

# Mag- és neutronfizika

Az előadás célja: megalapozni az atomenergetikai ismereteket

A félév során a következő témaköröket ismertetjük:

- **Magfizikai alapfogalmak** (atommagok, radioaktivitás)
- **Sugárzás és anyag kölcsönhatása, magfizikai detektorok**
- **Atommag-reakciók, és jellemző mennyiségeik**
- **Atomenergia.** Maghasadás, magfúzió, láncreakció, atomerőmű-típusok
- **Neutrongáz-fizika** alapfogalmai

## Az atommag felfedezése és tulajdonságai

**XIX század: Avogadro felfedezése: molnyi mennyiségű anyagban mindig ugyanannyi részecske van:  $N_A=6\cdot 10^{23}$**

**Következmény: atomok mérete meghatározható!**

**Példa: arany atomok mérete:**

**Au atomsúlya: 197, azaz 197 g aranyban van  $6\cdot 10^{23}$  számú atom**

**Au sűrűsége:  $19,3 \text{ g/cm}^3$ , azaz 197 g térfogata  $(197/19,3) \sim 10 \text{ cm}^3$**

**Egy Au-atomra jutó térfogat:  $(10 \text{ cm}^3)/(6\cdot 10^{23}) \sim 16 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^3$**

**Egy Au-atomot befoglaló kocka éle:  $\sqrt[3]{16\cdot 10^{-24}} = 2,52\cdot 10^{-8} \text{ cm}$**

**Az atomok mérete tehát  $\sim 10^{-10} - 10^{-9} \text{ m}$  nagyságrendű.**

**Az atomok elektromosan semleges részecskék, de belőlük pozitív és negatív töltésű ionok hozhatók létre!**

**1897: az elektron felfedezése (J. J. Thomson)**

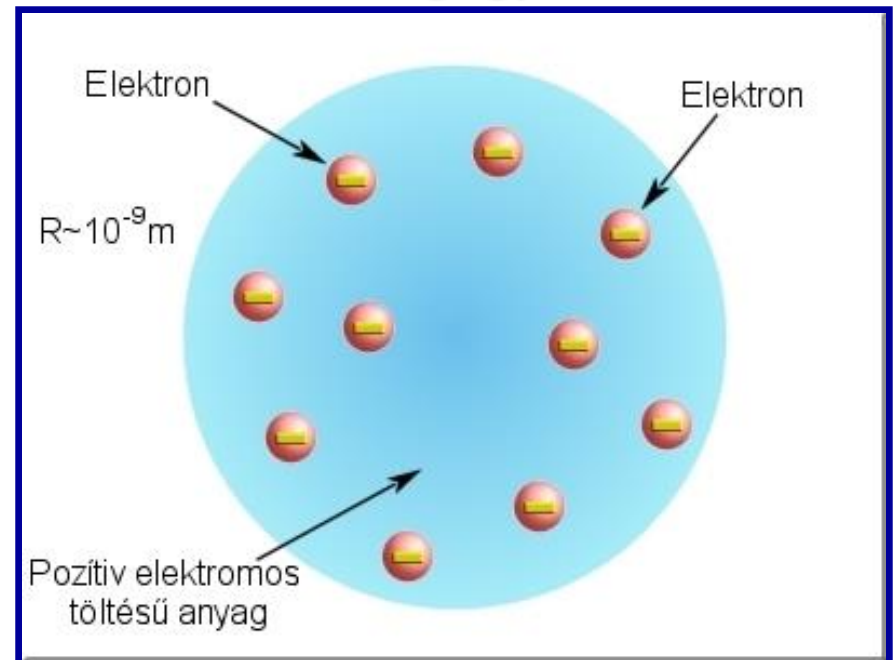
- minden atom alkotórésze,
- kis tömegű,
- negatív töltésű részecskék

**Következmény: a pozitív töltéshez nagy tömeg tartozik.**

**Matematikailag: az elektronra  $|q/m_{\text{elektron}}| \gg |q/M_{\text{pozitív}}|$**

**(mivel a semlegesség miatt a töltések megegyeznek)**

**Thomson-féle atommodell**  
**(görögdinnye, vagy**  
**mazsolás puding modell)**



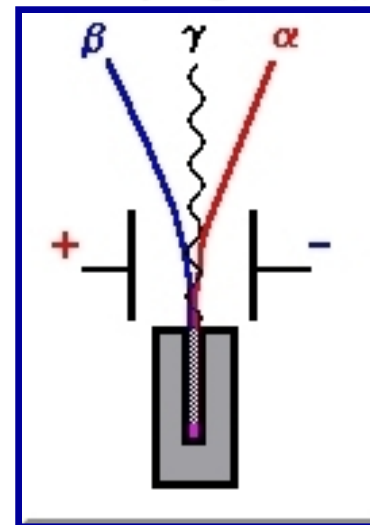
**1896: a természetes radioaktivitás felfedezése (H. Becquerel)**

