



SZÉCHENYI ISTVÁN
EGYETEM
GYŐR

Bevezetés a magfizikába

Berta Miklós
SZE, Fizika és Kémia Tsz.

2006. november 19.

Magyarország célba ér



Készült a HEFOP 3.3.1-P.-2004-09-0102/1.0 pályázat támogatásával



Bevezetés

- Bevezetés
- Kötési energia
- Magmodellek
- Magpotenciál

Természetes
radioaktivitás

Energiatermelés a
nukleáris energia
felszabadításával

Bevezetés



Bevezetés

Bevezetés

- **Bevezetés**

- Kötési energia
- Magmodellek
- Magpotenciál

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

Rutherford - kísérlet $\implies$ **ATOMMAG**



Bevezetés

Bevezetés

- Bevezetés

- Kötési energia

- Magmodellek

- Magpotenciál

Természetes
radioaktivitás

Energiatermelés a
nukleáris energia
felszabadításával

Rutherford - kísérlet $\implies$ **ATOMMAG**

Az atommagok méretének nagyságrendje $\sim 10^{-15}$ m



Bevezetés

- **Bevezetés**

- Kötési energia
- Magmodellek
- Magpotenciál

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

Bevezetés

Rutherford - kísérlet $\implies$ **ATOMMAG**

Az atommagok méretének nagyságrendje $\sim 10^{-15}$ m

ATOMMAG = Z db proton + N db neutron

proton – pozitív töltésű részecske

neutron – semleges részecske



Bevezetés

- **Bevezetés**

- Kötési energia
- Magmodellek
- Magpotenciál

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

Bevezetés

Rutherford - kísérlet $\implies$ **ATOMMAG**

Az atommagok méretének nagyságrendje $\sim 10^{-15}$ m

ATOMMAG = Z db proton + N db neutron

proton – pozitív töltésű részecske

neutron – semleges részecske

Mi tartja össze az atommagot, ha a protonok taszítják egymást?



Bevezetés

- **Bevezetés**

- Kötési energia

- Magmodellek

- Magpotenciál

Természetes
radioaktivitás

Energiatermelés a
nukleáris energia
felszabadításával

Bevezetés

Rutherford - kísérlet $\implies$ **ATOMMAG**

Az atommagok méretének nagyságrendje $\sim 10^{-15}$ m

ATOMMAG = Z db proton + N db neutron

proton – pozitív töltésű részecske

neutron – semleges részecske

Mi tartja össze az atommagot, ha a protonok taszítják egymást?

Nukleáris kölcsönhatás – MAGERŐK



Bevezetés

- **Bevezetés**

- Kötési energia

- Magmodellek

- Magpotenciál

Természetes
radioaktivitás

Energiatermelés a
nukleáris energia
felszabadításával

Bevezetés

Rutherford - kísérlet $\implies$ **ATOMMAG**

Az atommagok méretének nagyságrendje $\sim 10^{-15}$ m

ATOMMAG = Z db proton + N db neutron

proton – pozitív töltésű részecske

neutron – semleges részecske

Mi tartja össze az atommagot, ha a protonok taszítják egymást?

Nukleáris kölcsönhatás – MAGERŐK

Magerők tulajdonságai:

- töltésfüggetlenség
- rövid hatótávolság $\sim 10^{-15}$ m



Bevezetés

● Bevezetés

- Kötési energia
- Magmodellek
- Magpotenciál

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

Bevezetés

Rutherford - kísérlet $\implies$ **ATOMMAG**

Az atommagok méretének nagyságrendje $\sim 10^{-15}$ m

ATOMMAG = Z db proton + N db neutron

proton – pozitív töltésű részecske

neutron – semleges részecske

Mi tartja össze az atommagot, ha a protonok taszítják egymást?

Nukleáris kölcsönhatás – MAGERŐK

Magerők tulajdonságai:

- töltésfüggetlenség
- rövid hatótávolság $\sim 10^{-15}$ m

A magerők az elektronokra nem hatnak!



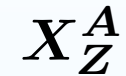
Kötési energia

Bevezetés

- Bevezetés
- **Kötési energia**
- Magmodellek
- Magpotenciál

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a
nukleáris energia
felszabadításával



Z – protonszám

N – neutronszám

$A = Z + N$ – nukleonszámszám



Kötési energia

Bevezetés

- Bevezetés
- **Kötési energia**
- Magmodellek
- Magpotenciál

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

$$X_Z^A$$

Z – protonszám

N – neutronszám

$$A = Z + N - \text{nukleonszámszám}$$

Tömegmérés elektromágneses terekkel $\Rightarrow$ **tömegspektroszkópia**



Kötési energia

Bevezetés

- Bevezetés
- Kötési energia
- Magmodellek
- Magpotenciál

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

$$X_Z^A$$

Z – protonszám

N – neutronszám

$A = Z + N$ – nukleonszámszám

Tömegmérés elektromágneses terekkel $\Rightarrow$ tömegspektroszkópia
TÖMEGHIÁNY

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{mag}$$



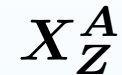
Kötési energia

Bevezetés

- Bevezetés
- Kötési energia
- Magmodellek
- Magpotenciál

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával



Z – protonszám

N – neutronszám

$A = Z + N$ – nukleonszámszám

Tömegmérés elektromágneses terekkel $\Rightarrow$ tömegspektroszkópia
TÖMEGHIÁNY

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{mag}$$

Ha egy kötött rendszert darabjaira szeretnénk bontani úgy, hogy a darabok már egymás erőterén kívülre kerüljenek, ahhoz a rendszerrel energiát kell közölnünk. $\Rightarrow$ kötési energia



Kötési energia

Bevezetés

- Bevezetés
- Kötési energia
- Magmodellek
- Magpotenciál

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

$$X_Z^A$$

Z – protonszám

N – neutronszám

$A = Z + N$ – nukleonszámszám

Tömegmérés elektromágneses terekkel $\Rightarrow$ tömegspektroszkópia
TÖMEGHIÁNY

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{mag}$$

Ha egy kötött rendszert darabjaira szeretnénk bontani úgy, hogy a darabok már egymás erőterén kívülre kerüljenek, ahhoz a rendszerrel energiát kell közölnünk. $\Rightarrow$ kötési energia
A tömeghiánnyal ekvivalens energia a kötési energia:

$$\Delta W = \Delta mc^2$$



Bevezetés

- Bevezetés
- **Kötési energia**
- Magmodellek
- Magpotenciál

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

Az egy nukleonra jutó átlagos kötési energia:

$$\epsilon = \frac{\Delta W}{A}$$



Bevezetés

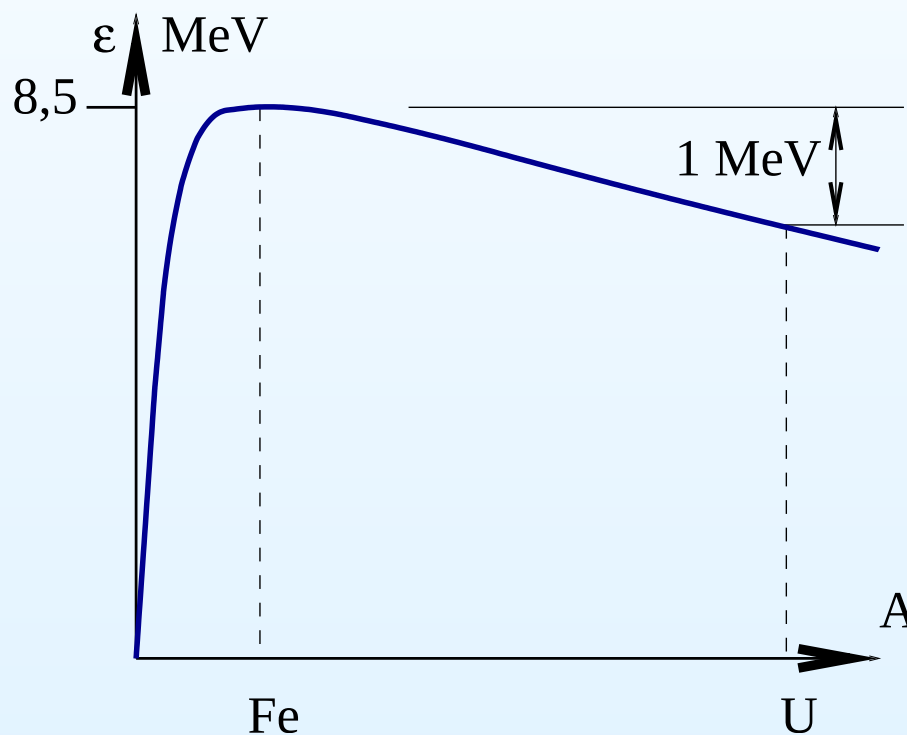
- Bevezetés
- **Kötési energia**
- Magmodellek
- Magpotenciál

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

Az egy nukleonra jutó átlagos kötési energia:

$$\varepsilon = \frac{\Delta W}{A}$$





Bevezetés

- Bevezetés
- Kötési energia
- **Magmodellek**
- Magpotenciál

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a
nukleáris energia
felszabadításával

Magmodellek

Cseppmodell

$$R_{mag} = r_0 A^{1/3}$$

Itt $r_0 = 1,2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$.



Bevezetés

- Bevezetés
- Kötési energia
- **Magmodellek**
- Magpotenciál

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a
nukleáris energia
felszabadításával

Magmodellek

Cseppmodell

$$R_{mag} = r_0 A^{1/3}$$

Itt $r_0 = 1,2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$.

Ennek alapján a mag térfogata:

$$V_{mag} = \frac{4}{3} \pi r_0^3 A$$



Bevezetés

- Bevezetés
- Kötési energia
- **Magmodellek**
- Magpotenciál

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

Magmodellek

Cseppmodell

$$R_{mag} = r_0 A^{1/3}$$

Itt $r_0 = 1,2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$.

Ennek alapján a mag térfogata:

$$V_{mag} = \frac{4}{3} \pi r_0^3 A$$

Mivel $V_{mag} \sim A \implies$ **a maganyag összenyomhatatlan** $\implies$ töltött folyadékcsepphez hasonlít az atommag



Bevezetés

- Bevezetés
- Kötési energia
- **Magmodellek**
- Magpotenciál

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

Magmodellek

Cseppmodell

$$R_{mag} = r_0 A^{1/3}$$

Itt $r_0 = 1,2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$.

Ennek alapján a mag térfogata:

$$V_{mag} = \frac{4}{3} \pi r_0^3 A$$

Mivel $V_{mag} \sim A \implies$ **a maganyag összenyomhatatlan** $\implies$ töltött folyadékcsepphez hasonlít az atommag

Ez a modell jól adja vissza az $\varepsilon(A)$ függvény átlagos viselkedését!



Bevezetés

- Bevezetés
- Kötési energia
- **Magmodellek**
- Magpotenciál

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a
nukleáris energia
felszabadításával

Példa

Határozza meg a maganyag sűrűségét a cseppmodell alapján!



Bevezetés

- Bevezetés
- Kötési energia
- **Magmodellek**
- Magpotenciál

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

Példa

Határozza meg a maganyag sűrűségét a cseppmodell alapján!

Megoldás: A cseppmodell alapján a maganyag sűrűsége állandónak adódik. Számoljuk ki ezt az értéket a szén 12 nukleonszámú nuklidja esetében. Ennek a nuklidnak a tömege $12u$, ahol u az atomi tömegegység.



Bevezetés

- Bevezetés
- Kötési energia
- **Magmodellek**
- Magpotenciál

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

Példa

Határozza meg a maganyag sűrűségét a cseppmodell alapján!

Megoldás: A cseppmodell alapján a maganyag sűrűsége állandónak adódik. Számoljuk ki ezt az értéket a szén 12 nukleonszámú nuklidja esetében. Ennek a nuklidnak a tömege $12u$, ahol u az atomi tömegegység.

Az egy atomi tömegegység a szén 12 nukleont tartalmazó izotópja tömegének $1/12$ része, $1u = 1,66 \cdot 10^{-27}$ kg.



Bevezetés

- Bevezetés
- Kötési energia
- **Magmodellek**
- Magpotenciál

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

Példa

Határozza meg a maganyag sűrűségét a cseppmodell alapján!

Megoldás: A cseppmodell alapján a maganyag sűrűsége állandónak adódik. Számoljuk ki ezt az értéket a szén 12 nukleonszámú nuklidja esetében. Ennek a nuklidnak a tömege $12u$, ahol u az atomi tömegegység.

Az egy atomi tömegegység a szén 12 nukleont tartalmazó izotópja tömegének $1/12$ része, $1u = 1,66 \cdot 10^{-27}$ kg.

Így a maganyag sűrűsége:

$$\rho_{mag} = \frac{m_{mag}}{V_{mag}} = \frac{Au}{\frac{4}{3}\pi r_0^3 A} = \frac{3u}{4\pi r_0^3} = 2,3 \cdot 10^{17} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$



Bevezetés

- Bevezetés
- Kötési energia
- **Magmodellek**
- Magpotenciál

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

Példa

Határozza meg a maganyag sűrűségét a cseppmodell alapján!

Megoldás: A cseppmodell alapján a maganyag sűrűsége állandónak adódik. Számoljuk ki ezt az értéket a szén 12 nukleonszámú nuklidja esetében. Ennek a nuklidnak a tömege $12u$, ahol u az atomi tömegegység.

Az egy atomi tömegegység a szén 12 nukleont tartalmazó izotópja tömegének $1/12$ része, $1u = 1,66 \cdot 10^{-27}$ kg.

