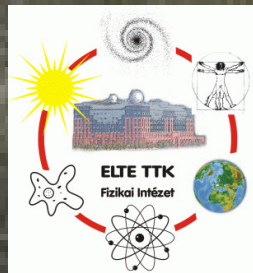


# Hamuval fűteni

## avagy a csillagok termodinamikája 2.

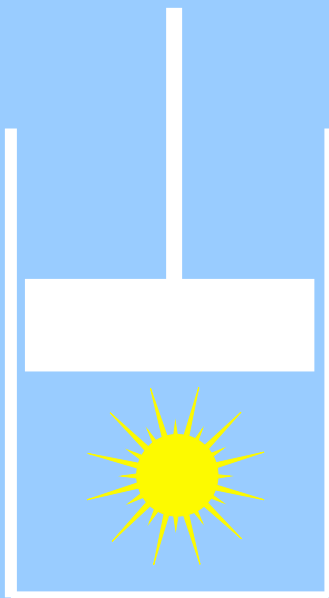


Az atomoktól a csillagokig

Dávid Gyula

2013. 01. 10.

# A csillagok termodinamikája 2.



*A termodinamika tudománya nem merül ki az ideális gáz állapotegyenletének napi ötszöri felírásában és átrendezésében.*

*(Sir James Clark Maxwell)*

*Friss, csodálkozó szemmel nézni a leghétköznapibb dolgokra – ez a gyermekek és az igazi tudósok kiváltsága.*

*(Albert Einstein)*

*Most már épp eleget tudunk a fizikából ahhoz, hogy megérthessünk egy olyan egyszerű dolgot, mint egy csillag.*

*(Sir Arthur S. Eddington)*

*Papa! Miért nem lehet hamuval fűteni?!*

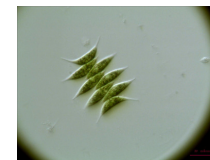
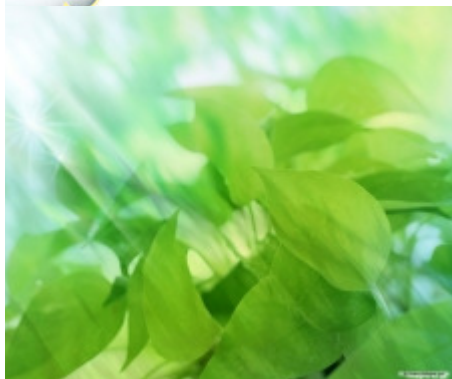
*(D.E. 1982)*





# Honnan kapja a Föld az energiát?

a Naptól



természetes antennák a napenergia felvételére



# Honnan kapja a Föld az energiát?

## a Naptól



mesterséges antennák a napenergia felvételére



De honnan veszi a Nap a kisugárzott energiát?

**Magfúzióval termeli !**

De miből?

Egyáltalán: hogyan lehet energiát „termelni” ???

hiszen azt tanultuk, hogy az energia megmarad...

**Általános válasz: az energia „termelése” igazából a meglevő energia átalakítása, átrendezése**

Ez az átrendezhető energia gyakran nem nyilvánvaló, rejtett, „**potenciális**” formában van jelen, és csak trükkös módon lehet hozzájutni, felszabadítani.





Ugyanazon anyagi rendszer két, energetikailag különböző állapotban



$$\Delta E = mgh$$

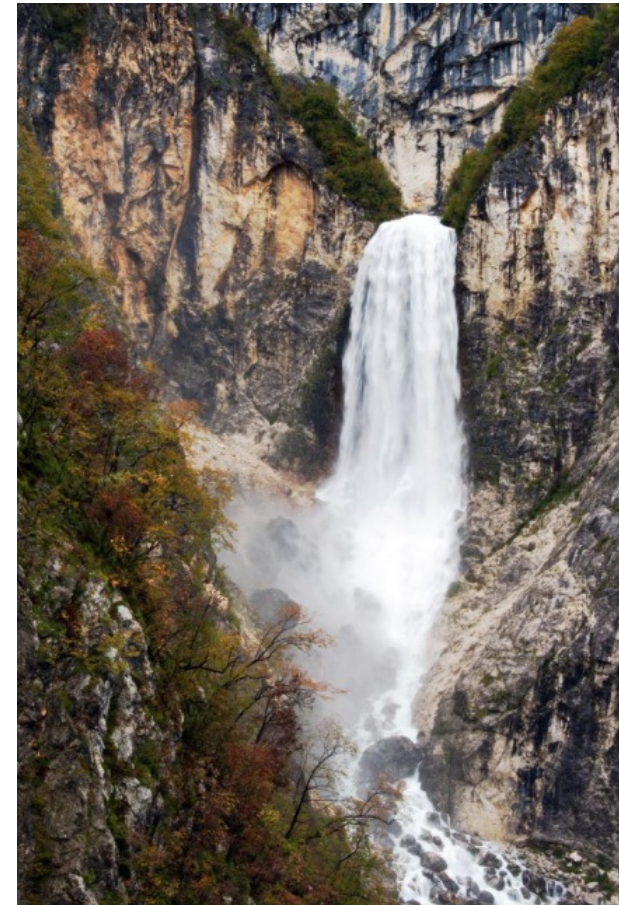
Ha átmegy egyik állapotból a másikba, a potenciális energia különbsége munkát tud végezni



