

Fizika mérnököknek 2. levelező

4. előadás - Atomfizika

Mingesz Róbert

Szegedi Tudományegyetem

2010. március 19.

Tartalom I

- 1 Atomfizika
- 2 Röntgensugárzás
 - A röntgensugárzás alkalmazásai
- 3 A hőmérsékleti sugárzás
 - A Planck-féle sugárzási törvény
- 4 A fény kettős természete
 - Fényelektromos jelenségek
 - A fény mint részecske
- 5 A mikrorészecskék kettős természete
- 6 A Heisenberg-féle határozatlansági reláció
- 7 Az atomfogalom kialakulása
- 8 A Bohr-féle atommodell
 - A kvantumszámok
 - A Pauli-elv
- 9 Az atomok színeképe
 - Spontán és kényszerített emisszió

Tartalom II

- Lumineszcencia sugárzások

- Lézerek

10 Magfizika

11 A természetes radioaktivitás

- A radioaktív sugarak hatásai
- Kísérleti vizsgálat

12 A radioaktív bomlás

13 Tömegspektroszkópia

- Izotópok
- Tömegspektroszkópok

14 A neutron

15 A pozitron

16 Részecskegyorsítók

17 Magreakciók

18 Az atommag szerkezete

- A radioaktivitás értelmezése

Tartalom III

19 A maghasadás

20 A fúzió

- Héjfizika

- Az elektronhéj tulajdonságai
- Elektromágneses hullámok
- A részecskék kettős természete

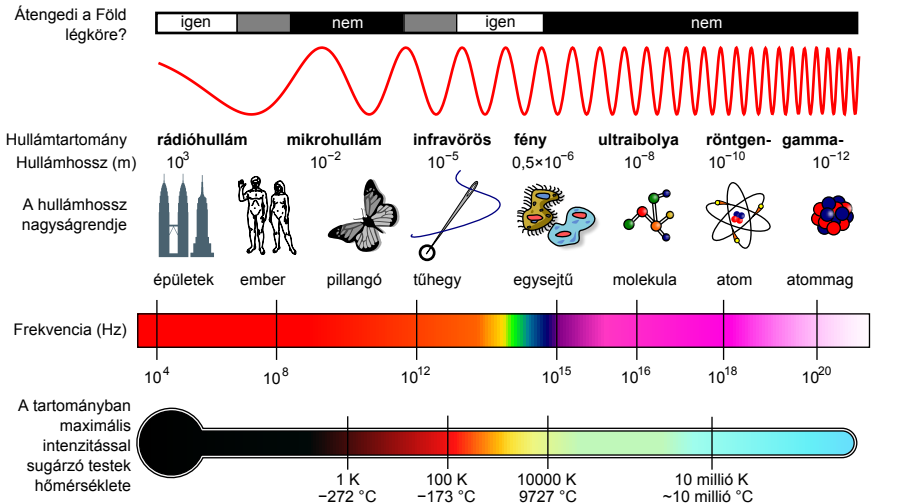
- Magfizika

- Az atommag szerkezete
- Radioaktív sugárzás
- Magreakciók
- Atomreaktorok működése
- A csillagokban lejátszódó folyamatok

- Részecskefizika

- Az anyag építőkövei
- Elemi részecskék
- Kozmikus sugárzás

Az elektromágneses spektrum



A röntgensugárzás

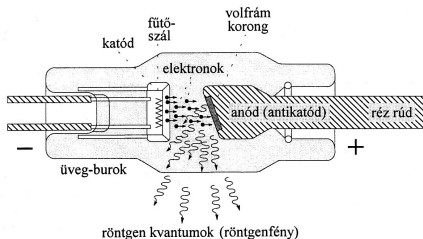
- Nagyenergiájú elektromágneses sugárzás

- Előállítása: röntgenső

Elektronok fékezése \Rightarrow fékezési röntgensugárzás

Jellemzői:

- erősség (intenzitás) – a fűtőáram függvénye
- keménység – a gyorsítófeszültség függvénye



A röntgensugárzás tulajdonságai

- Nagy frekvencia, kis hullámhossz (atomi nagyságrend)
- Fluoreszkáló hatást keltenek
- A fényképezőlemezt megfeketítik
- A levegőt ionizálják
- Nagy áthatolóképeség (függ az anyagtól)

A röntgensugárzás áthaladása anyagon

- Főbb folyamatok:

- Abszorpció (elnyelődés)
ionizáció (elektronok kiválása az atomokból)
- Szórás (szekunder röntgensugárzás)
 - szórt sugárzás (a primer sugárzással azonos hullámhossz)
 - karakterisztikus sugárzás (az anyagra jellemző, diszkrét hullámhossz)

- A röntgensugárzás gyengülése

$$I = I_0 e^{-\mu d}$$

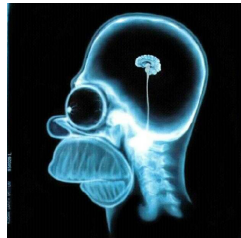
μ : gyengítési együttható. Függ:

- hullámhossz (λ)
- atomsúly (a nehéz atomok jól nyelik el)
- sűrűség

A víz és szerves anyagok alig, a csontok, fémek erősen gyengítik.

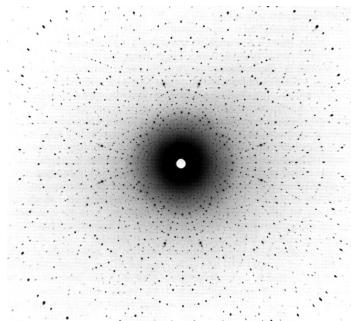
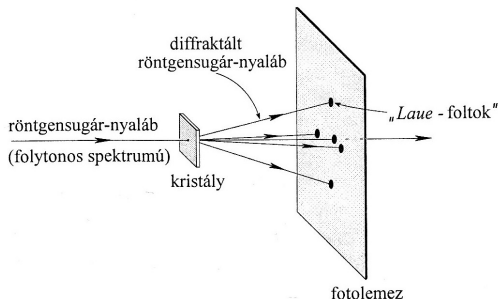
Gyakorlati alkalmazások

- Orvosi alkalmazások (\Rightarrow röntgen dózis)
- Technikai vizsgálatok
Szerkezet megállapítása, hibakeresés
- Anyagvizsgálat

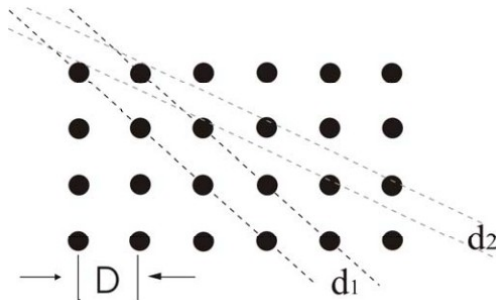
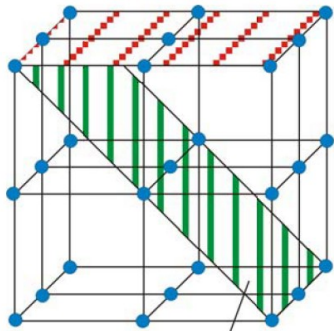


Laue-eljárás

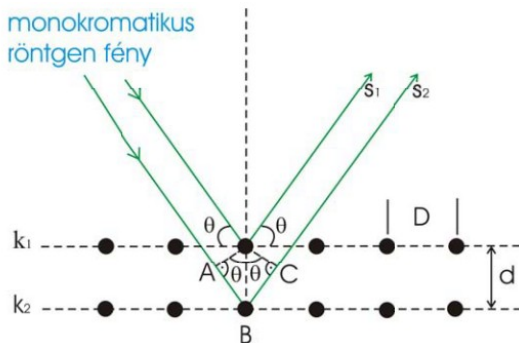
- Folytonos spektrumú röntgennyaláb + egykristály
⇒ bizonyos, jól meghatározott irányokba erősítés (interferencia)



Interferencia kristályokon



Interferencia kristályokon



- Az erősítés feltétele:

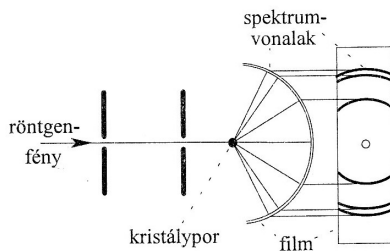
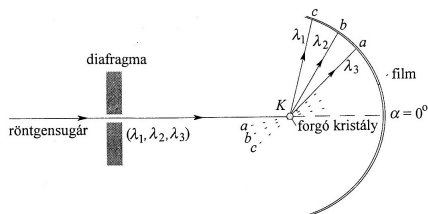
$$AB + BC = k\lambda$$

$$AB = BC = d \sin \theta$$

$$2d \sin \theta = k\lambda$$

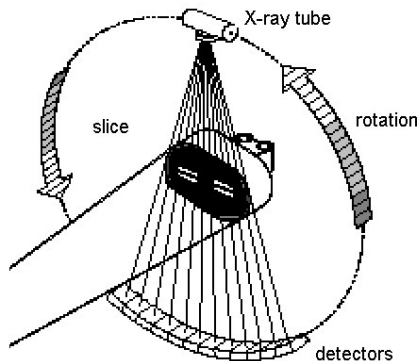
Interferencia kristályokon

- **Bragg-féle forgókristály módszer**
Spektrális analízis
- **Debye-Scherrer-féle por módszer**
Nincs szükség egykristályra. Kristályszerkezet elemzése.



