

# Termonukleáris reakciók, Nap-neutrínó probléma és a magfúziós energiatermelés fejlesztési irányai

Készítette: Béri János  
Orbán Balázs

## I. Termonukleáris reakciók

1920-ban az atommagok megfelelő pontosságú tömegmérésének következtében Arthur Eddington és Jean Perrin felvetette, hogy a csillagok energiáját a hidrogén atomok fúziója fedezi miközben hélium és esetlegesen nehezebb elemek keletkeznek. Ezzel megalapozva a csillag nukleoszintézis alapjait.

1946-ban Fred Hoyle javasolta a kidolgozott hipotézist, ennek során a vasig lefedte a a periódusos rendszer atomjait. Ezt követően 1957-ben bővült a vasnál nehezebb atomokhoz tartozó szintézisekkel.

## Osztályozás

A csillagokban, a következő kulcs reakciók ismertek:

Hidrogén fúzió	Hélium fúzió	Nehéz elemek fúziója	Vasnál nehezebb elemek
Proton-proton lánreakció	Tripla alfa folyamat	Lítium égés	Neutron befogás
CNO ciklus	Alfa folyamat	Szén égés	Proton befogás
		Neon égés	Photodezintegráció
		Oxigén égés	
		Szilicon égés	

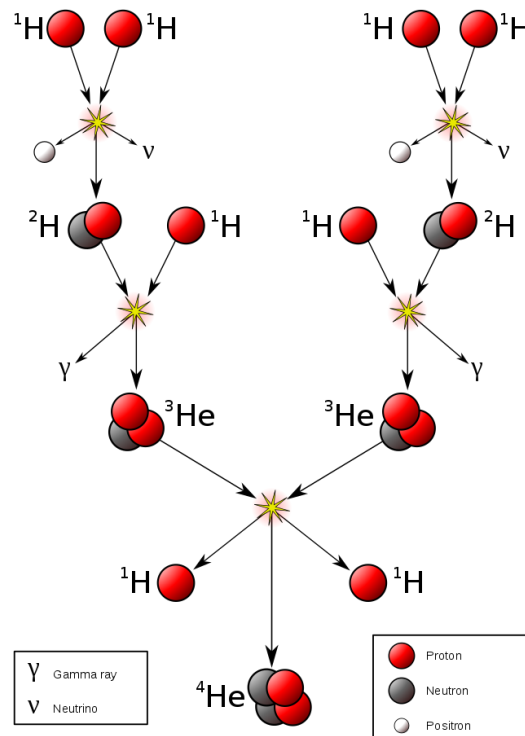
Emellett ezen reakciók erősen befolyásoltak a csillag korától, a csillag hőmérsékletétől és mint kémiai reakció, a reaktánsok és termékek koncentrációjától. A széleskörű irodalomra tekintettel, a meghatározó folyamatokat ismertetjük, vagyis a hidrogén és hélium fúziós jelenségeket és az ennél nehezebb elemek képződését, kisebb részletességgel ismertetjük.

## Hidrogén fúziós reakciók

### Proton-proton lánreakció (P-P)

A hidrogén fúziós reakciók minden esetben hélium-4 termék képzésére irányulnak, mely egy többlépcsős reakció sorozat eredménye, miközben nagy energia szabadul fel. Főként ez fedezi a csillagok által kibocsátott energia nagyrészét. A proton-proton lánreakció a naprendszerünkben található méretű és annál kisebb tömegű csillagok legjellemzőbb reakciója. A reakció kritikus faktora az egyes részecskék kinetikus energiája, mely megszabja, hogy rendelkeznek-e megfelelő energiával, hogy a Coulomb kölcsönhatást le tudják győzni.

Az átalakulás több reakcióútvonalon át megvalósulhat. Négy fő út ismert. Ezeket római számmal I-IV-el jelöljük. Ezek között a különbség főleg az egyes lánclépésekben tér, mivel a csillag öregedése során dúsuló új elemek, új reakcióutakat tesznek lehetővé. Például a **P-P I** útvonala a következő:



*1. ábra Proton-proton I láncreakció*

A folyamat során a két hidrogénből keletkező átmenti di-proton, jellemzően azonnal visszalakul két hidrogénné és nem szenved béta bomlást. Így a reakció sebessége nagyon alacsony. Ennek köszönhetően garantált, hogy a nap típusú csillagok  $10^{10}$ -en nagyságrendű „életidővel” rendelkeznek, vagyis hidrogénmennyiségük nem ég el túl gyorsan. A naprendszerünkben található csillaghoz hasonló tömegű csillagokban ez a reakciólánc a fő, körülbelül 84%-ban ezen az útvonalon képződik  $^4\text{He}$ .

A P-P II lánc során a  $^3\text{He}$  egy  $^4\text{He}$ -al képez  $^7\text{Be}$ -ot, majd egy elektronbefogással  $^7\text{Li}$  keletkezik, mely egy  $^1\text{H}$ -val két darab hélium-4-et képez. Ez Nap-típusú csillagokban 17%-os gyakorisággal jellemző.

A P-P III, mely már az igen ritka reakcióláncok egyik, melynek során a P-P II-höz hasonlóan  $^7\text{Be}$  köztiterméken keresztül, annak  $^1\text{H}$ -el való reakciója során  $^8\text{B}$  keletkezik, mely béta bomlás során  $^8\text{Be}$ -t eredményezve két darab  $^4\text{He}$ -ra bomlik.