sajnos, ez csak egyszeri esemény



**Tartós energiatermeléshez  
tartósan fennmaradó  
potenciálkülönbség kell**

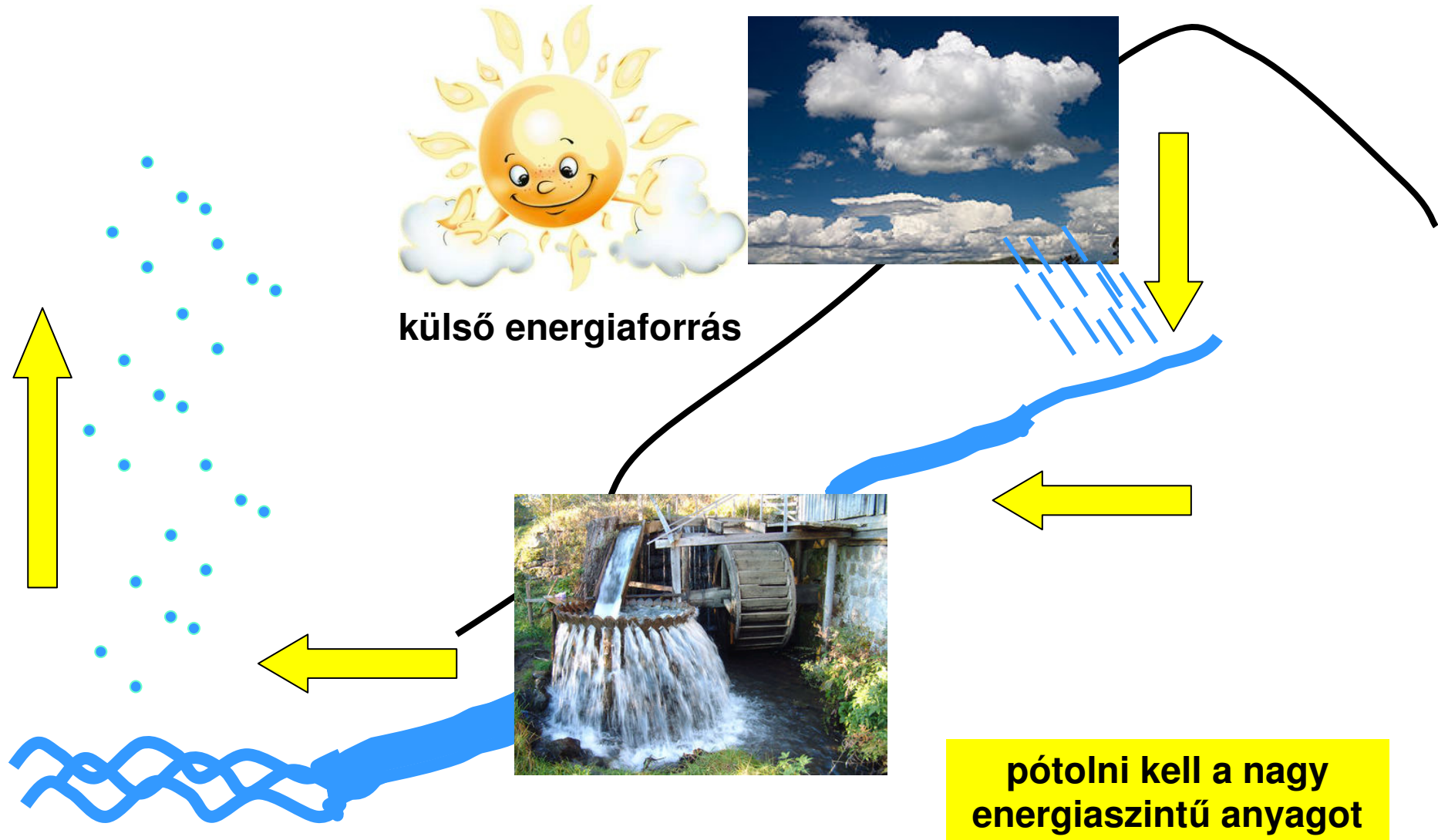


**pótolni kell a nagy  
energiaszintű anyagot**



**első lehetőség:  
körforgalom**

**Tartós energiatermeléshez  
tartósan fennmaradó  
potenciálkülönbség kell**



**pótolni kell a nagy  
energiaszintű anyagot**





**másik lehetőség:  
óriási anyagkészlet**

nem szigorúan állandó,  
de emberi mértékkel  
nagyon sokáig tartó  
folyamat

**Kérdés:  
miért tart ilyen sokáig?  
Miért nem ömlik ki  
egyszerre az egész?**



**pótolni kell a nagy  
energiaszintű anyagot**



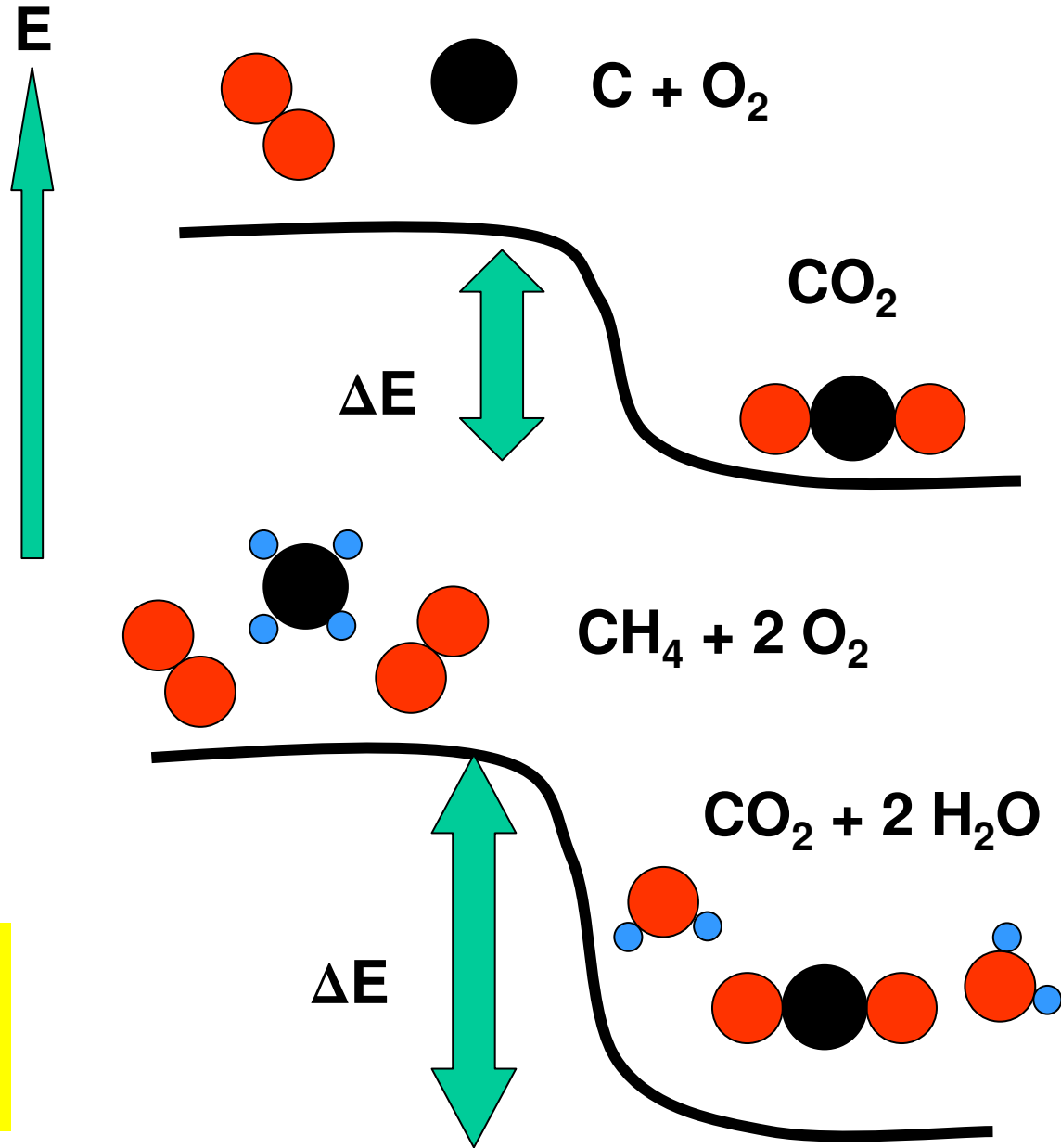
## Kémiai energetika

ugyanazon atomok  
másfajta  
elrendeződése:  
más energiájú  
rendszer

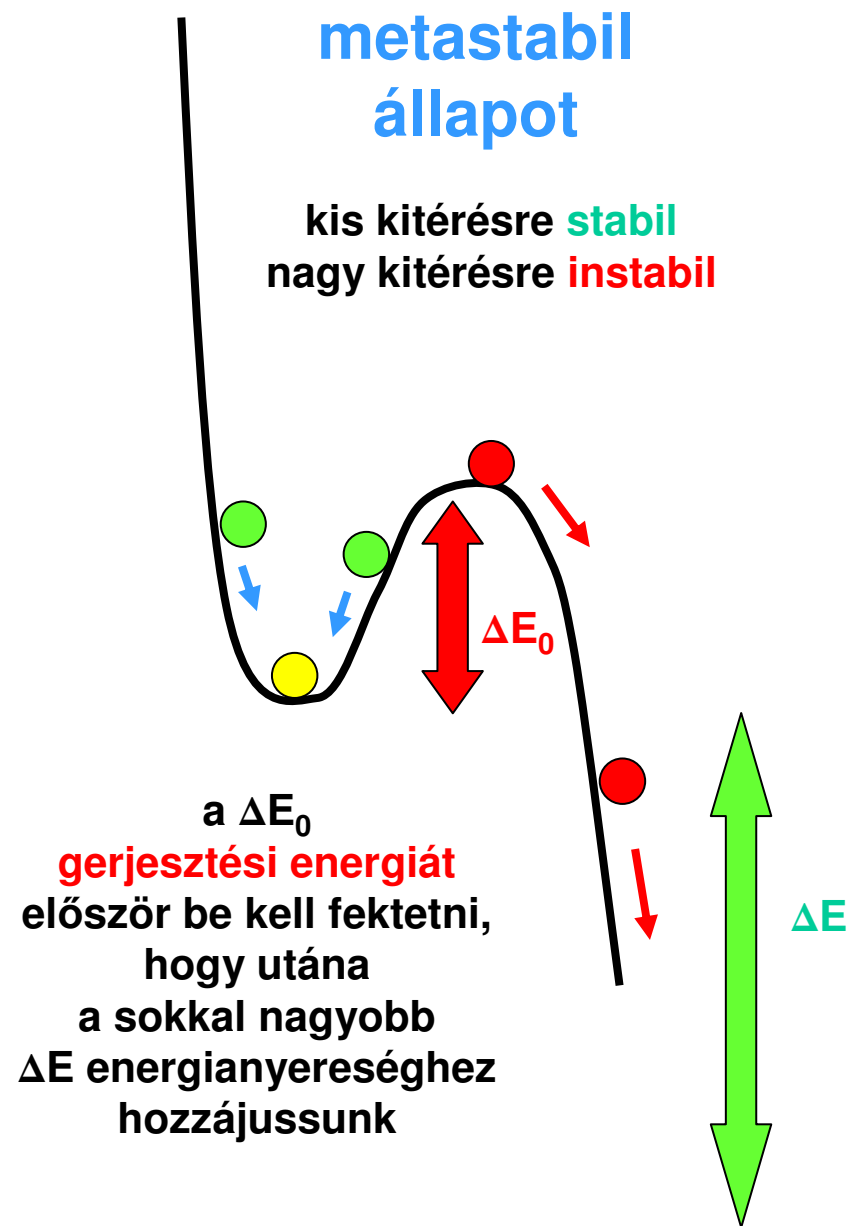
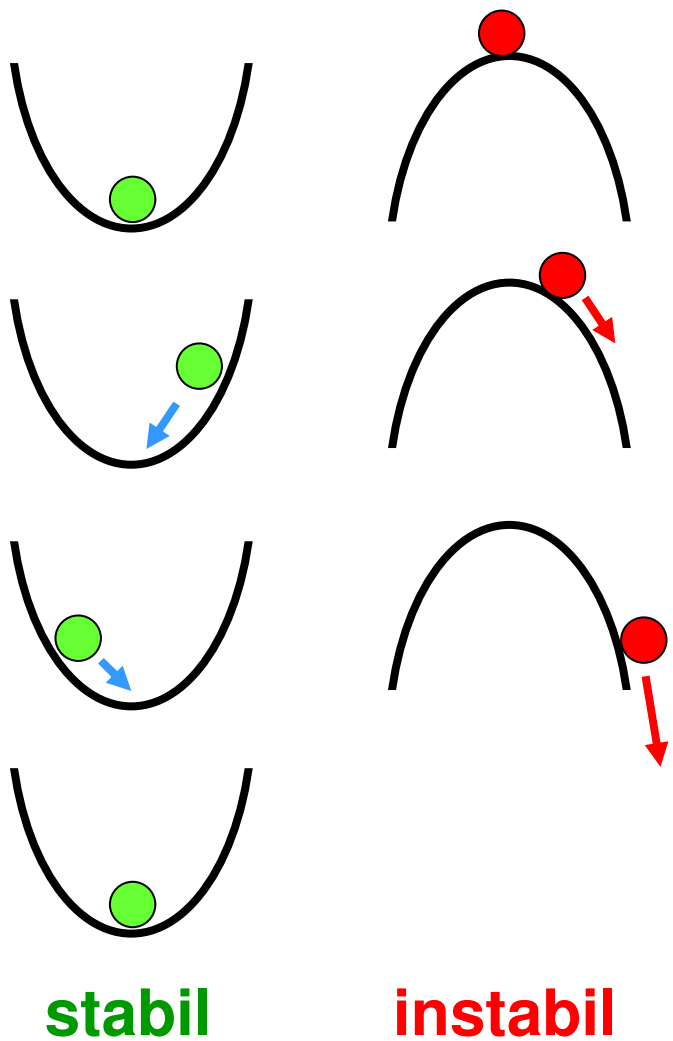
Kémiai folyamat:  
**atomátrendeződés:**  
a rendszer spontán  
átmegy a kisebb  
energiájú állapotba

a  $\Delta E$  energiakülönbség  
– általában hőmozgás  
formájában – felszabadul

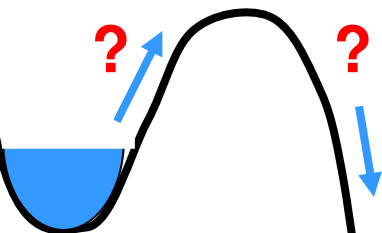
**Kérdés: miért van még a  
világon tiszta szén, metán és  
oxigén?  
Miért nem alakult át mind?**



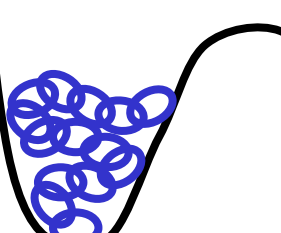
# Stabilitási viszonyok



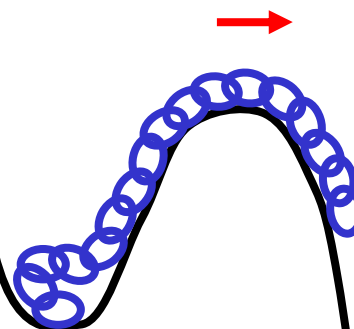
Hogyan folyik ki a víz a metastabil gödörből?



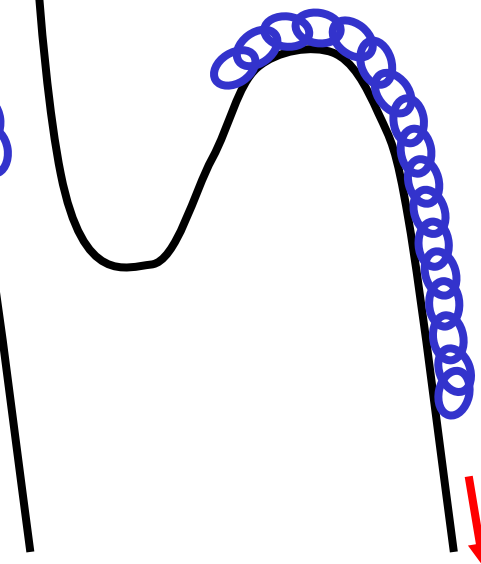
Hogyan folyik ki a **lánc** a metastabil gödörből?



Elegendő az anyag egy részét gerjesztett állapotba hozni!



A többit elintézi a kölcsönhatás, a **visszacsatolás**

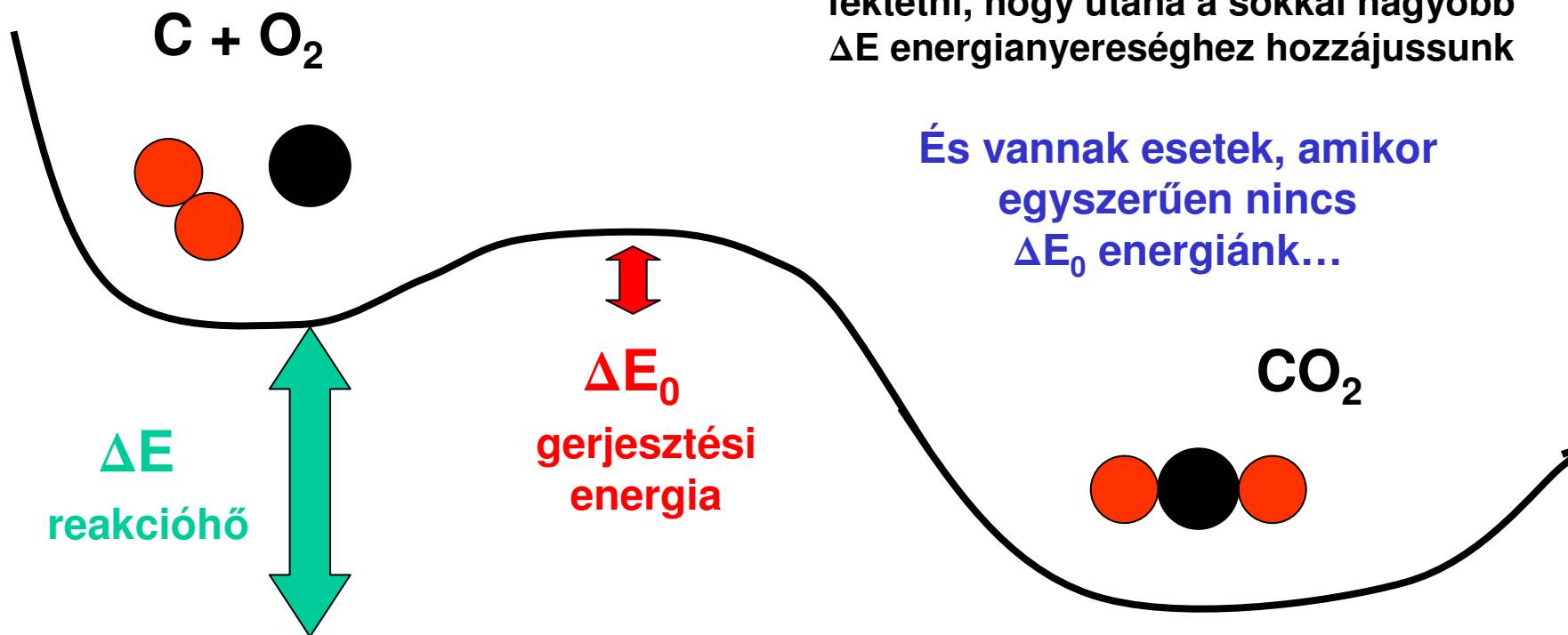


## Kémiai energetika revisited

Kérdés: miért van még a világon  
tisztá szén és oxigén?  
Miért nem alakult át mind?

