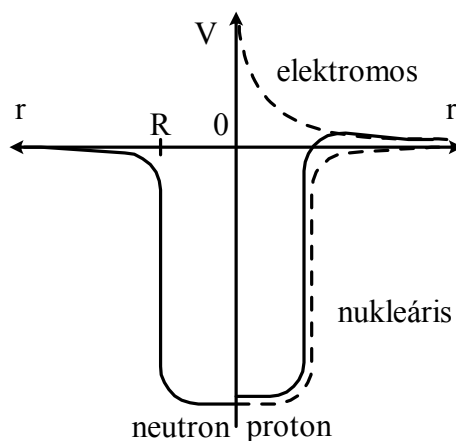
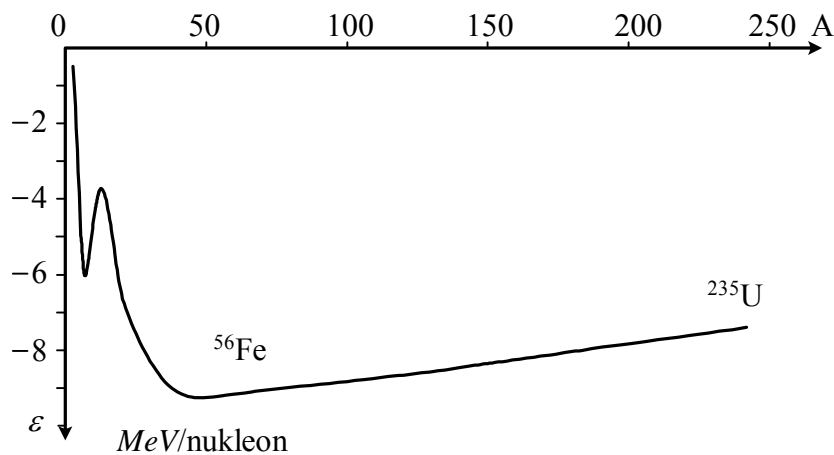


- **Nukleáris kölcsönhatás:**
- az atommagban Z számú proton, és $N = A - Z$ számú neutron van, és stabil képződmény
- ***Mi tartja össze az atommagot?***
- A Heisenberg-féle határozatlansági reláció alapján egy nukleon becült kinetikus energiája
- $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$ ha $\Delta x \approx R \approx 10^{-15} \text{ m} \rightarrow \Delta p_x \approx p_x \approx 10^{-20} \frac{\text{kgm}}{\text{s}}, T = \frac{p^2}{2m_p} \geq 5 \text{ MeV},$
- 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.

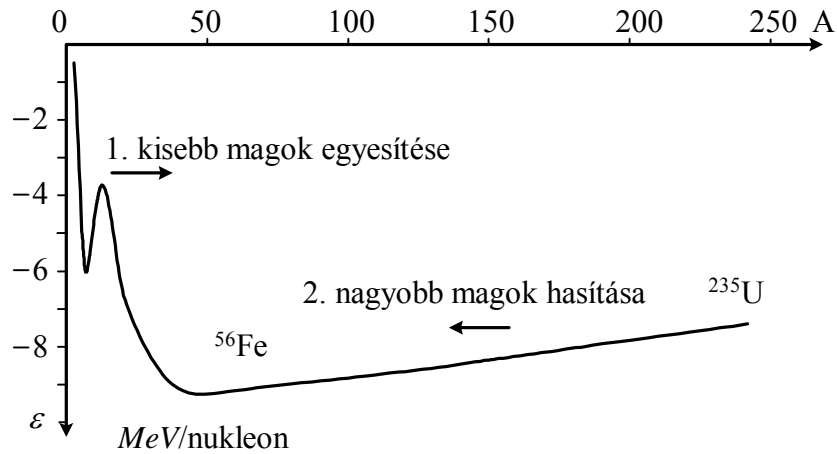


- ***Tömegdefektus és kötési energia:***
- $M(A, Z)$ az A tömegszámú és Z rendszámú atommag tömege (tömeg spektrométerrel mérhető)

- $\Delta m = M(A, Z) - Z \cdot m_p - (A - Z)m_n < 0$
- 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



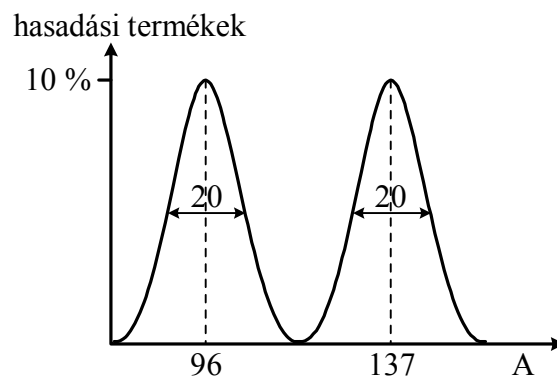
- az egy nukleonra jutó kötési energia ε értéke átlagosan $-8\text{MeV} / \text{nukleon}$
 - ha A kicsi, akkor még ugrál a görbe, majd nagy A -ra kisimul
 - az energiavölgy minimuma a vasnál van: $Z = 26, A = 56$
- **Kérdés: van-e lehetőség a nukleáris energia felszabadítására?**
 - A nukleáris energia felszabadítása olyan magátalakulással lehetséges, melynek során a fajlagos kötési energia tovább csökken.



