

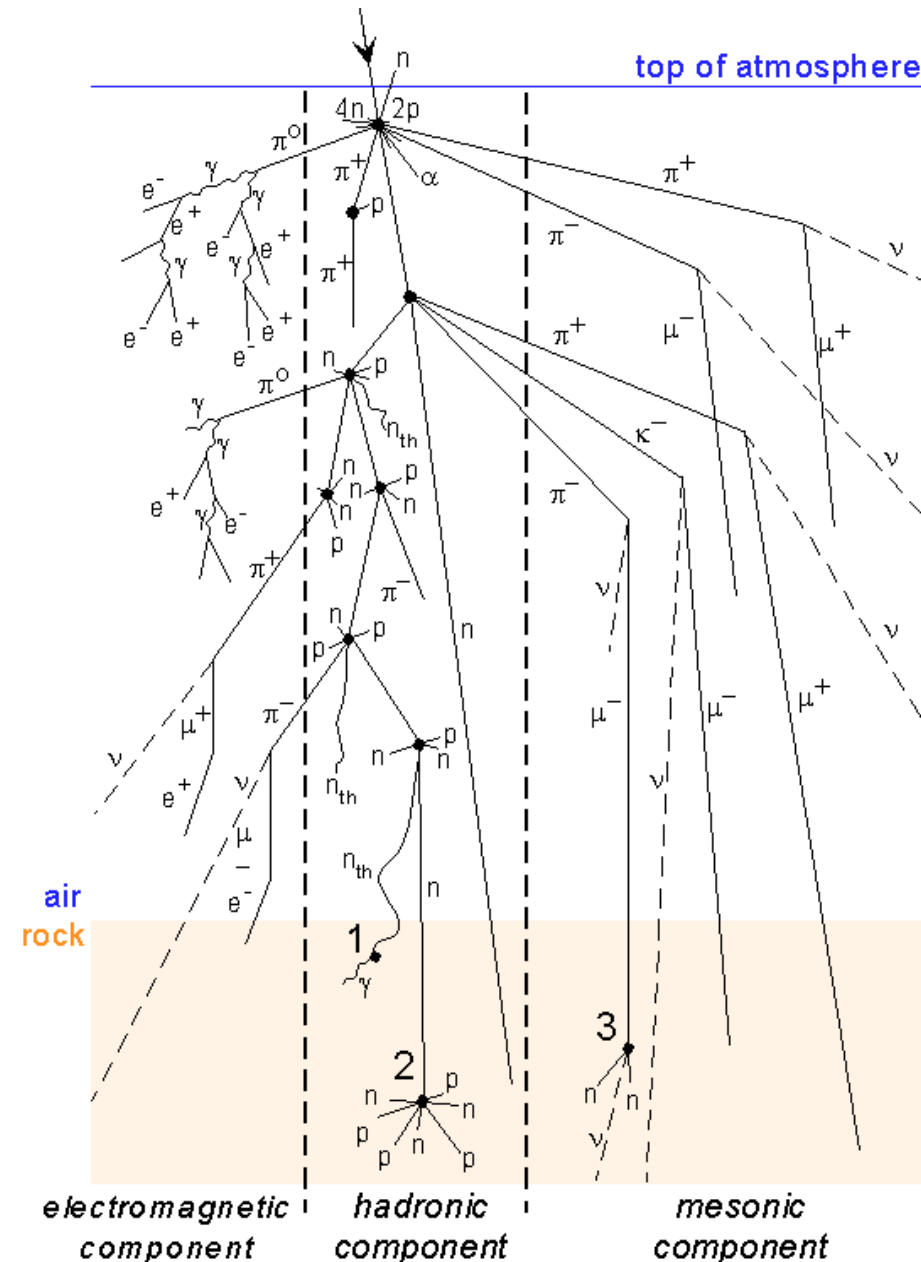
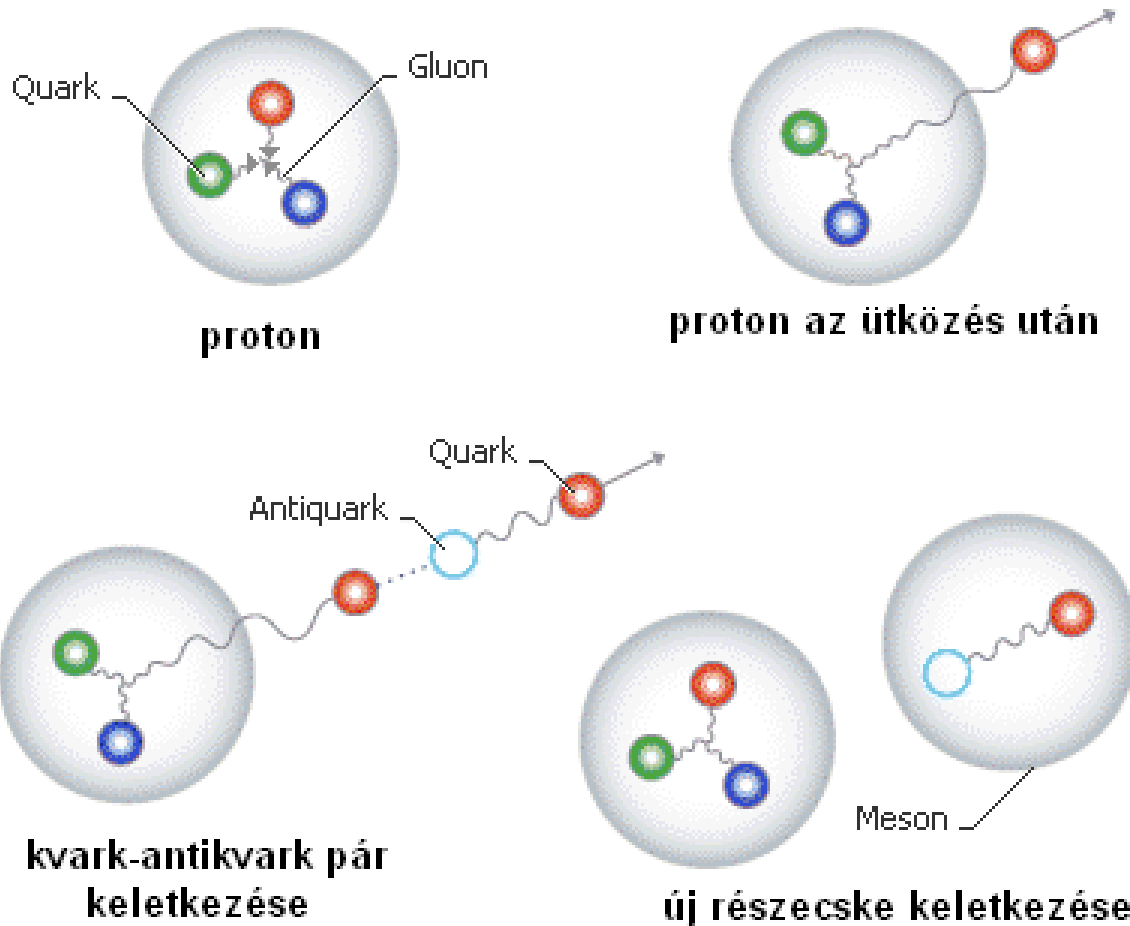
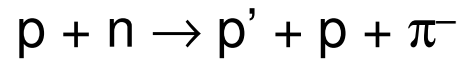
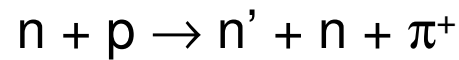
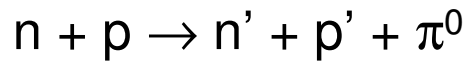
A kölcsönhatások összefoglalása és