**1900-as évek elején:**

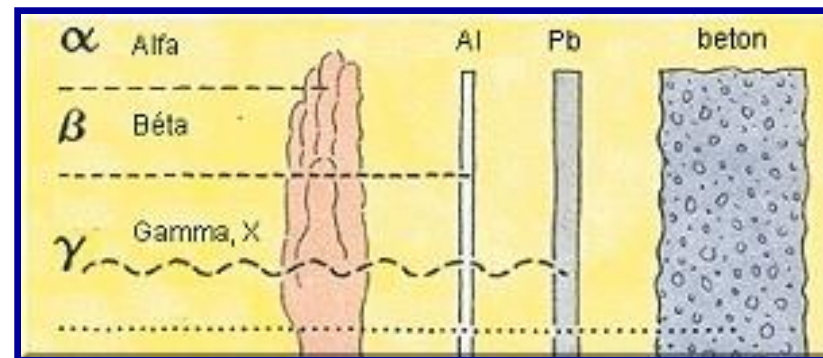
- nagy energiájú részecskék lépnek ki a sugárzó anyagból ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ )
- elemek átalakulnak egymásba

a részecskék elektromos töltése  
különböző

- $\alpha$  – részecskék: nehéz,  $\text{He}^{2+}$  ionok
- $\beta$  – részecskék: nagy energiájú elektronok
- $\gamma$  - sugárzás: elektromágneses (fotonok)



a részecskék áthatolóképesége  
különböző



**Meglepő, hiszen az anyag  
elektromosan semleges!**

**E. Rutherford: miért nem**

**hatolnak át az  $\alpha$  – részecskék egy vékony papírlapon sem?**

## 1911: Rutherford kísérlete:

- $\alpha$ -részecskék kölcsönhatása vékony arany (Au) fóliával

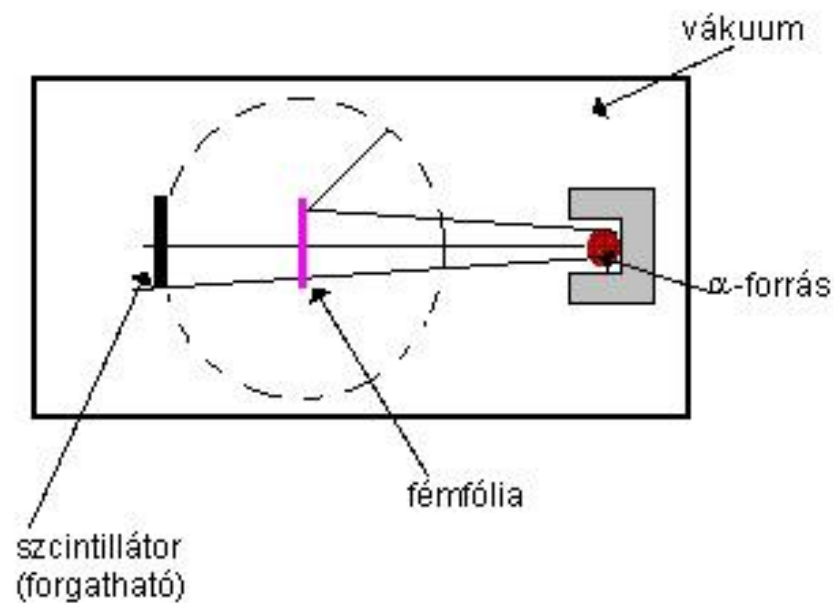


### Miért éppen arany?

- az aranyat lehetett a legvékonyabbra kalapálni (néhány atomréteg)



Rutherford kísérlet



# Mit lehetett várni?

Az  $E$  energiájú  $\alpha$ -részecskét a Thomson-atom pozitív töltésű anyaga taszítja – Coulomb-potenciáldomb

A potenciáldomb maximális „magassága”

$$E_{\max} = \frac{3}{2} k \frac{Z_1 Z_2 e^2}{R_{\text{atom}}}$$

Itt  $Z_1 = 2$  (He rendszáma)

$Z_2 = 79$  (Au rendszáma)

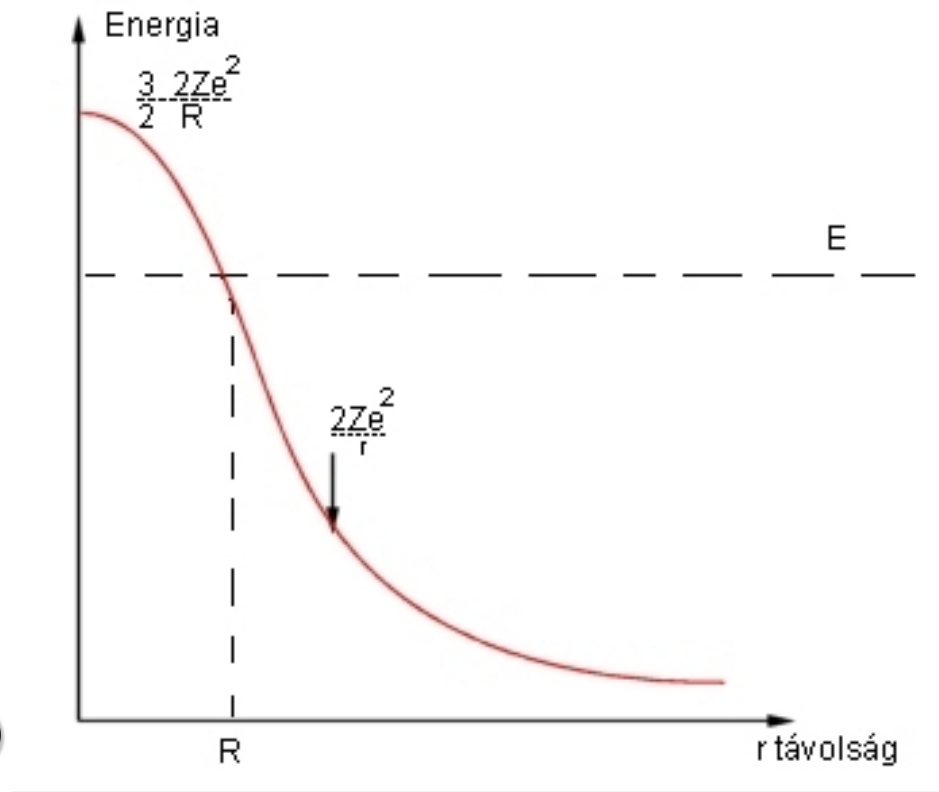
$k = 9 \cdot 10^9 \text{ J}\cdot\text{m}/\text{Cb}^2$