Komputertomográfia

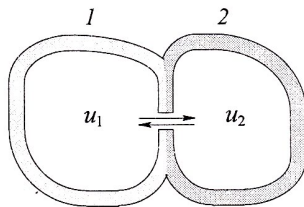
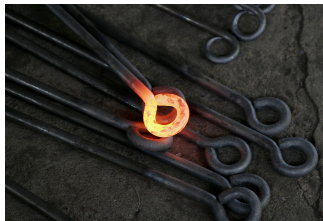
- Több irányból készített felvétel + számítógép
⇒ egy szelet képe
- Sok szelet ⇒ 3D kép



A hőmérsékleti sugárzás

- Tapasztalatok:

- A felmelegített testek hőszugárzást bocsátanak ki (infravörös sugárzás majd látható)
- A melegebb test lehűl, a hideg felmelegszik
- A sugárzás erőssége a hőmérséklettel nő
- A spektrum a hőmérséklet függvénye
- Azon testek sugároznak jól, melyek jól abszorbeálnak
- Egyensúly a testek és a tér között
- Egyensúly a különböző térrészek elektromágneses energiasűrűsége között



A hőmérsékleti sugárzás

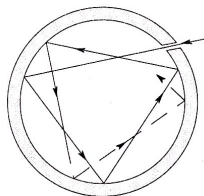
- **Emisszióképesség** $e(\nu, T)$: egységnyi felület egységnyi frekvenciatartományban kisugárzott teljesítménye

$$e(T) = \int e(\nu, T) d\nu$$

- **abszorpcióképesség** $a(\nu, T)$: a sugárzás mekkora részét nyeli el
- **Abszolút fekete test**: a ráeső elektromágneses sugárzást teljes egészében elnyeli $\Rightarrow a(\nu, T) = A(\nu, T) = 1$
Emisszióképessége: $E(\nu, T)$

- **Spektrális energiasűrűség**: $u(\nu, T)$
- **Kirchhoff-törvény**:

$$\frac{e(\nu, T)}{a(\nu, T)} = \frac{E(\nu, T)}{A(\nu, T)} = \frac{c}{2\pi} u(\nu, T)$$



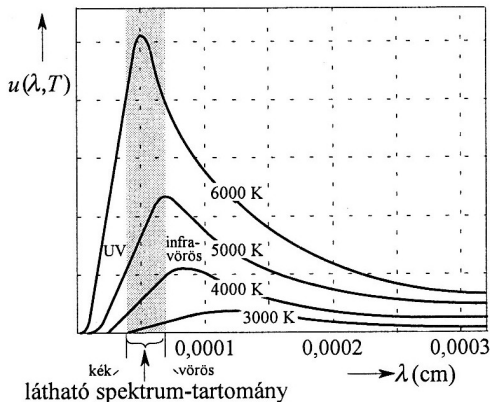
A Stefan-Boltzmann-féle törvény

- A Stefan-Boltzmann-féle törvény:

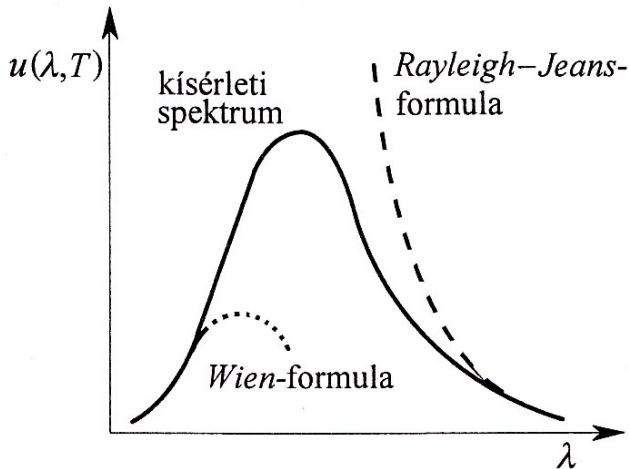
$$E(T) = \sigma T^4$$

- Wien-féle eltolódási törvény:

$$\lambda_{\max} T = \text{konstans}$$



A Planck-féle sugárzási törvény



- Korábbi elméletek \Rightarrow hibás eredmények

A Planck-féle sugárzási törvény

Kiinduló feltételezések:

- Hőmérséklet \Rightarrow hőmozgás \Rightarrow a töltések apró (különböző frekvenciájú) oszcillátorként működnek
- Ezek az atomi oszcillátorok kölcsönhatnak az elektromágneses térrel \Rightarrow energiacsere az anyag és a tér között
- Az oszcillátorok energiája nem lehet tetszőleges, hanem egy minimális egységnek az egész számú többszöröse:

$$\epsilon_n = n \cdot \epsilon_0, \quad \epsilon_0 = h \cdot \nu$$

Planck állandó: $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

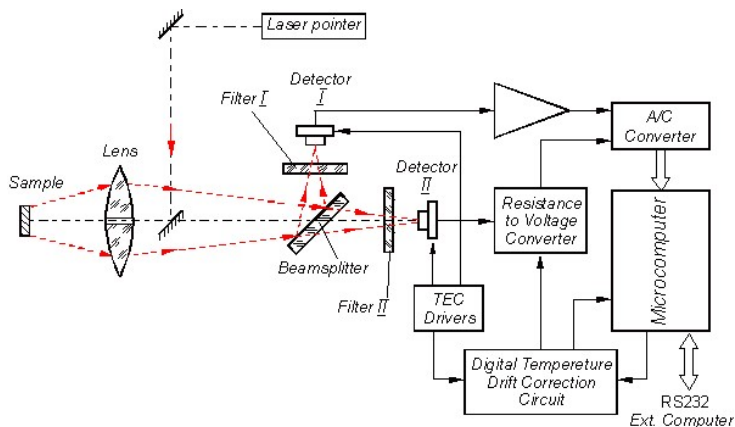
- Az energiaátadás a tér és az anyag között is csak ezeket a diszkrét értékeket veheti fel

A végeredmény:

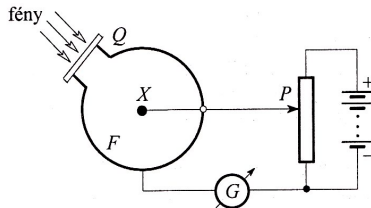
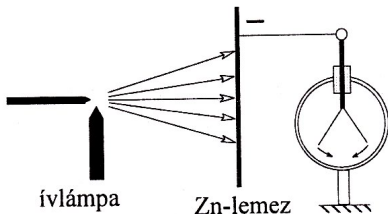
$$u(\nu, T) = \frac{4\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

A pirométer

- Magas hőmérsékletek mérése:
 - sugárzás intenzitása
 - a sugárzás hullámhossza (\Rightarrow színhőmérséklet)

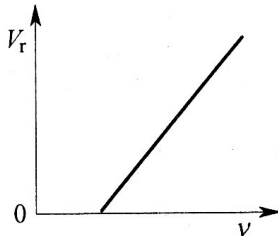
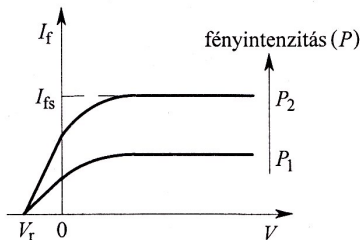


Fényelektromos jelenségek



- Fény hatására elektronok lépnek ki a fémből (fotoeffektus)
- Fotocella: fény hatására áram indul meg

A fotocella árama



- A fényintenzitás a maximális áramot határozza meg
- A fény hullámhossza az elektronok maximális energiáját határozza meg
- Az elektronok kilépése azonnal bekövetkezik
- Ezek a jelenségek a fény hullámmélettének ellentmondanak

Einstein-féle fényelektromos egyenlet

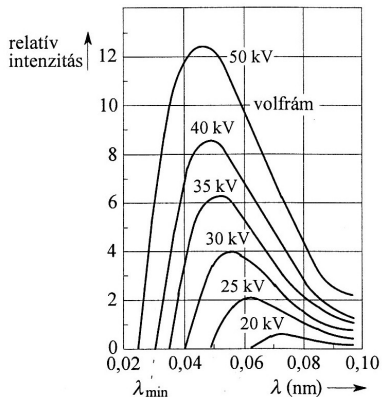
- **Fotonhipotézis:** a fény diszkrét, $h\nu$ energiájú fénykvantumokból (fotonokból) áll, melyek egyenes vonalban, fénysebességgel mozognak
A foton energiája:

$$E_{\text{foton}} = h\nu$$

- A kilépő elektronok maximális energiája (Einstein-féle fényelektromos egyenlet):

$$\frac{1}{2}mv_{\text{max}}^2 = h\nu - A$$

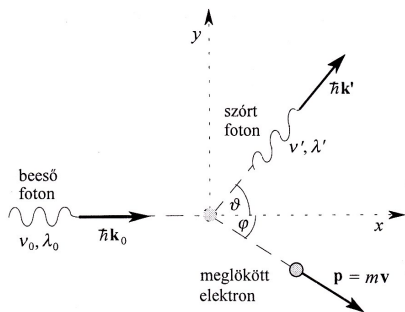
ahol A : a kilépési munka (anyagra jellemző)



- Egy röntgen foton csak egy elektrontól kaphat energiát

$$h\nu_{\max} = h \frac{c}{\lambda_{\min}} = \frac{1}{2}mv^2 = eV$$

A Compton-effektus



- Röntgenfotonok rugalmas ütközése elektronokkal: úgy viselkednek, mint egy részecske
- A foton tömege és impulzusa:

$$m_{\text{foton}} = \frac{h\nu}{c^2}$$

$$p_{\text{foton}} = \frac{h\nu}{c}$$

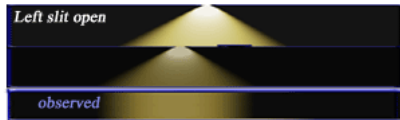
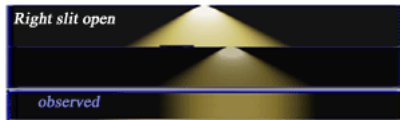
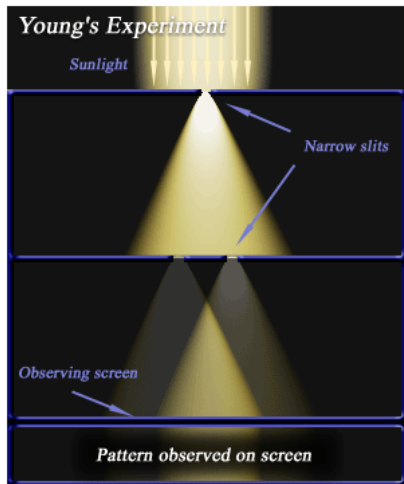
- Hullámszámvektor bevezetésével:

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \mathbf{p}_{\text{foton}} = \hbar \cdot \mathbf{k}$$

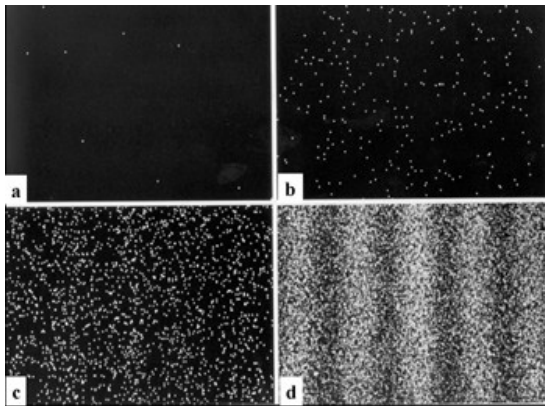
A fény kettős természete

- Hullámtermészet (elektromágneses hullám)
 - interferencia
 - polarizáció
- Részecske természet (meghatározott energia, impulzus és tömeg)
 - fotoeffektus
 - Compton-szórás
- Mindkét módon magyarázható jelenségek:
 - fénynyomás
 - Doppler-effektus

Interferencia



Elektronok interferenciája



- Az elektronok eloszlása ugyanolyan mintát követ, mint a fény interferenciaképe
(akkor is, ha egyszerre csak egy elektron van a rendszerben)

