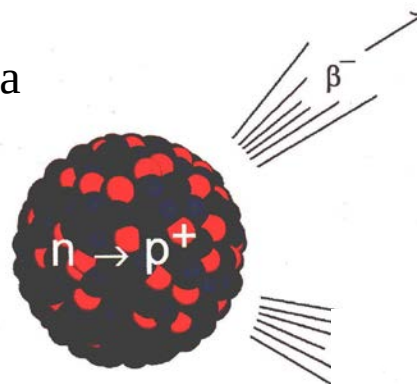


2. premena (rozpad, emisia) **beta** (β)

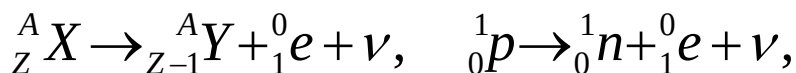
žiarenie sú emitované elektróny plus antineutrína



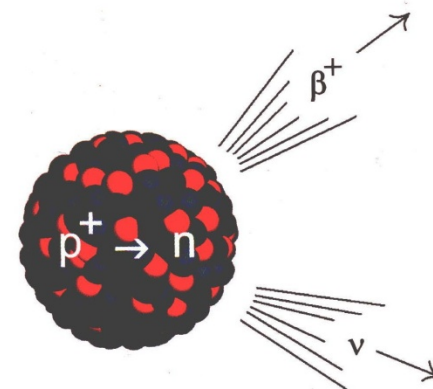
kde $\tilde{\nu}$ je antineutríno



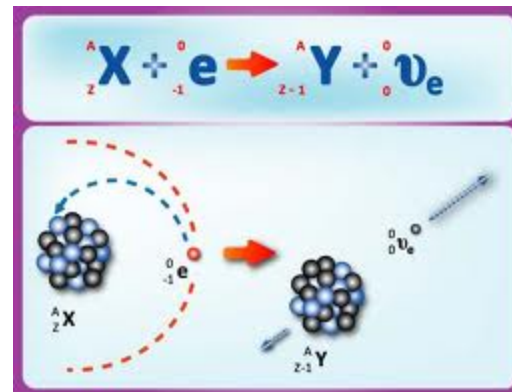
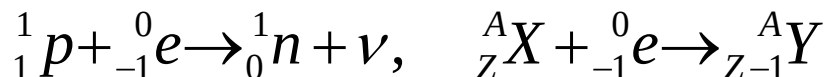
- premena β^+



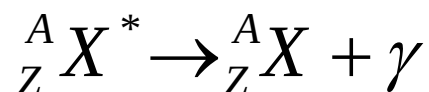
kde ${}_1^0e$ je pozitron (anti – elektrón) a ν je neutríno