Az atommagok alaptulajdonságai

Atommag és részecskefizika

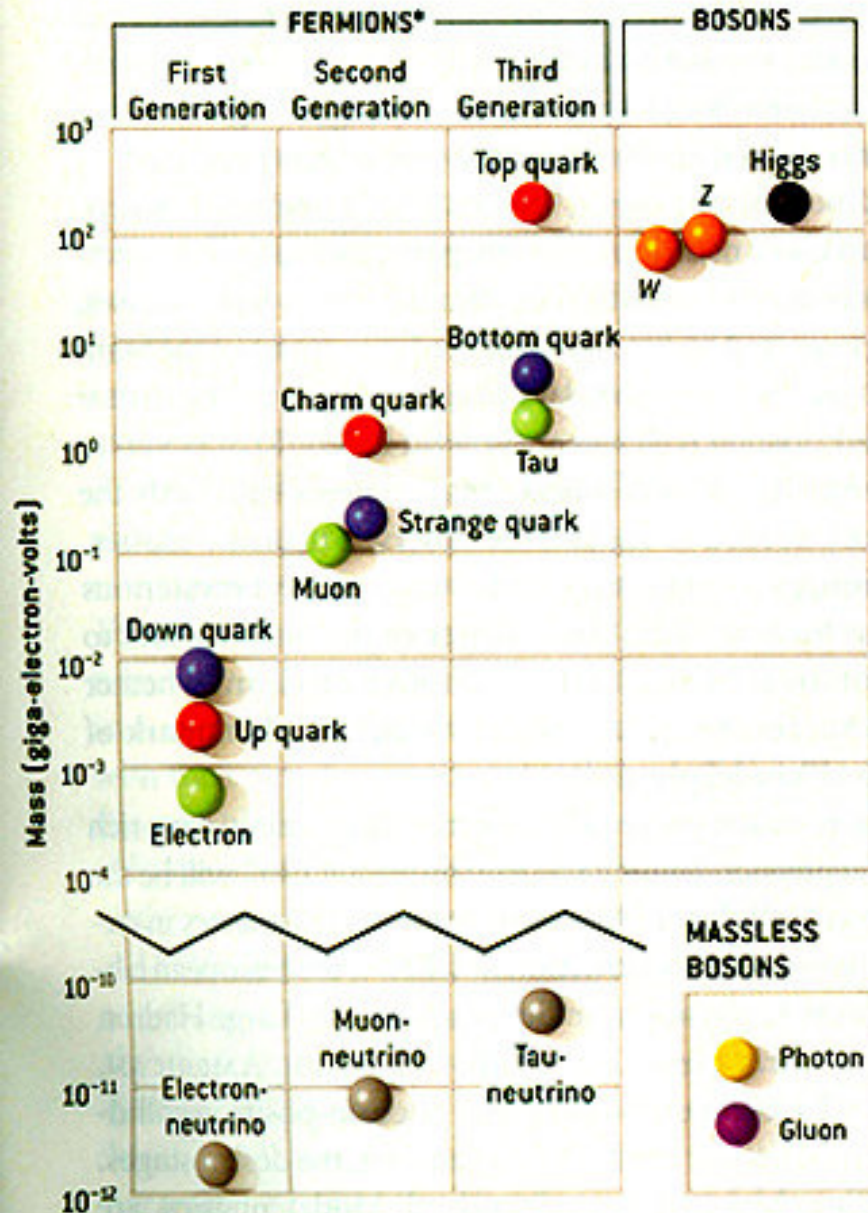
5. előadás 2011. március 22.

A pionok keletkezése a kozmikus sugárzásban



Miből áll egy mikrorészecske? 1.

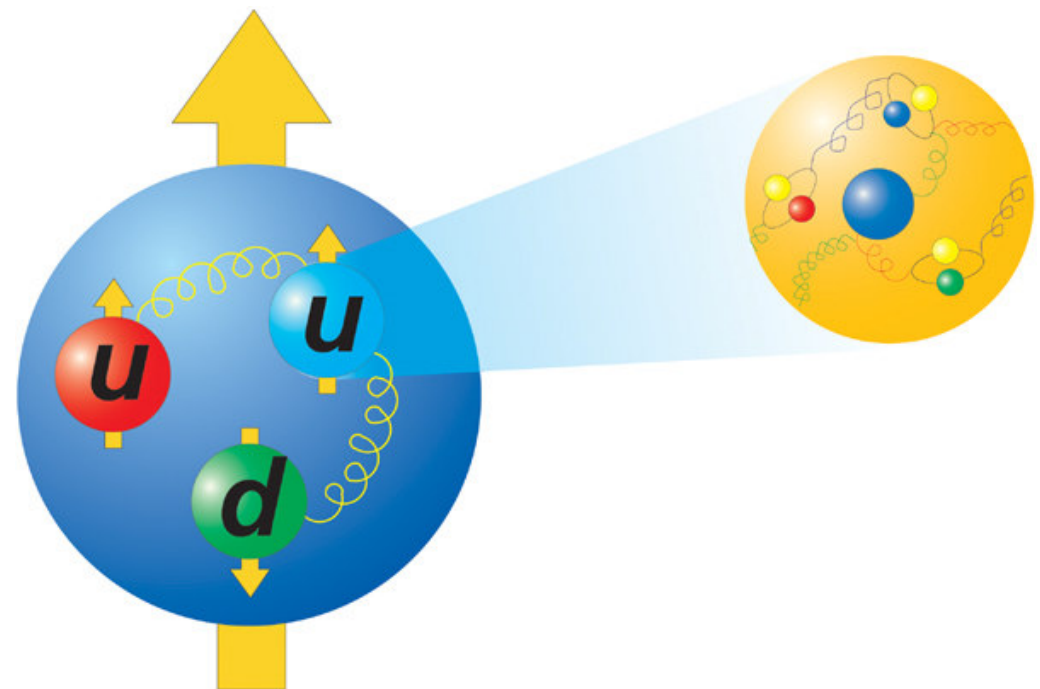
Az elemi részecskék tömege



csupasz kvarktömeg (5-10 MeV)

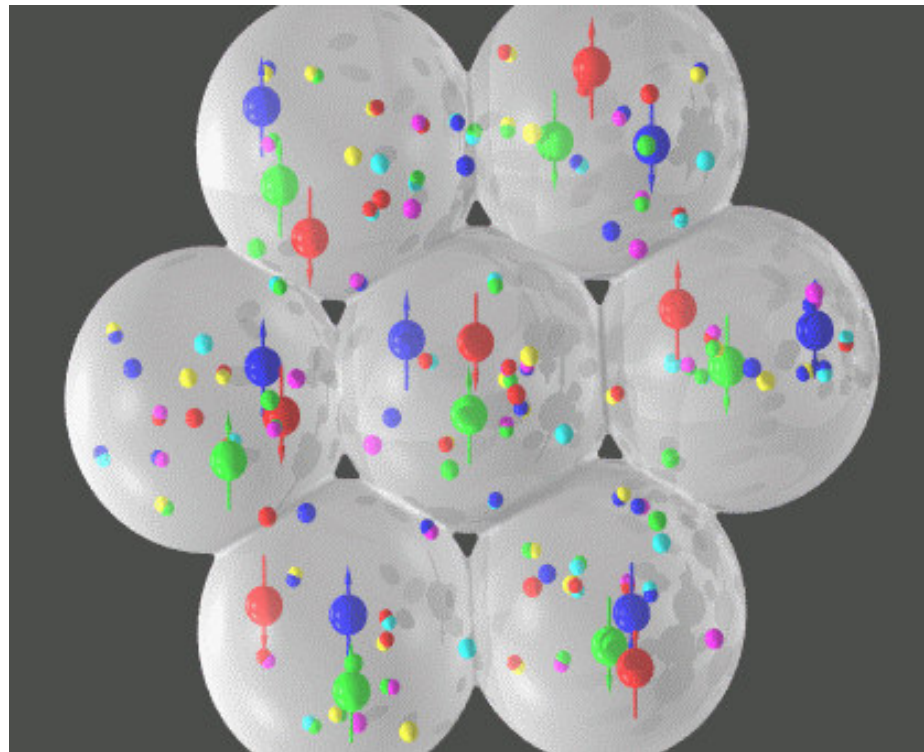
$$H = (D-m) + EM + EK$$

Hogyan lesz ebből 938 MeV?



Miből áll egy mikrorészecske? 2.

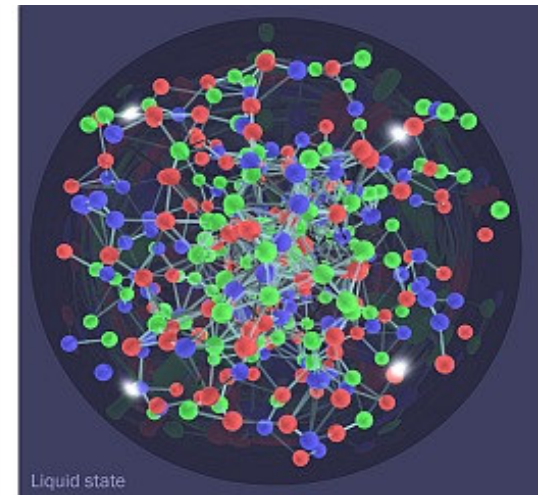
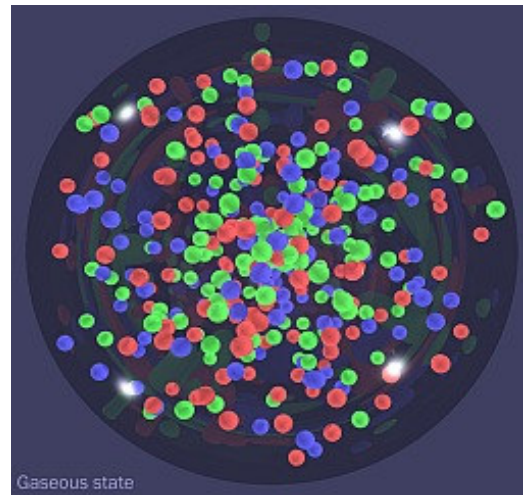
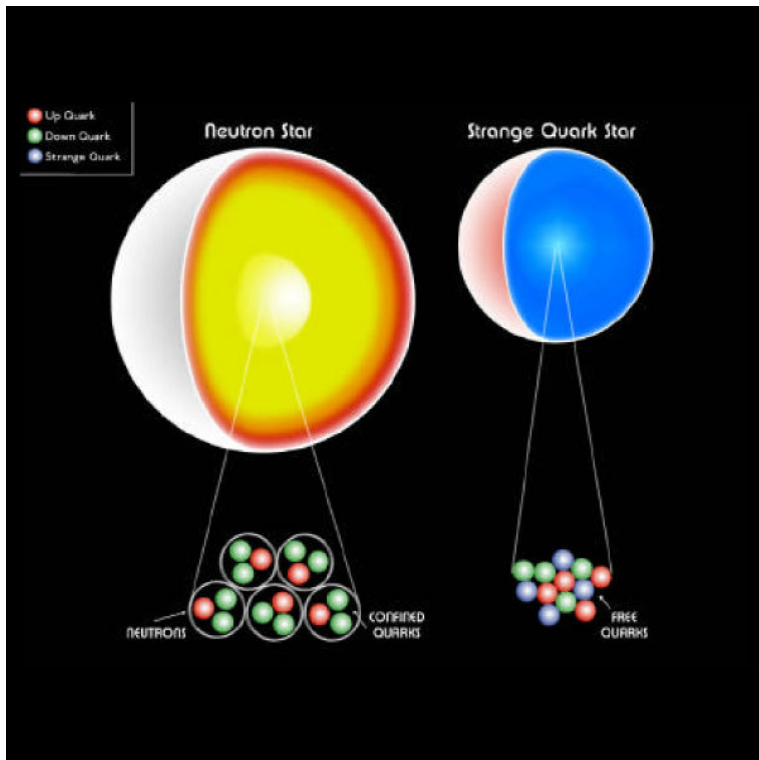
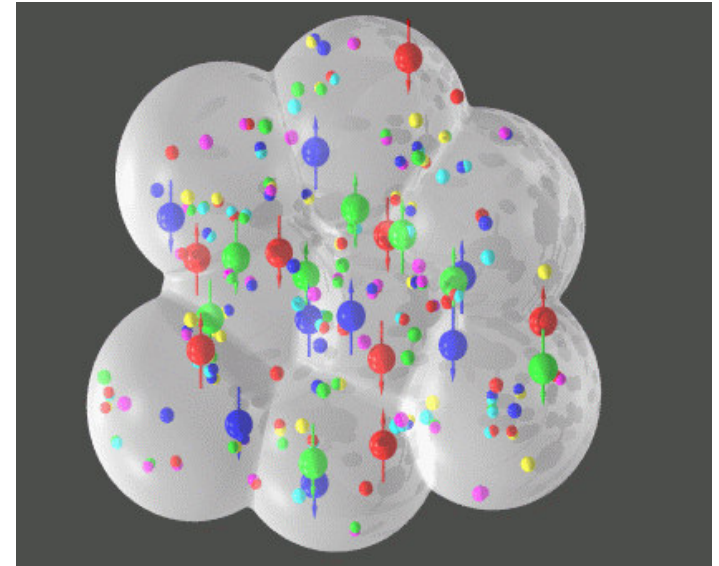
kvarkok és gluonok egy részecskében