A mikrorészecskék kettős természete

- De Broglie: nem csak a fény, hanem minden mikroszkópikus részecske rendelkezik kettős természettel
- A részecskék mozgását egy hullámfüggvény írja le (\Rightarrow kvantummechanika)

$$mv = p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

$$\nu = \frac{E}{h} = \frac{mc^2}{h}$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

$$\Psi = Ae^{i(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t)}$$

Az elektronok kettős természete

- Ha az elektronokat felgyorsító feszültség: $U = 10^5 \text{ V}$
 $\Rightarrow \lambda \approx 0,04 \cdot 10^{-10} \text{ m}$
Ez megegyezik a röntgensugárzás hullámhosszával
- Diffrakciós kísérletek
(Laue, Bragg, Debye-Scherrer)
- Elhajlás, interferencia
- Elektronmikroszkóp: az elektronok hullámhossza befolyásolja a felbontást

Hasonlóan lehet vizsgálni az atomsugarak, molekulásugarak valamint a neutronok diffrakcióját (Stern és munkatársai)

A Heisenberg-féle határozatlansági reláció

- Egy részecske bizonyos megfigyelhető változóit (fizikai tulajdonságait) nem lehet egyszerre tetszőleges pontossággal meghatározni.
- Részecske helye és impulzusa
ok: de Broglie hullámok valószínűségi jelentése

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$$

- Energia - idő
Pl. egy energiaállapot energiájának meghatározottsága és az adott állapot élettartalma

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$$

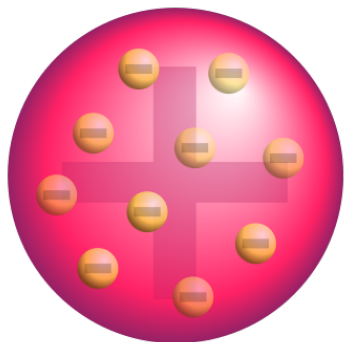
Az atomfogalom kialakulása

- Görögök:
Leukipposz, Démokritosz: minden létező kicsiny, az érzékszervek által nem látható atomokból áll.
- Állandó súlyviszonyok törvénye \Rightarrow
Dalton: az elemek kis részecskékből, atomokból állnak, a vegyületek ezek egyesülnek
- Avogadro-törvény: azonos térfogatú, nyomású és hőmérsékletű gáz azonos számú molekulát tartalmaz
- Brown-féle mozgás: a gáz és folyadékok részecskéinek véletlenszerű mozgása
- Kinetikus gázelmélet

Az atomfogalom kialakulása

- Laue: röntgensugarak elhajlása (\Rightarrow kristályrács)
- Prout: minden elem hidrogénatomokból áll
- Mengyelejev: az elemek tulajdonságainak szabályszerűségei \Rightarrow periódusos rendszer
- Az elektrolízis Faraday-féle törvényei
- Katódsugarak: az anyagból elektronok lépnek ki
Elektron töltésének és tömegének hányadosa Millikan-kísérlet: az elemi töltés nagysága
- Az energia kvantáltsága, részecske-hullám kettősség
 - Planck-féle sugárzási törvény
 - Optikai spektrumok \Rightarrow Bohr-féle atommodell
 - A fény részecsketermészete
 - A részecskék hullámtermészete \Rightarrow Kvantummechanika

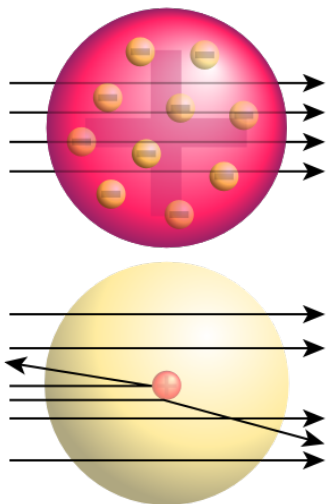
A Thomson-féle atommodell



- A + töltés egy tömör gömbben egyenletesen oszlik el
- A pontszerű elektronok ebben a gömbben helyezkednek el (mazsolás puding)

- Katódsugarak szóródása \Rightarrow az anyag nem lehet tömör
- Lénárd-féle atommodell: a + töltések kis helyeken csoportosulnak

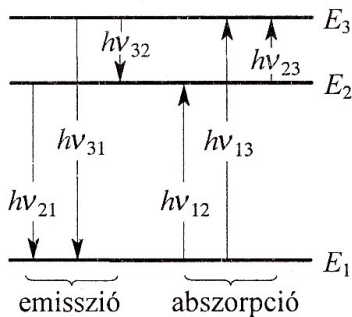
Rutherford-féle atommodell



- Rutherford-féle szórás kísérlet:
 α -sugarak szórása aranyfólián
Az eltérülő részecskék eloszlásából következtetni lehet az anyag szerkezetére.
- Az + töltés kis térfogatban összpontosul
- Az atommag körül keringenek az elektronok
A klasszikus elektrodinamika szerint a keringő elektronok sugároznak, így energiát veszítenek, majd beesnek az atommagba \Rightarrow ez a modell instabil.

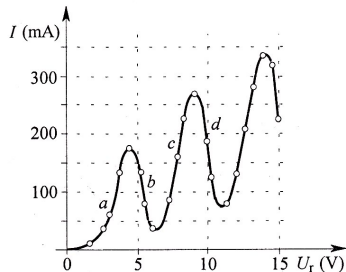
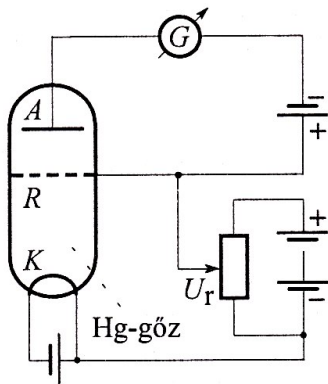
A Bohr-féle atommodell

- Az atom elektronjai csak stacionárius, állandó energiájú pályákon tartozkodhatnak
⇒ az atom nem sugároz
- Sugárzás abszorpciója vagy emissziója csak stacionárius állapotok közötti átmenetkor lehetséges



$$h\nu = E_n - E_k$$

Franck-Hertz kísérlet



- A meghatározott energiájú elektronok átadják energiájukat a gáznak, ekkor lefékeződnek

Az atomi energianívók

- Diszkrét, jól meghatározott energiaszintek
- Energiaközlés a környezettel \Rightarrow elektromágneses hullám: jól meghatározott, diszkrét energiacsomagok

$$h\nu = E_n - E_k$$

- Idő mérése: $T = 1/\nu$
- Távolság mérése: $\lambda = c/\nu$

A hidrogén atom Bohr-féle elmélete

- A hidrogén atom:
 - atommag: M tömegű, $+e$ töltésű, nyugalomban van; $Z = 1$
 - elektron: m tömegű, $-e$ töltésű, körpályán kering
- Bohr-féle kvantálási feltétel: az impulzusmomentum csak diszkrét értéket vehet fel

$$mrv = n \frac{h}{2\pi}$$

ahol n : **főkvantumszám**

A körpálya feltétele:

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r^2}$$

- A pálya sugara:

$$r_n = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{Zme^2} n^2$$

A hidrogén atom Bohr-féle elmélete

- A elektron energiája:

$$E_n = -\frac{Z^2 e^4 m}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2} \frac{1}{n^2} + E_0$$

- Az állapotok közötti átmenetkor kisugárzott energia:
(kezdőállapot: n , végállapot: k)

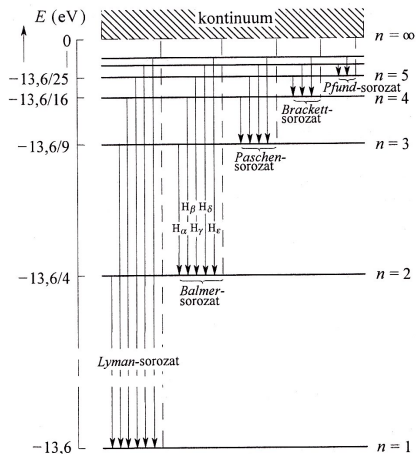
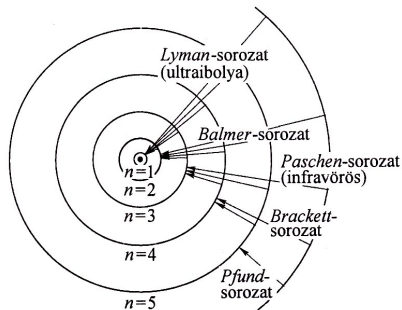
$$h\nu = E_n - E_k = \frac{Z^2 e^4 m}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2} \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Rydberg-állandó:

$$R = \frac{e^4 m}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^3 c}$$

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

A hidrogén atom spektruma



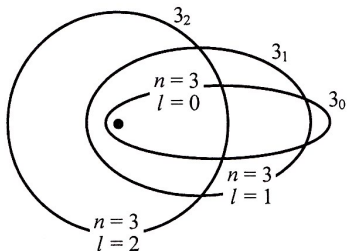
A Bohr-Sommerfeld-féle hidrogénatom modell



- Elegendően nagy felbontóképesség \Rightarrow a színeképvonalak nem egyszerű vonalak, hanem több, egymáshoz közel álló komponensből állnak



\Rightarrow nem csak körpályák lehetségesek, hanem ellipszis pályák is:



A hidrogénatom kvantummechanikai modellje

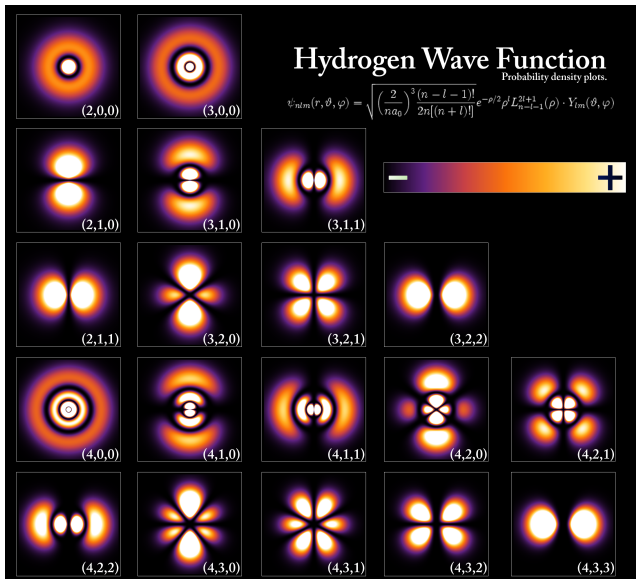
- Elektron: egy hullámfüggvény írja le
- Az elektron Schrödinger-egyenlete a hidrogénatomban:

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi + U\psi = E\psi$$

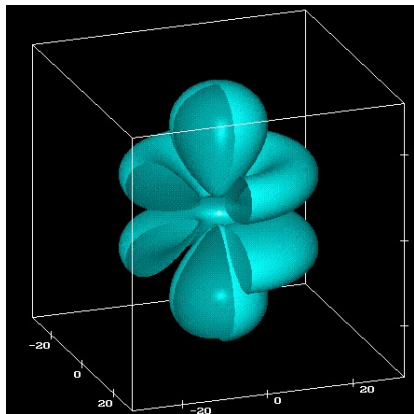
Polár koordinátarendszerben:

$$\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial\psi}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial\psi}{\partial\theta}\right) + \frac{1}{r^2\sin^2\theta}\frac{\partial^2\psi}{\partial\phi^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U) = 0$$

A hidrogénatom kvantummechanikai modellje

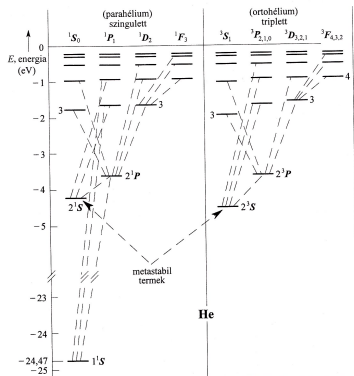


A hidrogénatom kvantummechanikai modellje



- n – főkvantumszám (pálya sugara, energiája)
- l – mellékkvantumszám ($0, 1, \dots, n-1$)
a pálya impulzusmomentuma (alakja)
a pályák elnevezése: s, p, d, f, g, h
- m_l – mágneses kvantumszám ($-l, \dots, +l$)
a pálya irányítása (egy külső térhez képest)
- m_s – spinquantumszám ($\pm 1/2$)
az elektron saját-impulzusmomentumának iránya

- Elektronokat tartalmazó rendszerben nem lehet több elektron ugyanabban a kvantumállapotban.
- A Pauli-elv minden fermion-ra igaz. (Fermion: feles spinnel rendelkező részecske.)
- Következmény: egy elektronpályán (rögzített n , l és m_l) két ellenkező spinű elektron tartózkodhat.

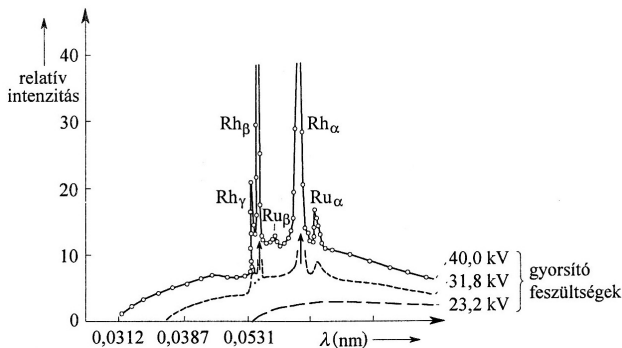


- Több elektron \Rightarrow több energiaszint
- Mely átmenetek között történhet fénykibocsátás: **kiválasztási szabályok**

$$\Delta l = \pm 1, \quad \Delta m_l = 0, \pm 1, \quad \Delta s = 0$$

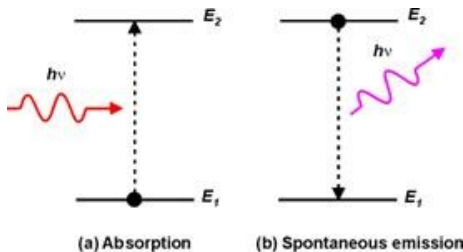
- **Tiltott átmenetek:** ezen átmenetek között nincs dipólsugárzás
Az átmenet mégis megtörténhet, de jóval kisebb valószínűséggel. Okok: magasabb rendű sugárzások, további hatások figyelembevétele.
- **Metastabil állapotok:** csak tiltott átmenettel kerülhetnek alapállapotba, élettartamuk ezerszeres egy átlagos állapothoz képest.

Karakterisztikus röntgensugárzás



- Ütköző elektron \Rightarrow kilökődhet egy elektron a belső héjakról
- Héj betöltése egy magasabb energiaszintről \Rightarrow röntgenfoton
- A karakterisztikus sugárzás spektruma jellemző az anyagra
- A rendszám növekedésével a nagyobb energiák felé tolódnak a vonalak

Kölcsönhatás az elektromágneses térrel



- Abszorpció: egy foton elnyelődik \Rightarrow gerjesztett állapot

$$P_\beta = N_1 B_{12} u(\nu_{12}) h\nu_{12}$$

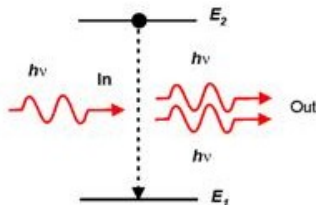
B_{12} : abszorpció valószínűsége, P_β : az elnyelt sugárzás teljesítménye

- Spontán emisszió: külső hatás nélkül alapállapotba kerül az elektron

$$P_\alpha = N_2 A_{21} h\nu_{12}$$

A_{21} : spontán emissziós átmeneti valószínűség

Kényszerített emisszió



(c) Simulated emission

- Külső tér \Rightarrow kényszerrezgés \Rightarrow a kibocsátott foton paraméterei megegyeznek a bejövő fotonnal

$$P_\gamma = N_2 B_{21} u(\nu_{12}) h\nu_{12}$$

B_{12} : indukált emissziós átmeneti valószínűség

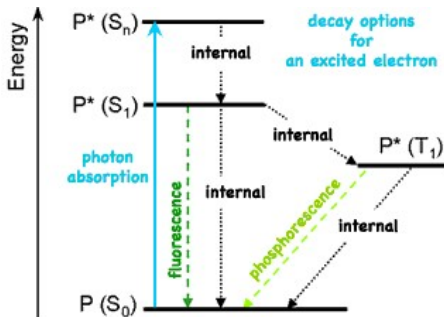
- Egyensúly feltétele

$$P_\alpha + P_\gamma = P_\beta$$

Lumineszcencia

- **Lumineszcencia:** a fénykibocsátás oka nem a sugárzó test hőmérséklete
+ energia \Rightarrow gerjesztett állapot \Rightarrow alapállapot + fény
- **Fluoreszcencia:** fény által történő gerjesztés. A kibocsátott fény hullámhossza eltér a gerjesztő fénytől





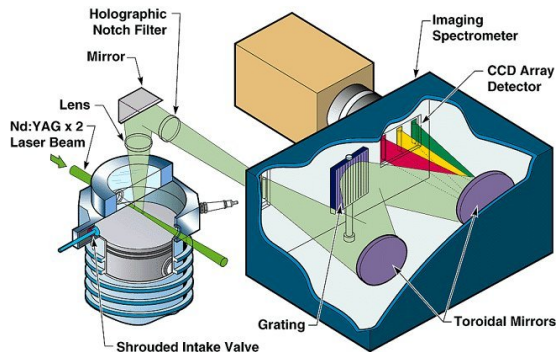
- A külső gerjesztés megszűnte után tovább tart
- Az atomok metastabil állapotba kerülnek
- Alapállapotba visszajutás:
 - további gerjesztés (hőmozgás), majd alapállapot
 - hosszabb várakozás

A lumineszcencia kiváltó okai

Kiváltó ok	Elnevezés
Fény	fotolumineszcencia
Elektron	katódlumineszcencia
Röntgen	röntgenlumineszcencia
γ -sugárzás	radiolumineszcencia
elektromos tér	elektrolumineszcencia
kémiai reakció	kemilumineszcencia
kristályok széttörése, összeolvadása	tribolumineszcencia
baktériumok, szentjánosbogár	biolumineszcencia

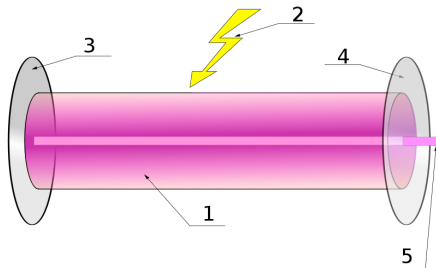
A kibocsátott/elnyelt fény az anyagra jellemző \Rightarrow

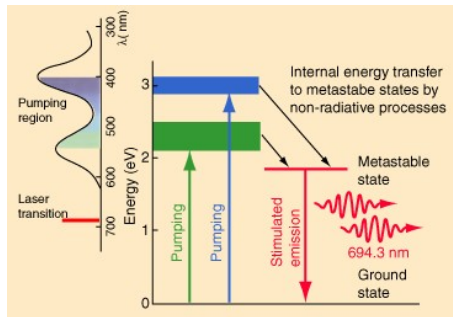
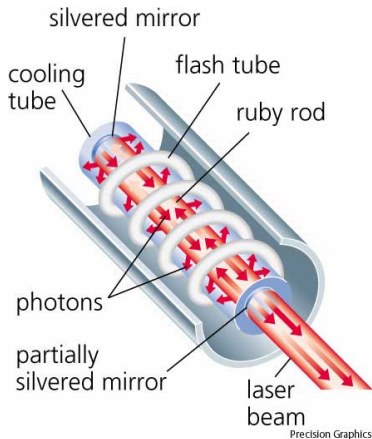
- anyagok azonosítása
- anyagszerkezet elemzése
- csillagok/bolygók összetétele



Broadband Multi-point Raman Scattering for the Measurement of Major Combustion Species

- **LASER:** Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
- Az erősítés feltétele: több atom legyen gerjesztett állapotban:
populáció inverzió
- Tulajdonságok:
 - monokromázia: nagy spektrális energiasűrűség
 - párhuzamosság \Rightarrow jól fókuszálható
 - rövid impulzusidő lehetséges \Rightarrow nagy teljesítmény
 - nagy fókuszált fényintenzitás érhető el ($10 \cdot 10^{20} \text{ W/cm}^2$)





- **Gázlézerek:** gerjesztés gázkisüléssel
Hélium-neon, Széndioxid, Argon-ion, ...
- **Kémiai lézerek:** gerjesztés kémiai reakció segítségével
Pl. Deutérium-fluorid lézer
- **Excimer lézerek:** *excited dimer*; olyan molekulákat tartalmaz, melyek csak gerjesztett állapotban léteznek
Argon-fluorid, Kripton-fluorid, ...
- **Szilárdtest lézerek:** gerjesztés villanólámpával
Rubin, Nd:YAG (Neodymium doped Yttrium-Aluminium Garnet),
Titán-zafír, ...
- **Festéklézerek:** szerves festék + gerjesztés nagyenergiájú lézerrel
Hangolható hullámhossz
- **Félvezető lézerek** (lézer-dióda)

Új felfedezések:

- Elektron
- Különböző atommodellek (Bohr-féle atommodell, kvantummechanika ...)
- Röntgensugárzás