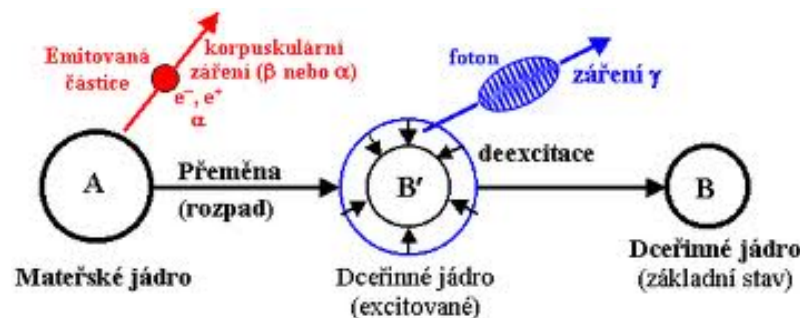
3. K-záchyt elektrónu



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 sprevádzať ostatné premeny



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

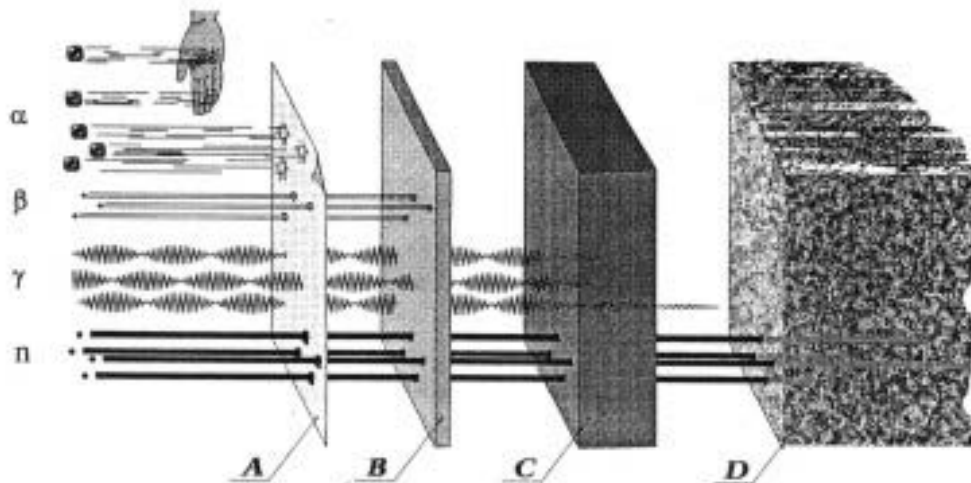


Rádioaktívne (jadrové) žiarenie = prúd (tok) nabitých častíc, neutrónov alebo kvánt gama žiarenia, ktoré doprevádzajú premeny rádionuklidov.

