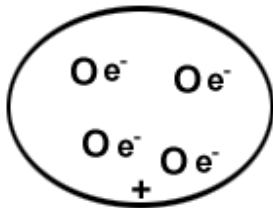


- **Az atommag felfedezése, az atommag főbb tulajdonságai**
- **A nukleáris kölcsönhatás, a nukleonok összetétele, kötési energia és tömegdefektus. A potenciálkád modell.**
- **Az egy nukleonra jutó kötési energia. A radioaktív bomlások értelmezése. A maghasadás és a magfúzió**

Atommag

Előzmény : 1897-ben J.J. Thomson felfedezte az elektronokat. Az atom modellje egy „mazsolás puding” volt.

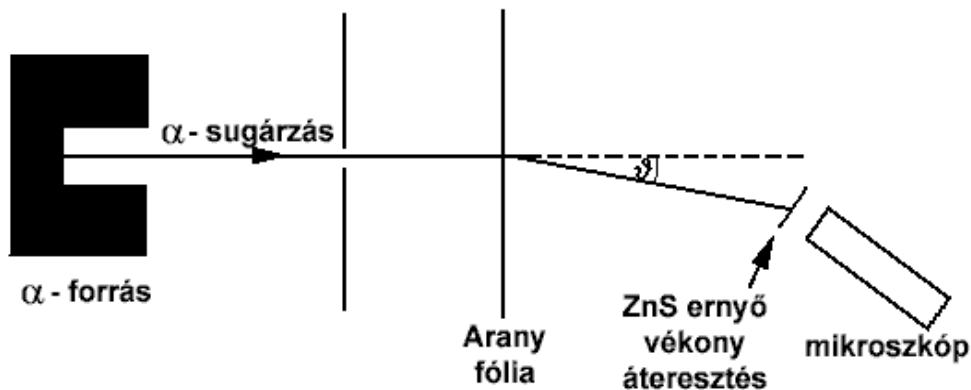


atommodell

(+) puding az atomtörzs, (-) mazsolák az elektronok

Rutherford kísérlet (1911) :

Felvették az $I(\gamma)$ függvényt



ZuS : 1 db α rész 1 db fényfelvillanást okoz (szcintilláció)

Kvalitatív tapasztalatok :

1. Az α sugarak több, mint 99,9%-a nem térül el.
2. Kb. 0,1% jelentősen eltérül.
3. Néhány α rész visszaszóródik

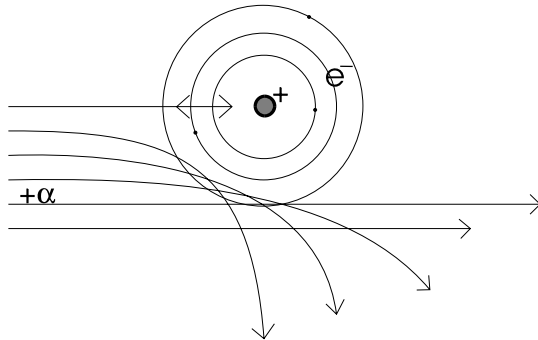
Klasszikus analógia: **szalmakazal golyószórózása:**

Meg akarjuk tudni, hogy van-e valami a szalmakazalban.

Elkezdjük egyenletesen megszórni golyókkal. A szalmakazal mögött felfogjuk a golyókat, és azt tapasztaljuk, hogy a lövedékek legnagyobb hányadának pályája nem változott, de néhány golyó mozgásának iránya nagymértékben megváltozott. Emiatt arra következtetünk, hogy a

szalmakazalban valamilyen kicsi, kemény tárgy van. A szalmakazalt megfeleltethetjük az atomnak, a kis tárgyat az atommagnak, a golyókat pedig az α - részecskéknak.

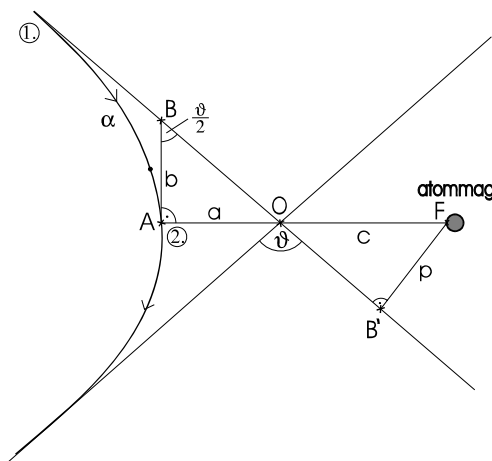
Az új atommodell: Középen, a kis térrészben helyezkedik el az anyag legnagyobb része, több, mint **99,9** %-a, ez az atommag.