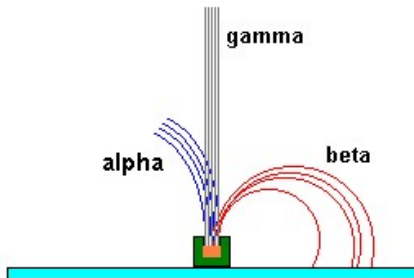
A természetes radioaktivitás jelensége

- 1896 Becquerel – uránsók vizsgálata
- Curie házaspár – radioaktív anyagok vizsgálata

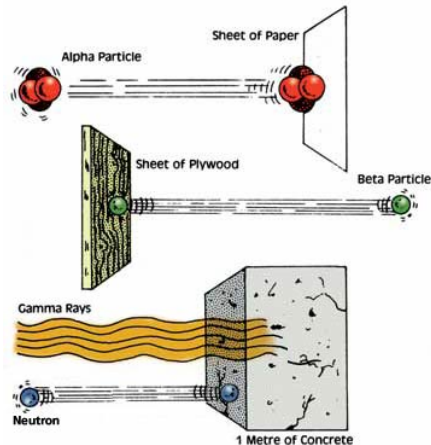
Az atommag közvetlen vizsgálata

- Elektronnyaláb, neutronnyaláb ütköztetése az atommaggal

A természetes radioaktív sugárzás



- α , β és γ sugárzás
- Mágneses térben az α és β sugárzás eltérül
- A hatótávolság függ a sugárzás típusától



- Fajlagos töltése fele a protonénak
 $Q = 2e, m_\alpha = 4 \cdot m_{H^+}$
- Hélium ionok (He^{++})
- Az α -részecskék sebessége a kibocsátó anyagtól függ

$$v = 1,4 \cdot 10^7 - 2,1 \cdot 10^7 \text{ m/s}$$

- Kinetikai energia

$$E = 4 - 9 \text{ MeV}$$

$$1 \text{ MeV} = 1,602 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

- Elektronokból áll
- Bármilyen sebességet felvehet
Akár relativisztikus nagyságút is (a fénysebességhez közelít)
 \Rightarrow tömegnövekedés
- Kinetikai energia

$$E = 1 \text{ keV} - 10 \text{ MeV}$$

- Elektromágneses sugárzás: γ -fotonok
- Nagy frekvencia, kis hullámhossz
- Energia

$$E = 0,01 - 4 \text{ MeV}$$

- Hullámhossz

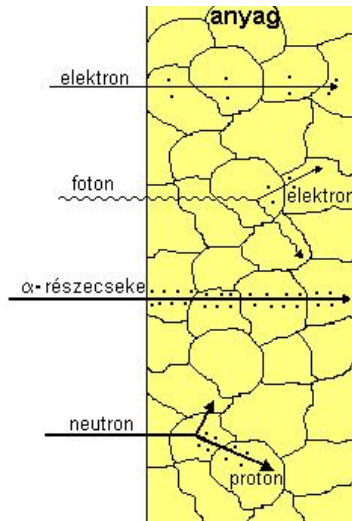
$$\lambda = (1 - 0,003) \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

- Frekvencia

$$\nu = 3 \cdot 10^{18} - 3 \cdot 10^{21} \text{ Hz}$$

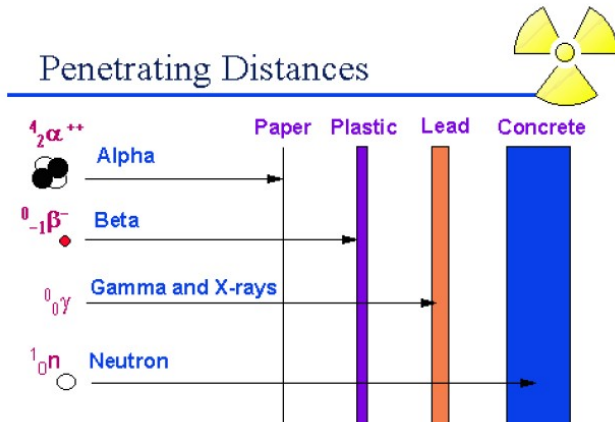
A radioaktív sugarak hatásai

- Ionizáló hatás: a sugárzás ionizálja az anyag atomjait (molekuláit), közben veszít az energiájából
- α -részecske: 1 cm úton $10^4 - 10^5$ ionpár (**fajlagos ionizáció**)
- β -részecske: több százszor kisebb
- γ -részecske: több tízezerszer kisebb
- Az ionizáló hatás függ a részecske aktuális energiájától



Hatótávolság

- Függ az energiától valamint az anyagtól
- Hatótávolság levegőben
 - α -részecske: < 1 cm
 - β -részecske: néhányszor 10 cm



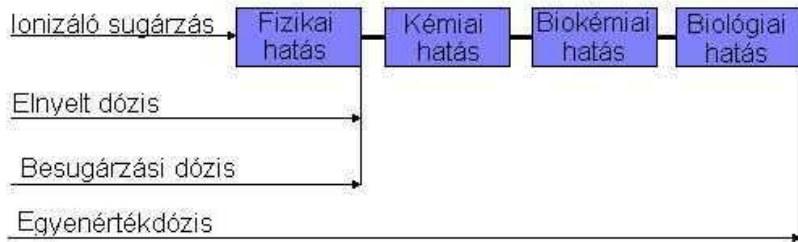
A sugárzás abszorpciója

- Nagyobb ionizáló hatás \rightarrow nagyobb abszorpció
- γ -sugárzás (hasonló a röntgensugárzáshoz):

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

- β -sugárzás: torzul a törvény
- α -sugárzás: nem érvényes rá az exponenciális törvény, rövid hatótávolságon belül elnyelődik

- Cél: a sugárzás hatásának mérése
- A radioaktív anyagok **aktivitása**
becquerel: a másodpercenkénti bomlások száma
- Dózisfogalmak:



- Biológiai hatás: **dózisegyenérték** (sievert)

$$H = DQY$$

- D : elnyelt sugárzás (egysége: gray)
egységnyi tömegben elnyelt energiamennyiség
- Q : a sugárzás minőségi faktora
 $\beta, \gamma \rightarrow 1; \alpha \rightarrow 20$
- Y : besugárzott objektum (szerv) minőségi tényezője

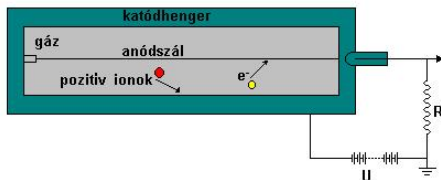
A radioaktív sugarak kísérleti vizsgálata

Célok:

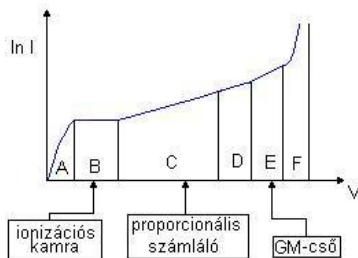
- Atommagban lejátszódó folyamatok vizsgálata (bomlás, ...)
- Magreakciók vizsgálata
- Részecskefizikai kísérletek
- Biztonságtechnika (radioaktív sugárzás követése)



Ionizációs kamrák



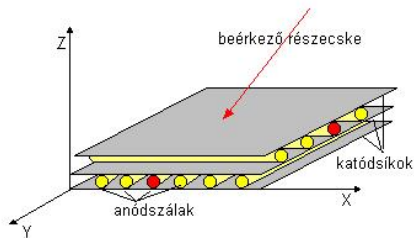
- Légritkított cső + nagy feszültség
- Ionizáló sugárzás
 - ⇒ elektron-ion párok
 - ⇒ gázkisülés
- Felhasználás:
 - Részecskék megszámlálása
 - Energia mérése
 - Pálya láthatóvá tétele
 - Dozimetria



Geiger-Müller-számláló (GM-cső)

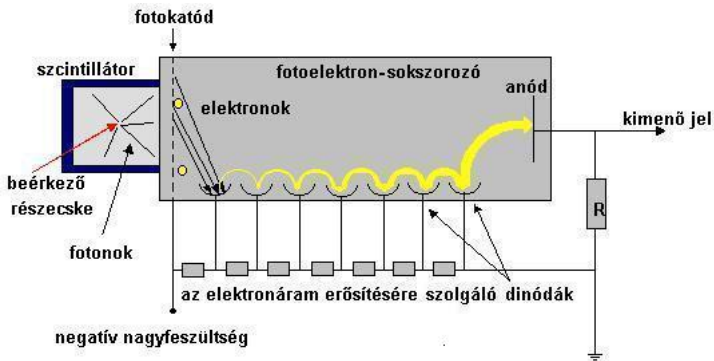
- Ionizáló részecske \Rightarrow ionlavina
- Az ionlavina mérete nem arányos a primer ionizációval, csak beütésszám van mérve



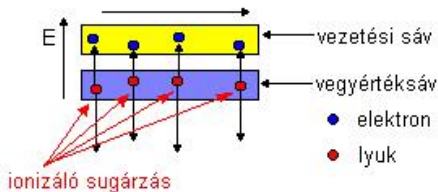


- Részecske áthaladásának helye
- Részecske energiája

Szcintillációs számlálók



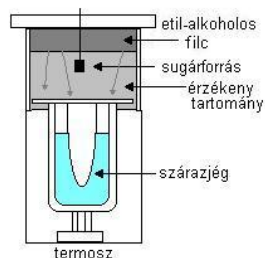
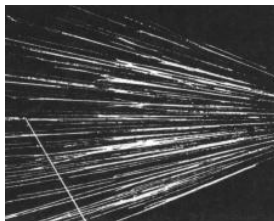
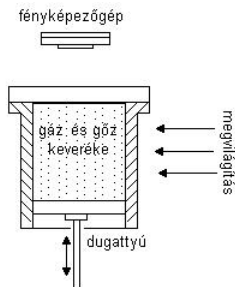
- Szcintillátor: ionizáló sugárzás \Rightarrow gerjesztés \Rightarrow foton
- Fotoelektron-sokszorozó: foton \Rightarrow elektron \Rightarrow sok elektron



- Ionizáló sugárzás \Rightarrow szabad töltéshordozók \Rightarrow vezetés

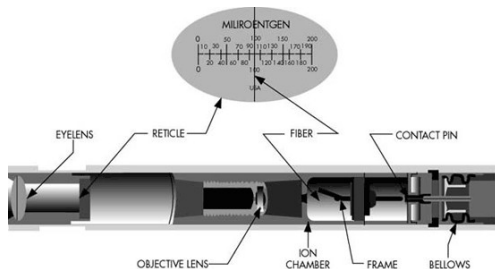
Részecskenyom detektorok

- Expanziós ködkamra (Wilson-kamra)
Hirtelen lehűlés \Rightarrow túltelített gőz
- Diffúziós ködkamra (alacsony hőmérsékletű tartomány)
- Buborékkamra (túlhevített folyadék)
- Szilárdtest nyomdetektorok (sugárzás \Rightarrow maradandó változás)