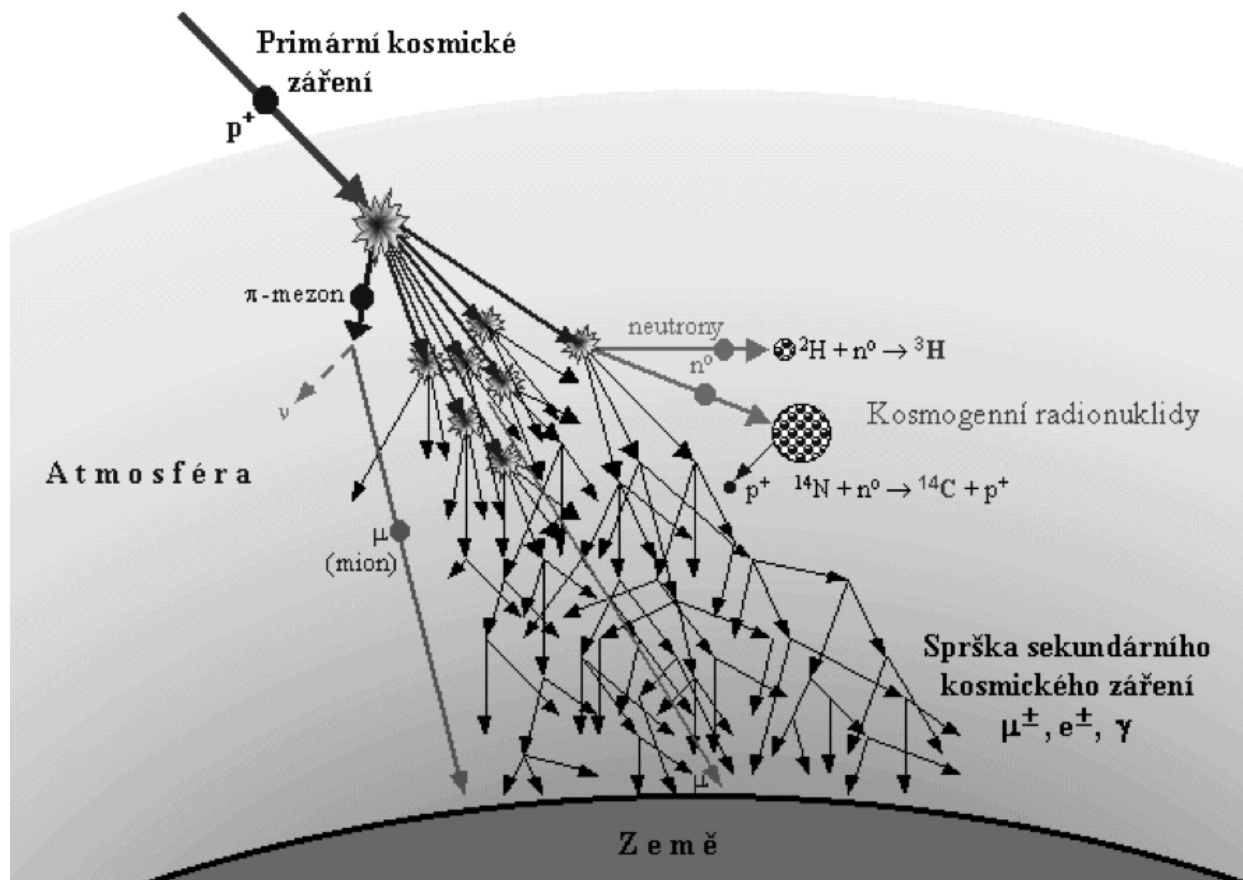


Druhy jadrového žiarenia:

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 buď elektrónmi e^- (β^-) alebo pozitronmi 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

