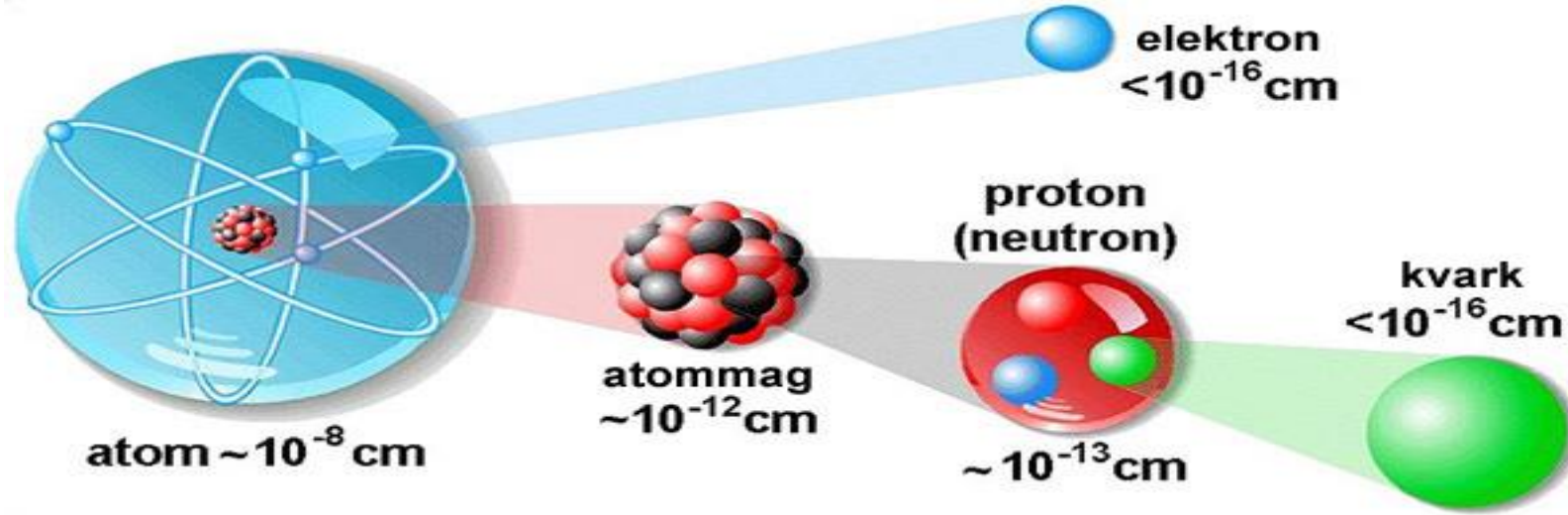


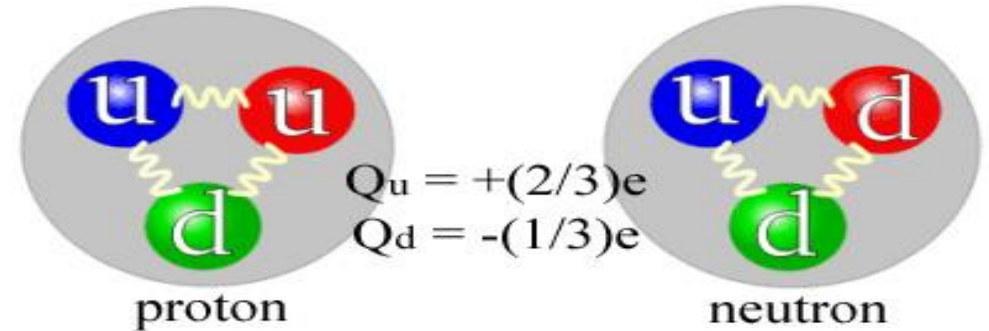
Nukleáris Fizika GEFIT762-MFTL
2024/2025 tanév, II. félév

Az atommag összetétele, a nukleáris kölcsönhatás, atommag modellek

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.

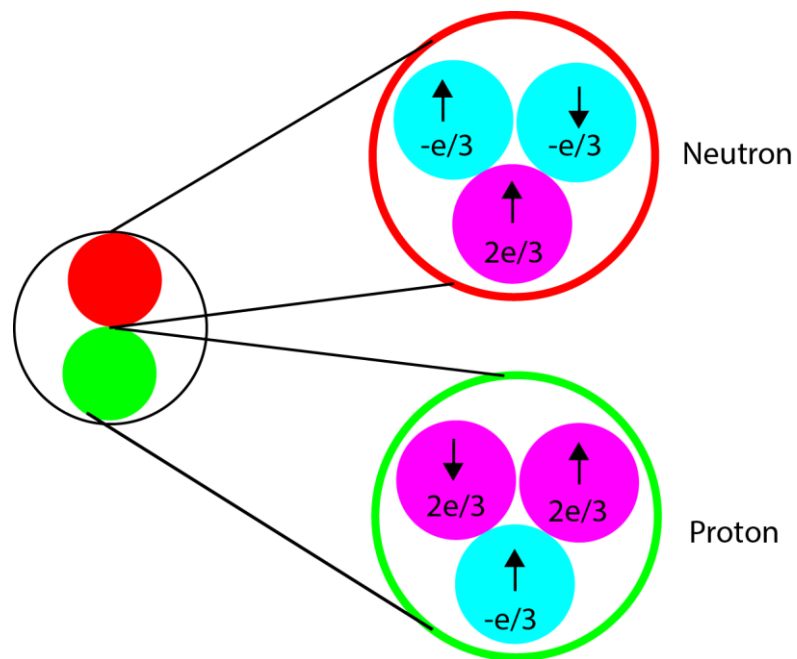
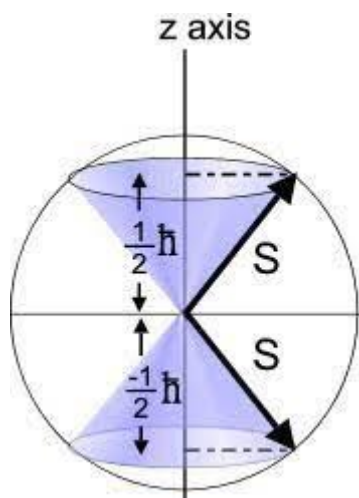
Van némi hasonlóság a van der Waals kölcsönhatáshoz, amely a semleges atomok vonzó kölcsönhatása, amely tehát a töltött részecskék elektromos kölcsönhatásának a „maradék”.