Erősen kölcsönható anyag egy „zsákban”

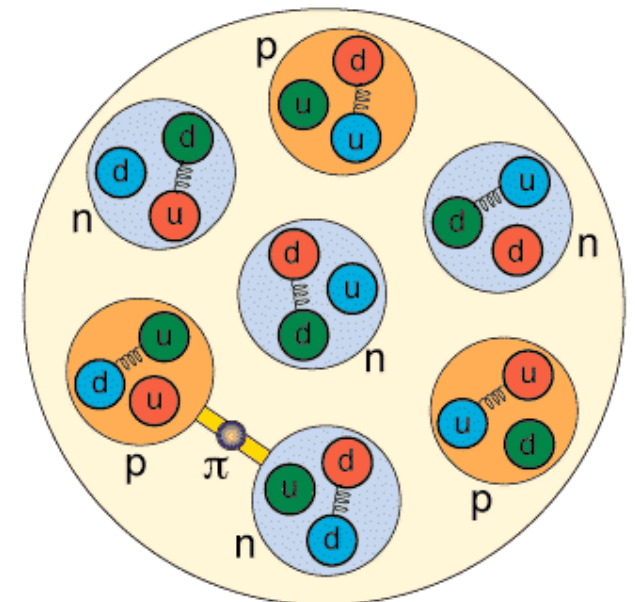
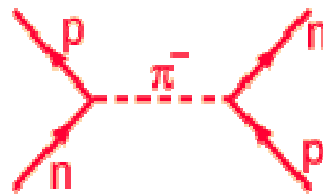
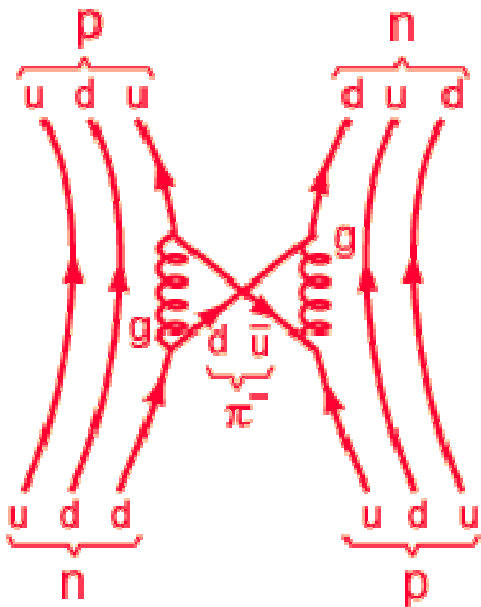
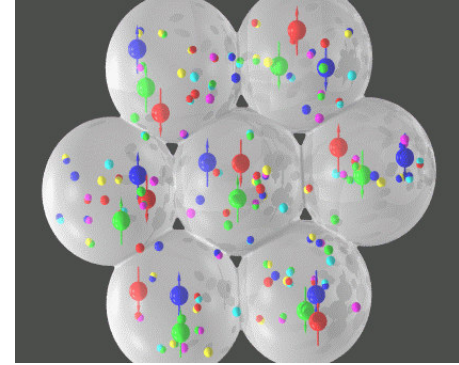
Erős kcsh – bezáró kcsh, EM kcsh, magerő – nem bezáró kcsh (r nagy: lecseng)

Kvarkanyag



Magerők és az erős kcsh. kapcsolata

- különböző nukleonba bezárt kvarkok is cserélhetnek gluonokat, vagy színnel rendelkező részecskét.
- Amikor elhagyja a nukleont az objektum, már csak fehér lehet: legkisebb ilyen: π -mezon
- erős kcsh – gluoncseré magerő - mezoncseré



Jet-ek (részecskepászmák)

- A kvarkok és gluonok nem repülhetnek ki egyedül az ütközési pontból
- Helyette felöltöznek, hadronizálódnak, további kvarkokkal és antikvarkokkal
- Sok, majdnem egyirányba távozó hadront (bariont, mezont) látunk
- Sok pion lesz bennük, ez a legkönnyebb hadron
- Összenergiájuk a kezdeti kvark vagy gluon energiájára jellemző



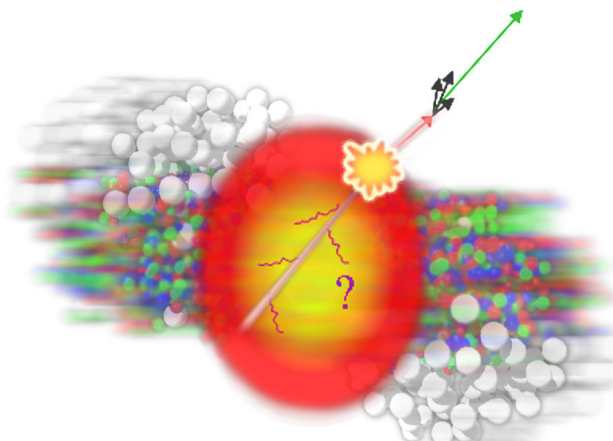
Atommagok „megolvasztása”

Nehézion-ütközések

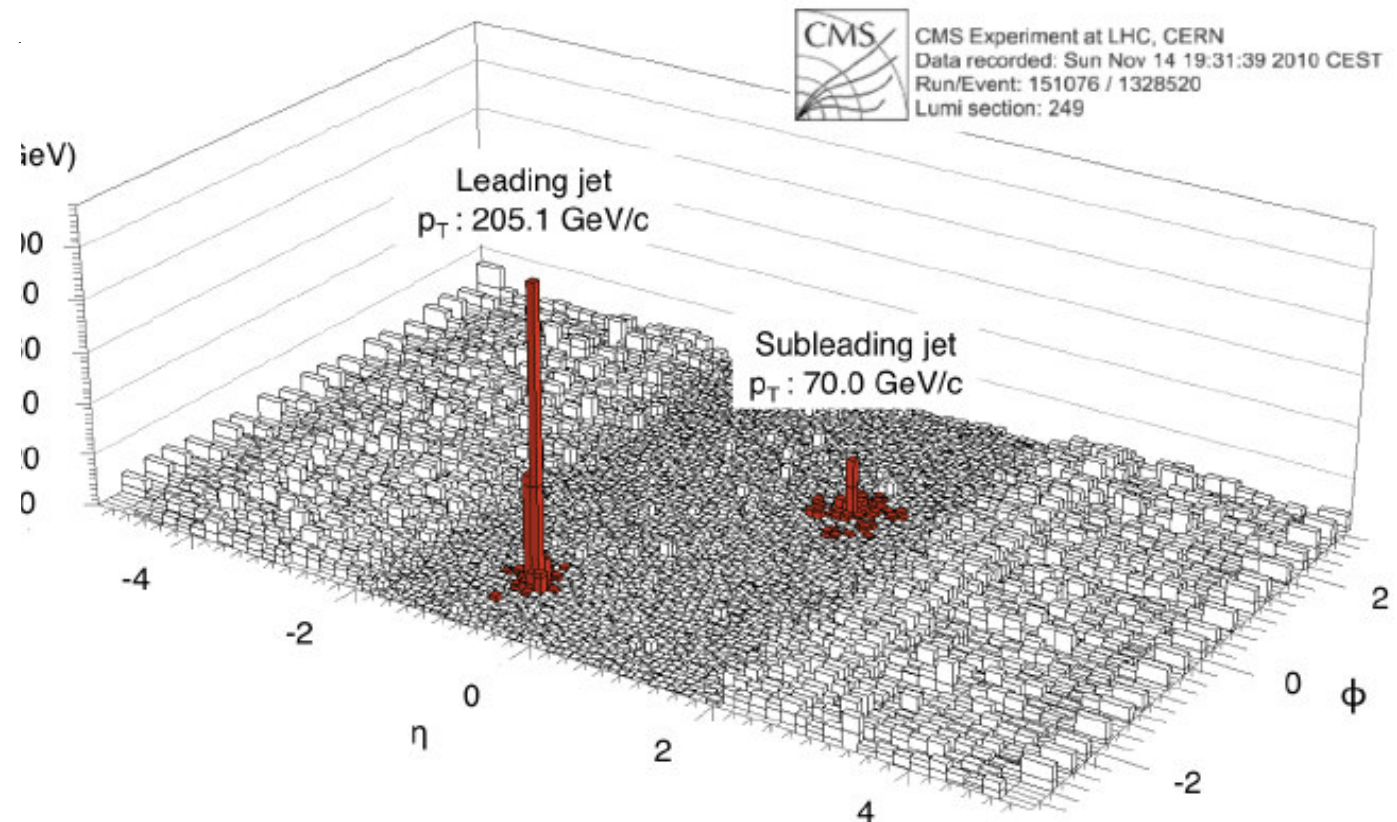
CERN LHC, 2010. november:

Az ellentétes irányban kirepülő

jet-ek közül az egyik rengeteg energiát veszít!



3 hetes eredmény!



Erős kölcsönhatás

- Nukleonokat tartja össze az atommagban
- Kvarkokat tartja össze a nukleonban
- Gluonok közvetítik (tömegtelen), a gluon-kvark, gluon-antikvark és gluon-gluon kh-on keresztül.
- A Kvantumszíndinamika írja le (nem-Abeli mértékelmélet, lokális SU(3) szimmetria – ld. MSc.)
- *Szín*-bezárás: kvarkok közötti erő nem csökken a távolsággal (10000 N)
- Szabad kvarkok nincsenek, helyette jet-ek (részecskesugarak).
- *Színes* objektumok: kvarkok, gluonok, antikvarkok
- Részt vesznek benne: kvarkok, gluonok, hadronok (qq vagy qqq). Barionok: qqq, mezonok: qq.
- Az atommag tömegének nagy részét a QCD dinamika adja (nem az alkotóelemek tömege).
- Csatolási állandó (kh erőssége) *csökken* az impulzusátadás függvényében. Emiatt: perturbációszámítás csak nagy energiájú folyamatokra

Gyenge kölcsönhatás

- Radioaktivitásért és magfúzióért felelős (béta bomlás, Nap fúziós energiatermelése)
- Minden fermionra ($1/2$ spin) hat: kvarkok, elektron, müon...
- W^\pm (töltött áram), Z^0 (semleges áram) bozonok közvetítik. Nagy tömegűek (80-90 GeV, Higgs mechanizmus miatt). Rövid hatótávolság.
- Kvark ízváltásra is képes! (a többi kh nem)
- Paritás és CP sértő!
- Nem hoz létre kötött állapotot!
- Neutrínók csak ebben vesznek részt.

Elektromágneses kölcsönhatás

- Foton közvetíti (tömegtelen)
- Minden elektromosan töltött részecske részt vesz benne
- A leggyakoribb módja részecskék detektálásának (ionizáció)
- Atomok, molekulák felépítése. Kémia. Atomfizika. Szilárdtestfizika. Biológia.
- A speciális relativitáselmélet megszületéséhez vezetett.
- Kvantumelektrodinamika (QED) írja le. Relativisztikus térelmélet. Legpontosabb jóslatokat ez adja. Kis csatolási állandó, perturbációszámítás jól működik.
- Feynman-diagramok, renormálás, kvantumtérelmélet itt indultak útjukra.

Elektrogyenge kölcsönhatás

- Az elektromágneses és gyenge kölcsönhatás egyesített elmélete.
- Nagy energián (100 GeV) illetve nagy hőmérsékleten (10^{15} K) a két kh. egyesül
- Közvetítik: W^+, W^-, W^0, B^0 .
- Szimmetria spontán sérül (Higgs mechanizmus) kis energián (hőmérsékleten).
- A részecskefizikai **Standard Modell** része, a QCD-vel együtt.

Gravitációs kölcsönhatás

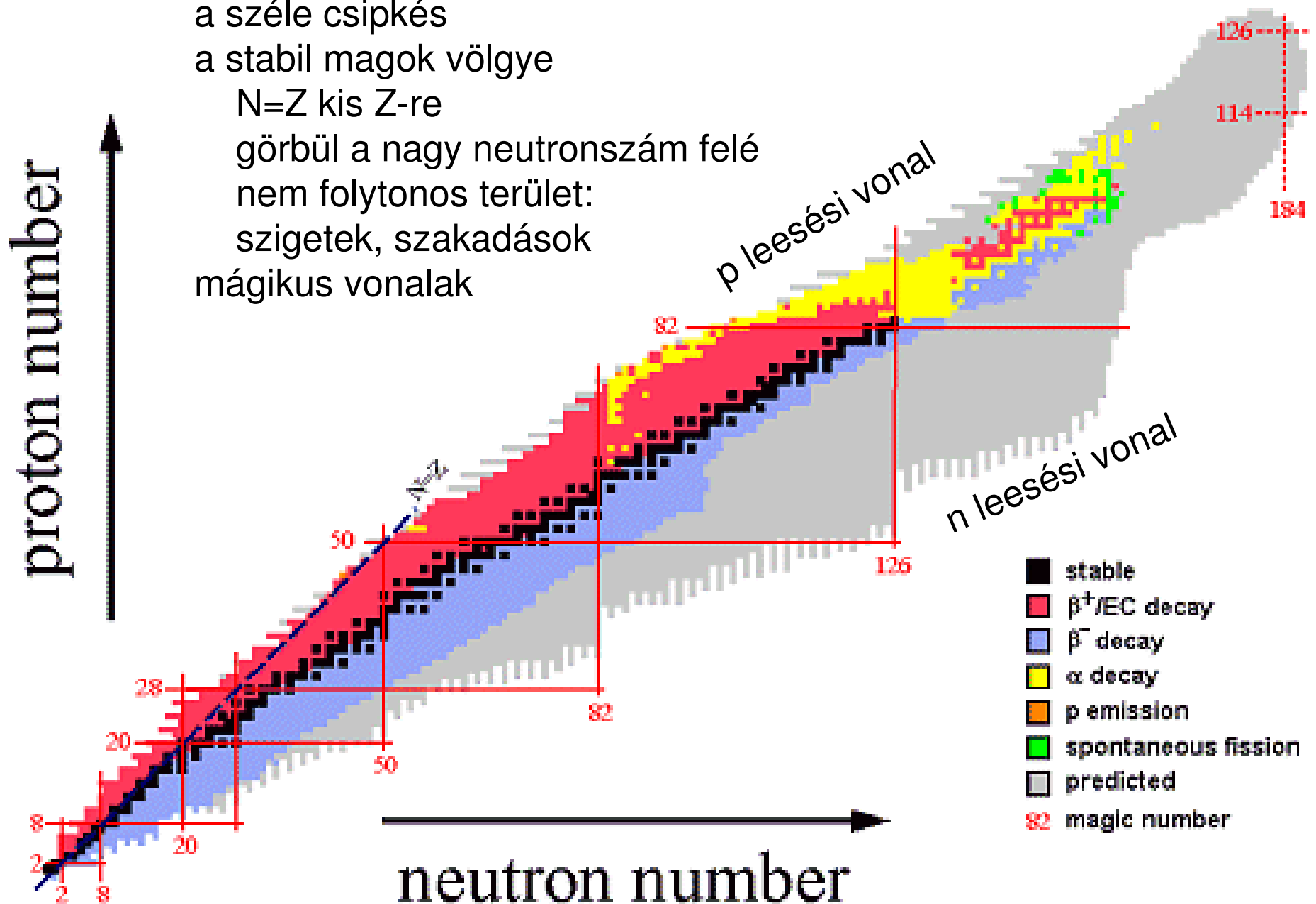
- Csak vonzó lehet. Tömeges részecskék vesznek részt benne.
 - Nagy méretű objektumokat tartja össze (Naprendszer, galaxisok, Föld, csillagok)
 - Általános relativitáselmélet írja le. Newton törvénye jó közelítés.
 - Kvantumtérelméleti leírásában a graviton közvetíti. Kis távolságskálákon (10^{-35}m) nem működik.
 - Gravitációs sugárzás direkt detektálása eddig sikertelen. Aktív kutatás: pl. LIGO (Atomfizikai Tsz.)
-

