

# Müon-katalizált fúzió

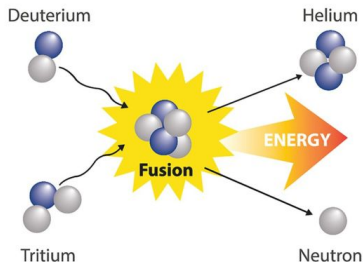
Pesznyák Dávid

2019. november 7.

- Fúzió során 2 (vagy több) atommag "összeolvad" 1 (vagy több) atommaggá.
- A kezdeti és a végállapot között  $\Delta m$  tömegkülönbség figyelhető meg, mely az  $E = \Delta mc^2$  tömeg-energia ekvivalencia alapján energiazabadosulás vagy szükséges energiabefektetés formájában érvényesül.
- Pl. p-p ciklus csillagokban (a korábbi előadásokra hivatkozva).
- A könnyű atommagokra jellemző (Fe, Ni alatt):
  - kisebb a mag mérete, az erős kölcsönhatás jobban érvényesül,
  - kisebb a mag töltése, a Coulomb-gát könnyebben legyőzhető.

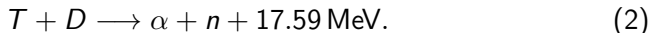
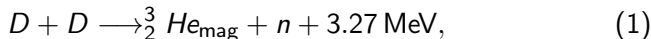
# A müon-katalizált fúzió ötlete

- Franck és Sakharov (1940): a müonok katalizálni tudnák a magfúzió folyamatát:
  - kiküszöbölhető lenne a termonukleáris fúzió magas hőmérséklete,
  - nem kellene magas hőmérsékletű plazmákat használni,
  - nem lenne szükség nagyenergiás lézerekre.
- Megvalósítható hidegfúzió  $\implies$  potenciális energiaforrás.



Példa a magfúzióra [1]

- Alapgondolat [2]:
  - adott egy  $T_{\text{szoba}}$  szobahőmérsékletű tartály, melyben deutérium  ${}^2_1\text{H}$  és trícium  ${}^3_1\text{H}$  izotópok vannak,
  - negatív müonokat  $\mu^-$  vezetünk be a tartályba, így ezen részecskék ütközések során lelassulnak, majd erős kötéseket alakítanak ki az izotópokkal, közben (valamilyen módon) katalizálva a magfúzió folyamatát.
- Pl. a lehetséges fúzióra ( $D$  deuteron,  $T$  triton):



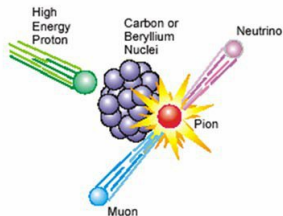
- A  $\mu^-$  túlél.

- Elemi részecskék közé tartozik, azon belül is leptonok közé.
- Bomlása:  $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ .
- A kozmikus müonok körülvesznek minket, azonban a müon-katalizált fúzióhoz elő kell tudnunk állítani őket:
  - 1 egy részecskegyorsítóban ionokat gyorsítunk, melyeket egy céltárgyra (pl. C) vezetünk,
  - 2 az ütközések során gyakori képződő részecske a pion  $\pi$ , melynek bomlása során müonok is keletkeznek:

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu, \quad (3)$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu,$$

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma.$$

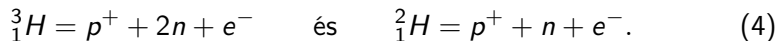


## A müonok keletkezése [3]

- A  $\mu^-$  az  $e^-$ -hoz hasonló tulajdonságokkal rendelkezik, azonban tömege kb. 207-szerese.
- Probléma: átlagos élettartam  $\tau_\mu \approx 2\mu s$ , ennyi idő alatt kell elegendő fúziót katalizálnia ahhoz, hogy az elképzelt reaktor meg tudja hajtani a gyorsítót újabb  $\mu^-$ -ok "gyártásához" (öfenntartás).

