

# Fizika II.

Vegyésszmérnök BSc Kazincbarcika  
2023/24 tanév I félév

Az 5. konzultáción leadott tananyag

# Ellenőrző kérdések

Válasszuk ki a hamis állítást!

- a) A  $K_\alpha$  a legnagyobb kvantumenergiájú csoport legintenzívebb karakterisztikus röntgen vonala
- b) Az atommag Coulomb-terében eltérülő és lefékeződő elektronok sugárzásának a spektruma folytonos
- c) Adott atom  $L_\alpha$  sugárzásának hullámhossza nem függ a röntgenső feszültségétől
- d) Az Auger-folyamat nagy rendszámú anyagokban domináns

A Moseley-törvény kapcsolatot ad

- a) A röntgenső feszültsége és a maximális fotonenergia között
- b) A röntgenső feszültsége és a  $K_\alpha$  karakterisztikus vonalak frekvenciája között
- c) Az anód rendszáma és karakterisztikus vonalak frekvenciája között
- d) Az anód rendszáma és a maximális fotonenergia között

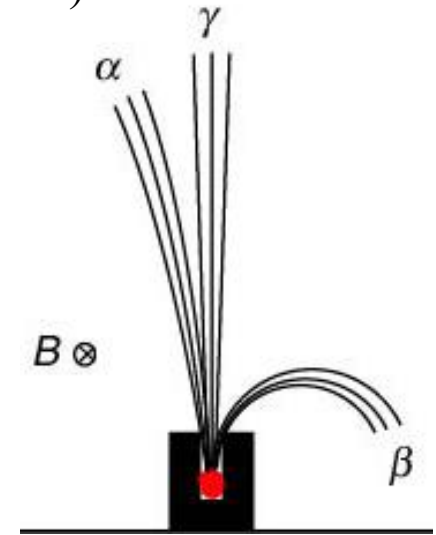
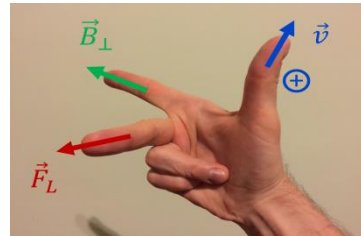
# Radioaktivitás

Becquerel (1896): uránérc a fotopapírt megfeketíti (előhívás után persze), még ha az vastag papírba is van csomagolva (mintha fény érte volna, pedig nem).

Később az urán sugárzását (vákumban és mágneses térben) sikerült összetevőkre bontani (Rutherford, Villard).

A sugárzások a rajz síkjára merőleges mágneses téren haladnak át Lorentz-erő:

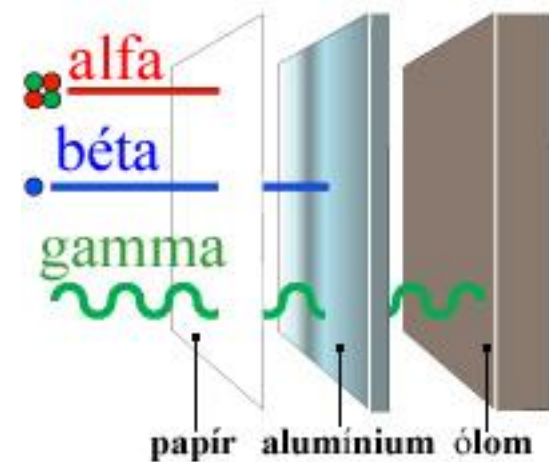
$$\vec{F} = q[\vec{v} \times \vec{B}]$$



$\alpha$ : hélium atommagok  ${}^4_2\text{He}^{2+}$  (kicsi áthatolóképesség, papírlap elnyeli)

$\beta$ : elektronok (közel fénysebességgel, néhány mm Al lap elnyeli)

$\gamma$ : nagyenergiájú EM sugárzás ( $f > 10^{18}$  Hz, csak több cm ólom nyeli el)

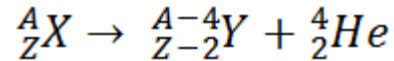


# Megjegyzések

- A kirepülő részecskék nagy energiájúak, nagyságrendben milliószor akkorák, mint a kémiai reakciók közben felszabadulók (elektron átmenetek az energiaszintek között).
- Ha az  $\alpha$  sugárzást elnyeletik, akkor ott He keletkezik. Úgy gondolják, a Földön megtalálható He jelentős részben az  $\alpha$  sugárzásból származik.
- A radioaktív bomlások során felszabaduló energia tartja melegen (olvadt állapotban) a Föld magját.
- Az  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  a leggyakoribb sugárzások, de másfajta (itt nem részletezett) sugárzások is léteznek a természetben.
- Az  $\alpha$ , és  $\gamma$  sugárzások spektruma vonalas, a bétáé folytonos.
- A sugárzások kibocsátása bomlási folyamatban történik (ma már tudjuk, hogy a bomlás az atommagon belül történik).
- A radioaktív sugárzás kibocsátásakor általában elemátalakulás történik (kivéve  $\gamma$ ). Ezzel megdőlt az az axióma, hogy a kémiai elemek nem alakíthatók át.
- Ezért kémiai Nobel-díjat adtak egy fizikusnak, Rutherfordnak 1911-ben). Akár aranyat is lehetne így csinálni, de a bányászata sokkal olcsóbb.

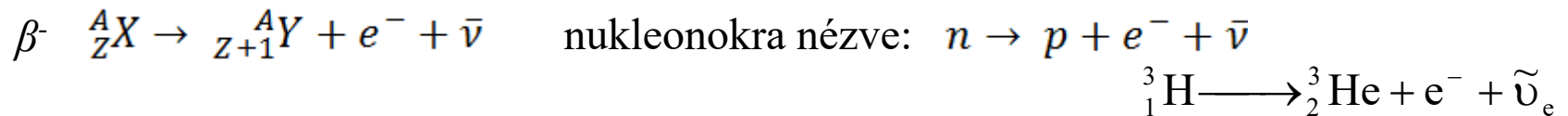
# A radioaktív bomlások típusai

$\alpha$ -bomlás: az atommag tömegszáma 4-el, rendszáma 2-vel csökken.



Példa: egy fémből két nemesgáz keletkezik  ${}^{226}_{88}Ra \longrightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^4_2He$

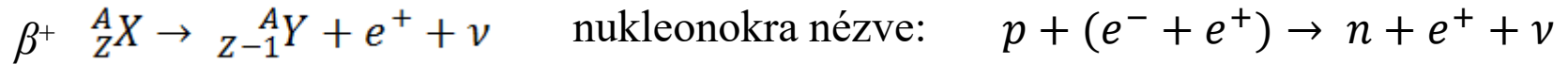
$\beta$ -bomlás: két fajtája van ( $\beta^-$  és  $\beta^+$ ) attól függően, hogy elektron ( $e^-$ ) vagy **pozitron** ( $e^+$ ) keletkezik. A pozitron az elektron antirészecskéje, töltése ellentétes, minden másban azonos.



A  $\nu$  és a  $\bar{\nu}$  **neutrínót** illetve antineutrínót jelent. Ezek töltés nélküli, nagyon kis tömegű részecskék és csak a gyenge kölcsönhatáson keresztül lépnek reakcióba. Emiatt detektálni őket rendkívül nehéz. Osztódik a bomlási energián az elektronnal (pozitronnal), ezért folytonos a spektruma.

A pozitron az atommagot elhagyva egy elektronnal annihilálódik és két nagyenergiájú foton keletkezik belőlük.

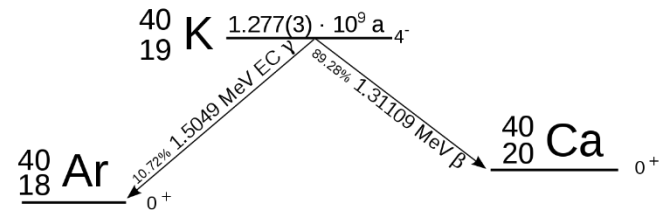
## A radioaktív bomlások típusai/2



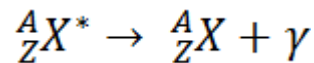
A pozitív béta bomlásnak van egy alternatívája is, ami kísérni szokta.  
Ez az **elektron befogás** (többnyire a legbelső héjről).



Vannak esetek, amikor csak ez lehetséges energetikailag,  
pozitron emisszió nem.



$\gamma$ -bomlás: nem jár elem átalakulással, mindössze az atommag egy gerjesztett állapotából alapállapotba történő alakulása megy végbe. Az energiakülönbség szabadul fel egy foton formájában (nagyok az energia különbségek!). Általában a béta- vagy az alfa-bomlást követi.



# Radioaktív bomlástörvény

A radioaktív bomlás véletlenszerű jelenség. Egy radioaktív izotóp atommagja egységnyi idő alatt ugyanolyan valószínűséggel bomlik el, függetlenül az életkorától. A törvények statisztikai jellegűek, csak nagy számok esetén teljesülnek.

Ha  $\lambda$  annak valószínűsége, hogy egy mag a következő másodpercben elbomlik (**bomlási állandó**), akkor  $dt$  idő alatt a magok  $N$  számának (nagy!) megváltozására:

$$dN = -\lambda N dt$$

Az egyenletet átrendezve (változókat szétválasztva):  $\frac{dN}{N} = -\lambda dt$

Ennek az egyenletnek a megoldása: a **bomlástörvény**:  $N = N_0 e^{-\lambda t}$

(exponenciális csökkenés,  $1/\lambda$  az átlagos élettartam.)

A **felezési idő** megadja, hogy az eredeti nagyszámú radioaktív magnak mennyi idő alatt bomlik el a fele. További felezési időt várva a még nem elbomlott magok száma ismét feleződik, és így tovább.

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$
$$e^{\lambda T_{1/2}} = 2 \quad \longrightarrow \quad T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

# Ellenőrző kérdések

Mely radioaktív bomlás során változik a rendszám?

- a) Csak az  $\alpha$ -bomlás során
- b) Mindhárom bomlás ( $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -bomlás) során
- c) Egyik bomlás során sem
- d) Az  $\alpha$ -bomlás és a  $\beta$ -bomlás során is

Milyen izotóp keletkezhet a  $^{90}\text{Sr}$  béta bomlásakor?