Az atommagok tulajdonságai

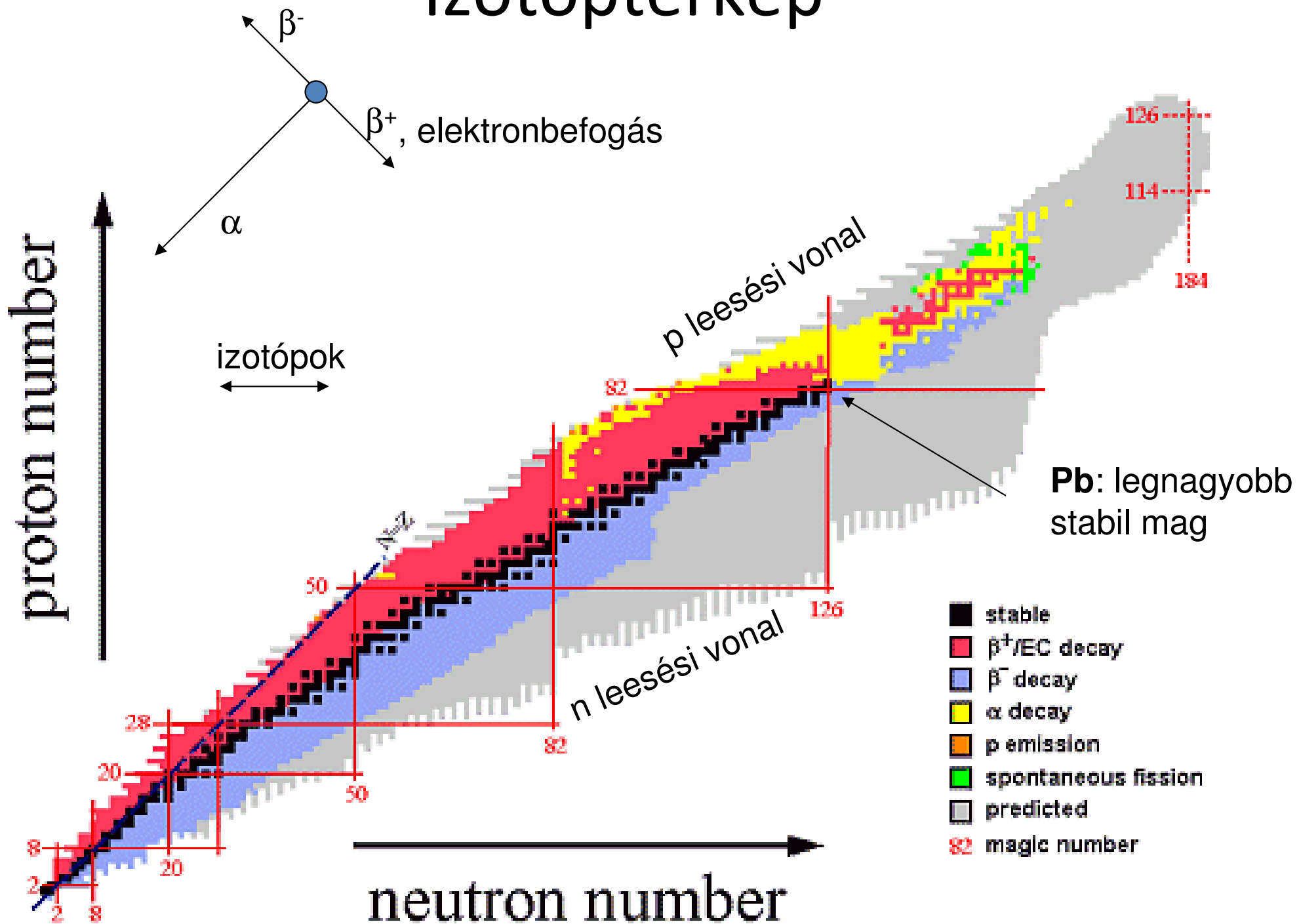
- Atommagok jelölése: ${}^A_Z X$, pl. ${}^{208}_{82} Pb$
ahol A a tömegszám (protonok és neutronok számának összege), Z a rendszám (protonok száma). Az utóbbi elhagyható (vegyjel elég).
- $N = A - Z$ a neutrons szám.
- Izotópok: azonos Z , különböző A .
- Izotónok: azonos N .
- Izobárok: azonos A .

Izotóptérkép

a széle csipkés
a stabil magok völgye
N=Z kis Z-re
görbül a nagy neutronszám felé
nem folytonos terület:
szigetetek, szakadások
mágikus vonalak



Izotóptérkép



Az atommagok mérete

- Elektromos magsugár mérése:
 - Nagyenergiájú elektronszórás
 - müonatomok karakterisztikus röntgensugárzásának izotópeltolódása
 - Tükörmagok béta-bomlása
- Nukleáris magsugár mérése:
 - anomális Rutherford-szórás
 - neutronok elnyelődése

Nagyenergiájú elektronok szóródása

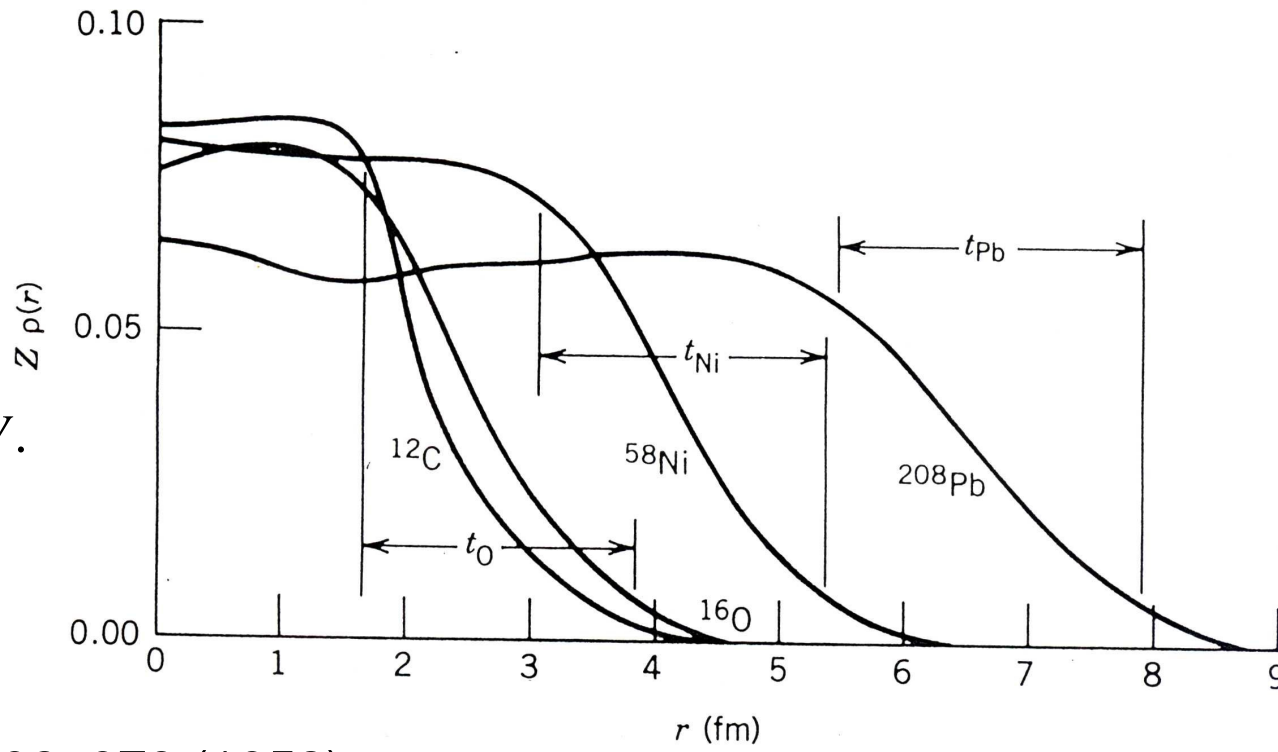
$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\vartheta) = \frac{d\sigma}{d\Omega}(\vartheta) \Big|_{Mott} \cdot \overset{\text{alakfaktor}}{F(q)} \xrightarrow{\text{Furier}} \rho(\vec{r})$$

Mott khm: Relativisztikus Rutherford

1955 Hofstadter (1961 Nobel)
 Stanford LINAC
 100 MeV elektronok
 Tisztán EM szórás khm.

Akkora kell, hogy $\lambda < 10$ fm legyen:

$$E \approx pc = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1241 \text{ MeVfm}}{10 \text{ fm}} = 124 \text{ MeV}.$$



Hofstadter, R., et al., Phys. Rev. 92, 978 (1953).

Ekvivalens magsugár

- egyenletes sűrűségű R sugarú gömb

$$\langle r^2 \rangle = \frac{1}{V \rho_{\text{egyenletes}}} \iiint r^2 \rho_{\text{egyenletes}} dV = \frac{3}{5} R^2$$

- általános sűrűségű atommag

$$\langle r^2 \rangle = \frac{1}{M} \iiint r^2 \rho(r) dV \equiv \frac{3}{5} R_{EQ}^2$$

- Azon egyenletes sűrűségű gömb sugara, melyre $\langle r^2 \rangle$ azonos az adott sűrűségeloszlás $\langle r^2 \rangle$ -ével.