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 (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.)

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

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 μ_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.

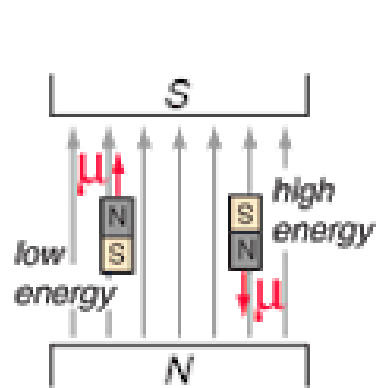
Mágneses térbe helyezett mágneses eszközök

mágnesrúd

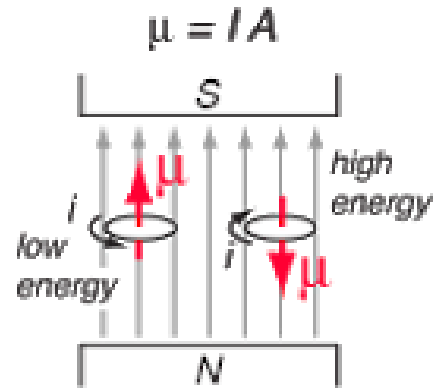
köráram

elektron

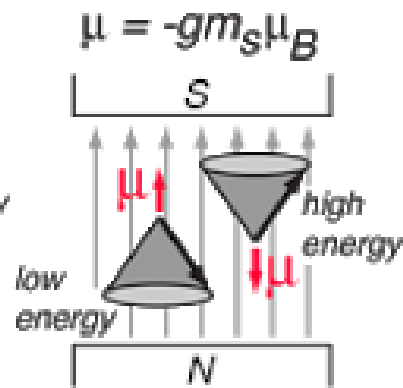
proton



Bar magnet
magnetic moment



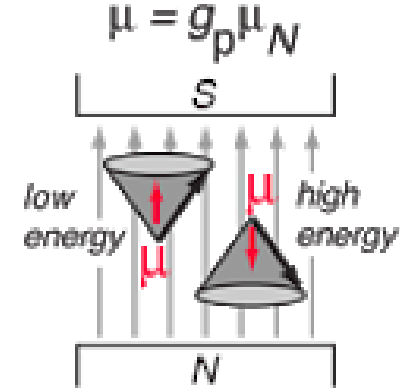
Current loop
magnetic moment



Electron spin
magnetic moment

$$g = 2$$

$$\mu_B = 5.79 \times 10^{-5} \text{ eV/T}$$



Proton spin
magnetic moment

$$g = 2.79$$

$$\mu_N = 3.15 \times 10^{-8} \text{ eV/T}$$

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

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

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

$$f=2W_m/h$$

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

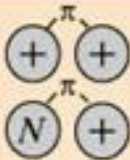
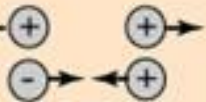
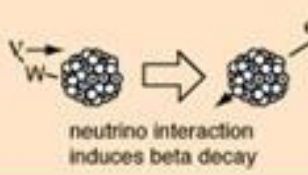

$$f=42,4 \text{ MHz}$$

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

Fundamental Forces					
Strong		Force which holds nucleus together	Strength 1	Range (m) 10^{-15} (diameter of a medium sized nucleus)	Particle gluons, π (nucleons)
Electromagnetic			Strength $\frac{1}{137}$	Range (m) Infinite	Particle photon mass = 0 spin = 1
Weak		neutrino interaction induces beta decay	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
Gravity			Strength 6×10^{-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.

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

Δm : 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

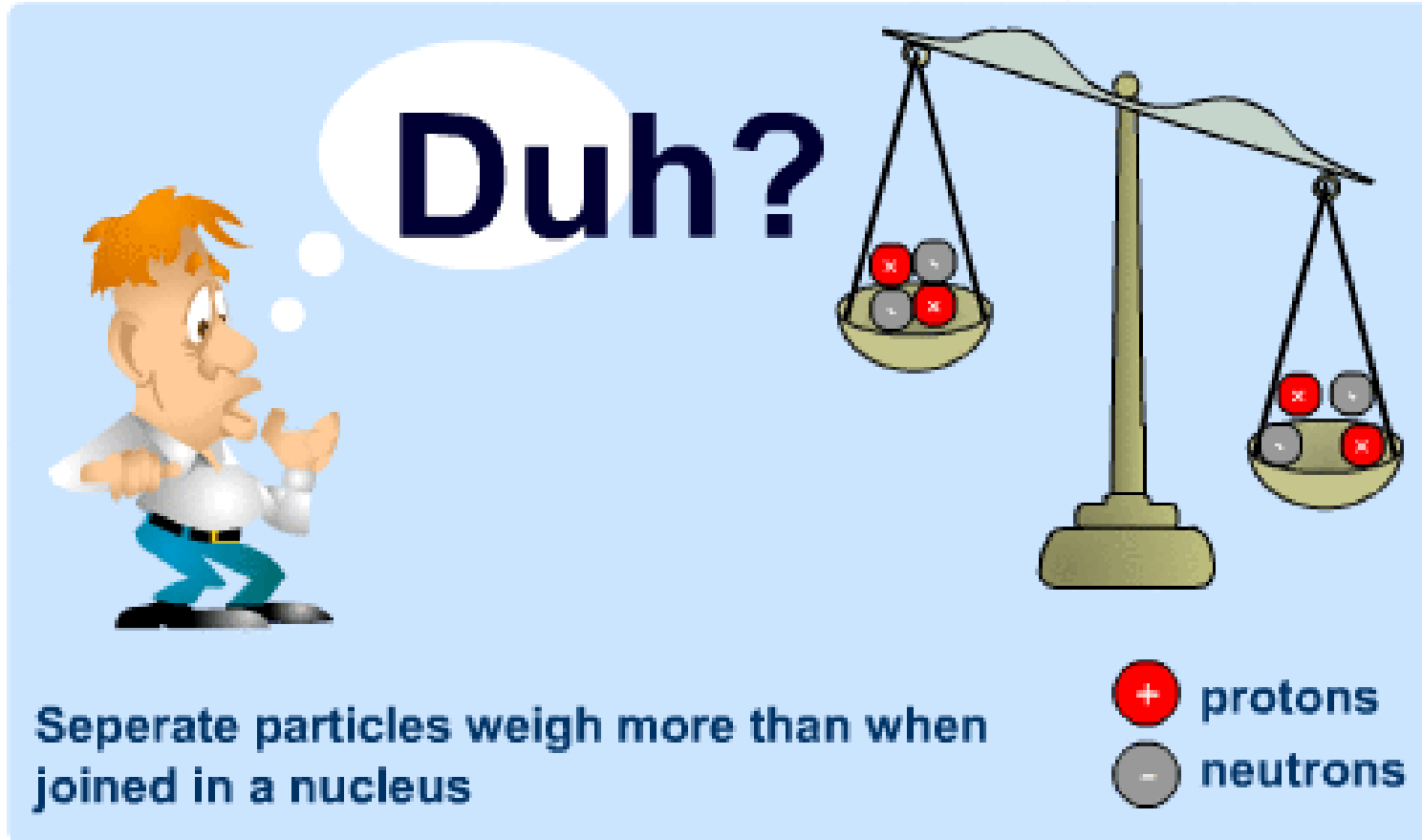
Tömegspektrométerrel az atommagok tömege mérhető, így a tömegdefektus is meghatározható.