Doziméterek

- Cél: a személyeket érő dózis követése
- Film-doziméter
Ki kell dolgozni
- Szilárdtest doziméterek
Pl. termolumineszcens doziméter: kiolvasás felmelegítéssel
- Zseb ionizációs kamra



A radioaktív bomlás

- **Bomlás:** egy atommagból spontán módon, külső hatás nélkül különböző részecskék keletkeznek
- Főbb bomlások:
 - α -bomlás: α részecske távozik
 $\Delta A = -4, \Delta Z = -2$
 - β -bomlás: $\Delta Z = +1$
 - β^+ bomlás: pozitronok lépnek ki
 $\Delta Z = -1$
 - γ -bomlás: az atommag egy gerjesztett állapotból alapállapotba kerül

A bomlási törvény

- N : az atomok száma egy t időpillanatban
 - ΔN : az időegység alatt elbomló atomok száma
 - λ : **bomlási állandó**, $1/\lambda$: átlagos élettartam

$$-\Delta N = \lambda N \Delta t$$

– dN/dt : bomlási sebesség: arányos a bomlatlan atomok számával

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

- A differenciálegyenlet megoldása:

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

A bomlási törvény

- **Felezési idő:** az az idő, amíg a bomlatlan atomok száma a felére csökken (T)

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T}$$

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0,693}{\lambda}$$

- A bomlási törvény másik alakja

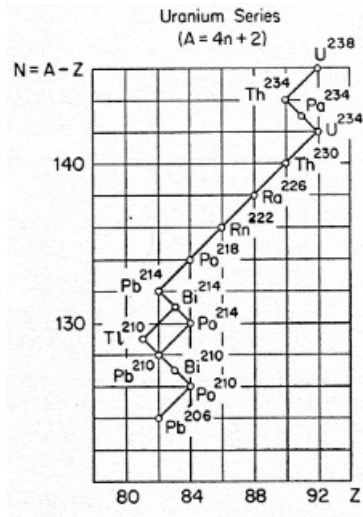
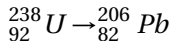
$$N = N_0 2^{-t/T}$$

Bomlási sorozatok

- Radioaktív anyag bomlása → a keletkező atomok nem mindig stabilak, tovább bomlanak
- A nagy rendszámú ($Z > 80$) természetes radioaktív anyagok 3 bomlási sorozatba rendezhetők

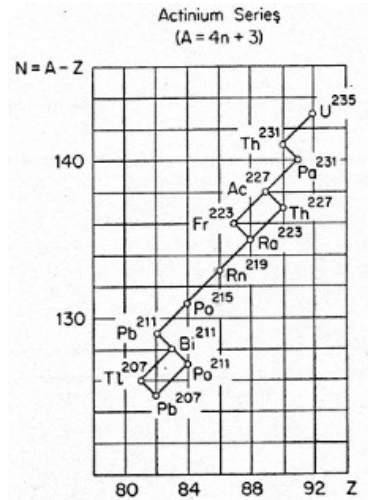
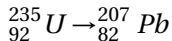
Uránium-sorozat

- A leghosszabb felezési idejű mag
felezési ideje: $4,47 \cdot 10^9$ év



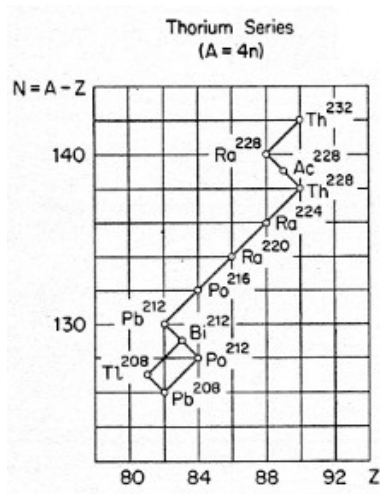
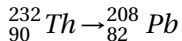
Aktinium-sorozat

- A leghosszabb felezési idejű mag
felezési ideje: $7,04 \cdot 10^8$ év



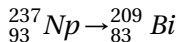
Tórium-sorozat

- A leghosszabb felezési idejű mag felezési ideje: $1,41 \cdot 10^{10}$ év

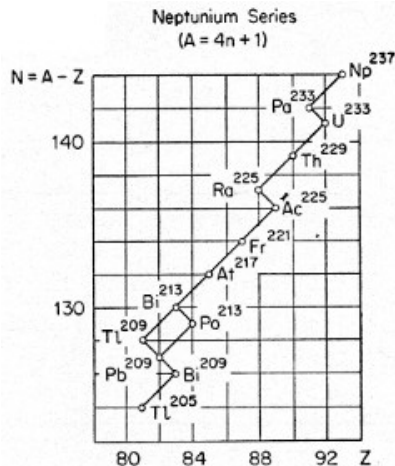


Neptúnium-sorozat

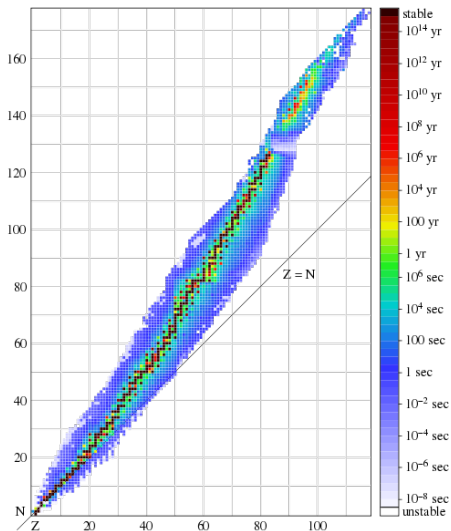
- A leghosszabb felezési idejű mag
felezési ideje: $2,14 \cdot 10^6$ év



- Már elbomlottak



- Egy adott, Z rendszámú elem: az őt alkotó atomok tömegszáma (atomsúlya) nem azonos. A kémiai elemek nagy része **izotópok** keveréke, az izotópok aránya általában állandó.
 - Kémiaailag csaknem azonos viselkedés
 - Azonos rendszám (azonos magtöltés)
- Az izotópok atomtömegei jó közelítéssel egész számok
- 50 stabil, 250 természetes radioaktív, több mint 1000 mesterséges izotóp

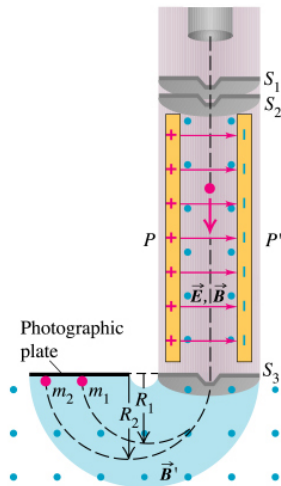


Tömegspektroszkópok

- Cél: a különböző e/m hányadosú ionok megkülönböztetése, az ionok arányának meghatározása
- **Tömegspektrométer:** méri az ionáramokat
- **Felbontóképesség:**

$$F = m/\Delta m$$

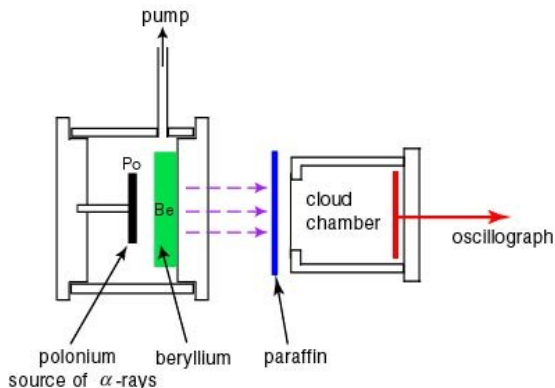
ahol Δm a legkisebb felbontható tömegkülönbség



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

A neutron felfedezése

- 1930 Boethe és Becker: berillium + α -sugárzás \Rightarrow nagy áthatolóképességű, semleges sugárzás (γ ?)
- 1932 Curie és Joliot: + parafinréteg \Rightarrow nagyenergiájú protonok lépnek ki
- Chadwick: semleges részecskék, $m \approx m_p$

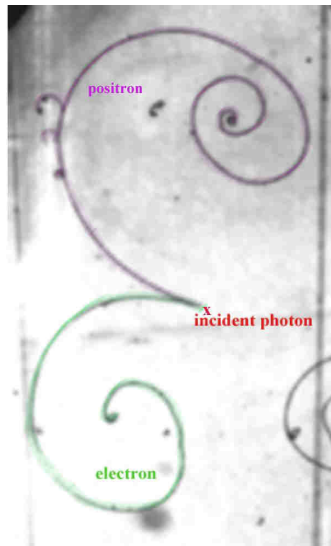


A neutron tulajdonságai

- Elektromos és mágneses térben nem térül el
- Az atom külső részén áthatol anélkül, hogy az atomot ionizálná
- Rendkívül nagy áthatolóképesség
- Sebességéből csak akkor veszít, ha az atommaggal közvetlenül összeütközik
- Jelölés: n , ${}_0^1n$
- $m_n = 1,00138 m_p$
- Szabadban elbomlik, felezési idő: 10,61 perc
- Spin: $1/2$
- Van mágneses momentuma

A pozitron

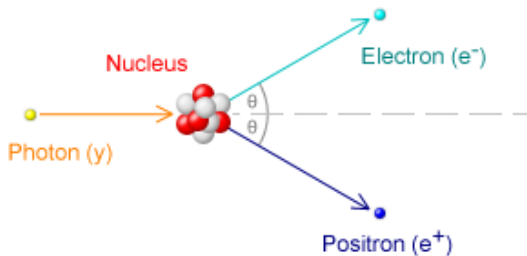
- 1932 Anderson:
ködkamra + mágneses tér + kozmikus sugárzás \Rightarrow elektronhoz hasonló nyom, csak ellenkező irányba görbül
- elektronnal egyező tömegű részecske
- pozitív töltésű



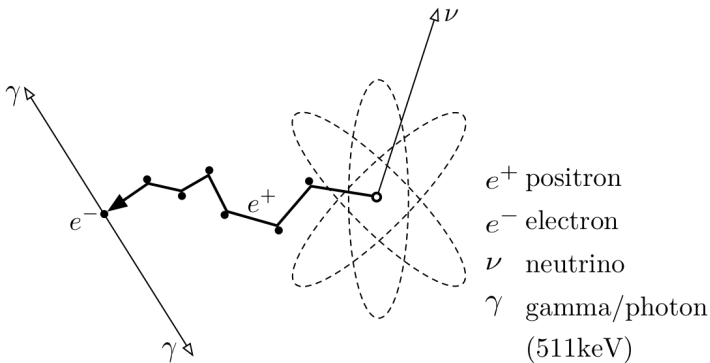
Pároképződés

- Elegendően nagy energiájú γ -sugárzás \Rightarrow a foton elnyelődik, helyette keletkezik egy elektron és egy pozitron
- Atommag közelében játszódik le (energia- és impulzus-megmaradás!)
- A foton energiája:

$$h\nu > 1,02 \text{ MeV}$$



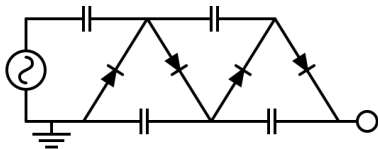
- elektron + pozitron \Rightarrow 2 γ -foton



