Mag- és neutronfizika

<u>Az előadás célja</u>: 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: $N_A=6\bullet10^{23}$

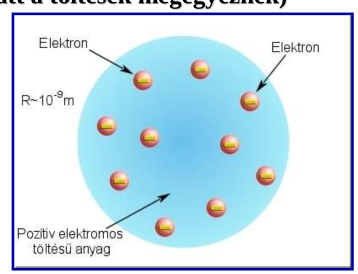
Következmény: atomok mérete meghatározható!

Példa: arany atomok mérete:
Au atomsúlya: 197, azaz 197 g aranyban van $6\bullet10^{23}$ számú atom
Au sűrűsége: 19,3 g/cm^3, azaz 197 g térfogata (197/19,3) ~ 10 cm^3
Egy Au-atomra jutó térfogat: (10 cm^3)/($6\bullet10^{23}$) ~ 16 $\bullet10^{-24}$ cm^3
Egy Au-atomot befoglaló kocka éle: $\sqrt[3]{16\cdot10^{-24}}=2{,}52\cdot10^{-8}$ cm
<u>Az atomok mérete tehát ~ 10^{-10} - 10^{-9} m nagyságrendű.</u>

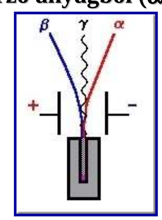
Az atomok elektromosan semleges részecskék, de belőlük pozitív és negatív töltésű ionok hozhatók létre!
1897: az elektron felfedezése (J. J. Thomson)
– minden atom alkotórésze,
– kis tömegű,
– negatív töltésű részecskék

Következmény: a pozitív töltéshez nagy tömeg tartozik.
Matematikailag: az elektronra $|q/m_{elektron}| >> |q/M_{pozitív}|$
(mivel a semlegesség miatt a töltések megegyeznek)

<u>Thomson-féle atommodell</u>
(görögdinnye, vagy mazsolás puding modell)

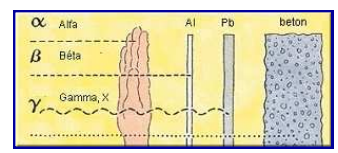


1896: a természetes radioaktivitás felfedezése (H. Becquerel)
1900-as évek elején:
– nagy energiájú részecskék lépnek ki a sugárzó anyagból (α, β, γ)
– elemek átalakulnak egymásba



a részecskék elektromos töltése különböző
- α – részecskék: nehéz, He^{2+} ionok
- β – részecskék: nagy energiájú elektronok
- γ - sugárzás: elektromágneses (fotonok)

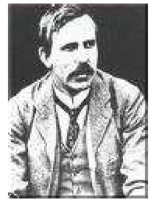
a részecskék áthatolóképessége különböző



Meglepő, hiszen az anyag elektromosan semleges!
E. Rutherford: miért nem hatolnak át az α – részecskék egy vékony papírlapon sem?

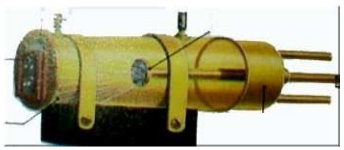
1911: Rutherford kísérlete:

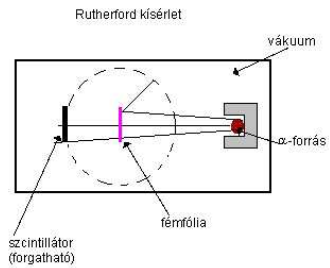
- α– részecskék kölcsönhatása vékony arany (Au) fóliával



Miért éppen arany?

- az aranyat lehetett a legvékonyabbra kalapálni (néhány atomréteg)





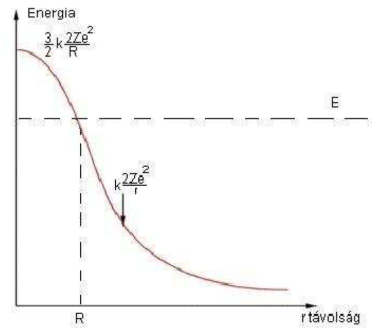
Mit lehetett várni?

Az E energiájú α–részecskét a Thomson-atom pozitív töltésű anyaga taszítja – Coulomb-potenciáldomb

A potenciáldomb maximális „magassága”

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

Itt Z_1= 2 (He rendszáma)
Z_2= 79 (Au rendszáma)
k= $9 \cdot 10^9$ J·m/Cb²
e = 1,6 ·10^{-19} Cb (elemi tölté
R_{atom}~10^{-10} m (láttuk koráb



Ezekkel E_{max}~ 5,5 ·10^{-16} J

Ugyanakkor: E_{alfa}~ 7700 ·10^{-16} J

Mint lövedék a papírlapon!

Tapasztalat:

Voltak „visszapattanó” részecskék is!

Következtetés:

A potenciáldomb „magasabb”, mint az α-részecske energiája, azaz:

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

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

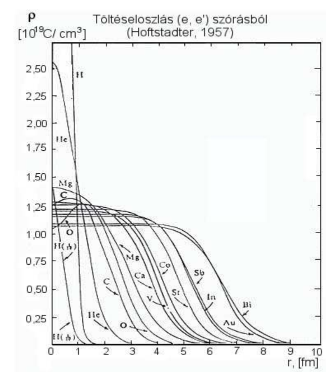
Az atomokban a tömeg és a pozitív elektromos töltés az igen kisméretű atommagba koncentrálódik!