Így a maganyag sűrűsége:

$$\rho_{mag} = \frac{m_{mag}}{V_{mag}} = \frac{Au}{\frac{4}{3}\pi r_0^3 A} = \frac{3u}{4\pi r_0^3} = 2,3 \cdot 10^{17} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

A fenti magsűrűség azt jelenti, hogy egy köbmilliméternyi maganyag tömege 230 000 tonna lenne.



Bevezetés

- Bevezetés
- Kötési energia
- **Magmodellek**
- Magpotenciál

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

Példa

Határozza meg a maganyag sűrűségét a cseppmodell alapján!

Megoldás: A cseppmodell alapján a maganyag sűrűsége állandónak adódik. Számoljuk ki ezt az értéket a szén 12 nukleonszámú nuklidja esetében. Ennek a nuklidnak a tömege $12u$, ahol u az atomi tömegegység.

Az egy atomi tömegegység a szén 12 nukleont tartalmazó izotópja tömegének $1/12$ része, $1u = 1,66 \cdot 10^{-27}$ kg.

Így a maganyag sűrűsége:

$$\rho_{mag} = \frac{m_{mag}}{V_{mag}} = \frac{Au}{\frac{4}{3}\pi r_0^3 A} = \frac{3u}{4\pi r_0^3} = 2,3 \cdot 10^{17} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

A fenti magsűrűség azt jelenti, hogy egy köbmilliméternyi maganyag tömege 230 000 tonna lenne.

Ebből is látszik mennyire más lenne a világunk, ha a magerők hatósugara nem korlátozódna a mag tartományára.



Bevezetés

- Bevezetés
- Kötési energia
- **Magmodellek**
- Magpotenciál

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

Héjmodell

A mag mért kötési energiája nagyobb bizonyos A értékekre, mint a cseppmodell alapján számítható érték. Az ilyen protonszámú vagy neutronszámú magokat nevezzük **mágikus magoknak**.



Bevezetés

- Bevezetés
- Kötési energia
- **Magmodellek**
- Magpotenciál

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

Héjmodell

A mag mért kötési energiája nagyobb bizonyos A értékekre, mint a cseppmodell alapján számítható érték. Az ilyen protonszámú vagy neutronszámú magokat nevezzük **mágikus magoknak**.

Ezek a mágikus számok a **2,8,20,28,50,82** és a neutronok esetében még a **126**.



Bevezetés

- Bevezetés
- Kötési energia
- **Magmodellek**
- Magpotenciál

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

Héjmodell

A mag mért kötési energiája nagyobb bizonyos A értékekre, mint a cseppmodell alapján számítható érték. Az ilyen protonszámú vagy neutronszámú magokat nevezzük **mágikus magoknak**.

Ezek a mágikus számok a **2,8,20,28,50,82** és a neutronok esetében még a **126**.

⇒ Héjmodell

Egy kiszemelt nukleon esetében azt az erőteret, amelyben mozog, a többi nukleon hozza létre, kialakítva a **magpotenciált**.



Bevezetés

- Bevezetés
- Kötési energia
- **Magmodellek**
- Magpotenciál

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

Héjmodell

A mag mért kötési energiája nagyobb bizonyos A értékekre, mint a cseppmodell alapján számítható érték. Az ilyen protonszámú vagy neutronszámú magokat nevezzük **mágikus magoknak**.

Ezek a mágikus számok a **2,8,20,28,50,82** és a neutronok esetében még a **126**.

⇒ Héjmodell

Egy kiszemelt nukleon esetében azt az erőteret, amelyben mozog, a többi nukleon hozza létre, kialakítva a **magpotenciált**.

Héjak az elektronburukhoz hasonlóan a kvantummechanika következményeként.



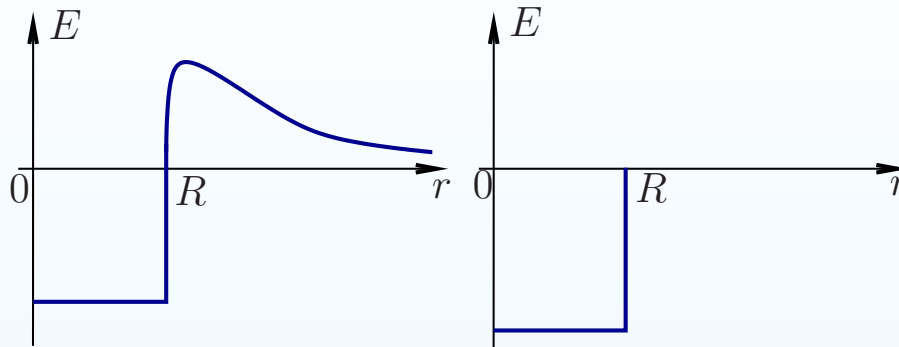
Magpotenciál

Bevezetés

- Bevezetés
- Kötési energia
- Magmodellek
- **Magpotenciál**

Természetes
radioaktivitás

Energiatermelés a
nukleáris energia
felszabadításával





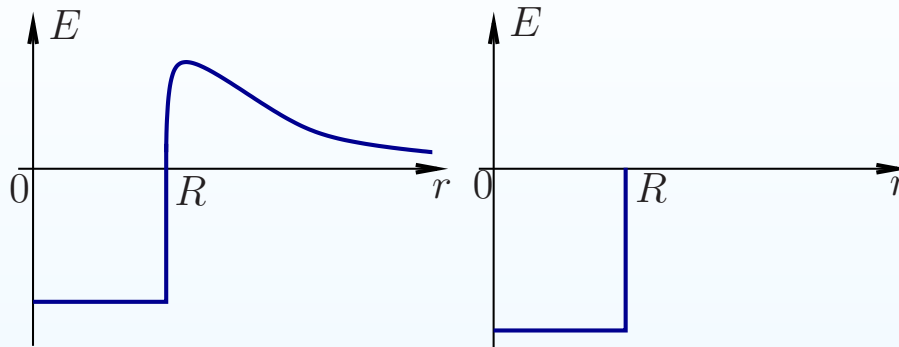
Bevezetés

- Bevezetés
- Kötési energia
- Magmodellek
- **Magpotenciál**

Természetes
radioaktivitás

Energiatermelés a
nukleáris energia
felszabadításával

Magpotenciál



Ebben a potenciáltérben alakulnak ki egymástól függetlenül a protonhéjak és neutronhéjak.



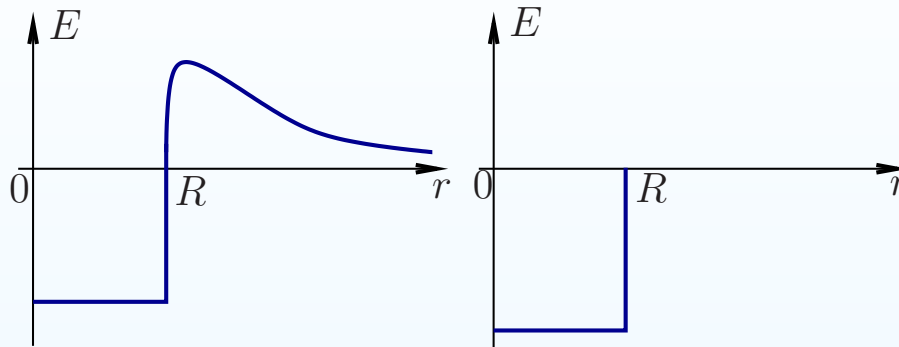
Magpotenciál

Bevezetés

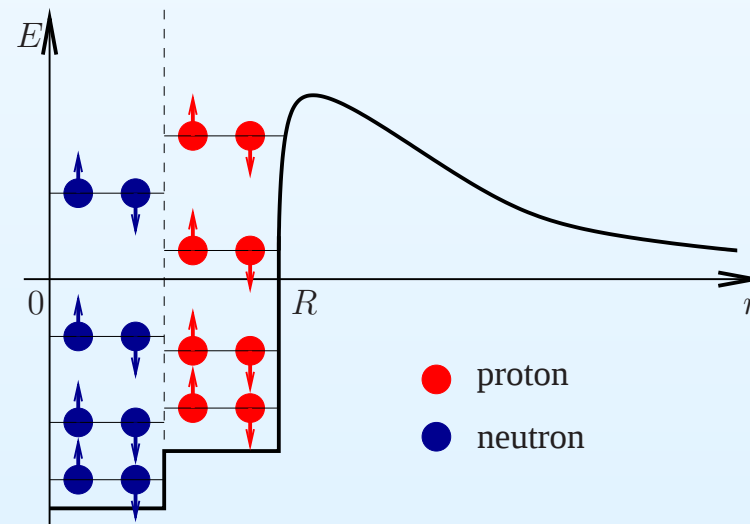
- Bevezetés
- Kötési energia
- Magmodellek
- **Magpotenciál**

Természetes
radioaktivitás

Energiatermelés a
nukleáris energia
felszabadításával



Ebben a potenciáltérben alakulnak ki egymástól függetlenül a protonhéjak és neutronhéjak.





Bevezetés

Természetes radioaktivitás

- Természetes radioaktivitás
- α – sugárzás
- β – sugárzás
- γ – sugárzás
- Bomlási törvény

Energiatermelés a
nukleáris energia
felszabadításával

Természetes radioaktivitás



Természetes radioaktivitás

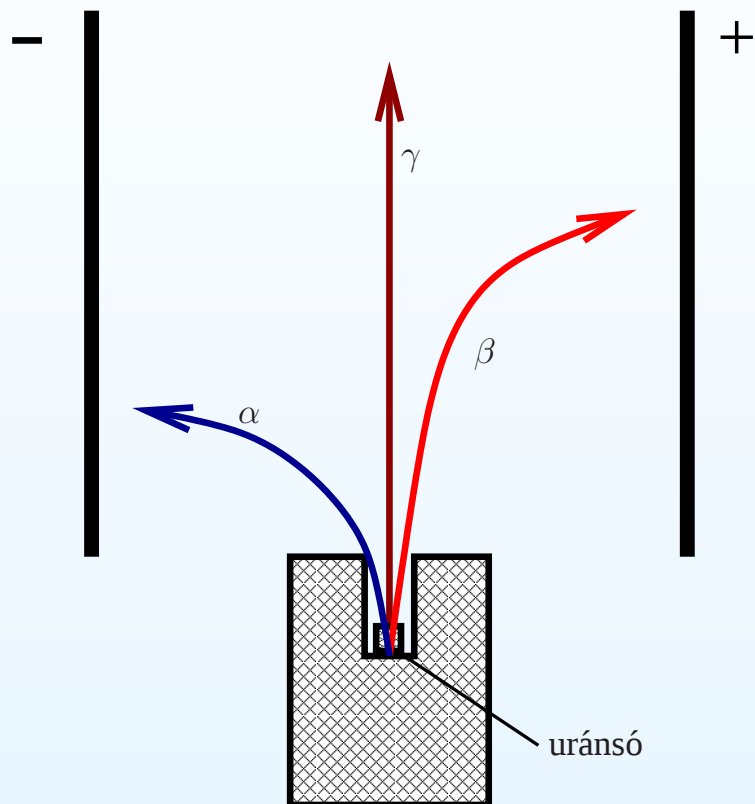
Bevezetés

Természetes radioaktivitás

• Természetes radioaktivitás

- α – sugárzás
- β – sugárzás
- γ – sugárzás
- Bomlási törvény

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával





Bevezetés

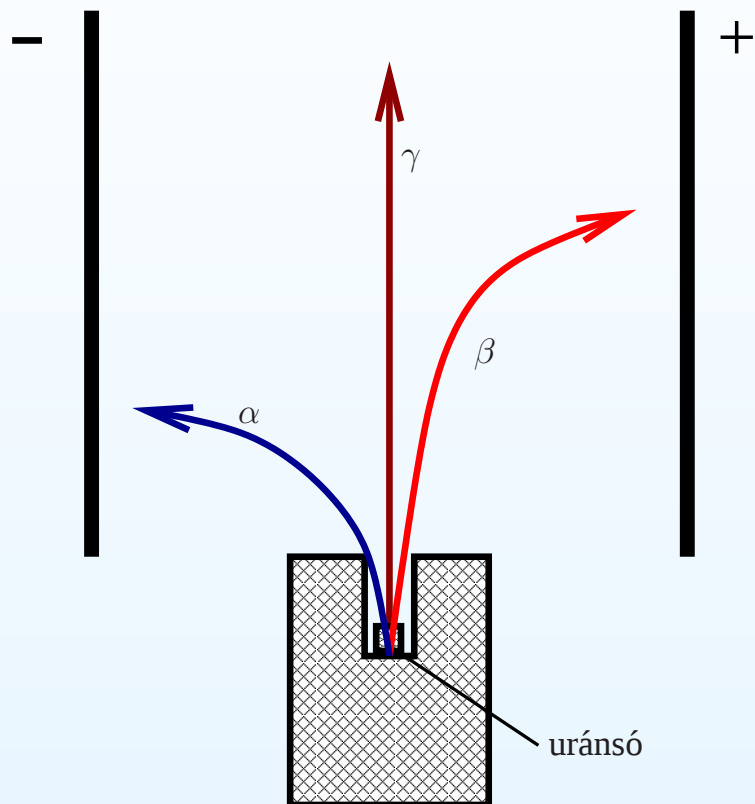
Természetes radioaktivitás

• Természetes radioaktivitás

- α – sugárzás
- β – sugárzás
- γ – sugárzás
- Bomlási törvény

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

Természetes radioaktivitás



α – sugárzás

β – sugárzás

γ – sugárzás



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

- Természetes radioaktivitás
- α – sugárzás
- β – sugárzás
- γ – sugárzás
- Bomlási törvény

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

α – sugárzás

Egyes atommagok az α -részecskék kibocsátásával szemben instabilak.