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

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.

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



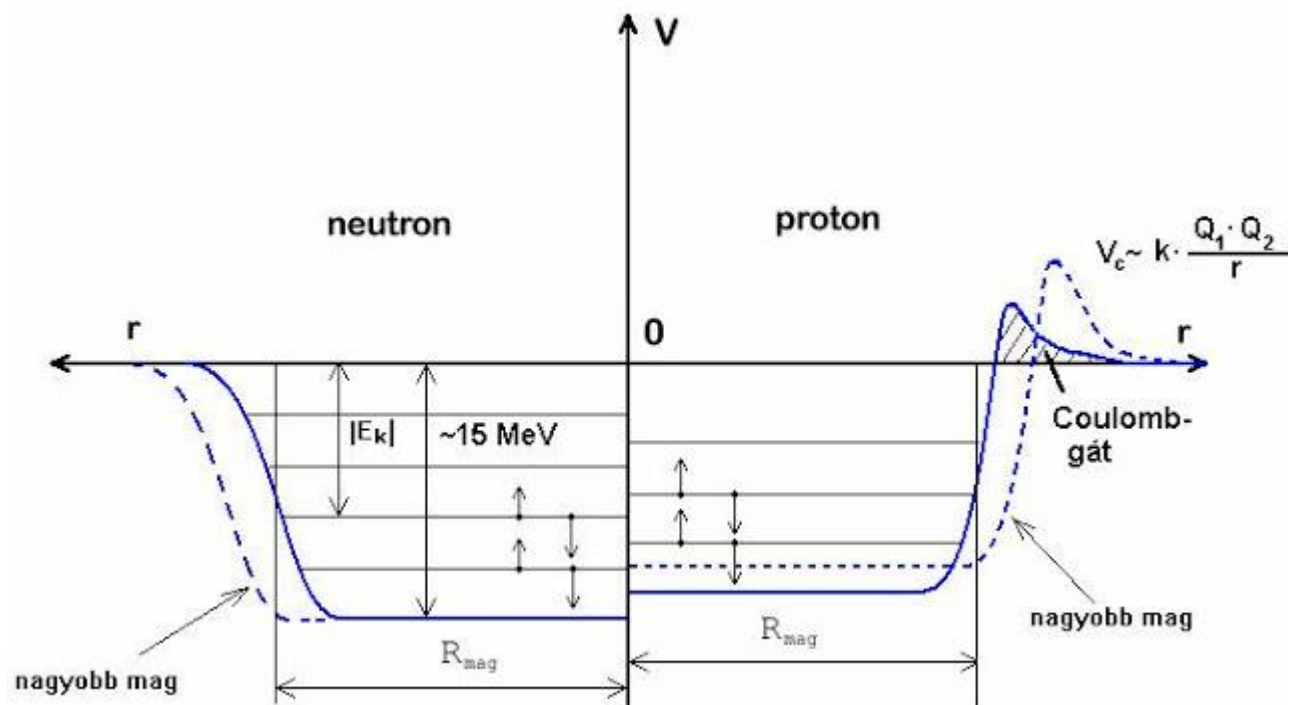
A potenciáلكád modell

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

