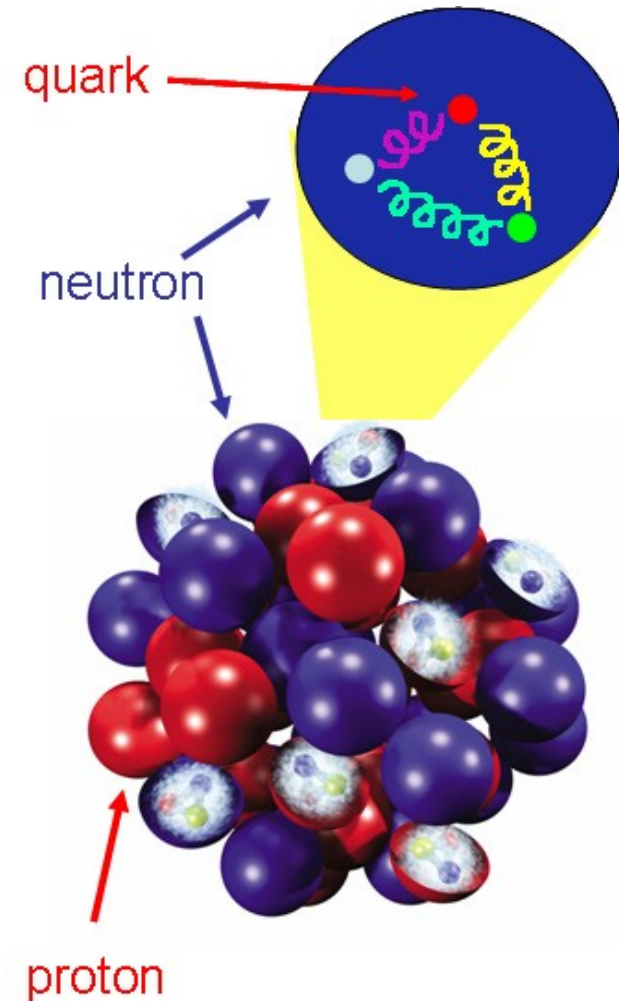
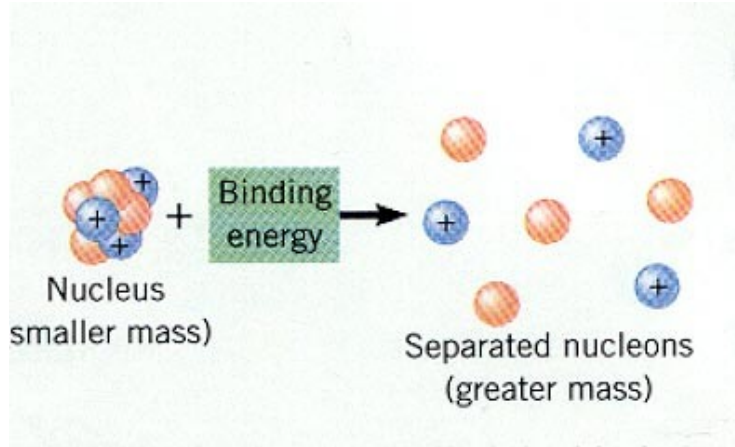


Cseppmodell

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



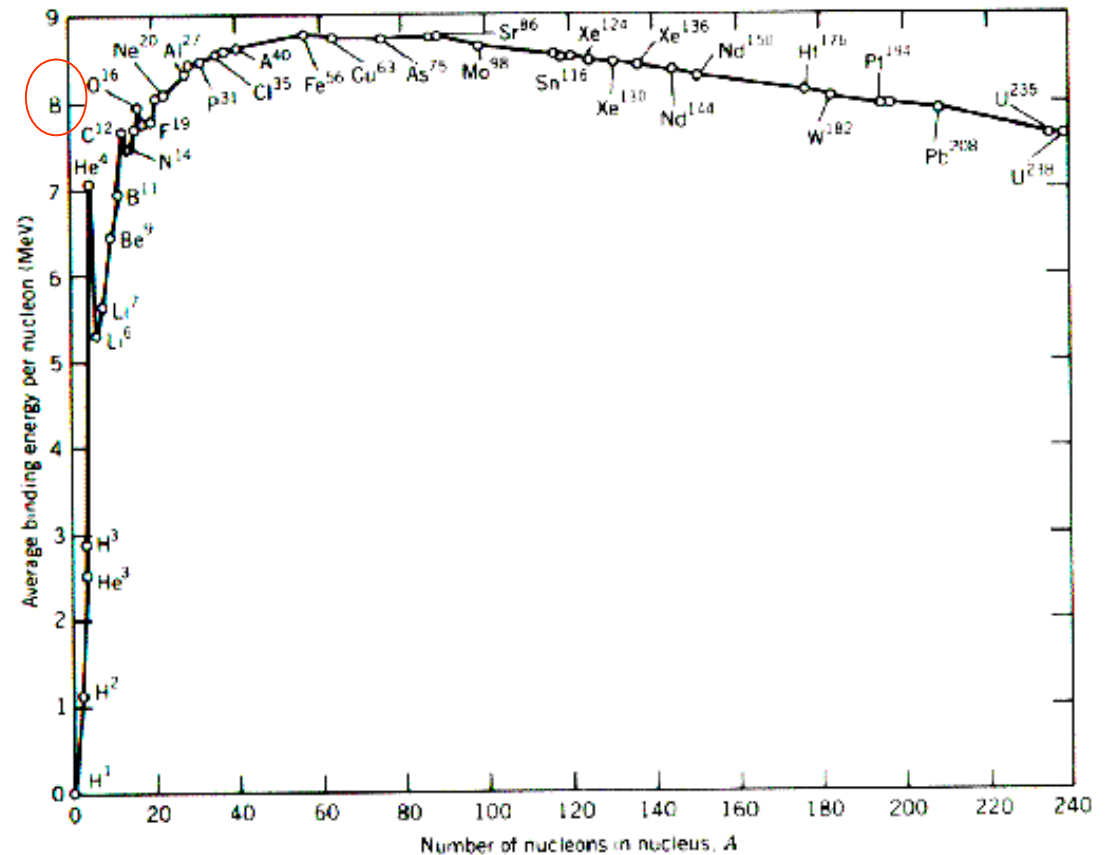
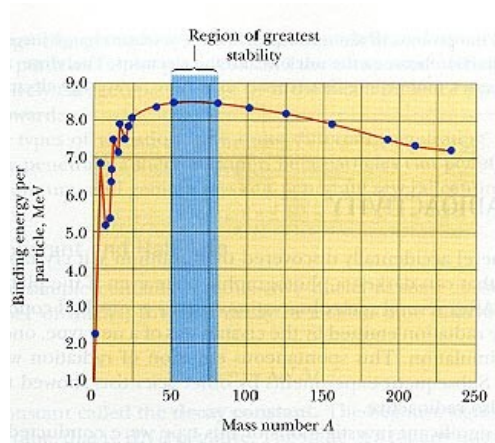
Atommagok kötési energiája



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

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 pti-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: ${}^4\text{He}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{40}\text{Ca}$, ${}^{208}\text{Pb}$

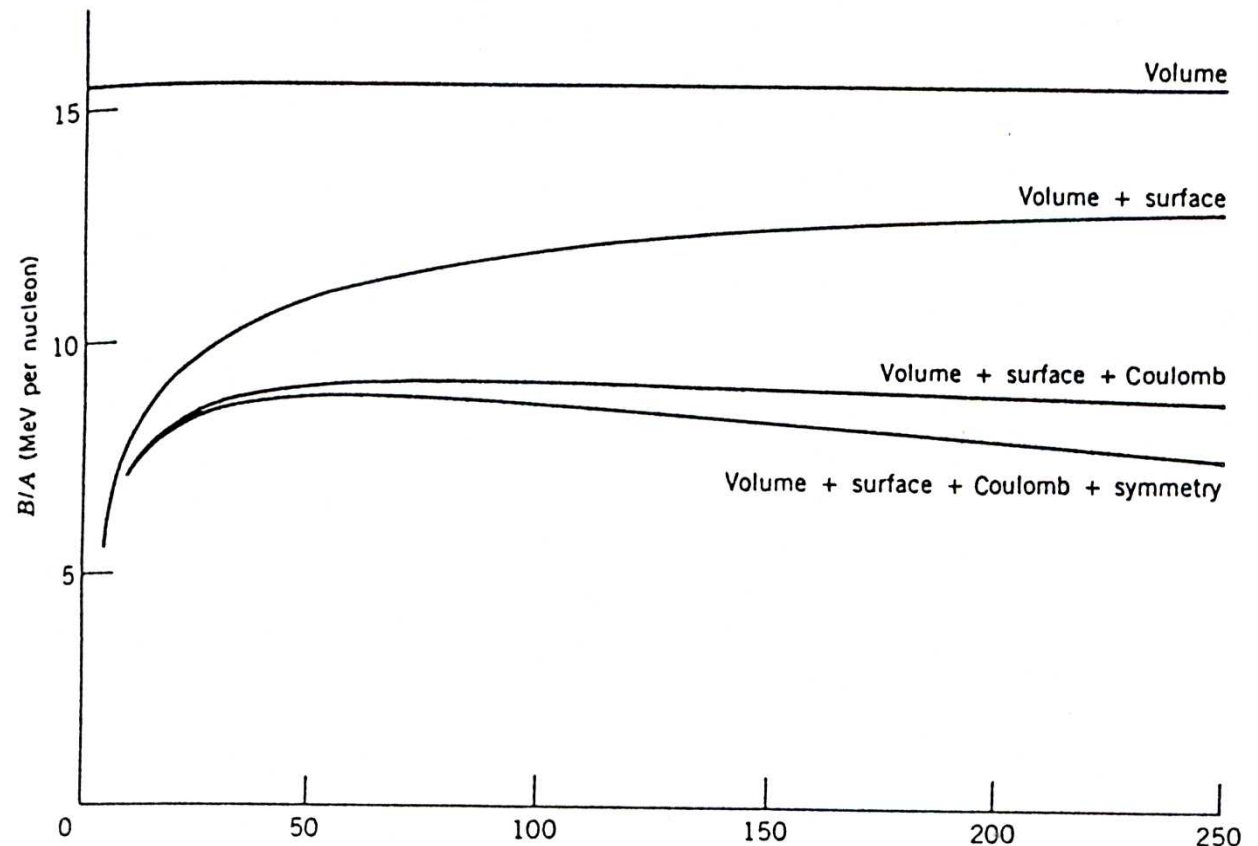
Félempírikus kötési formula

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:

- térfogati
- felületi
- Coulomb
- Szimmetria
- Párkölcsonhatás
 - ptl-ptl: negatív
 - ps-ps: pozitív
 - ps-ptl: nulla



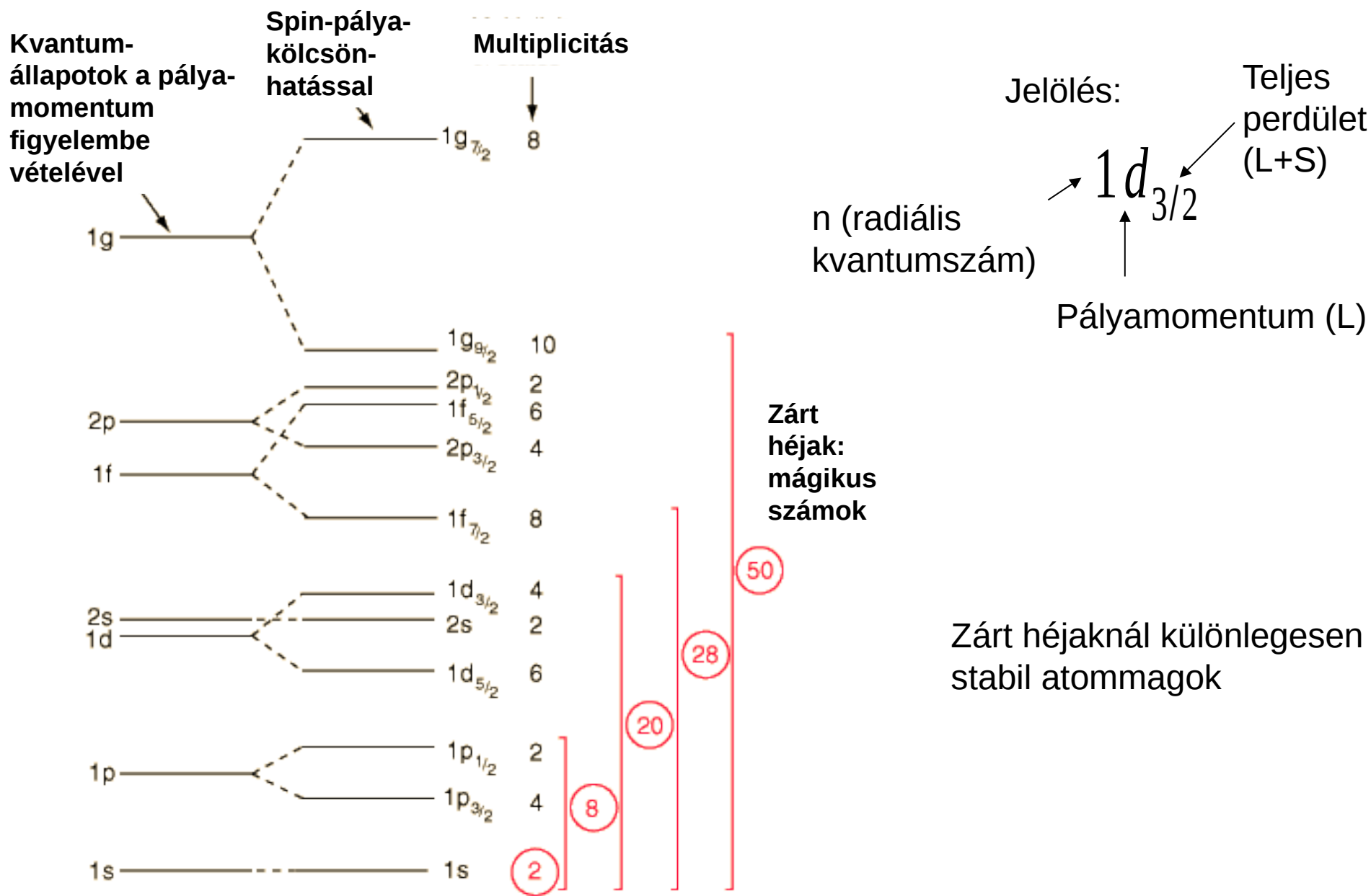
FEKF

- Térfogati 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.

Héjmodell

- Kvantummechanikai magmodell
- Ehhez kétnukleon-potenciál kéne...
- Helyette gyakran: **átlagtér** közelítés (minden nukleon ebben a centrális térben mozog).
Woods-Saxon potenciál: ahol sok nukleon van, ott mélyebb a potenciálgödör
- Független részecske modell: minden nukleonnak kiszámítjuk a hullámfüggvényét
- Hasonló kvantumszámok, pályaperdület stb. mint az atom esetén. 1s, 1p, 1d, 2s, 1f, 2p stb. kvantummechanikai pályák.
- Az első 3 mágikus szám kijön. 1s: **2** nukleon, 1p: $2(2 \times 1 + 1) = 6$ (eddig összesen **8**), 1d: $2(2 \times 2 + 1) = 10$, 2s: 2 (összesen **20**).
- Nagyobb mágikus számokhoz kell a spin-pálya kölcsönhatás is!
Ez a magokban igen nagy (erős).
- A nukleonok spinje a pályamomentummal *azonos* irányban szeret állni.
- FEKF szimmetria-tag: Pauli-elv, csak magasabb energiaszintek szabadok az „extra” nukleonok számára

Héjmodell spin-pálya kölcsönhatással



Energiaváltozás béta-bomlásban

Izobárok (A=konst)

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

Páratlan A: $E(Z)$ egy parabola, páros A: két parabola (pártag).

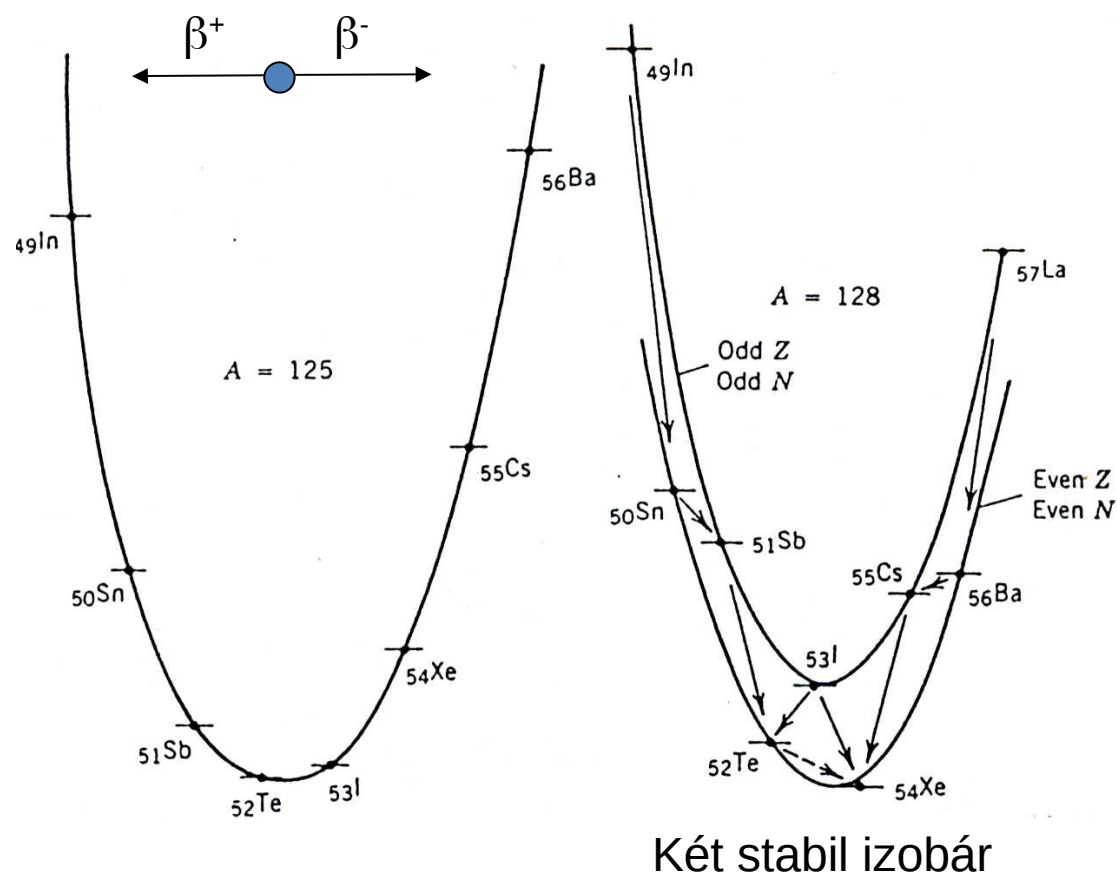
Páros A-nál két vagy több stabil izobár mag is létezhet: nem tudnak Alacsonyabb szintre kerülni.