Néhány elméleti megfontolás (az előadáson kevesebb matek ment le):

1, Geometriai megfontolás

Az α -részecske pályája kúpszelet, pontosabban **hiperbola**, melynek külső fókuszában helyezkedik el az atommag. Van némi hasonlóság a bolygómozgáshoz, mivel a Coulomb-törvény a gravitációs erőtvényhez hasonló alakú. Az atommag rögzítettségének feltételezése jó közelítés, mert tömege jóval nagyobb, mint az α -részecskéé.



hiperbola esetén ismert, hogy
 $(\text{lineáris excentritás})^2 =$
 $(\text{fél kistengely})^2 + (\text{fél nagytengely})^2$

$$\frac{ABO\Delta \sim B'FO\Delta}{c^2 = a^2 + b^2}$$

⇓
 a két Δ egybevágó

a: fél nagytengely
 θ : az eltérülés szöge
 atommag mellett.)

b: fél kistengely
p: ütközési paraméter (ilyen messze ment volna el az

c: fókusz távolság

Ami fontos: minél kisebb az ütközési paraméter, annál nagyobb az eltérülés szöge. (Egészen pontosan:

$$\text{ctg}\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{b}{a} = \frac{p}{a}$$

2, Megmaradási tételek

Mivel az atommag körül kialakult elektrosztatikus tér **konzervatív**, ezért érvényes benne a **mechanikai energia megmaradására** vonatkozó tétel.

Másrészt mivel **centrális**, érvényes a **perdületmegmaradás**.

Alkalmazzuk a két fent említett tételt az ábrán 1.-gyel illetve 2.-vel jelölt pontok (egy, az atommagtól távoli pont, és az A pont) között.

$$\frac{1}{2}mv_0^2 + 0 = \frac{1}{2}mv_A^2 + k \frac{q_1 q_2}{r_{\min}} \quad mv_0 p = mv_A r_{\min}$$

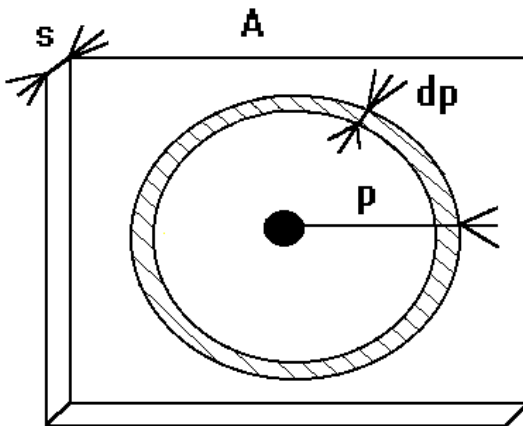
Igen fontos speciális eset, amikor az α - részecske éppen eltalálja (illetve eltalálná, ha nem pattanna vissza) az atommagot, azaz $p=0$. Ekkor természetesen $v_A=0$ és $\nu=180^\circ$. Ekkor

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = k \frac{q_1 q_2}{r_{\min}}, \text{ tehát az } \alpha \text{ - részecske energiájának ismeretében kiszámítható az a távolság,}$$

amelyre az α - részecske legjobban megközelíti a magot.

3, Statisztikus megfontolások

Minden pont felé ugyanolyan valószínűséggel halad α részecske.



dn_1 : annak a valószínűsége, hogy az α részecske a $(p, p+dp)$ ütközési tartományba esik

n : az összes α részecske száma

$2\pi p dp$: a körgyűrű területe

Geometriai valószínűség egy célpont esetén:

$$\frac{dn_1}{n} = \frac{2\pi p dp}{A}$$

Célpontok száma : NAs , $N = \frac{\text{atom}}{\text{térfogat}}$

Összes céltárgy : $\frac{dn}{n} = NAs \frac{dn_1}{n}$

Nem lehet biztosítani, hogy a $(\vartheta, \vartheta+d\vartheta)$ szóródási tartományt figyeljük.

Műszerrel a ϑ körüli $d\Omega$ térszöget lehet figyelni. Erre a következő ún. **Rutherford-formula** vezethető le:

$$\frac{dn}{n} = Ns\pi \left(\frac{kZ'e^2}{mv_0^2} \right)^2 \cdot \frac{1}{\sin^4\left(\frac{\vartheta}{2}\right)} \cdot d\Omega$$

A kísérlet eredménye

1. A szórási kép (az egységnyi térszögbe jutó α -részek száma), azaz a mért $I(\vartheta)$ egyezik a modell által szolgáltatott $\frac{1}{\sin^4\left(\frac{\vartheta}{2}\right)}$ összefüggéssel.

Ez a kísérlet volt az első bizonyíték az atommag létezésére.
 2. n ismeretében z' meghatározható.
 Az atommag töltése (+e egységben) egyezik a rendszámmal.
 Eredmény: $Z' = Z$

A rendszám hármas jelentése

1. sorszám a periódusos rendszerben
2. az atommag töltése +e egységben
3. a semleges atomban levő elektronok száma

Az atommag mérete

Kísérlet: ugyanez a szórás alumínium céltárgyon (Marsden-kísérlet)

Eredmény: eltérés van a Rutherford-formulától $\vartheta=180^\circ$ körül.

Következmény: az α -részek ténylegesen el is érik az atommagot, melyeknek ütközési paramatérük kicsi volt.