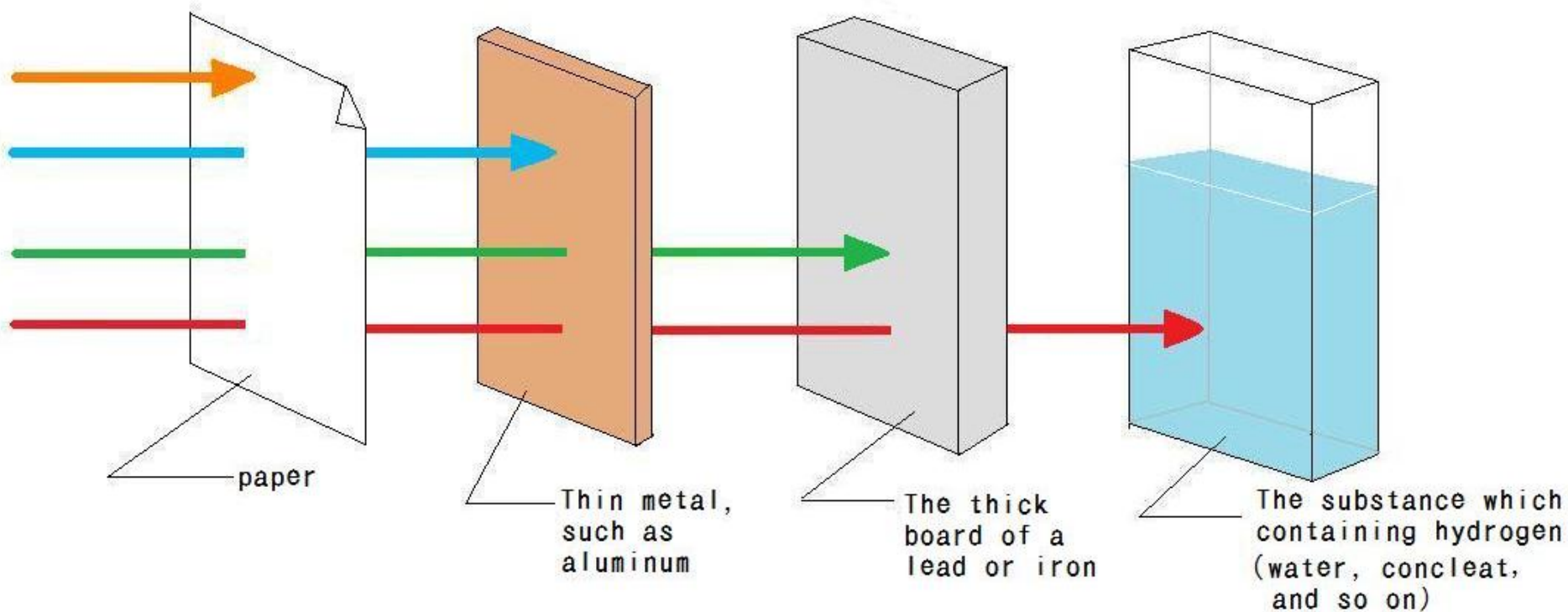


4. **žiarenie neutrónové** (1932, Chadwick)– časticové žiarenie tvorené neutrónmi
- väčšia hmotnosť ako u β , malé rozmery, bez náboja, energetické vybudenie (excitácia) prostredia, široký interval rýchlostí a energií, veľký dolet a dobrá priechodnosť hmotou
5. **žiarenie kozmické** – prúd nabitých častíc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



Prienik rôznych druhov rádioaktívneho žiarenia:

- Alpha rays
- Beta rays
- Gamma rays and X-ray
- Neutron radiation



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 RÁDIOAKTÍVNEJ PREMENY (ROZPADU)**

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

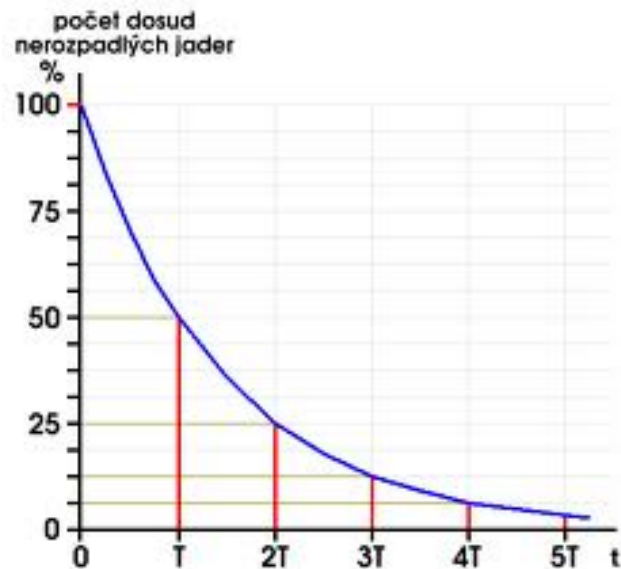
kde $N(t)$ je počet nepremených jadier v čase t ,
 N_0 je počet nepremených jadier na začiatku v čase $t = 0$,
 λ je tzv. premenová (rozpadová) konštanta konkrétneho nuklidu.

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

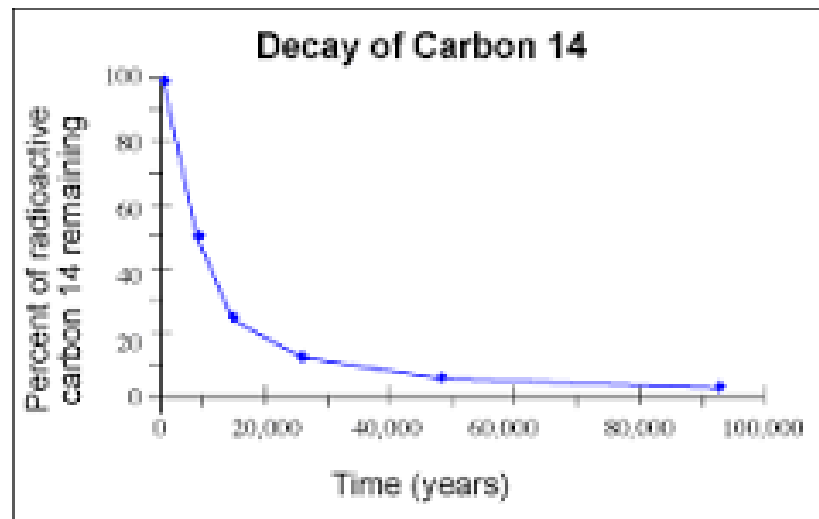
$$T = \ln 2 / \lambda = 0,693 / \lambda .$$

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

Táto skutočnosť sa využíva pri časovom datovaní látky.