$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$  (elemi töltés)

$R_{\text{atom}} \sim 10^{-10} \text{ m}$  (láttuk korábban)

Ezekkel  $E_{\max} \sim 5,5 \cdot 10^{-16} \text{ J}$

Ugyanakkor:  $E_{\text{alfa}} \sim 7700 \cdot 10^{-16} \text{ J}$



Mint lövedék a papírlapon!



# Tapasztalat:

Voltak „visszapattanó” részecskék is!

## Következtetés:

A potenciáldomb „magasabb”, mint az  $\alpha$ -részecske energiája,  
azaz:

$$E_{\text{alfa}} < \frac{3}{2} k \frac{Z_1 Z_2 e^2}{R} \quad \text{azaz:}$$

$$R < \frac{3}{2} k \frac{Z_1 Z_2 e^2}{E_{\text{alfa}}}$$

Az adatokat behelyettesítve kapjuk:  $R < 10^{-14}$  m, azaz tízezerszer kisebb, mint az atomok sugara!

**Az atomokban a tömeg és a pozitív elektromos töltés az igen kisméretű atommagba koncentrálódik!**

# Hofstadter nagy energiájú elektronokkal még az atommagon belüli töltéseloszlást is meg tudta mérni

## Eredmények:

- a középponti sűrűség ~ állandó
- $R = r_0 \cdot A^{1/3}$ , ahol
- $r_0 = 1,2 \cdot 10^{-15} \text{ m} = 1,2 \text{ fm}$ .

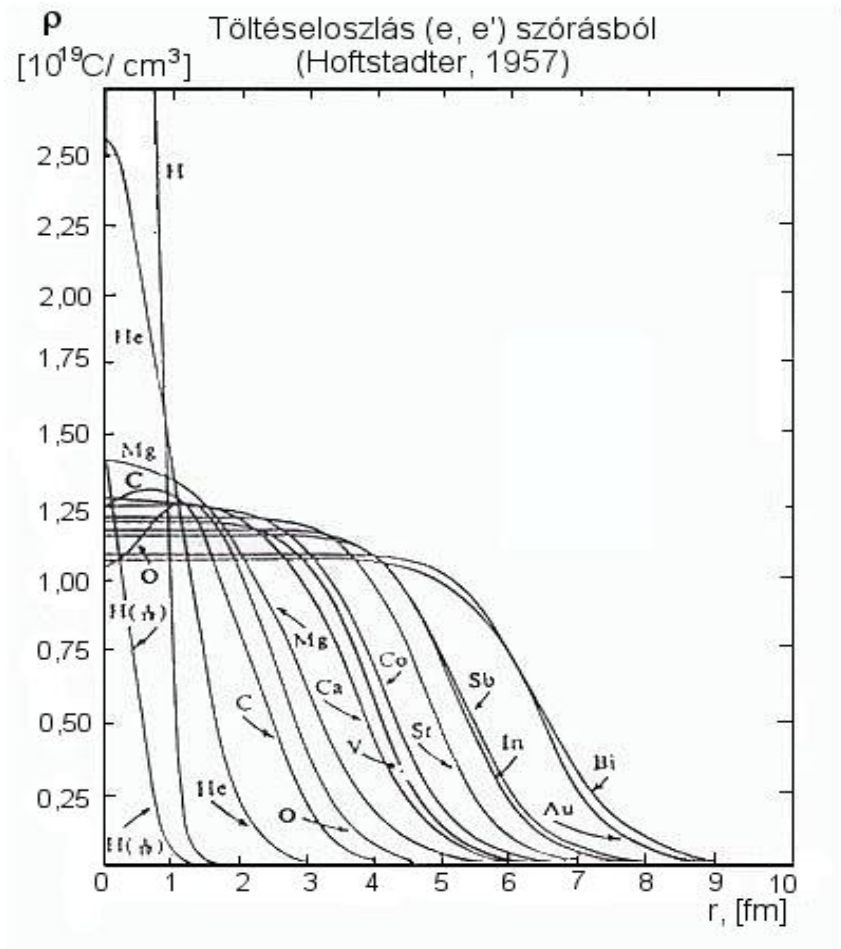
A magsűrűség jól leírható  
Egy Fermi-függvénnyel:

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + e^{\frac{r-R}{d}}}$$

Ahol

$R$  a mag sugara, ( $\sim r_0 \cdot A^{1/3}$ )

$d$  a felületi „diffuzitás”



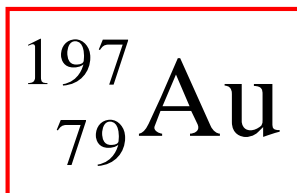


## Az atommag összetétele:

- $Z$  db. proton (rendszám)      Nukleon: protonok és neutronok
- $N$  db. neutron      közös neve
- $A = N + Z$  (tömegszám, nukleonszám)

	proton	neutron
tömeg	$1,67265 \cdot 10^{-27}$ kg	$1,67495 \cdot 10^{-27}$ kg
töltés	+e	0

Jelölés:



$$N = A - Z = 197 - 79 = 118$$

## Elnevezések:

- azonos protonszámú atommagok: **IZOTÓPOK**
- azonos tömegszámú atommagok : **IZOBÁROK**
- azonos neutronszámú atommagok: **IZOTÓNOK** (ritkán)

## Az atommag tömege:

$M(A,Z) = Z \cdot m_{\text{proton}} + (A-Z) \cdot m_{\text{neutron}} - \Delta M$  a mérések szerint.

$\Delta M$  neve: **tömeghiány**

A tömeghiány oka az, hogy a protonok és a neutronok kötött állapotban vannak az atommagban, és csak  $B$  kötési energia befektetésével bonthatók szét.

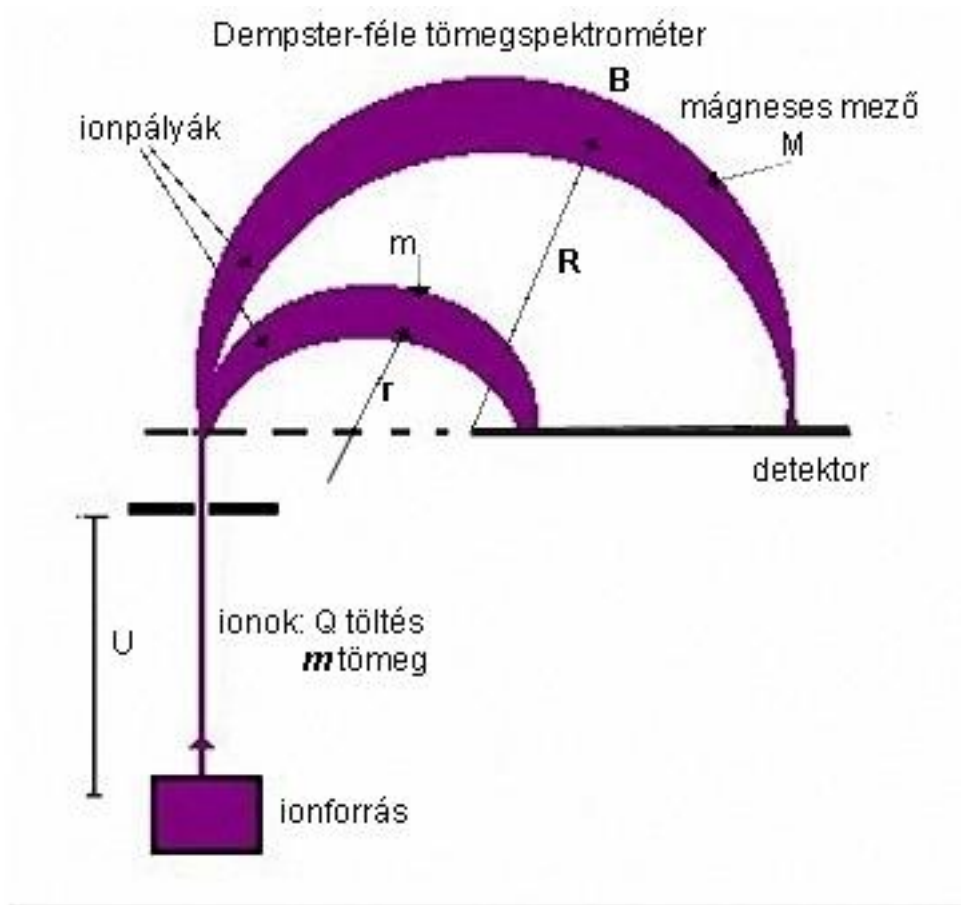
Einstein szerint:  $E = mc^2$ , ami erre az esetre:  $B = \Delta M \cdot c^2$

**A tömeg pontos mérésével tehát az atommag kötési energiáját lehet meghatározni!**

## Az atomtömeg mérése:

Tömegspektrométerekkel (tömegspektroszkóp)

- Az atomokat először ionizáljuk,
- Az ionokat elektromos mezőben felgyorsítjuk
- A gyorsított ionokat elektromos és mágneses terekkel eltérítjük
- Az eltérülésből a tömeget meg lehet határozni.