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



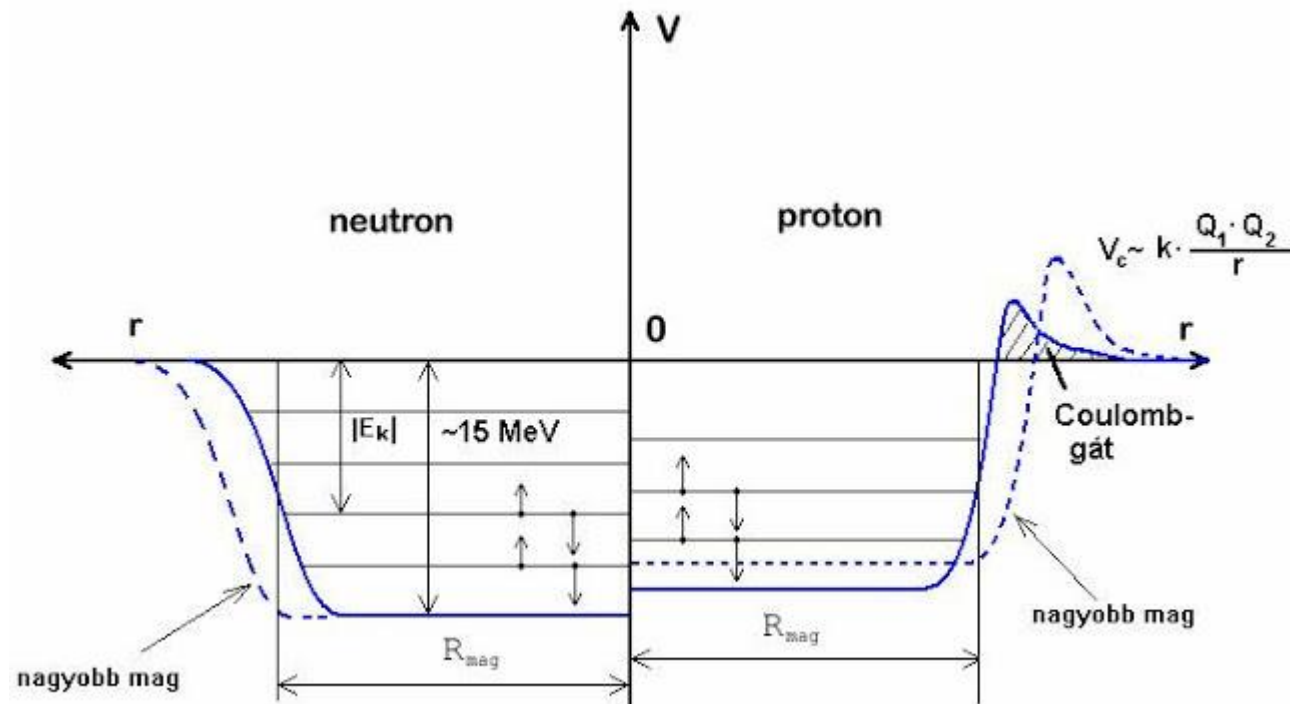
A potenciáلكád modell

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.

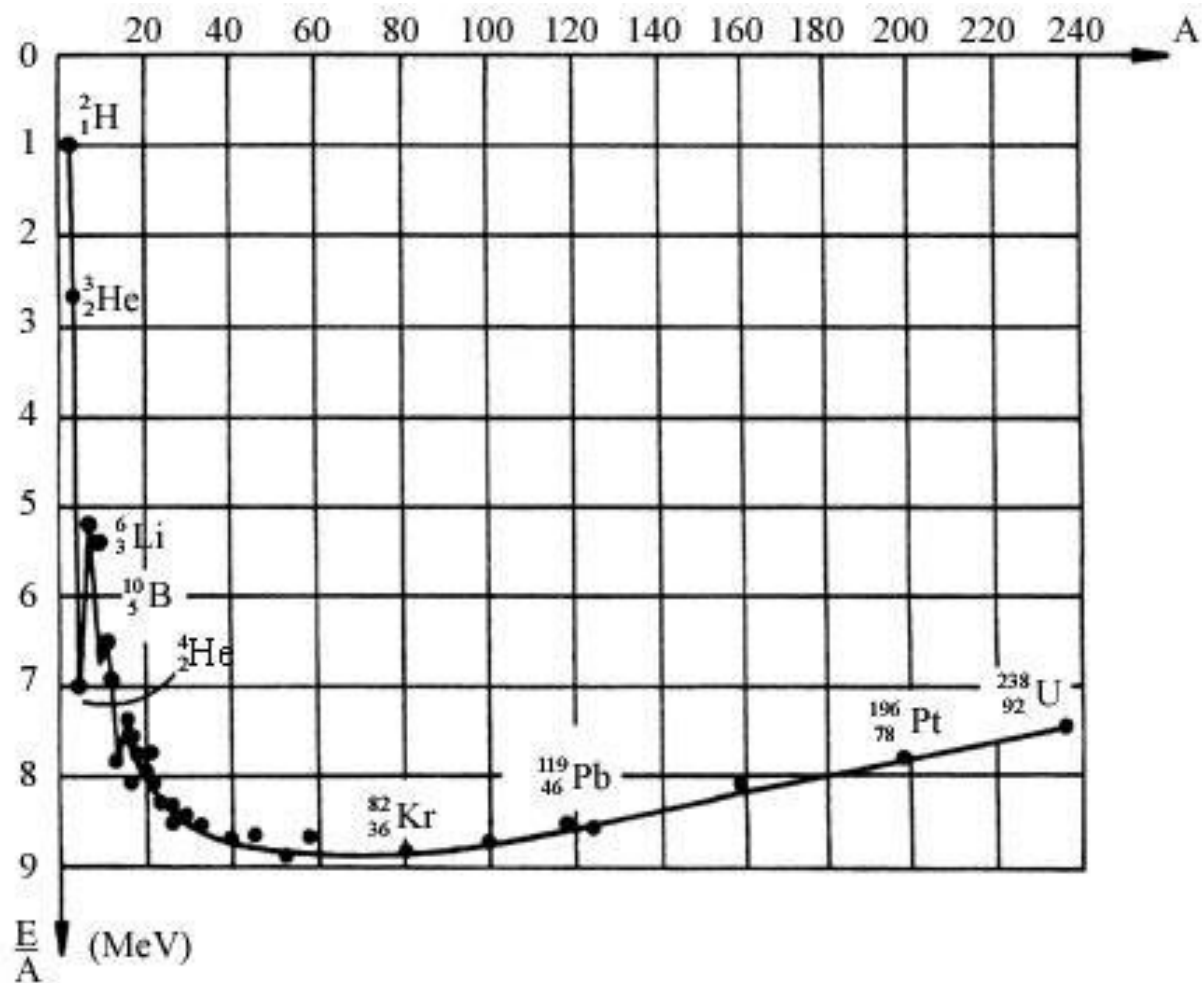
Nagyobb kádban sűrűbben vannak az energiaszintek.