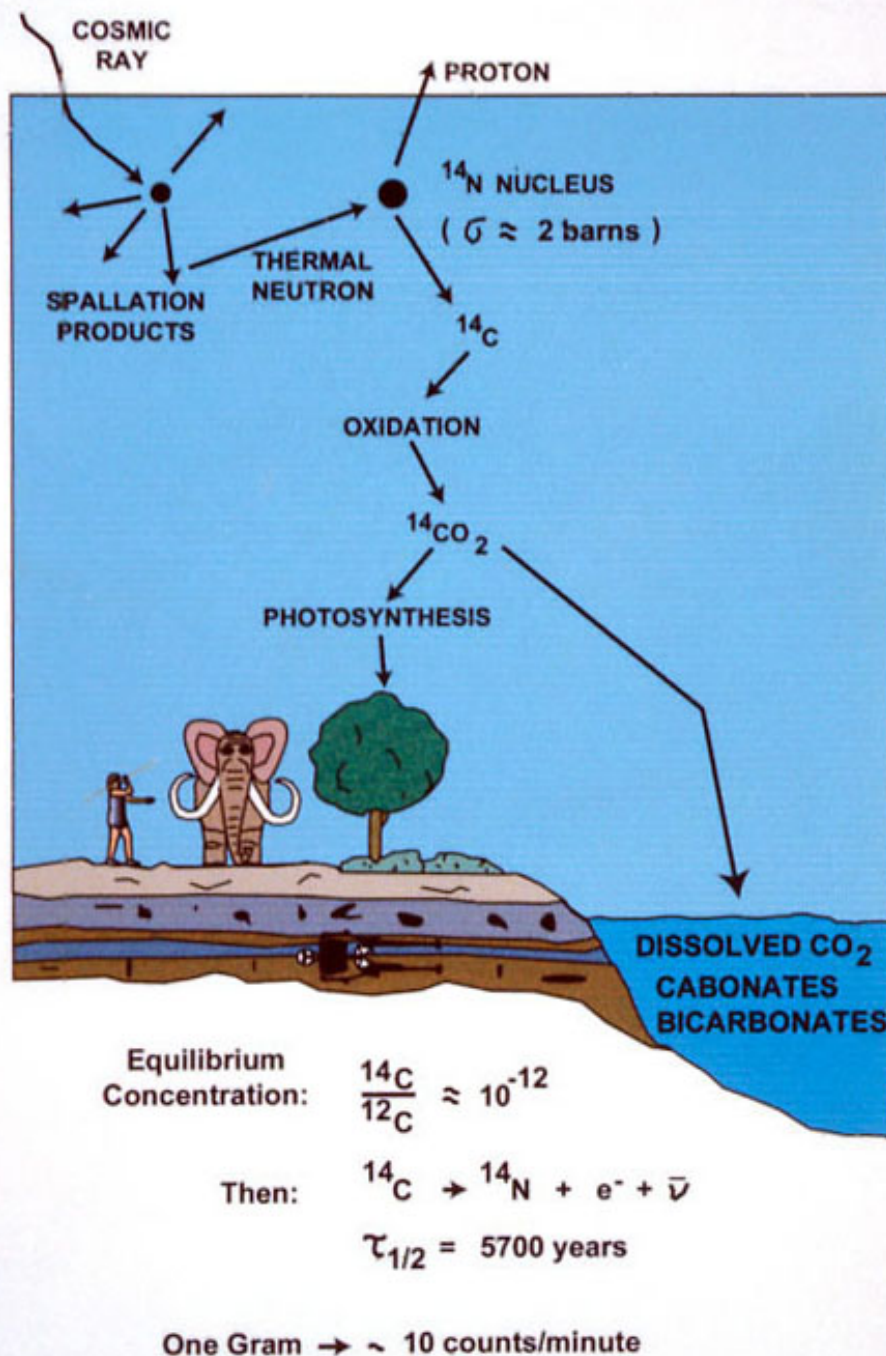


Princíp datovania metódou ^{14}C (tzv. rádiokarbónová metóda)