Minimumhely: Z szerinti derivált=0

$$Z_{stabil} = \frac{A}{2} \frac{1}{1 + \frac{a_c}{4a_A} A^{2/3}}$$

Kis magokra: $Z \cong N \cong A/2$

Nagy magokra: $Z < A/2$



neutronsám ← ————— → protonszám

Energiaváltozás béta-bomlásban

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

$$\frac{\partial E}{\partial Z} \approx \frac{\partial}{\partial Z} \left[-\frac{a_C}{A^{1/3}} Z^2 - \frac{a_A}{A} (A^2 + 4Z^2 - 4AZ) \right] \stackrel{!}{=} 0$$

$$2a_C \frac{Z^*}{A^{1/3}} + \frac{8a_A}{A} Z^* - 4a_A = 0$$

$$Z^* \left[\frac{a_C}{A^{1/3}} + \frac{4a_A}{A} \right] = 2a_A$$

$$Z^* = \frac{2a_A}{\frac{4a_A}{A} + \frac{a_C}{A^{1/3}}} = A \frac{2a_A}{4a_A + a_C A^{2/3}} = \frac{A}{2} \frac{4a_A}{4a_A + a_C A^{2/3}} =$$

$$= \frac{A}{2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{a_C}{4a_A} A^{2/3}}$$

Kis magokra: $Z \cong N \cong A/2$

Nagy magokra: $Z < A/2$

Atommagok nyomatóka

- Spin: neutron és proton esetén is $\frac{1}{2}$.
- Mágneses momentumuk is van: $\mu = g\mu_N S$
- μ_N a mag-magneton: $\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p}$
- g-faktor: proton: 5,586, neutron: -3,826 (nem nulla, kvarkokból áll!)
- A magspin a neutronok és protonok spinjeinek és pályamomentumainak összege (kvantumoz szabályok szerint):

$$\vec{I} = \sum_i^Z \vec{S}_{pi} + \sum_j^N \vec{S}_{nj} + \sum_i^Z \vec{L}_{pi} + \sum_j^N \vec{L}_{nj}$$

- I^2 sajátértéke $\hbar^2 i(i+1)$, az I_z harmadik komponens értéke $m = -i, i+1, \dots, i$ (egész vagy félegész)
- Páros A: a magspin egész, páratlan A: félegész.
- Páros N és Z esetén a magspin 0.

Magok mágneses momentuma

- A teljes mágneses momentumba a spinek és a *protonok* pályamomentuma adnak járulékot:

$$\vec{M} = \mu_N \left(g_p \sum_i^Z \vec{S}_{pi} + g_n \sum_j^N \vec{S}_{nj} + \sum_i^Z \vec{L}_{pi} \right)$$

- A perdület és a mágneses momentum nem párhuzamosak. A perdület megmarad. **M** ekörül precesszál, az időátlagja mérhető:

$$\vec{M}_{\text{eff}} = \vec{\mu} = \frac{(\vec{M} \cdot \vec{I}) \vec{I}}{I^2} = g \mu_N \vec{I}$$

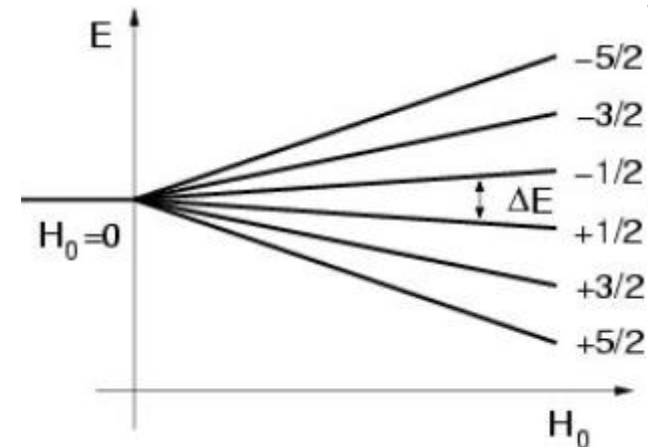
Magok mágneses momentuma

- Páros-páros magokra mágn. mom. = 0.
- Páros-páratlan magok: a lezárt héjak és párok (magtörzs) momentuma 0, csak az utolsó nukleon számít
 - Spin és pályaperdület adandó össze
- Jelentősége:
 - Hiperfinom felhasadás az atomfizikában
 - Mágn. mom. hangolható, változtatható (NMR)

Mag-mágneses rezonancia (NMR)

- Külső mágneses térben
nívófelhasadás
- Szomszédos nívók közötti
energiakülönbség:

$$\Delta E = |\gamma| \hbar H_0$$

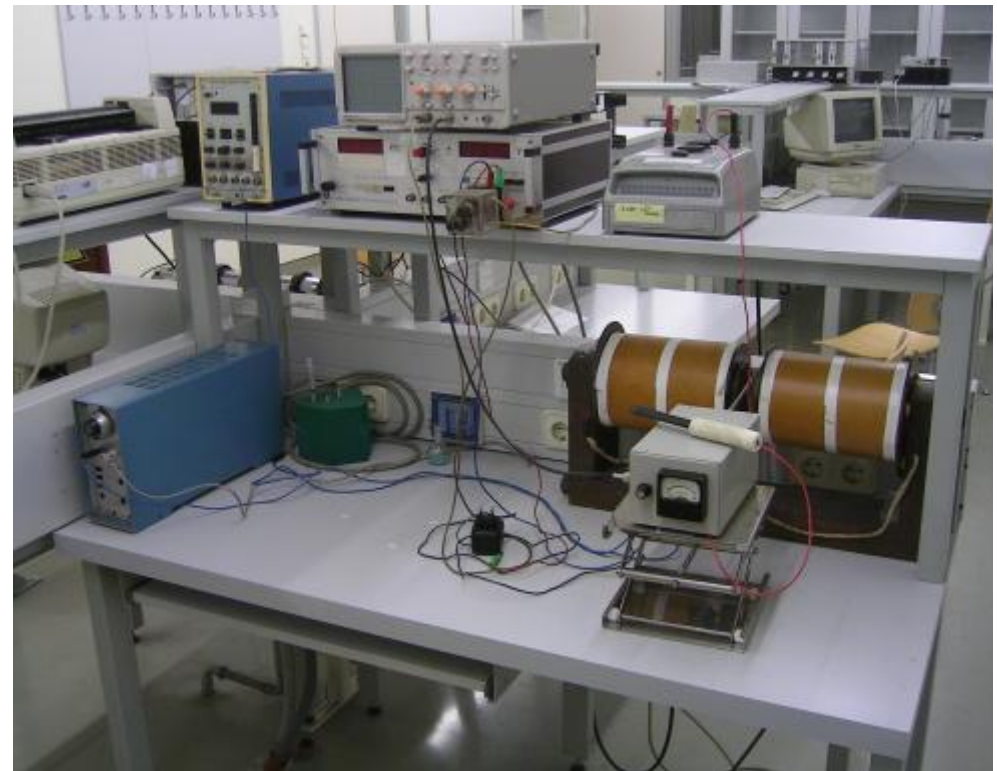


- Rezonancia-elnyelődést egy
 ω körfrekvenciájú fotonnal
(rádiófrekvenciás EM térrel)
hozzatunk létre:

$$h\nu = \hbar \omega = \Delta E = |\gamma| \hbar H_0$$

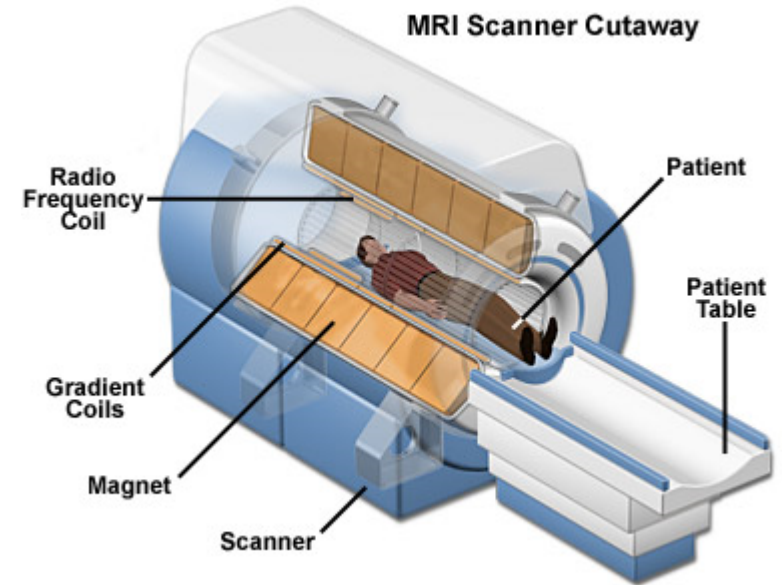
Mag-mágneses rezonancia (NMR)

- III. év, BSc. Korszerű vizsgálati módszerek labor
- Rádiófrekvenciás tekercs jósági tényezőjét mérjük (elnyelődés a mintában), változtatva a mágneses teret és a rádiófrekvenciát
- g-faktorok mérhetőek (atommagok mágneses momentumai)



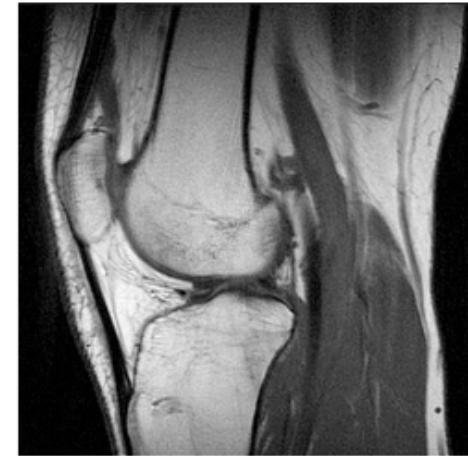
NMR alkalmazásai

- **Kémia, biofizika, stb:** molekulákban különböző (elektronszerkezetből származó) mágneses teret érző protonok máshol rezonálnak. Bonyolult molekulák szerkezete is feltérképezhető.
- **Orvosi:** beteg roncsolásmentes vizsgálata. Inhomogén mágneses térben a rezonancia csak egy síkfelület mentén jön létre. Ezt a felületet lassan mozgatva minden szeletben megmérhető az abszorpció. Ebből a protonszűrűség megmérhető, 3 dimenzióban is.