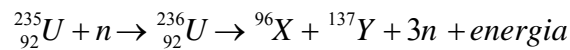
1. kisebb magok egyesítése (fúzió)
2. nagyobb magok hasítása (fisszió)

– **Maghasadás**

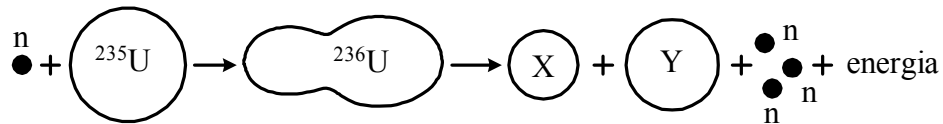
- A neutron felfedezése után számos kísérletben neutronnal bombáztak különböző elemeket.
- Egy ilyen kísérlet során Hahn és Strassmann (1937) az urán neutronnal történő besugárzása után igen nagy radioaktivitást tapasztalt. A reakció után pedig közepes tömegszámú magokat detektált!
- Néhány tipikus reakció:
- ${}_{92}^{235}\text{U} + n \rightarrow {}_{92}^{236}\text{U} \rightarrow {}_{56}^{139}\text{Ba} + {}_{36}^{94}\text{Kr} + 3n + \text{energia}$
- ${}_{92}^{235}\text{U} + n \rightarrow {}_{92}^{236}\text{U} \rightarrow {}_{55}^{137}\text{Cs} + {}_{37}^{96}\text{Rb} + 3n + \text{energia}$
- ${}_{92}^{235}\text{U} + n \rightarrow {}_{92}^{236}\text{U} \rightarrow {}_{54}^{144}\text{Xe} + {}_{38}^{90}\text{Sr} + 2n + \text{energia}$
- 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:



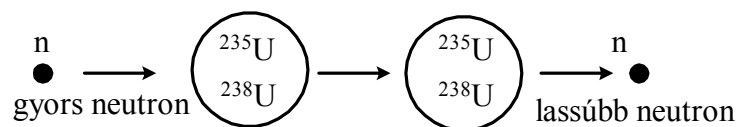
- Egy általános reakció képlete:



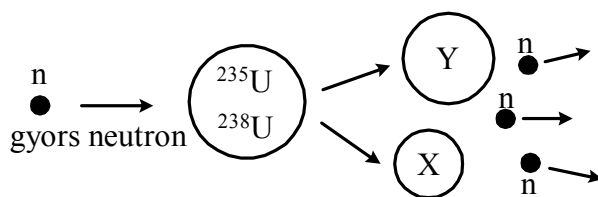
- A reakció során két lényegesen eltérő tömegszámú hasadvány születik, átlagosan $\bar{n} \cong 2,5$ neutron jelenik meg bomlásonként, és kb. 200 MeV energia szabadul fel, ami döntően a hasadási termékek kinetikus energiájaként jelenik meg:
- A hasadás mechanizmusa:



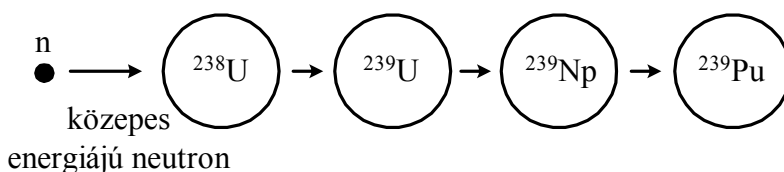
- a neutron a nukleáris kölcsönhatás segítségével átadja energiáját az atommagnak, a magregrzés olyan nagy lehet, hogy a mag befűződik és kettéhasad
- ${}^{235}\text{U}$ lassú neutronok is hasítják
- ${}^{238}\text{U}$ csak gyors neutronok hasítják
- A hasadványok igen radioaktívak! A neutron fölöslegük 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 ${}^{235}\text{U}$ - és ${}^{238}\text{U}$ -magokat tartalmazó fémtömböt. Kövessük nyomon egy atommag felhasadása során keletkező nagy energiájú (pJ) neutronokat:



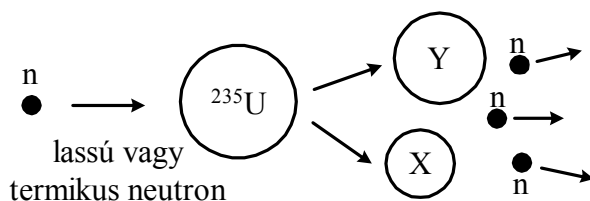
- leggyakrabban a neutron csak energiát veszít az ütközés során,