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

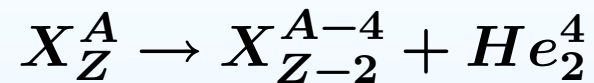
- Természetes radioaktivitás
- α – sugárzás
- β – sugárzás
- γ – sugárzás
- Bomlási törvény

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

α – sugárzás

Egyes atommagok az α -részecskék kibocsátásával szemben instabilak.

α -rész kisugárzásával a mag energetikailag előnyösebb állapotba jut:





Bevezetés

Természetes radioaktivitás

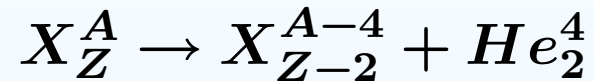
- Természetes radioaktivitás
- α – sugárzás
- β – sugárzás
- γ – sugárzás
- Bomlási törvény

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

α – sugárzás

Egyes atommagok az α -részecskék kibocsátásával szemben instabilak.

α -rész kisugárzásával a mag energetikailag előnyösebb állapotba jut:



A He magok **alagúteffektussal** kerülnek ki a radioaktív magból.



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

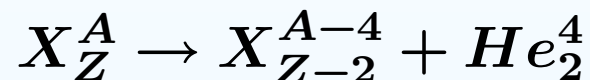
- Természetes radioaktivitás
- α – sugárzás
- β – sugárzás
- γ – sugárzás
- Bomlási törvény

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

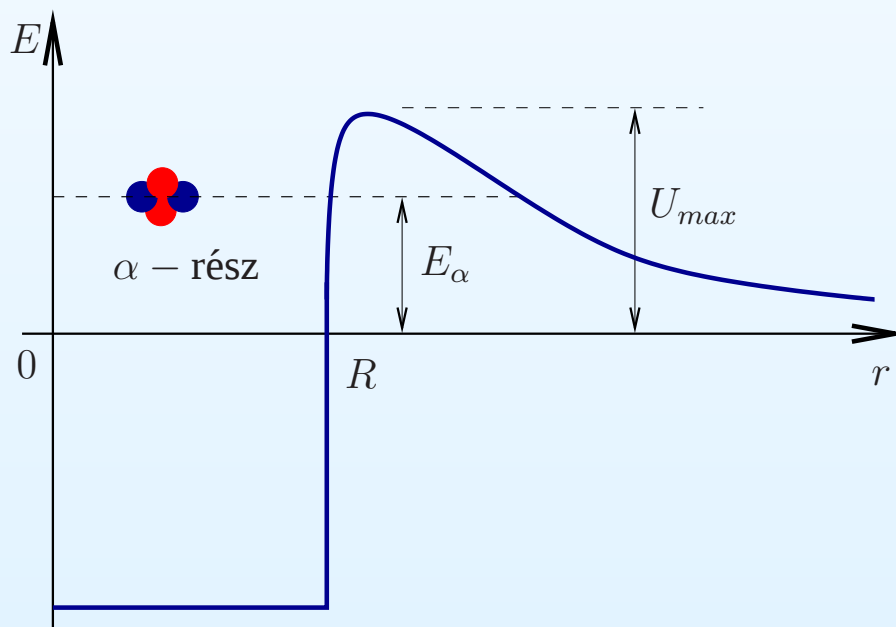
α – sugárzás

Egyes atommagok az α -részecskék kibocsátásával szemben instabilak.

α -rész kisugárzásával a mag energetikailag előnyösebb állapotba jut:



A He magok **alagúteffektussal** kerülnek ki a radioaktív magból.





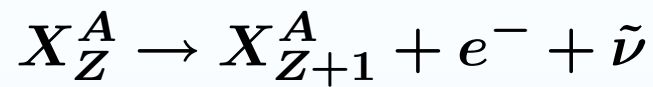
Bevezetés

Természetes radioaktivitás

- Természetes radioaktivitás
- α – sugárzás
- β – sugárzás
- γ – sugárzás
- Bomlási törvény

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

β – sugárzás





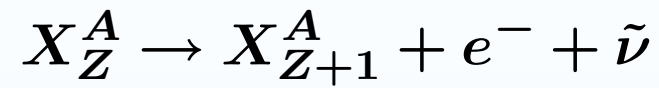
Bevezetés

Természetes radioaktivitás

- Természetes radioaktivitás
- α – sugárzás
- β – sugárzás
- γ – sugárzás
- Bomlási törvény

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

β – sugárzás



Az elektronok a β -bomlás folyamatában keletkeznek.



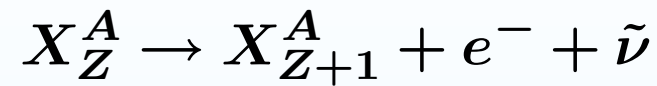
Bevezetés

Természetes radioaktivitás

- Természetes radioaktivitás
- α – sugárzás
- β – sugárzás
- γ – sugárzás
- Bomlási törvény

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

β – sugárzás



Az elektronok a β -bomlás folyamatában keletkeznek.
A szabad neutron β -bomlása.



Ennek a folyamatnak a jellemző ideje kb. 1000 s.



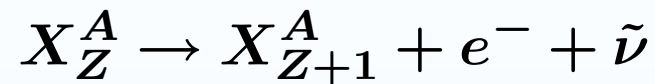
Bevezetés

Természetes radioaktivitás

- Természetes radioaktivitás
- α – sugárzás
- β – sugárzás
- γ – sugárzás
- Bomlási törvény

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

β – sugárzás



Az elektronok a β -bomlás folyamatában keletkeznek.
A szabad neutron β -bomlása.



Ennek a folyamatnak a jellemző ideje kb. 1000 s.

Egy töltetlen, a fotonhoz nagyon hasonló fermion az antineutrínó ($\tilde{\nu}$), amelyik egy újabb kölcsönhatási típus közvetítője, a **gyenge kölcsönhatásé**.



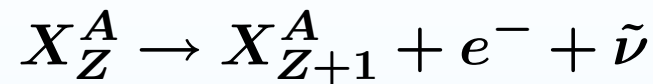
Bevezetés

Természetes radioaktivitás

- Természetes radioaktivitás
- α – sugárzás
- β – sugárzás
- γ – sugárzás
- Bomlási törvény

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

β – sugárzás



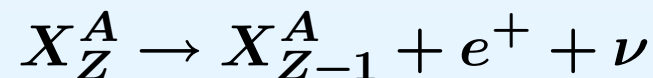
Az elektronok a β -bomlás folyamatában keletkeznek.
A szabad neutron β -bomlása.



Ennek a folyamatnak a jellemző ideje kb. 1000 s.

Egy töltetlen, a fotonhoz nagyon hasonló fermion az antineutrínó ($\tilde{\nu}$), amelyik egy újabb kölcsönhatási típus közvetítője, a **gyenge kölcsönhatásé**.

β^+ -bomlás:



e^+ - az elektron **antirészecskéje a pozitron**.



Bevezetés

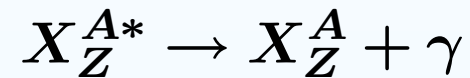
Természetes radioaktivitás

- Természetes radioaktivitás
- α – sugárzás
- β – sugárzás
- γ – sugárzás
- Bomlási törvény

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

γ – sugárzás

A fentebb említett bomlások után a mag általában gerjesztett állapotban marad. Felesleges energiájától γ -foton formájában szabadul meg.





Bevezetés

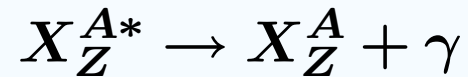
Természetes radioaktivitás

- Természetes radioaktivitás
- α – sugárzás
- β – sugárzás
- γ – sugárzás
- Bomlási törvény

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

γ – sugárzás

A fentebb említett bomlások után a mag általában gerjesztett állapotban marad. Felesleges energiájától γ -foton formájában szabadul meg.



Tehát a γ -sugárzás nem más, mint nagy energiájú elektromágneses sugárzás.



Bevezetés

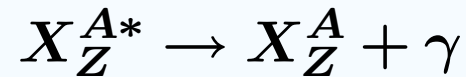
Természetes radioaktivitás

- Természetes radioaktivitás
- α – sugárzás
- β – sugárzás
- γ – sugárzás
- Bomlási törvény

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

γ – sugárzás

A fentebb említett bomlások után a mag általában gerjesztett állapotban marad. Felesleges energiájától γ -foton formájában szabadul meg.



Tehát a γ -sugárzás nem más, mint nagy energiájú elektromágneses sugárzás.

Ezek a sugárzások a magból és nem az elektronburokból származnak. Energiájuk ugyanis általában MeV nagyságrendű.



Bevezetés

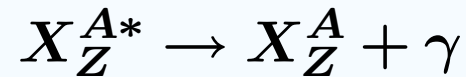
Természetes radioaktivitás

- Természetes radioaktivitás
- α – sugárzás
- β – sugárzás
- γ – sugárzás
- Bomlási törvény

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

γ – sugárzás

A fentebb említett bomlások után a mag általában gerjesztett állapotban marad. Felesleges energiájától γ -foton formájában szabadul meg.



Tehát a γ -sugárzás nem más, mint nagy energiájú elektromágneses sugárzás.

Ezek a sugárzások a magból és nem az elektronburokból származnak. Energiájuk ugyanis általában MeV nagyságrendű.

Az elektronburokban ilyen energiájú kvantumátmenetek nem lehetségesek.



Bevezetés

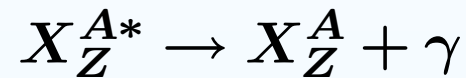
Természetes radioaktivitás

- Természetes radioaktivitás
- α – sugárzás
- β – sugárzás
- γ – sugárzás
- Bomlási törvény

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

γ – sugárzás

A fentebb említett bomlások után a mag általában gerjesztett állapotban marad. Felesleges energiájától γ -foton formájában szabadul meg.



Tehát a γ -sugárzás nem más, mint nagy energiájú elektromágneses sugárzás.

Ezek a sugárzások a magból és nem az elektronburokból származnak. Energiájuk ugyanis általában MeV nagyságrendű.

Az elektronburokban ilyen energiájú kvantumátmenetek nem lehetségesek.

A γ -sugárzás fotonjai is képesek közvetve ionizálni az anyagot, viszonylag nagy energiájuk miatt az anyagba való behatolási mélységük nagy lehet. Több cm vastag fémllemezen is áthatolnak.



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

- Természetes radioaktivitás
- α – sugárzás
- β – sugárzás
- γ – sugárzás
- **Bomlási törvény**

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

Bomlási törvény

A tapasztalat azt mutatta, hogy az egységnyi idő alatt elbomló magok száma egyenesen arányos a még el nem bomlott magok számával.

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

- Természetes radioaktivitás
- α – sugárzás
- β – sugárzás
- γ – sugárzás
- **Bomlási törvény**

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

Bomlási törvény

A tapasztalat azt mutatta, hogy az egységnyi idő alatt elbomló magok száma egyenesen arányos a még el nem bomlott magok számával.

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

A változókat szétválasztva, majd az egyenlet mindkét oldalát integrálva:

$$\int \frac{dN}{N} = -\lambda \int t dt,$$

a megoldást a következő alakba írhatjuk:

$$\ln N(t) = -\lambda t + \ln C.$$



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

- Természetes radioaktivitás
- α – sugárzás
- β – sugárzás
- γ – sugárzás
- **Bomlási törvény**

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

Bomlási törvény

A tapasztalat azt mutatta, hogy az egységnyi idő alatt elbomló magok száma egyenesen arányos a még el nem bomlott magok számával.

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

A változókat szétválasztva, majd az egyenlet mindkét oldalát integrálva:

$$\int \frac{dN}{N} = -\lambda \int t dt,$$

a megoldást a következő alakba írhatjuk:

$$\ln N(t) = -\lambda t + \ln C.$$

Innen $N(t)$ kifejezhető:

$$N(t) = Ce^{-\lambda t}$$



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

- Természetes radioaktivitás
- α – sugárzás
- β – sugárzás
- γ – sugárzás
- **Bomlási törvény**

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

A $t = 0$ időpillanatban $N(t) = N_0$, így $C = N_0$.



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

- Természetes radioaktivitás
- α – sugárzás
- β – sugárzás
- γ – sugárzás
- **Bomlási törvény**

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

A $t = 0$ időpillanatban $N(t) = N_0$, így $C = N_0$.
A bomlási törvény exponenciálisan lecsengő függvény:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

ahol λ -bomlási állandó, τ -átlagos élettartam.



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

- Természetes radioaktivitás
- α – sugárzás
- β – sugárzás
- γ – sugárzás
- **Bomlási törvény**

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

A $t = 0$ időpillanatban $N(t) = N_0$, így $C = N_0$.

A bomlási törvény exponenciálisan lecsengő függvény:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

ahol λ -bomlási állandó, τ -átlagos élettartam.

Határozza meg mennyi idő (felezési idő) alatt bomlik el egy λ bomlási állandójú anyag fele!



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

- Természetes radioaktivitás
- α – sugárzás
- β – sugárzás
- γ – sugárzás
- **Bomlási törvény**

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

A $t = 0$ időpillanatban $N(t) = N_0$, így $C = N_0$.

A bomlási törvény exponenciálisan lecsengő függvény:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

ahol λ -bomlási állandó, τ -átlagos élettartam.

Határozza meg mennyi idő (felezési idő) alatt bomlik el egy λ bomlási állandójú anyag fele!

Megoldás: Írjuk fel a bomlási törvényt erre az esetre.

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

- Természetes radioaktivitás
- α – sugárzás
- β – sugárzás
- γ – sugárzás
- **Bomlási törvény**

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

A $t = 0$ időpillanatban $N(t) = N_0$, így $C = N_0$.

A bomlási törvény exponenciálisan lecsengő függvény:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

ahol λ -bomlási állandó, τ -átlagos élettartam.

Határozza meg mennyi idő (felezési idő) alatt bomlik el egy λ bomlási állandójú anyag fele!