Tehát: $r_{\min}(\text{Au}) > R_{\text{Au}}$ R: atommag
 $r_{\min}(\text{Al}) < R_{\text{al}}$

Az ehhez hasonló, csak pontosabb mérések eredménye:

$$R = R_0 A^{\frac{1}{3}} \quad R_0 = (1,4-1,5) \cdot 10^{-15} \text{ m}$$

Megjegyzések

$$(I) \quad V_{\text{atommag}} = \frac{4}{3} R^3 \pi = \frac{4}{3} \pi R R_0^3 A$$

a térfogat arányos a tömegszámmal $V_{\text{atommag}} \sim A$

mivel a tömeg is arányos A-val, ezért a sűrűség független tőle → **minden atommagnak**

kb. ugyanannyi a sűrűsége

(II) Az atomi méret 10^{-10} nagyságrendű
 Az atommag-atom arány 100000-es nagyságrendű

$$\frac{R_{\text{atommag}}}{R_{\text{atom}}} \sim 10^{-4} - 10^{-5}$$

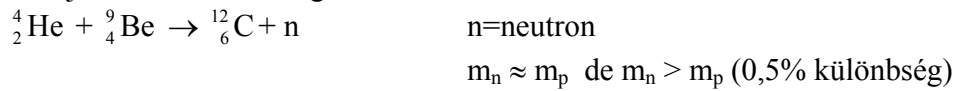
Az atommag összetétele

1932: Chadwich felfedezi a neutront

Módszer: α -részecskékkel beríliumot bombáztak. A sugárzás energiáját a Compton-effektus alapján akarták mérni, de mindig különböző eredményeket kaptak. A kezdeti feltételezésük:

${}^4_2\text{He} + {}^9_4\text{Be} \neq {}^{13}_6\text{C} + \gamma$ (igen nagy áthatoló képességű) tehát ellentmondásokra vezetett.

Valójában a következő igaz:



Heisenberg és Ivanyenko rájön arra, hogy az atommag áll:

Z db protonból és $A-Z$ db neutronból

Izotópia

Egy kémiai elem különböző tömegszámú változatait izotópoknak nevezzük.

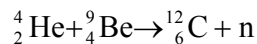
${}^A_Z\text{X}$ és ${}^{A'}_Z\text{X}$ ahol $A' \neq A$ izotópok

A radioaktív bomlás vizsgálata során derült rájuk fény. Minden elem a természetben különböző izotópok keveréke.

Megjegyzések:

1.; A Rutherford-szórás ma is az egyik legkorszerűbb anyagvizsgáló, felületvizsgáló módszer, azonban ma már nem α -részecskéket, hanem felgyorsított ionokat használnak.

2.; A labor neutronforrások is a fenti reakcióval működnek :



A nukleáris kölcsönhatás

A nukleáris kölcsönhatás az atommagot alkotó nukleonok (azaz protonok és neutronok) közötti vonzó kölcsönhatás. Ez tartja össze az atommagot a protonok Coulomb taszítása ellenére, tehát erősebb, mint az elektromágneses kölcsönhatás. (A másik két kölcsönhatás fajta: a gravitációs és az un. gyenge kölcsönhatás sokkal gyengébb ezeknél. Mi itt most azokkal nem foglalkozunk.)

A nukleonok szerkezete

Ma már tudjuk, hogy a protonok és neutronok nem elemi részecskék, hanem 3 db un. **kvark** alkotja őket. A kvarkok elemi részecskék, a nukleonok felépítésében kétféle kvark vesz részt: **u** és **d** kvark. **A kvarkok kölcsönhatása az un. erős kölcsönhatás**, ennek „maradék” a nukleáris kölcsönhatás.

Van némi hasonlóság a van der Waals kölcsönhatáshoz, amely a semleges atomok vonzó kölcsönhatása, amely tehát a töltött részecskék elektromos kölcsönhatásának a „maradék”.

Tehát: az **u** és **d** kvark kölcsönhatása az **erős kölcsönhatás**.

A belőlük felépülő **proton (uud)** és **neutron (udd)** kölcsönhatása a **nukleáris kölcsönhatás**. Az **elektronok és az atommag** kölcsönhatása az **elektromágneses kölcsönhatás**.

A belőlük felépülő **semleges atomok** kölcsönhatása a **van der Waals kölcsönhatás**.

A nukleonok spinje

A kvarkok az elektronhoz hasonlóan feles spinű részecskék. A 3 db kvarkból felépülő protonok és neutronok szintén feles spinűek.

Emlékeztető: a „feles spin” azt jelenti, hogy a részecske sajátperdületének vetülete egy kitüntetett irányra $+\hbar/2$ vagy $-\hbar/2$ lehet. Ezekre a részecskékre vonatkozik a Pauli-elv, azaz egy adott kvantumállapotot legfeljebb két proton (neutron) tölthet be ellentétes spinnel.