- a)  $^{90}\text{Y}$
- b)  $^{91}\text{Y}$
- c)  $^{89}\text{Sr}$
- d)  $^{91}\text{Sr}$



# Aktivitás

Aktivitás: A mintában időegység alatt bekövetkező bomlások száma:  $A = \left| \frac{dN}{dt} \right|$

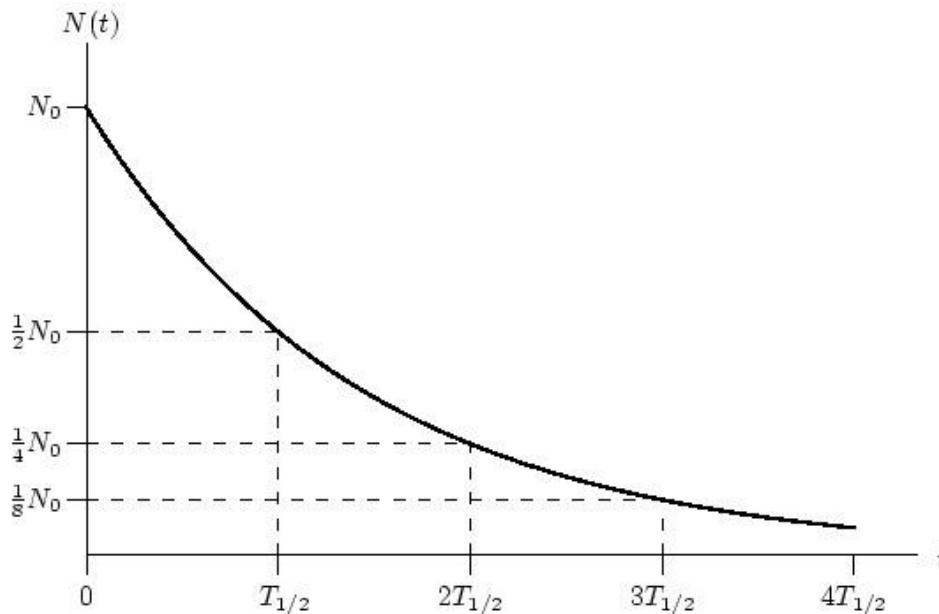
$[A] = 1 \text{ Bq (becquerel)} = 1 \text{ bomlás/másodperc}$

Korábbi egysége: 1Ci (curie)

$1\text{Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq} (= 1\text{g Ra radioaktivitása})$

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = N_0 \lambda e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}$$

Tehát az aktivitás ugyanolyan exponenciális függvény szerint csökken, és bármely időben:



$$A(t) = N(t)\lambda$$

# Bomlási sorok

A különböző bomlásoknál a tömegszám vagy nem változik ( $\beta$ ,  $\gamma$ ), illetve 4-el csökken ( $\alpha$ ). Ezért a periódusos rendszer végén lévő természetes anyagok bomlási sorokba rendezhetők. A tömegszám 4-el való osztásánál lehet 0, 1, 2, illetve 3 maradék, ezek megadják a négy különböző bomlási sort, melynek elején egy anyaelem áll, közbenő radioaktív elemeit pedig lányelemeknek hívjuk. A végső stabil elem a végtermék.

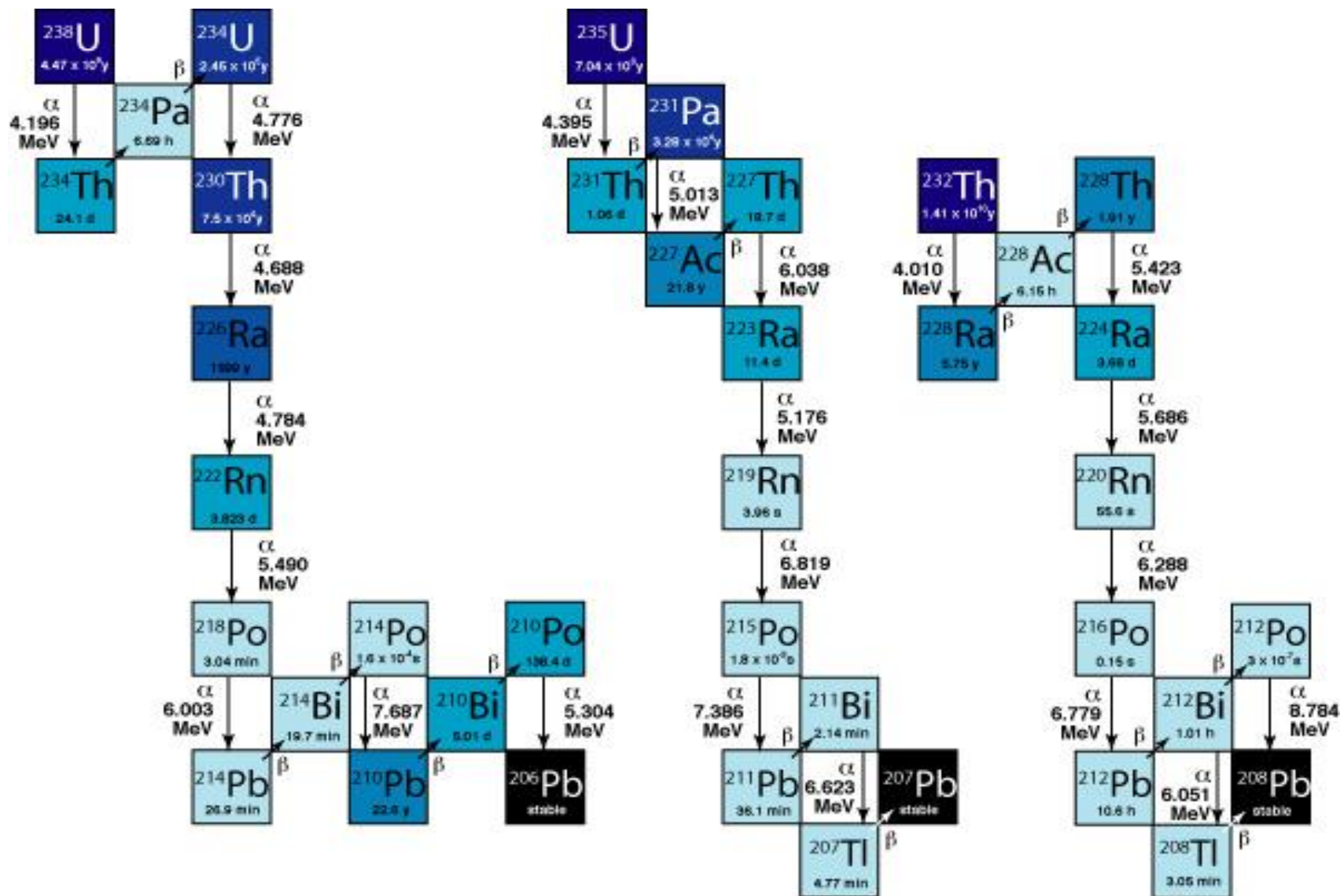
$A = 4n$     tórium-sor, anyaelem:  $^{232}\text{Th}$ ,  
 $T_{1/2} = 1,41 \cdot 10^{10}$  év,    végtermék  $^{208}\text{Pb}$

$A = 4n + 1$     neptúnium-sor, anyaelem:  $^{237}\text{Np}$ ,  
 $T_{1/2} = 2,14 \cdot 10^6$  év,    végtermék  $^{209}\text{Bi}$   
(ez a sor már lebomlott a Föld keletkezése óta)

$A = 4n + 2$     urán 238-sor, anyaelem:  $^{238}\text{U}$ ,  
 $T_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9$  év,    végtermék  $^{206}\text{Pb}$

$A = 4n + 3$     urán 235-sor, anyaelem:  $^{235}\text{U}$ ,  
 $T_{1/2} = 7,1 \cdot 10^8$  év,    végtermék  $^{207}\text{Pb}$

# Bomlási sorok/2



# Arcképcsarnok



Antoine Henri Becquerel  
1852- 1908  
Nobel-díj: 1903 (megosztva  
a Curie-házaspárral)



Marie Skłodowska-Curie (1867-1934), Pierre Curie (1859-1906),  
Irene Joliot-Curie 1897-1956)

# Ellenőrző kérdések

Az ősi időkben keletkezett radioaktív anyagok aktivitása egyre kisebb, mert egyre kisebb a száma a bennük lévő még el nem bomlott atommagoknak.

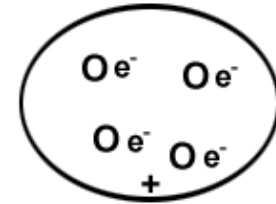
- a) Az állítás hamis, de az indoklás önmagában helyes
- b) Az állítás igaz, de az indoklás nem
- c) Az állítás és az indoklás is helyes, közöttük oki kapcsolat van
- d) Az állítás és az indoklás is helyes, közöttük nincs oki kapcsolat

Válasszuk ki a hamis állítást!