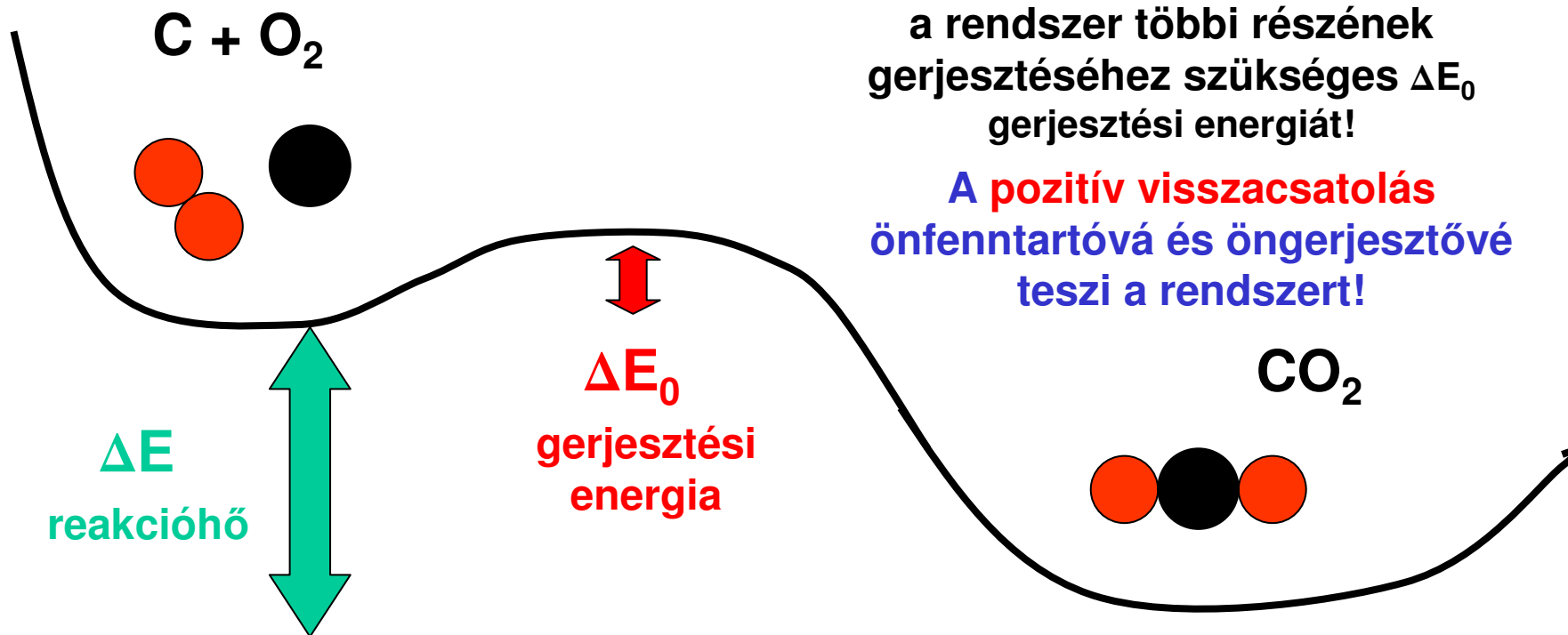
a  $\Delta E_0$  **gerjesztési energiát** először be kell  
fektetni, hogy utána a sokkal nagyobb  
 $\Delta E$  energianyereséghez hozzájussunk

És vannak esetek, amikor  
egyszerűen nincs  
 $\Delta E_0$  energiánk...



## Kémiai energetika revisited

Újabb kérdés: de ha a rendszer  
EGY RÉSZÉT sikerül gerjeszteni,  
reakcióba vinni, akkor mi  
történik? (Gondolj a lánkra!)



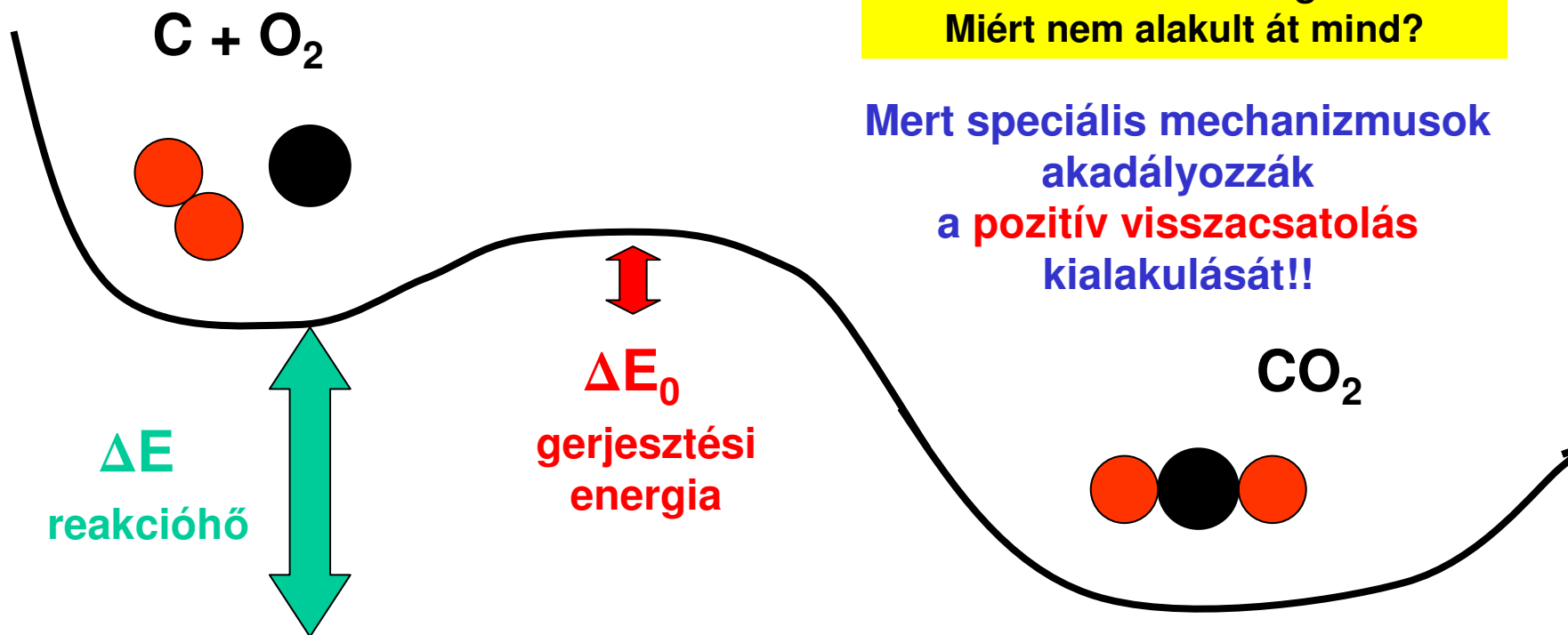
Akkor a felszabaduló  $\Delta E$  energia fedezi  
a rendszer többi részének  
gerjesztéséhez szükséges  $\Delta E_0$   
gerjesztési energiát!

**A pozitív visszacsatolás  
önfenntartóvá és öngerjesztővé  
teszi a rendszert!**

Ezért elég egy gyufa a gáztűzhely, a tábortűz és  
az erdőtűz gerjesztéséhez...



## Kémiai energetika revisited



A visszatérő kérdés:  
ha elegendő néhány molekulát  
gerjeszteni, a többit elintézi a  
pozitív visszacsatolás, akkor  
mégis miért van még a világon  
tiszta szén és oxigén?  
Miért nem alakult át mind?

Mert speciális mechanizmusok  
akadályozzák  
a pozitív visszacsatolás  
kialakulását!!

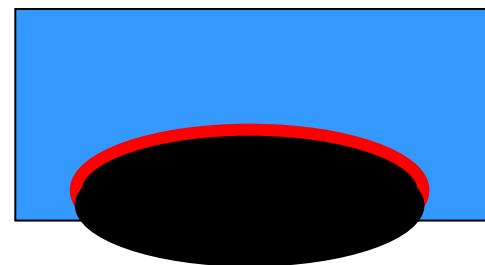
Ezért **NEM** elég egy gyufa a világ összes kémiai  
anyagának alapállapotba alakítására...



## Akadályozó mechanizmusok

### felületi érintkezés

az égő széndarab vagy fahasáb csak a felületén, és nem egész anyagában érintkezik az oxigénnel, ez korlátozza a reakció továbbhaladását



### a reagensek szétválasztása, adagolása

gáztűzhely, benzinmotor, rakéta, hegesztés: csak annyi anyag reagálhat, amennyi épp találkozik, amennyit engedünk



### lassú keveredés

a reagáló molekuláknak meg kell találniuk egymást

### a rendszer túl gyorsan szétesik

esetleg épp a felszabaduló energia dobja szét...

## Akadálytalan reakció:

molekuláris szinten elkevert anyag, csak molekulán belüli átrendeződés: gyors elemi lépések

## villámgyorsan terjedő reakció: robbanás





## Mi köze a kémiai reakcióknak a csillagokhoz?

A csillagokban nem atomok, hanem  
atommagok reakciója zajlik,

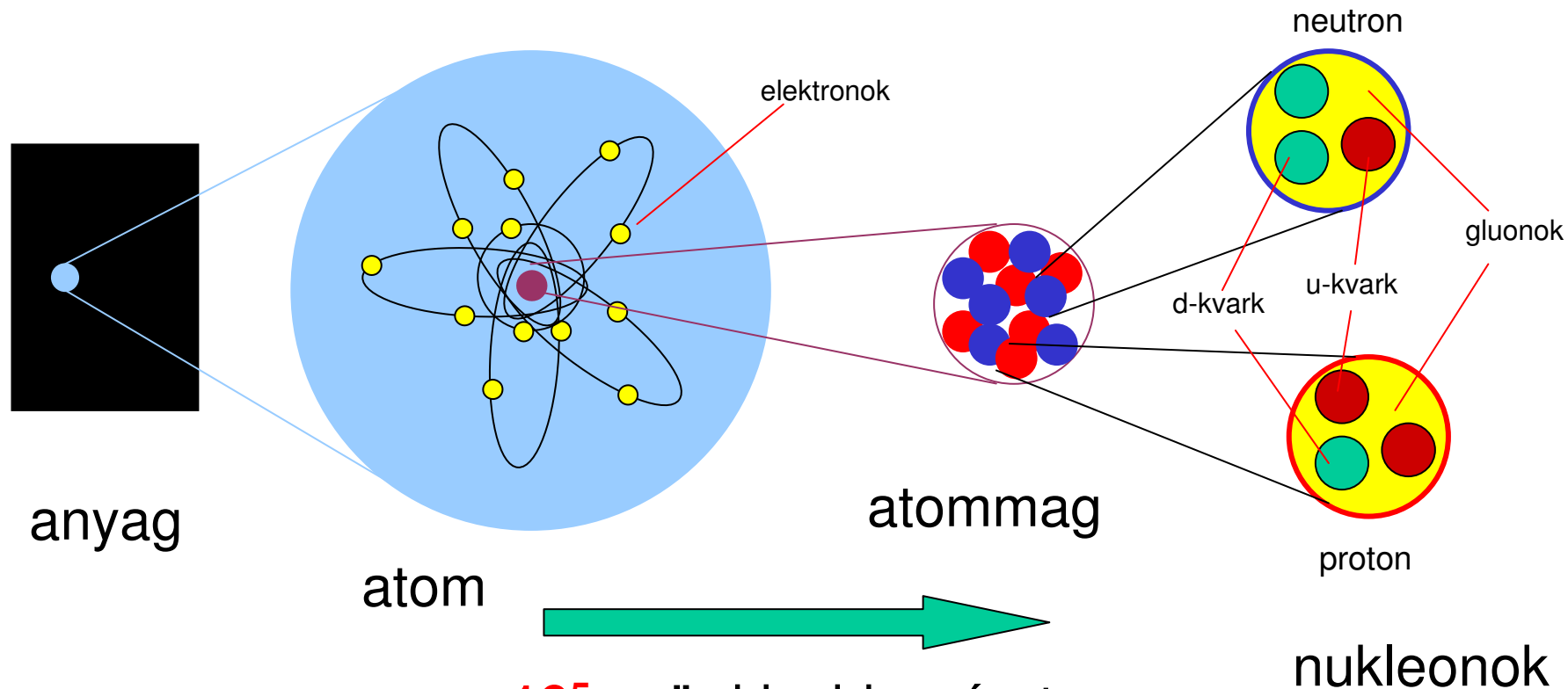
de a reakcióenergetikai viszonyok  
hasonlók a kémiához,

**(bár a szereplő energiák százezerszer  
nagyobbak)**

ezért hasonló fogalmakkal írhatók le, mint a  
kémiai reakciórendszerek.

Részletek: Atomcsill, 2011.09.21.  
dgy: Kirándulás a nukleáris völgybe





Mi tartja össze az atommagot?

$10^5$ -ször kisebb méret  
 $10^5$ -ször nagyobb energia

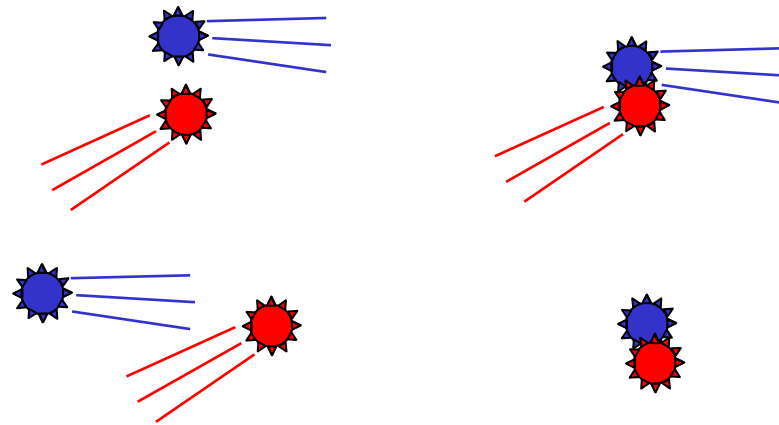
**A MAGERŐ**  
 (erős kölcsönhatás)  
**VONZÓERŐ**

$$n - n \approx n - p \approx p - p$$

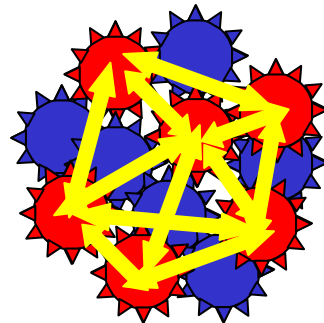
itt még egy kis elektromos taszítás is fellép...