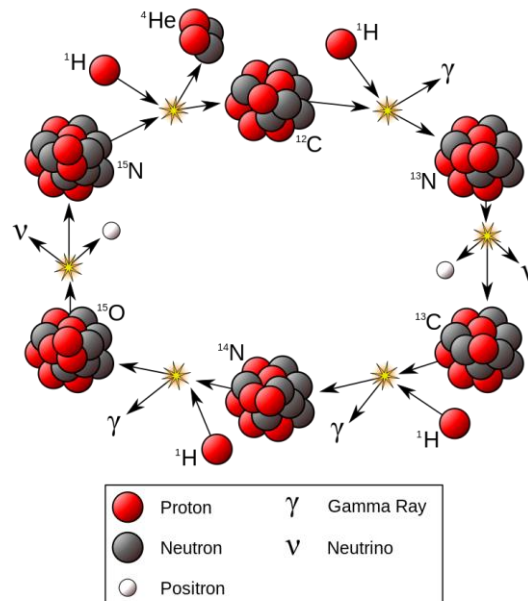
A P-P IV reakciólánc, mely egy teoretikusan megjósolt folyamat, melyet megfigyeléssel még nem támasztottak alá, mely során egy  $^3\text{He}$  direkt útvonalon egy  $^1\text{H}$  befogással és béta bomlással eredményez  $^4\text{He}$ -ot.

A reakció energia termelő része a tömegdefektus és a keletkező pozitron elektronnal történő annihilációja során felszabaduló energia. A különböző útvonalaktól függetlenül nagy energiájú neutrínó és gamma fotonok formájában távozik az energia, melynek értéke 26.73 MeV, mely a kiindulási tömegek 0,7%-a. Ezen energia fedezi a nap hőmérsékletének

megtartását, emellett azt az energiát mely meggátolja a nagy tömegű csillag összeomlását, mely öregedő csillagok halálakor bekövetkezik, mikor a P-P lánc már nem képes elegendő energiát szolgáltatni.

### Carbon-Nitrogen-Oxygen ciklus (CNO)

A CNO ciklus kiemelt különbsége a P-P láncreakcióval összehasonlítva, hogy ez egy katalitikus folyamat, mely  $^4\text{He}$ -ot termel a névben szereplő elemek egy katalitikus reakciója során. Ennek egyik példáját a 2. ábrán láthatjuk:



2. ábra Cold CNO I ciklus

A CNO ciklus esetében két fő kategóriát és több alosztályt különböztetünk meg. A két fő kategória az adott csillag nyomása és hőmérséklete szerint megkülönböztet hideg és meleg (Cold and Hot CNO) ciklust, ezen belül pedig több alosztály található.

Cold CNO esetében, mely nap típusú csillagokra jellemző I-IV alosztály ismert. Az alacsony hőmérsékletű és nyomású égítetekben, a CNO ciklus a proton befogási lépések által kinetikususan kontrollált. A bétabomlási lépések azonban gyorsan lejátszódnak. Így a CNO ciklus egyetlen energiaforrás a csillagok számára. Az alosztályokban bizonyos kevésbé valószínű reakciók módosítják az útvonalat, mely során újabb átmeneti állapotú nuklidok kerülnek a ciklusba.

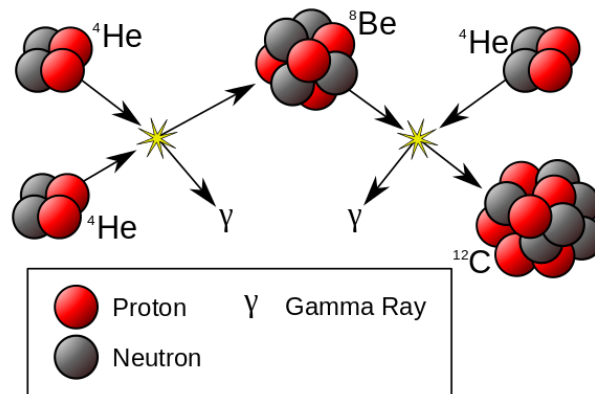
Hot CNO esetében, melyek jellemzően nóvákban és röntgen sugárzó kettőscsillagok esetében alakul ki, ahol megfelelően magas hőmérséklet és nyomás hatására a proton befogás nem limitálja a katalitikus folyamatot. A Hot CNO esetében I-III alosztály ismert, melyen a cold CNO-hoz hasonlóan egyes befogási vagy bomlási lépések eltérőek, vagy esetleges új köztitermékek ékelődnek a ciklusba. A különleges körülmények, különleges utat tesznek lehetővé. Ekkor ugyanis a protonbefogás akár erősen instabil nuklidok keletkezését is lehetővé teszi, mivel a béta bomlás, és ezáltal a stabilizáció, sebessége nagyságrendekkel kisebb mint a befogásé.

## Hélium fúziós reakciók

A hélium fúziós reakciók „funkciója” hogy a csillagban feldúsult  ${}^4\text{He}$  mennyiségét csökkentsék. Ez főleg öreg csillagokban fordul elő ahol a hidrogén tartalom megfelelően lecsökkent, így a részecskék kinetikus energiája lecsökken (a hidrogén fúzió energiája többet nem fedezi) és a magsűrűség megnövekedett. A csillagok összeomlását megelőzően és annak során jellemző folyamatok.