Megoldás: Írjuk fel a bomlási törvényt erre az esetre.

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

Az egyenlet mindkét oldalát logaritmálva, $T_{1/2}$ meghatározható.

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \cdot \ln 2.$$

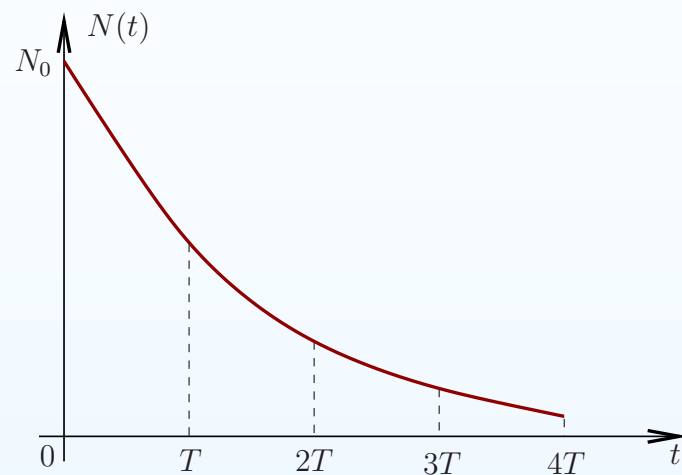


Bevezetés

Természetes radioaktivitás

- Természetes radioaktivitás
- α – sugárzás
- β – sugárzás
- γ – sugárzás
- **Bomlási törvény**

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával



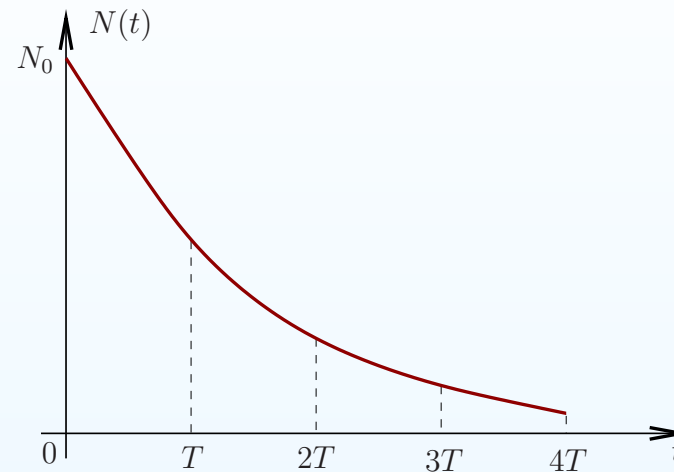


Bevezetés

Természetes radioaktivitás

- Természetes radioaktivitás
- α – sugárzás
- β – sugárzás
- γ – sugárzás
- **Bomlási törvény**

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával



A radioaktív anyagok viselkedésének fontos jellemzője **A** aktivitásuk.

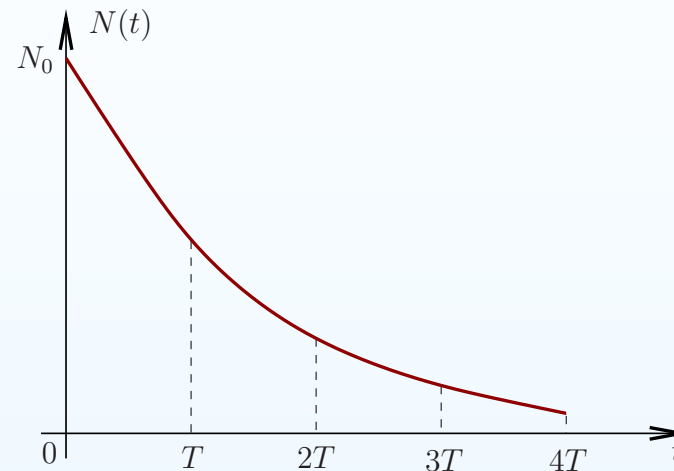


Bevezetés

Természetes radioaktivitás

- Természetes radioaktivitás
- α – sugárzás
- β – sugárzás
- γ – sugárzás
- **Bomlási törvény**

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával



A radioaktív anyagok viselkedésének fontos jellemzője **A aktivitásuk**.

Megadja, hogy a radioaktív anyagdarabban időegység alatt hány radioaktív bomlás következik be.

$$A(t) = -\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N(t)$$

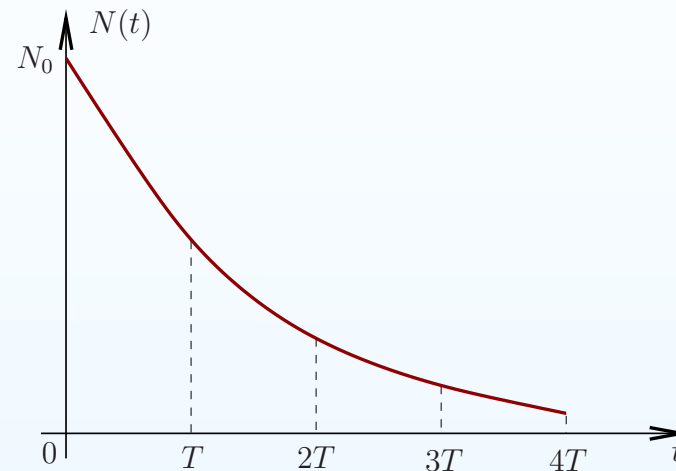


Bevezetés

Természetes radioaktivitás

- Természetes radioaktivitás
- α – sugárzás
- β – sugárzás
- γ – sugárzás
- **Bomlási törvény**

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával



A radioaktív anyagok viselkedésének fontos jellemzője **A aktivitásuk**.

Megadja, hogy a radioaktív anyagdarabban időegység alatt hány radioaktív bomlás következik be.

$$A(t) = -\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N(t)$$

A fenti definíció értelmében az aktivitás mértékegysége s^{-1} , amit a radioaktivitás felfedezőjének tiszteletére Bq-nek nevezünk.



Bevezetés

Természetes
radioaktivitás

Energiatermelés a
nukleáris energia
felszabadításával

- Atomenergetika
- Atomerőmű
- Magfúzió

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával



Atomenergetika

Bevezetés

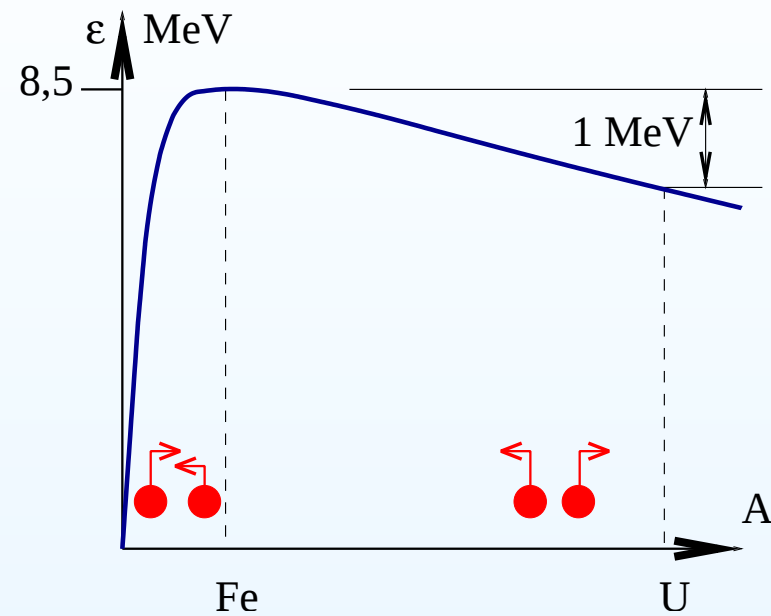
Természetes
radioaktivitás

Energiatermelés a
nukleáris energia
felszabadításával

● Atomenergetika

● Atomerőmű

● Magfúzió





Atomenergetika

Bevezetés

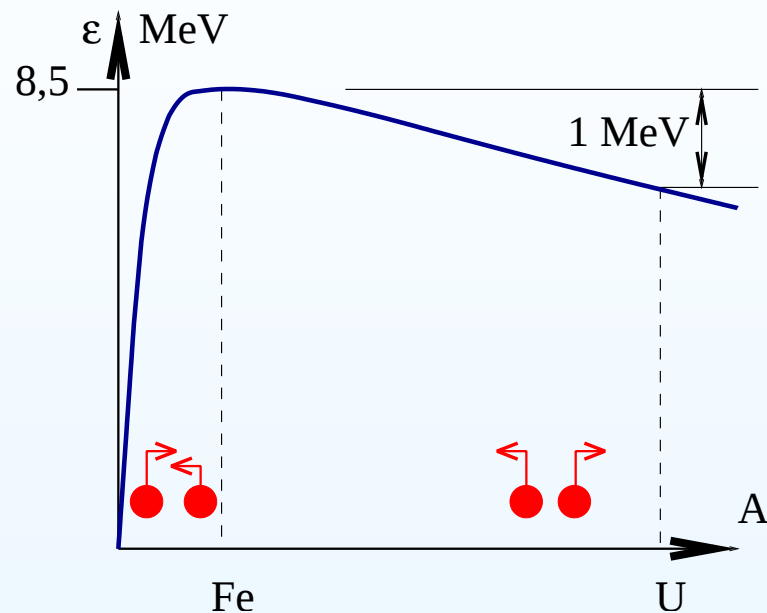
Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

● Atomenergetika

● Atomerőmű

● Magfúzió



Látható, hogy a vas környékén (pontosan a nikkell 60-as izotópjánál) a függvénynek maximuma van.



Atomenergetika

Bevezetés

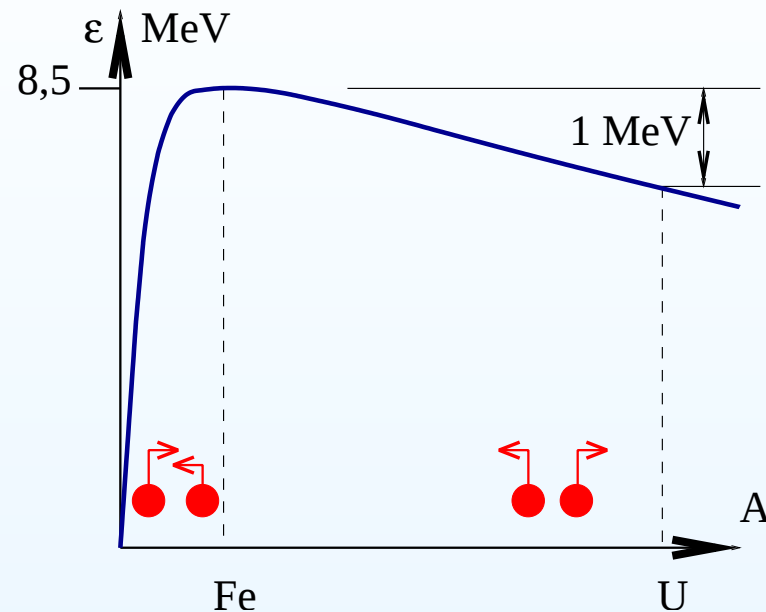
Természetes
radioaktivitás

Energiatermelés a
nukleáris energia
felszabadításával

● Atomenergetika

● Atomerőmű

● Magfúzió



Látható, hogy a vas környékén (pontosan a nikkell 60-as izotópjánál) a függvénynek maximuma van.

Tehát, ha egy nehezebb ($A > 230$) mag két könnyebbre esik szét, vagy két igen könnyű ($A < 50$) mag egyesül, a végeredmény mindkét esetben stabilabb magok létrejötte, és ezen két folyamat során *energia szabadul fel*.



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- **Atomenergetika**
- Atomerőmű
- Magfúzió

Azt az energiafelszabadulással járó folyamatot, amikor egy nehezebb mag két könnyebbre esik szét, maghasadásnak nevezzük.



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- **Atomenergetika**
- Atomerőmű
- Magfúzió

Azt az energiefelszabadulással járó folyamatot, amikor egy nehezebb mag két könnyebbre esik szét, maghasadásnak nevezzük.

Határozza meg nagyságrendileg azt az energiát, amelyik az U^{235} nuklid hasadásakor szabadul fel! (Tegyük fel, hogy a hasadási termékek a Fe^{56} és egy $A_2 = 179$ nukleonszámú atommag.)



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- **Atomenergetika**
- Atomerőmű
- Magfúzió

Azt az energiefelszabadulással járó folyamatot, amikor egy nehezebb mag két könnyebbre esik szét, maghasadásnak nevezzük.

Határozza meg nagyságrendileg azt az energiát, amelyik az U^{235} nuklid hasadásakor szabadul fel! (Tegyük fel, hogy a hasadási termékek a Fe^{56} és egy $A_2 = 179$ nukleonszámú atommag.)

Megoldás: Az U^{235} -ben egy nukleonra kb. 7,5 MeV kötési energia jut. Azaz az U^{235} kötési energiája:

$$\Delta W(235) = 235 \cdot 7,5 = 1763 \text{ MeV.}$$



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- **Atomenergetika**
- Atomerőmű
- Magfúzió

Azt az energiefelszabadulással járó folyamatot, amikor egy nehezebb mag két könnyebbre esik szét, maghasadásnak nevezzük.

Határozza meg nagyságrendileg azt az energiát, amelyik az U^{235} nuklid hasadásakor szabadul fel! (Tegyük fel, hogy a hasadási termékek a Fe^{56} és egy $A_2 = 179$ nukleonszámú atommag.)