- a) Az aktivitás arányos a még el nem bomlott atommagok számával
- b) Az aktivitás mértékegysége a becquerel (=bomlás/s)
- c) A bomlási állandó megadja az időegység alatti bomlások számát
- d) Adott izotóp esetén az elbomlás esélye korfüggetlen

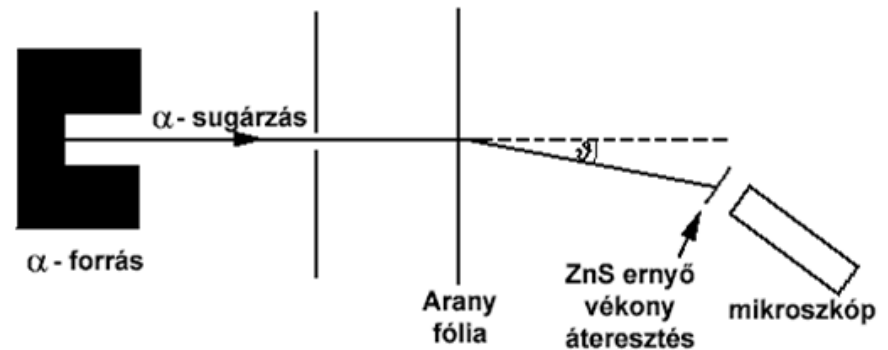
# Az atommag felfedezése

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  $I(\theta)$  függvényt

ZnS : 1 db  $\alpha$ - részecske  
1 db fényfelvillanást okoz (szcintilláció)

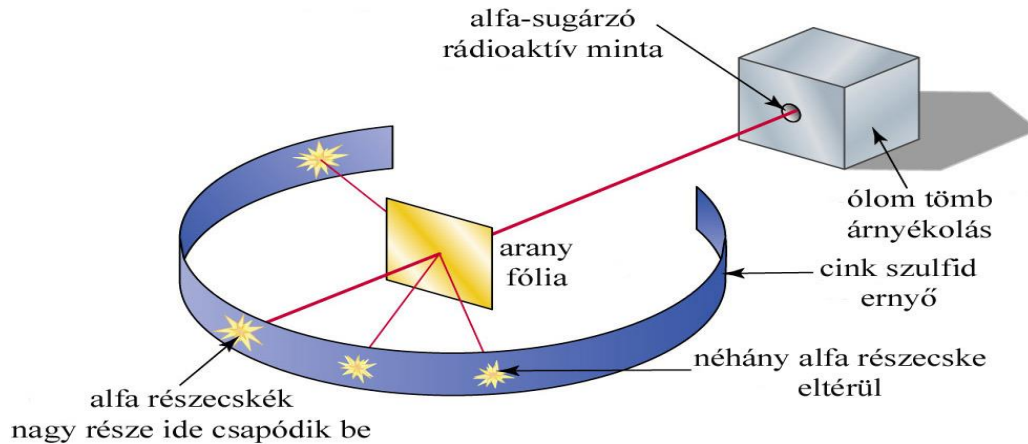


Kvalitatív tapasztalatok :

1. Az  $\alpha$ - részecskék több mint 99,9%-a nem térül el.
2. Kb. 0,1% jelentősen eltérül.
3. Néhány  $\alpha$ - részecske visszaszóródik

## Az atommag felfedezése/2

Rutherford kísérlet (1911): Az atom pozitív töltése és a tömeg nagy része egy nagyon kis helyre összpontosul. Ezt nevezte el atommagnak.

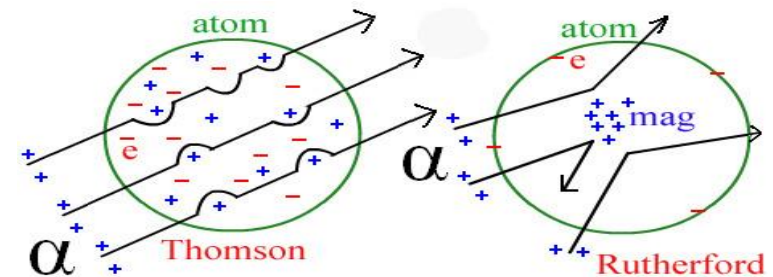
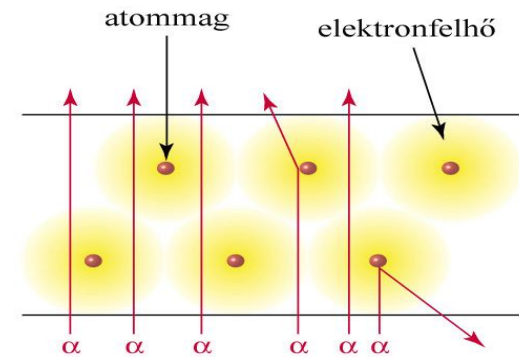


Az eltérülés ritka de nagymértékű.

Thomson puding atom-modellje nem lehet helyes.

Az atom mérete  $10^{-10}$  m nagyságrendű (angström, Å).

Az atommagé  $10^{-15}$  m (femtó méter, fm)



## Az atommag felfedezése/3

***Az alfa részecske szóródását lehet a klasszikus fizika alapján is tárgyalni, mert a hullámhosszuk nagyon kicsi. (Az elektronnal ez már nem tehető meg.)***

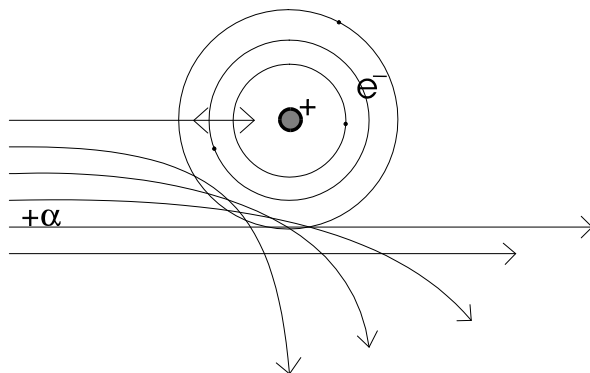
Itt még van értelme a klasszikus analógiáknak is: **szalmakazal golyószórózása**

Meg akarjuk tudni, hogy van-e valami a szalmakazalban. Elkezdjük egyenletesen megszórni golyókkal.

A szalmakazal mögött felfogjuk a golyókat (vagy a golyók nyomjelzősek), 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  $\alpha$ -részecskéknak.

Az új atommodell:



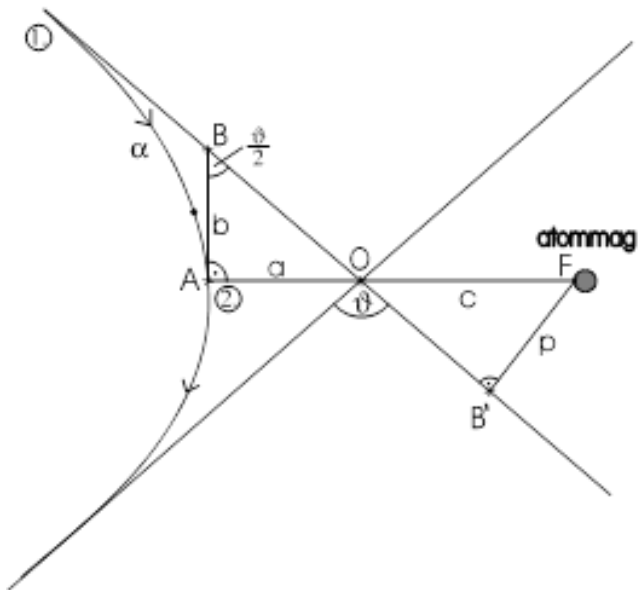
Középen, a kis térrészben helyezkedik el az anyag legnagyobb része, több, mint **99,9 %**-a, ez az atommag.



## Néhány megfontolás a Rutherford-féle szórási formulához vezető úton (ínyenceknek)

### 1, Geometriai megfontolás

Az  $\alpha$ -részecske pályája kúpszelet, pontosabban **hiperbola**, melynek külső fókuszában helyezkedik el az atommag. A Kepler probléma tárgyalása során kapott eredmény itt is használható, mivel a Coulomb-törvény a gravitációs erőtvényhez hasonló alakú. Az atommag rögzítettségének feltételezése jó közelítés, mert tömege jóval nagyobb, mint az  $\alpha$ -részecskéé.



a: fél nagytengely

b: fél kistengely

c: fókusz távolság

$\vartheta$ : az eltérülés szöge

p: ütközési paraméter (ilyen messze ment volna el az atommag mellett.)

**Levezethető, hogy minél kisebb az ütközési paraméter, annál nagyobb az eltérülés szöge.** (Egészen pontosan:

$$\operatorname{ctg}\left(\frac{\vartheta}{2}\right) = \frac{b}{a} = \frac{p}{a}$$

## 2, Megmaradási tételek

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

B, 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.

$$A, \quad \frac{1}{2}mv_0^2 + 0 = \frac{1}{2}mv_A^2 + k \frac{q_1q_2}{r_{\min}}$$

$$B, \quad mv_0p = mv_A r_{\min}$$

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

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = k \frac{q_1q_2}{r_{\min}}$$

, tehát az  $\alpha$ -részecske energiájának ismeretében kiszámítható az az  $r_{\min}$  távolság, amelyre az  $\alpha$ -részecske legjobban megközelíti a magot.

A fenti képletekben a töltések:  $q_1=2e$  (az  $\alpha$ -részecske töltése),  $q_2=Z'\cdot e$  (az atommag töltése)

**A levezetés eredménye:** itt nem részletezett statisztikus megfontolásokat is figyelembe véve

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

dn a  $\vartheta$  körüli  $d\Omega$  térszögben detektált száma  
 n: az összes  $\alpha$ -részecske száma  
 N, s a céltárgy atomsűrűsége ( $\text{db}/\text{m}^3$ ) és vastagsága (m)

### A kísérlet eredménye

1. A szórási kép (az egységnyi térszögbe jutó  $\alpha$ -részecskék száma), azaz a mért  $I(\vartheta)$  egyezik a modell által szolgáltatott

$$\frac{1}{\sin^4\left(\frac{\vartheta}{2}\right)}$$

összefüggéssel.

**Tehát a modell által adott szögfüggés egyezett a tapasztalattal. Ezt a kísérleti bizonyítéknak tekintjük és a modellt elfogadjuk** (míg az ellenkezőjére nem találunk bizonyítékot).

*Ez volt az első kísérleti bizonyíték az atommag létezésére.*

2. n ismeretében  $z'$  is meghatározható. Az eredmény:  $z' = z$ , vagyis **az atommag töltése (e egységben) egyezik a rendszámmal.**

A rendszám hármasszám jelentése (ezt követően)

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

Viszont az atommag tömege nagyobb, mint a benne lévő protonok össztömege. Miért???

20 év alatt találták meg a helyes választ.

## Az atommag összetétele

1932: Chadwich felfedezi a neutront

Módszer:  $\alpha$ - részecskével beríliumot bombáztak. A sugárzás energiáját a Compton-effektus alapján akarták mérni, de mindig különböző eredményeket kaptak. A kezdeti feltételezésük:



ellentmondásokra vezetett.

Valójában a következő igaz:  ${}^4_2\text{He} + {}^9_4\text{Be} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + \text{n}$

n=neutron  $m_n \approx m_p$  de  $m_n > m_p$  (0,5% különbség)

Heisenberg es Ivanyenko rájön arra, hogy az atommag áll: **Z db protonból és A-Z db neutronból**



### Izotópia

Egy kémiai elem különböző tömegszámú változatait izotópoknak nevezzük.

és  ${}^A_Z\text{X}$  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.