### Tripla-alfa folyamat

A tripla-alfa folyamat során három alfa-részecske ( ${}^4\text{He}$ ) többlépcsős fúziójával  ${}^{12}\text{C}$  keletkezik. A folyamat a 3. ábrán látható:



3. ábra Tripla alfa folyamat

A folyamat alapfeltétele hogy a csillagban  ${}^4\text{He}$  dúsulás alakuljon ki, mely a P-P és CNO reakcióknak következtében ki is alakul a csillag öregedése során. A folyamat során 7,27 MeV szabadul fel. A folyamat kritikus lépése a  ${}^8\text{Be}$  sorsa, mint láttuk részt vehet más folyamatokban is. A tripla alfa folyamat során ritkán található a  ${}^8\text{Be}$  környezetében  ${}^4\text{He}$ , mely megfelelő kinetikus energiával rendelkezne, így a folyamat nem jellemző fiatal csillagokban. Azonban, mikor a csillag hidrogén tartalma kezd kiégni és az energiatartalma megfelelően lecsökken és a csillag önsúlya alatt „összeroskad” a mag hőmérséklet  $10^8$  hőmérsékletet elérve a  ${}^8\text{Be}$  és a  ${}^4\text{He}$  reakció megfelelő sebességet ér, vagyis beindul a tripla alfa folyamat a  ${}^4\text{He}$  tartalom csökkentésére.

### Alfa folyamat

Másnéven, alfa-létra, mely a tripla alfa folyamatot követő összes reakció mely a kialakult  ${}^{12}\text{C}$ -ből nehezebb elemeket eredményez. Megelőzi a  ${}^{12}\text{C}$  megfelelő feldúsulása. Minden reakció egy  ${}^4\text{He}$ -t fogyaszt, ezért sok helyen alfa elemeknek is nevezik őket. Majd a keletkező magok esetleges instabilitása esetén újabb héliummal reagálnak, vagy bomlási folyamatban stabilizálódnak. A folyamat utolsó tagja a  ${}^{56}\text{Ni}$ , mivel ennél nehezebb atomok képződése már endoterm folyamat. A reakciók jellemzően 6-9 MeV nagyságrendű gamma sugárzást eredményeznek.

## Nehéz elemek fúziója

A nehéz elemek fúziója esetében, a lítium (P-P), az oxigén, a szén (CNO), már más említett folyamatok részét képezik. Így, e folyamatokat itt nem tárgyaljuk újra, azoktól eltérő esetekre térünk ki csak.

### Lítium fúzió

A lítium bizonyos fúziós reakcióinak érdekessége, hogy az már csillag<sup>1</sup> hőmérséklet alatt is lejátszódhatnak, mely során a P-P lánc végtermékévé <sup>4</sup>He-á alakulnak, protonbefogásokon át. Ezért csillagok magjában gyorsan átalakuló köztitermék a lítium. Általában barna-törpék magjában halmozódik fel, melyek nem érik el a csillag hőmérsékletet, így ott a lítium felhalmozódhat és lassabb égése során felhalmozódhat.

### Szén fúzió

A szén fúziós reakciók nagytömegű csillagok esetében jellemzők (legalább a Nap 8x-os tömegű csillagok). Ez a folyamat a csillag magban, magas ( $5 \times 10^8$  K) hőmérsékleten és sűrűség mellett fordul elő. A reakcióban mindig két <sup>12</sup>C vesz részt, mely egy instabil <sup>24</sup>Mg mag stabilizációjával hoz létre új elemeket. A reakcióban mindig egy nehezebb elem és egy könnyű elem (<sup>1</sup>H, <sup>4</sup>He) vagy elemi részecske keletkezik. Például: <sup>20</sup>Ne, <sup>23</sup>Na, <sup>23</sup>Mg, <sup>16</sup>O.

### Neon fúzió

A szén fúziós reakciókhoz hasonló csillagokban fordul elő, megfelelően magas hőmérsékleten és sűrűség mellett, mikor már a csillag széntartalma erősen lecsökkent. A megfelelő hőmérséklet hatására a fotodezintegráció folyamata teret nyer, mely reakcióhoz a neon megfelelő reaktánst szolgáltat. Ekkor <sup>20</sup>Ne egy gamma fotonnal ütközve bomlik és <sup>16</sup>O és <sup>4</sup>He keletkezik. Emellett elemi részecskékkel vagy könnyű elemekkel (<sup>4</sup>He) reagál fúziós reakcióban.

### Oxigén fúzió

Az oxigén fúziós reakciók a neon fúziós reakciók után következnek be a már tárgyalt megfelelő csillagok magjában. A reakció fő gátja a Coulomb erők legyőzése a két nagy-töltésű mag miatt. A reakció során két <sup>16</sup>O egyesül egy instabil <sup>32</sup>S-t eredményezve, mely bomlással stabilizálódik és különböző nehézelemekre és kísérő elemi részecskére vagy könnyű elemre bomlik. Például így keletkezik: <sup>28</sup>Si, <sup>31</sup>P, <sup>31</sup>S, <sup>30</sup>Si, <sup>30</sup>P, <sup>24</sup>Mg.

### Szilícium fúzió

A szilícium emésztő reakciók a már eddig említett nagytömegű csillagokban fordulnak elő, mikor a szén-neon-oxigén láncban az oxigén nagyrésze is már átalakult. Ekkora a magban dúsult szilícium képes <sup>4</sup>He-al reagálva nehezebb elemeket eredményezve egyesülni, egyéb termék nélkül. A reakció fontos követelménye hogy a csillag elkezdjen öntömege alatt „összeroskadni” így a hőmérséklet megfelelően magas szintet érhet el. Így a szilícium reakciók a csillagok utolsó „éveiben” a meghatározók. A reakció termékei: <sup>32</sup>S, <sup>36</sup>Ar, <sup>40</sup>Ca, <sup>44</sup>Ti, <sup>48</sup>Cr, <sup>52</sup>Fe, <sup>56</sup>Ni, <sup>60</sup>Zn

---

<sup>1</sup>  $2,5 \times 10^6$  K feletti hőmérséklettől nevezünk egy égitestet csillagnak.