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)
Kálium-argónová metóda (K-Ar),
Rubídium-stronciová m. (Rb-Sr)



Rádioaktívne prvky:

Prírodné rádionuklidy = vyskytujú sa vo všetkých prírodných sférach, ich jadrá 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: ${}^{40}\text{K}$, ${}^{48}\text{Ca}$, ${}^{87}\text{Rb}$ a ďalšie

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

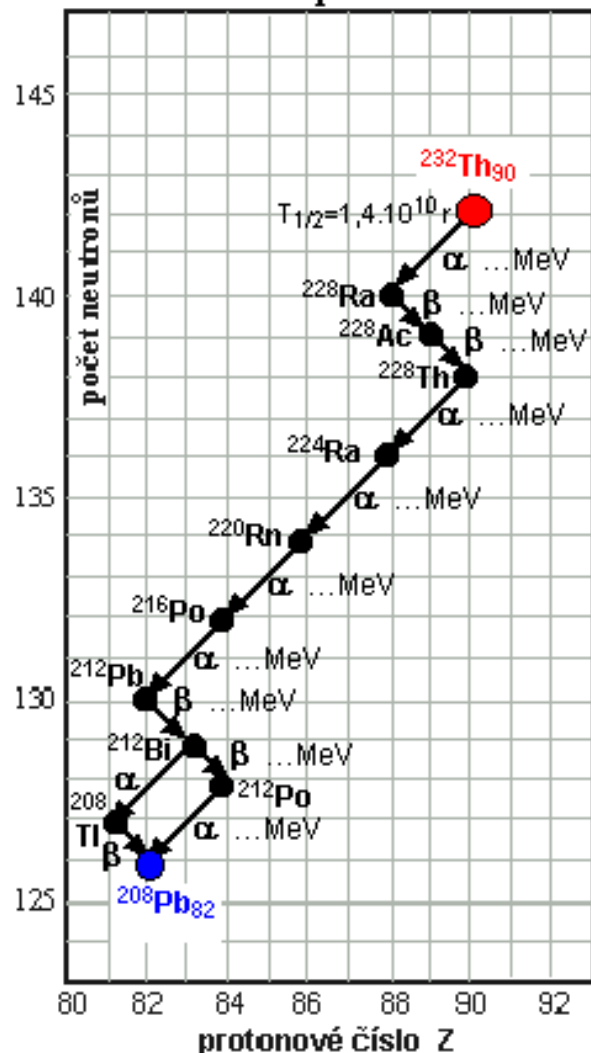
- cca 800: jeden rozpadový rad alebo samostatne