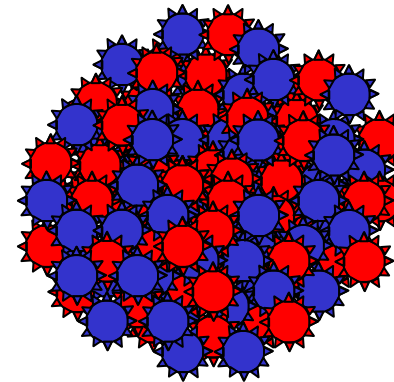
# „Bogáncsfizika”



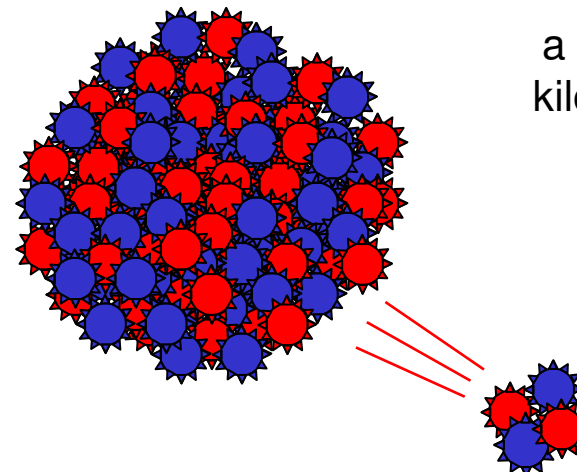
elektromos  
taszítóerő  
**MINDEN**  
protonpár között