További fúziós reakciók nem lehetségesek. Ezután a csillag belső energiája folyamatosan csökken, végül a katasztrofális összeroskadás következtében -jellemzően- szupernova robbanás következik be, mely szétszórja a világűrbe a csillag tartalmát.

## **Vasnál nehezebb elemek képződése**

### **Neutron befogás**

Neutron befogás, és ezáltal nehéz elemek képződése, igen ritka folyamat. Két típusa ismert a gyors és lassú neutron befogás. (RNC vagy r-process, SNC vagy s-process)

A gyors neutronbefogás során jellemzően vas atom a mag. Ebben a folyamatban fontos hogy az első neutron befogása után az új instabil mag ne rendelkezzen elég idővel a radioaktív bomláshoz, és így egy újabb neutron is befoghasson, és így tovább. Ennek a speciális feltételnek, vagyis a szabad neutronoknak ilyen magas sűrűsége főleg összeomlott szupernovamagokban, vagy két neutroncsillag egyesülése során van jelen.

A lassú neutron befogás igen ritka folyamat mely speciális csillagtípusokban fordul elő. Ezek a kis és közepes tömegű csillagok (0,6-10 Nap tömeg) melyek, megfelelően öregek. Ez a r-process során igényelt körülményeknél sokkal valószínűbben előfordul, így az s-process felelős a vasnál nehezebb elemek felének kialakulásáért. A folyamat abban tér el a gyors neutron befogástól, hogy itt a keletkező mag szenvedhet bomlást, vagyis csak stabil magok maradnak meg, vagyis bétabomlásra stabil izobár mentén minden izotóp kialakulhat, majd az instabilak elbomlanak. Vagyis kis neutron sűrűségek mellett is halad a folyamat. Azonban az esetlegesen kialakuló magok, ha nem alfa bomlással szemben stabilak a folyamat lényegében visszafordulhat

### **Proton befogás**

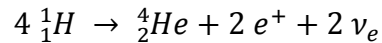
Ezt tantárgyi keretek között megfelelő mélységben tárgyaltuk Tanár úrral. Külön nem térek ki rá.

### **Photodezintegráció**

A folyamatot röviden a Neon fúziók során említettük. Összefoglalva: egy nagyenergiájú gamma foton reakciója a maggal, mikor egy gerjesztett állapotot követően bomlással stabilizálódik a mag miközben elemi részecskét bocsát ki. Nagytömegű csillagokban megfelelő hőmérsékleten, vagy csillagrobbanás során jellemző reakció.

## II. Nap-neutrínó probléma

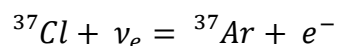
A huszadik század első felében a tudósok meg voltak győződve, hogy a Nap a sugárzását a proton-proton láncon keresztül állítja elő, melynek során próciumból négyes tömegszámú hélium keletkezik miközben „melléktermékként” pozitron és neutrínó eliminálódik. Ez a folyamat napmodell néven is ismert. Habár a teljes folyamat több, konszekutív fúziós lépésből tevődik össze, a bruttó reakció az alábbi séma szerint írható fel:



A kiindulási négy hidrogén összesített tömege nagyobb, mint a keletkező termékek együttes tömege, így a fúzió során (nagy mennyiségű) energia szabadul fel gamma sugárzás formájában. A gamma fotonok, a Napban történő gerjesztési folyamatokon keresztül, látható tartományú fotonokká alakulnak át, melyek kisugározva érik el a Föld atmoszféráját.

A fúzió során kizárólag elektron-neutrínók keletkeznek, azonban a neutrínóknak három fajtája (íze) is ismert, amelyek egy-egy elemi részecskéhez köthetők. Ennek megfelelően, az elektron-neutrínó mellett, még létezik müon-és tau-neutrínó, azonban ezen részecskék csillagok felrobbanásakor keletkeznek, illetve laboratóriumi gyorsítóknak is sikerült már előállítani a hozzájuk tartozó elemi részecskék mellett (müon és tau). A neutrínók töltés nélküli elemi részecskék, melyek, a részecske fizika standard modellje alapján, tömeggel sem rendelkeznek. Nagyon gyengén és ritkán lépnek kölcsönhatásba anyaggal, csupán minden 100 milliárdadik Napból érkező neutrínó hat kölcsön a Földet felépítő atomokkal.