Mágneses magrezonancia képalkotás

- Erős mágneses térbe helyezik a vizsgált testrészt
- Az erőtér elbillenti a hidrogénatomokban a protonok tengelyének irányát
- A test körülbelül 70 százalékát víz (H_2O) alkotja, így sok a hidrogén (fontos: páratlan protonszám \rightarrow spin = $1/2!$)
- A szkennelés alatt, rétegenként, plusz energiával „bombázzák” a víz protonjait, ezzel megváltoztatják a tengelyek dőlését
- A proton igyekszik visszaállítani eredeti dőlésszögét, így a kapott energiát visszasugározza
- Ezt a visszasugárzott energiát méri a készülék, és ez alapján rekonstruálható a háromdimenziós kép
- Szisztematikusan, tetszőlegesen beállított síkokban képeket készíthetnek, amelyekből információt nyernek az adott térfogaton található szövetek víztartalmáról, sűrűségéről, végső soron az anyagáról, mely a strukturális elemzésekhez szükséges.

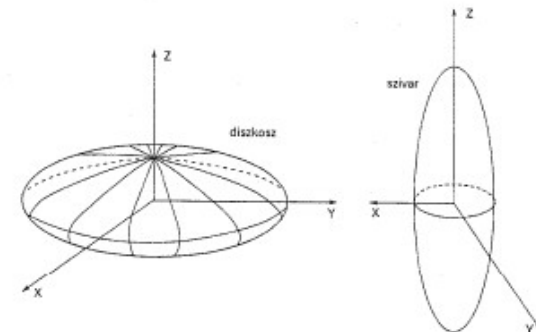


Elektromos kvadrupólmomentum

- Nem gömbszimmetrikus magokra nem nulla
- Magok általában forgási ellipszoid alakúak
- Töltés momentumai és az elektromos tér kölcsönhatási energiája:

$$E = qV_0 + \sum_i D_i \left(\frac{\partial V}{\partial x_i} \right)_{r=0} + \sum_{i,j} Q_{ij} \left(\frac{\partial E_i}{\partial x_j} \right)_{r=0} + \dots$$

- D dipólmomentum =0, mivel nincs negatív töltés az atommagban.
- Q a kvadrupólmomentum, hengersizimmetrikus esetben egyetlen adattal leírható
- Diszkosz: $Q < 0$, szivar: $Q > 0$
- Nagy Q: jól gerjeszthető magok, mágikus számoktól távol vannak általában

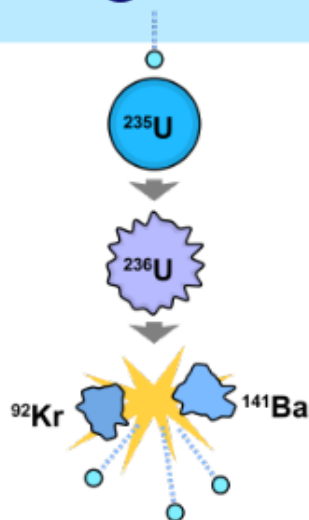


Elektromos Q momentum mérése

- III. év, BSc. Korszerű vizsgálati módszerek labor
- Mössbauer-effektus (ld. később)
- Az elektromos térgradiens és Q szorzata mérhető, mint kis (*nanoelektronvoltos*) energia-eltolódás
- Külső tér ismeretében Q, Q ismeretében pedig a térgradiens kiszámítható az atommag helyén!
- 10^{-15} pontosságú relatív energiamérés



Maghasadás



Nagy atommagok széthasadása, spontán vagy (általában) indukált módon (lassú, termikus neutronokkal)

A hasadványok tömege 2:3 arányhoz van közel, de széles tartományban változik, hasadásról hasadásra is!

Általában 2 részre hasad a mag.

A felszabaduló energia az alfa-bomlásnál egy nagyságrenddel nagyobb, 200 MeV körüli. (Vő szénégetés: néhány eV).

Hasadási termékek tömegszámának eloszlása:

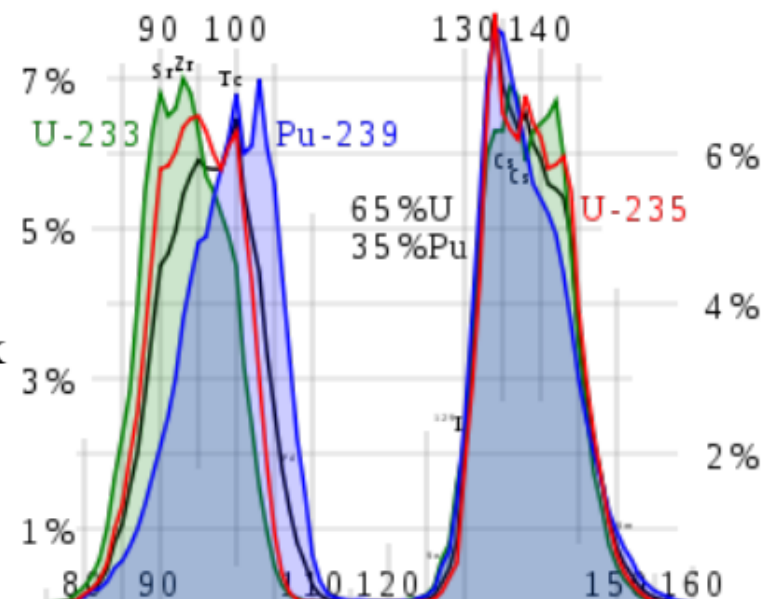
Cseppmodell nem magyarázza, héjmodell kell

2-3 prompt neutron is keletkezik hasadáskor, ezek (moderálás után) további hasításra képesek

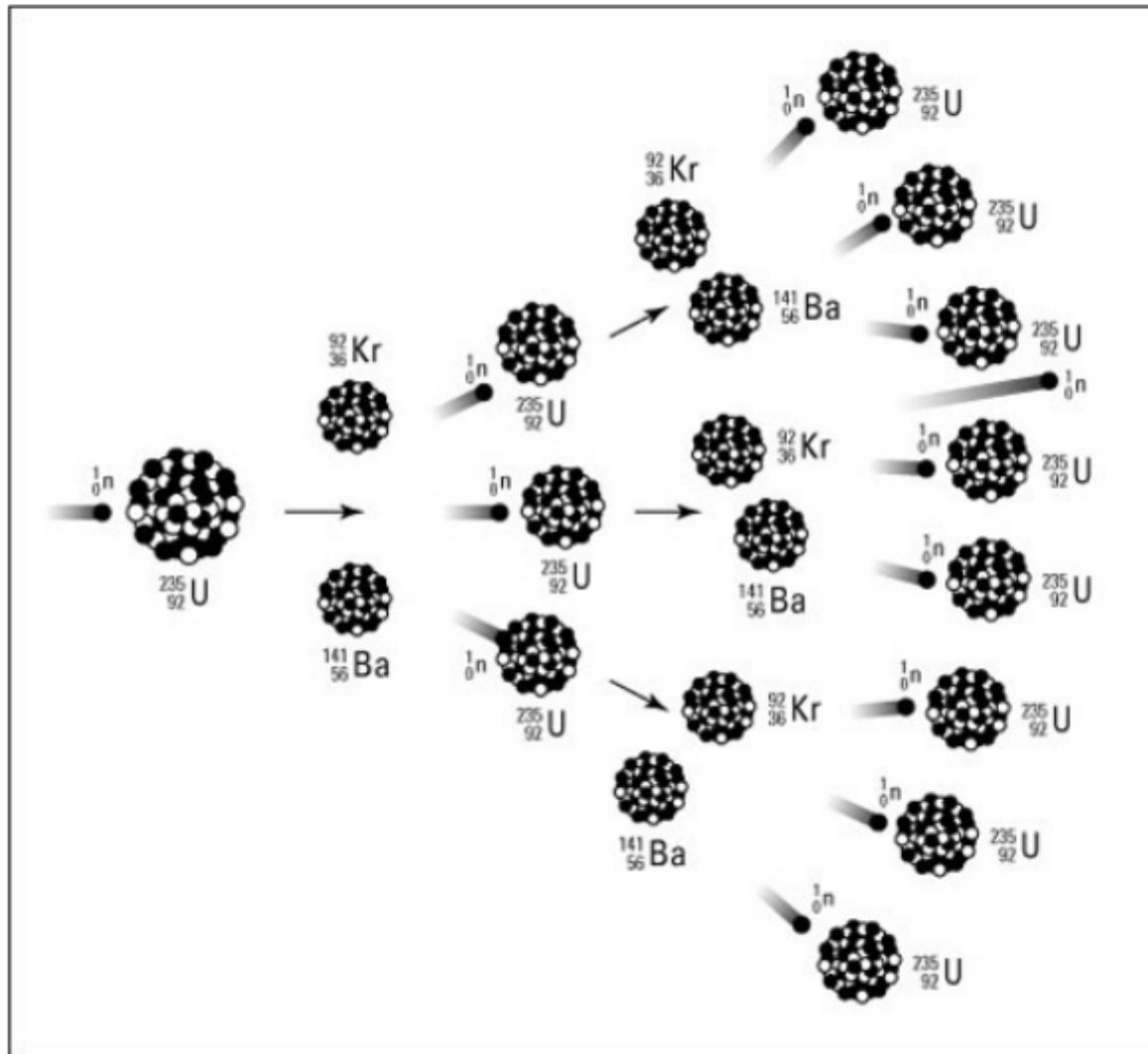
Láncreakció: atomerőműben, atombombában

Gamma-sugárzás is fellép

Antineutrínók is (neutrontöbblet, pozitív béta bomlások).



Maghasadási lánreakció



Maghasadás

Hasadási termékek: SOKKAL radioaktívabbak mint a kiindulási (üzem)anyag.
Ez a nukleáris hulladék problémája.

Remanens hő: a kiégett üzemanyag radioaktivitása termeli, pár ezrelék középtávon!