# Összetettebb atommag



nagy bogáncsgömb



a túl nagy mag  
kilöki felesleges  
részeit



# Az atommagok térképe

protonok száma: **Z**

neutronok száma: **N**

**<sup>238</sup>U**  
2.342E7 Y  
α: 100.00%  
SF: 9.4E-8%

alfa-bomlás

**<sup>208</sup>Pb**  
STABLE  
52.4%

STABIL MAG

**<sup>128</sup>Pt**  
2.34 S  
ε: 100.00%

béta(+)-bomlás

**<sup>20</sup>F**  
11.07 s  
β-: 100.00%

béta-bomlás

**<sup>12</sup>O**  
0.40 MeV  
P

proton-emisszió

**<sup>27</sup>Sg**  
1 M  
SF

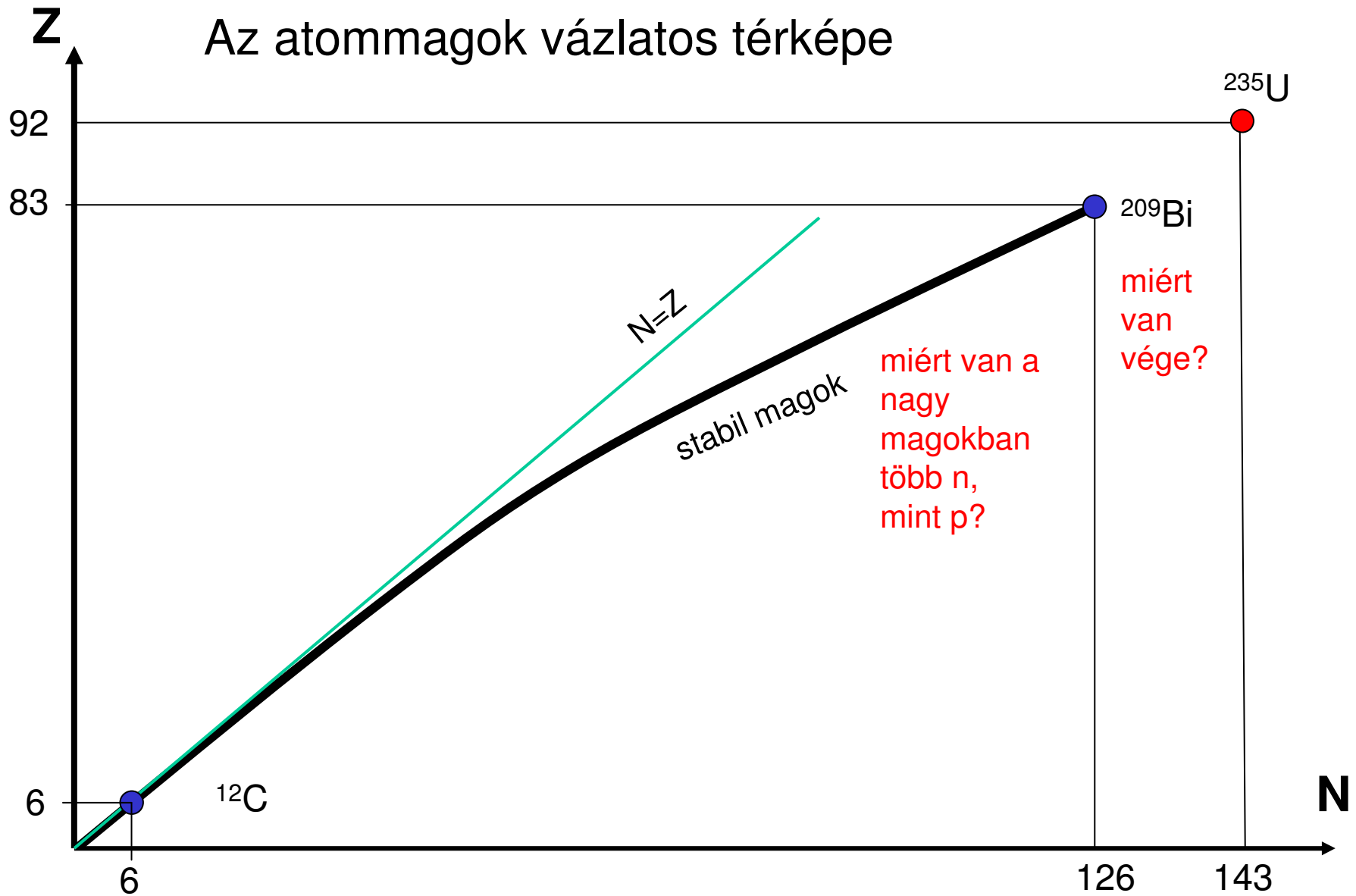
spontán hasadás

**<sup>28</sup>F**  
<40 NS  
N

neutron-emisszió

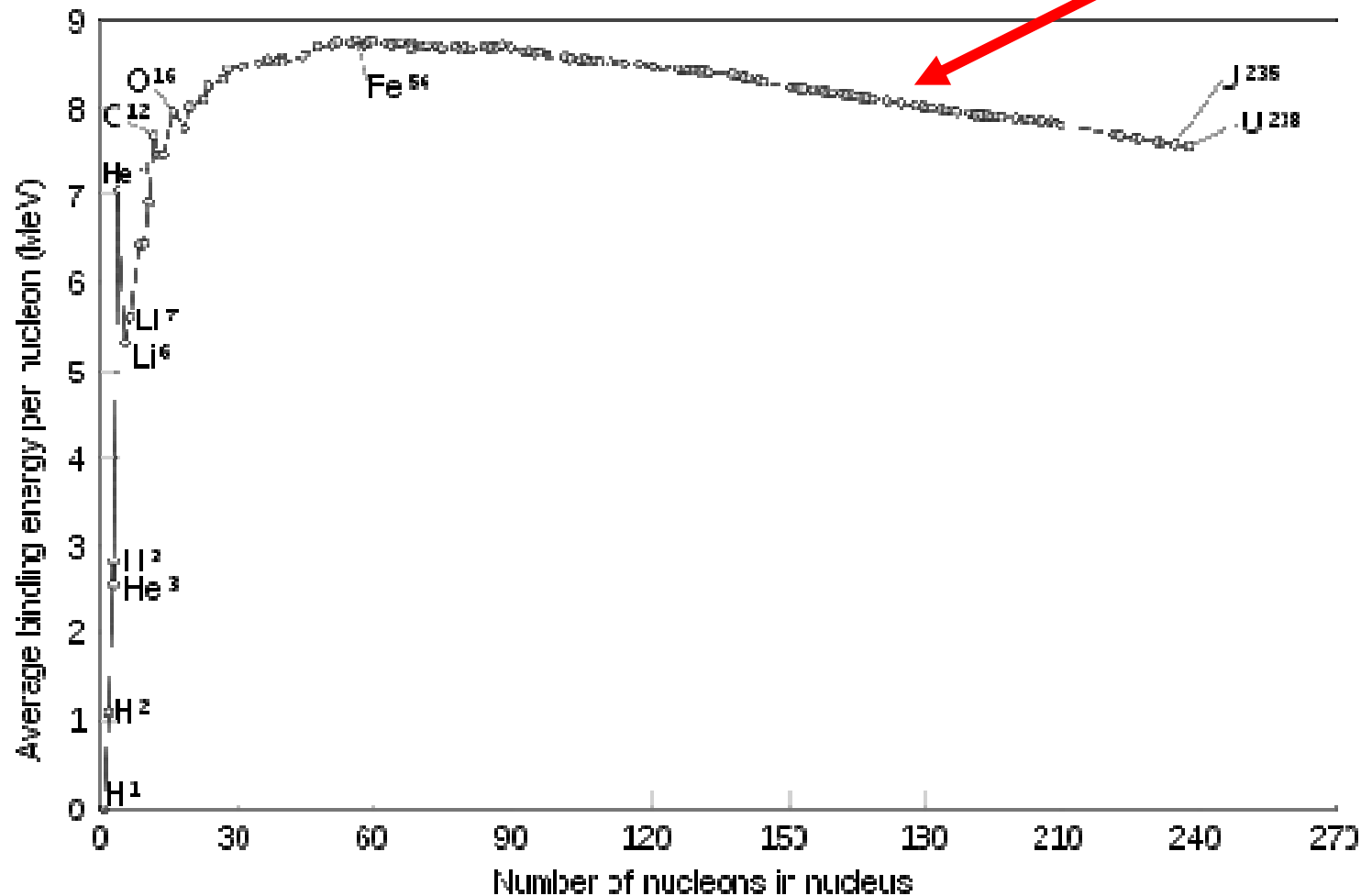


# Az atommagok vázlatos térképe



# Az atommagok kötési energiája: a „szétszedésükhöz” szükséges energia

végig a stabil magok  
vonalán

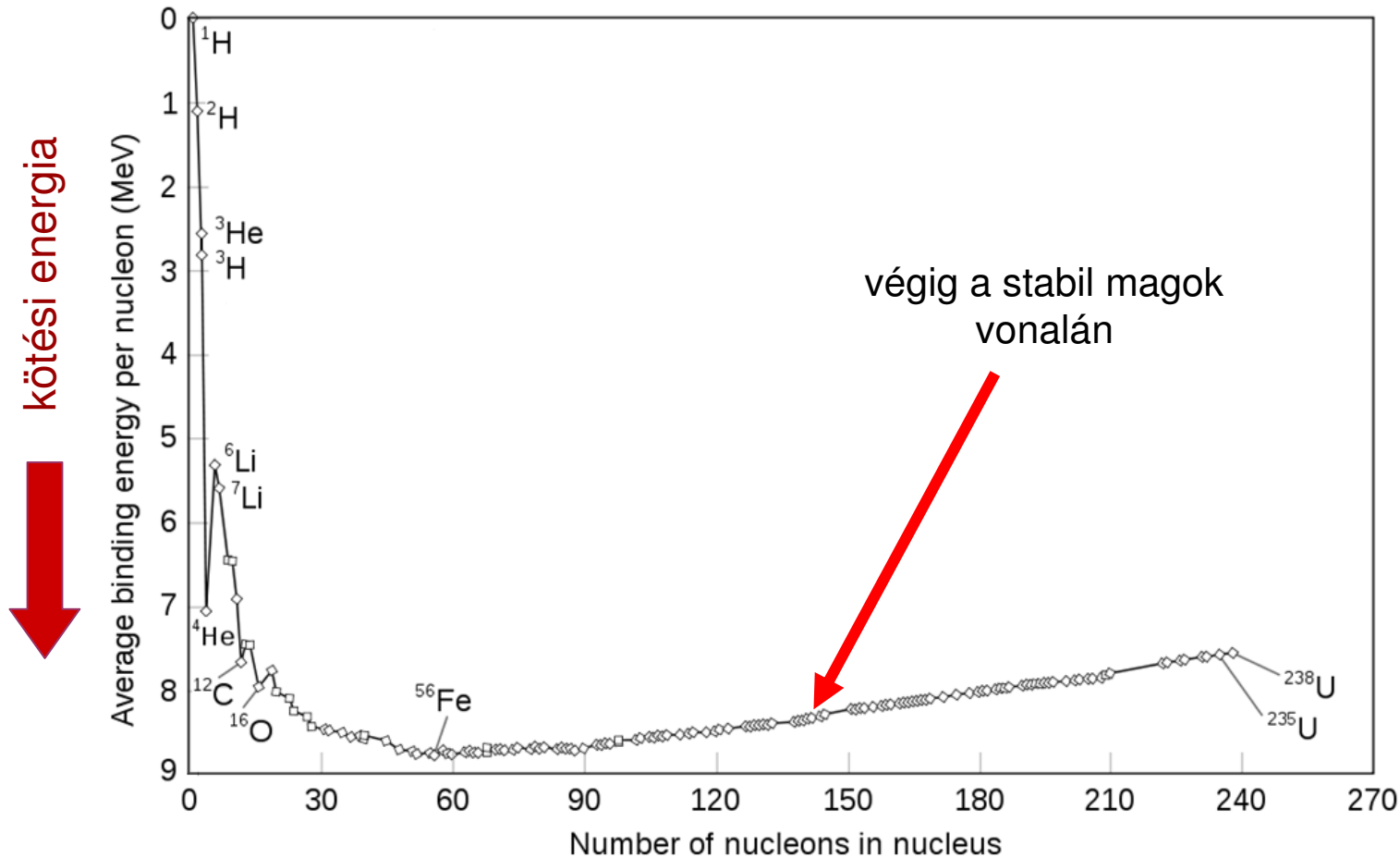


tömegszám

$$A = Z + N$$



# A nukleáris völgy

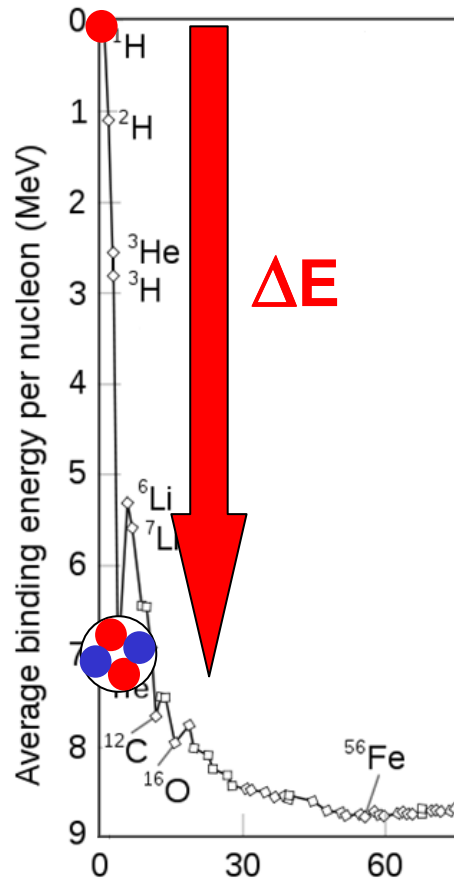
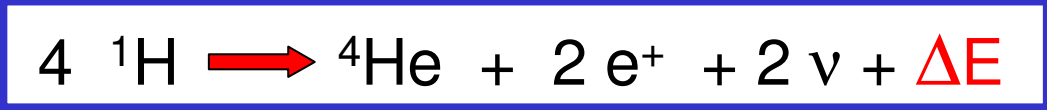


tömegszám

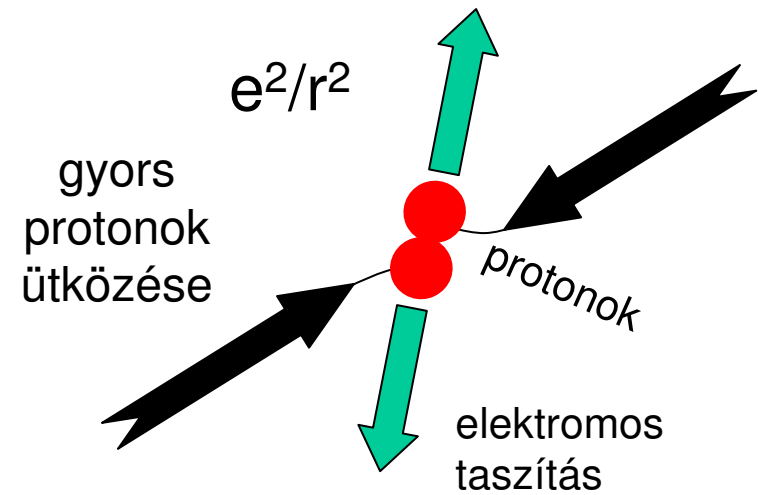
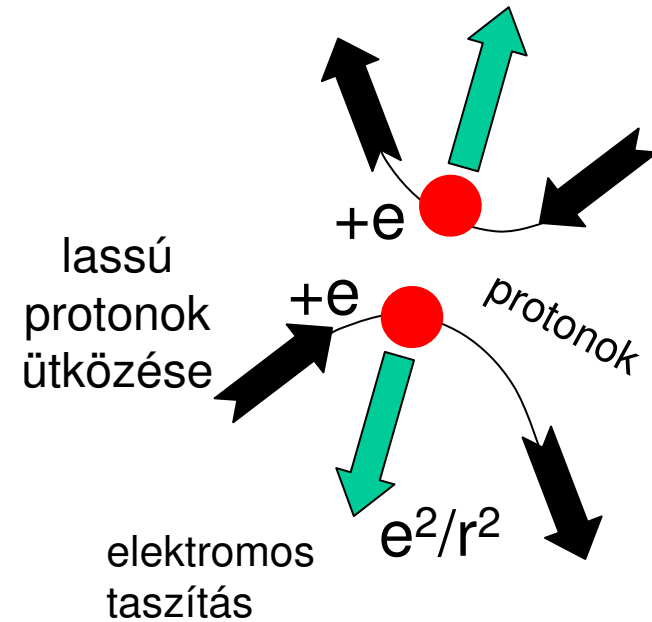
$$A = Z + N$$



# Magfúzió a Napban



első lépés:  
két proton  
ütközése:



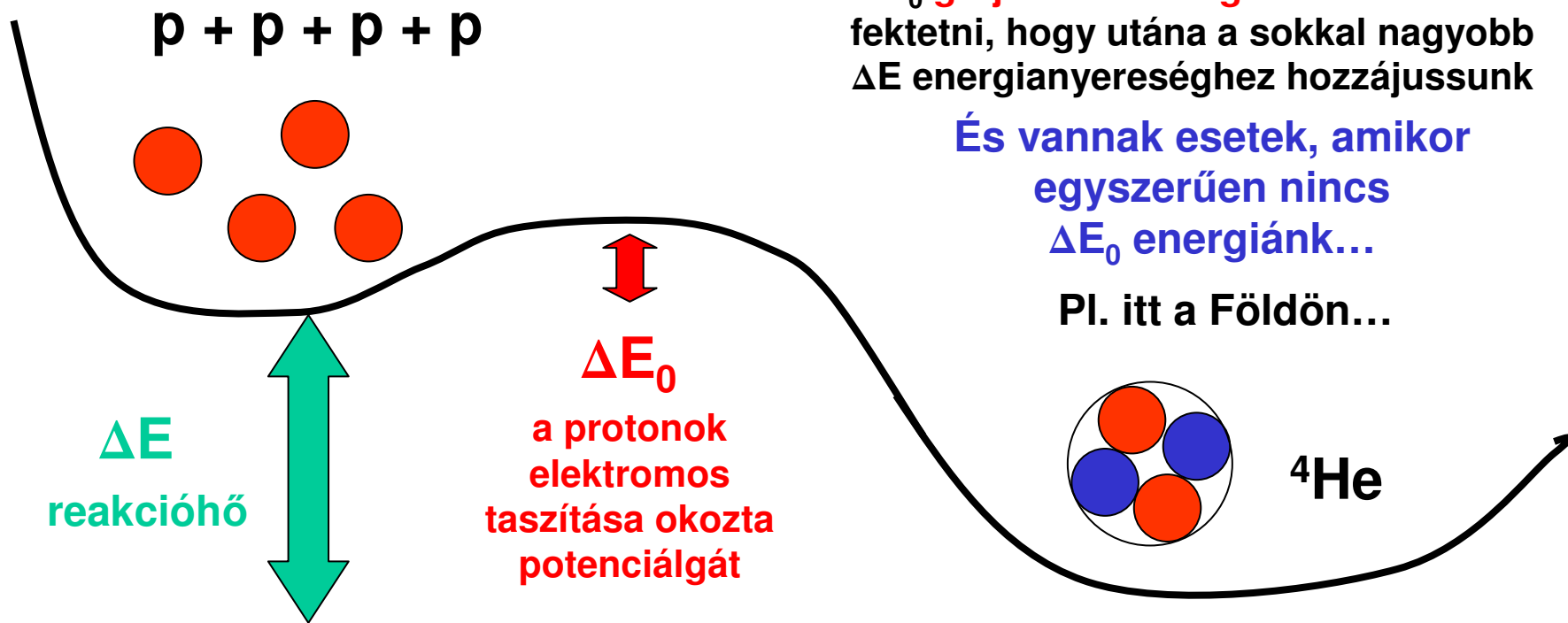
a Nap középpontjában 14 millió fok van!





Vizsgáljuk meg a **magfúziót**  
termodinamikai  
szempontból!

**Kérdés: miért van még a világon  
hidrogén atommag?  
Miért nem alakult át mind  
héliummá?**



a  $\Delta E_0$  **gerjesztési energiát** először be kell fektetni, hogy utána a sokkal nagyobb  $\Delta E$  energianyereséghez hozzájussunk

És vannak esetek, amikor  
egyszerűen nincs  
 $\Delta E_0$  energiánk...

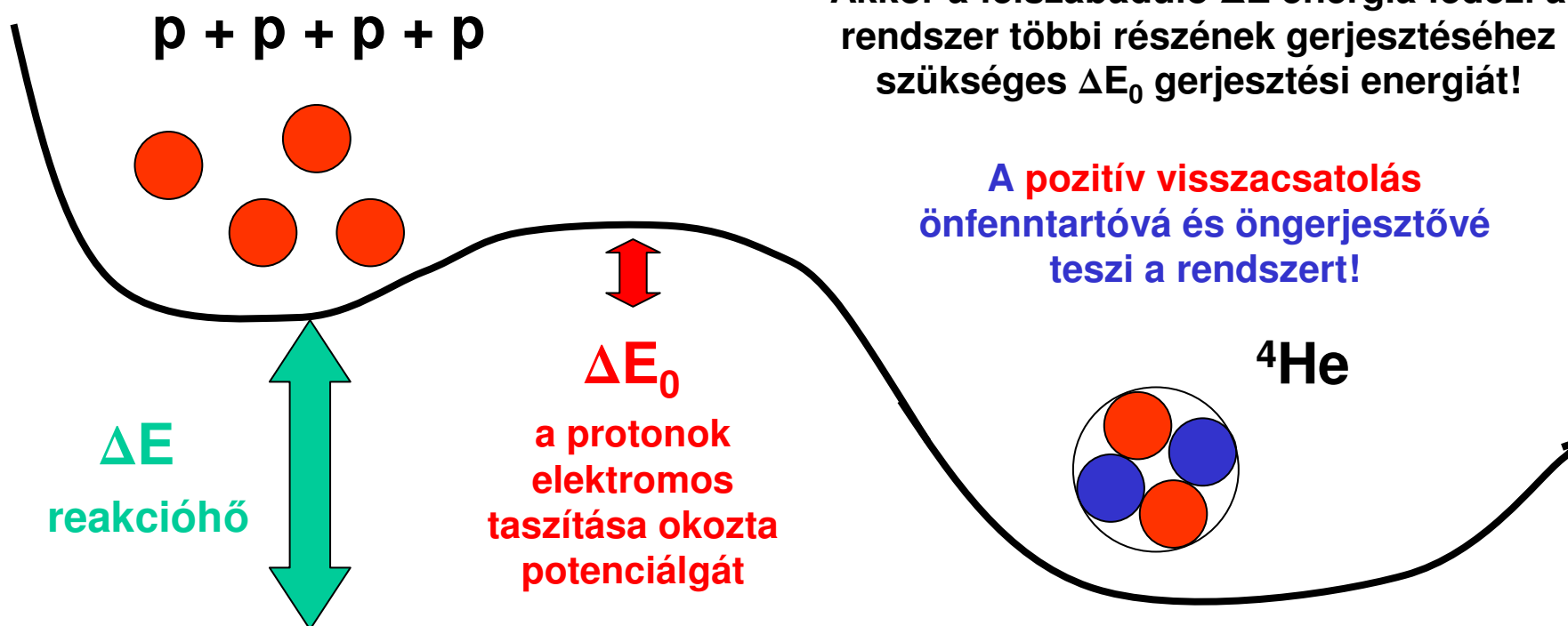
Pl. itt a Földön...