A spinhez tartozó mágneses nyomaték

Ismeretes, hogy elektron esetében a mágneses nyomaték z komponensének nagysága egyenlő a Bohr-magnetonnal (μ_B), amely a spinvetület ($\hbar/2$) e/m_e -szerese. (Az elektron negatív töltése miatt a spin és a mágneses nyomaték vetülete ellentétes előjelű.)

$$M_S^Z = \pm \mu_B = \pm \frac{e\hbar}{2m_e} = -\frac{e}{m_e} S_z$$

Ha a proton elemi részecske lenne azt várhatnánk, hogy a mágneses nyomatékának komponense:

$$M_S^Z = \pm \mu_N = \pm \frac{e\hbar}{2m_p} = \frac{e}{m_p} S_z$$

Ahol μ_N az ún. **mag-magneton** és m_p a proton tömege. A semleges neutron esetében pedig nulla mágneses nyomatékra számíthatunk. Megjegyezzük, hogy a proton nagy tömege miatt ($m_p \approx 1830 m_e$) a mágneses nyomatéka három nagyságrenddel kisebb az elektronénál ($\mu_N \approx \mu_B/1830$).

Azonban a **nukleonok mágneses nyomatéka** – az összetett szerkezetük miatt – **a fenti értékeknél lényegesen nagyobb**. Az általános képlet:

$$M_S^Z = \pm g \mu_N$$

Ahol g az ún. giromágneses együttható. Ennek értéke protonra **2,792**, neutronra pedig **-1,91**. Ezek az értékek a kvarkok segítségével jól értelmezhetőek.

A nukleáris kölcsönhatás további tulajdonságai :

1) *Nukleonok között hat, függetlenül attól, hogy protonról (p) vagy neutronról (n) van szó.*

Másképpen fogalmazva: az n-n , p-p , n-p kölcsönhatások ugyanolyan erősek .

De az erős kölcsönhatás spinfüggő. A n-n és p-p pár sohasem alkot kötött rendszert , mert spinjeik ellentétes irányba mutatnak (Pauli-elv), de a n-p pár (a deutérium) létezik, mert a Pauli-elv nem zárja ki, hogy a protonok és neutronok ugyanazt az állapotot egyező spinnel betöltsék.

3) *Nagyon rövid hatótávolságú* kölcsönhatás (gyakorlatilag csak a szomszéd - egymással érintkező - nukleonok hatnak így kölcsön). A nukleáris kölcsönhatás telített: bizonyos hatásgömbön belüli nukleonokat kell csak figyelembe venni a kölcsönhatás során . (Hasonlóan a van der Waals kölcsönhatáshoz.)

Kötési energia: E_k

Az az energianagyság, amivel össze vannak kötve a nukleonok. Az atommag energiájának és az azt alkotó nukleonok energiájának különbsége. Ezt az energiát kell befektetni, hogy kiszabadítsuk a nukleont az atommagból.

Kötési energia és tömegdefektus / tömeghiány /

Legyen $M(A,Z)$ A tömegszámú, Z rendszámú atom atommagjának a tömege.

Legyen m_p a proton tömege,

m_n a neutron tömege.

$$\Delta m = M(A,Z) - Z \cdot m_p - (A - Z) \cdot m_n \text{ ez egy negatív érték}$$

Δm : tömegdefektus : a protonok és neutronok egyesítésekor felszabadult energia eltávozott, és elvitt egy bizonyos tömeget.

Tömegspektrométerrel az atommagok tömege mérhető, így a tömegdefektus is meghatározható.

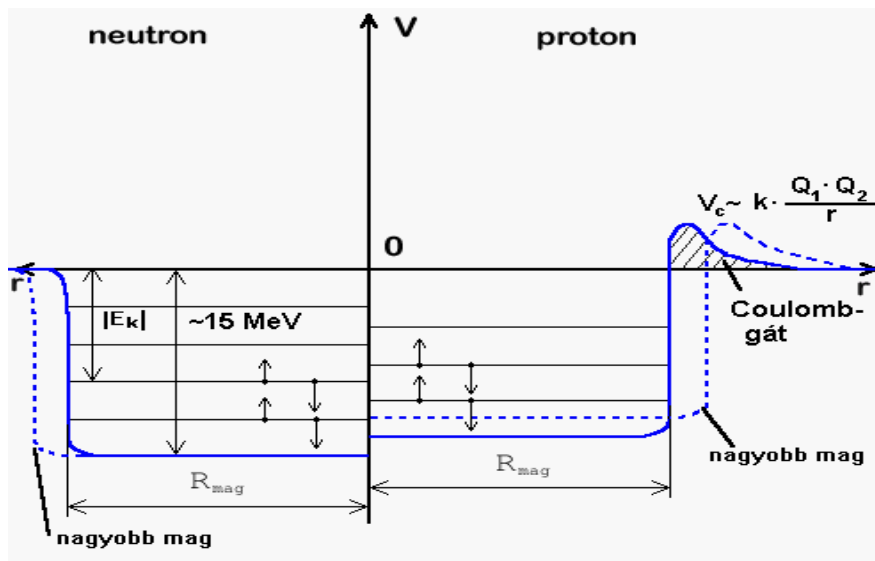
A relativitáselméletből következik : $\Delta m \cdot c^2 = E_k$

E_k -t csak néhány atommagra lehet közvetlenül meghatározni, de azokra nagy pontossággal.

Ezekre a magokra a tömeg-energia ekvivalencia kísérletileg igazolható.

A magok többségére a kötési energia a tömegdefektusból határozható meg.

A potenciáلكád modell_(kvalitatív modell a potenciál helyfüggésére)



A nukleáris kölcsönhatáshoz pontos analitikus függvényt nem tudunk rendelni.