Háromtest-hasadás: három kisebb atommagra. Ez csak az esetek pár ezreléke, mégis fontos, mert He, trícium keletkezik az atomerőművekben.
(16 MeV-es, hosszú hatótávolságú alfa részecskék).

Az indukált hasadásra használt izotópok: ^{235}U és ^{239}Pu .

Az urán 238-as izotópja a gyakoribb, 235-ös csak 0,7% arányban van.

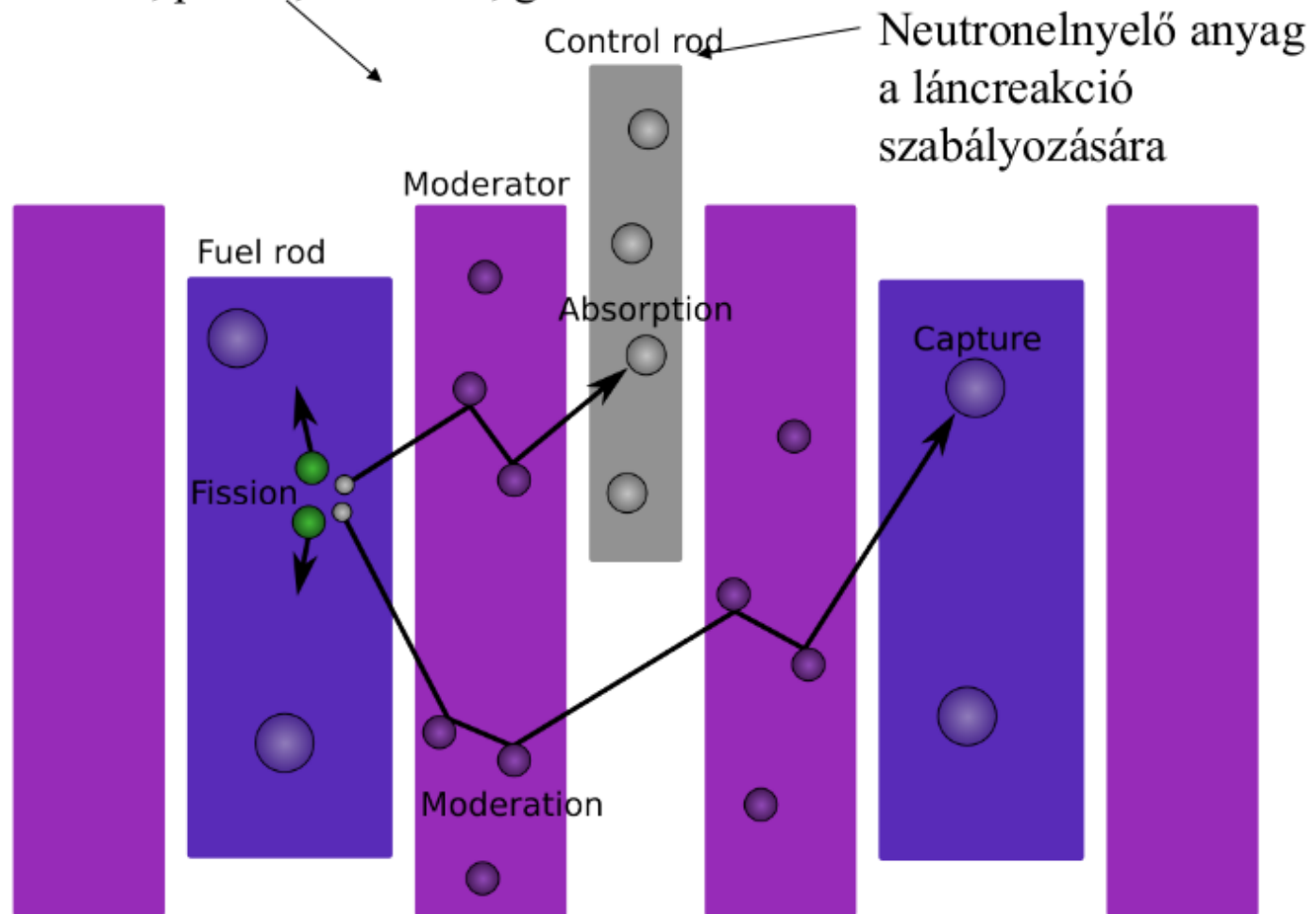
Dúsítani kell kb. 3%-ra.

Természetes reaktorok: 2 milliárd évvel ezelőtt a természetben is léteztek (Gabon).
100 kW. Normál vizes moderátor.

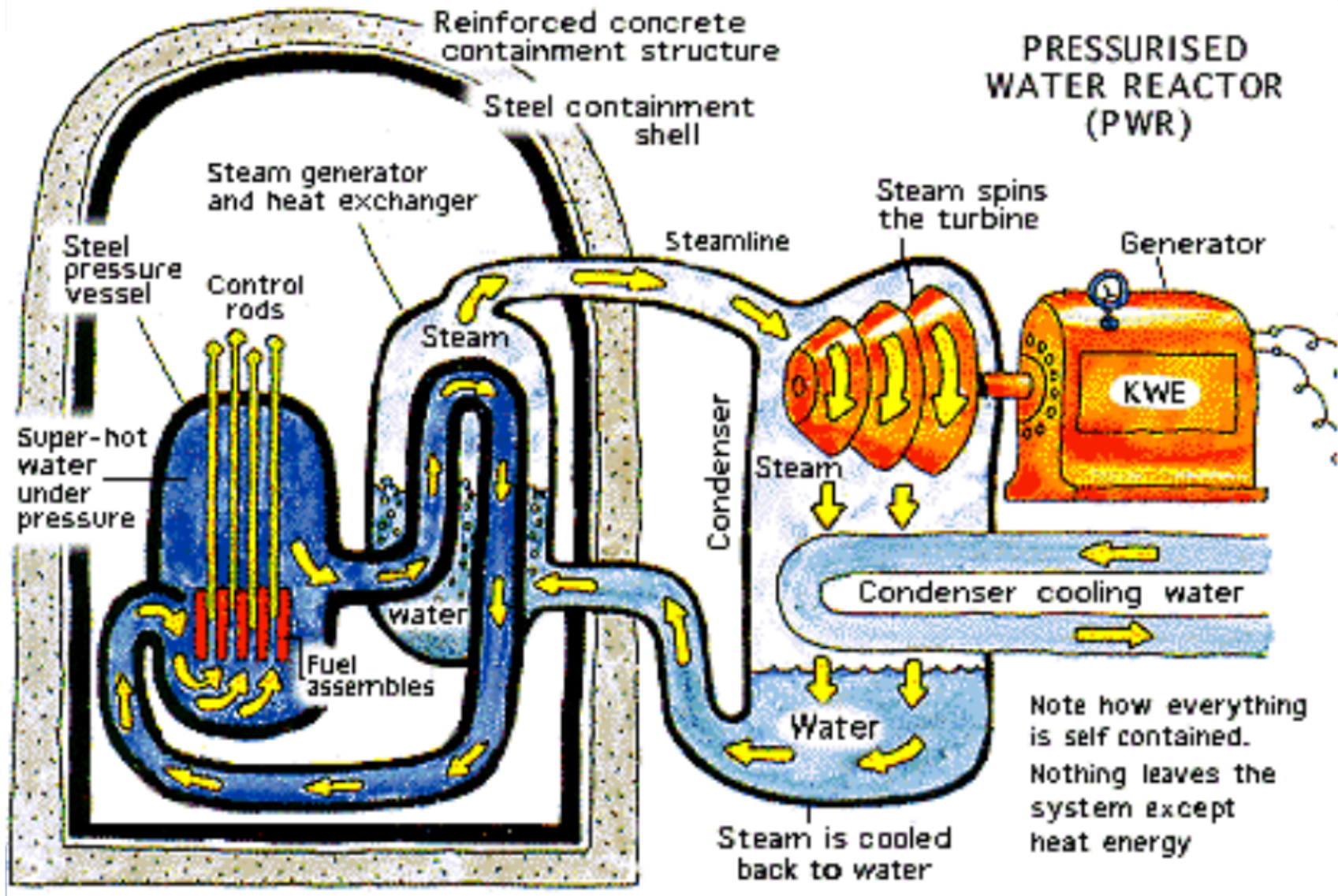
Kritikus tömeg: a neutronok nem szöknek el nagy arányban, képesek önfenntartó láncreakcióra.