Elektronszórás-kísérletek eredményei

- A sűrűség állandó az atommagok közepénél (nem függ A-tól)
- ez az állandó a stabil atommagoknál meg is egyezik
- diffúz széle van: $t=2,3$ fm (10-90%), nem függ A-tól

$$R_{EQ}=1,2 \text{ fm } A^{1/3}$$

- az atommagok sűrűségeloszlását jól leírja a Woods-Saxon-alak:

$$\rho(\vec{r}) = \frac{\rho_0}{1 + e^{\frac{r-r_0}{a}}}$$

Müon-atomok karakterisztikus röntgensugárzása

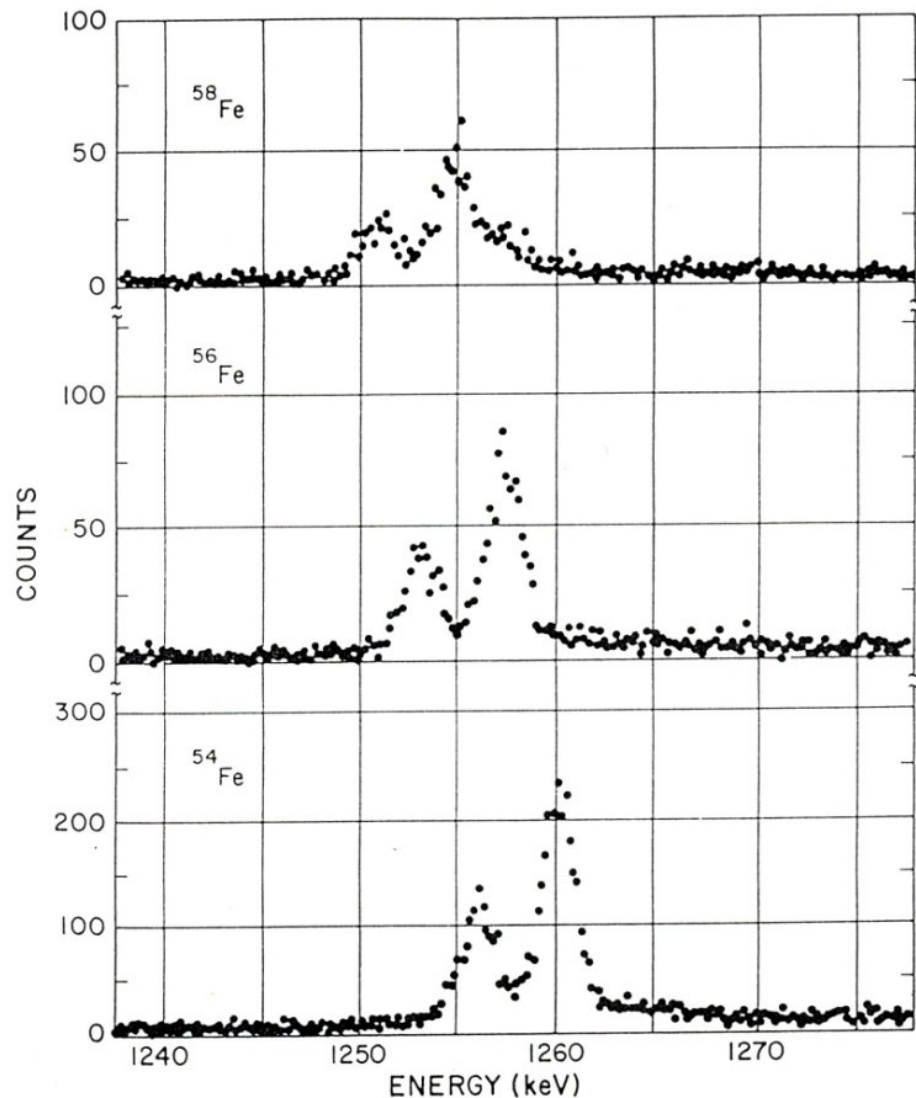


Figure 3.8 The muonic K X rays in some Fe isotopes. The two peaks show the $2p_{3/2}$ to $1s_{1/2}$ and $2p_{1/2}$ to $1s_{1/2}$ transitions, which have relative intensities in the ratio 2:1 determined by the statistical weight $(2j + 1)$ of the initial state. The isotope shift can clearly be seen as the change in energy of the transitions. The effect is about 0.4%, which should be compared with the 10^{-6} effect obtained with electronic K X rays (Figure 3.6). From E. B. Shera et al., *Phys. Rev. C* **14**, 731 (1976).

Bombázó müonok kilöknek egy elektront, helyükre beépülnek.
Pályasugár: 207-szer kisebb ($53000/207 = \text{kb. } 250 \text{ fm}$)!
 $2p \rightarrow 1s$ átmenet: K_{α} sugárzás.
Ez függ a magsugártól!
Müon valószínűsége a mag helyén:

p állapotban 0
s állapotban nem 0!

$1s$ áll. energiakülönbsége két izotóp esetén:

$$R_1^2 - R_2^2$$

Ez $A^{2/3}$ szerint változik.
Tehát $r \sim A^{1/3}$

Számolás: táblán

Tükörmagok béta-bomlása

- Tükörmagok: $A_1=A_2$, $Z_1=N_2$, $Z_2=N_1$
- Pl. ${}^3\text{H}$ és ${}^3\text{He}$
- A kötési energia csak az elektrosztatikus tagban különbözik
- Egymásba alakulásuknál felszabaduló energia béta bomlással:

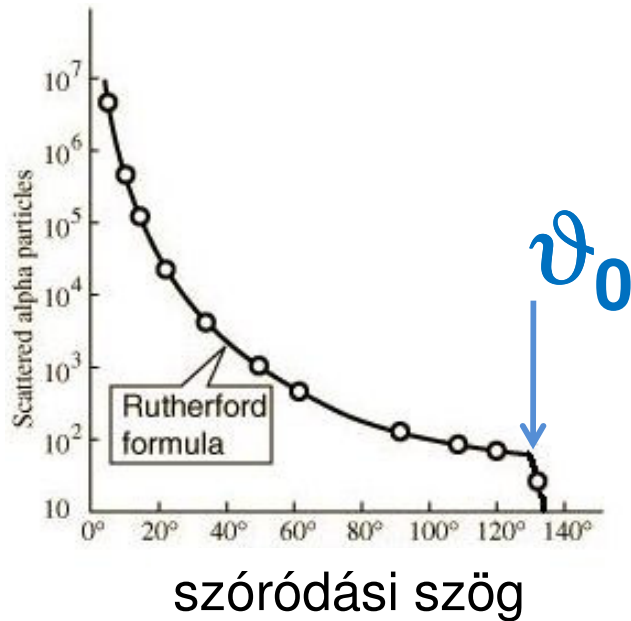
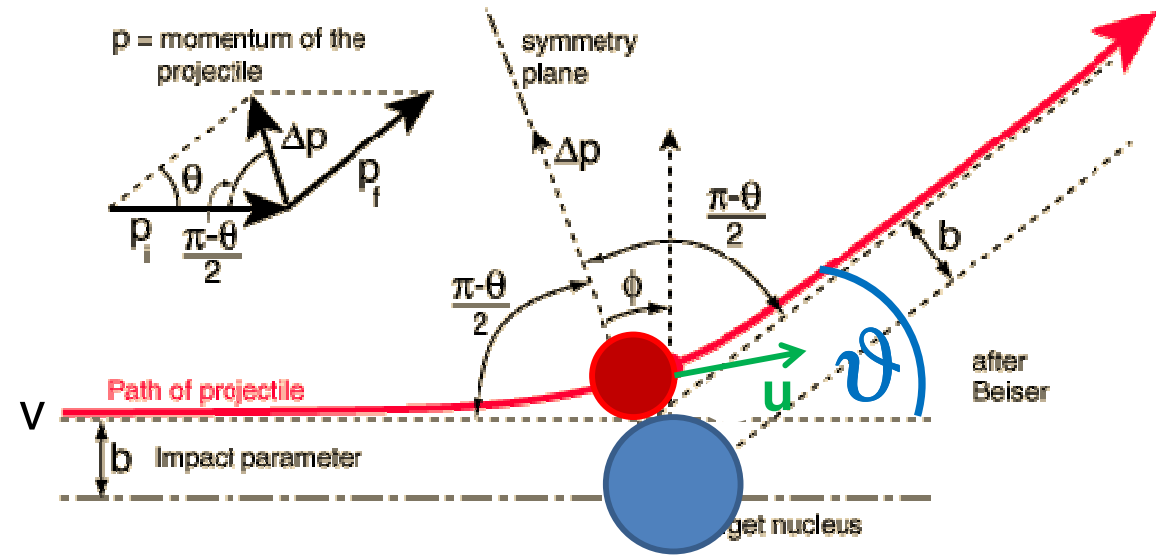
$$\Delta E = (m_n - m_p)c^2 + k \frac{Z^2}{R} - k \frac{(Z-1)^2}{R}$$