A potenciálgát átlépéséhez nagy mozgási energia, tehát magas hőmérséklet kell. Kb. 10 millió K!



Vizsgáljuk meg a **magfúziót**  
termodinamikai  
szempontból!

Újabb kérdés: de ha a rendszer  
EGY RÉSZÉT sikerül gerjeszteni,  
reakcióba vinni, akkor mi  
történik? (Gondolj a láncrea!)



Akkor a felszabaduló  $\Delta E$  energia fedezi a  
rendszer többi részének gerjesztéséhez  
szükséges  $\Delta E_0$  gerjesztési energiát!

A pozitív visszacsatolás  
önfenntartóvá és öngerjesztővé  
teszi a rendszert!



A felszabaduló  $\Delta E$  energia fedezi a rendszer többi részének gerjesztéséhez szükséges  $\Delta E_0$  gerjesztési energiát!

Ezt próbáljuk megvalósítani a **fúziós reaktorokban**.

### Miért nem sikerül a tartós magfúzió a Földön?

Szobahőmérsékletű környezetben kell többször tízmillió fokos plazmát létrehozni, melegen tartani és tárolni, stabilizálni, elszigetelni a környezettől és a berendezés falától, ugyanakkor ki kell vezetni a termelődő energiát.

**Egymásnak ellentmondó technikai feltételek...**

Egyelőre a termelt energia nem elegendő a folyamat fenntartásához, a rendszer instabil. Talán majd harminc év múlva...

Atomcsill, 2011. 01.13.  
Zoletnik Sándor: Mágneses Nap a laboratóriumban -- szabályozott magfúziós kutatások

**A pozitív visszacsatolás**  
önfenntartóvá és öngerjesztővé teszi a rendszert

### Miért sikerül ugyanez a csillagoknak?

Zseniális megoldás/1: **nem kell tartály!**  
A rendszert összetartó eszköz maga az üzemanyag: a csillag anyaga, pontosabban ennek gravitációja.

Zseniális megoldás/2: **nem kell fűtés!**  
A rendszert felmelegítő tényező maga a gravitáció, a csillag összehúzódása.

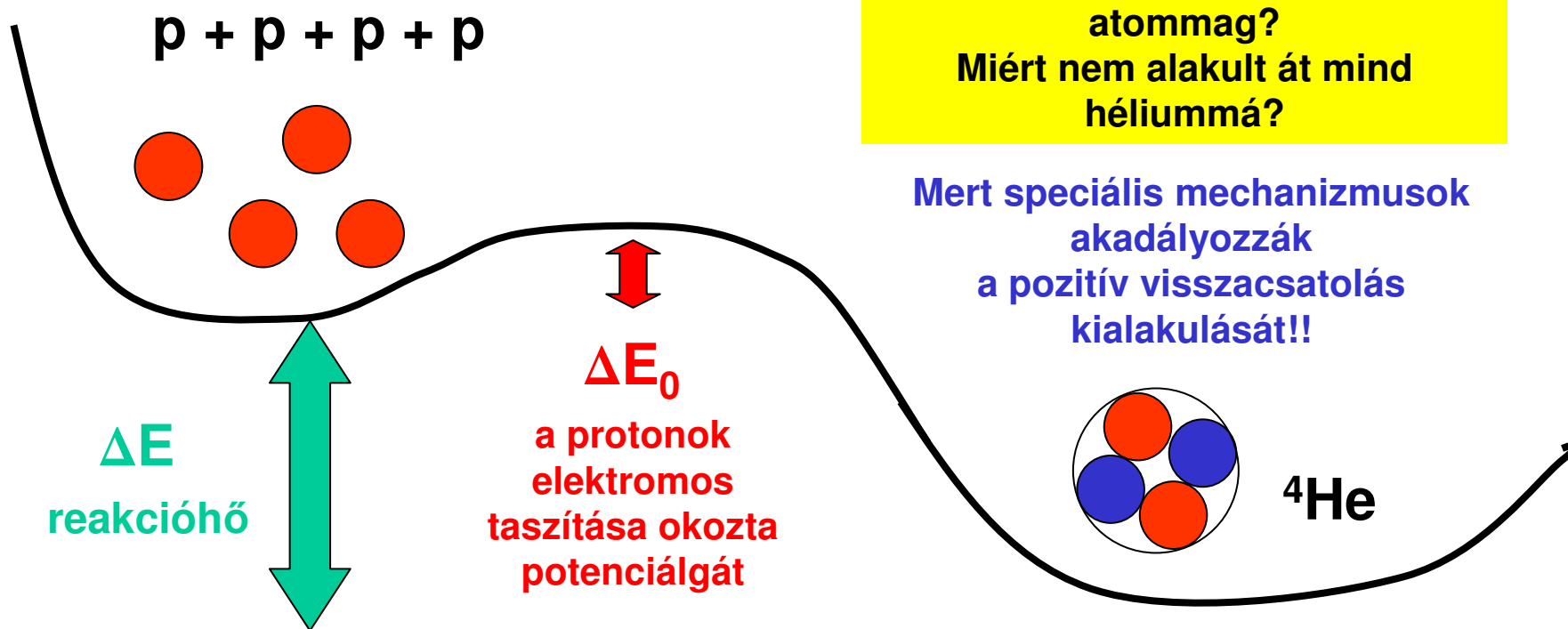
Atomcsill, 2012. 01.19.  
dgy: A lehűléstől forrósodó téglá – avagy a csillagok termodinamikája 1.

Zseniális megoldás/3: **nem kell hűtés!**  
A csillaganyag elvezeti, majd kisugározza a termelt energiát.

**Harmonikusan összeillő technikai részletek: működő berendezés!**



Vizsgáljuk meg a **magfúziót**  
termodinamikai  
szempontból!



A visszatérő kérdés:  
ha a csillagokban elegendő  
néhány protonnyi fúziót  
megvalósítani, a többit elintézi a  
pozitív visszacsatolás, akkor  
miért van még a világon hidrogén  
atommag?  
Miért nem alakult át mind  
héliummá?

Mert speciális mechanizmusok  
akadályozzák  
a pozitív visszacsatolás  
kialakulását!!

Vajon működnek-e a csillagokban a hagyományos akadályozó  
mechanizmusok?



## Vajon működnek-e a csillagokban a hagyományos akadályozó mechanizmusok?

**felületi érintkezés**

semmiféle felület sincs, a csillag anyaga homogén



**a reagensek szétválasztása, adagolása**

ilyen sincs, sőt nincs is kétféle reagens, proton a protonnal reagál



**lassú keveredés**

minden anyag össze tökéletesen össze van keverve



### Akadálytalan reakció:

atomi szinten elkevert anyag, közvetlen érintkezés, nagy hőmérséklet: gyors elemi lépések

**villámgyorsan terjedő reakció: robbanás**





**A Cár-bomba, 100 Mt, 1961.10.30.**

A Földön valóban létre tudtunk hozni  
töredék másodpercig tartó magfúziót

## Akadályozó mechanizmus:

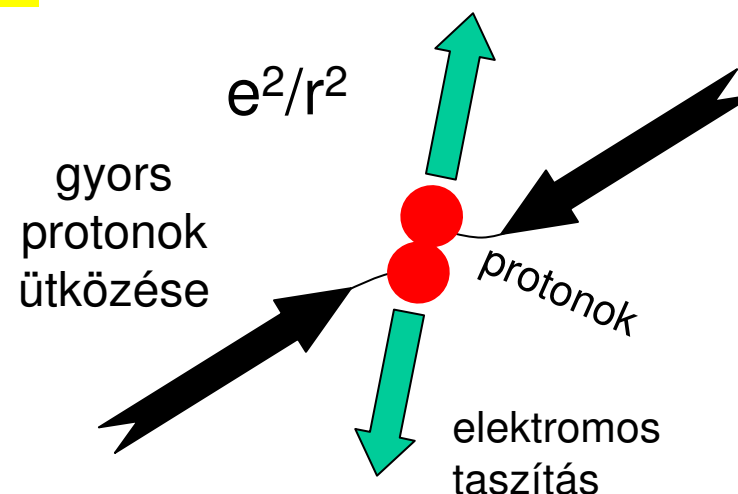
a rendszer túl gyorsan szétesik      épp a felszabaduló energia dobja szét...

## De miért nem robbannak fel a csillagok?

Ha valóban az lenne a reakció,  
hogy két proton összetapad,  
akkor fel is robbannának!



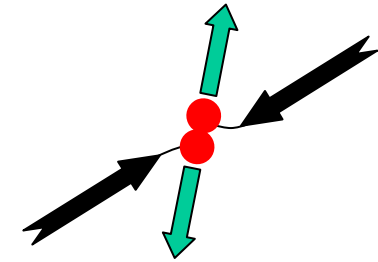
A H-bombák tervezői sokat dolgoztak azon, hogy legalább egy töredék másodpercig egyben maradjon a rendszer...



**Speciális stabilizáló mechanizmus** akadályozza a villámgyors magfúziós folyamatot

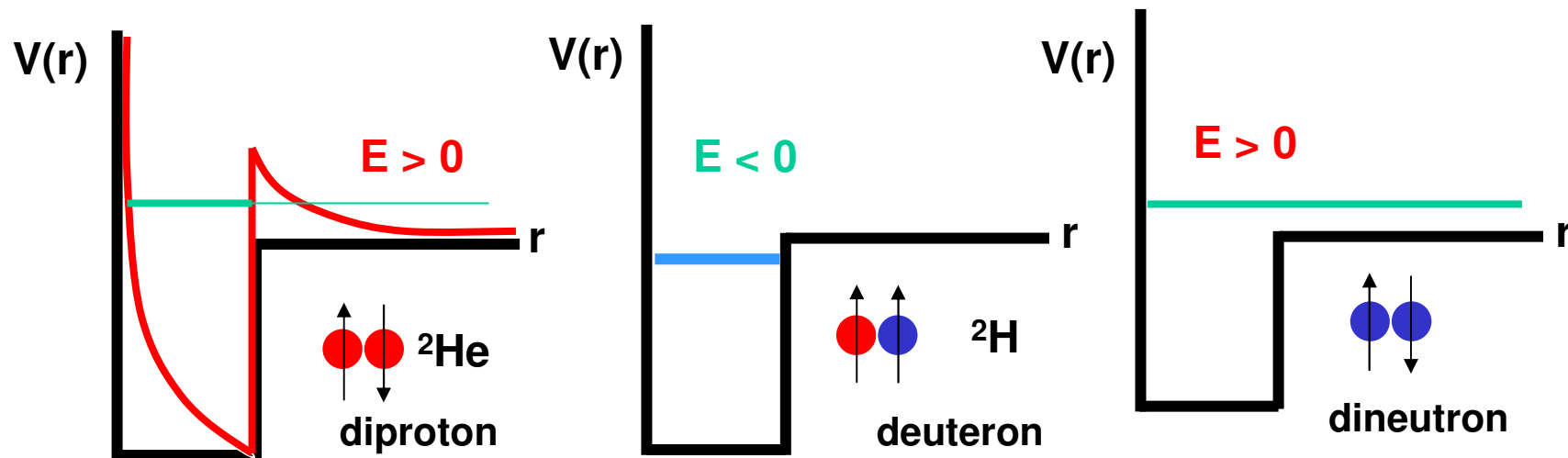
(hasonló néhol a kémiában is előfordul)

az energiatermelő folyamat egyik kiinduló anyagát helyben, frissen kell létrehozni!



ugyanis

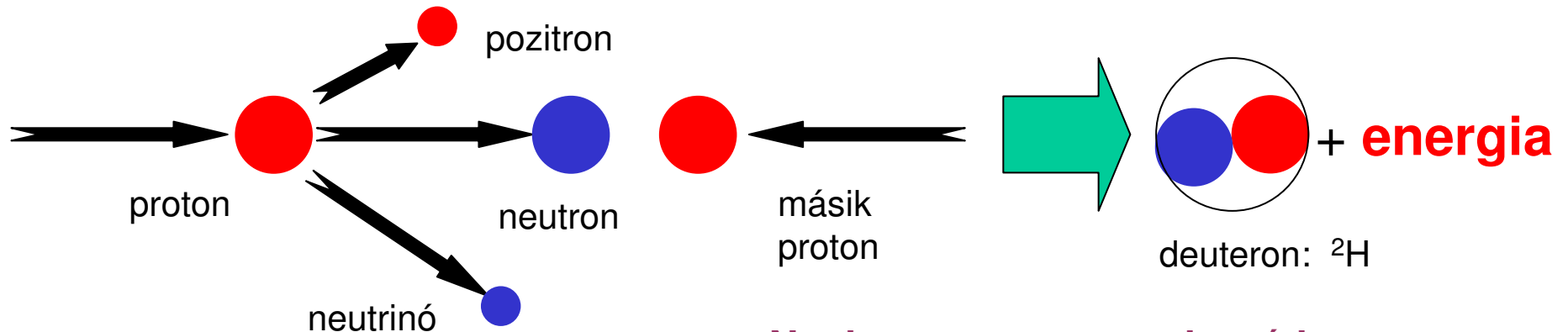
két proton kötött állapota, a  ${}^2\text{He}$  atommag **NEM LÉTEZIK!**