**Azonos ( $q/m$ ) –hez tartozó (molekula-) ionok azonos helyre érkeznek.**

**Kis tömegkülönbségek is pontosan mérhetők!**

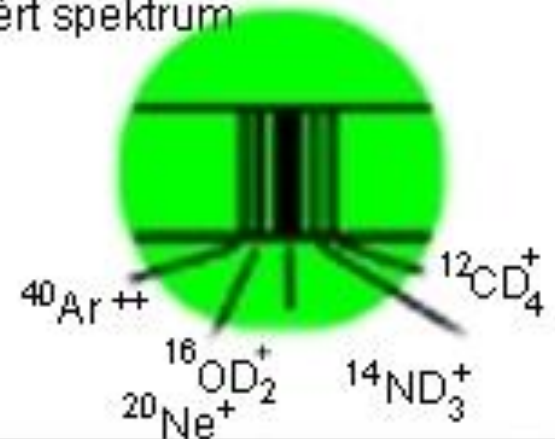
**Pl. ( $q/m$ )=1/20**

**„kevert” nyaláb:**

$^{40}\text{Ar}^{++}$ ,  $^{20}\text{Ne}^+$ ,

$^{16}\text{OD}_2^+$ ,  $^{14}\text{ND}_3^+$ ,  $^{12}\text{CD}_4^+$

mért spektrum



Atomi tömegegység (atomic mass unit):

Megállapodás szerint az atomi tömegegység a <sup>12</sup>C atom tömegének a 12-ed része  $u = M(^{12}\text{C})/12$

1 u =  $1,66043 \pm 0,00002 \cdot 10^{-27}$  kg

Figyelem: ez  $\frac{1}{2}$  elektrontömeeggel több, mint a <sup>12</sup>C **atommag** tömegének 12-ed része!

Miért éppen a <sup>12</sup>C atomot választották?

Mert a szén nagyon sokféle atommal, sokféle molekulasúlyú molekulát tud képezni, így a tömegdublett módszerrel sok atom pontos tömegét meg lehet határozni!

(Tömegdublett módszer: gyakorlaton)

## Energia és kötési energia:

Einstein:  $E = m \cdot c^2$ . Mivel  $m \geq 0$ , ezért a teljes energia is  $E \geq 0$ .

Példaként nézzük a deuteron ( ${}^2\text{H}$ ) tömegét, és energiáját!

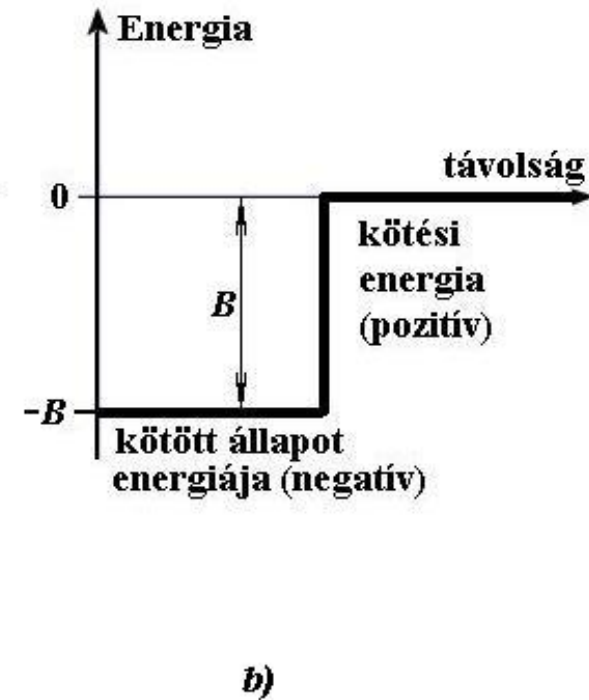
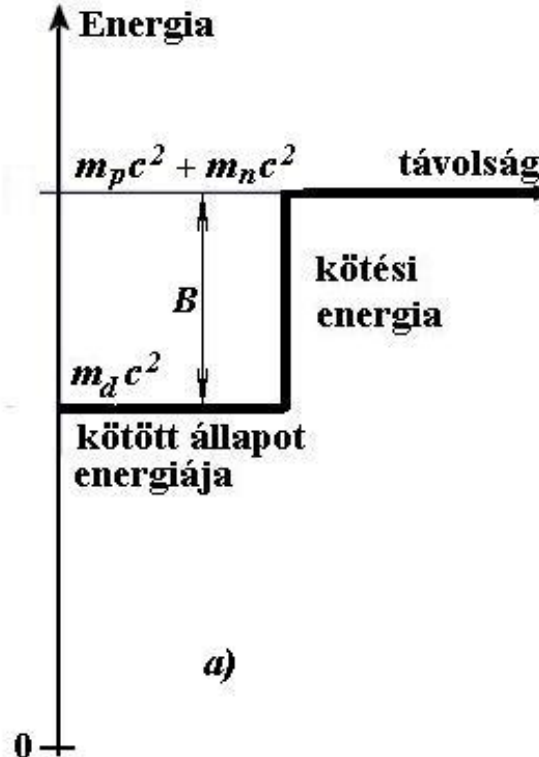
$$m_d = m_p + m_n - \Delta M \quad (\text{szorozzuk be } c^2\text{-el})$$

$$m_d c^2 = m_p c^2 + m_n c^2 - B \quad (\text{ábra bal oldala})$$

Gyakran a szétbontott rendszer energiájánál helyezzük el az energiaskála 0 pontját (ábra jobb oldala).