- Ez mérhető (elektron max. energiájából)
- Ebből R meghatározható

Anomális Rutherford-szórás

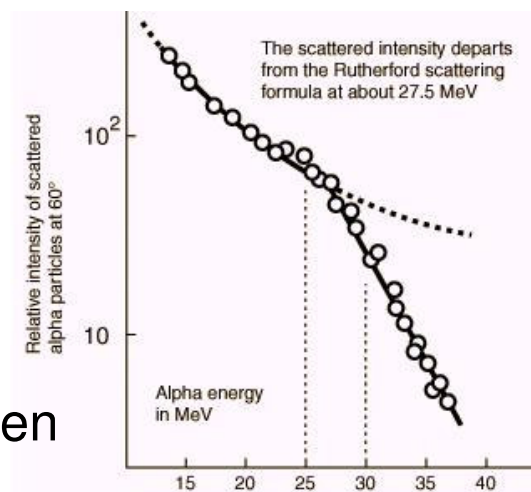
Ha $v < v_0$ azaz $b > b_0$ akkor nem érnek össze az atommagok →
Rutherford-szórás szögeloszlását kapjuk

$v > v_0$ esetén levágást tapasztalunk



Adott szögben mérve a szóródott alfa-részecskéket, egyre nagyobb bombázó energiákon egyszer csak egymáshoz ér a két atommag

$E_\alpha > 20$ MeV, hogy hozzáérjen a céltárgyhoz



bombázó energia

Anomális Rutherford-szórás

- a : a legkisebb megközelítés fele centrális ütközésben

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{ke^2Z_1Z_2}{2a} \rightarrow a = \frac{ke^2Z_1Z_2}{mv^2}$$

- legkisebb megközelítéskor *perdület*: $mur = mbv$.

energia:
$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mu^2 + \frac{ke^2Z_1Z_2}{r} = \frac{1}{2}m\left(\frac{b}{r}\right)^2 v^2 + \frac{amv^2}{r}$$

Ebből: $r^2 - 2ar - b^2 = 0$ $\operatorname{tg} \frac{\vartheta}{2} = \frac{a}{b}$ ← Mechanikában tanultuk

$$r = \frac{\pm \sqrt{4a^2 + 4b^2} + 2a}{2} = a \left(1 + \sqrt{\left(\frac{b}{a}\right)^2 + 1} \right) = a \left(1 + \sqrt{\left(\frac{\cos(\vartheta/2)}{\sin(\vartheta/2)}\right)^2 + 1} \right) = a \left(1 + \frac{1}{\sin(\vartheta/2)} \right)$$

Adott bombázó energián a adott, θ (kontakt) mérhető, ebből R megkapható.

Neutronok elnyelődése

- Gyors neutronok befogása az atommagba $R^2\pi$ hatáskeresztmetszettel történik (geometriai hkm).
- Megmutatható, hogy a rugalmas szóródás (hullámelhajlás a mag peremén) hkm-je szintén $R^2\pi$.
- Anyagdarabon átlőtt neutronnyaláb intenzitása mérhető (d az anyag vastagsága, n a magok számsűrűsége):

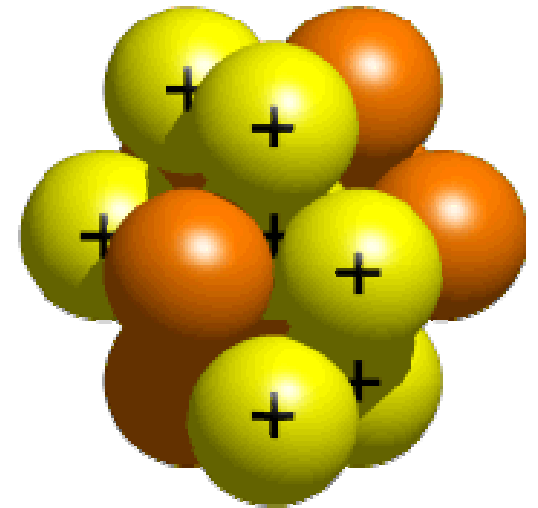
$$I(d) = I_0 e^{-\sigma nd}$$

- Ebből a mag sugara meghatározható ($\sigma=2R^2\pi$)

Eredmények

- $R_{EQ} = a(1 + 1/\sin(\vartheta_0/2))$
- Sok mérés alapján:

$$R_{EQ} = 1,4 \text{ fm} \cdot A^{1/3}$$



Elektronszórás

$$r_0 = 1,2 \text{ fm}$$

Anomális Rutherford-szórás $r_0 = 1,4 \text{ fm}$

Különbség: kölcsönhatás: elektromos – nukleáris
elektromos magsugár < nukleáris magsugár

neutronbőr: felszínen neutrontöbblet

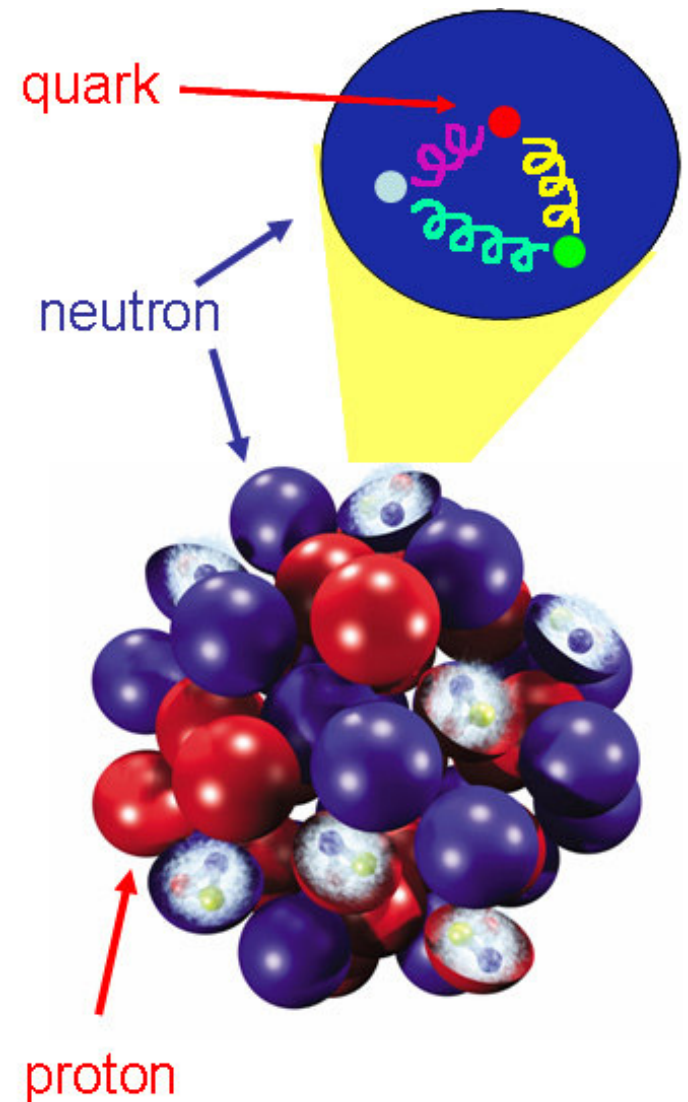
Neutron *glória (halo)*: tipikusan 2 neutron nagyon messze a mag középpontjától, pl ^{11}Li

Atommagok mérete

- Tehát a magok térfogata A -val arányos, pl. mint egymást érintő tömör golyók esetén
- A nukleonok, a maganyag sűrűsége állandó, akár egy folyadék esetén. Kb. 10^{17} kg/m³
- Az magerők rövid hatótávolságúak, távoli nukleonokra nem hatnak – additív térfogat
- Általában N nagyobb Z -nél, a többlet-elektronok nagyobb energiájú, kiterjedtebb pályákra kerülnek: neutronbőr

Cseppmodell

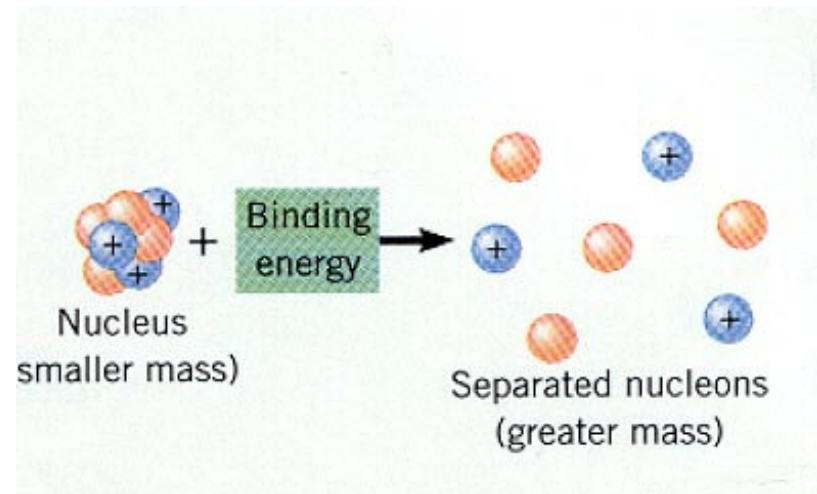
- **magerő:** szomszédok között
távoliakat nem vonzza,
nagyon közel taszító
olyan mint a Van der Waals!
az is másodlagos kcsh.!
- EM: minden proton között



