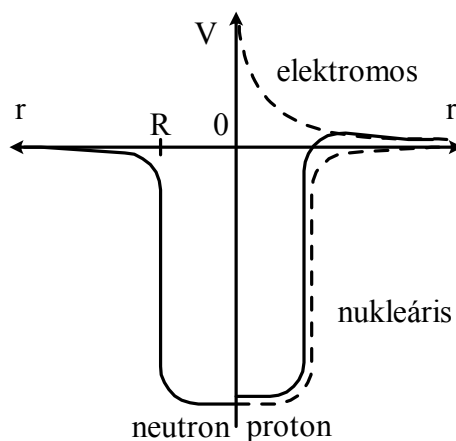
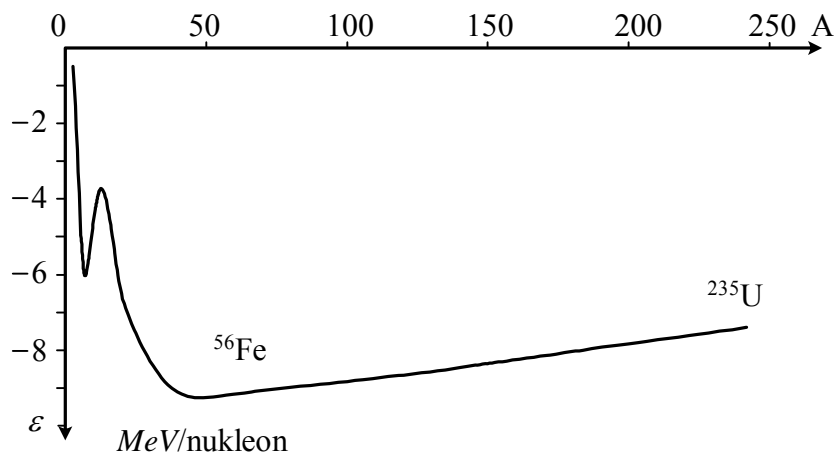


- **Nukleáris kölcsönhatás:**
- az atommagban Z számú proton, és $N = A - Z$ számú neutron van, és stabil képződmény
- ***Mi tartja össze az atommagot?***
- A Heisenberg-féle határozatlansági reláció alapján egy nukleon becült kinetikus energiája
- $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$ ha $\Delta x \approx R \approx 10^{-15} \text{ m} \rightarrow \Delta p_x \approx p_x \approx 10^{-20} \frac{\text{kgm}}{\text{s}}$, $T = \frac{p^2}{2m_p} \geq 5 \text{ MeV}$,
- kötött állapot energiája $E = T + V < 0$, így $V < -T = -5 \text{ MeV}$
- Az atommagon belüli kölcsönhatáshoz tehát igen mély potenciális energia társul. A kölcsönhatás nem elektromos, és nem gravitációs jellegű.
- A nukleonok (protonok és neutronok) közötti kölcsönhatás ún. ***erős kölcsönhatás vagy nukleáris kölcsönhatás.***
- Törvényszerűségeinek vizsgálata során gyors neutronok vagy protonok nyalábjával cseppfolyós hidrogént bombáztak: $p - p$, $p - n$ reakciók tanulmányozhatóak voltak.
 - a nukleáris kölcsönhatás (magerő) ***töltés független***; a proton – proton, proton – neutron, és a neutron – neutron kölcsönhatás egyforma,
 - ***vonzó*** kölcsönhatás, azaz a potenciális energia negatív,
 - ***rövid hatótávolságú***, $1,4 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ távolságon kívül megszűnik (telítésbe megy), csak a szomszédokkal van kölcsönhatása egy nukleonnak,
 - ***igen erős*** a kölcsönhatás, ~ 100 -szorosa az ilyen távolságon ébredő elektromos kölcsönhatásnak
- Az egyes nukleonok a többi nukleon által létrehozott potenciálgödörben mozognak, ebben a kvantummechanikának megfelelően a protonok és a neutronok csak diszkrét energiával rendelkezhetnek, s ezeket a Pauli-elvnek megfelelően párosával tölthetik be.