## Az atommag mérete

Ismételjük meg a Rutherford kísérletet, de arany helyett alumínium céltárgyon (Marsden-kísérlet)

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

Következmény: az  $\alpha$ -részecskék 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*

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

azaz a térfogat arányos a tömegszámmal

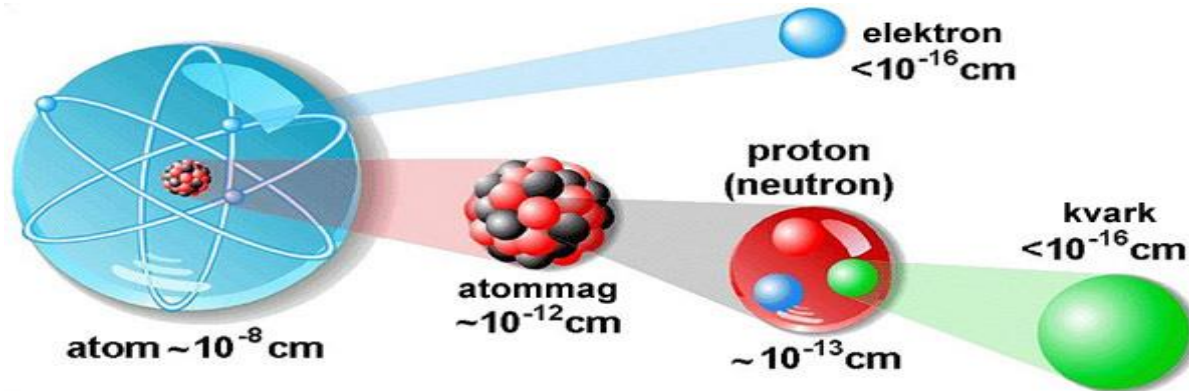
$$V_{\text{atommag}} \sim A$$

Mivel a tömeg is arányos a tömegszámmal, a kettő hányadosa független tőle, azaz **minden atommag sűrűsége ugyanakkora**

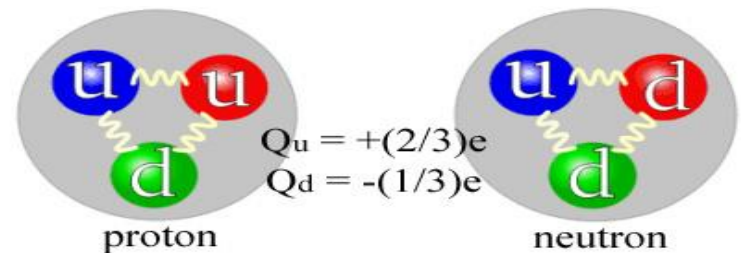
$$\rho_{\text{mag}} = m_p / 4R_0^3 = 1 / (6 \cdot 10^{23}) \cdot 1/4 (1,5 \cdot 10^{-15})^3 \text{ g/m}^3 \approx 10^{20} \text{ g/m}^3$$

**Azaz az atommag a legsűrűbb anyagoknál is  $10^{15}$ -ször sűrűbb (mert igen kicsi a mérete)!**

## Az atommag 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 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, Ezek sokkal gyengébbek ezeknél. A gravitáció különösen gyenge, de nagy hatótávolságú és mindig vonzó, ezért a világegyetem egyben tartásában mégis kiemelkedő a szerepe.)

**A nukleonokat alkotó kvarkok kölcsönhatása az un. erős kölcsönhatás, ennek „maradék” a nukleáris kölcsönhatás.**

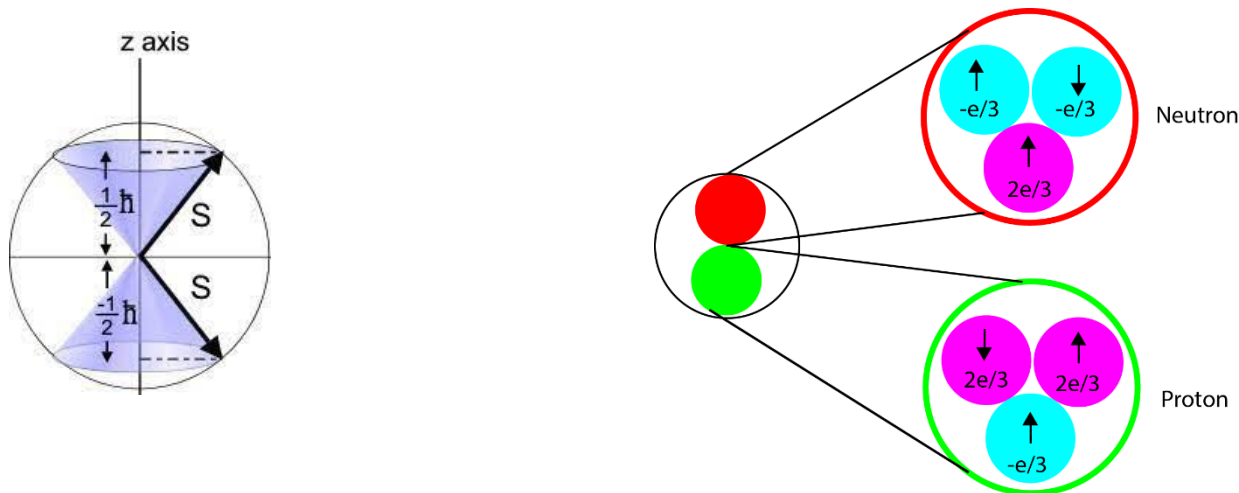
Van némi hasonlóság a van der Waals kölcsönhatáshoz, amely a semleges atomok vonzó kölcsönhatása, amely tehát a töltött részecskék elektromos kölcsönhatásának a „maradék”.

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. **Minden feles spinű részecskének (elektronnak, neutrínónak, nukleonoknak, kvarkoknak) ugyanakkora a spinje. Ezeket fermionoknak is nevezzük.**
- 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 ( $\mu_B$ ), amely a spinvetület ( $\hbar/2$ )  $e/m_e$  –szerese. (Az elektron negatív töltése miatt a spin és a mágneses nyomaték vetülete ellentétes előjelű.)

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

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

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

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

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.

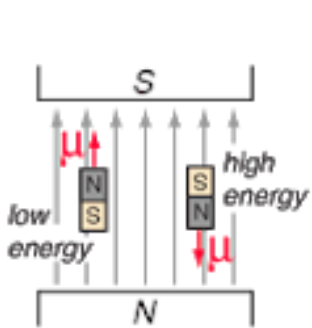
# Mágneses térbe helyezett mágneses eszközök

mágnesrúd

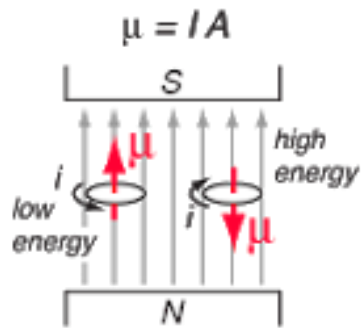
köráram

elektron

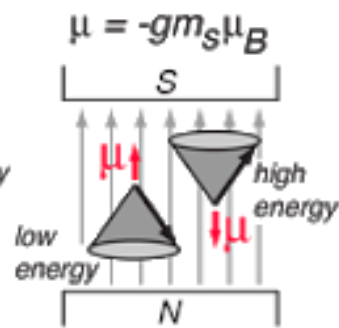
proton



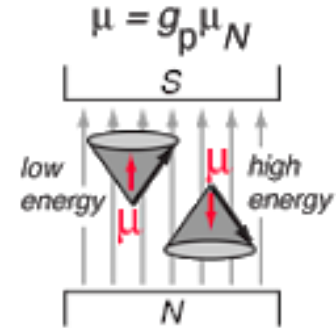
Bar magnet  
magnetic moment



Current loop  
magnetic moment



Electron spin  
magnetic moment  
 $g = 2$   
 $\mu_B = 5.79 \times 10^{-5} \text{ eV/T}$



Proton spin  
magnetic moment  
 $g = 2.79$   
 $\mu_N = 3.15 \times 10^{-8} \text{ eV/T}$

$$B=1\text{T}$$

$$W_m=5,79 \cdot 10^{-5} \text{ eV}$$

$$W_m=8,79 \cdot 10^{-8} \text{ eV}$$

$$f=2W_m/h$$

$$f=27,9 \text{ GHz}$$

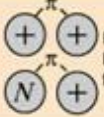
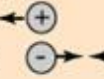
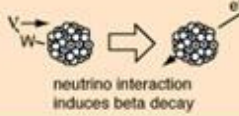
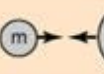
$$f=42,4 \text{ MHz}$$

## A nukleáris kölcsönhatás további tulajdonságai

1) *Nukleonok között hat, függetlenül attól, hogy protonról (p) vagy neutronról (n) van szó.* Másképpen fogalmazva a nukleáris kölcsönhatás **töltésfüggetlen**, tehát az n-n, p-p és az n-p kölcsönhatások ugyanolyan erősek.

2) 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 kölcsönre). A nukleáris kölcsönhatás telített: bizonyos hatásgömbön belüli nukleonokat kell csak figyelembe venni a kölcsönhatás során. (Hasonlóan a van der Waals kölcsönhatáshoz.)

Fundamental Forces				
<b>Strong</b>		Strength <b>1</b>	Range (m) $10^{-15}$ (diameter of a medium sized nucleus)	Particle gluons, $\pi$ (nucleons)
<b>Electro-magnetic</b>		Strength $\frac{1}{137}$	Range (m) Infinite	Particle photon mass = 0 spin = 1
<b>Weak</b>		Strength $10^{-6}$	Range (m) $10^{-18}$ (0.1% of the diameter of a proton)	Particle Intermediate vector bosons $W^+$ , $W^-$ , $Z_0$ , mass > 80 GeV spin = 1
<b>Gravity</b>		Strength $6 \times 10^{-39}$	Range (m) Infinite	Particle graviton ? mass = 0 spin = 2

## Ellenőrző kérdések

Válasszuk ki a nukleáris kölcsönhatásra nem jellemző tulajdonságot!

- a) A kvarkok közötti erős kölcsönhatás maradéka
- b) Nagy hatótávolságú (hasonlóan a gravitációhoz)
- c) Nukleonok között hat
- d) Töltésfüggetlen

Állítsuk az alapvető kölcsönhatásokat erősségük szerint növekvő sorrendbe (tehát a leggyengébb legyen elől)!