Közelítés: átlagos potenciáltér, amelyben a nukleonok mozognak. A nukleonokra a magon belül nem hat erő, csak a mag határán. Ott a mag „beszippantja” a nukleont. A magon kívül a proton taszítást érez, a neutronra nem hat erő.

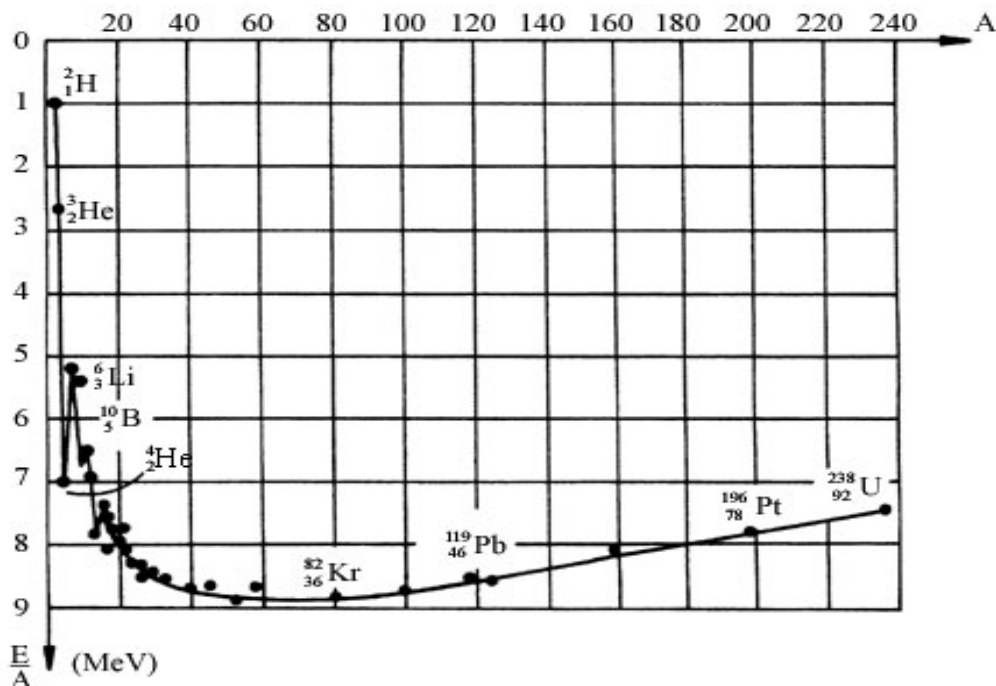
A potenciáلكád a proton és a neutron számára eltérő, mert a proton a nukleáris kölcsönhatás mellett az elektromágnesesben is részt vesz (taszítják egymást). A mag körül kialakuló Coulomb-gátón csak nagy energiájú protonok juthatnak át. Ez a hatás megemeli a protonokhoz tartozó potenciál kádat.

A potenciálkádiban kötött állapotok alakulnak ki, amelyet a nukleonok párosával tölthetnek be (egy szintre vagy egy nukleon, vagy kettő, de ellentétes spinnel a Pauli-elv szerint).

Az atommag méretét növelve a neutronok „kádja” - a nukleáris kölcsönhatás telítődése miatt - egy méret fölött már nem mélyül (illetve alig mélyül). A protonok kádja viszont sekélyebb lesz, mert a több proton több taszítást és ezáltal nagyobb Coulomb energiát jelent.

Nagyobb kádban sűrűbben vannak az energiaszintek. Emiatt a nagyobb atommagok gamma sugárzása általában lágyabb.

Az egy nukleonra jutó kötési energia ($\epsilon = E_k/A$) a tömegszám függvényében.



Az ábráról látható, hogy az egy nukleonra jutó kötési energia ϵ értéke átlagosan **$\approx 8 \text{ MeV/nukleon}$** . Ha a tömegszám A kicsi, akkor még ugrál a görbe, majd nagy A értékekre kisimul. Az energiavölgy minimuma a *vas környékén* van: **$Z = 26, A = 56$** . A nukleáris energia felszabadítása olyan magátalakulással lehetséges, melynek során a fajlagos kötési energia tovább csökken.

A görbe jellemzői:

1., Az illesztés nagyon jó, kivéve a nagyon könnyű elemeket és néhány mágikus számot: Z , vagy $A-Z=2,8,20,50,82,126$

Oka : Ezek a magban lezárt nukleonhéjakat jelentik, amelyet a folyadékcsepp modell nem vesz figyelembe.

2., Optimális ϵ nagyjából $A \sim 50$ környékén :

Ha $A \ll 50$, akkor túl nagy a felületi energia (túl sok nukleon van a felületen.)