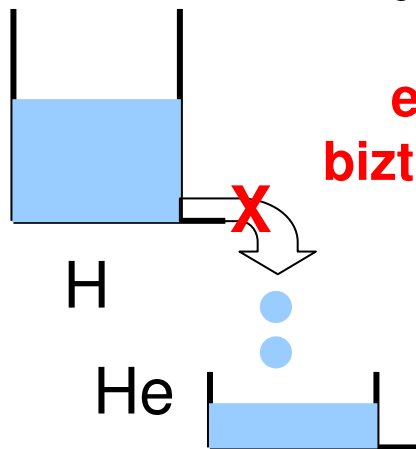
két proton kötött állapota, a  ${}^2\text{He}$  atommag NEM LÉTEZIK!

segít a **gyenge kölcsönhatás**:



a Napban egy protonnal ez átlagosan  
1 millió évente történik meg

**ez a magfúzió  
biztonsági szelepe!**



a további folyamatokat már  
az erős kölcsönhatás  
kormányozza: kb.  $10^{-10}$  s



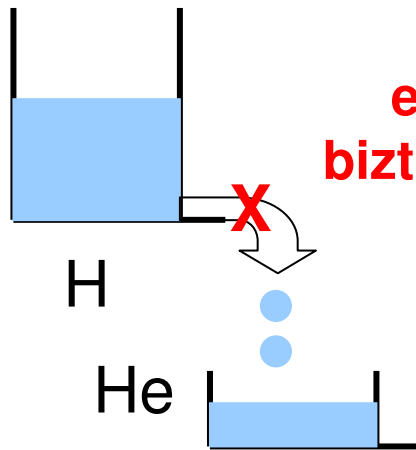
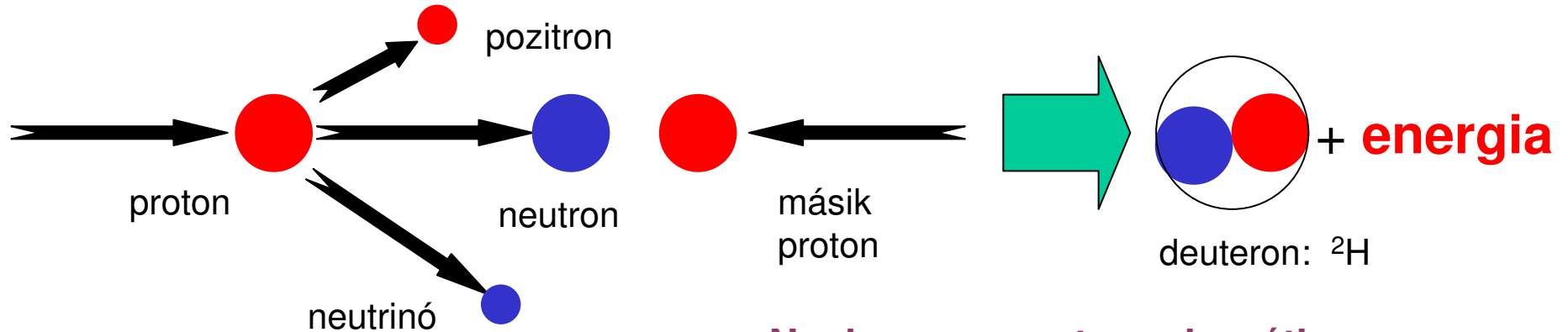
Ha a diproton létezne, a fúziót időskáláját  
is az erős kölcsönhatás szabályozná:

**az összehúzódó gázfelhő a kritikus  
hőmérsékleten azonnal szétrobbanna**



két proton kötött állapota, a  ${}^2\text{He}$  atommag NEM LÉTEZIK!

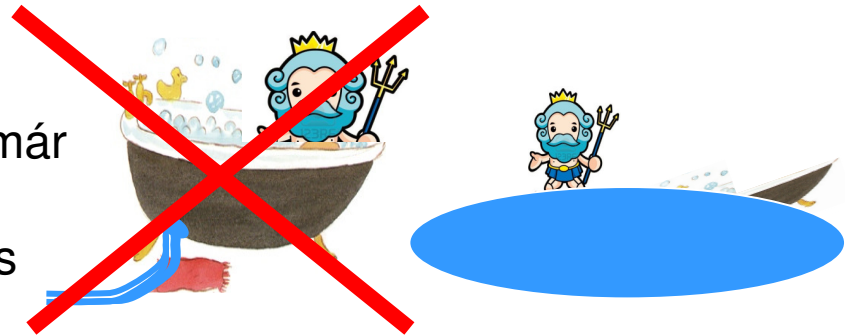
segít a **gyenge kölcsönhatás**:



**ez a magfúzió  
biztonsági szelepe!**

a további folyamatokat már  
az erős kölcsönhatás  
kormányozza: kb.  $10^{-10}$  s

a Napban egy protonnal ez átlagosan  
1 millió évente történik meg



Ha a diproton létezne, a fúziót időskáláját  
is az erős kölcsönhatás szabályozná:

**az összehúzódó gázfelhő a kritikus  
hőmérsékleten azonnal szétrobbanna**



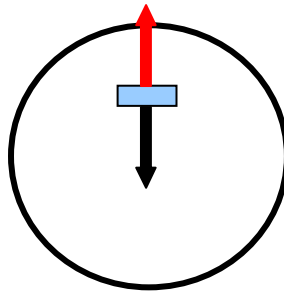
## Csillag:

ez a magfizikai trükk mechanikus szelepek és csövek meg szilárd felületek nélkül megoldja az üzemanyag lassú adagolását

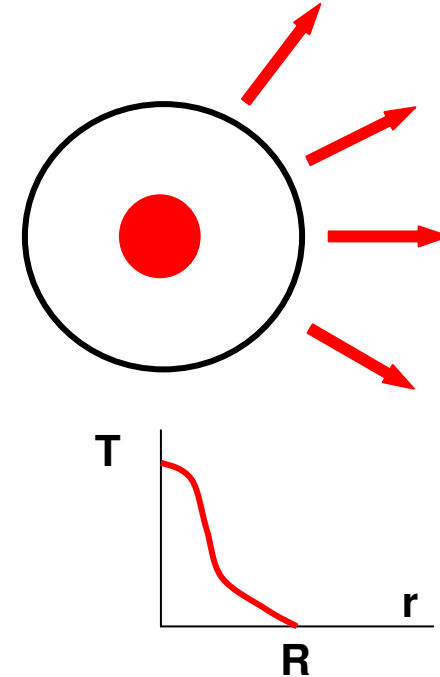
további önszabályozási  
mechanizmusok:

mechanikai, hidrosztatikai:

sugár- + hidrosztatikai  
nyomás  
gravitáció



termikus,  
hővezetési,  
energetikai:



a csillag egy negatív visszacsatolású,  
önszabályozó nukleáris kazán

mechanikai, termikus és sugárzási  
egyensúlyban

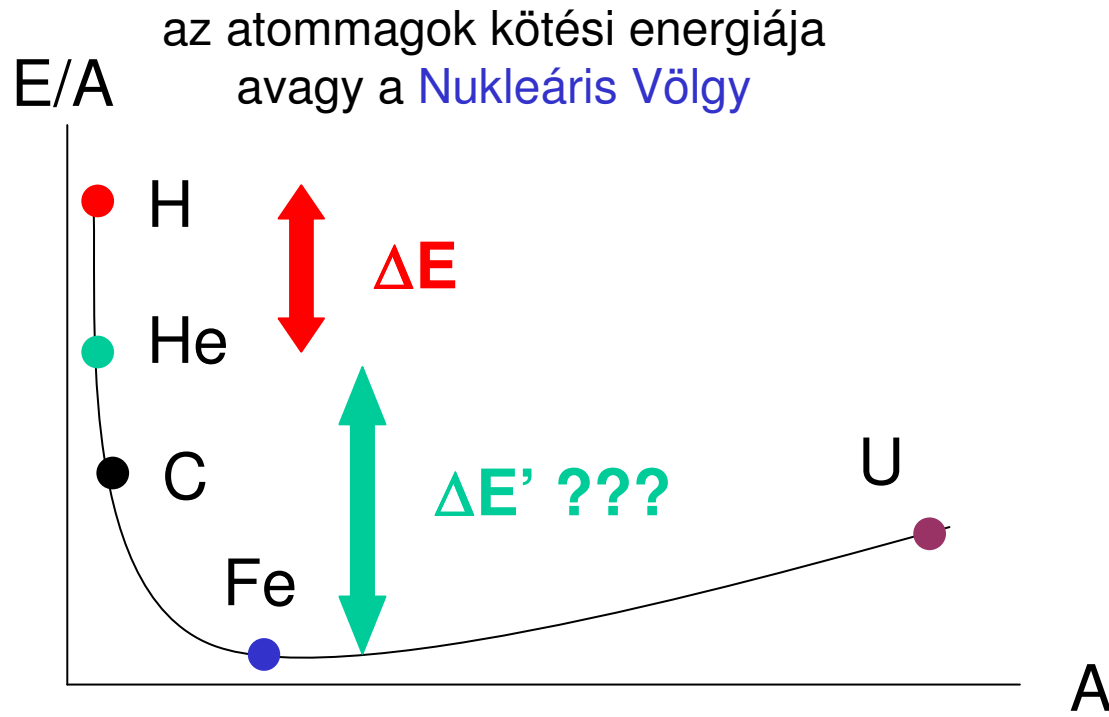
**Meddig?**

amíg el nem fogy  
a hidrogén...

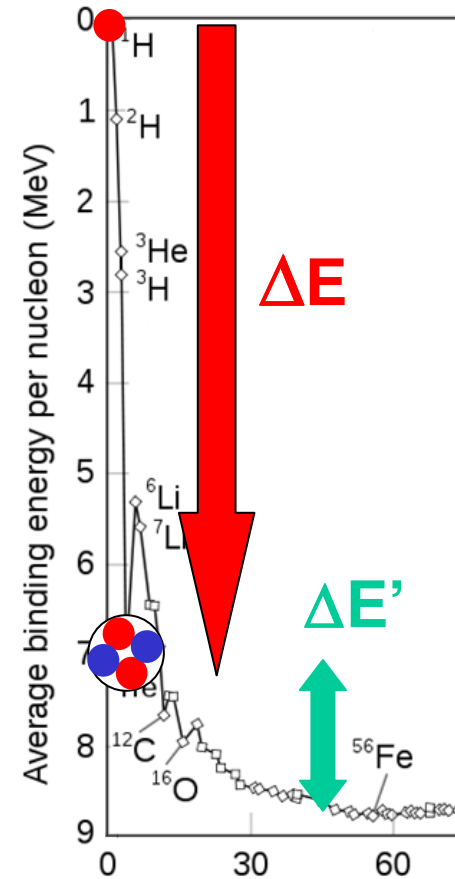
a centrális hőmérséklettől  
(azaz a tömegtől) függően  
10 millió – 100 milliárd év



# Honnan származik a kisugárzott energia?



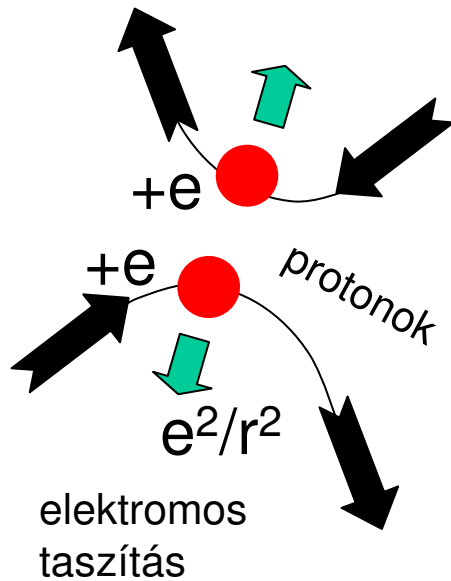
A  ${}^4\text{He}$  még nem a végső szó, még nem a legkisebb energiájú állapot!



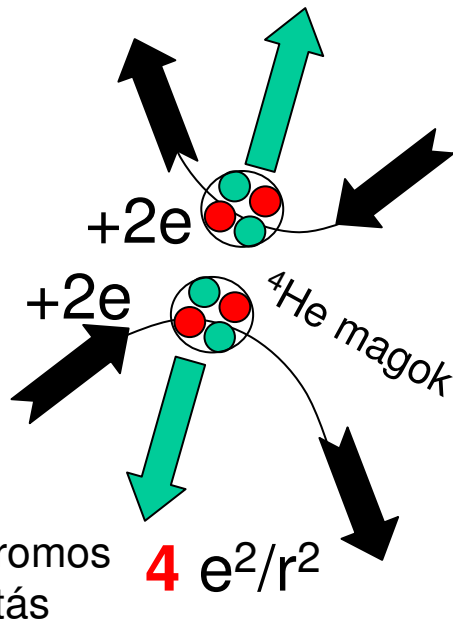
De a  ${}^4\text{He}$  egy mély metastabil gödörben van:

Kis energiával gerjeszthetetlen, inert anyag: **HAMU**





protonok  
ütközése



$^4\text{He}$  magok  
ütközése

Négyszer nagyobb energia,  
azaz sokkal nagyobb  
központi hőmérséklet kell  
ahhoz, hogy a  $^4\text{He}$  magok  
reakcióképes közelségbe  
kerüljenek!