Megoldás: Az U^{235} -ben egy nukleonra kb. 7,5 MeV kötési energia jut. Azaz az U^{235} kötési energiája:

$$\Delta W(235) = 235 \cdot 7,5 = 1763 \text{ MeV.}$$

A Fe^{56} -ban egy nukleonra kb. 8,5 MeV kötési energia jut. Azaz a Fe^{56} kötési energiája:

$$\Delta W(56) = 56 \cdot 8,5 = 476 \text{ MeV.}$$



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- **Atomenergetika**
- Atomerőmű
- Magfúzió

Az $\varepsilon(A)$ függvény vas és urán közötti szakasza jól közelíthető egy egyenessel. Ezen egyenes egyenlete:

$$\varepsilon(A) = 8,5 - \frac{A - 56}{179}$$



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- **Atomenergetika**
- Atomerőmű
- Magfúzió

Az $\varepsilon(A)$ függvény vas és urán közötti szakasza jól közelíthető egy egyenessel. Ezen egyenes egyenlete:

$$\varepsilon(A) = 8,5 - \frac{A - 56}{179}$$

Tehát az $A_2 = 179$ nukleonszámú hasadási termék kötési energiája:

$$\Delta W(179) = 179 \cdot \varepsilon(179) = 179 \cdot 7,8 = 1399 \text{ MeV.}$$



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- **Atomenergetika**
- Atomerőmű
- Magfúzió

Az $\varepsilon(A)$ függvény vas és urán közötti szakasza jól közelíthető egy egyenessel. Ezen egyenes egyenlete:

$$\varepsilon(A) = 8,5 - \frac{A - 56}{179}$$

Tehát az $A_2 = 179$ nukleonszámú hasadási termék kötési energiája:

$$\Delta W(179) = 179 \cdot \varepsilon(179) = 179 \cdot 7,8 = 1399 \text{ MeV.}$$

Így ebben a hasadási folyamatban felszabaduló energia:

$$Q_{hasad} = \Delta W(56) + \Delta W(179) - \Delta W(235) = 112 \text{ MeV.}$$

A részleteket is figyelembe vevő pontosabb számítások eredménye 200 MeV körüli érték.



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- **Atomenergetika**
- Atomerőmű
- Magfúzió

Azt az energiatranszformációval járó folyamatot, amikor két könnyű mag egyesül, magfúzióknak nevezzük.



Bevezetés

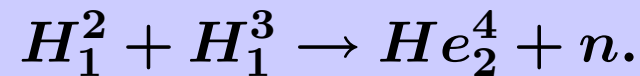
Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- **Atomenergetika**
- Atomerőmű
- Magfúzió

Azt az energiaszabadulással járó folyamatot, amikor két könnyű mag egyesül, magfúziónak nevezzük.

Határozza meg a következő fúziós folyamatban felszabaduló energia nagyságát!





Bevezetés

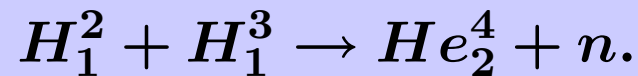
Természetes
radioaktivitás

Energiatermelés a
nukleáris energia
felszabadításával

- **Atomenergetika**
- Atomerőmű
- Magfúzió

Azt az energiefelszabadulással járó folyamatot, amikor két könnyű mag egyesül, magfúziónak nevezzük.

Határozza meg a következő fúziós folyamatban felszabaduló energia nagyságát!



Megoldás: A folyamatban szereplő nuklidok kötési energiái rendre $\Delta W(2) = 2,2 \text{ MeV}$, $\Delta W(3) = 8,5 \text{ MeV}$ és $\Delta W(4) = 28,3 \text{ MeV}$.



Bevezetés

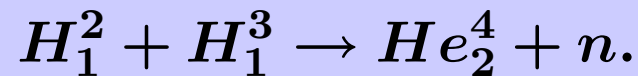
Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- **Atomenergetika**
- Atomerőmű
- Magfúzió

Azt az energiefelszabadulással járó folyamatot, amikor két könnyű mag egyesül, magfúziónak nevezzük.

Határozza meg a következő fúziós folyamatban felszabaduló energia nagyságát!



Megoldás: A folyamatban szereplő nuklidok kötési energiái rendre $\Delta W(2) = 2,2 \text{ MeV}$, $\Delta W(3) = 8,5 \text{ MeV}$ és $\Delta W(4) = 28,3 \text{ MeV}$. Tehát a folyamatban felszabaduló energia:

$$Q_{fuzio} = \Delta W(4) - \Delta W(2) - \Delta W(3) = 17,6 \text{ MeV}.$$



Bevezetés

Természetes
radioaktivitás

Energiatermelés a
nukleáris energia
felszabadításával

- Atomenergetika
- **Atomerőmű**
- Magfúzió

Atomerőmű

A természetben nincs olyan atommag, amely spontán elhasadna. Ebből az következik, hogy külső behatásra van szükség, hogy a maghasadást működtessük. Ennek legegyszerűbb, erőművi céloknak is megfelelő módja a neutronokkal történő hasítás.



Bevezetés

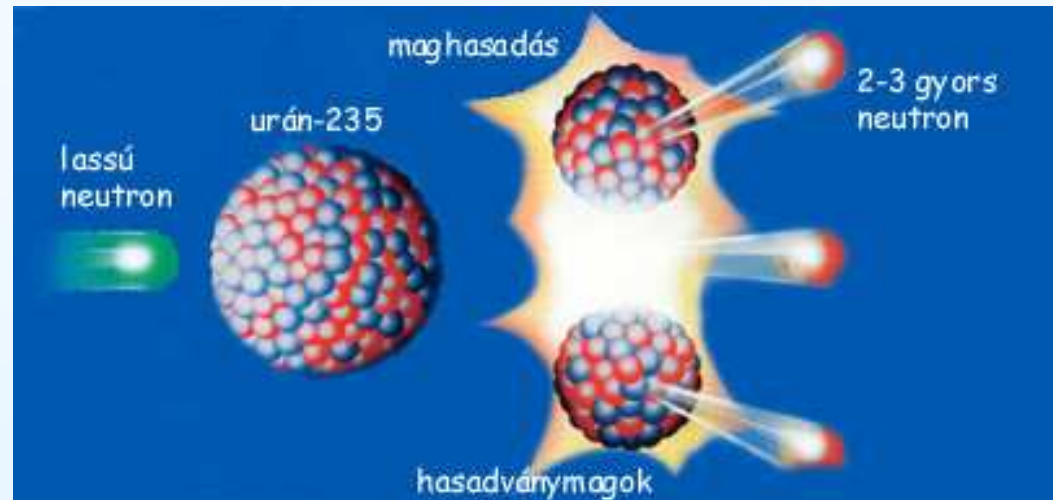
Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- **Atomerőmű**
- Magfúzió

Atomerőmű

A természetben nincs olyan atommag, amely spontán elhasadna. Ebből az következik, hogy külső behatásra van szükség, hogy a maghasadást működtessük. Ennek legegyszerűbb, erőművi céloknak is megfelelő módja a neutronokkal történő hasítás.





Bevezetés

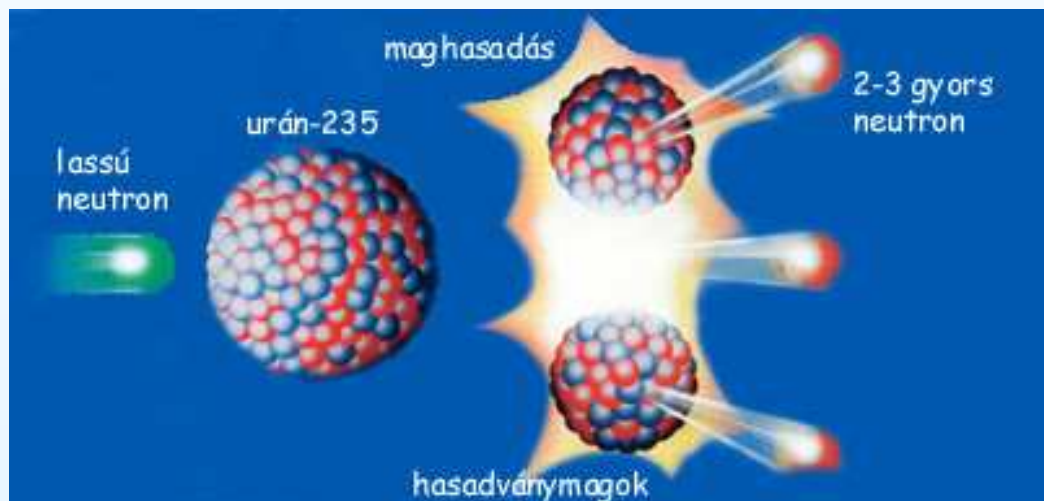
Természetes
radioaktivitás

Energiatermelés a
nukleáris energia
felszabadításával

- Atomenergetika
- **Atomerőmű**
- Magfúzió

Atomerőmű

A természetben nincs olyan atommag, amely spontán elhasadna. Ebből az következik, hogy külső behatásra van szükség, hogy a maghasadást működtessük. Ennek legegyszerűbb, erőművi céloknak is megfelelő módja a neutronokkal történő hasítás.



Csak néhány olyan atommag van, amelyek ilyen szempontból szóba jöhetnek: U^{235} , U^{238} , Pu^{239} .



Bevezetés

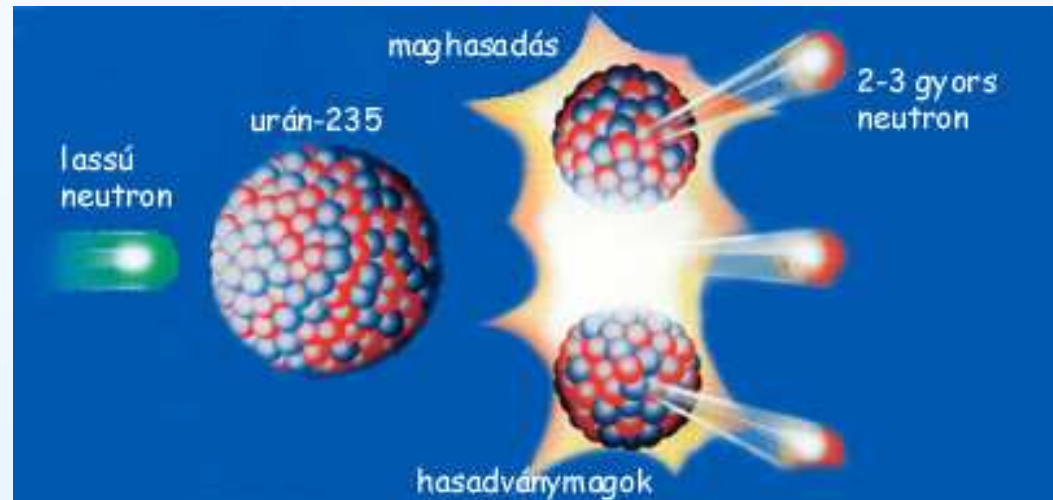
Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- **Atomerőmű**
- Magfúzió

Atomerőmű

A természetben nincs olyan atommag, amely spontán elhasadna. Ebből az következik, hogy külső behatásra van szükség, hogy a maghasadást működtessük. Ennek legegyszerűbb, erőművi céloknak is megfelelő módja a neutronokkal történő hasítás.



Csak néhány olyan atommag van, amelyek ilyen szempontból szóba jöhetnek: U^{235} , U^{238} , Pu^{239} .

A neutronokkal történő hasításnak a leghatásosabb módja a lassú neutronok által kiváltott hasadás.



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- **Atomerőmű**
- Magfúzió

Az uránmag egy lassú neutronot elnyel, majd rövid idő eltelte után két részre szakad.



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- **Atomerőmű**
- Magfúzió

Az uránmag egy lassú neutronot elnyel, majd rövid idő eltelte után két részre szakad.

Az urán hasadásakor 2-3 neutron is kirepül. Ezek energiája néhány MeV, tehát csak nagyon kis valószínűséggel hasítanak további uránmagot. $\implies$ gyors neutronoknak.



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- **Atomerőmű**
- Magfúzió

Az uránmag egy lassú neutront elnyel, majd rövid idő eltelte után két részre szakad.

Az urán hasadásakor 2-3 neutron is kirepül. Ezek energiája néhány MeV, tehát csak nagyon kis valószínűséggel hasítanak további uránmagot. $\implies$ gyors neutronoknak.

Le kell a gyors neutronokat lassítani. Erre szolgálnak a **moderátorok**.



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- **Atomerőmű**
- Magfúzió

Az uránmag egy lassú neutronot elnyel, majd rövid idő eltelte után két részre szakad.

Az urán hasadásakor 2-3 neutron is kirepül. Ezek energiája néhány MeV, tehát csak nagyon kis valószínűséggel hasítanak további uránmagot. $\implies$ gyors neutronoknak.

Le kell a gyors neutronokat lassítani. Erre szolgálnak a **moderátorok**.

A moderátorok olyan anyagok, amelyek csak kevésbé nyelik el a neutronokat, azok a magjaikkal tökéletesen rugalmasan ütköznek.



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- **Atomerőmű**
- Magfúzió

Az uránmag egy lassú neutronot elnyel, majd rövid idő eltelte után két részre szakad.

Az urán hasadásakor 2-3 neutron is kirepül. Ezek energiája néhány MeV, tehát csak nagyon kis valószínűséggel hasítanak további uránmagot. $\implies$ gyors neutronoknak.

Le kell a gyors neutronokat lassítani. Erre szolgálnak a **moderátorok**.

A moderátorok olyan anyagok, amelyek csak kevésbé nyelik el a neutronokat, azok a magjaikkal tökéletesen rugalmasan ütköznek.

Ahhoz, hogy a lassítás folyamata a leghatékonyabb legyen, arra van szükség, hogy a moderátor atommagjainak tömege és a neutron tömege ne térjenek el nagyon egymástól.