- Az atommagok és részecskék vizsgálatának legfontosabb módszere: részecskék közötti ütközések létrehozása, majd a szétrepülő részecskék vizsgálata
- Megfelelő energiájú részecskenyaláb ütköztetése a céltárggyal
- Kezdetek: természetes radioaktív bomlás felhasználása
- Részecskegyorsító: elektromos terek segítségével töltött részecskék nyalábját nagy energiára gyorsítjuk fel
 - folytonos/impulzusüzemű
 - lineáris/ciklikus
- Ionforrás
- További alkalmazások
 - orvosi alkalmazások (radioterápia)
 - anyagszerkezeti vizsgálatok
 - ipari alkalmazások (anyagszerkezet átalakítása, kutatás)
 - biológiai kutatások

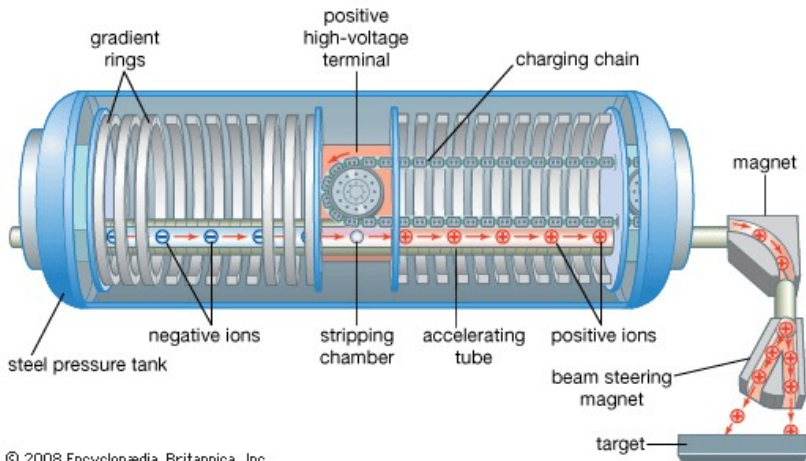
Cockcroft-Walton-gyorsító

- Nagyfeszültség létrehozása:
kaskádgenerátor
- $E_{\max} \approx 1 \text{ MeV}$



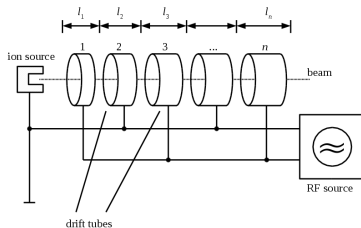
Van de Graaff-generátor

- $E_{\max} \approx 20 \text{ MeV}$
- Energia kétszerezése: tandem elrendezés



© 2008 Encyclopædia Britannica, Inc.

Lineáris részecskegyorsító

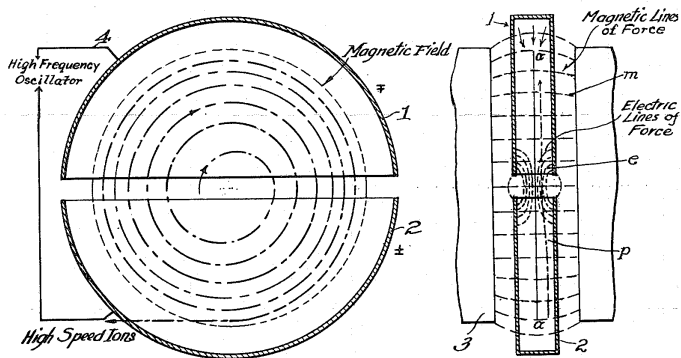


- SLAC: 3km, 50 GeV



Ciklotron

- Elektronnyaláb létrehozása
- $E_{\max} \approx 20 \text{ MeV}$



- $E_{\text{max}} \approx 7000 \text{ GeV}$

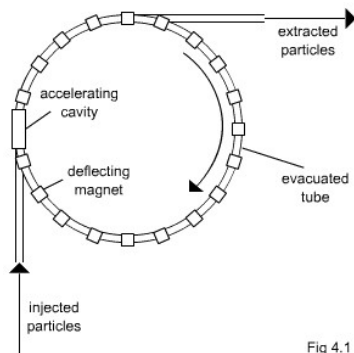
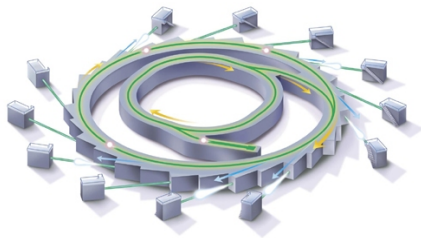
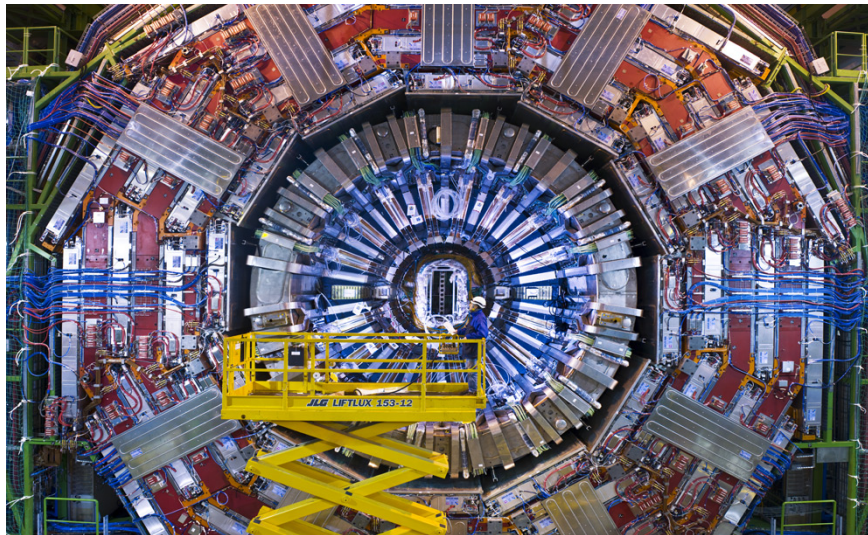
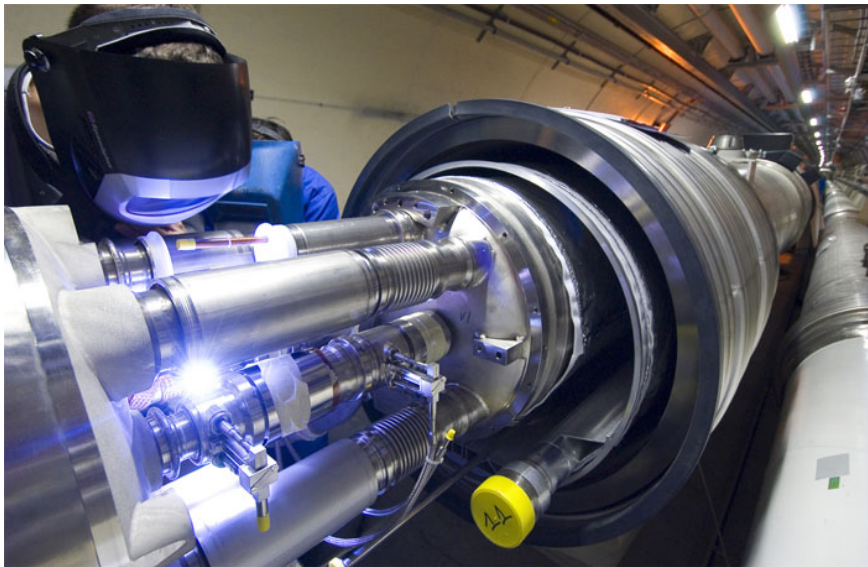


Fig 4.1









- 1977 Rutherford:
 α -részecske + $^{14}\text{N} \Rightarrow$ proton lépett ki
- Az atommagok át tudnak egymásba alakulni, a természetben elő nem forduló részecskéket is létre lehet hozni
- **Megmaradási tételek:**
 - töltésmegmaradás
 - nukleonszám-megmaradás
 - perdület
 - energia
 - paritás (néha sérül)
 - leptonszám (könnyű részecskék: elektron, neutrínó, ...)

- Rugalmas szórás
- Rugalmatlan szórás
- Sugárzásos befogás
- Fotoreakciók
- Stripping
- Picking up
- Nukleoncserék
- Többrészecske-reakciók
- Hasadás
- Fúzió
- Nehézion-reakciók

Az atommag felépítése

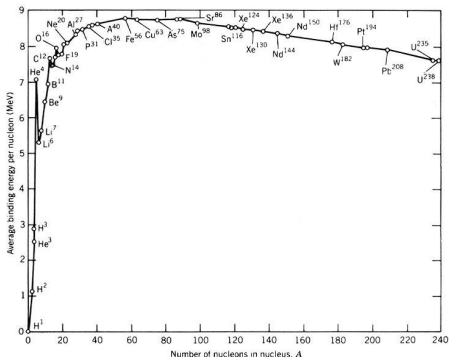
- Protonok + neutronok
(a tömegük közel azonos)
- Tömegszám (A): protonok és neutronok száma
- Rendszám (Z): protonok száma (a mag töltése)
- Neutronok száma (N): $A - Z$
- Az atommag tömege minden esetben kisebb, mint a magot alkotó protonok és neutronok tömegének összege \Rightarrow tömeghiány

$$\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_{\text{mag}}$$

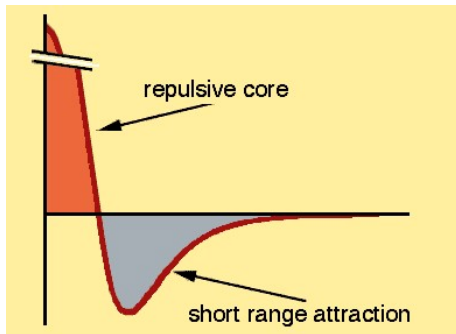
Kötési energia

- $\Delta m \cdot c^2$: ez az energia szabadul fel, amikor a magot az alkotóelemekből összerakjuk \Rightarrow **kötési energia**
- Tömeg-energia ekvivalencia:

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



- Vonzó kölcsönhatás, amely a nukleonok között hat
- Rövid hatótávolságú ($10 \cdot 10^{-15}$ m)
- Nagyon kis távolságra taszítóvá válik
- \Rightarrow a magok sűrűsége közel állandó