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

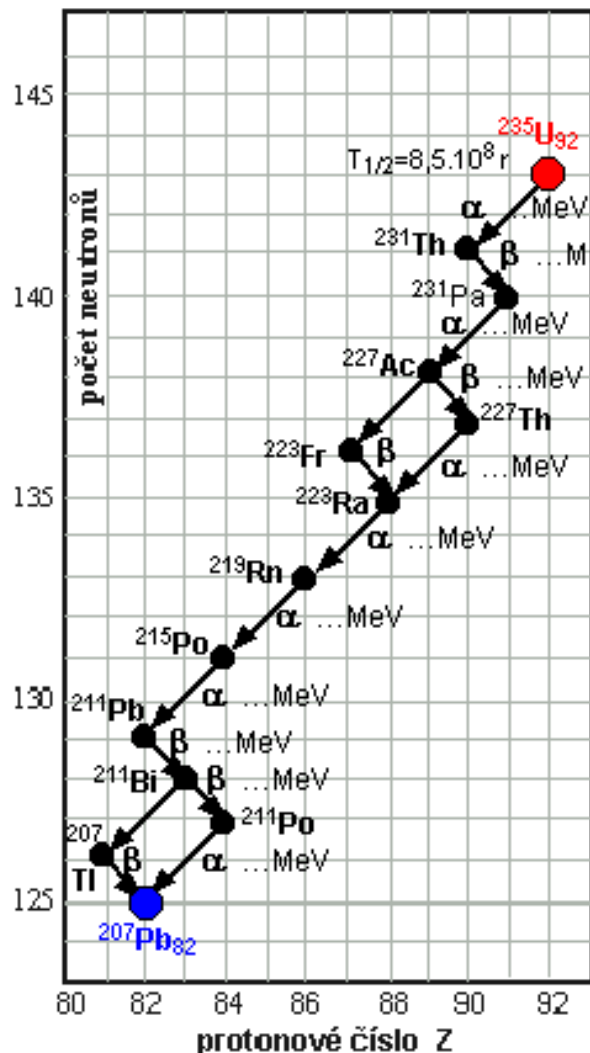
- samostatne: ${}^{238}\text{Pu}$, ${}^{14}\text{C}$, ${}^{137}\text{Cs}$ a ďalšie

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

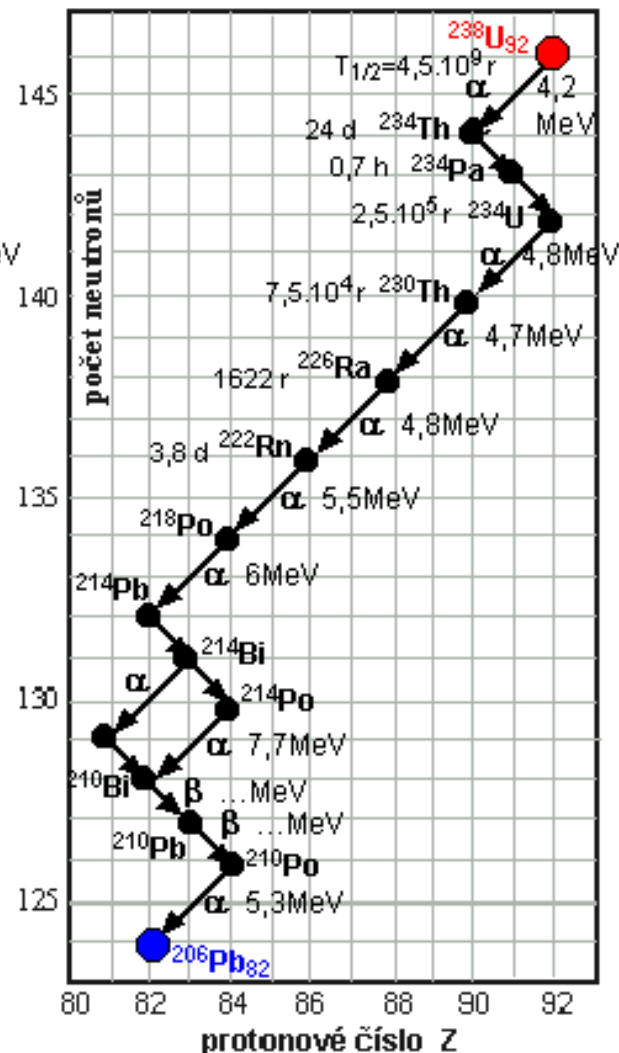
Thoriová rozpadová řada



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 hydrogeológii a inžinierskej geológii
- Banské prevádzky a upravne rúd
- Hodnotenie kvality životného prostredia

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