A napmodell ígéretesnek bizonyult a Napban keletkező sugárzás leírására, azonban az elméletet csupán közvetve lehet ellenőrizni, mivel a legtöbb reakciótermék nem hagyja el a Napot. Csupán a képződő neutrínók képesek könnyedén távozni, így a folyamatot ezen elemi részecskék mérésével lehetséges igazolni. Ebből kiindulva 1964-ben Raymond Davis és John Bahcall állt elő egy kísérlettel, amelyben közel 40.000 liter tetraklóretilént használtak fel a Napból érkező neutrínók kimutatására. A 37-es tömegszámú klóratom a neutrínóval magreakcióba képes lépni, melynek során radioaktív argonatom keletkezik 35 napos felezési idővel:



Raymond Davis és John Bahcall számítógépes program segítségével pontosan kiszámolták a Napból érkező neutrínók és a fenti magreakcióból származó argonatomok mennyiségét (erre 3 argonatom/nap mennyiséget kaptak eredményül), amelyek radioaktív detektálásával pontosan meghatározható a napmodellből származó neutrínók száma. Végül a kísérletet 1967-ben végezték a Homestake Gold Mine bányában, az USA-ban, ahol körülbelül egy mérföld mélyen építették meg az úszómedence méretű tartályt, tetraklóretilénnel töltve. A havonta keletkezett argonatomokat elválasztva és megmérve 1968-ban hozták ki első eredményüket, azonban a kapott érték váratlan volt. A becsült argonatom mennyiségnek csupán a harmadát detektálták, és az így kapott eredmény hamarosan „Nap neutrínó probléma” illetve „A hiányzó neutrínók rejtélye” neven vált ismertté.

A kísérleti eredmény és az elméleti számítás közötti különbségre három lehetséges okot javasoltak:

- 1.) Az elméleti számítások hibásak, melynek két forrása lehet. Vagy a jósolt neutrínó mennyiség vagy a számított argonatomok száma okozza az eltérést.
- 2.) A végzett kísérletből származik a hiba.

3.) A neutrínók viselkedését leíró elmélet a hibás, azonban ezt tekintették a legkisebb valószínűségűnek.

A következő két évtizedben több kutatócsoport is foglalkozott az elméleti számítások finomításával és ellenőrzésével. A felhasznált adatok egyre pontosabbak lettek és így a kapott eredmények is egyre megbízhatóbbak voltak, azonban nem tapasztaltak semmilyen hibát a Nap számítógépes modelljében. Eközben a kísérleti oldal is fejlődött, a mérés érzékenysége javult és különböző tesztekkel validálták a kísérleti módszert.

Az 1980-as és 90-es években számos kutatócsoport végzett kísérleteket a Nap neutrínó probléma megoldása érdekében, azonban eredményeik tovább erősítették a hiányzó neutrínók rejtélyét. Így egy japán-amerikai együttműködésből származó Kamiokande csoport ultra tiszta vízen alapuló detektort alkalmazott, amellyel (az eredeti klór alapú méréshez hasonlóan) csak a nagy energiájú neutrínókat lehetett detektálni. Mindazonáltal a méréseik szintén alátámasztották, hogy kevesebb neutrínó detektálható, mint amennyit az elmélet jósol. Emellett Oroszországban és Olaszországban is végeztek kísérleteket SAGE és GALLEX név alatt, melyekben gallium alapú detektort felhasználva határozták meg, hogy a kis energiájú neutrínók száma szintén kisebb az elméletből feltételezetttnél. Tehát mind a kis, mind a nagy energiájú neutrínók kevesebben voltak, azonban nem azonos mértékben volt kisebb a számuk a számítottéhoz viszonyítva.

Az újabb és újabb kísérleti eredmények hatására egyre világosabbá vált, hogy az eltérést a harmadik lehetséges ok okozza, és új fizikai elmélet szükséges a neutrínók viselkedésének megfelelő leírásához. Mivel a számítógépes számításokhoz használt modell is jónak bizonyult, a kísérleti eredmények azt sugallták, hogy valami történik a neutrínókkal a Nap és a Föld közötti útjuk során.

Végül a megoldás megtalálása két kísérlet eredményeire alapult. Az 1990-es években a Kamiokande csoport által alkalmazott víz alapú detektorral azonos, de annál sokkal nagyobb (és így pontosabb) detektort építettek, Super-Kamiokande néven, amellyel szintén a nagy energiájú neutrínókat tudták megmérni. Kísérletük során feleannyi neutrínót mértek, mint az elmélet alapján számított, azonban a detektor nem csak az elektron-neutrínókra szelektív, bizonyos mértékben érzékeny a neutrínók másik két ízére (műon-és tau-neutrínóra) is. A másik kísérletet egy nemzetközi együttműködés során végezték, melyben 1000 tonna nehézvizet használtak fel a neutrínók detektálására. A detektort Sudbury kanadai város közelében építették meg, és kizárólag a nagy energiájú elektron-neutrínók mérhetők vele. Mérésük során a modell alapján számított neutrínó mennyiség harmadát detektálták. Azonban rájöttek, hogy ha a részecske fizika standard modellje helyes volna, akkor a két kísérletből (Super-Kamiokande és SNO) származó neutrínó mennyiség azonos kellene legyen. Az eredmények alapján meghatározták a Napból származó mindhárom ízű neutrínónak az együttes mennyiségét, illetve külön csak az elektron-neutrínók számát is, amelyekből megállapították, hogy a teljes neutrínó mennyiség (mindhárom ízt figyelembe véve) megegyezik a Nap számítógépes modellje alapján számítottal, míg az elektron-neutrínók ennek csupán a harmadát teszik ki. Tehát a hiányzó neutrínó mennyiség mindvégig jelen volt, csupán a neutrínó más fajtáiban, melyek nehezebben detektálhatóak. Ezek alapján az SNO csoport összerakta a képet, miszerint a Nap belsejében lejátszódó fúziós folyamatokban kizárólag elektron-neutrínók keletkeznek, amelyek a Föld felé megtett útjuk során képesek átalakulni másik ízekké.