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- **Atomerőmű**
- Magfúzió

Képzeljük el, hogy a rendelkezésünkre álló hasadóanyag mennyisége kevesebb a kritikusnál.



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- **Atomerőmű**
- Magfúzió

Képzeljük el, hogy a rendelkezésünkre álló hasadóanyag mennyisége kevesebb a kritikusnál.

Ez azt jelenti, hogy több neutron nyelődik el és hagyja el a rendszert egységnyi idő alatt, mint amennyi ugyanennyi idő alatt a hasadóanyag teljes térfogatában keletkezik.



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- **Atomerőmű**
- Magfúzió

Képzeljük el, hogy a rendelkezésünkre álló hasadóanyag mennyisége kevesebb a kritikusnál.

Ez azt jelenti, hogy több neutron nyelődik el és hagyja el a rendszert egységnyi idő alatt, mint amennyi ugyanennyi idő alatt a hasadóanyag teljes térfogatában keletkezik.

Ha növeljük a rendszer sugarát (az egyszerűség kedvéért gömb alakot tételezünk fel), akkor a fentebb említett arány csökken, mivel a gömb felszíne a sugár négyzetével, míg térfogata a sugár köbével arányos.



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- **Atomerőmű**
- Magfúzió

Képzeljük el, hogy a rendelkezésünkre álló hasadóanyag mennyisége kevesebb a kritikusnál.

Ez azt jelenti, hogy több neutron nyelődik el és hagyja el a rendszert egységnyi idő alatt, mint amennyi ugyanennyi idő alatt a hasadóanyag teljes térfogatában keletkezik.

Ha növeljük a rendszer sugarát (az egyszerűség kedvéért gömb alakot tételezünk fel), akkor a fentebb említett arány csökken, mivel a gömb felszíne a sugár négyzetével, míg térfogata a sugár köbével arányos.

Létezik egy olyan sugárérték, amelynél átlagosan annyi neutron keletkezik a rendszerben egységnyi idő alatt, mint amennyi elnyelődik és kirepül.



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- **Atomerőmű**
- Magfúzió

Képzeljük el, hogy a rendelkezésünkre álló hasadóanyag mennyisége kevesebb a kritikusnál.

Ez azt jelenti, hogy több neutron nyelődik el és hagyja el a rendszert egységnyi idő alatt, mint amennyi ugyanennyi idő alatt a hasadóanyag teljes térfogatában keletkezik.

Ha növeljük a rendszer sugarát (az egyszerűség kedvéért gömb alakot tételezünk fel), akkor a fentebb említett arány csökken, mivel a gömb felszíne a sugár négyzetével, míg térfogata a sugár köbével arányos.

Létezik egy olyan sugárérték, amelynél átlagosan annyi neutron keletkezik a rendszerben egységnyi idő alatt, mint amennyi elnyelődik és kirepül.

Az ehhez a sugárhoz tartozó hasadóanyag mennyisége éppen **kritikus tömegű**.

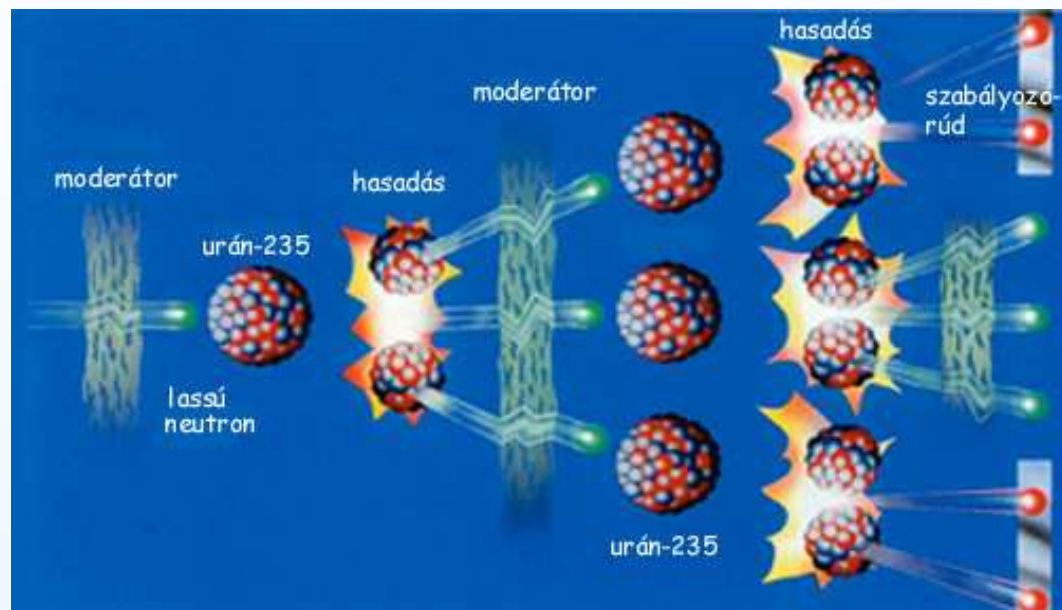


Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- **Atomerőmű**
- Magfúzió



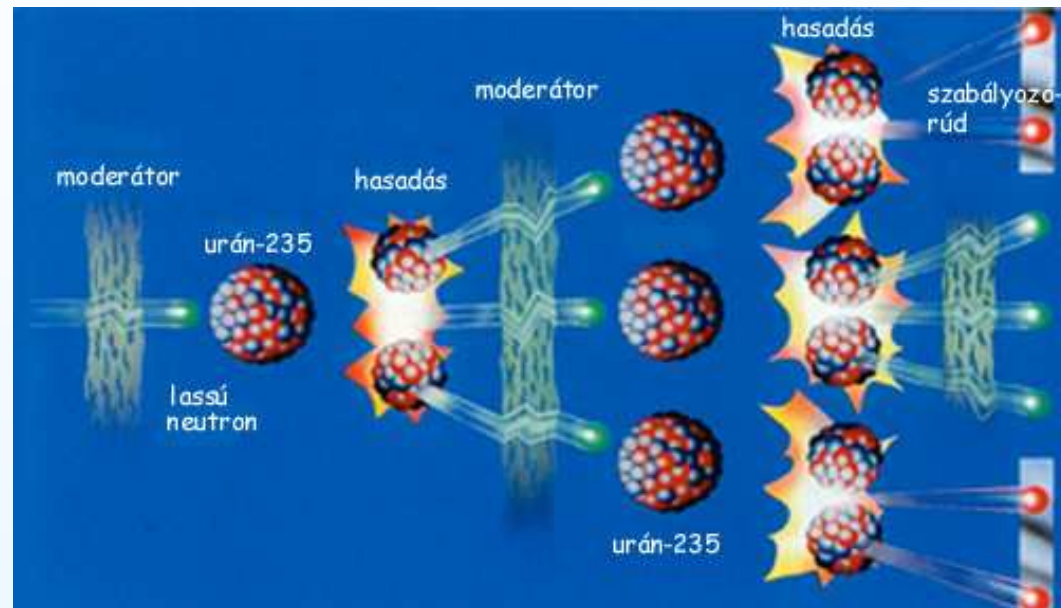


Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- **Atomerőmű**
- Magfúzió



Tehát ha kritikus tömegű, tiszta U^{235} van együtt egy tömegben a hasadás után keletkező 2-3 neutron nem hagyja el a hasadóanyag térfogatát.

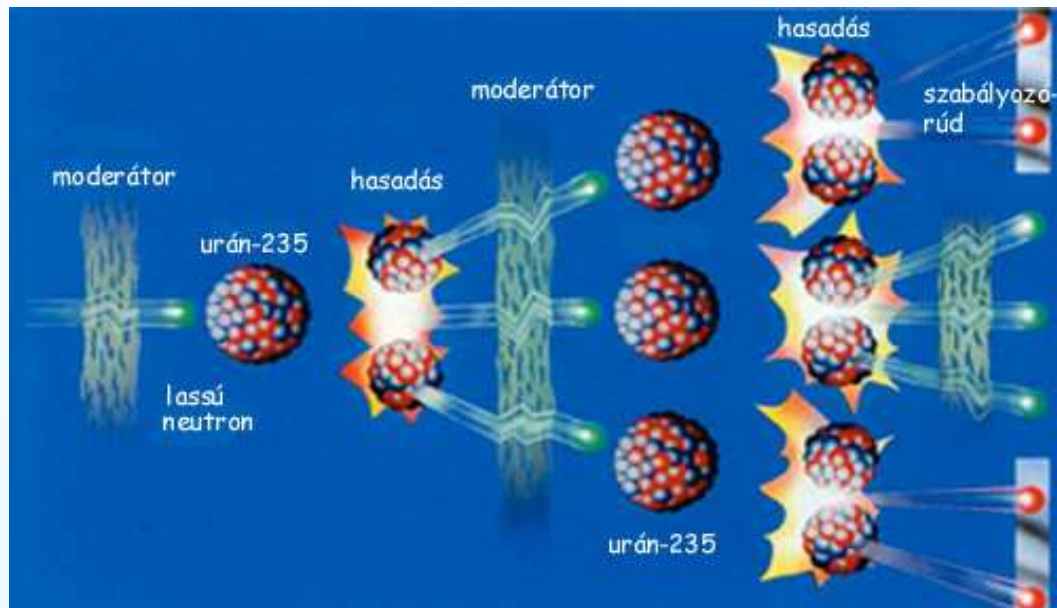


Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- **Atomerőmű**
- Magfúzió



Tehát ha kritikus tömegű, tiszta U^{235} van együtt egy tömegben a hasadás után keletkező 2-3 neutron nem hagyja el a hasadóanyag térfogatát.

Lassulás után újabb magokat hasítanak. $\implies$ **láncreakció**

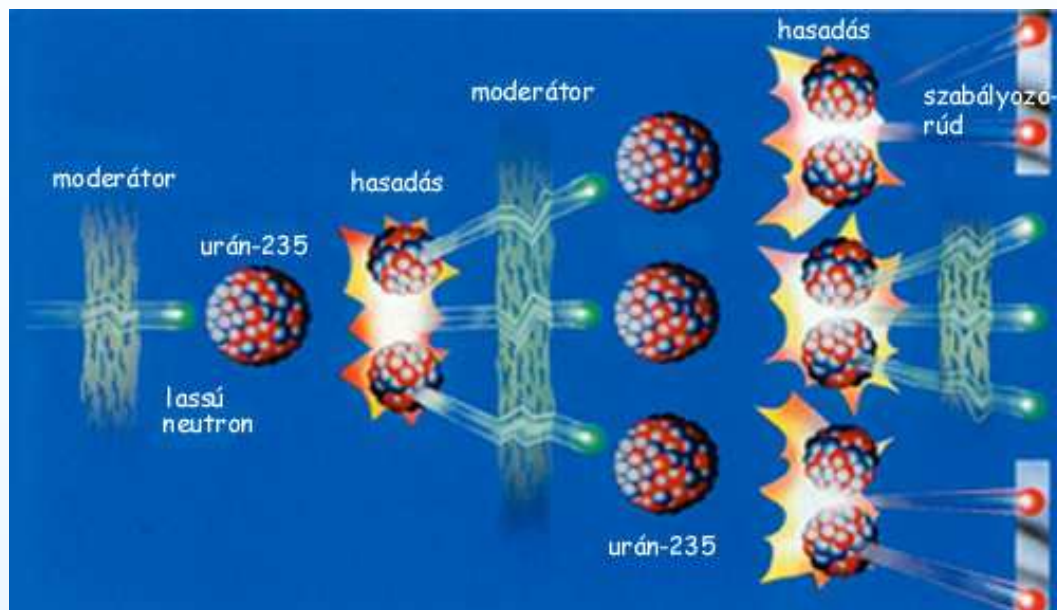


Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- **Atomerőmű**
- Magfúzió



Tehát ha kritikus tömegű, tiszta U^{235} van együtt egy tömegben a hasadás után keletkező 2-3 neutron nem hagyja el a hasadóanyag térfogatát.

Lassulás után újabb magokat hasítanak. $\implies$ **láncreakció**

A hasadó magok száma exponenciálisan nő!



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- **Atomerőmű**
- Magfúzió

Mit kell tenni ahhoz, hogy a láncreakciót szabályozni tudjuk?



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- **Atomerőmű**
- Magfúzió

Mit kell tenni ahhoz, hogy a láncreakciót szabályozni tudjuk?
Nyilván akkor áll be az egyensúly, ha az elnyelődő és keletkező neutronok száma egyenlő.



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- **Atomerőmű**
- Magfúzió

Mit kell tenni ahhoz, hogy a láncreakciót szabályozni tudjuk?

Nyilván akkor áll be az egyensúly, ha az elnyelődő és keletkező neutronok száma egyenlő.

Amikor már a rendszerben a kívánt teljesítmény eléréséhez elegendő neutron van, akkor a rendszer szabályozására szolgáló kadmiumrudakat beljebb toljuk a reaktorba.



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

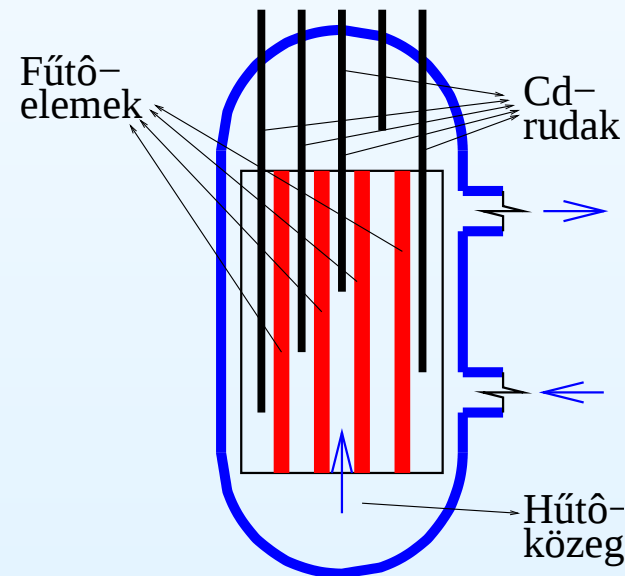
Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- **Atomerőmű**
- Magfúzió

Mit kell tenni ahhoz, hogy a láncreakciót szabályozni tudjuk?