- Az első kísérleti eredmények a feltételezést követően kb. egy évtized múlva érkeztek.
- Alvarez és csapata (Berkeley) véletlenül figyelt fel a müon-katalizált fúzió eredményeire egy buborékkamrás kísérletben.
- "We had a short but exhilarating experience when we thought we had solved all of the fuel problems of mankind for the rest of time."
- Az eredmények továbbra sem voltak meggyőzőek, túl gyorsan bomlik a  $\mu^-$  ...
- Vizsgáltak különféle reakciókat, különböző hidrogén izotóp keverékeket.
- A reakcióráta magasabb hőmérsékleten nőtt, valamint nagy sűrűségű  ${}^3_1\text{H} - {}^2_1\text{H}$  keverék mellett már az először megfigyelt reakciónál 1000-szer gyorsabbat is tapasztaltak.

# A deutérium és a trícium



- A deutériumok és tríciumok is kétatomos molekulákat alkotnak, közös elektronfelhőt alakítanak ki.
- A molekulákban az izotópok közt nagy a távolság: kb.  $3 \cdot 10^4$  mag sugar.

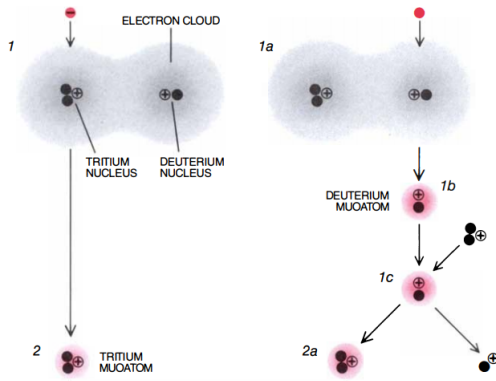


- A  $\mu^-$  a  ${}^3_1\text{H} - {}^2_1\text{H}$  gázkeverékben való útja során az  $e^-$ -okkal ütközik, fokozatosan lelassul.
- Képes kiütni is az  $e^-$ -okat, és ha elég alacsony a sebessége, akkor be is tud épülni az atomba, hasonló pályára állva a  $e^-$ -hoz, azonban a pálya sugara jelentősen kisebb lesz.
- A Bohr-modell alapján is:

$$F_{\text{Coulomb}} = F_{\text{cp}} \implies k \frac{e^2 Z}{r^2} = m \frac{v_k^2}{r} \implies r \propto \frac{1}{m}. \quad (5)$$

- Beépülés után az eredeti molekula szétesik, és kis sebességű müonatom jön létre.
- Általában a deutérium által kötött  $\mu^-$  is trícium mellett "köt ki", mivel a trícium atommag nagyobb tömege miatt erősebb tudja magához kötni a  $\mu^-$ -t.

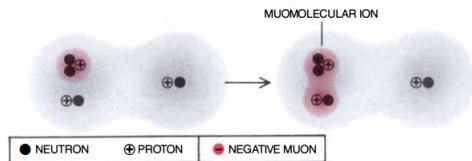
# A müonatom



A müonatom kialakulása [2].

# A müonmolekuláris ion

- A müonatom (semleges és kis méretű) szabadon mozoghat, és ha elég közel kerül egy deutérium molekula egyik atommagjához, akkor képes vele kölcsönhatva egy ún. müonmolekuláris iont ("muomolecular ion") alkotni. Az ion továbbra is része az elektromolekulának.

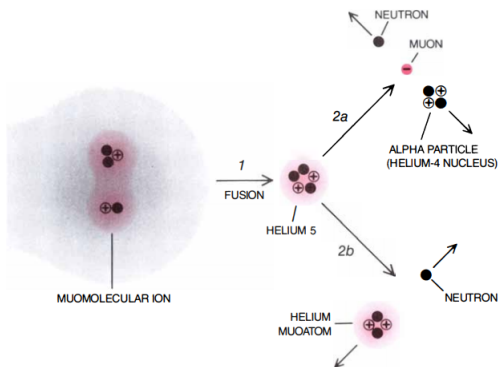


A müonmolekuláris ion kialakulása [2].

