

# Megoldották a napneutrínók problémáját

I. Manno

*MTA KFKI Részecske és Magfizikai Kutató Intézet – Budapest*

## Abstract

2001 június 18.-án a SNO<sup>1</sup> együttműködés bejelentette, hogy megtalálták a megoldást a napneutrínók problémájára, amely több mint 30 éve vetődött fel. A SNO együttműködés első mérési eredményei magyarázatot adnak a napneutrínó-fluxus hiányára és a neutrínók új tulajdonságaira derítettek fényt. A megoldás annyit jelent, hogy legalább egy neutrínó típusnak zérusnál nagyobb véges tömege van, ennek pedig óriási jelentősége van a természettudomány számos területén, hogy a legfontosabbak közül csak egyet a kozmológiát emlitsük.

## A neutrínók

A neutrínók elemi részecskék. Elektromos töltésük nincs. A négy alapvető kölcsönhatás (erős, elektromágneses, gyenge és gravitációs) közül a gravitációs kölcsönhatáson kívül, amely kölcsönhatásban minden részecske részt vesz, csak a gyenge kölcsönhatásban vesznek részt. A neutrínók a leptonok családjába tartoznak. Három elektromosan töltött lepton létezik az elektron ( $e^-$ ), a müon ( $\mu^-$ ) és a tau ( $\tau^-$ ). Minden töltött leptonhoz tartozik egy neutrínó, az elektronhoz az elektron-neutrínó ( $\nu_e$ ), a müonhoz a müon-neutrínó ( $\nu_\mu$ ), a tauhoz pedig a tau-neutrínó ( $\nu_\tau$ ).

## A napneutrínók

Napneutrínóknak nevezzük azokat a neutrínókat, amelyek a Napban keletkeznek. A Nap által szétsugárzott energia mélyen a Nap belsejében keletkezik termonukleáris reakciók láncolatában. A reakcióknak ebben a láncolatában protonokból ( $p$ ) több lépésben hélium ( $^4\text{He}$ ) keletkezik:



A reakciók közül többen elektron-neutrínó keletkezik. Minthogy a neutrínók csak gyengén hatnak kölcsön az anyaggal, ezért könnyen kijutnak a Nap belsejéből és a keletkezésüktől számítva nyolc perc alatt elérik a Földet. A Nap-modellek megjósolják az egyes reakciókban keletkező neutrínók fluxusát<sup>2</sup> és energia spektrumát, amelyeket kísérletileg mérni lehet. Különböző detektálási technikákkal az egész napneutrínó-spektrum különböző részeit lehet vizsgálni. A napneutrínók fluxusa a Föld felszínén:  $6.57 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . A Napban másodpercenként  $2 \times 10^{38}$  elektron-neutrínó keletkezik.

A napneutrínó-kísérletek, amelyek detektálják a Napban keletkező neutrínókat lehetővé teszik a Nap belsejében lejátszódó termonukleáris reakciók kísérleti vizsgálatát. Mint érdekességet megjegyezhetjük, hogy a napneutrínó-kísérletek mélyen a földalól vizsgálják a Nap sugárzását. A kísérletek eredményei alapján lehetőség nyílik:

<sup>1</sup>Sudbury Neutrino Observatory, Sudbury Ontario, Canada

<sup>2</sup>A fluxus egyenlő a részecskék irányára merőleges egységnyi felületen egységnyi idő alatt áthaladó részecskék számával.

- A Napban játszódó energiát termelő folyamatok egyre tökéletesebb megértésére. Olyan Nap-modellek készítésére, amelyek egyre pontosabban írják le a Napban játszódó folyamatokat (csillagászat).
- A neutrínók tulajdonságainak (neutrínó-oszcilláció, a neutrínók nyugalmi tömege stb) egyre pontosabb megértéséhez (részecskefizika).

## A napneutrínók problémája

1968-ban Ray Davis megkezdte úttörő kísérletét a  $^{37}\text{Cl}$ -kísérletet a Homestake bányában az Egyesült Államokban ( $\nu_e + ^{37}\text{Cl} \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$ ). Ez a kísérlet volt az első és két évtizeden keresztül az egyetlen, amely napneutrínókat figyelt meg. Ray Davis az ún. Standard Nap-modell (Standard Solar Model – SSM) által megjósolt értéknél lényegesen kevesebb napneutrínót detektált. A jósolt és mért érték közötti eltérés kapta a napneutrínók problémája (Solar Neutrino Problem – SNP) elnevezést.

A  $^{37}\text{Cl}$ -kísérletet követő napneutrínó-kísérletek (Kamiokande és a gallium kísérletek ( $\nu_e + ^{71}\text{Ga} \rightarrow ^{71}\text{Ge} + e^-$ ): GALLEX – GALLium EXperiment és SAGE – Soviet American Gallium Experiment) igazolták a napneutrínók problémájának a létezését. Ezek a kísérletek a napneutrínók energiaspektrumának nagy részét mérték és nyilvánvalóvá vált, hogy az elméleti és mért érték eltérése más és más az energiaspektrum különböző részein. A napneutrínók problémája nagyon érdekes különösen azért, mert a tudósok gondosan ellenőrizték, mind az elméleti feltételezéseket, mind a kísérleteket és nem találtak hibát egyikben sem.