Ilyenkor a kötött rendszer energiája **NEGATÍV** lesz.

$$E = -B$$



# Atommagok kötési energiája

(Weizsäcker-féle félempírikus kötési energia formula)

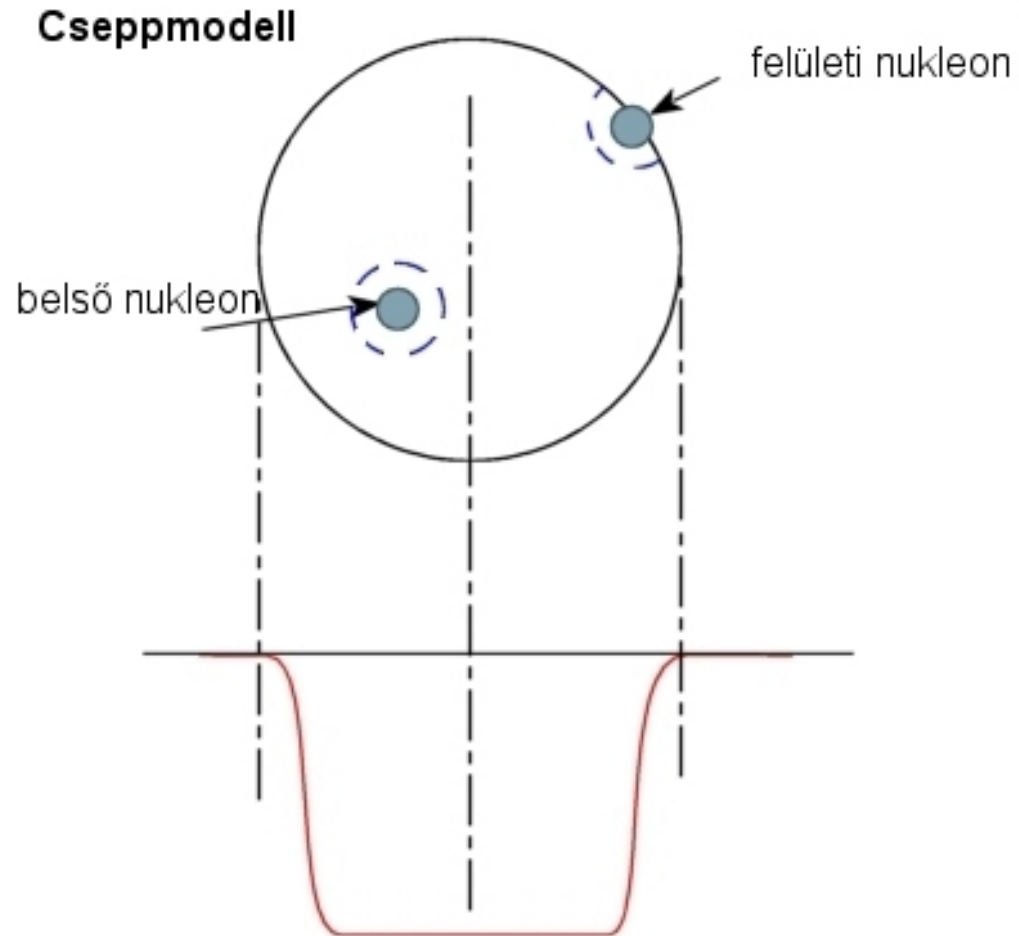
Kiindulás: a magsűrűség  $\sim$  állandó, ezért az atommag olyan, mint egy (elektromosan töltött) folyadékcsepp (Cseppmodell)

A nukleonok csak a szomszédaikkal állnak nukleáris kölcsönhatásban. Ha minden nukleon „belső” lenne, akkor  $B = b_V \cdot A$  lenne. ( $b_V$  egyetlen „belső” nukleon kötési energiája.)

A felületi nukleonok gyengítik a kötést, ezért

$$B = b_V \cdot A - \beta \cdot 4\pi R^2$$

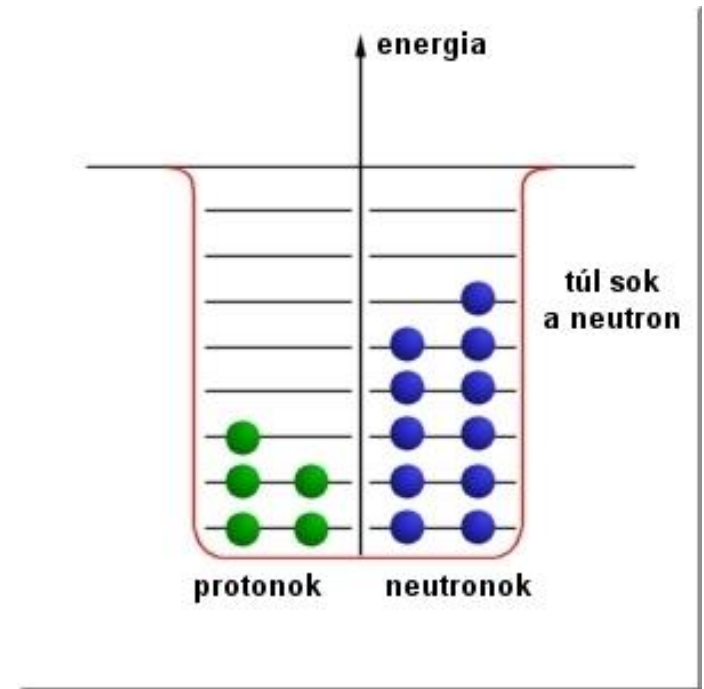
Itt  $\beta$  egy állandó.