- ***Tömegdefektus és kötési energia:***
- $M(A, Z)$ az A tömegszámú és Z rendszámú atommag tömege (tömeg spektrométerrel mérhető)

- $\Delta m = M(A, Z) - Z \cdot m_p - (A - Z)m_n < 0$
- A mérések szerint az alkotórészek tömege nagyobb, mint a kész atommag tömege. Δm jelöli a tömegdefektust vagy tömeghiányt.
- **Kötési energia:** $E_K = \Delta m \cdot c^2 < 0$
- A kötési energia az az energia, amennyivel az A számú nukleon együttes energiája mélyebb az egyensúlyi állapotú atommagban, mint egymástól távol.
- $|E_K|$ energia kell az atommag felbontásához, mivel $M(A, Z) \rightarrow$ mérhető $\rightarrow E_K$ számolható
 $\rightarrow \varepsilon = \frac{E_K}{A}$ az egy nukleonra jutó kötési energia meghatározható



- az egy nukleonra jutó kötési energia ε értéke átlagosan $-8 \text{ MeV} / \text{nukleon}$
 - ha A kicsi, akkor még ugrál a görbe, majd nagy A -ra kisimul
 - az energiavölgy minimuma a vasnál van: $Z = 26, A = 56$
- Mint ismeretes, Hofstadter mérései szerint az atommagok sugara: $R = R_0 \cdot A^{\frac{1}{3}}$ ahol $R_0 = 1,4 - 1,5 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
 - $V = \frac{4R^3\pi}{3} = \frac{4R_0^3 \cdot A \cdot \pi}{3}$, tehát $\frac{A}{V} = \frac{3}{4R_0^3\pi} = \text{állandó}$
 - A nukleonsűrűség állandó, vagyis a nagyobb magok ugyanolyan sűrűek mint a kisebbek.
 - **Weizsäcker töltött folyadékcsepp modellje:**
 - a kötési energiára vonatkozó félempirikus képlet:

$$E_K = -\alpha A + \beta A^{\frac{2}{3}} + \gamma \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} + \delta \frac{\left(\frac{A}{2} - Z\right)^2}{A} + \eta A^{-\frac{3}{4}}$$

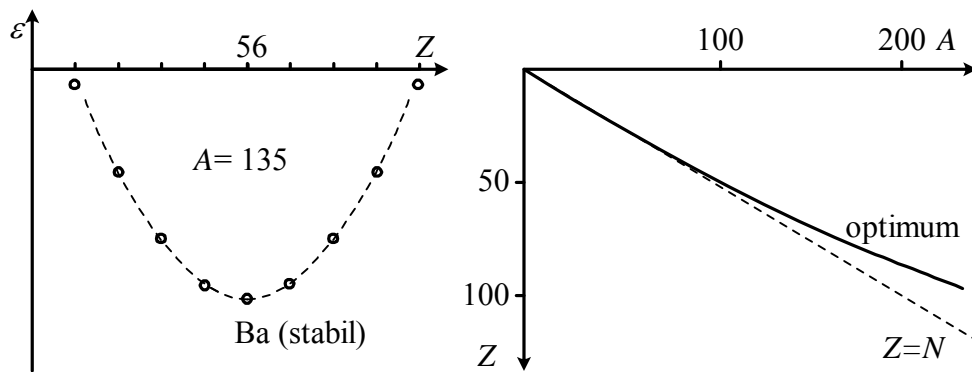
- Az egyes tagok sorrendben: térfogati energia, felületi energia, Coulomb energia, Pauli vagy aszimmetria energia, párenergia
- **térfogati energia:** nagyobb atommagokban egy-egy nukleon csak a szomszédokkal hat kölcsön, így kb. mindnek egyforma a kölcsönhatási energiája $E_{\text{térfogati}} = -\alpha A$
- **felületi energia:** a felületre szorult nukleonok hatásgömbje nem teljes, $E_{\text{felületi}} \sim \text{felszín} \sim R^2 = R_0^2 A^{\frac{2}{3}}$, így $E_{\text{felületi}} = \beta \cdot A^{\frac{2}{3}}$
- **Coulomb energia:** az elektromos kölcsönhatás hosszú hatótávolságú, minden proton taszítja az összes többi protont a magban, $E_{\text{Coulomb}} \sim \frac{Z \cdot (Z-1)}{R} \approx \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}}$ $E_{\text{Coulomb}} = \gamma \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}}$
- **Pauli energia:** a Pauli elvnek megfelelően mind a protonok, mind a neutronok párosával töltik be az energiaszinteket. Energetikailag legkedvezőbb, ha egyszerre töltődik a két potenciál gödör. A neutronok és protonok számának eltérése többletenergiával jár.