Moderálás, szabályozás

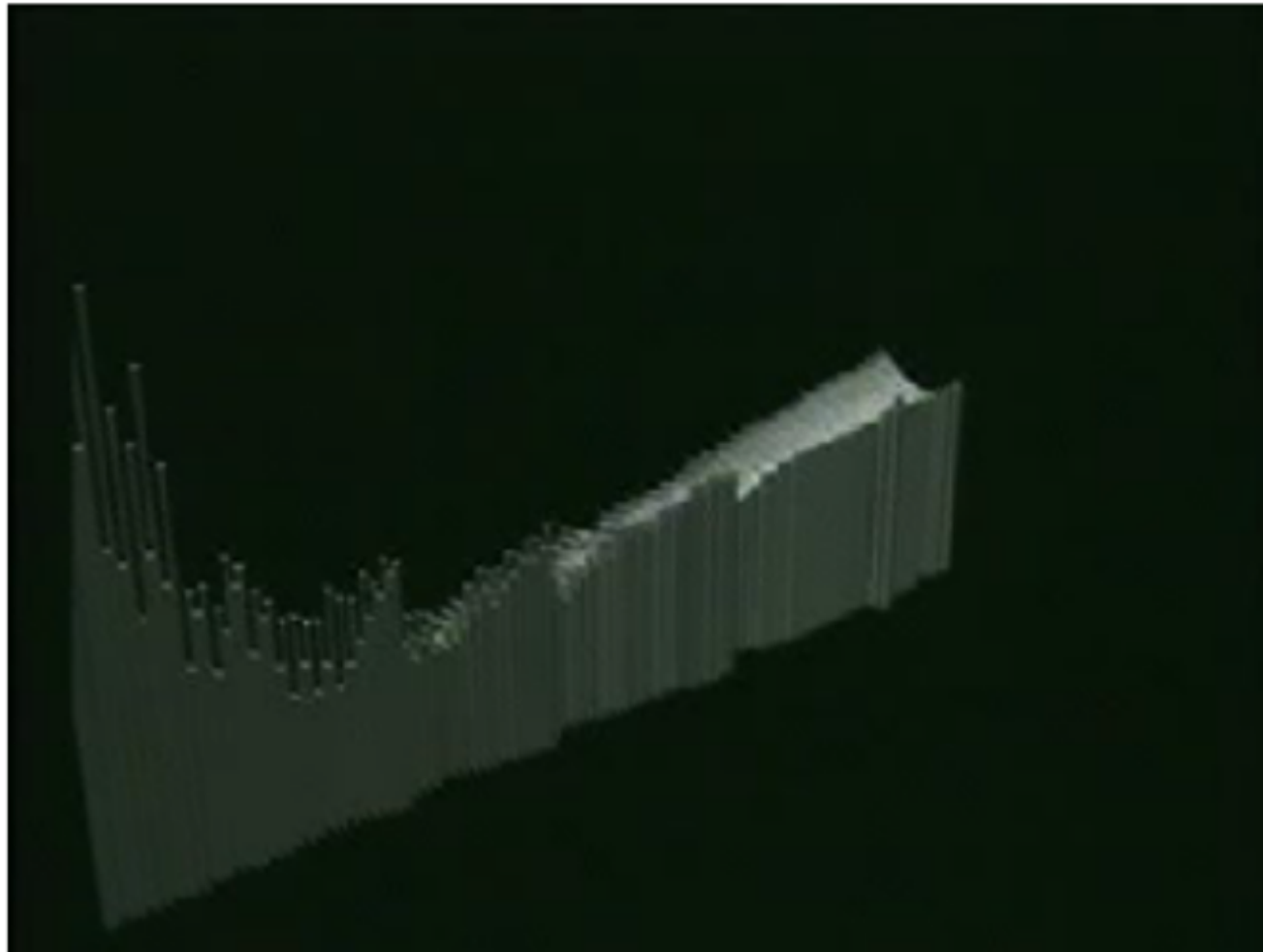
Termikus neutronok előállítása a magreakció hatáskeresztmetszetének növelése érdekében, pl. víz, nehézvíz, grafit használatával



Atomreaktor, atomerómű



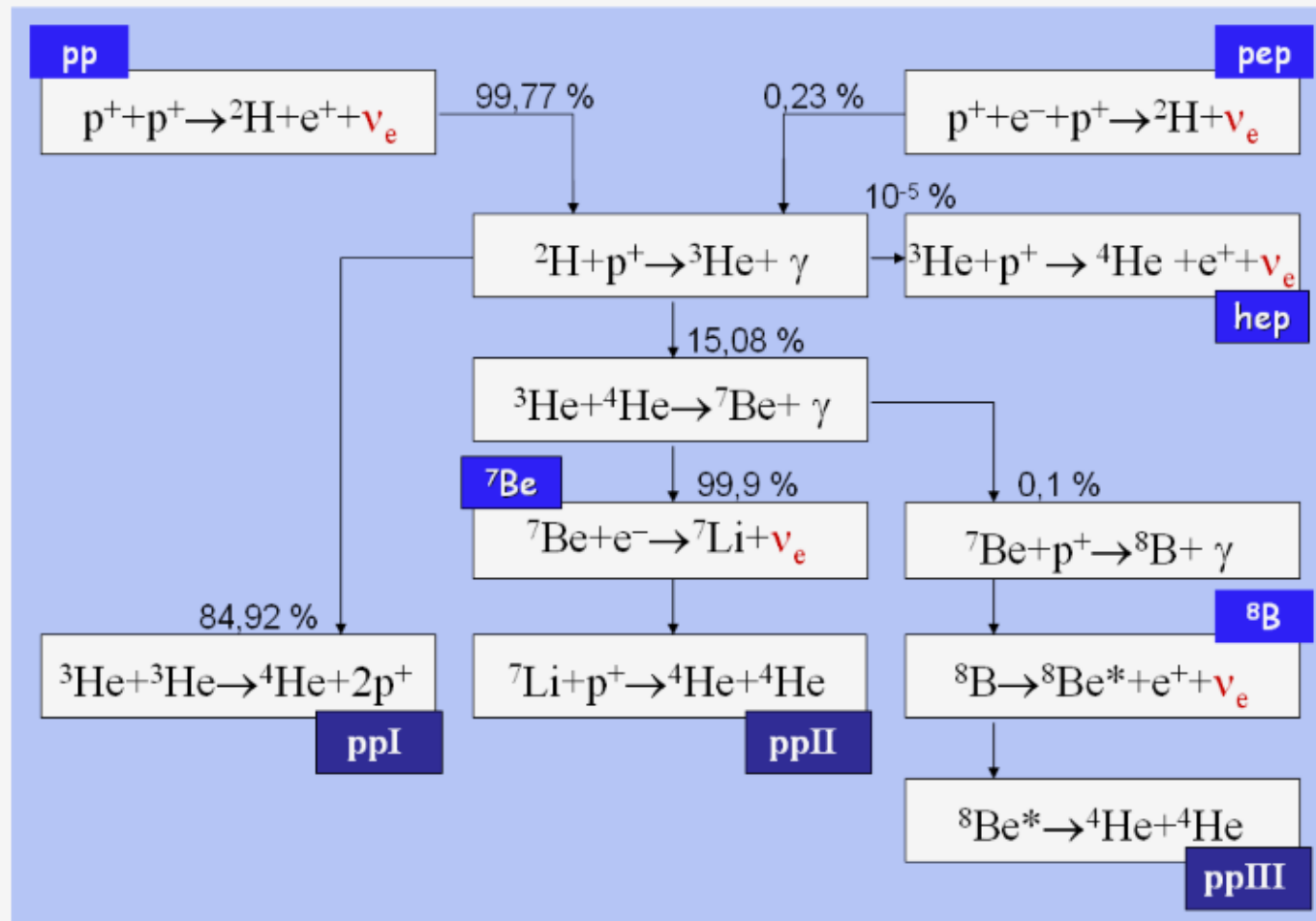
Stabilitás völgye



Nukleoszintézis

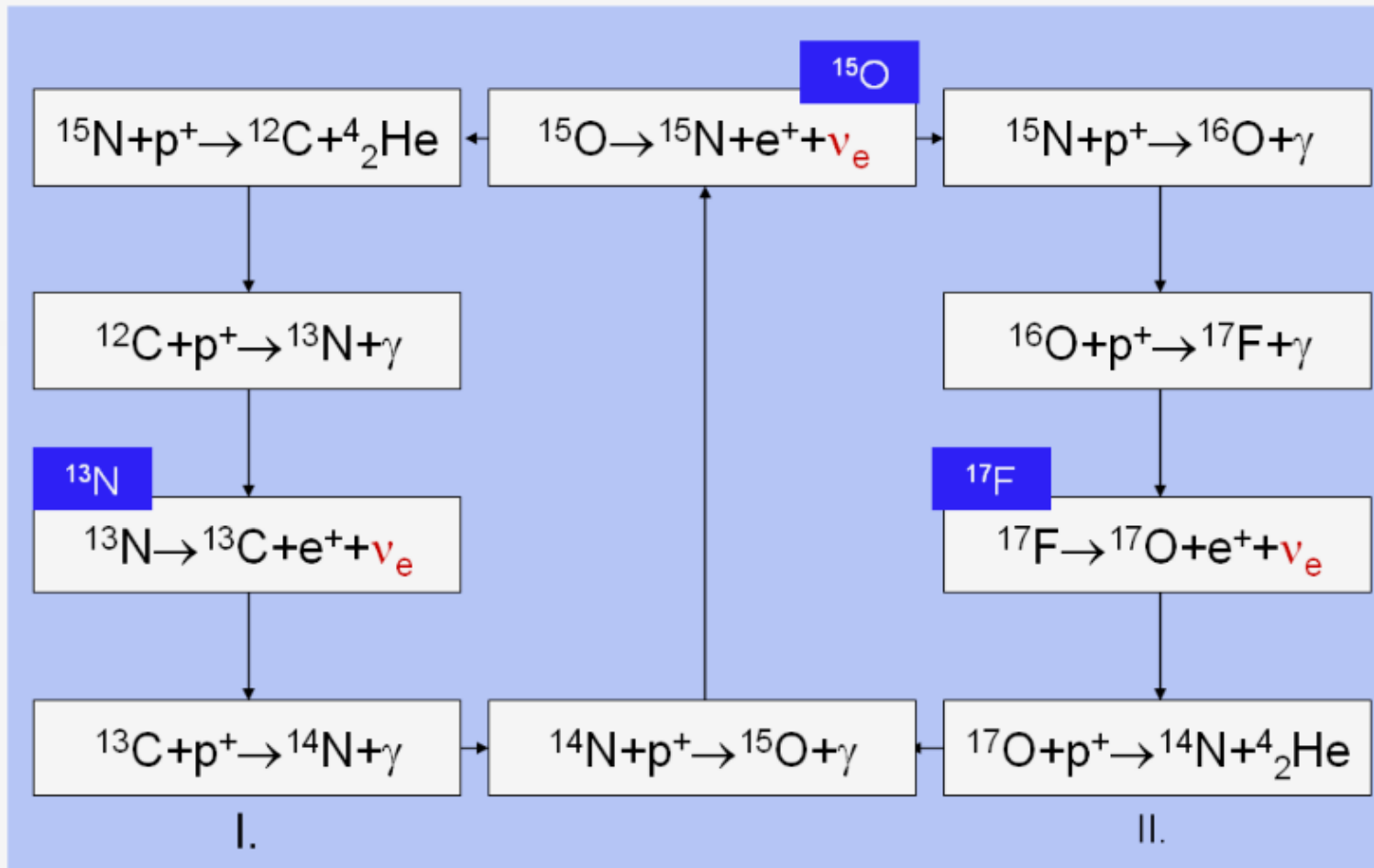
		<table border="0"> <tr> <td>B Big Bang</td> <td>L Large stars</td> <td>S Super-novae</td> </tr> <tr> <td>C Cosmic rays</td> <td>S Small stars</td> <td>M Man-made</td> </tr> </table>																B Big Bang	L Large stars	S Super-novae	C Cosmic rays	S Small stars	M Man-made						
B Big Bang	L Large stars	S Super-novae																											
C Cosmic rays	S Small stars	M Man-made																											
H B																	He B												
Li C	Be C											B C	C S L	N S L	O S L	F L	Ne S L												
Na L	Mg L											Al \$ L	Si \$ L	P L	S S L	Cl L	Ar L												
K L	Ca L	Sc L	Ti \$ L	V \$ L	Cr L	Mn L	Fe \$ L	Co \$	Ni \$	Cu L	Zn L	Ga \$	Ge \$	As L	Se \$	Br \$	Kr \$												
Rb \$	Sr L	Y L	Zr L	Nb L	Mo \$ L	Tc L	Ru \$ L	Rh \$	Pd \$ L	Ag \$ L	Cd \$ L	In \$ L	Sn \$ L	Sb \$	Te \$	I \$	Xe \$												
Cs \$	Ba L		Hf \$ L	Ta \$ L	W \$ L	Re \$	Os \$	Ir \$	Pt \$	Au \$	Hg \$ L	Tl \$ L	Pb \$	Bi \$	Po \$	At \$	Rn \$												
Fr \$	Ra \$		La L	Ce L	Pr \$ L	Nd \$ L	Pm \$ L	Sm \$ L	Eu \$	Gd \$	Tb \$	Dy \$	Ho \$	Er \$	Tm \$	Yb \$ L	Lu \$												
			Ac \$	Th \$	Pa \$	U \$	Np \$	Pu \$	Am M	Cm M	Bk M	Cf M	Es M	Fm M	Md M	No M	Lr M												