**Idáig csak a nukleáris kölcsönhatást vettük figyelembe. A mag  $Ze$  töltése miatt Coulomb-energia is van, amely a protonok taszítása miatt tovább gyengíti a kötést:**

$$B = b_V A - \beta \cdot 4\pi R^2 - \frac{3}{5} k \frac{Z^2 e^2}{R}$$

**Figyelembe kell még vennünk azt, hogy a protonokra és a neutronokra is érvényes a Pauli elv (legfeljebb 2 azonos részecske lehet egy energiaszinten). Emiatt, túl sok neutron (proton) jelenléte (aszimmetria) tovább gyengíti a kötést:**



$$B = b_V A - \beta \cdot 4\pi R^2 - \frac{3}{5} k \frac{Z^2 e^2}{R} - b_A \frac{(Z - N)^2}{A}$$

**Végül: a tapasztalat szerint azok az atommagok erősebben kötöttek, ahol a proton (és/vagy) a neutrons szám páros (pár-energia)**

$$B = b_V A - \beta \cdot 4\pi R^2 - \frac{3}{5} k \frac{Z^2 e^2}{R} - b_A \frac{(Z - N)^2}{A} + b_P \delta \cdot A^{4/3}$$

**Itt  $\delta = 1$ , ha az atommag páros-páros**

**$\delta = 0$ , ha az atommag páratlan-páros**

**$\delta = -1$ , ha az atommag páratlan-páratlan**

**Használjuk még ki, hogy  $R = r_0 \cdot A^{1/3}$ , és a különböző konstansokat vonjuk össze egyetlen konstansba minden tagnál:**

$$B = b_V A - b_F \cdot A^{2/3} - b_C \cdot \frac{Z^2}{A^{1/3}} - b_A \cdot \frac{(N - Z)^2}{A} + b_P \cdot \delta \cdot A^{4/3}$$

**Ez a Weizsäcker-féle félempirikus kötési energia formula**



**A képletben szereplő tagok elnevezése (zárójelben az energiatagban szereplő konstans értéke)**

- **térfogati energia ( $b_V=2,52 \cdot 10^{-12}$  J)**
- **felületi energia ( $b_F=2,85 \cdot 10^{-12}$  J)**
- **Coulomb-energia ( $b_C=0,11 \cdot 10^{-12}$  J)**
- **Aszimmetria energia ( $b_A=3,80 \cdot 10^{-12}$  J)**
- **Párenergia ( $b_P=1,49 \cdot 10^{-12}$  J)**

**Ezeket a konstansokat empirikus (tapasztalati) úton határozták meg. Ezzel az 5 konstanssal az ismert, kb. 2000 atommag kötési energiája 1-2% pontossággal leírható!!!**