$$E_{\text{Pauli}} = \delta \frac{\left(\frac{A}{2} - Z\right)^2}{A}$$

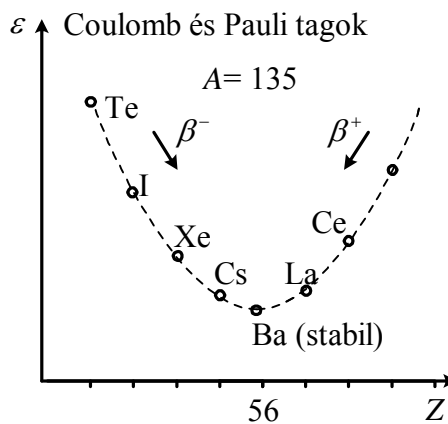
$$- \text{Párenergia: } E_{\text{Páren.}} = \eta A^{\frac{3}{4}}$$

	neutronszám	protonszám
$\eta = \eta $	páratlan	páratlan
$\eta = 0$	páros	páratlan
$\eta = - \eta $	páros	páros

- mélyebb a kölcsönhatási energia, ha minden nukleonnak van azonos párja
- A félempirikus képletben szereplő $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta$ együtthatók, a kísérleti adatokból illesztéssel meghatározhatók.
- $\varepsilon = \frac{E_K}{A}$, az egy nukleon kötési energiája előállítható
- A tapasztalat szerint:
 - közepes és nagy atommagokra jó a cseppmodell
 - mágikus nukleonszám esetén rossz 2, 8, 20, 50, 82, 126
 - az utolsó tag miatt: páros-páros kb. 150 stabil mag, páros-páratlan kb. 50-50 db, páratlan-páratlan kb. 4 db.
- Az egy nukleonra jutó kötési energia állandó tömegszám esetén a Z rendszám függvényében, parabola. Minden A -hoz található egy optimális Z , ahol a kötési energia a legmélyebb.
 - kis magoknál a legmélyebb az egy nukleonra jutó kötési energia, ha $Z = N$
 - nagy magoknál kedvezőbb, ha több a neutron, mint a proton

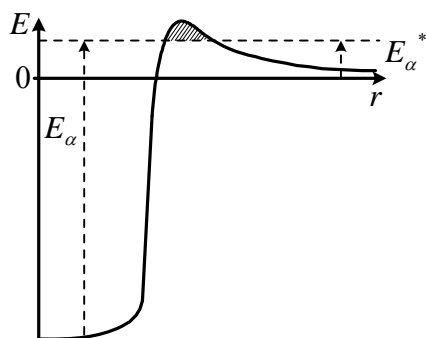


- Csak a Coulomb és a Pauli tagok függenek a rendszámtól, így ezeket ábrázolva $A =$ állandó esetén:
- Pl.: $A = 135$ esetén a $Z = 56$ -os bárium található a minimum helyen, ez a legstabilabb elem. A körülötte található radioaktív elemek β^- vagy β^+ bomlással igyekeznek stabilabb állapot a jutni.