Nukleoszintézis: p-p ciklus a Napban



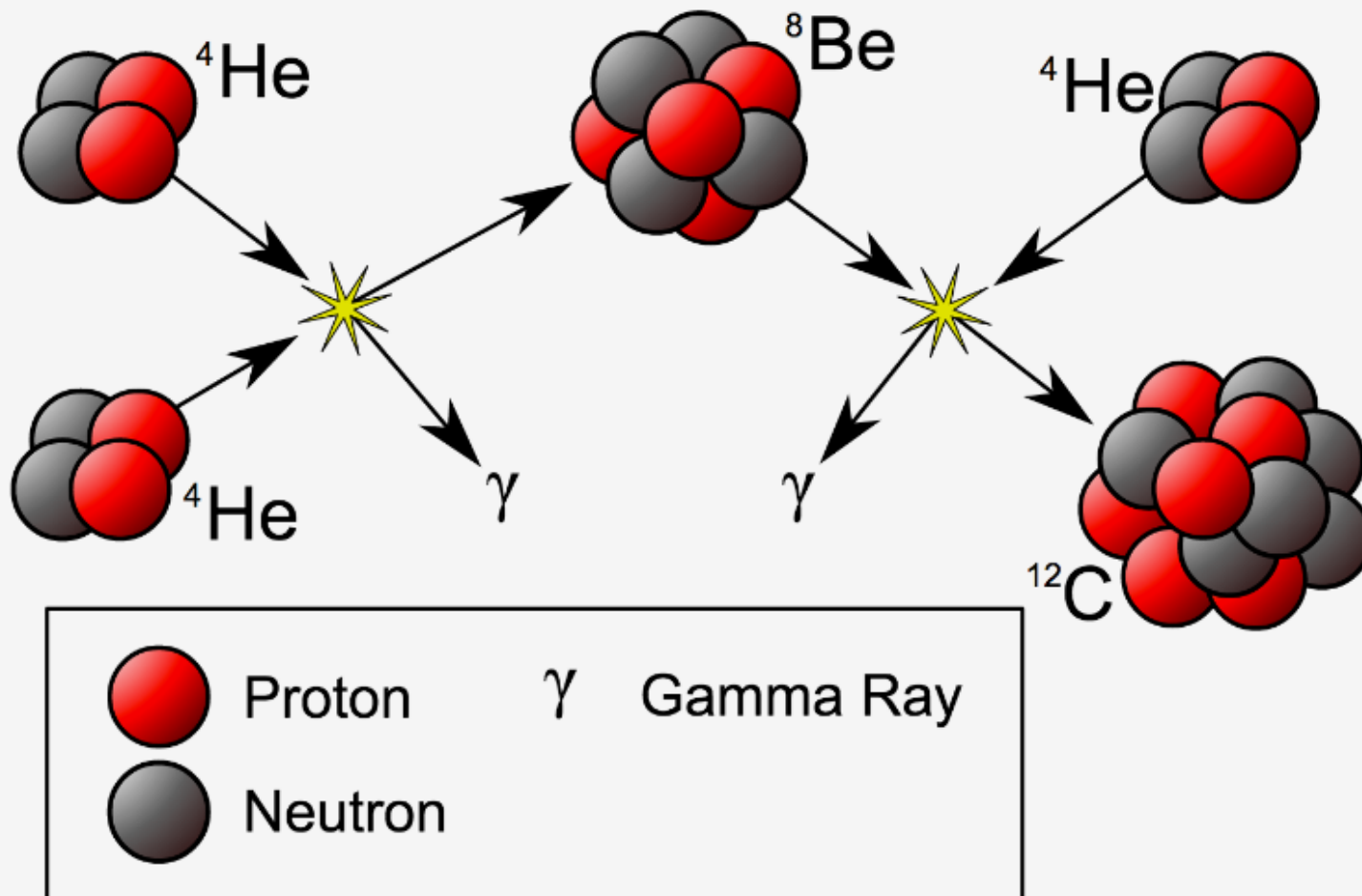
Nukleoszintézis: CNO ciklus ($>1.5 m_{\text{Nap}}$)

Slide 50

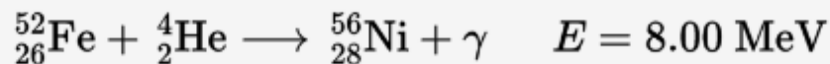
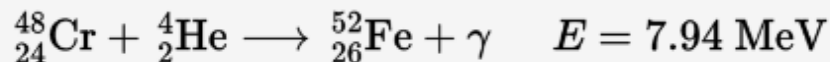
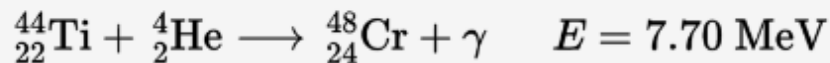
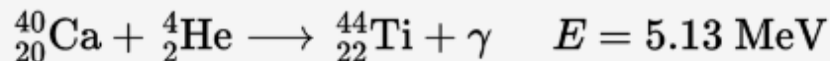
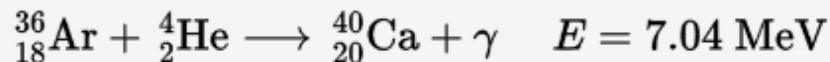
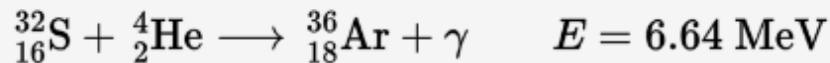
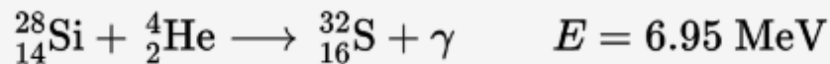
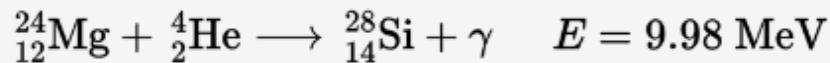
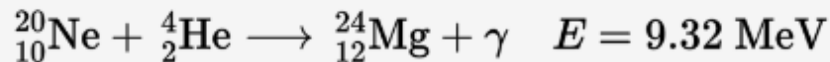
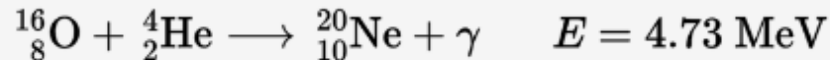
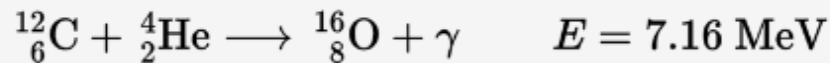