- a) Gravitációs-, gyenge-, elektromágneses-, erős kölcsönhatás
- b) Gyenge-, elektromágneses-, gravitációs-, erős kölcsönhatás
- c) Gyenge-, gravitációs-, elektromágneses-, erős kölcsönhatás
- d) Gravitációs-, elektromágneses-, gyenge-, erős kölcsönhatás

## Az atommag kötési energiája

Kötési energia:  $E_k$

Az az energianagyság, amivel össze vannak kötve a nukleonok. Az atommag energiájának és az azt alkotó nukleonok energiájának különbsége. Ekkora nagyságú energia szabadul fel, ha a nukleonok atommaggá egyesülnek. És ennyi energiát is kell befektetni, hogy kiszabadítsuk a nukleonokat az atommagból.

$E_k$  előjelét a fizikában negatívnak szokás venni.

Kötési energia és tömegdefektus / tömeghiány /

Legyen  $M(A,Z)$  az  $A$  tömegszámú,  $Z$  rendszámú atom atommagjának a tömege. Legyen  $m_p$  a proton tömege,  $m_n$  a neutron tömege.

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

$\Delta m$  : tömegdefektus: a protonok és neutronok egyesítésekor felszabadult energia eltávozott, és elvitt egy bizonyos tömeget.

Másképpen fogalmazva: az atommag tömege kisebb, mint a benne lévő nukleonok össztömege

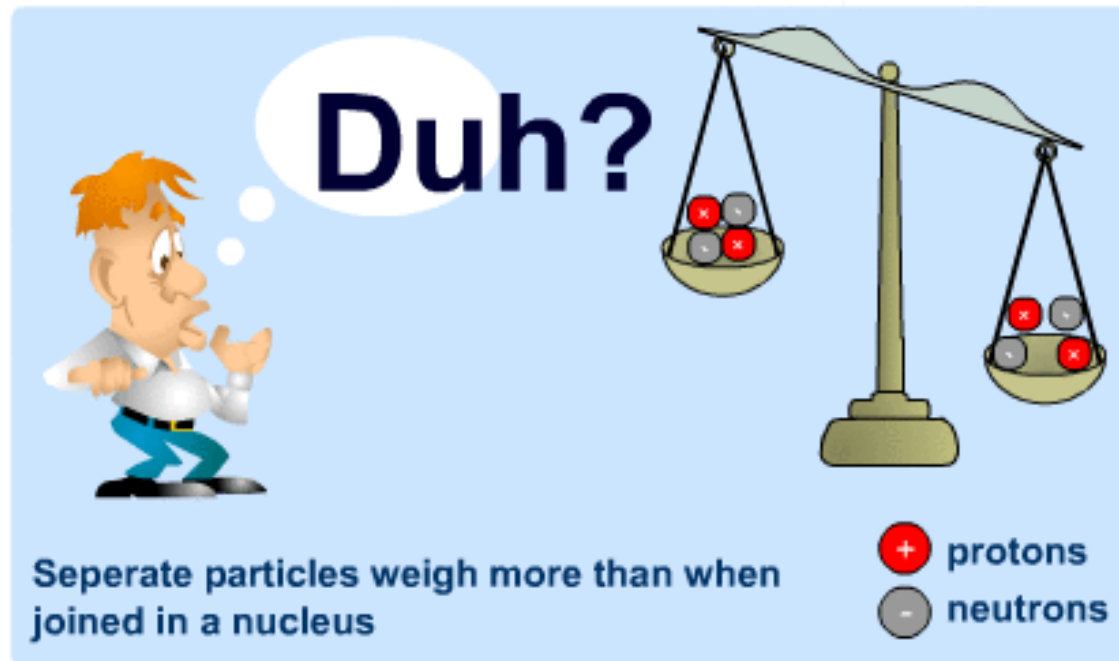
Tömegspektrométerrel az atommagok tömege mérhető, így a tömegdefektus is meghatározható.

A relativitáselméletből következik :

$E_k$ -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.

# Tömegdefektus: az atommag tömege kisebb, mint az őt alkotó részecskék összömege



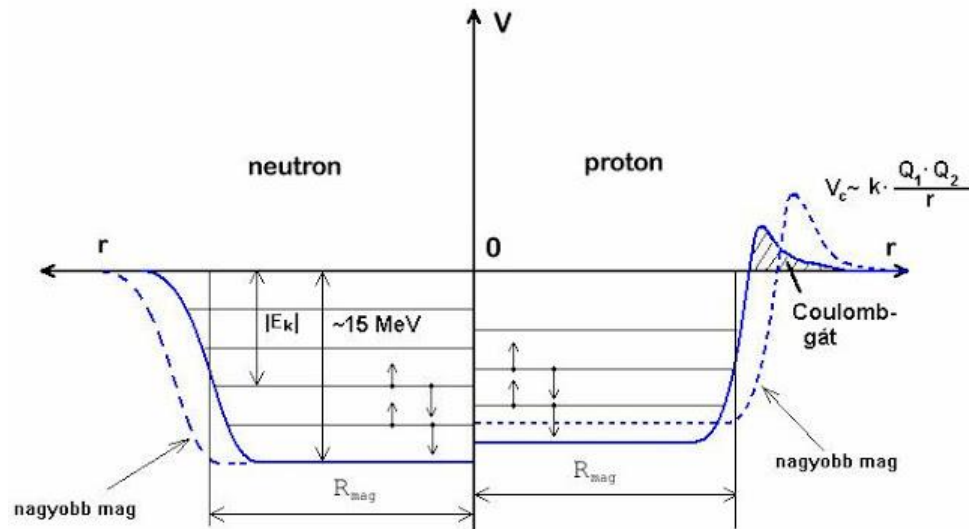
## A potenciálkád modell

A nukleáris kölcsönhatáshoz pontos analitikus függvényt nem tudunk rendelni (mint például az elektrosztatikushoz a Coulomb-törvényt).

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 potenciálkád a proton és a neutron számára eltérő, mert a proton a nukleáris kölcsönhatás mellett az elektromágnesesben is részt vesz (taszítják egymást).

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



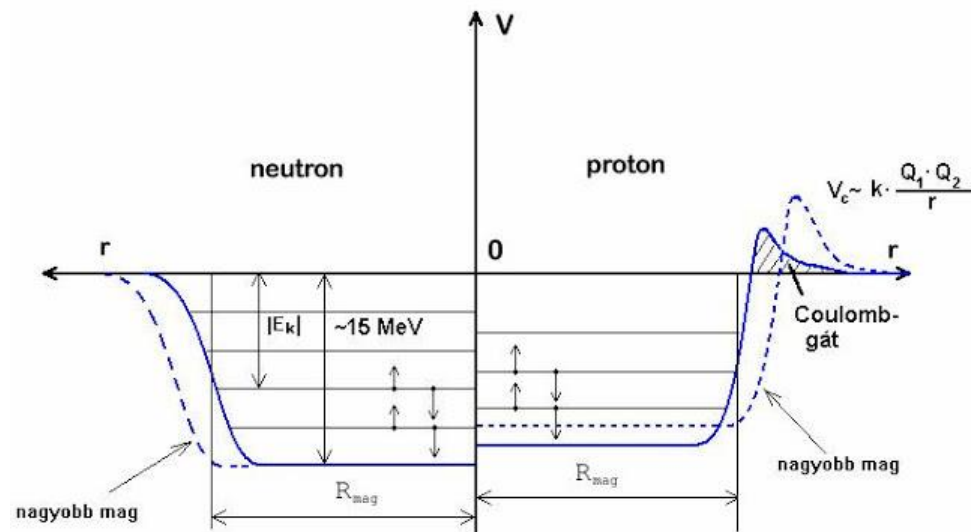
## A potenciáلكád modell

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.

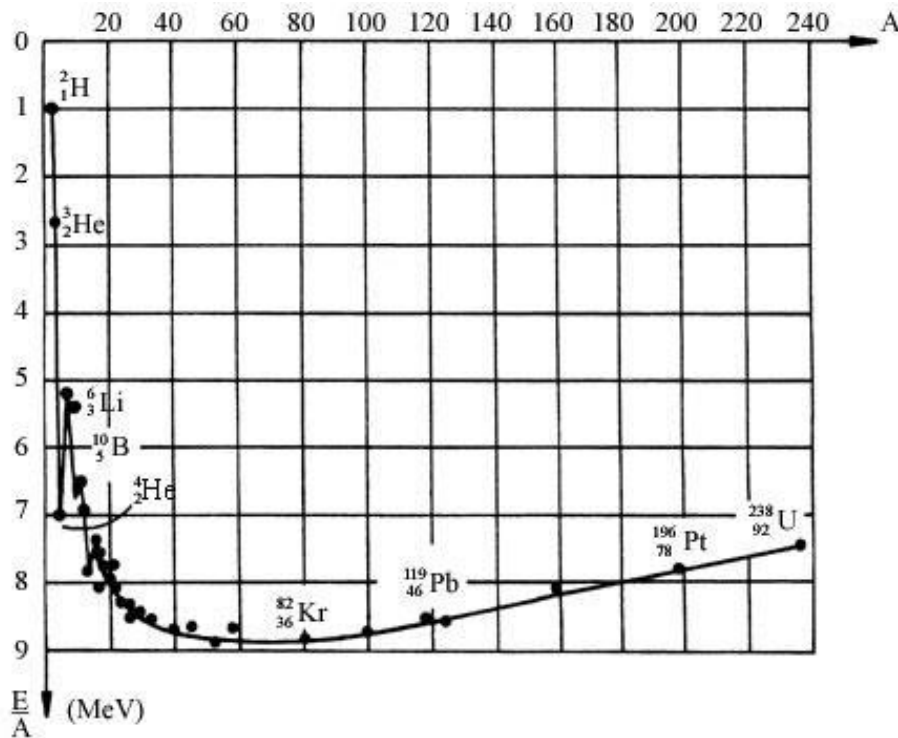
Emlék: nagyobb kádban kisebb a minimális Kinetikus energia

$$T_{\text{kin.}} \geq \frac{\hbar^2}{8m\Delta x^2}$$



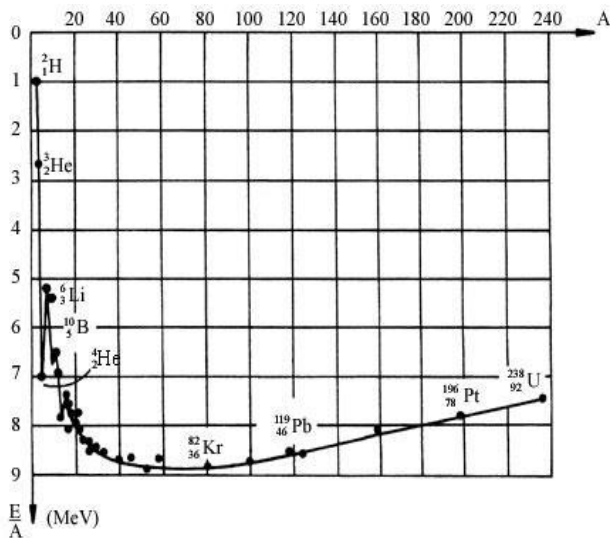


## Az egy nukleonra jutó kötési energia ( $\epsilon = E_k/A$ ) a tömegszám függvényében



- Az ábráról látható, hogy az egy nukleonra jutó kötési energia értéke átlagosan  $\epsilon \approx -8 \text{ MeV/nukleon}$ .
- Ha a tömegszám  $A$  kicsi, akkor még ugrál a görbe, majd nagy értékekre  $\epsilon$  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.