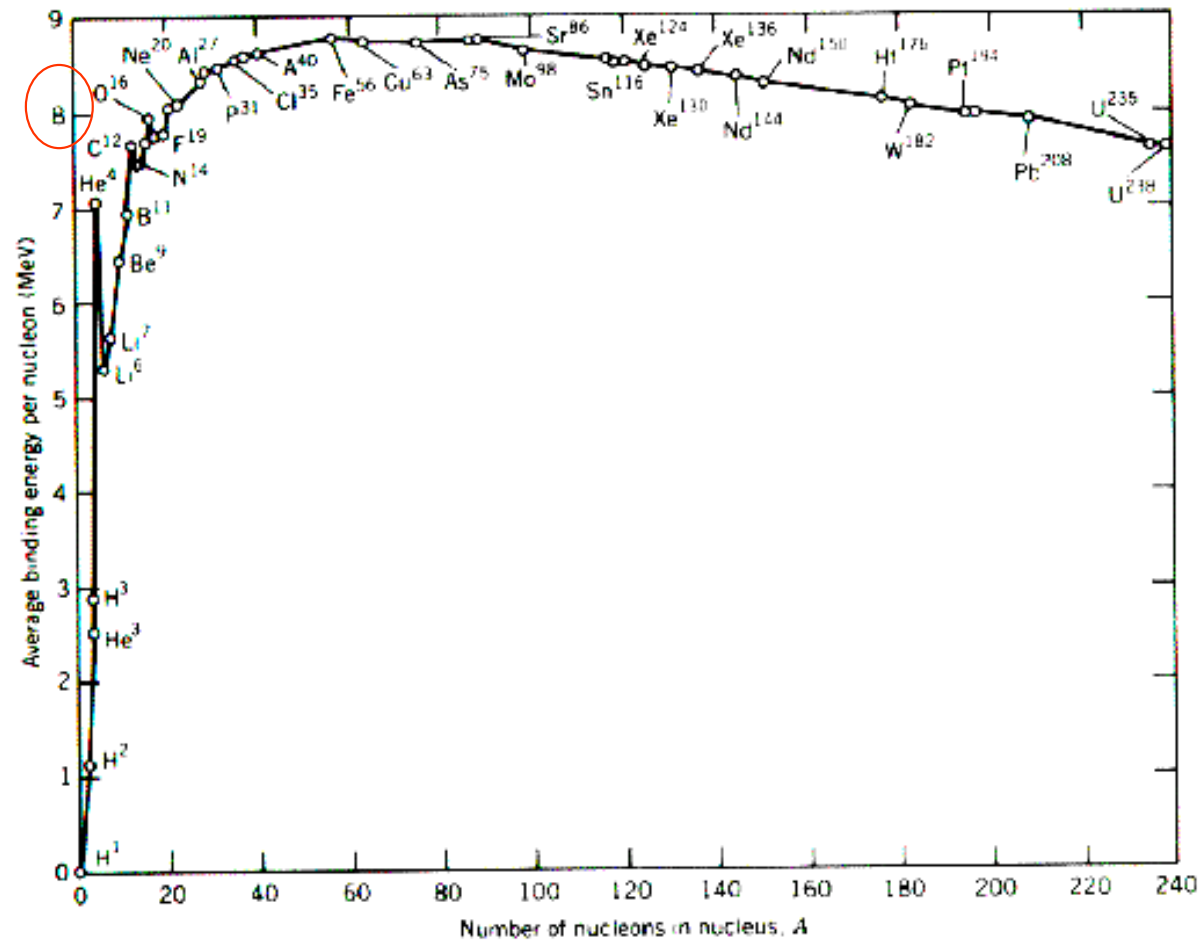
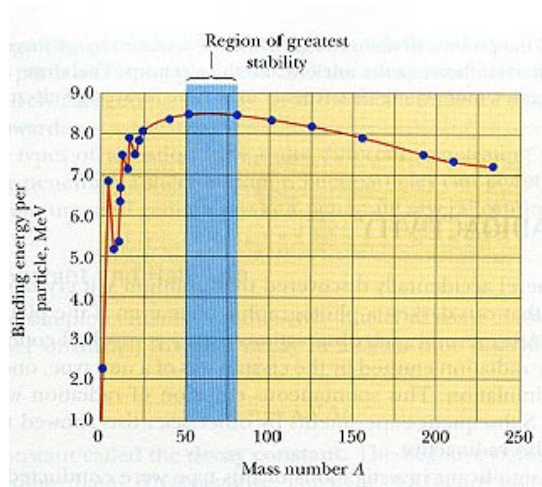
Atommagok kötési energiája

$$E_k = (Zm_p + Nm_n - m)c^2$$

m : atommag (nem atom!) tömege



Egy nukleonra jutó kötési energia: E_k/A



Kötési energia

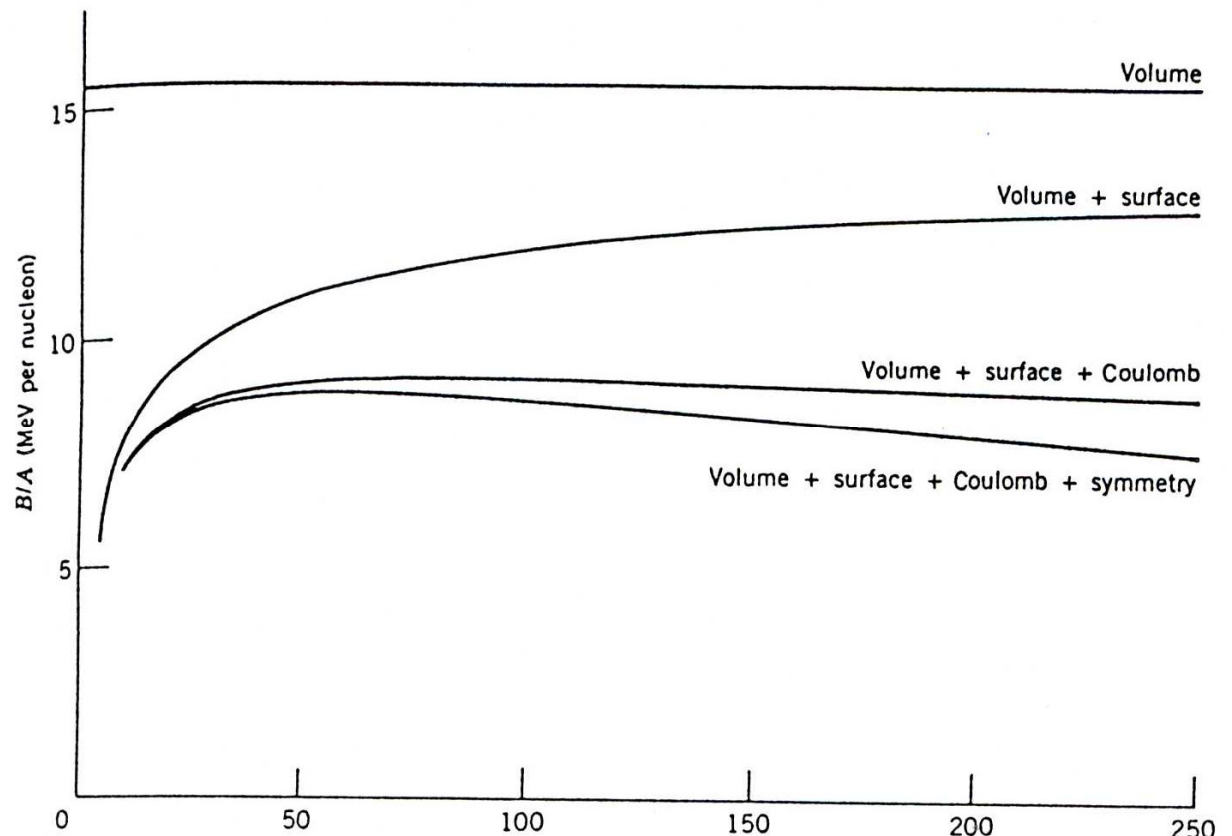
- A kis magok kivételével kb 8 MeV nukleononként. Ez azt jelzi, hogy minden nukleon csak a szomszédokkal lép erős kölcsönhatásba (telítettség)
- A mag összenyomhatatlan: nagyon kis távolságokon taszító potenciál (*hard core*)
- A legerősebben kötött mag a vas (Fe), $A=56$, környéke a vas-tó
 - A magátalakulások efelé törekednek (energiaminimum)
 - Kis magok: fúzió
 - Nagy magok: hasadás, stb.
- Páros és páratlan magokra ugrál a köt. energia. Párosak erősebben kötöttek! Csak 5 ptl-ptl mag van! Párkölcsönhatások, spinfüggés
- Relatív izotópgyakoriság: páros N preferált minden Z-re
- Nagyon stabil magok: N vagy Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 (mágikus számok)
- Duplán mágikus magok: ${}^4\text{He}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{40}\text{Ca}$, ${}^{208}\text{Pb}$

Félempírikus kötési formula

- Weizsäcker, FEKF

$$E_B = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_A \frac{(A-2Z)^2}{A} + \delta(A, Z).$$

- TAGOK:
- térfogat
- felület
- Coulomb
- Szimmetria
- Párkölcsonhatás
 - ptl-ptl: negatív
 - ps-ps: pozitív
 - ps-ptl: nulla



FEKF

- Tértfogati tag: telítettség, kis hatótáv, minden nukleonnak minden irányba van szomszédja
- Felületi tag: a felületi nukleonoknak nincs minden irányba szomszédja. *Felületi feszültség. (kapilláris lejtő)*
- Coulomb-tag: egyenletesen töltött gömb elektrosztatikus energiája (*Coulomb-lejtő*). Alfa-bomlás, hasadás ezért van.
- A cseppmodell nagyon sikeres: több száz atommag tömegét leírja 5 paraméterrel, <4% pontossággal.