Ehhez fel kell borítani a  
csillag jól bevált termikus és  
mechanikai egyensúlyát

De az úgyis felborul, amikor  
elfogy a centrumban a  
hidrogén...



## Ha elfogy a hidrogén...

az egyensúly megbomlik, minden átrendeződik

a gravitáció összehúzza a centrumot  
(közben a külső héj felfúvódik)

ismét a régi trükk a negatív fajhővel:  
a centrum melegszik

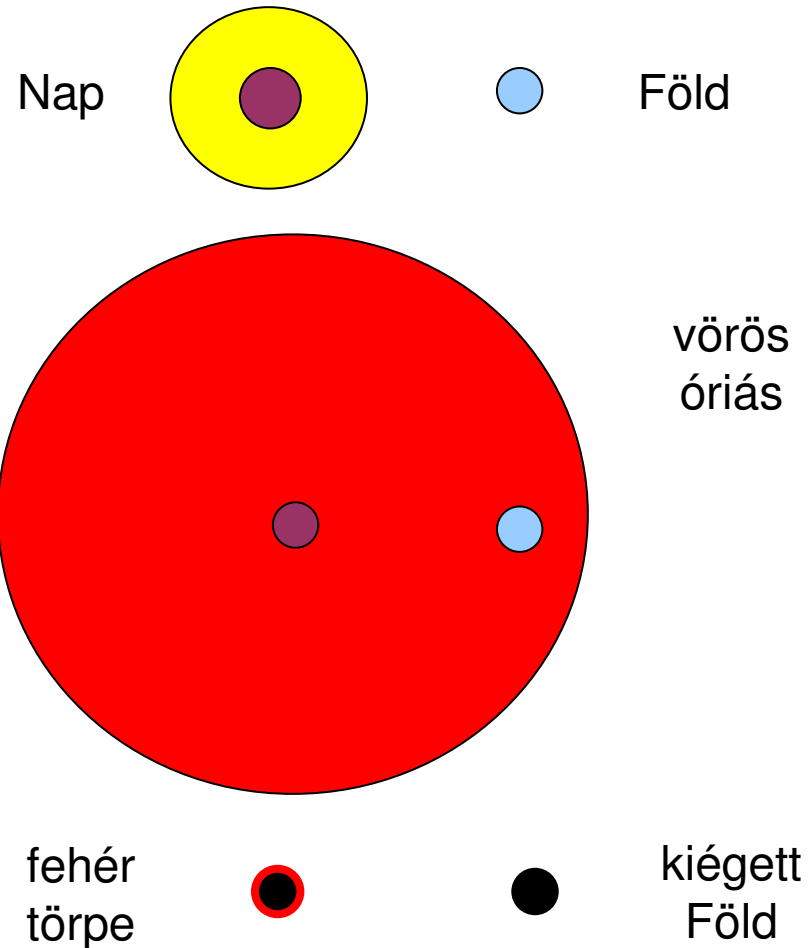
ha eléri a szükséges hőmérsékletet,  
a metastabil helyzet „kiolvad”,  
**a hamu aktivizálódik, üzemanyag lesz belőle:**

beindul a hélium-fúzió

**FOLYT KÖV:  
a csillag termodinamikai kalandjai még nem értek véget...**

bár van, akinek véget értek:  
a Napban nem lesz elég meleg  
a további fúzióhoz...

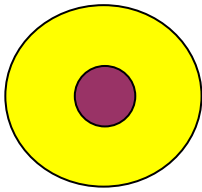
túl kicsi a tömege!



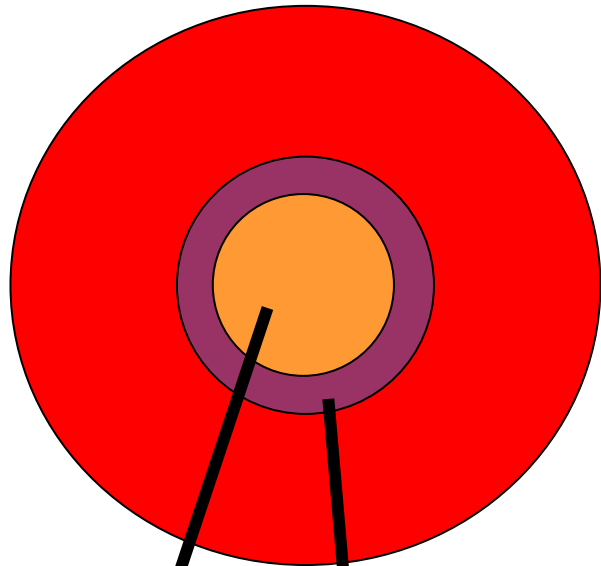
a vörös óriásból törvényszerűen fehér törpe lesz... (*pol. incorrect, 1976*)

röpke ötmilliárd év múlva





nagyobb  
tömegű  
csillag

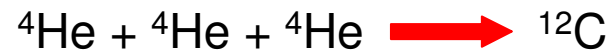
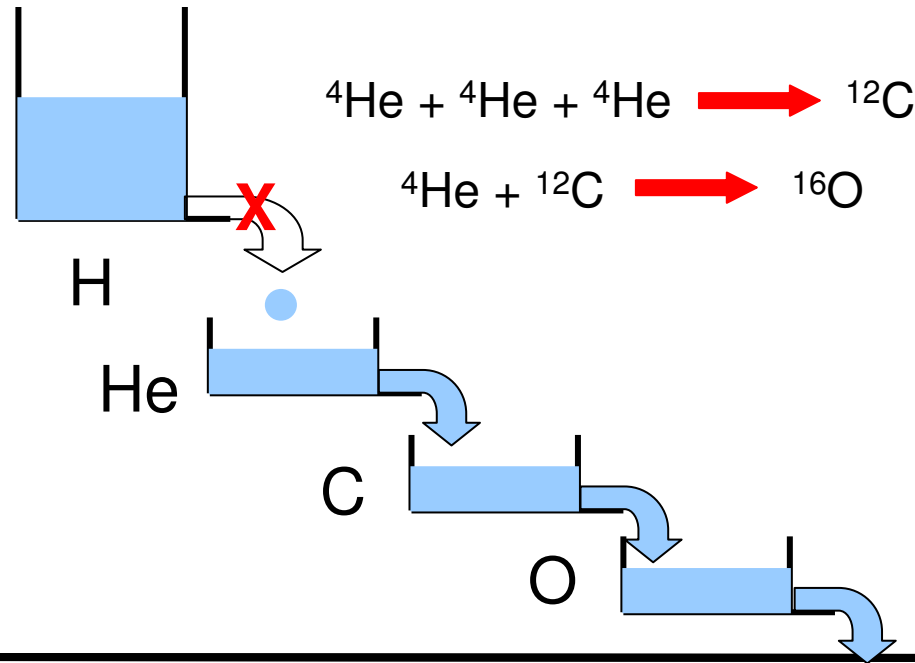
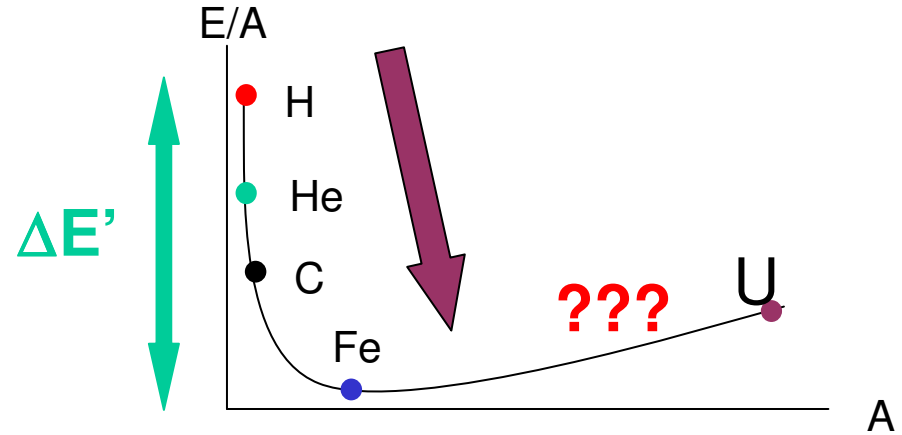


vörös  
óriás

He-  
égető  
mag

H-  
égető  
héj

tovább a nukleáris lejtőn...



**Miért nem tudunk az  
otthoni kályha  
hamujával fűteni?**

**TUDUNK!**

az anyagban sokféle szabadsági fok  
gerjeszthető, különböző  
energiatartományokban

a kályha hamuja elérte a kémiai  
szabadságfokok energetikai  
minimumát:  
az elektronfelhő további átrendezése  
nem csökkenti az energiát

de az atommagjai még nincsenek a  
minimális energiájú állapotban  
(az a vas atommagja lenne)

csak tetszhalott Csipkerózsika-álmot  
alszanak a metastabil  
potenciálmínimumban...



dobjuk a hamut egy megfelelő  
hőmérsékletű kazánba:  
kiolvadnak a metastabil állapotok,  
újra (nukleáris) üzemanyag lesz a  
kályha hamujából

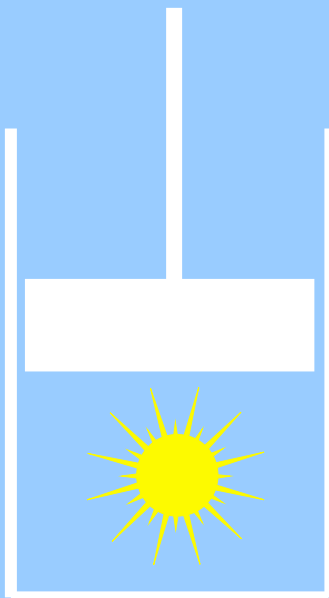
**ehhez csak egy vörös óriást kell  
tartanunk a sufnyiban**

de ha egyszer a gyerekeknek  
megigértük...





# A csillagok termodinamikája 2.



*A termodinamika tudománya nem merül ki az ideális gáz állapotegyenletének napi ötszöri felírásában és átrendezésében.*

*(Sir James Clark Maxwell)*

*Friss, csodálkozó szemmel nézni a leghétköznapibb dolgokra – ez a gyermekek és az igazi tudósok kiváltsága.*

*(Albert Einstein)*

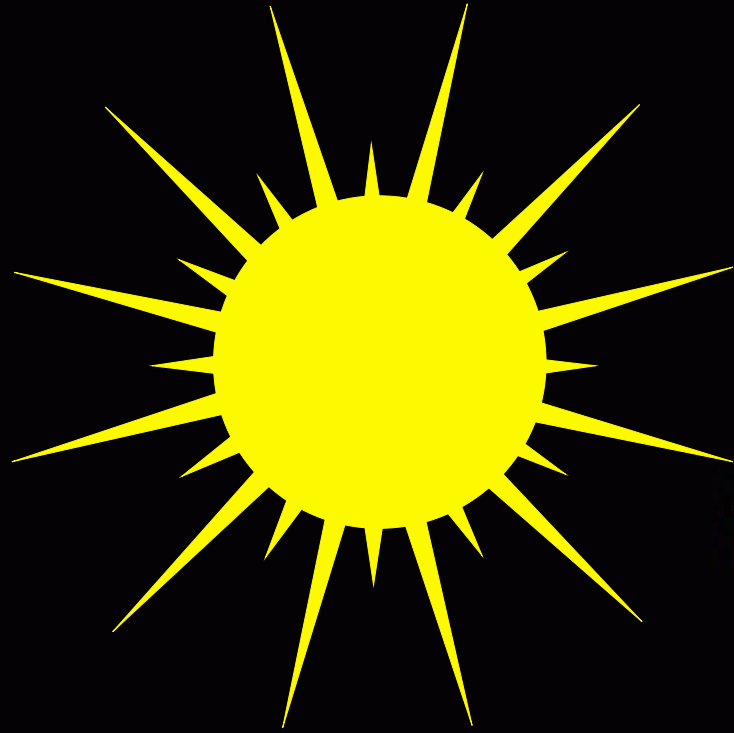
*Most már épp eleget tudunk a fizikából ahhoz, hogy megérthessünk egy olyan egyszerű dolgot, mint egy csillag.*

*(Sir Arthur S. Eddington)*

*Papa! Miért nem lehet hamuval fűteni?!*

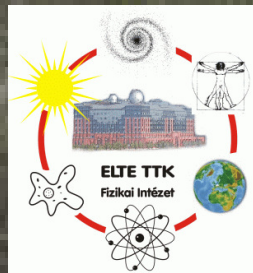
*(D.E. 1982)*





# Hamuval fűteni

## avagy a csillagok termodinamikája 2.



Az atomoktól a csillagokig

Dávid Gyula

2013. 01. 10.