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

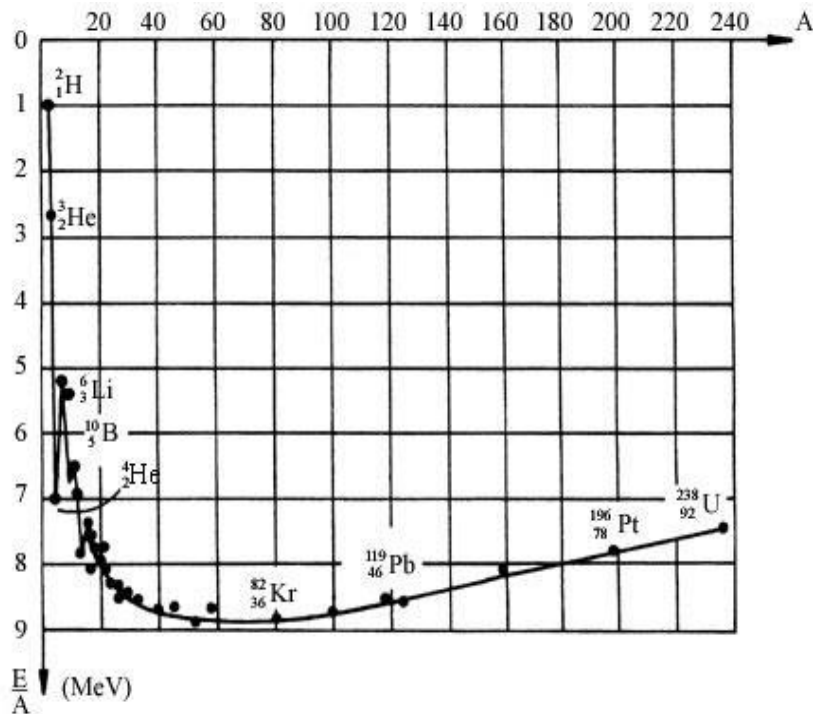
$$\epsilon \approx -8 \text{ MeV/nukleon.}$$

- Ha a tömegszám A kicsi, akkor még ugrál a görbe, majd nagy értékekre ϵ 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.

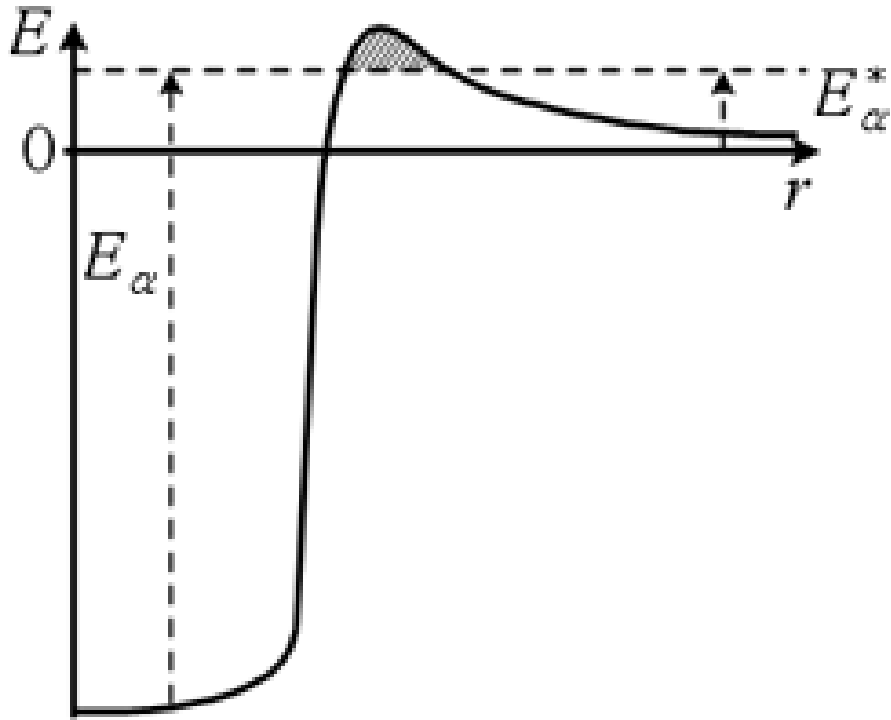
Az $\epsilon(A)$ függvény



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 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
- 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 értelmezése



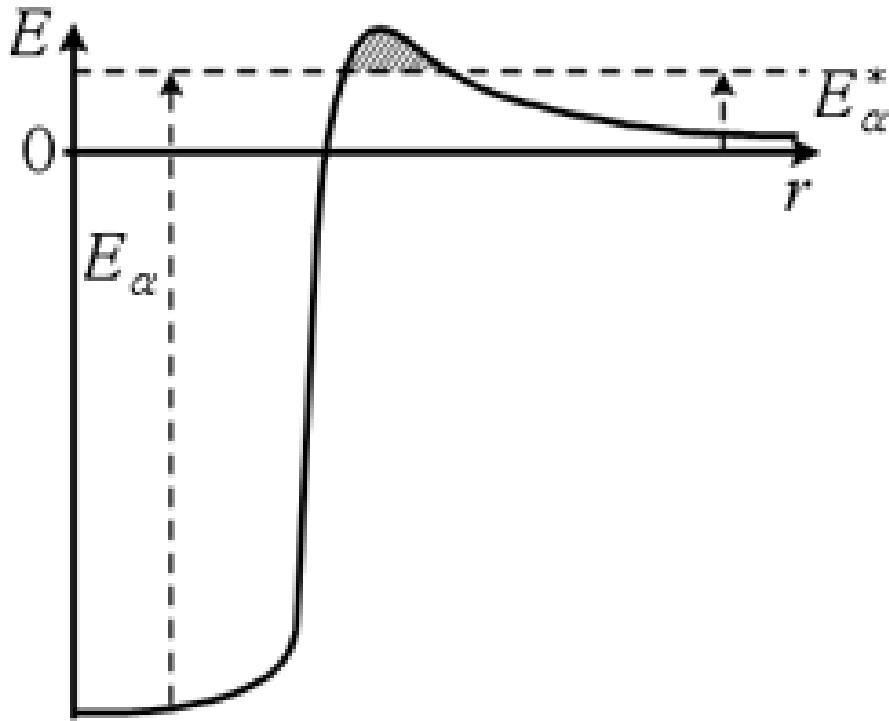
Kezdetben az α -részecske az atommag középpontjához közel, az ábra bal oldalán tartózkodik, a potenciálgödör mélyén.

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.

Az α -részecske energiája az atommag középpontjától mért távolság függvényében a potenciálgödör modell szerint

A kvantummechanikai alagút effektus



Az α -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 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 felezési ideje kicsi, ellenkező esetben nagy.