A neutrínóknak ez a „többszörös személyiségzavara” a neutrínó oszcillációval magyarázható, amely egy kvantummechanikai jelenség, mely során a neutrínó három íze egymásba képes alakulni. A folyamat leírásához azonban el kellett vetni a standard modellből



azt, hogy a neutrínó nem rendelkezik tömeggel. Sőt, az átalakulás valószínűsége függ attól, hogy mekkora az ízek tömege közötti különbség. Általánosan a neutrínó két íze közötti átalakulási valószínűséget az alábbi összefüggés jellemzi fénysebességhez közeli, ultrarelativisztikus esetben:

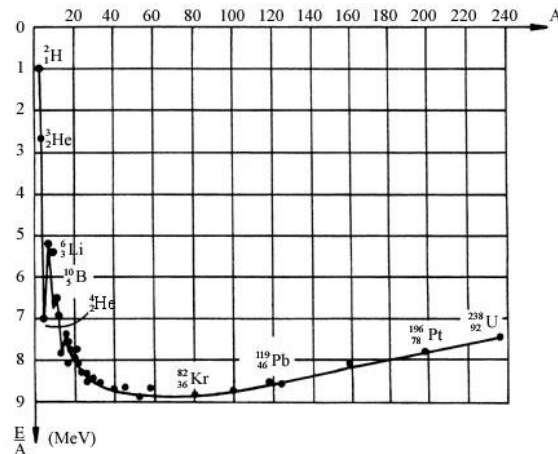
$$P(\nu_i \rightarrow \nu_j) = \sin^2 \left( \frac{\Delta(m^2) * L}{4 * E_\nu} \right) * \sin^2(2\theta_m)$$

ahol  $m$  a neutrínó ízeinek tömeg,  $L$  a neutrínó által megtett távolság,  $E_\nu$  a neutrínó energiája és  $\theta_m$  az ízek keveredési szöge.

A neutrínó oszcilláció elméletének kidolgozása megoldotta a hiányzó Nap neutrínók rejtélyét, azonban a vártnál nagyobb előrelépést jelentett a fizika és asztronómia világában. Kiderült, hogy a neutrínó rendelkezik tömeggel (amelynek igazolására 2015-ben Nobel-díjjal jutalmazták a Super-Kamiokande és SNO csoport vezetőjét, Takaaki Tajimat és Arthur B. McDonaldot), amely egy fontos építőköve lett a standard modell fejlődésében.

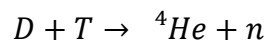
### III. Magfúziós energiatermelés fejlesztési irányai

Már régóta ismert, hogy az ember által ismert elemek közül a legstabilabb a vas. Az elemek stabilitását a magot felépítő, egy nukleonra eső kötési energiával szokták jellemezni, mely a tömegszám függvényében ábrázolva az 56-os tömegszámú vasatomnál éri el a maximumot.

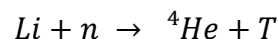


Energiatermelés szempontjából két ágat különböztethetünk meg a grafikonon. A vasatomnál nagyobb elemek esetén az atommag hasításával (fisszió), míg kisebb rendszámú elemeknél a magok egyesítésével (fúzió) szabadul fel energia. Ez alapján belátható, hogy a termonukleáris reakciók és így a Napban lejátszódó fúziós folyamatok felhasználhatóak energiatermelésre.

A Naphoz hasonlóan, az energia előállítására felhasználható a protonok deutériummá való egyesülése, azonban a folyamat során a proton béta-bomlás során alakul át neutronná, amely egy nagyon lassú folyamat. Emiatt a Napban az energiatermelés is lassú (csupán kb.  $1 \text{ W/m}^3$ ), tehát ezen a folyamaton alapuló fúziós energiatermelés nem valósítható meg a Földön praktikus térfogatban. Más reakciók után kutatva kiderült, hogy a földi körülmények között legkönnyebben alkalmazható folyamat a hidrogén nehezebb izotópjából kiinduló, deutérium és trícium egyesülése hélium atommaggá miközben egy neutron keletkezik melléktermékként (D-T reakció).



A folyamat során keletkezett  $17,6 \text{ MeV}$  energián a reakciótermékek a tömegükkel fordított arányban osztoznak, így a hélium kb.  $20 \%$ -át, míg a neutron a  $80 \%$ -át kapja meg. A kiindulási anyagok közül a deutérium könnyen, nagy mennyiségben előállítható tengervízből (1 literből  $33 \text{ mg}$ ), míg a trícium igen ritka elem a földi légkörben. Ennek kiküszöbölésére a tríciumot helyben, a reaktor köpenyében állítják elő lítiumból és a keletkező neutron magreakciójából.



A fúziós reakció nagy előnye, hogy a reakciótermék kizárólag hélium, amely kémiaiilag inert és nem radioaktív (ellentétben a nagy mértékű sugárzással járó maghasadással), illetve csupán kis mennyiségben keletkezik. Azonban fontos megjegyezni, hogy a keletkező nagyenergiájú neutron a reaktort felépítő szerkezeti anyagokkal ütközve magreakciókat válthat ki, amelynek hatására radioaktív sugárzás képződhet, azonban a kis mennyiségek miatt sokkal

rövidebb idő (kevesebb, mint 100 év) alatt válik elfogadható mértékűvé a sugárzás, mint az atomerőművek esetében (akár 1000-10000 év is lehet).