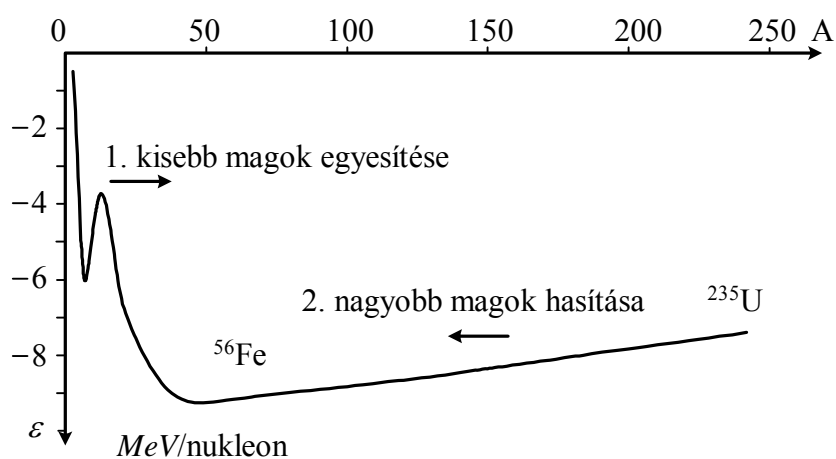


- **β^- -bomlás:**
- ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + e^- + \tilde{\nu}$, ekkor $n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}$
- mivel a β^- -bomlás során kirepülő elektron energia eloszlása a mérések szerint folytonos görbe, az értelmezéshez Pauli 1931-ben feltételezte egy kicsi (talán zérus tömegű) töltés nélküli részecske megjelenését: (antineutrínó)
- **β^+ -bomlás:**
- ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + e^+ + \nu$, ekkor $p \rightarrow n + e^+ + \nu$
- **elektronbefogás:**
- ${}^A_Z X + e^- \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + \nu$ ekkor $p + e^- \rightarrow n + \nu$
- Az elektronbefogás a β^+ -bomláshoz hasonlóan a relatív protontöbbséggel rendelkező magokra jellemző. Ilyenkor a legnagyobb energiájú proton, az elektronburokból (leggyakrabban a K-héjról) befog egy elektront.

- Az α -bomlás értelmezése:



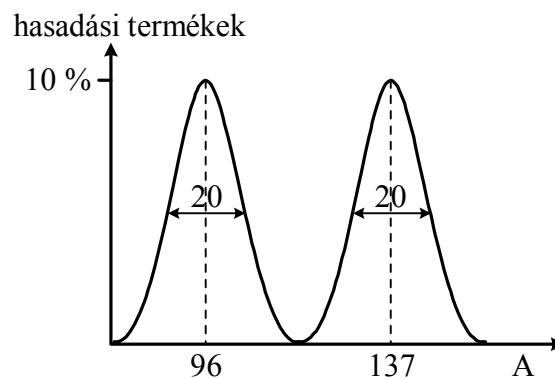
- α -részecske energiája a magban E_α , klasszikus megfontolás szerint nem elegendő a kilépéshez
- A Coulomb-gáton **alagúteffektussal** jut át a részecske, és véges valószínűséggel megtalálható a magon kívül is. A magon kívül az α -részecske energiája E_α^* . Az alagúteffektus valószínűsége annál nagyobb minél kisebb a bevonalkázott terület.
- ha E_α nagy $T_{1/2}$ kicsi
 - $E_\alpha \sim 4\text{MeV}$ $T_{1/2} = 10^9$ év (urán)
 - $E_\alpha \sim 9\text{MeV}$ $T_{1/2} = 10^{-8}$ s
- **Kérdés: van-e lehetőség a nukleáris energia felszabadítására?**
- A nukleáris energia felszabadítása olyan magátalakulással lehetséges, melynek során a fajlagos kötési energia tovább csökken.



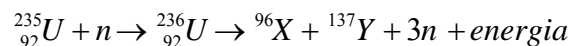
1. kisebb magok egyesítése (fúzió)
2. nagyobb magok hasítása (fisszió)

– **Maghasadás**

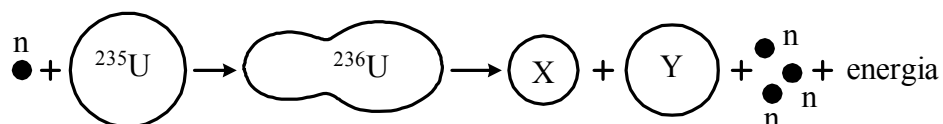
- A neutron felfedezése után számos kísérletben neutronnal bombáztak különböző elemeket.
- Egy ilyen kísérlet során Hahn és Strassmann (1937) az urán neutronnal történő besugárzása után igen nagy radioaktivitást tapasztalt. A reakció után pedig közepes tömegszámú magokat detektált!
- Néhány tipikus reakció:
- ${}_{92}^{235}\text{U} + n \rightarrow {}_{92}^{236}\text{U} \rightarrow {}_{56}^{139}\text{Ba} + {}_{36}^{94}\text{Kr} + 3n + \text{energia}$
- ${}_{92}^{235}\text{U} + n \rightarrow {}_{92}^{236}\text{U} \rightarrow {}_{55}^{137}\text{Cs} + {}_{37}^{96}\text{Rb} + 3n + \text{energia}$
- ${}_{92}^{235}\text{U} + n \rightarrow {}_{92}^{236}\text{U} \rightarrow {}_{54}^{144}\text{Xe} + {}_{38}^{90}\text{Sr} + 2n + \text{energia}$
- Azt a jelenséget, amely során a **nagy tömegszámú atommag két közepes tömegszámú atommaggá és néhány neutronná hasad fel energia felszabadulás mellett, maghasadásnak nevezzük.**
- A hasadási termékek tömegszám szerinti %-os eloszlása látható az ábrán:



- Egy általános reakció képlete:

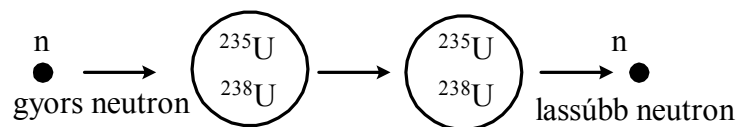


- A reakció során két lényegesen eltérő tömegszámú hasadvány születik, átlagosan $\bar{n} \cong 2,5$ neutron jelenik meg bomlásonként, és kb. 200 MeV energia szabadul fel, ami döntően a hasadási termékek kinetikus energiájaként jelenik meg:
- A hasadás mechanizmusa:

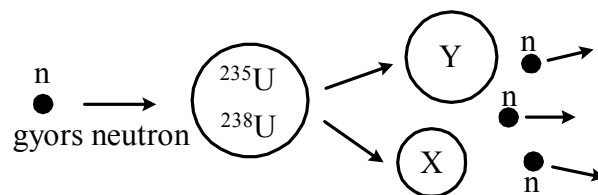


- a neutron a nukleáris kölcsönhatás segítségével átadja energiáját az atommagnak, a magregzés olyan nagy lehet, hogy a mag befűződik és kettéhasad

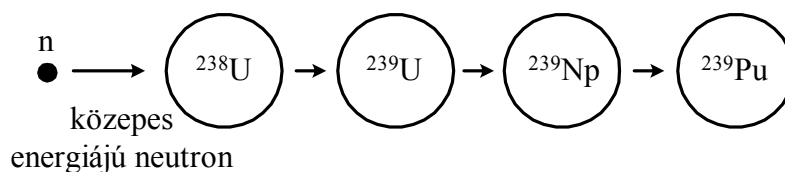
- ^{235}U lassú neutronok is hasítják
- ^{238}U csak gyors neutronok hasítják
- A hasadványok igen radioaktívak! A neutron fölöslegük miatt β^- aktívak, és igen veszélyesek. (A β^- -bomlásokat γ -bomlás követi.)
- **Láncreakció (Szilárd Leó, 1933)**
- A neutron által kiváltott maghasadás során 2-3 neutron keletkezik, s ezek a neutronok további hasadásokat idézhetnek elő, az így létrejövő folyamatot **magfizikai láncreakciónak** nevezik.
- Ha az n -számú hasadás során keletkező $\sim 2,5 n$ számú neutron közül átlagosan n' számú idéz elő újabb hasadást, akkor a $k = \frac{n'}{n}$ hányadost **sokszorozási tényezőnek** nevezzük.
- A láncreakció önfenntartó, ha a sokszorozási tényező 1 vagy annál nagyobb $k \geq 1$.
 - Ha $k < 1$ szubkritikus a reakció,
 - ha $k = 1$ kritikus,
 - ha $k > 1$ superkritikus reakcióról beszélünk.
- Tekintsünk egy ^{235}U - és ^{238}U -magokat tartalmazó fémtömböt. Kövessük nyomon egy atommag felhasadása során keletkező nagy energiájú (pJ) neutronokat:



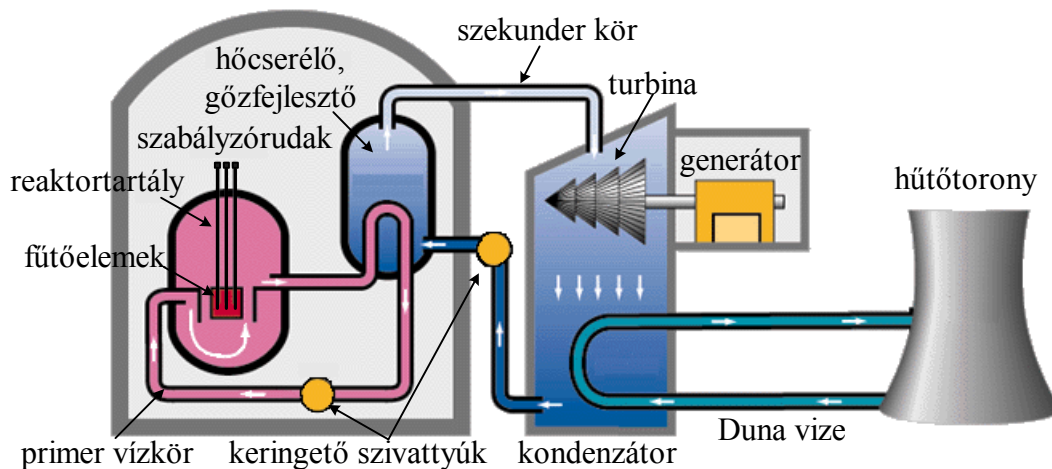
- leggyakrabban a neutron csak energiát veszít az ütközés során,