Nyilván akkor áll be az egyensúly, ha az elnyelődő és keletkező neutronok száma egyenlő.

Amikor már a rendszerben a kívánt teljesítmény eléréséhez elegendő neutron van, akkor a rendszer szabályozására szolgáló kadmiumrudakat beljebb toljuk a reaktorba.





Bevezetés

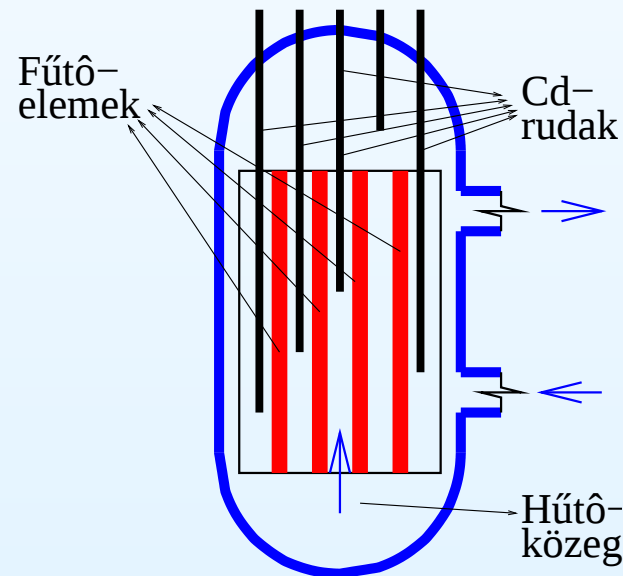
Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- **Atomerőmű**
- Magfúzió

Mit kell tenni ahhoz, hogy a láncreakciót szabályozni tudjuk?
Nyilván akkor áll be az egyensúly, ha az elnyelődő és keletkező neutronok száma egyenlő.

Amikor már a rendszerben a kívánt teljesítmény eléréséhez elegendő neutron van, akkor a rendszer szabályozására szolgáló kadmiumrudakat beljebb toljuk a reaktorba.



A kadmium nagy számban nyeli el a lassú neutronokat!



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- **Atomerőmű**
- Magfúzió

A hasadáskor felszabaduló energia legjelentősebb része a hasadási termékek mozgási energiájaként jelentkezik.



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- **Atomerőmű**
- Magfúzió

A hasadáskor felszabaduló energia legjelentősebb része a hasadási termékek mozgási energiájaként jelentkezik.

Ezek ütközve a hűtőközeg atomjaival felmelegítik azt. $\implies$ gőz $\implies$ villamos energia



Bevezetés

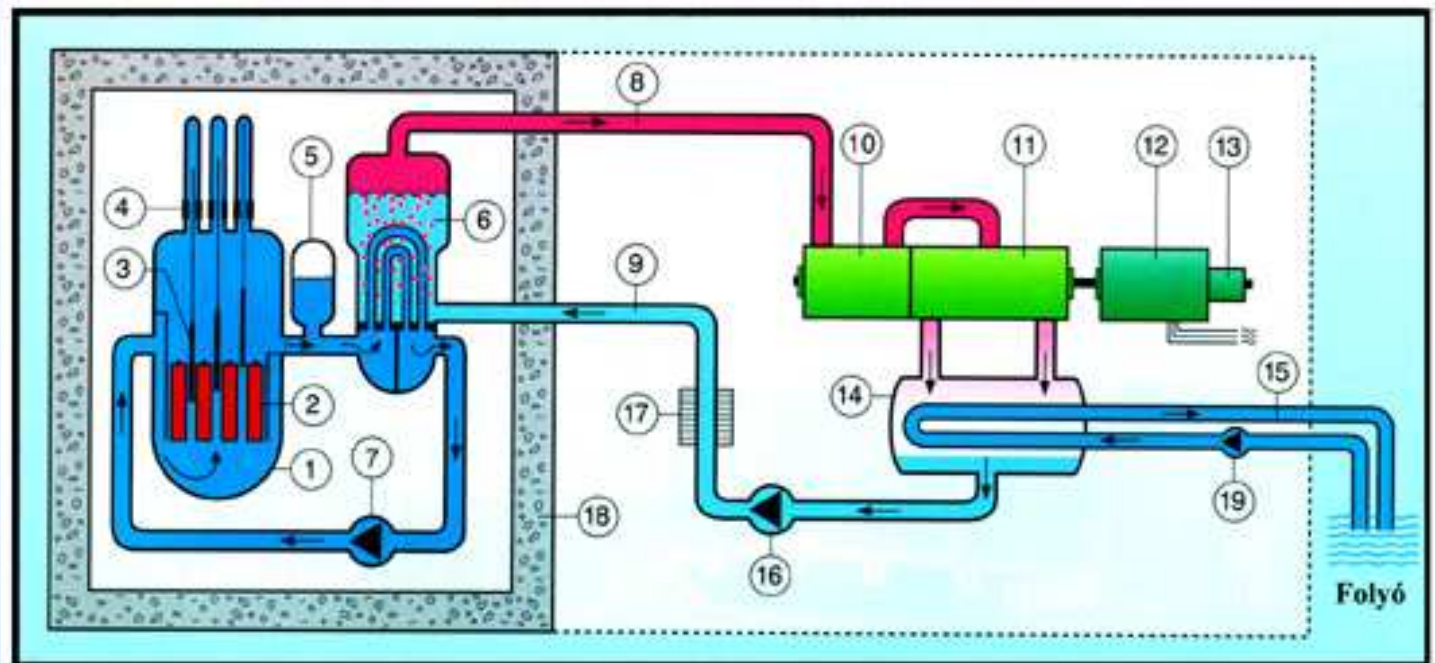
Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- **Atomerőmű**
- Magfúzió

A hasadáskor felszabaduló energia legjelentősebb része a hasadási termékek mozgási energiájaként jelentkezik.

Ezek ütközve a hűtőközeg atomjaival felmelegítik azt. $\Rightarrow$ gőz $\Rightarrow$ villamos energia





Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- **Atomerőmű**
- Magfúzió

Ma a világon a legelterjedtebb reaktortípus a nyomottvizes reaktor.



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- **Atomerőmű**
- Magfúzió

Ma a világon a legelterjedtebb reaktortípus a nyomottvizes reaktor. Moderátorként és hűtőközegként az ásványi sóktól megtisztított ipari víz szolgál.



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- **Atomerőmű**
- Magfúzió

Ma a világon a legelterjedtebb reaktortípus a nyomottvizes reaktor. Moderátorként és hűtőközegként az ásványi sóktól megtisztított ipari víz szolgál.





Bevezetés

Természetes
radioaktivitás

Energiatermelés a
nukleáris energia
felszabadításával

- Atomenergetika
- Atomerőmű
- **Magfúzió**

Magfúzió

Tudjuk, hogy a fúzió csak akkor következik be, ha a magok a magerők hatósugaránál kisebb távolságra közelítik meg egymást. Ez gyakorlatilag azt jelenti, hogy érintkezniük kell.



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- Atomerőmű
- **Magfúzió**

Magfúzió

Tudjuk, hogy a fúzió csak akkor következik be, ha a magok a magerők hatósugaránál kisebb távolságra közelítik meg egymást. Ez gyakorlatilag azt jelenti, hogy érintkezniük kell.

El kell érniük, hogy a fuzionáló magok nagy hányada kerüljön párosával érintkezésbe $\implies$ termikus ütközések $\implies$ magas hőmérséklet ($\sim$ millió fok) $\implies$ **plazmaállapot**



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- Atomerőmű
- **Magfúzió**

Magfúzió

Tudjuk, hogy a fúzió csak akkor következik be, ha a magok a magerők hatósugaránál kisebb távolságra közelítik meg egymást. Ez gyakorlatilag azt jelenti, hogy érintkezniük kell.

El kell érniük, hogy a fuzionáló magok nagy hányada kerüljön párosával érintkezésbe $\implies$ termikus ütközések $\implies$ magas hőmérséklet ($\sim$ millió fok) $\implies$ **plazmaállapot**

A fuzionáló magok nem jutnak át a Coulomb-gát maximumán, hanem **alagút-effektussal** zajlik a fúzió.



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

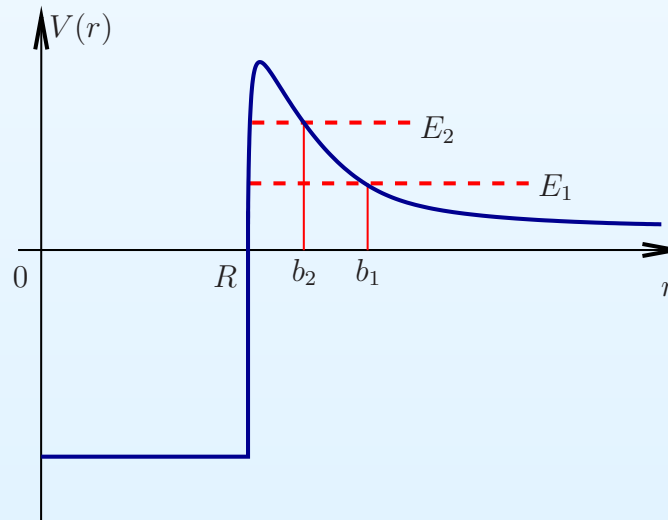
- Atomenergetika
- Atomerőmű
- **Magfúzió**

Magfúzió

Tudjuk, hogy a fúzió csak akkor következik be, ha a magok a magerők hatósugaránál kisebb távolságra közelítik meg egymást. Ez gyakorlatilag azt jelenti, hogy érintkezniük kell.

El kell érniük, hogy a fuzionáló magok nagy hányada kerüljön párosával érintkezésbe $\implies$ termikus ütközések $\implies$ magas hőmérséklet ($\sim$ millió fok) $\implies$ **plazmaállapot**

A fuzionáló magok nem jutnak át a Coulomb-gát maximumán, hanem **alagút-effektussal** zajlik a fúzió.





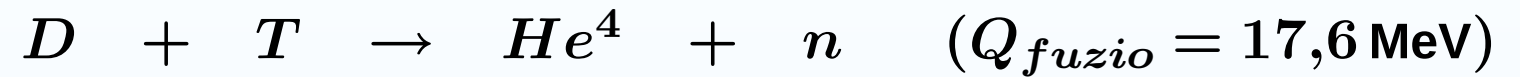
Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- Atomerőmű
- Magfúzió

Az ígéretes reakció reaktorhoz:





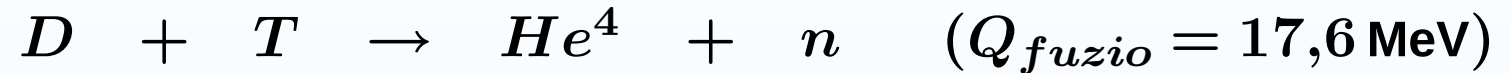
Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- Atomerőmű
- Magfúzió

Az ígéretes reakció reaktorhoz:



TOKAMAK

Egy toroidban (gyűrű alakú tekercs) helyezik el azokat az atomokat, melyeknek magjai fúzióra alkalmasak.

Ebben a(gáz halmazállapotú) anyagban elektromos ívkisülést hoznak létre. Az egész toroid erős mágneses térben van elhelyezve, mégpedig úgy, hogy az indukcióvektor merőleges a toroid $x - y$ síkjára.



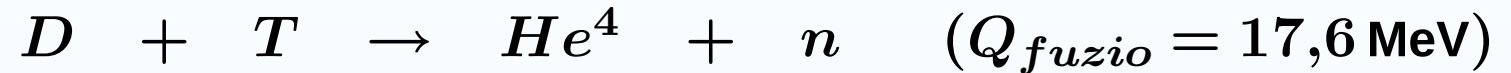
Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- Atomerőmű
- Magfúzió

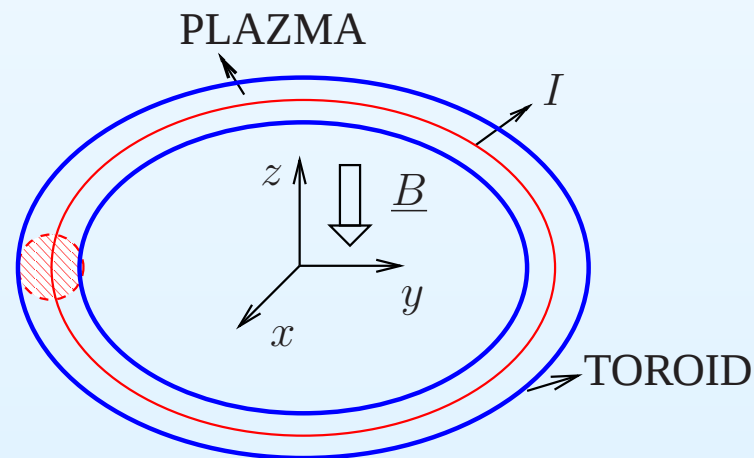
Az ígéretes reakció reaktorhoz:



TOKAMAK

Egy toroidban (gyűrű alakú tekercs) helyezik el azokat az atomokat, melyeknek magjai fúzióra alkalmasak.

Ebben a(gáz halmazállapotú) anyagban elektromos ívkisülést hoznak létre. Az egész toroid erős mágneses térben van elhelyezve, mégpedig úgy, hogy az indukcióvektor merőleges a toroid $x - y$ síkjára.





Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- Atomerőmű
- Magfúzió

Az ívkisülés következtében az atomok ionizálódnak, és a keletkezett ionok és elektronok a mágneses tér jelenléte miatt körpályára kényszerülnek.



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- Atomerőmű
- Magfúzió

Az ívkisülés következtében az atomok ionizálódnak, és a keletkezett ionok és elektronok a mágneses tér jelenléte miatt körpályára kényszerülnek.

A plazmában az egymással szemben áramló ionok és elektronok ütközéseinek következtében növekszik a hőmérséklet.



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- Atomerőmű
- Magfúzió

Az ívkisülés következtében az atomok ionizálódnak, és a keletkezett ionok és elektronok a mágneses tér jelenléte miatt körpályára kényszerülnek.

A plazmában az egymással szemben áramló ionok és elektronok ütközéseinek következtében növekszik a hőmérséklet.

A forró plazma nem érintkezhet a toroid falával!



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- Atomerőmű
- Magfúzió

Az ívkisülés következtében az atomok ionizálódnak, és a keletkezett ionok és elektronok a mágneses tér jelenléte miatt körpályára kényszerülnek.

A plazmában az egymással szemben áramló ionok és elektronok ütközéseinek következtében növekszik a hőmérséklet.

A forró plazma nem érintkezhet a toroid falával!

Az ilyen rendszer mágneses térrel lokalizálható. Azt szokás mondani, hogy a forró plazma lebeg a mágneses térben.



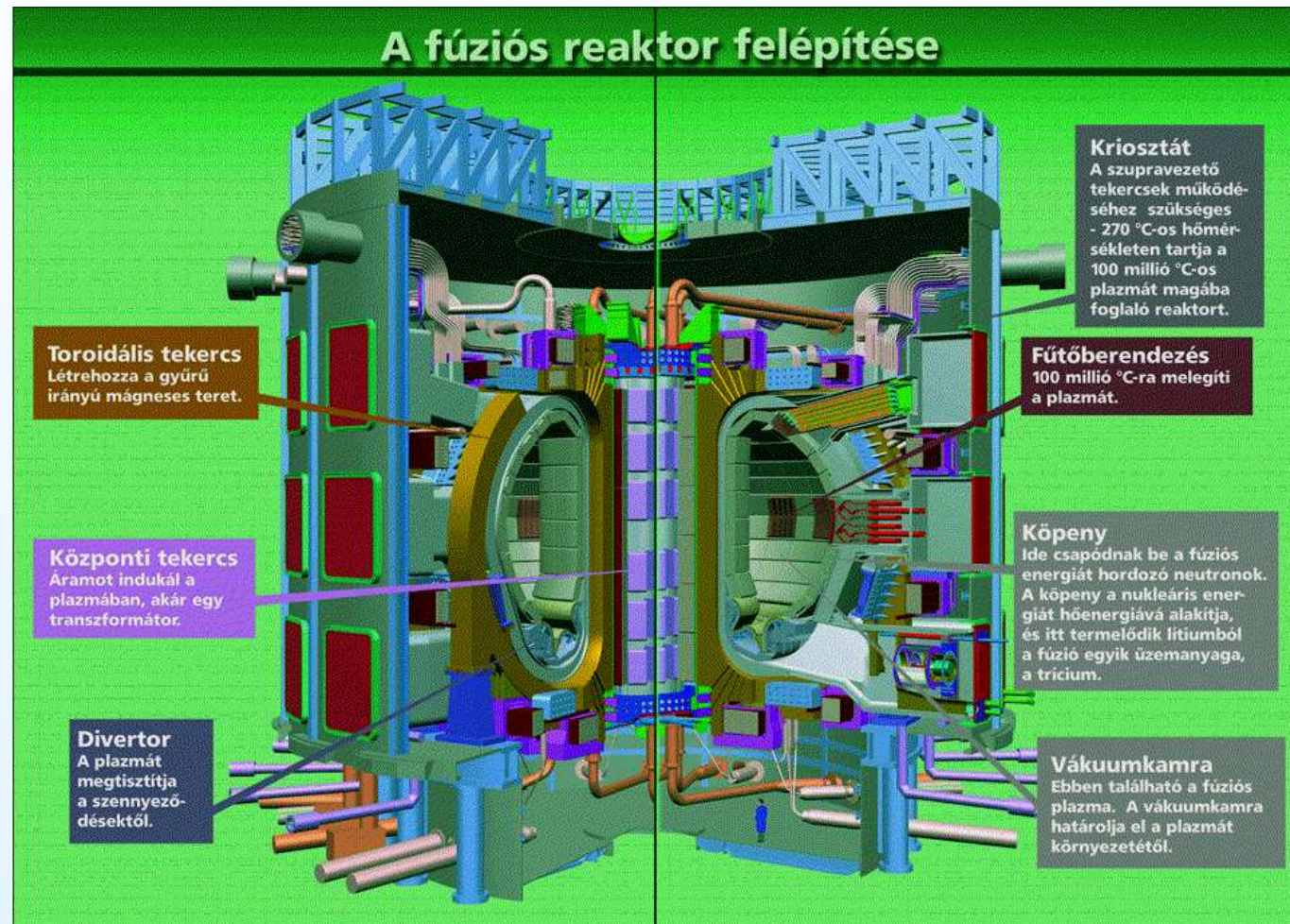
Bevezetés

Természetes
radioaktivitás

Energiatermelés a
nukleáris energia
felszabadításával

- Atomenergetika
- Atomerőmű
- Magfúzió

A világ első tervezett kísérleti fúziós reaktora: ITER





Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- Atomerőmű
- Magfúzió

Veszteségek is fellépnek. A TOKAMAK esetében ezek elsősorban a fékezési sugárzás okozta veszteségek.



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- Atomerőmű
- Magfúzió

Veszteségek is fellépnek. A TOKAMAK esetében ezek elsősorban a fékezési sugárzás okozta veszteségek.

Az ionok és elektronok körpályán mozognak, így a centripetális gyorsulás miatt elektromágneses sugárzást sugároznak ki, miközben mozgási energiájuk csökken.



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- Atomerőmű
- Magfúzió

Veszteségek is fellépnek. A TOKAMAK esetében ezek elsősorban a fékezési sugárzás okozta veszteségek.

Az ionok és elektronok körpályán mozognak, így a centripetális gyorsulás miatt elektromágneses sugárzást sugároznak ki, miközben mozgási energiájuk csökken.

A fúziós kísérletek esetében az un. **Lawson-kritérium** határozza meg, hogy mi a feltétele az önfenntartó fúziónak:

$$n \cdot \tau_E \geq C(T)$$



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- Atomerőmű
- Magfúzió

Veszteségek is fellépnek. A TOKAMAK esetében ezek elsősorban a fékezési sugárzás okozta veszteségek.

Az ionok és elektronok körpályán mozognak, így a centripetális gyorsulás miatt elektromágneses sugárzást sugároznak ki, miközben mozgási energiájuk csökken.

A fúziós kísérletek esetében az un. **Lawson-kritérium** határozza meg, hogy mi a feltétele az önfenntartó fúziónak:

$$n \cdot \tau_E \geq C(T)$$

Az energiatárolási idő (τ_E) azt adja meg, hogy a magára hagyott plazma energiatartalma mennyi idő alatt csökken a veszteségek következtében 1/e-ed részére.



Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- Atomerőmű
- Magfúzió

Veszteségek is fellépnek. A TOKAMAK esetében ezek elsősorban a fékezési sugárzás okozta veszteségek.

Az ionok és elektronok körpályán mozognak, így a centripetális gyorsulás miatt elektromágneses sugárzást sugároznak ki, miközben mozgási energiájuk csökken.

A fúziós kísérletek esetében az un. **Lawson-kritérium** határozza meg, hogy mi a feltétele az önfenntartó fúziónak:

$$n \cdot \tau_E \geq C(T)$$

Az energiatárolási idő (τ_E) azt adja meg, hogy a magára hagyott plazma energiatartalma mennyi idő alatt csökken a veszteségek következtében 1/e-ed részére.

Reaktorban még nem sikerült eleget tenni a Lawson-kritériumnak.



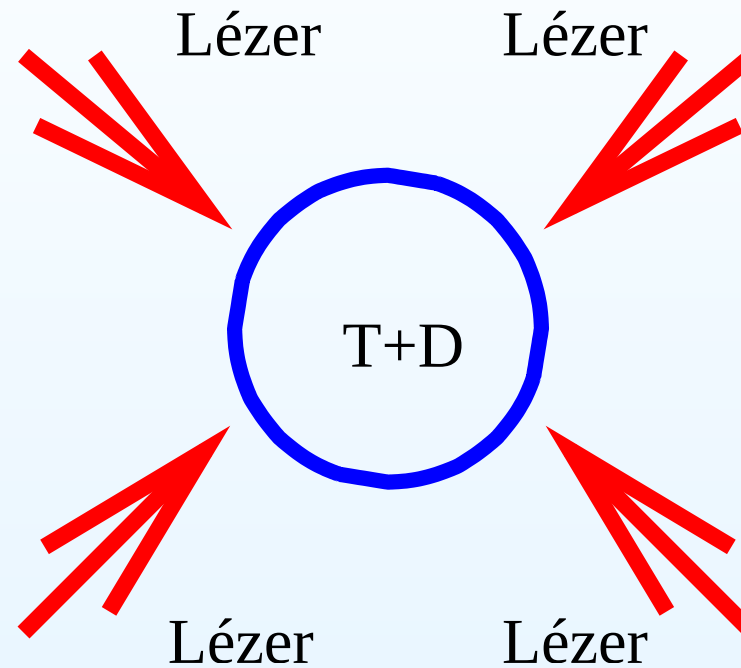
Bevezetés

Természetes radioaktivitás

Energiatermelés a nukleáris energia felszabadításával

- Atomenergetika
- Atomerőmű
- Magfúzió

Lézeres fúzió





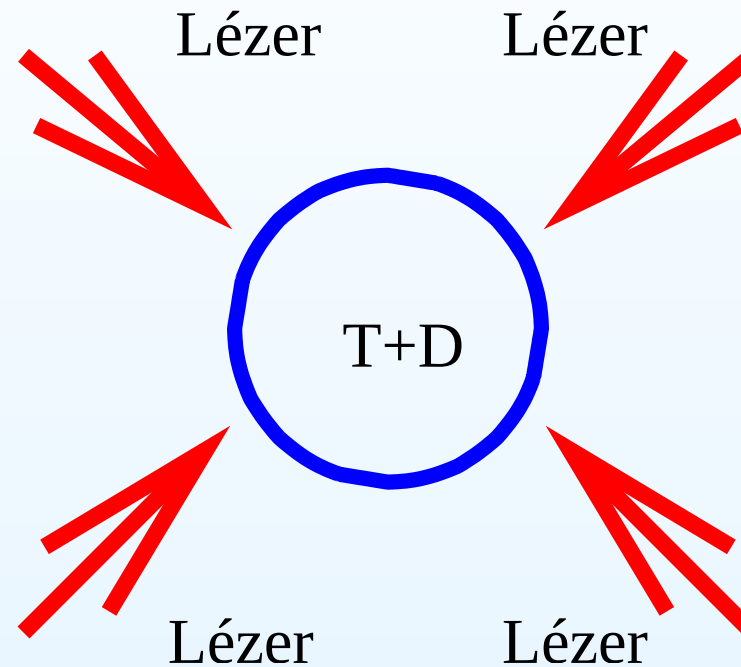
Bevezetés

Természetes
radioaktivitás

Energiatermelés a
nukleáris energia
felszabadításával

- Atomenergetika
- Atomerőmű
- Magfúzió

Lézeres fúzió



Itt a fúzióra alkalmas magok keveréke megfagyasztott $D - T$ keverék csepp.



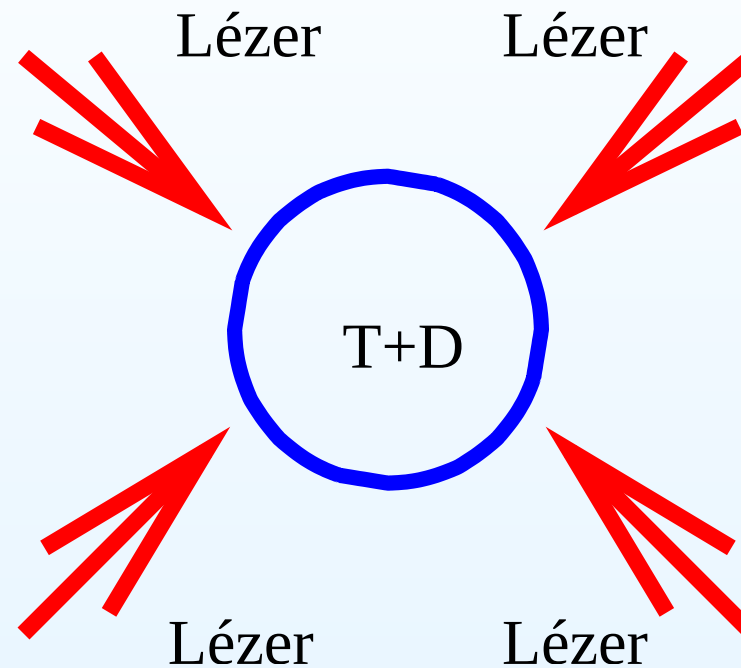
Bevezetés

Természetes
radioaktivitás

Energiatermelés a
nukleáris energia
felszabadításával

- Atomenergetika
- Atomerőmű
- Magfúzió

Lézeres fúzió



Itt a fúzióra alkalmas magok keveréke megfagyasztott $D - T$ keverék csepp.

Ez a szilárd keverék esik be nagy teljesítményű szimmetrikusan elhelyezett impulzuszérezek fókuszába.