- A fúzió szempontjából kritikus a kialakulás ideje. Úgy gondolták, hogy ez egy lassú folyamat, mivel nagy a felszabaduló kötési energia (kb. 100-szorosa egy közönséges molekulának). Van rá lehetőség, hogy az elektronfelhő vigye el az energiát, de ez ritka (és még akkor is lassú).

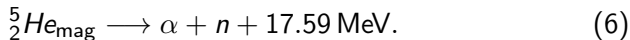
- A megoldás elméletét Vesman írta le 1967-ben.
- A teljes molekula rezeghet a térben, és ez a rezgés kvantált. A müonmolekuláris ion kialakulásakor felszabaduló energiát a teljes külső elektromolekula nyeli, "megkongatva" egy ilyen rezgésállapotot.
- A kötési energia még mindig túl nagy lenne, azonban Ponomarev belátta, hogy létezik gyengén kötött állapot is.
- Gyengén kötött állapotban már kevesebb energia szabadul fel, de ez pótolható a müonatomok és deutronok kezdeti sebességének ( $\propto T$ ) hangolásával.
- Kísérletek bizonyítják (sőt túl is szárnyalták a várakozásokat), hogy a megfelelő hőmérséklet mellett már kb. 150 magfúziót tud katalizálni egyetlen müon (LAMPF).

- A müonmolekuláris ion kilakulása után gyengén kötött állapotából egy erősebben kötöttbe kerül. Ekkor az ion atommagjai már **nagyon** közel kerülnek egymáshoz egy kis térfogatban.
- A Coulomb-taszítás szétvetné a magokat, de a müon mindig visszatereli őket egymáshoz, míg át nem tudnak alagutazni egymás Coulomb-gátján.
- Ilyen közelségben már érvényesül az erős kölcsönhatás, és megtörténik a magfúzió.



A fúzió [2].

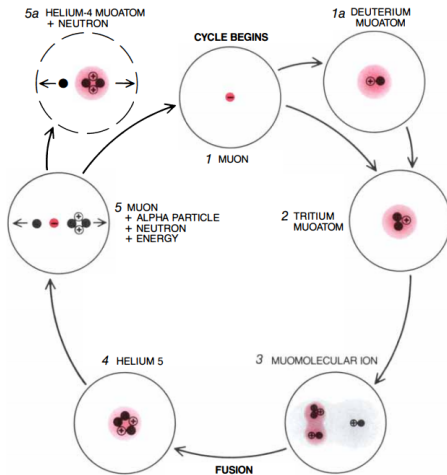
- A fúzió eredménye egy  ${}^5_2\text{He}$  izotóp magja, mely szinte azonnal ( $T_{1/2} \approx 7 \cdot 10^{-32}$  s) elbomlik:



- A  $\mu^-$  jó katalizátor módjára visszamarad és újra részt vehet kölcsönhatásban ideális esetben, de előfordul, hogy a pozitív töltésű  $\alpha$  magával viszi (még ekkor is leszakadhat: az esetek 25-40%-a).

- Az  $\alpha$ -részecske hatása az elsődleges akadálya a müon-katalizált fúzióknak.
- Nehéz megmondani, hogy az esetek mekkora hányadában történik meg, mivel ez egy komplex soktest probléma.
- Korai elméleti jóslatok alapján ez az esetek 1%-ában történik meg (és már ez is elég ahhoz, hogy ne műkdjön az önfenntartás).
- A LAMPF kísérlet eredménye szerint az  $\alpha$ -részecske csak az esetek 0.4%-ban viszi el végleg a  $\mu^-$ -t, de még ez sem elég.
- Ideális esetben azt mondhatjuk, hogy 1 db  $\mu^-$  létrehozásához 6 fúzió elég lenne ( $6 \cdot 17.59 \text{ MeV} = 105.54 \text{ MeV} \approx m_\mu(c^2)$ ). A valóságban kb. 20-szor annyira lenne szükség különféle külső hatások miatt.