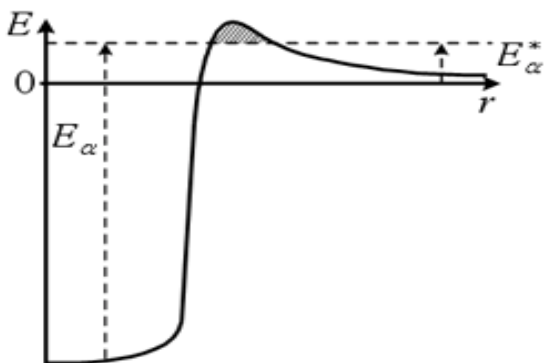
Ha $A \gg 50$, akkor túl nagy a Coulomb energia

3., Különösen erős kötés van a ${}^4\text{He}$ és az ${}^{16}\text{O}$ esetében
($4=2+2$, $16=8+8 \Rightarrow$ ezek kétszer mágikusak)

Az ábráról látható, hogy két lehetőség is van a nukleáris energia felszabadítására, az egyik a kisebb *magok egyesítése (fúzió)*, a másik a nagyobb *magok hasítása (maghasadás vagy fission)*.

Az α -bomlás magyarázata

Kezdetben az α -részecske az atommag középpontjához közel, az ábra bal oldalán tartózkodik, a potenciálgödör mélyén. A potenciális energiája egy nagy negatív szám, az összenergiája a magban viszont pozitív E_α (ezt vízszintes szaggatott vonal jelöli). Ez az energia a klasszikus megfontolás szerint nem elegendő a kilépéshez, ugyanis a besatírozott területet (a gátat) a részecske semmiképp sem tudná átlépni.



Coulomb-gáton alagúteffektussal juthatnak át az α -részecskék

A Coulomb-gáton nem zérus valószínűséggel mégis átjut a részecske, amelyre a kvantummechanika ad magyarázatot, amely szerint a részecske véges valószínűséggel megtalálható a magon kívül is. A jelenséget *alagúteffektusnak* hívják, mert kicsit olyan, mintha a részecske alagutat fűrt volna a potenciálgátba (a vízszintes szaggatott vonal mentén) és azon kiszökött volna. Erre utal az is, hogy a magtól távol az α -részecske energiája E_α^* lesz. Az alagúteffektus valószínűsége annál nagyobb, minél kisebb a besatírozott terület. Ezért ha az α -részecske energiája nagy (a vízszintes szaggatott vonal magasan van), akkor a bomlás $\tau_{1/2}$

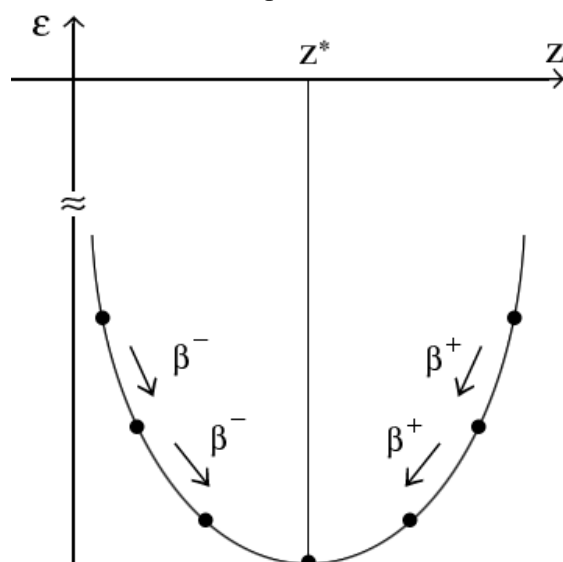
felezési ideje kicsi, ellenkező esetben nagy. Például, ha $E_\alpha \sim 4 \text{ MeV}$ akkor $T_{1/2} = 10^8 \text{ év}$, ha $E_\alpha \sim 9 \text{ MeV}$ akkor $T_{1/2} = 10^{-8} \text{ s}$.

A β -bomlás

Az egy nukleonra jutó kötési energia állandó tömegszám esetén a Z rendszám függvényében, parabola, vagyis akár túl sok a proton a neutronok számához képest, akár túl kevés, az sem jó, ui. a mag mindkét esetben távol van az energia-minimumtól. Minden A -hoz található egy optimális Z , ahol a kötési energia a legmélyebb.

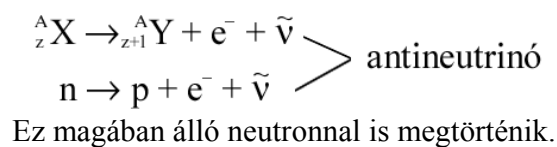
Kis magoknál a legmélyebb az egy nukleonra jutó kötési energia, ha $Z = N$ teljesül, nagy magoknál kedvezőbb, ha több a neutron, mint a proton. Ha egy adott tömegszámú magnál az optimálishoz képest túl sok a neutron, akkor az **negatív β -bomlással**, ha túl kevés, akkor **pozitív β -bomlással** vagy elektronbefogással bomlik.

A β -bomlás magyarázata: „ A ” adott és páratlan



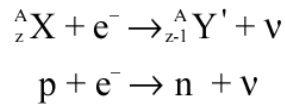
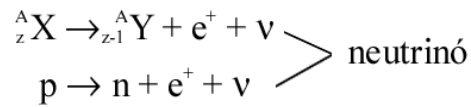
A parabola alján lévő atommagok stabilisak és az atomok igyekeznek β -bomlással a parabola mélyére jutni.