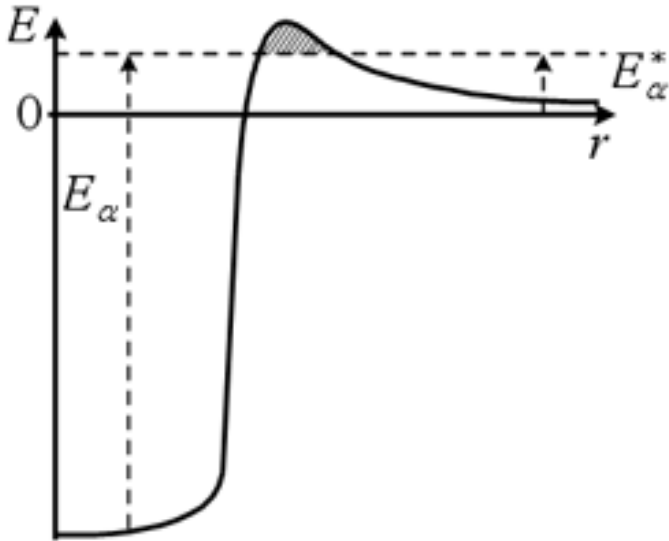
## Az $\epsilon(A)$ függvény



A görbe jellemzői :

- Az adatok jól illeszkednek egy simán futó görbére, 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 potenciálkád modell nem vesz figyelembe.
- Optimális  $\epsilon$  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
- 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 fisszió).

## Az $\alpha$ -bomlás értelmezése



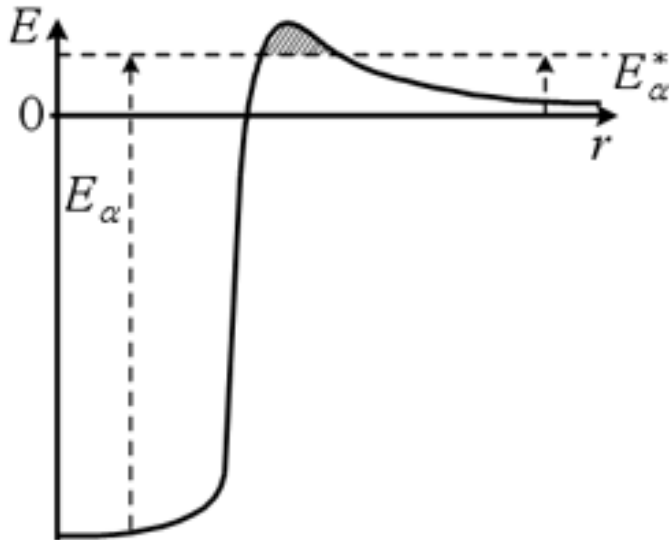
Az  $\alpha$ -részecske energiája az atommag középpontjától mért távolság függvényében a potenciálgödör modell szerint

Kezdetben az  $\alpha$ -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  $E_{\alpha}$  (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.

## A kvantummechanikai alagút effektus



Az  $\alpha$ -részecske energiája az atommag középpontjától mért távolság függvényében a potenciálgát modell szerint

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 **alagúteffektus**nak hívják, mert kicsit olyan, mintha a részecske alagutat fúrt volna a potenciálgátba (a vízszintes szaggatott vonal mentén) és azon kiszökött volna.

Erre utal az is, hogy a magtól távol az  $\alpha$ -részecske energiája  $E_{\alpha}^*$  lesz. Az alagúteffektus valószínűsége annál nagyobb, minél kisebb a besatírozott terület. Ezért ha az  $\alpha$ -részecske energiája nagy (a vízszintes szaggatott vonal magasan van), akkor a bomlás felezési ideje kicsi, ellenkező esetben nagy.

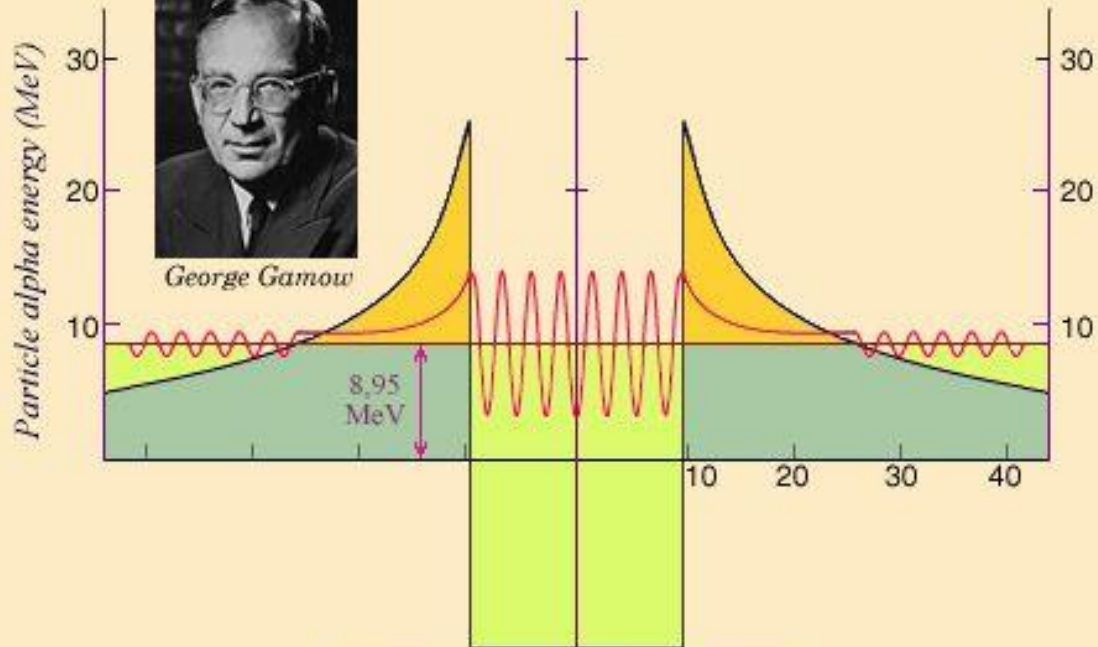
Például, ha  $E_{\alpha} \approx 4 \text{ MeV}$  akkor  $T_{1/2} = 10^9 \text{ év}$ ,

ha  $E_{\alpha} \approx 9 \text{ MeV}$  akkor  $T_{1/2} = 10^{-8} \text{ s}$

*alpha decay of Polonium-212 (Z=84)*

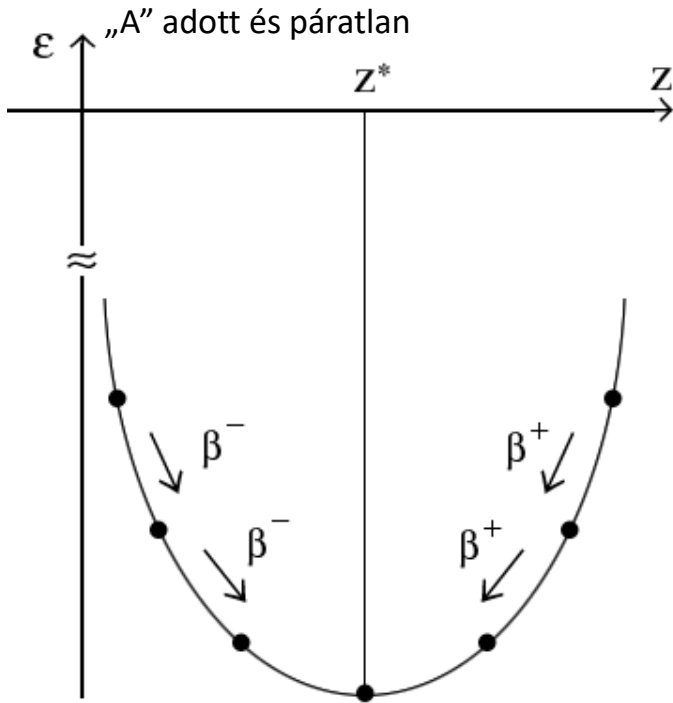


*George Gamow*



*Distance between centers (fermis)*

## A $\beta$ -bomlás értelmezése



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.

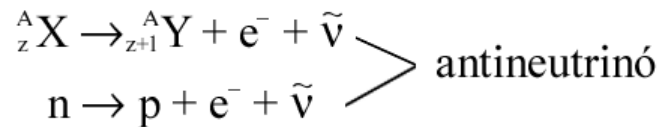
Minden  $A$ -hoz található egy optimális  $Z$ , ahol a kötési energia a legmélyebb.

Kis magoknál a legmélyebb az egy nukleonra jutó kötési energia, ha  $Z=N=A/2$  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  $\beta$ -bomlással, ha túl kevés, akkor pozitív  $\beta$ -bomlással vagy elektronbefogással bomlik.