A cseppmodell

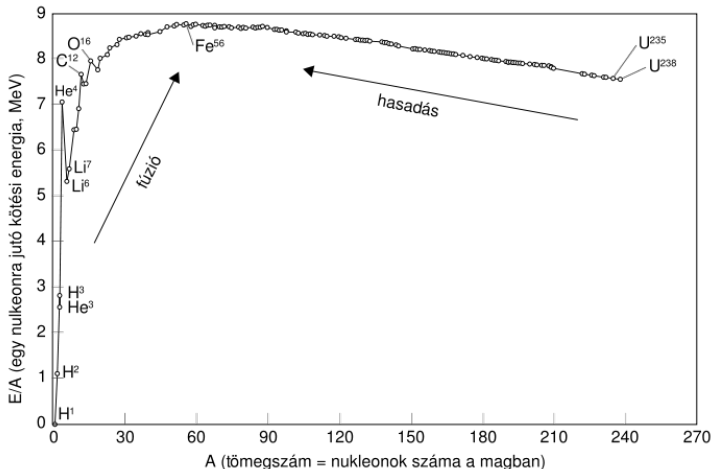
- A mag sűrűsége állandó \Rightarrow összenyomhatatlan folyadék: egymással érintkező azonos sugarú gömbök halmaza
- Félempirikus formula a kötési energiára

$$E_k = a_t A - a_f A^{2/3} - a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_{sz} \frac{A - 2Z^2}{A} - \epsilon a_p A^{-3/4}$$

- térfogati tag: a kötési energia arányos a nukleonok számával
- felületi tag: a felületen lévőkre kevesebb társ hat
- Coulomb-tag: a protonok elektromos taszítása
- szimmetria tag és párkölcsönhatási tag (\Leftarrow héjmodell)

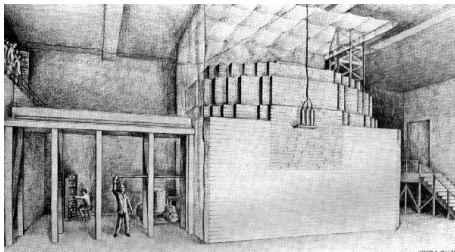
A radioaktivitás energetikai értelmezése

- Energiaminimumra való törekvés

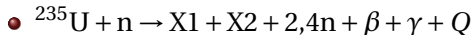


A maghasadás felfedezése

- Természetes „reaktorok” Gabon, kb 2 billió éve; 100 kW
- 1917 – Rutherford: $\text{Ni} + \alpha \Rightarrow$ nagy energiájú protonok
- 1932 – $\text{Li} + \text{p} \Rightarrow 2 \alpha$
- 1934 – Maghasadás (**fisszió**) gondolata
- 1938 – Hahn, Meitner, Strassman: $\text{n} + \text{U} \Rightarrow$ bárium
- 1942 – Chicago, Fermi, Szilárd, Wigner: első láncreakció
- 1945 – Első atombomba



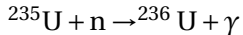
Az urán hasadása



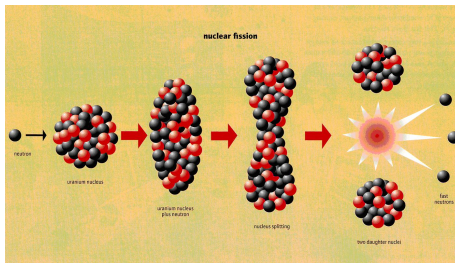
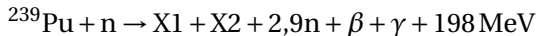
Az elsőként keletkező termékek tovább bomlanak, felezési idejük: 1 s – 10 000 év

$Q \approx 200 \text{ MeV}$ (kinetikus energia $\approx 169 \text{ MeV}$)

- Az esetek 20 %-ában

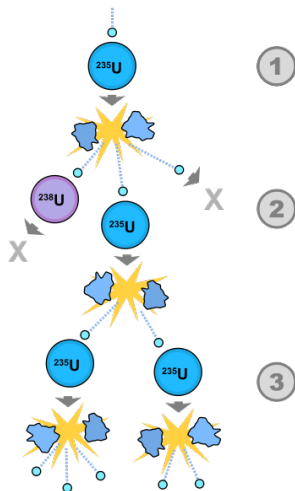


- Hasonló reakció:

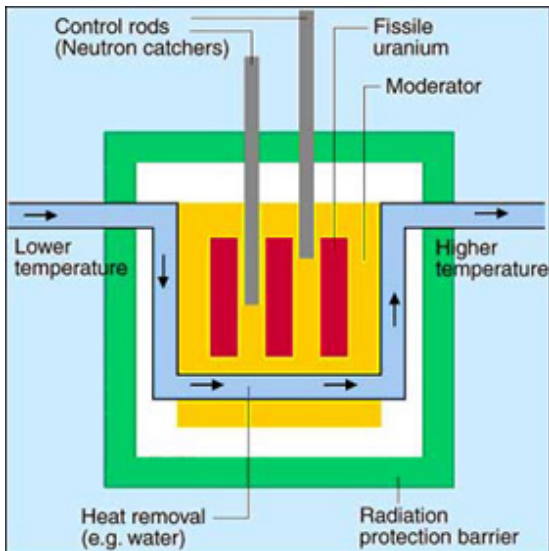


Láncreakció

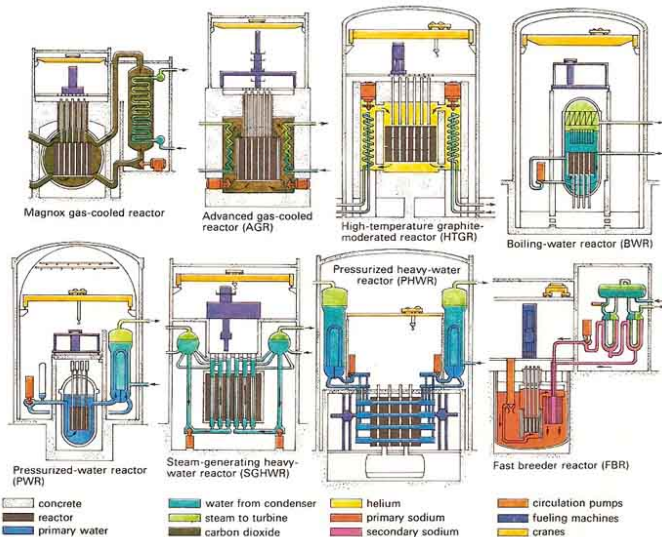
- A hasadáskor keletkezett neutronok újabb hasadóképes magokkal találkozhatnak
- Hatáskeresztmetszet függ a mag típusától és a neutronok sebességétől
- ^{235}U esetén a lassú, termikus neutronokra a legnagyobb a befogás valószínűsége
- **Szubkritikus láncreakció:** egyre kevesebb a hasadó atomok száma
- **Szuperkritikus láncreakció:** egyre több hasadás következik be (exponenciális növekedés)



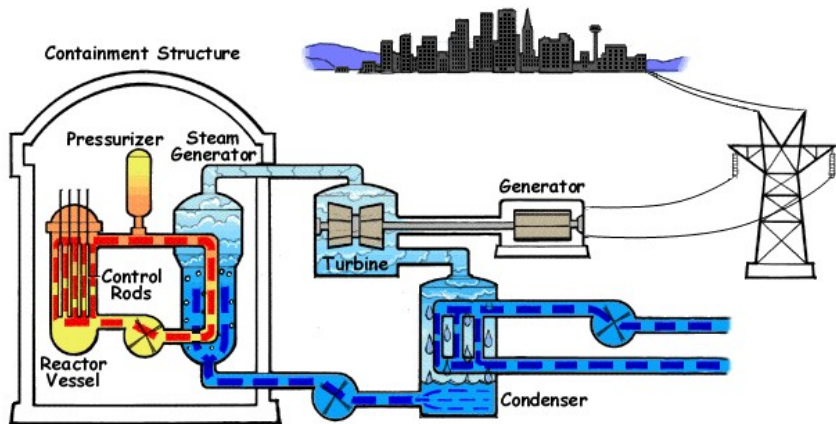
Reaktor elvi vázlata



Reaktortípusok



Nyomottvizes reaktor

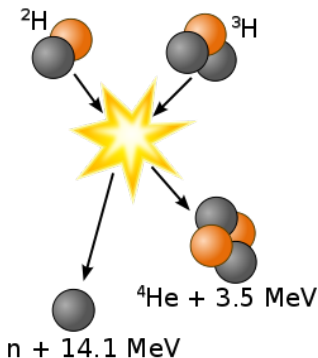


Fissziós erőművek problémái

- Biztonság kérdése
 - megfelelő tervezés
 - önszabályozó elrendezések
 - megfelelő képzés
 - előírások betartása
- A természetes uránnak csak 0,72%-a a hasadóképes ^{235}U
Szaporító reaktorok: $^{238}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$
Magasabb hatásfok (hőmérséklet növelése)
- A hasadási termékek akár 10 000 évig sugároznak
Semlegesítés speciális reaktorokban?

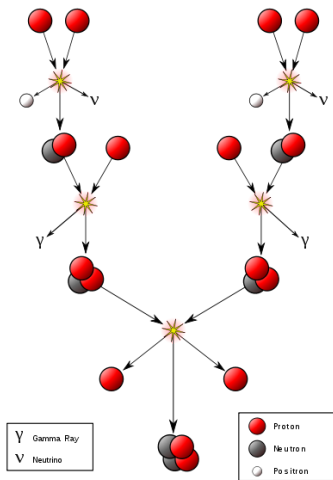
A fúzió

- Könnyű magok \rightarrow nehéz mag + energia
- Le kell győzni a Coulomb tasztítást
Az ehhez szükséges energia $\approx 10\text{ keV}$.
Ez 120 000 000 K hőmérsékletnek felel meg.
Alacsonyabb hőmérsékleten:
alagúthatás \Rightarrow bizonyos
valószínűséggel bekövetkezik a reakció.



A csillagokban lejátszódó fúziós folyamatok

- Hidrogén "égése"
- Hélium "égése"
- ...
- Nagyobb rendszámú elemek keletkezése \Rightarrow Mg
- Nehezebb elemek létrehozása: szupernóva robbanás



- Müion katalizált fúzió (akár szobahőmérsékleten)
- Részecskegyorsító alapú fúziós berendezések
 $U_{gy} > 10\text{keV}$
Alkalmazás: gyors neutronok gyártása.
- Magas hőmérséklet elérése atombomba robbantásával
 \Rightarrow hidrogénbomba
- Magas hőmérsékletű plazma létrehozása
 - mágneses készülékek (tokamak)
 - lézer
 - elektromos kisülések

- Plazma lokalizálása: mágneses tér
- Felfűtés: változó mágneses tér
- ITER: 500 MW teljesítmény 1000 s-ig