β^- : negatív β bomlás:



β^+ : pozitív β bomlás:

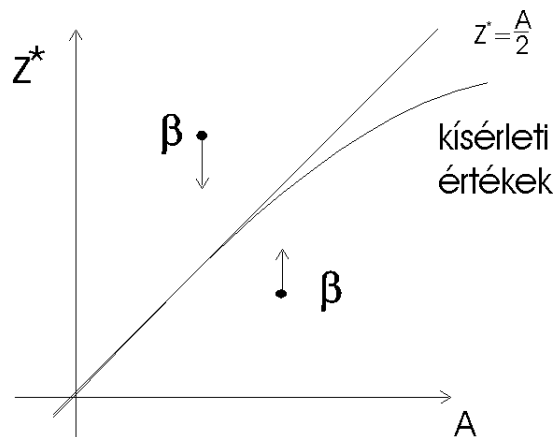
Ez csak atommagban történhet meg, magában nem.



A β bomlás beállítja az optimális proton – neutron arányt.

A β bomlásért felelős kölcsönhatás az ún. gyenge kölcsönhatás. Ez a 4. kölcsönhatási forma a természetben. /nincs több/

A $Z^*(A)$ függvény:



A görbevonallal feletti nukleonok β^+ bomlók, míg az alattiak β^- bomlók. Így juthatnak a stabil vonalra.

A 2015/16-ös tanévben csak eddig kell!!!

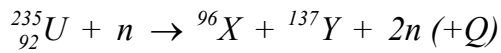
Maghasadás

Előzmények:

1934-ben: Szilárd Leó atommag + neutron -----> atommag' + több neutron
magfizikai láncreakció ötlete (atommag besugárzása neutronnal)

Kérdés, hogy van-e ilyen magreakció egyáltalán ?

Hahn és Strassman 1939-ben felismerte, hogy az urán egyik izotópjának az atommagja neutron-besugárzaskor kettéhasad, miközben 2-3 neutron is keletkezik. Tehát a láncreakció megvalósítható. A felszabaduló energia több milliószor meghaladja a kémiai folyamatok során felszabaduló energiát. Pl. egy ilyen hasadás lehet:



És ez újból hasíthat (X é Y különböző kémiai elemek lehetnek,

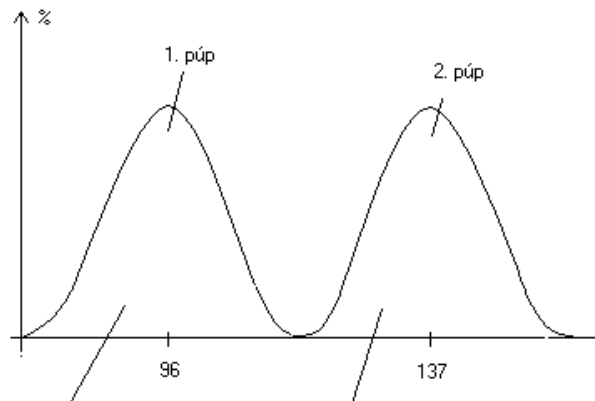
$Q \approx 200 \text{ MeV}$

A maghasadás tulajdonságai

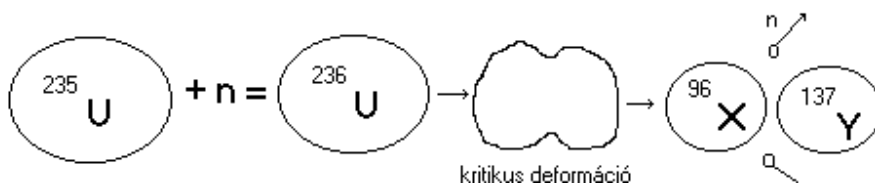
1.) A hasadványok tömegeloszlása:

2 db különböző részre hasad

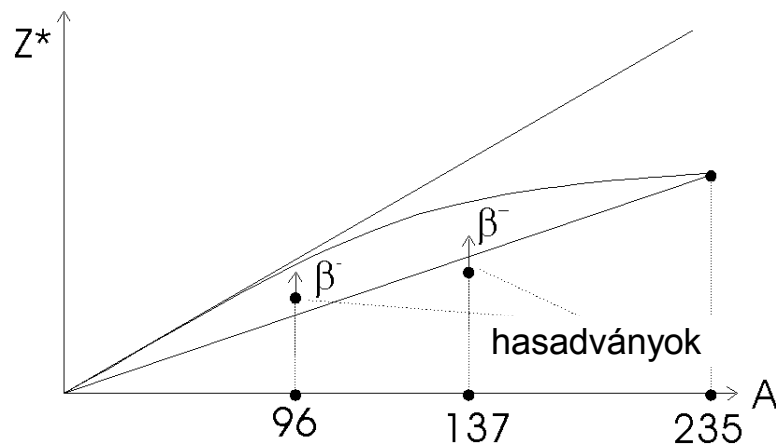
(kvantummechanikai okai vannak, hogy nem 2 egyforma részre hasad)



2, A hasadás mechanizmusa:



3.,



A stabilitási vonalat negatív β bomlások sorozatával tudjuk elérni.