**Egyetlen nukleon átlagos kötési energiája:  $b = B/A$ .**

**Milyen „mélyen” van egyetlen nukleon átlagosan a magban?**

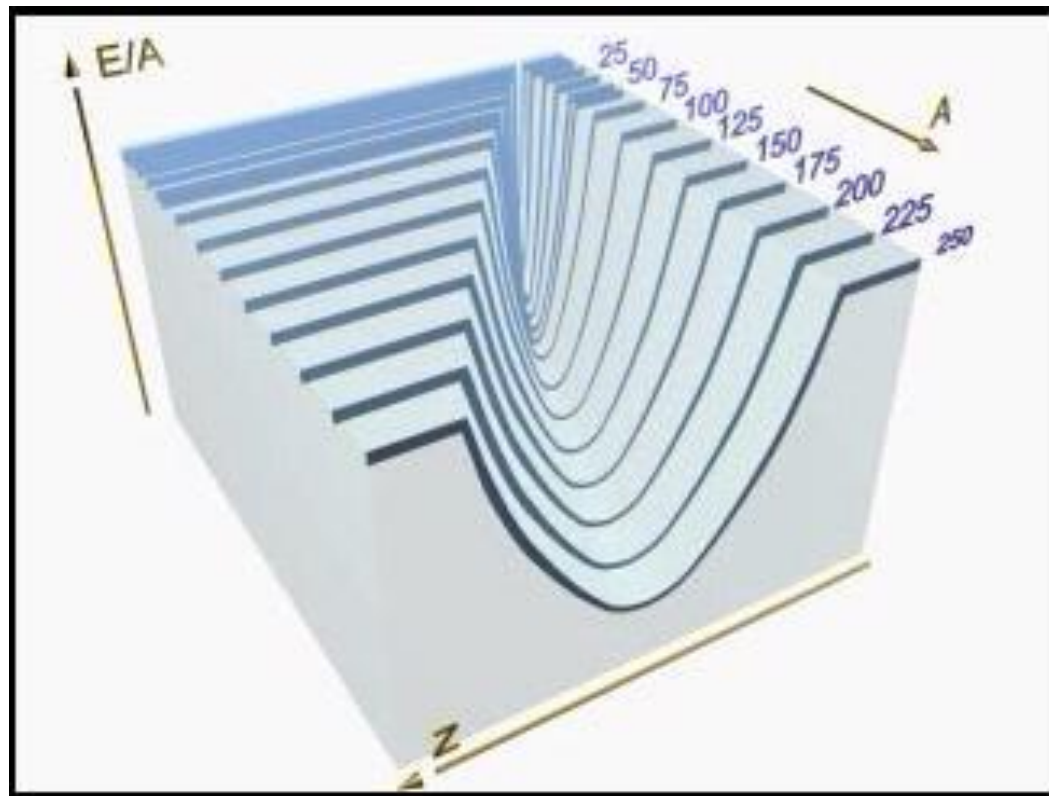
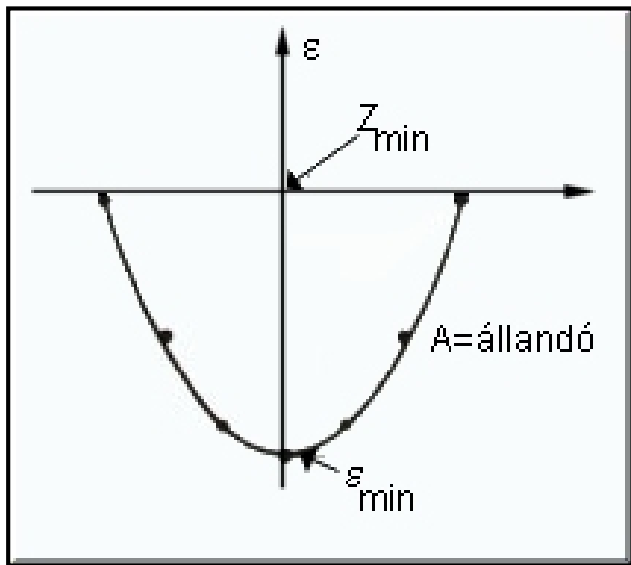
**Mekkora egyetlen nukleon energiája?**

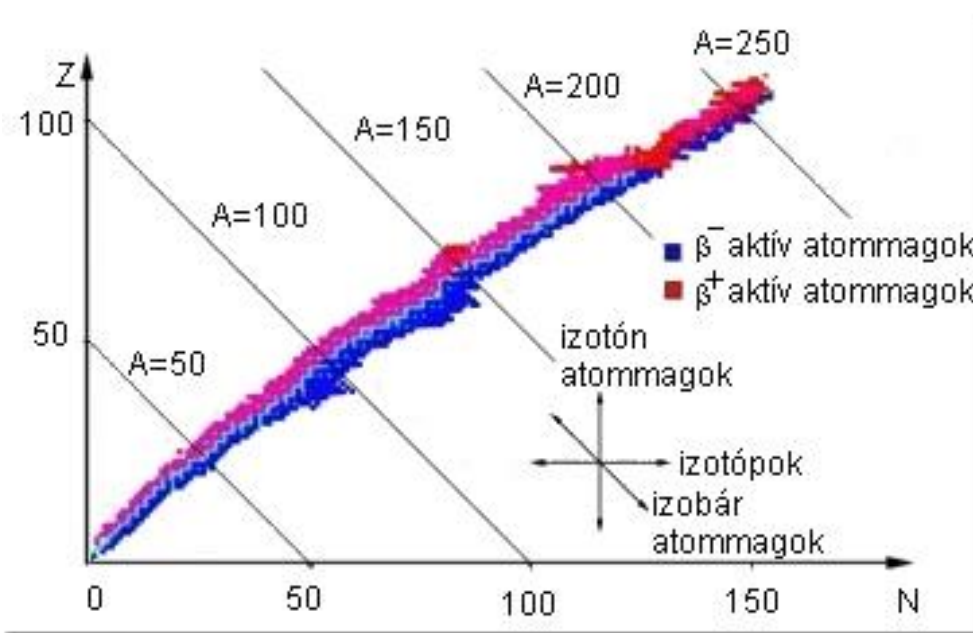
$$\varepsilon = -b = -B/A.$$

$\varepsilon = -b = -B/A$ . Mivel  $B$  a mag összetételének  $(Z,A)$  függvénye, ezért nyilván  $\varepsilon$  is az.  $\varepsilon = \varepsilon(Z,A)$ . Ezt egy felülettel lehet jellemezni. Ennek a vizsgálatával foglalkozunk a továbbiakban.

$$B = b_V A - b_F \cdot A^{2/3} - b_C \cdot \frac{Z^2}{A^{1/3}} - b_A \cdot \frac{(N-Z)^2}{A} + b_P \cdot \delta \cdot A^{4/3}$$

Vegyük észre, hogy az  $A = \text{konstans}$  metszetek parabolák!





**$Z_{\min}$  helye az  $(N,Z)$   
„térképen”**

**Ennek segítségével lehet  
megérteni a radioaktív  
bomlásokat!**

**$\epsilon_{\min}$  a tömegszám ( $A$ )  
függvényében**

**Ennek segítségével lehet  
megérteni az atomenergia  
felszabadítását**

Az egy nukleonra eső kötési energia a tömegszám függvényében