Hofstädter 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=1,2·10^{-15} m = 1,2 fm.**

A magsűrűség jól leírható Egy Fermi-függvénnyel:

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



Ahol
R a mag sugara, (~$r_0 \cdot A^{1/3}$)
d a felületi „diffuzitás”

Az atommag összetétele:

- Z db. proton (rendszám)
- N db. neutron
- $A = N+Z$ (tömegszám, nukleonszám)

Nukleon: protonok és neutronok közös neve

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

Jelölés: $\boxed{^{197}_{79}\mathrm{Au}}$ $N = A - Z = 197 - 79 = 118$

Elnevezések:

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

Az atommag tömege:

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

ΔM 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.

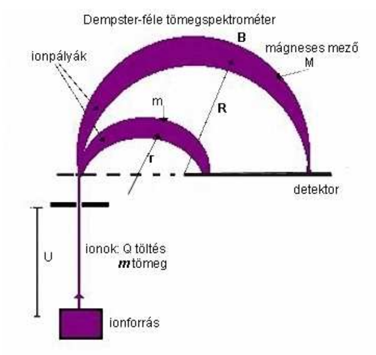
Einstein szerint: $E = mc^2$, ami erre az esetre: $B = \Delta M \cdot c^2$

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.



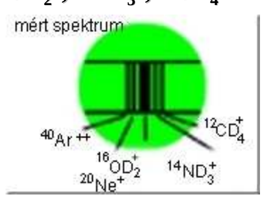
Azonos (q/m) –hez tartozó (molekula-) ionok azonos helyre érkeznek.

Kis tömegkülönbségek is pontosan mérhetők!

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

„kevert” nyaláb:

$^{40}Ar^{++}$, $^{20}Ne^{+}$, $^{16}OD_2^{+}$, $^{14}ND_3^{+}$, $^{12}CD_4^{+}$



Atomi tömegegység (atomic mass unit):

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

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

Figyelem: ez ½ elektrontömeggel több, mint a ^{12}C atommag tömegének 12-ed része!

Miért éppen a ^{12}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 $E \geq 0$.

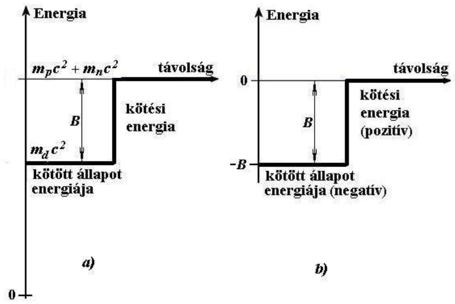
Példaként nézzük a deuteron (^{2}H) tömegét, és energiáját!

$m_d = m_p + m_n - \Delta M$ **(szorozzuk be c^2-el)**

$m_d c^2 = m_p c^2 + m_n c^2 - B$ **(ábra bal oldala)**

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

Ilyenkor a kötött rendszer energiája NEGATÍV lesz.
$E = -B$

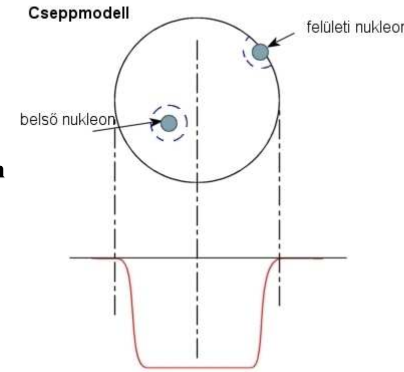


Atommagok kötési energiája

(Weizsäcker-féle félempírikus kötési energia formula)
Kiindulás: a magsűrűség ~ 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.)

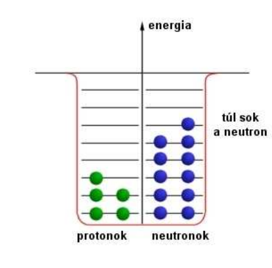
A felületi nukleonok gyengítik a kötést, ezért
$B = b_V \cdot A - \beta 4\pi R^2$
Itt β egy állandó.



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 neutronszám páros (pár-energia)

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

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:

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

Ez a Weizsäcker-féle félempirikus kötési energia formula

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

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

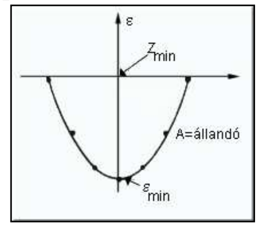
Egyetlen nukleon átlagos kötési energiája: $b = B/A$.

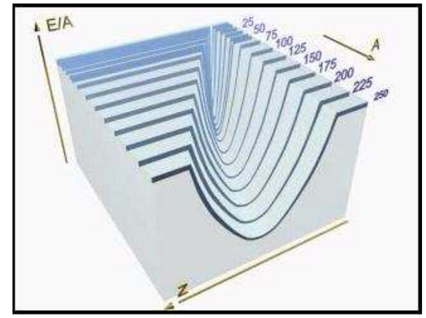
Milyen „mélyen" van egyetlen nukleon átlagosan a magban? Mekkora egyetlen nukleon energiája?
$\varepsilon = -b = -B/A$.

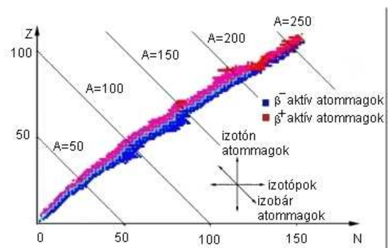
$\varepsilon = -b = -B/A$. Mivel B a mag összetételének (Z,A) függvénye, ezért nyilván ε is az. $\varepsilon = \varepsilon(Z,A)$. Ezt egy felülettel lehet jellemezni. Ennek a vizsgálatával foglalkozunk a továbbiakban.

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

Vegyük észre, hogy az A = konstans metszetek parabolák!







Z_{min} helye az (N,Z) „térképen"

Ennek segítségével lehet megérteni a radioaktív bomlásokat!

ε_{min} a tömegszám (A) függvényében

Ennek segítségével lehet megérteni az atomenergia felszabadítását