A müon-katalizált fúzió összefoglalása [2].

- 1 A részecskegyorsítók fejlesztése áttörést hozhat.
- 2 A CERN kísérletei alapján, ha el tudjuk érni a stabil 100-500 fúziót egy müonnal, akkor lehetséges az önfenntartás.
- 3 Müon-katalizált fúzió és fissziós reaktor hibrid  $\implies$  a keletkező neutronokat termikus neutronként felhasználhatnánk atomreaktorban.
- 4 Felmerülhet még a  $\mu^-$ -ok keltésekor, hogy a céltárgy helyett egyből a  ${}^3_1H - {}^2_1H$  keverékbe lövik az ionokat.

# A hipotetikus müon-katalizált fúziós reaktor előnye

- Deutérium szinte kimeríthetetlen mennyiségben van a tengervízben, valamint Li is, melyből trícium készíthető:









- Ideális hőmérséklet a müon-katalizált fúzióknak a 900 °C, ezen a hőmérsékleten működik ideálisan sok energiatermelő rendszer is (pl. gőzturbina). Ennél magasabb hőmérsékleten túl nagy kinetikus energiát kap a müonatom és a deutérium, melyet ha hozzáadunk a felszabaduló kötési energiához, akkor az elektromolekula már nem képes mind elnyelni.
- Emiatt a reaktor nem szaladna meg, nem olvadna le és nem lehetne termonukleáris fegyver gyártásában hasznosítani a technológiát.

- Nincs müon-katalizált fúziós reaktor.
- Habár az " $\alpha$ -sticking" valószínűsége jelenlegi tudásunk szerint 0.4%, nem történik elegendő fúzió az öfenntartáshoz ("break-even"). Ha létre is lehetne hozni az öfenntartást, akkor is figyelembe kell venni, hogy a termikus-elektromos energiakonverzió hatásfoka  $\approx 40\%$ .
- Továbbá a gyorsítóink kb. 6 GeV energiát használnak fel átlagosan egy  $\mu^-$  keltéséhez, és (véletlenszerűen) a gyorsítók hatásfoka is csak 40% körülire tehető.

Voltak más próbálkozások is a hidegfúzió megvalósítására.

- Fleischmann-Pons-kísérlet [4]  $\implies$  nehézvíz elektrolízése palládium elektródával. Elmondásuk szerint lényeges hőhatást tapasztaltak, valamint fúziós melléktermékeket találtak. Mérésük nem volt reprodukálható.
- Energy-Catalyzer (E-Cat) néven létezik egy kísérlet [5]:
  - felmelegített hidrogén és Ni-por, Cu-zé alakítva energiafelszabadulást eredményez,
  - "sounds fishy",
  - ...titkos adalék...nem volt szabad kihúzni a konnektorból...,
  - 2019: "there is no doubt about it being fake",
  - E-Cat-HOME.

-  <https://www.bbc.com/news/business-46219656>
-  Johann Rafelski, Steven E. Jones. *Cold Nuclear Fusion*. Scientific American, 1987.
-  <https://nmi3.eu/muon-research/the-musr-technique.html>
-  [https://en.wikipedia.org/wiki/Cold\\_fusion](https://en.wikipedia.org/wiki/Cold_fusion)
-  [https://en.wikipedia.org/wiki/Energy\\_Catalyzer](https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_Catalyzer)
-  <https://watchnebula.com/videos/minutephysics-legitimate-cold-fusion-exists-muon-catalyzed-fusion>

Köszönöm a figyelmet.

# Legit Cold Fusion?!



[6]