## A béta-bomlás formái (ism)

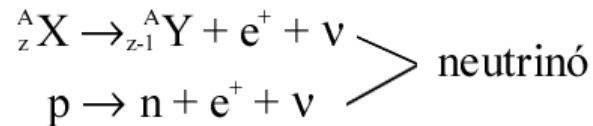
### $\beta^-$ : negatív $\beta$ -bomlás



Tehát a negatív béta bomlás során lényegében az történik, hogy a magban lévő egyik neutron protonra és elektronra (és persze az észrevétlenül elszökő antineutrínóra) bomlik. A proton a magban marad (növelve ezzel a rendszámot), a másik két részecske viszont kirepül a magból.

Ez a bomlás a magában álló neutronnal is megtörténik, a bomlás felezési ideje 10 perc körül van. Atommagban azonban csak akkor történhet meg, ha ez a mag számára energetikailag kedvező (a mag kötése erősödik, azaz  $\epsilon$  mélyebbre kerül a fenti ábrán). Hogy ténylegesen végbemegy-e a bomlás és milyen felezési idővel, az sok – itt nem tárgyalt – egyéb tényező függvénye.

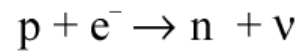
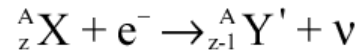
### $\beta^+$ : pozitív $\beta$ -bomlás



Tehát a pozitív béta bomlás során tehát a magban lévő egyik proton neutronra és pozitronra (és persze az észrevétlenül elszökő neutrínóra) bomlik. A protonnak ez a bomlása csak az atommagban történhet meg (ha ez energetikailag lehetséges (lásd fent)), magában álló proton sohasem bomlik el ilyen módon.

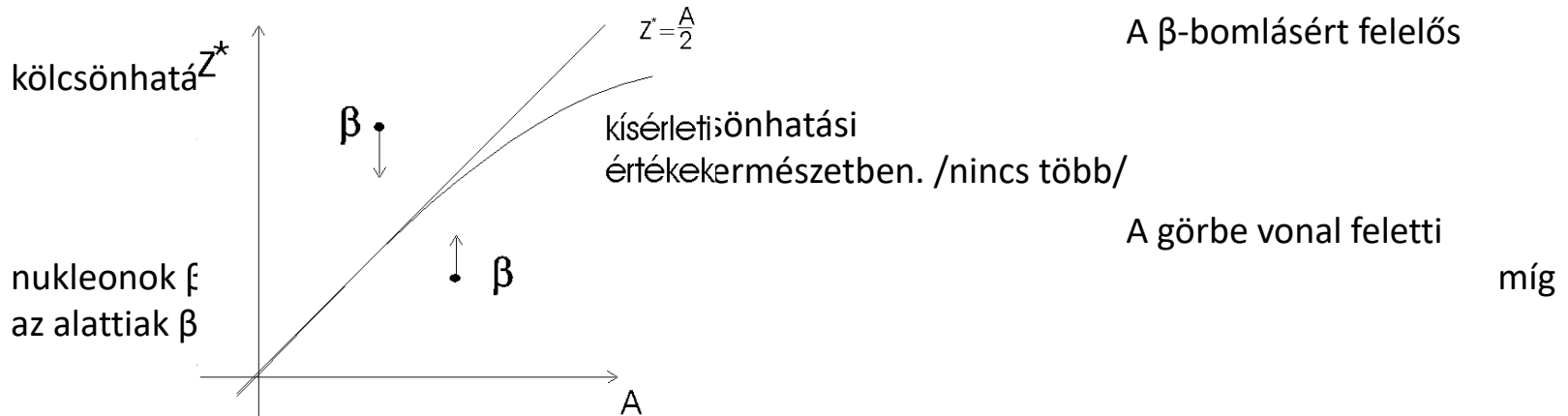
## A béta-bomlás formái (ism)/2

A pozitív béta bomlásnak mindig alternatívája az **elektron befogás**. Ilyenkor a magban lévő proton egy atomi belső héjon lévő (hozzá igen közel is előforduló) elektront fog be, létrehozva a magban maradó neutront és a kirepülő és elszökő neutrínót:



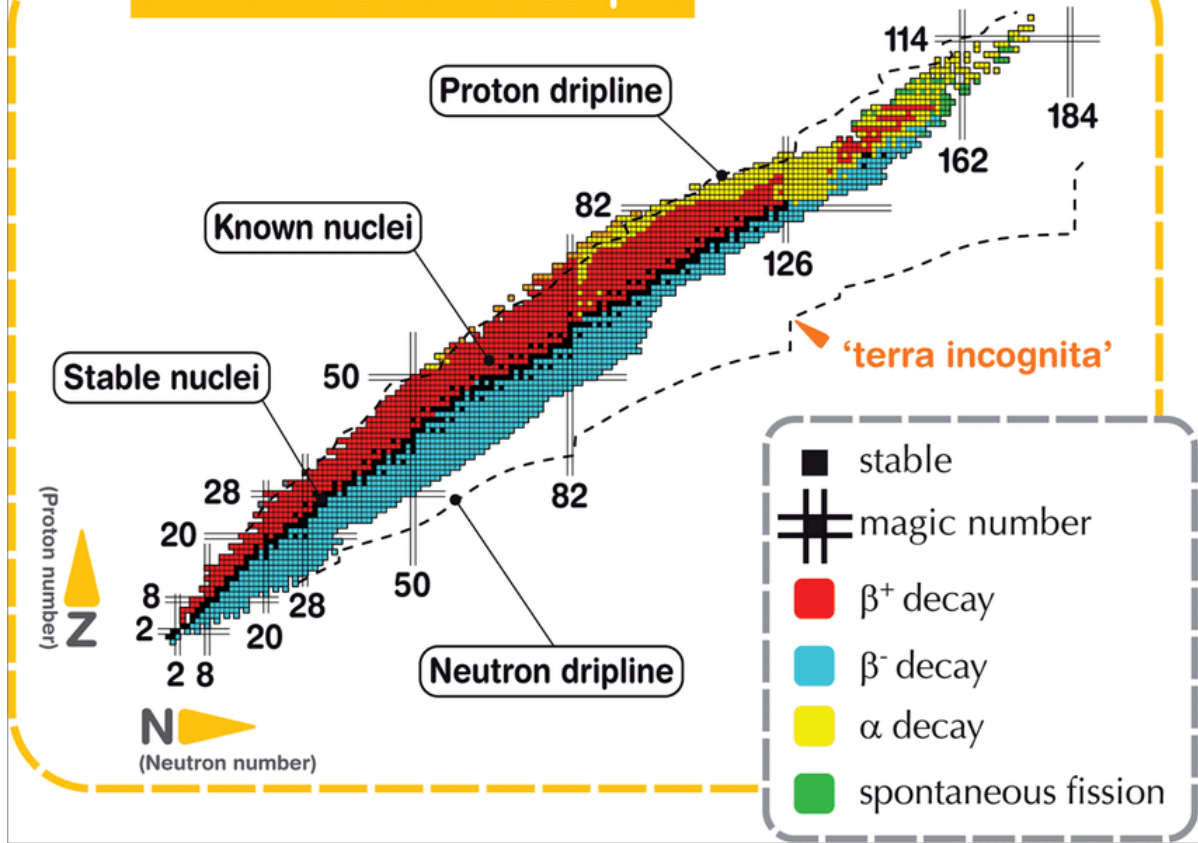
A  $\beta$ -bomlás tehát minden esetben az optimális proton – neutron arányt állítja be.

A  $Z^*(A)$  függvény:



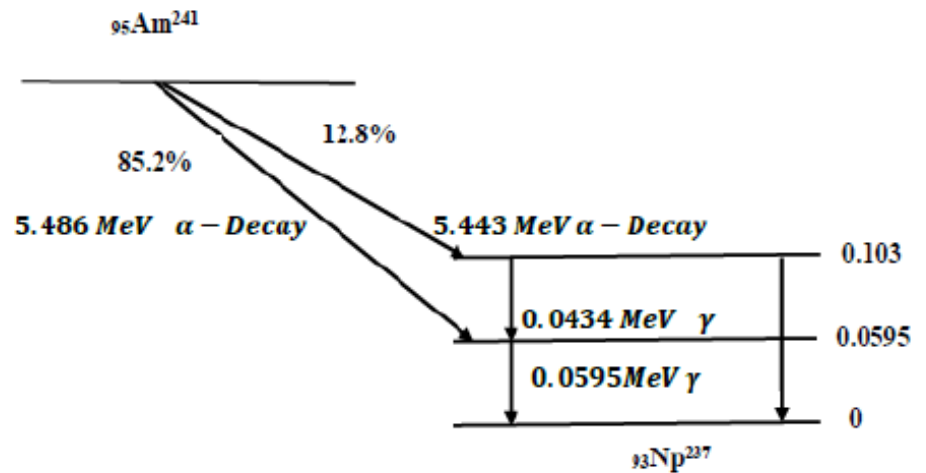
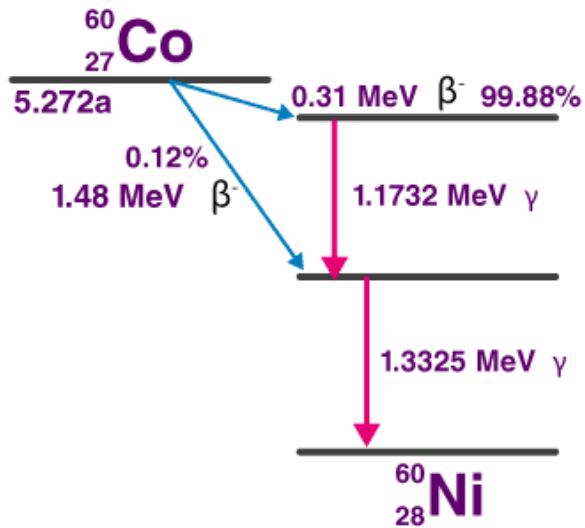


# The Nuclear Landscape



## Gamma-bomlás

Az alfa és béta-bomlást követően az atommag általában gerjesztett állapotban marad. Ennek legerjesztődése közben bocsájtja ki az atommag a gamma-sugárzást.