A fúziós folyamatokon alapuló energiatermelésen és a fúziós reaktor megvalósításán már az 1940-es években elkezdtek dolgozni, azonban számottevő fejlődés csak az 50-es évektől indult meg. A D-T reakció megvalósításának elsődleges kihívását az okozta, hogy a fúziós reakciót az atommagok közötti elektrosztatikus tasztítás (Coloumb-gát) akadályozza, amelynek legyőzésére nagy sebességgel kell ütközniük a magoknak. A szükséges ütközési sebesség 1000 km/s nagyságrendű, így a Coloumb-gátat nagy mértékű hőmozgással lehet leküzdeni, amihez legalább 100 millió Kelvin hőmérséklet kell. Ezen a hőmérsékleten a részecskék energiája százszor vagy akár ezerszer nagyobb mint az elektronhéj kötési energiái, így az anyag elektromosan vezető, ionizált gáz vagy más néven plazma állapotban van. A fúzió akkor önfenntartó, ha a megfelelő  $n$  sűrűségű plazmát, a megfelelő  $\tau$  ideig tartják egyben a Lawson-kritériumnak eleget téve:

$$n * \tau \geq 10^{20} \frac{s}{m^3}$$

A kritériumnak megfelelően, a gyakorlatban két szélsőséges eset valósítható meg a legegyszerűbben, a tehetetlenségi összetartás (Inertial confinement, ICF) és a mágneses összetartás (Magnetic Confinement, MCF). A két megvalósítás alkotja a fúziós energiatermelés két fő fejlesztési irányvonalát.

### **Tehetlenségi összetartás (ICF)**

Az ICF esetén a plazmát valójában semmi sem tartja össze, a fúzió lejátszódása során szabadon tágul. A folyamat hatására az anyag nagy sebességgel tágul, azonban a részecskék a tehetetlenségük miatt egy rövid ideig mégis egymás közelében lesznek, így nagy  $n$  és kis  $\tau$  értékkel a plazma eleget tesz a Lawson-kritériumnak és a fúzió megvalósulhat. Ehhez az szükséges, hogy a kezdeti nyomásnak és sűrűségnek megfelelően nagynak kell lennie, vagyis egy olyan robbantást kell létrehozni, amely „befelé” történik (sűrűség növelő). Ezt implózióknak nevezzük, és ennek megfelelő ICF megvalósításon alapszik a hidrogénbomba is, melyben a robbanást egy atombombával hozzák létre. Azonban a fúziós erőműben ennél sokkal kisebb robbanás szükséges, így a kis mennyiségű üzemanyag felrobbantásához lézereket alkalmaznak.

Ennek során egyetlen lézernyalábból indulnak ki, amelyet több kisebb sugárra választanak szét és azokat milliárdszorosuk felerősítik. A felerősített lézereket tükrök segítségével irányítják a reakció-kamrába úgy, hogy egyenletesen világítsák meg a céltárgy felületét (direkt fűtés) vagy a céltárgyat befoglaló üreg belső felületét (indirekt fűtés). Számos lézert fejlesztettek ki és építettek meg mind a direkt mind az indirekt fűtésre, így az Osakai Egyetemen a HALNA vagy a Lawrence Livermore National Laboratory laboratóriumban a Shiva lézert, amely neodímium üveg alapú és az infravörös tartományban sugároz. Fontos kiemelni a világ jelenlegi legnagyobb, a National Ignition Facility (NIF) által épített lézert, amelyet indirekt fűtésre alkalmaznak. A lézer szintén Nd:üveg alapú és a kiindulási (1062 nm-es) infravörös lézersugarat 192 nyalábra osztják szét, amiket kálium-dihidrogén-foszfát kristályon átvezetve tolják el az ultraibolya hullámhossztartományba. Végül 7500 darab villanólámpával gerjesztett, üvegbe ágyazott Nd atomok koherens sugárzásával erősítik fel, így a 192 nyaláb mindegyike 20000 J impulzusenergiájú lesz. A nyalábokat a targetkamrába vezetik, ahol a deutérium-trícium céltárgyat tartalmazó üreg belső falába érkező röntgen lökéshullámokat váltanak ki, melyek összepréselik a céltárgyat és beindítják a fúziót. Mivel a

fúzió beindulásakor a hidrogén target 100 millió fokos és 1 milliárd atmoszféra nyomású, ezért a hidrogént -250 Celsius fokon, folyékony halmazállapotban juttatják a targetba.

Az ICF lézerekkel való megvalósításának nagy hátránya, hogy a sugárnyalábok szétválasztása és felerősítése során olyan nagy mértékű energiavesztés lép fel, hogy összességében a befektett energia 20-30x meghaladja a fúzió által termelt energiát, így ennek az eljárásnak a megvalósítása még nincs belátható közelségben.

## **Mágneses összetartás (MCF)**

A plazma állapotban az anyag elektromosan töltött részecskékből áll, így elektromágneses térrel összetartható. Ennek segítségével biztosítható, hogy a mágneses tértől függően a plazmának egy közel állandó  $n$  sűrűséget fenntartsanak a megfelelő  $\tau$  ideig, hogy a Lawson-kritérium teljesüljön és a fúzió végbe menjen (az MCF esetén az  $n$  sokkal kisebb, viszont a  $\tau$  sokkal nagyobb az ICF-hez viszonyítva). A folyamat során keletkező hélium atommagok szintén töltött részecskék, és mivel a fúzióból keletkező energia 20 %-ával rendelkeznek, a plazmával együtt mozogva ütközéseken keresztül tovább tudják fűteni a plazmát. Ennek köszönhetően a fúziós plazma önfenntartó lehet az ún. alfa fűtéssel. Emellett pedig a fúziós hatáskeresztmetszetnek a hőmérséklet függvényében maximuma van (túl nagy hőmérséklet esetén is lelassul a reakció), így a sugárzásból eredő hővesztésnek és a reakció sebességnek a hőmérséklet függése miatt stabil fúziós „égés” valósulhat meg.