- a gyorsneutron ritkán okoz hasadást (gyorshasítás)



- a közepes energiájú neutronokat a ^{238}U -mag szívesen elnyeli, rezonancia befogás



- az ^{235}U -mag termikus neutron befogásakor általában elhasad az ^{238}U -mag termikus neutron befogásakor általában csak egy γ foton bocsát ki.
- a neutronok **mozgási energiája:**
 - gyors neutron néhány pJ
 - közepes energiájú $\sim 0,01$ pJ
 - lassú vagy termikus neutron $\sim 0,004$ aJ – $0,01$ aJ

- a fenti folyamatok bármelyike kb. 10^{-5} s alatt befejeződik

- **1. tiszta ^{238}U tömb:**

Mivel a gyors neutronok ritkán hasítanak, és a rezonanciabefogás neutronvesztés, így tiszta ^{238}U tömbben láncreakció nem indul meg!

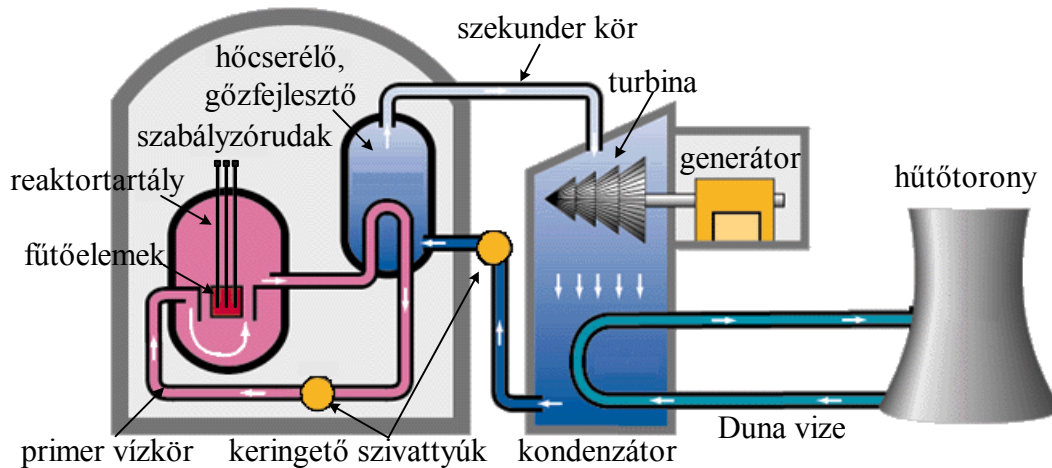
- **2. tiszta ^{235}U tömb:**

A gyorsneutronok ritkán hasítanak, ütközések révén lelassulnak, a termikus neutronok pedig hasítják az ^{235}U -magot. Ha a neutronvesztés (pl. kirepül a neutron a tömbből) kicsi, akkor folyamatos láncreakció valósul meg. 10 cm-nél nagyobb átmérő esetén teljesül, hogy $k > 1$.

- **3. természetes urántömb: 0,7 % ^{235}U és 99,3 % ^{238}U :**

A sok ^{238}U -mag rezonancia befogással akkora neutronvesztést okoz, hogy akármilyen nagy méret esetén sem indul be a láncreakció, azaz $k < 1$. Ezért nem égetek ki a természetes uránlelőhelyek.

- A megoldás **Szilárd Leó, és Enrico Fermi** (1942) nevéhez fűződik.
- A természetes urántömbből a neutronokat kivezetve, az ^{238}U -mag nem tudja azokat rezonancia befogással elnyelni. A környező grafit (moderátor) lelassítja a neutronokat. A termikus neutronok az urántömbbe visszajutva hasítják a ^{235}U -magokat.
- A felszabaduló energiát hűtőközeg segítségével elvonva, gőzfejlesztés után turbina segítségével, áram fejleszhető. Az első reaktor 200 W teljesítményű volt.
- A **moderátor vagy lassító közeg** szerepe az, hogy a keletkező neutronok közül minél több váljék termikus neutronná!
- Moderátor anyagok:
 - grafit ^{12}C : lassít, de nem nyel el
 - nehézvíz: $^2\text{H}_2\text{O}$, költséges
 - víz H_2O : lassít és el is nyel
- természetes uránt használva víz moderátorral $k < 1$, nem önfenntartó a reakció
- **ha feldúsítjuk a ^{235}U -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 ^{235}U -t tartalmazó uránoxid,
 - típusa nyomott vizes reaktor PWR (pressurized water reactor),
 - a négy blokk teljesítménye $4 \times 440 \text{ MW} = 1760 \text{ MW}$, 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 $305 \text{ }^\circ\text{C}$. *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 \rightarrow víz felforr \rightarrow csökken a moderálás \rightarrow 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 tolva. 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}U bombát robbantottak ^2H és ^3H -val töltött kádban
- a reakció irányíthatatlan és pillanatszerű
- A hidrogénbombát az oroszok valósították meg először ^{235}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!***