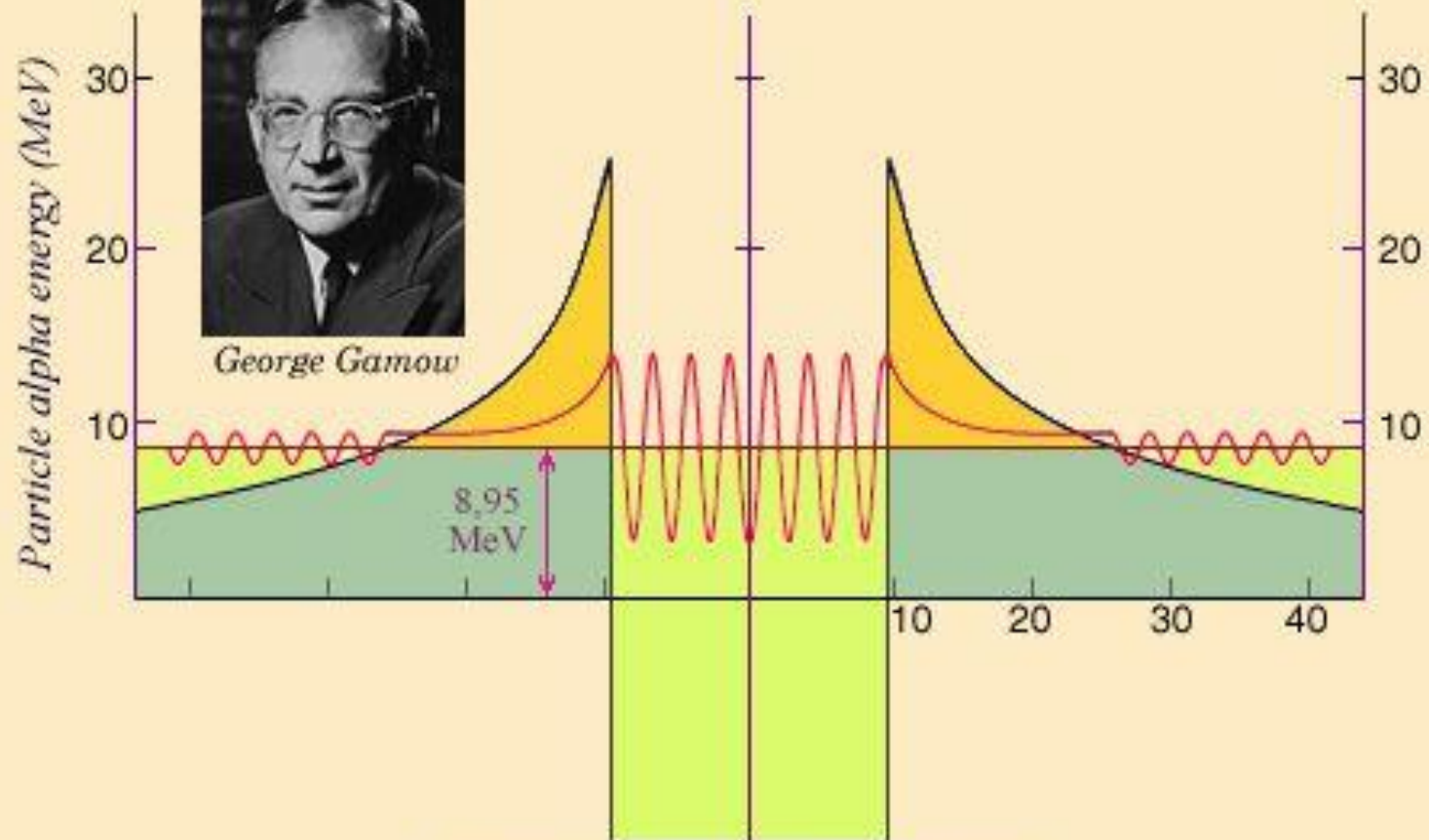
Például, ha $E_\alpha \approx 4 \text{ MeV}$ akkor $T_{1/2} = 10^9 \text{ év}$,

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

alpha decay of Polonium-212 (Z=84)

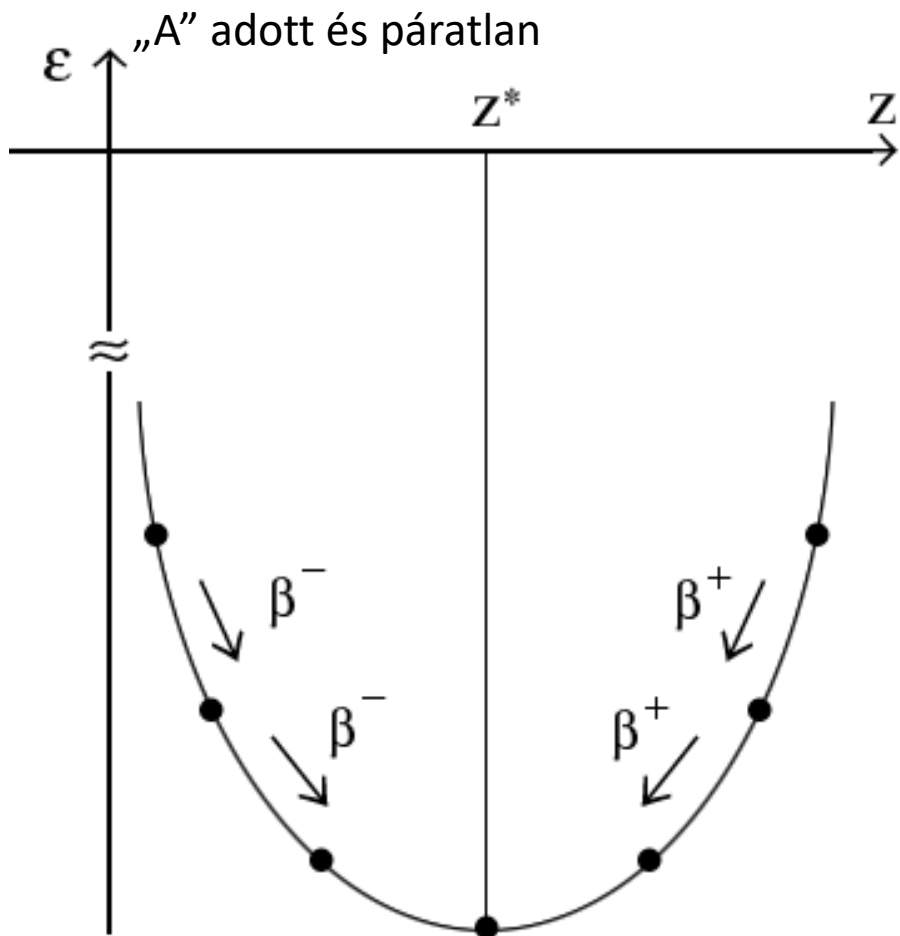


George Gamow



Distance between centers (fermis)

A β -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.