- a gyorsneutron ritkán okoz hasadást (gyorshasítás)



- víz H₂O: lassít és el is nyel
- természetes uránt használva víz moderátorral $k < 1$, nem önfenntartó a reakció
- **ha feldúsítjuk a ²³⁵U-izotópot a természetes uránban, akkor víz moderátorral is elérhető a $k > 1$ sokszorozási tényező, s ezáltal a reakció önfenntartóvá válik**
- **Atomerőmű:** Az atomerőmű reaktorában nagy nukleonszámú mag hasad. A hasadáskor felszabaduló energiával vizet melegítenek, gőzzé alakítják, ezzel turbinát hajtanak és a Lorentz-erő révén elektromos energiát termelnek.
- Megjegyzés: hasadásonként 0,02 késő neutron születik, amit az egyik hasadási termék emittál. Ezeket felhasználva állítják be $k = 1$ -re a reaktor állapotát.
- **A paksi atomerőmű:**
 - 1982-től üzemel,
 - üzemanyaga 2,5 %-ra dúsított ²³⁵U-t tartalmazó uránoxid,
 - típusa nyomott vizes reaktor PWR (pressurized water reactor),
 - a négy blokk teljesítménye 4 x 440 MW = 1760 MW, az országos felhasználás 43 %-a
- A **nyomott vizes reaktor** elvi felépítése látható az ábrán: a primer és szekunder kör egyaránt zárt, a szekunderkört a Dunából kivett vízzel hűtik



- a henger alakú, vastag falú reaktortartály 18 m magas, átmérője 3 m, benne a víznyomás $125 \cdot 10^5$ Pa, vízhőmérséklet 305 °C. **A víz mint moderátor biztosítja a láncreakció folytonosságát, hűti az uránt tartalmazó csöveket, fűti a hőcserélőben a szekunder kör vizét.**
- Ez a reaktortípus **részben önszabályzó**, ha megszalad a láncreakció → víz felforr → csökken a moderálás → lassul a láncreakció.
- A reaktorok szabályozását neutronelnyelő anyagokkal oldják meg, ilyenek a **vízben oldott bórsav, kadmium rudak** a fűtőelemek között.

- A reaktor indításakor sok bórsav van oldva a vízben, és a Cd rudak be vannak tolvva. Ezután kezdődik a bórsav hígítása, illetve a Cd rudak kihúzása, és $k = 1,001$ -re beállítva, futtatják fel a teljesítményt.
- A megfelelő teljesítményt elérve Cd rudak segítségével $k = 1,000$ kritikus állapotot állítanak be.
- **Magfúzió:**
- A könnyű magok egyesítése során szintén mélyül a kölcsönhatási energia. Az átalakulás energia felszabadulással jár.
- A Napban zajló hidrogénciklus során 4 protonból egy He mag jön létre.
- ${}^1\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu + 0,42\text{MeV}$, (ritka)
- ${}^2\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma + 5,5\text{eV}$
- ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2 \cdot {}^1\text{H} + 12,8\text{MeV}$
- Ezekben a folyamatokban az atommagoknak egészen a nukleáris hatótávolságig kell egymást megközelíteniük:
 - töltött részecskék esetén részecskegyorsítóval, felgyorsítják és ütköztetik az atommagokat
 - elegendően magas hőmérséklet esetén szintén létrehozható magfúzió (50 millió Kelvin)
- 1954 USA, termonukleáris láncreakció: ${}^{235}\text{U}$ bombát robbantottak ${}^2\text{H}$ és ${}^3\text{H}$ -val töltött kádban
- a reakció irányíthatatlan és pillanatszerű
- A hidrogénbombát az oroszok valósították meg először ${}^{235}\text{U}$ -bombát robbantottak, ez szolgáltatta a megfelelő hőmérsékletet és a kezdeti neutronokat:
- $n + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{H} + \text{energia}$
- ${}^3\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + n + \text{energia}$
- Fényköpennyel lassítják a szétrepülést, hogy nagy tartományra terjedjen ki a fúzió.
- ***Az irányított fúzió megvalósítását állandóan kutatják!***