A hasadványok erősen β - radioaktívak.

A nehéz hasadvány messzebb van a stabilitási vonaltól, ezért annál több β - bomlás következik egymás után.

1. púp:
Kr, Sr, Y,... stb. kémiai elemek
2. púp:
Cs, I, Xe,... stb. kémiai elemek

A hasadás után keletkező hasadványok az igazán veszélyes radioaktív dolgok. Pl. az urán önmagában "ártatlan", a hasadványok radioaktív sugárzása az urán 10^8 - 10^9 -szorosa. Csak néhány évvel a reaktorból való kiemelése után lesz szállítható állapotban.

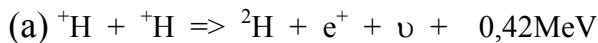
Cs, Sr, I : szublimálnak $1000\text{ }^\circ\text{C}$ környékén

Ezek több száz évig felügyeletet igénylő anyagok. Ebben rejlik a radioaktív sugárzás felhasználásának legnagyobb veszélye.

Fúzió égen és földön

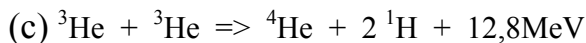
Égen: a Nap belsejében

Hidrogén ciklus (kis csillagoknál, pl.: Nap)



Magas hőmérséklet kell kb. 15 millió K szükséges hozzá! Ezen átlag nagyságrendileg 100 millió évente történik egy protonnal.(elég lassú)

Ha a két proton kötött lenne (azaz a ${}^2\text{He}$ létezne), akkor ez csak percekbe telne.



Végeredményben 4 protonból (${}^1\text{H}$) lett egy hélium (${}^4\text{He}$) mag. Atomokról ilyen hőmérsékleten nem, csak plazma állapotról beszélhetünk.

A legnagyobb a hőmérséklet a Nap középpontjában, a fúzió ott történik. A megnövekedő nyomás miatt a sűrűség csökken és a fúzió lassul, a hőmérséklet nem emelkedik tovább. Ma még vitatott, hogy a fúzió folyamatosan vagy szakaszosan zajlik le.

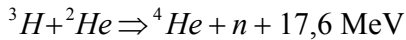
A napon belül vertikális keveredés gyakorlatilag nincs, a gravitációs nyomással a gázok és a fotonok nyomása egyensúlyt tart (nagyobbrészt a gázok). Eddig a pontig a nap egy szabályozott fúziós reaktorként viselkedik, de ha a hidrogén kiég, zavar keletkezik a szabályozásban \Rightarrow a belseje összeesik \Rightarrow a hőmérséklet nő, majd 100 millió K-en beindul a ${}^4\text{H}$ fúziója nehezebb elemekké (${}^{12}\text{C}$ és ${}^{16}\text{O}$ elemekké) \Rightarrow a csillag felfúvódik és vörös óriás keletkezik.

A vörös óriások instabilak és ritkák, mert ez a periódus rövid ideig tart. Az Orion csillagképben található az egyik legszebb példája.

Kis tömegű csillagok esetén (pl. a Nap) a vörös óriás állapottal megszűnik a magfúzió, a csillag évmilliárdok alatt lassan kihűl (fehér törpe). Nagyobb tömegű csillagok esetén további izgalmas folyamatok történnek (szupernóva robbanás, neutroncsillag, fekete lyuk), ezek tárgyalása azonban nem tananyag.

Fúzió a földön:

Nekünk nincs időnk 100 millió évet várni, valamilyen ettől eltérő módszerre van szükség:



Az energia nagy részét a neutron viszi. Ez a D+T (deutérium+trícium) reakció

Előidézése:

Gyorsítókkal vagy magas hőmérsékleten történik.

$\bar{\epsilon}$ - az egy szabadsági fokra jutó átlagos energia.

Az átlagos energiát alapul véve elmondhatjuk, hogy körülbelül 10^{10} K-nél indulna be a folyamat. Szerencsére egyes atommagok az átlagos energiától sokkal nagyobb energiával rendelkeznek (Boltzmann-eloszlás) és az alagút effektus is segít. Ezek miatt már lényegesen alacsonyabb hőmérsékleten is lehetséges a fúzió. Már nagyságrendileg 50 millió K-en beindul, tehát ez a folyamat lényegesen eltér attól, ami a Napban zajlódik.

A folyamat történése

A., robbanásszerűen nagy méretben: a hidrogénbombában a magas hőmérséklet előállítása hasadási bombával történik.

B., robbanásszerűen kicsi méretben: a néhány mm³-es üzemanyag kapszulában a magas hőmérséklet előállítása lézerekkel történik (NIF, Kalifornia, USA, 192 db lézer).

B., szabályozottan: így is működik de az energia mérlege egyelőre még negatív, mert a gyorsításhoz rengeteg energia kell és kizárólag elektromágneses falakkal lehet a minimum 50 millió K-es plazmát egyben tartani. A most épülő ITER (Cadarache, Franciaország) fúziós reaktor már pozitív energiamérlegű lesz. Ez a jövő energiaforrása lehet, hiszen egy fúziós erőmű nem termel radioaktív szennyező anyagokat.