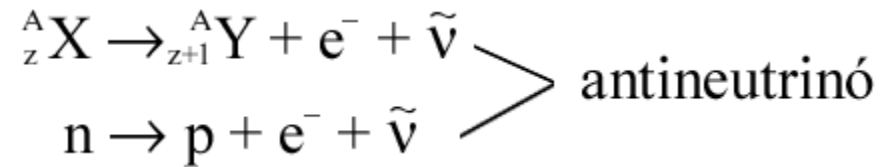
Minden A -hoz található egy optimális Z , ahol a kötési energia a legmélyebb.

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 β -bomlással, ha túl kevés, akkor pozitív β -bomlással vagy elektronbefogással bomlik.

A béta-bomlás formái (ism)

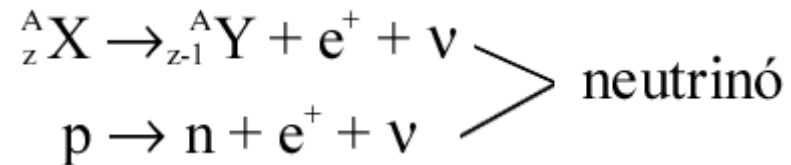
β^- : negatív β -bomlás



Tehát a negatív béta bomlás során lényegében az történik, hogy a magban lévő egyik neutron protonra és elektrorra (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 ε mélyebbre kerül a fenti ábrán). Hogy ténylegesen végbemegy-e a bomlás és milyen felezési idővel, az sok – itt nem tárgyalt – egyéb tényező függvénye.

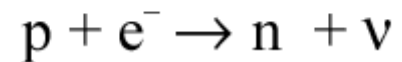
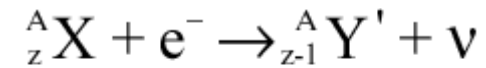
β^+ : pozitív β -bomlás



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.

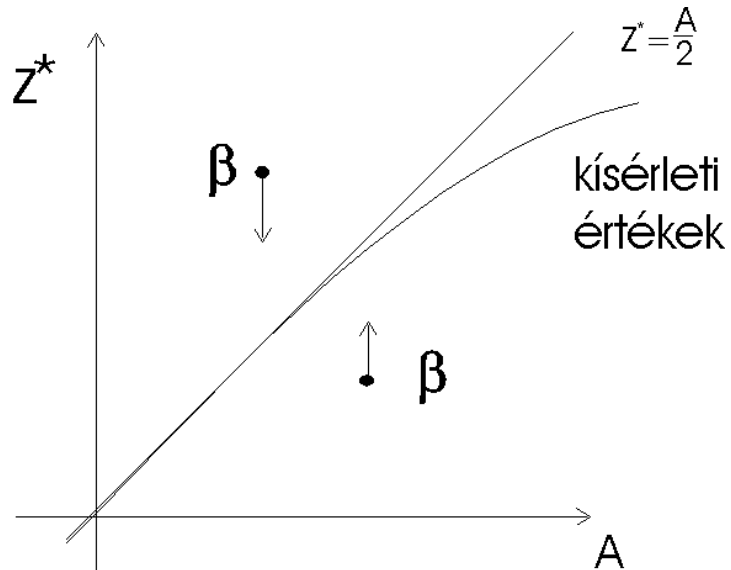
A béta-bomlás formái (ism)/2

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 β -bomlás tehát minden esetben az optimális proton – neutron arányt állítja be.

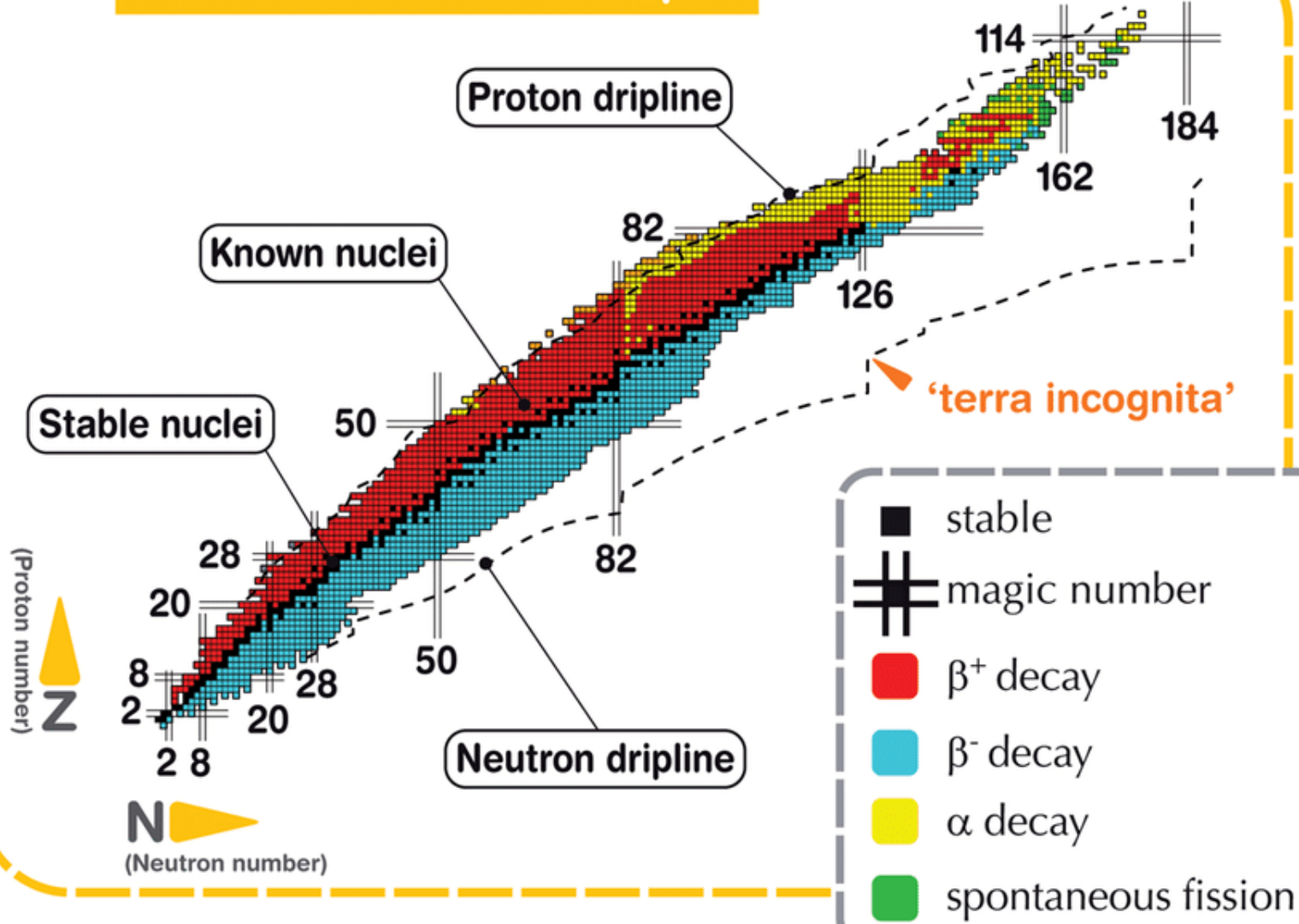
A $Z^*(A)$ függvény:



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

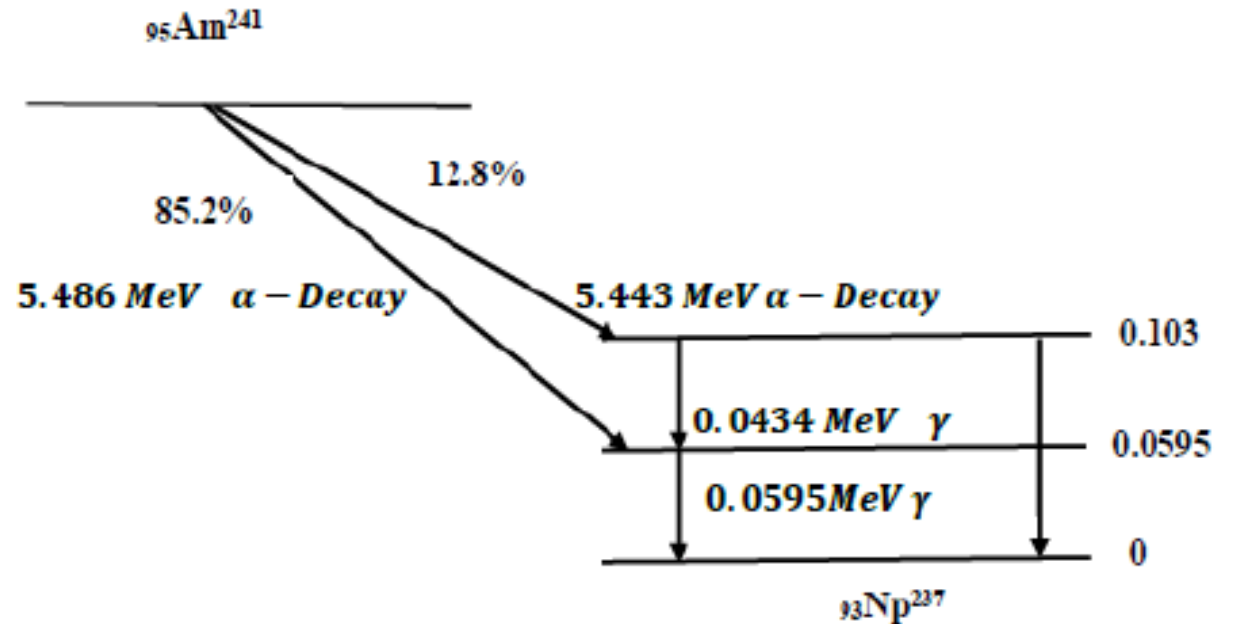
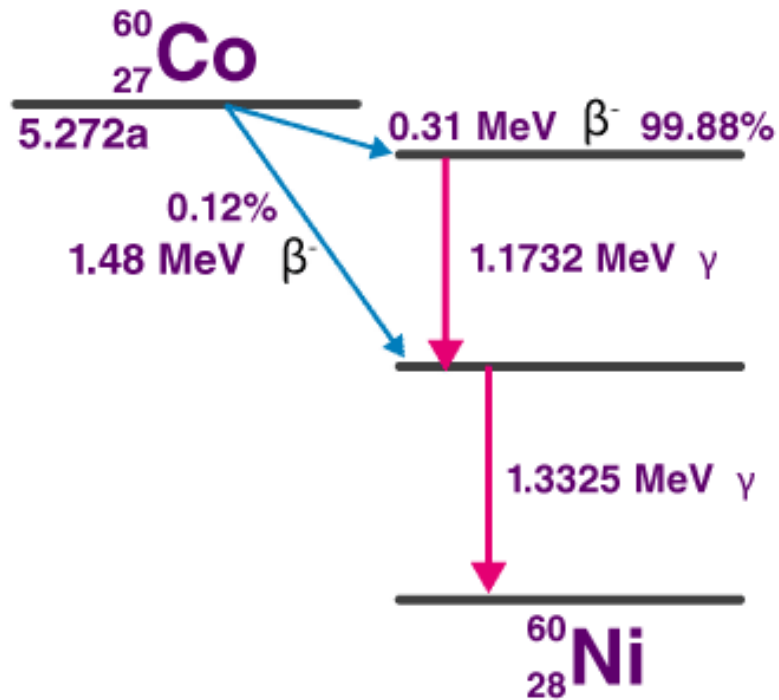
A görbe vonal feletti nukleonok β^+ bomlók, míg az alattiak β^- bomlók. Így juthatnak a stabil vonalra.

The Nuclear Landscape



Gamma-bomlás

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



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