Nukleoszintézis: 3-alfa folyamat

10^8 K fölött, gyors fúzió



Nukleoszintézis: alfa-létra

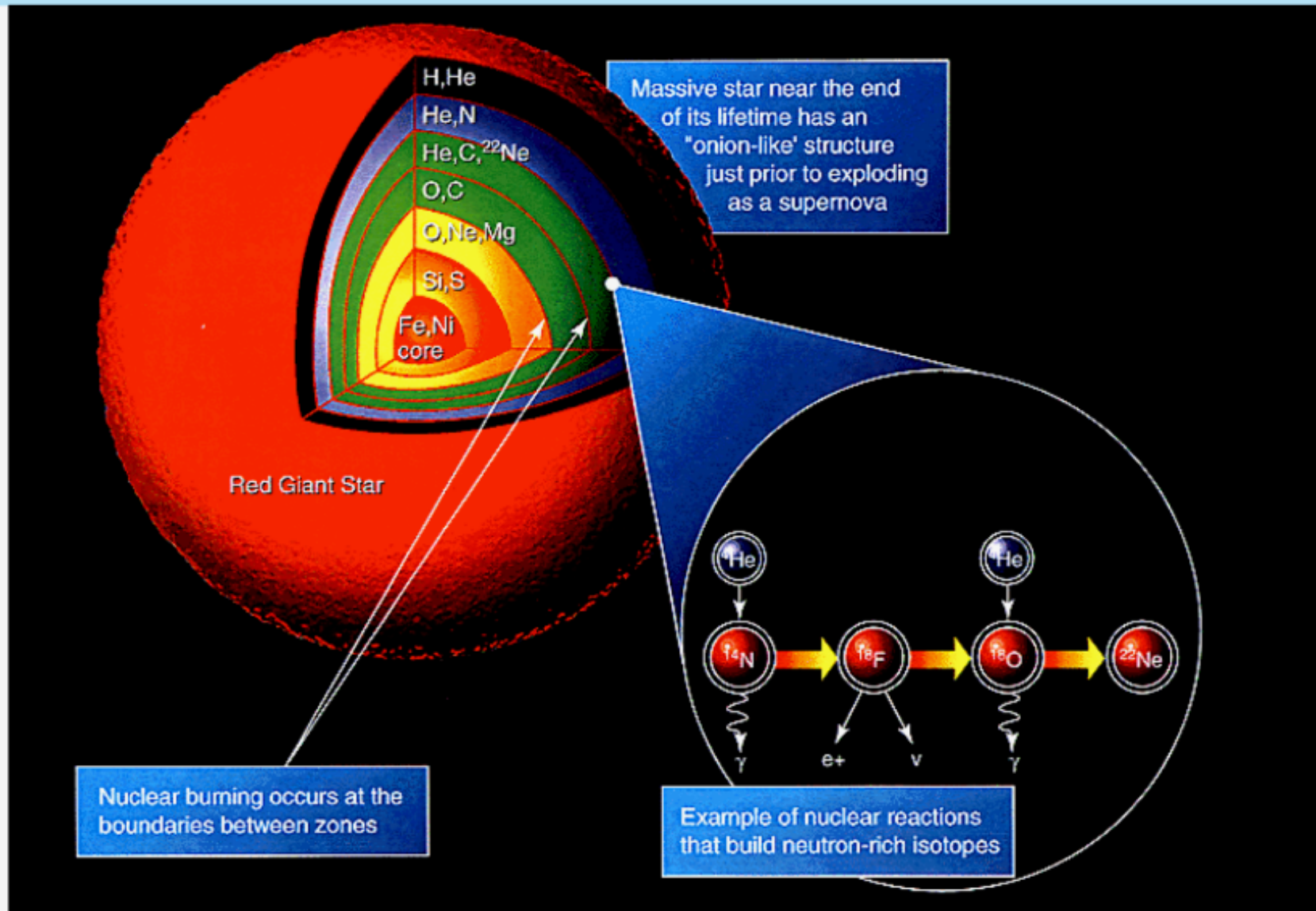


Fúziós folyamatok
nehezebb elemekkel:

C+C

O+O

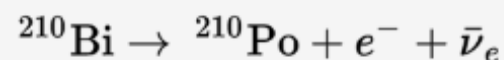
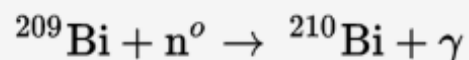
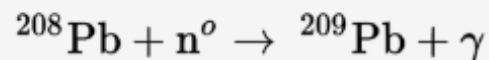
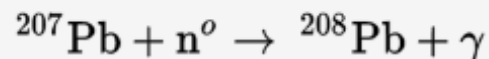
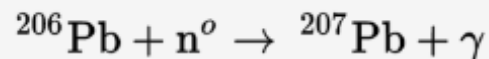
Nukleoszintézis



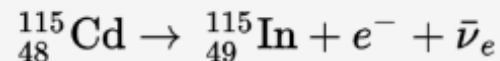
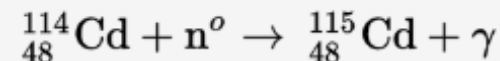
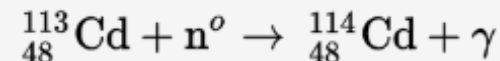
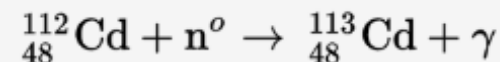
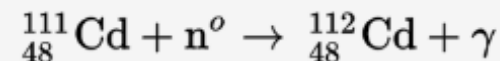
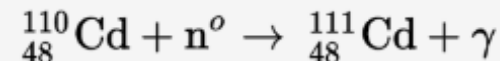
Nukleoszintézis: neutronbefogás

- A magas hőmérsékleten egymásnak ütköző atommagok neutronokat bocsátanak ki, 10^{10} K fokon a vas disszociálni kezd: ${}^{56}\text{Fe} \rightarrow 13 \text{ He} + 4 \text{ n}^0$
- A neutronok akadálytalanul fogódnak meg a megmaradt vas atommagokba
- A magok neutrontöbblete miatt negatív béta-bomlások játszódnak le
→ vason túli elemek kialakulása

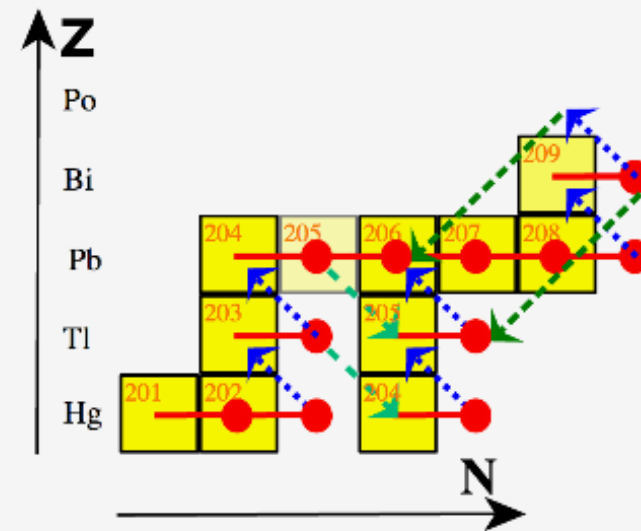
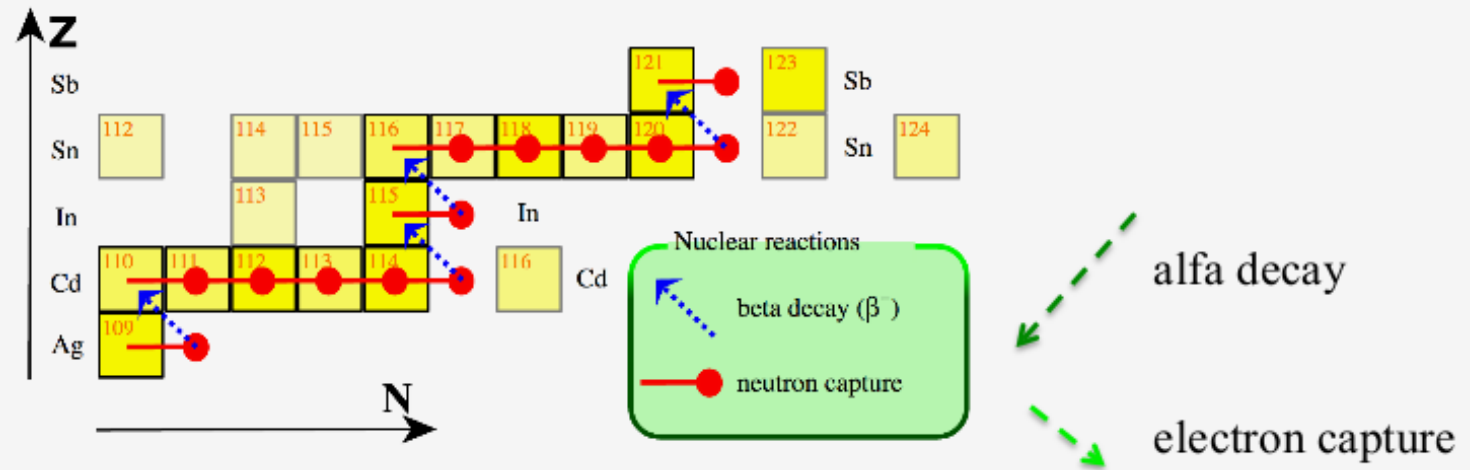
s-folyamat (“slow”)



r-folyamat (gyors neutron elnyelés)



Nukleoszintézis: s-folyamat



Házi feladatok

- 1) Az alumínium atommag akkor stabil, ha 14 neutront tartalmaz. A FEKF Coulomb-tagjának együtthatója $a_c=700$ keV. Legalább hány MeV az aszimmetria-tag a_A együtthatója?
- 2) Kis magok fúziójából energiát (és nagyobb magot) nyerünk. Nagy magok hasadásából is energiát (és kisebb magokat) nyerünk. Miért nem lehet örökmozgót csinálni a fúziót és a hasadást sokszor egymás után alkalmazva (ahol állandóan energiát nyernénk)?
- 3) Egy atommag sűrűsége az $1/(1+\exp((r-R)/a))$ függvény szerint változik, ahol r a középpontjától mért távolság, $R=5\text{fm}$, $a=1\text{fm}$. Mennyi az ekvivalens magsugara?
- 4) Egy ^{197}Au atommagot alfa-részecskékkel bombázunk. Mekkora az alfa-részecskék sebessége a fénysebességhez képest, ha $\theta=60$ fokos szögnél tapasztalunk anomális Rutherford-szórást? (Használjuk a magok sugarára megtanult képletet!)
- 5) Egy ^{57}Fe atommag első gerjesztett állapotának elektromos kvadrupólmomentuma 0.2 barn. Hány elektronvolttal fog felhasadni a mag energiaszintje, ha mellé helyezünk egy elektront, tőle Bohr-sugárnyi távolságra? Legalább nagyságrendi becslést adjunk.