A mágneses tér alkalmazásával a plazmát alkotó töltött részecskék Larmor pályára kényszerülnek, vagyis összetartva egy spirális pályán mozognak a mágneses erővonal, mint tengely körül az erővonallal azonos irányba. Ahhoz, hogy a részecskék összetartása ne szűnjön meg a mágneses tér végénél, az erővonalak zárásával tórusz alakú berendezéseket alkalmaznak, így a mágneses tér körbe-körbe halad. A tér görbülete miatt a részecskék mozgása kissé letér a mágneses erővonalakról, emiatt helikálisan feltekert erővonalakat hoznak létre a berendezésben. A helikális teret kétféleképpen lehet megvalósítani. Az egyik esetben egy megcsavart külső tekercsrendszert alkalmaznak, ezt nevezik Sztellátornak, míg a másik megoldásban plazmaáram segítségével állítják be a megfelelő mágneses konfigurációt, mely Tokamak néven ismert.

Hatékonyágának és egyszerű geometriájának köszönhetően a Tokamak vált a legfejlettebb berendezéssé, amelyet az 1960-as években fejlesztettek ki. Jelenleg a legnagyobb Tokamak berendezés a Joint European Torus (JET), amely Oxford mellett található, azonban építés alatt áll az International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), mely felépülését követően átveszi a legnagyobb tokamak titulust. Az ITER már önfenntartó fúziós energia-termelésre is képes lesz, habár csupán kísérleti reaktorként fog működni. A növekvő méretű reaktorok mellett számos kompaktált tokamakot is fejlesztettek és építettek, melyek célja, hogy a tórusz sugarát minél jobban lecsökkentve majdnem gömb alakú plazmát tudjanak létrehozni.

Az MCF-en alapuló fúziós reaktorok fejlesztései számos technológiai kihívásokkal járnak együtt. A mágneses tér létrehozásához a legtöbb berendezésben réz tekercset használnak, azonban ezek működéséhez hatalmas teljesítményre van szükség (JET-nél 800 MW). Ennek orvoslására kezdték el alkalmazni a szupravezetőket, melyek gyakorlatilag elhanyagolható teljesítményűek, csupán a hűtésük fogyaszt energiát (de az sem számottevő a réz tekercsekkel összehasonlítva). Emellett a másik fontos kihívás a plazma széléhez köthető. Habár a mágneses tér tartja egyben és szigeteli el a reaktor belső falától a plazmát, még így is képesek lassan diffundálni a részecskék a fal irányába. Elérve és beleütközve a falba, szennyező (pl. vas) atomokat tudnak felszabadítani a részecskék, amelyek jó sugárzási tulajdonságuknak

köszönhetően rossz hatással vannak a plazmára. Ennek kiküszöbölésére először limitereket építettek be a reaktortérbe, amelyek függőlegesen elhelyezett, megfelelő anyagból készült bordák voltak és feladatuk a plazma (szélének) korlátozása volt. Később kifejlesztettek egy jobb koncepciót, a divertorokat, melyekben plusz tekercseket építenek be (alul-fölül) a berendezésbe. A tekercsek lehántják a plazma szélső rétegét és az alul-fölül kialakított kamrákba helyezik el a limitereket, így oda korlátozzák a plazma-fal kölcsönhatást. A divertorok kialakításának nehézsége, hogy óriási hőterhelésnek vannak kitéve, így ez a fúziós technológia jelenlegi legnagyobb problémája.

Az MCF megvalósítás, a jó szabályozásának és hatékonyságának köszönhetően, a legjobban kutatott és legfontosabb irányvonala a fúziós energiatermelésnek. Habár a fentiekben csupán a két legfontosabb irányzatot mutattuk be, számos más módszerrel is kísérleteznek, amellyel a plazma összetartása és a fúziós reaktor megvalósítható (pl. elektrosztatikus összetartás).

## **IV. Források**

Termonukleáris reakciók:

<https://www.britannica.com/science/nuclear-fusion#ref259122>

<http://atropos.as.arizona.edu/aiz/teaching/a250/pp.html>

[https://www.astro.umd.edu/~chris/Teaching/ASTR120\\_Fall\\_2009/class26.pdf](https://www.astro.umd.edu/~chris/Teaching/ASTR120_Fall_2009/class26.pdf)

[https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-94-009-5253-9\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-94-009-5253-9_2)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Stellar\\_nucleosynthesis](https://en.wikipedia.org/wiki/Stellar_nucleosynthesis)

Nap-neutrínó probléma:

[https://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/themes/physics/bahcall/](https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/themes/physics/bahcall/)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Neutrino\\_oscillation](https://en.wikipedia.org/wiki/Neutrino_oscillation)

<https://hu.wikipedia.org/wiki/Neutr%C3%ADn%C3%B3szcill%C3%A1ci%C3%B3>

Magfúziós energiatermelés fejlesztési irányai:

[http://www.uni-miskolc.hu/~www\\_fiz/paripas/Fuzio.pdf](http://www.uni-miskolc.hu/~www_fiz/paripas/Fuzio.pdf)

<https://www.youtube.com/watch?v=LJoApwpQeVs&t=1666s>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Fusion\\_power](https://en.wikipedia.org/wiki/Fusion_power)