# Maghasadás és láncreakció

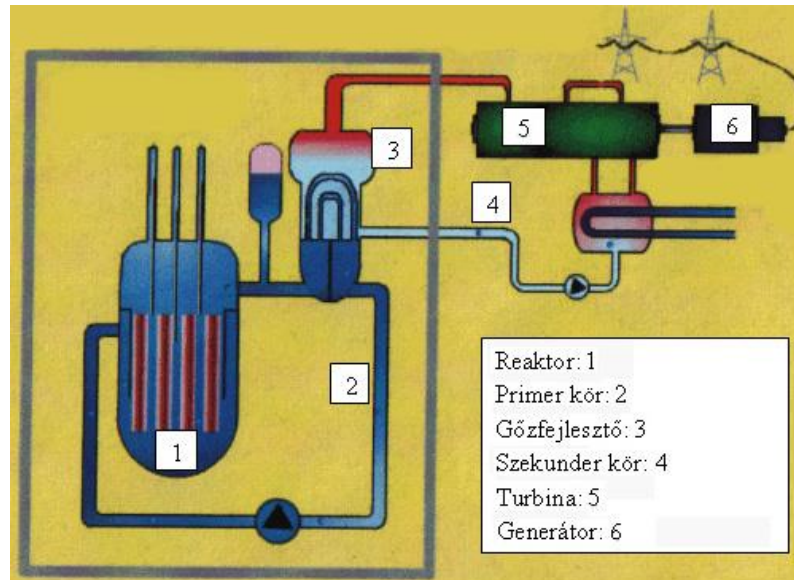
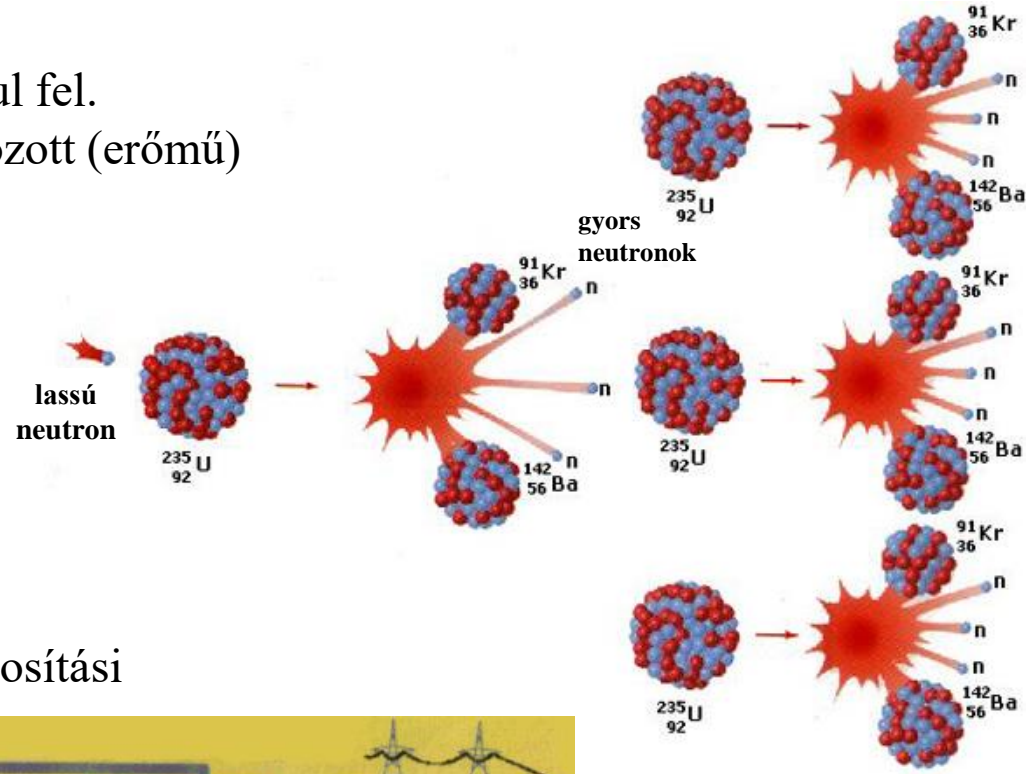
Nagy magok hasadásakor energia szabadul fel.  
Ez szabályozatlan (bomba) vagy szabályozott (erőmű)  
keretek között felhasználható.

Pl. urán 235 esetében a keletkező  
2 vagy 3 neutron (átlag  $\sim 2,5$ ) további  
magok hasadását idézi elő.  
Hasadásonként kb. **200 MeV** energia!

Amennyiben átlagban egynél  
több neutron kerül befogásra  
láncreakció jön létre. Ez a szám a sokszorosítási  
tényező ( $k = n'/n$ ).

$n'$ : újabb hasadást idéző  
 $n$ : hasadások száma

Ha  $k$  egy alatti, de  
ahhoz közeli értéken van  
tartva akkor szabályozott  
módon energia termelhető.  
(atomerőmű)



moderátor anyagok:

- grafit
- nehézvíz
- közönséges víz

gyors neutronok  
lelassítása a hasadás  
érdekében.

# Fúzió

Kisebb magok fúziójakor is energia szabadul fel, pl. a Napban ill. a hidrogén bombában hidrogénből hélium keletkezik.

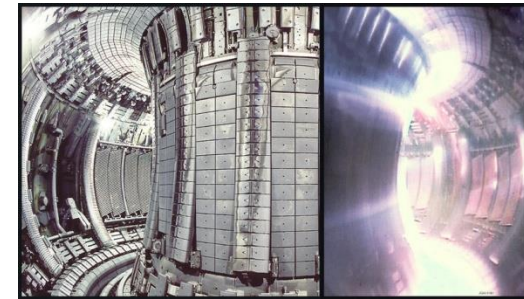
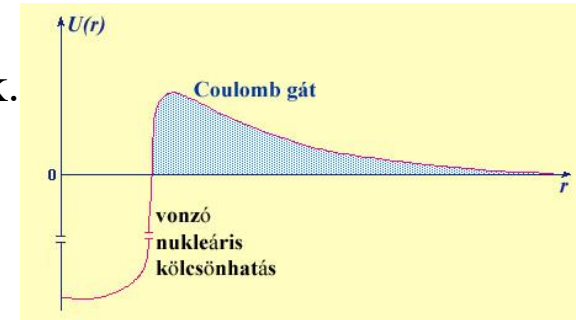
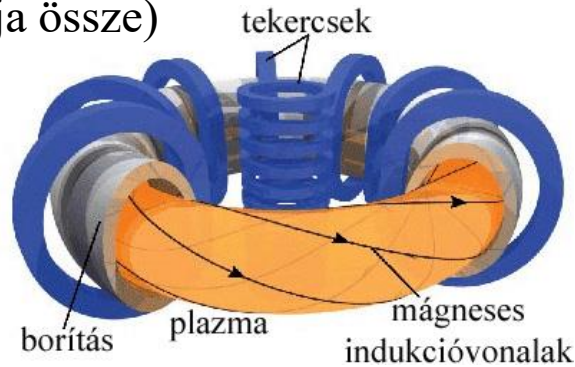
Probléma: a Coulomb-gát miatt több tízmillió fok hőmérséklet szükséges ahhoz, hogy a magok közötti fúzió létrejöhessen.

Bomba: hasadásos atombomba felhevíti

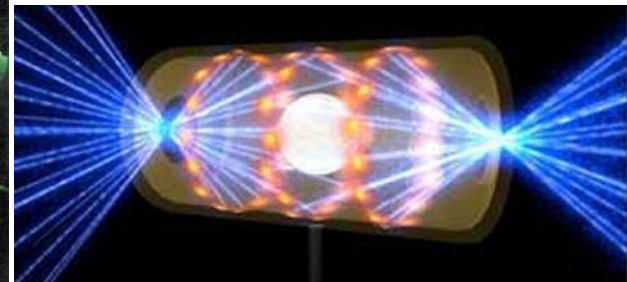
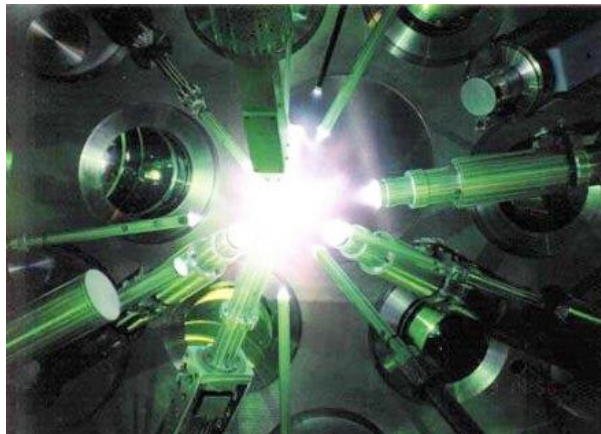
Erőmű: forró plazma együtt tartása eddig nem megoldott

Két típus:

1. Tokamak (mágneses palack tartja össze)



2. lézeres fúzió  
(pici cseppben a hidrogént a ráfókuszált lézerek begyűjtják)



## Ellenőrző kérdések

Az atommag tömege pontosan egyenlő a benne lévő protonok és neutronok össztömegével, mert a nukleáris kölcsönhatásban az elektronok nem vesznek részt.

- a) Az állítás és az indoklás is helyes, közöttük nincs oki kapcsolat
- b) Az állítás igaz, de az indoklás nem
- c) Az állítás hamis, de az indoklás önmagában helyes
- d) Az állítás és az indoklás is helyes, közöttük oki kapcsolat van

Válasszuk ki a hibás állítást!

A potenciáلكád modell szerint:

- a) a nukleonokra a magon belül nem hat erő, csak a mag határán
- b) a magon kívül a proton taszítást érez, a neutronra nem hat erő
- c) a potenciáلكád mélysége arányos az atommag méretével
- d) a potenciáلكádban kötött állapotok alakulnak ki, amelyet a nukleonok párosával tölthetnek be

## Ismétlő kérdések

Válasszuk ki a nukleáris kölcsönhatásra nem jellemző tulajdonságot!

- a) A kvarkok közötti erős kölcsönhatás maradéka
- b) Nagy hatótávolságú (hasonlóan a gravitációhoz)
- c) Nukleonok között hat
- d) Töltésfüggetlen

Állítsuk az alapvető kölcsönhatásokat erősségük szerint növekvő sorrendbe (tehát a leggyengébb legyen elől)!

- a) Gravitációs-, gyenge-, elektromágneses-, erős kölcsönhatás
- b) Gyenge-, elektromágneses-, gravitációs-, erős kölcsönhatás
- c) Gyenge-, gravitációs-, elektromágneses-, erős kölcsönhatás
- d) Gravitációs-, elektromágneses-, gyenge-, erős kölcsönhatás