Hova lettek a napneutrínók? A napneutrínók problémájának megoldását két területen lehet keresni:

- Az asztrofizikai megoldás. Elképzelhető, hogy nem értettük meg jól a Napban játszódó reakciókat és folyamatokat. Új Nap-modellek készítésével próbáljuk az elméleti és mért értékeket összehangolni.
- A részecskefizikai megoldás. A részecskéket és a közöttük létrejövő kölcsönhatásokat az ún. részecskék standard modellje (Standard Model of Particles – SM) írja le. E modell alapján a neutrínók tömege zérus. Ha a három különböző típusú neutrínó közül legalább egynek zérustól eltérő tömege van, akkor fellép az ún. neutrínó-oszcilláció jelensége, amikor egy adott típusú neutrínó átalakul más típusú neutrínóvá. A napneutrínók oszcillációja létrejöhet vákuumban (a Naptól a Földig megtett távolságon), vagy az anyagban (a Nap és a Föld anyagában). Az oszcilláció jelensége függ a neutrínók energiájától. A Napban csak elektron-neutrínók ( $\nu_e$ ) keletkeznek. A keletkezési helyüktől a Napban a detektálási helyükig a Földön megtett úton az elektron-neutrínók ( $\nu_e$ ) egy része más típusú neutrínókká ( $\nu_\mu, \nu_\tau$ ) alakulhat át, amelyet a detektorok többsége nem detektál.

A két lehetséges megoldás közül a részecskefizikai megoldás képes összehangolni az elméleti és mért értékeket a teljes energiaspektrumon. Ez a megoldás azért nagyon érdekes, mert ha bebizonyosodik, hogy ez a megoldás az igaz, akkor olyan új fizikai jelenséggel állunk szemben, amely túlmutat a jelenlegi fizikai ismereteinken.

## Neutrínó-oszcilláció

Ha a három különböző típusú neutrínónak nem egyforma a tömege, akkor fellép az ún. neutrínó-oszcilláció jelensége:

$$\nu_e \rightarrow \nu_\mu, \nu_\tau, \quad \nu_\mu \rightarrow \nu_e, \nu_\tau \quad \text{or} \quad \nu_\tau \rightarrow \nu_e, \nu_\mu. \quad (2)$$

A neutrínó-oszcillációban a neutrínó periodikusan különböző típusú neutrínóként jelenik meg.

Ha a neutrínók bármilyen kis tömeggel is rendelkeznek, akkor a természettudomány számos területén módosítani kell az elméleteinket:

- Módosítani kell a részecskefizika standard modelljét úgy, hogy számot tudjon adni a neutrínók tömegéről. Valamint arról, hogy a leptonszám megmaradása sérül.
- A kozmológia területén a neutrínók képezhetik az Univerzum sötét anyagát (dark matter).

### Neutrínó-oszcilláció a vákuumban

Ha a leptonszám megmaradása nem abszolút módon teljesül és a neutrínóknak tömegük van és azok nem egyenlők egymással ( $m_1 \neq m_2 \neq m_3$ ), akkor a  $\nu_1, \nu_2$  és  $\nu_3$  tömeg-sajátállapotok különböznek a gyenge kölcsönhatás  $\nu_e, \nu_\mu$  és  $\nu_\tau$  sajátállapotaitól. Az egyes tömeg-sajátállapotok a saját  $\omega$  frekvenciájuknak megfelelően változtatják az  $e^{i\omega t}$  fázisukat, ahol  $\omega = E/\hbar = \sqrt{m^2 + p^2}/\hbar$ . Amikor a neutrínó vákuumban halad, akkor a különböző tömeg-sajátállapotok különböző módon haladnak. Így a sajátállapotok összetétele megváltozik és a neutrínó periodikusan különböző neutrínóként jelenik meg. Az egyszerűség kedvéért két különböző típusú neutrínót feltételezve, annak a valószínűsége, hogy müon-neutrínó  $L$  távolság megtétele után müon-neutrínó marad

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\vartheta \sin^2 \left( \frac{1.27 \Delta m^2 L}{E} \right),$$

ahol a neutrínó-nyaláb  $E$  energiáját MeV-ben<sup>3</sup>, a  $\Delta m^2$ -et  $(eV/c^2)^2$  egységben, az  $L$  távolságot pedig méterben kell megadni. A neutrínó-oszcillációt a  $\sin^2 2\vartheta$  és  $\Delta m^2$  paraméterekkel lehet leírni, ahol  $\vartheta$  az ún. keveredés szöge (mixing angle) és  $\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$ .

### Neutrínó-oszcilláció az anyagban

Az anyagon áthaladva a különböző típusú neutrínók másképpen hatnak kölcsön az anyaggal. Így ez a jelenség is neutrínó-oszcillációhoz vezethet:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) \approx \sin^2(2\vartheta) \sin^2 \left( \frac{\Delta m^2 L}{4 E} \right).$$

## Hogyan lehet megoldani a napneutrínók problémáját?

A Napban az elmélet szerint csak elektron-neutrínók ( $\nu_e$ ) keletkeznek. A napneutrínók problémájának részecskefizikai megoldása azt tételezi fel, hogy a Napban keletkező elektron-neutrínók a keletkezési helyüktől a detektorig megtett úton vákuumban (a Nap - Föld távolságon) vagy anyagban (a Nap és Föld anyagában) más típusú neutrínóvá alakulnak át.

---

<sup>3</sup> 1 eV = 1.60211733(49)  $\times 10^{-19}$  J, 1 eV/c<sup>2</sup> = 1.782661731(70)  $\times 10^{-36}$  kg

A napneutrínó-detektorok eddig csak az elektron-neutrínókat detektálták. Ahhoz, hogy véglegesen el lehessen dönteni azt, hogy a Napban keletkező elektron-neutrínók ( $\nu_e$ ) a detektorig megtett útjukon átalakulnak-e vagy sem más típusú neutrínókká ( $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$ ), olyan napneutrínó-detektorra van szükség, amely egyrészt képes detektálni a Napból érkező elektron-neutrínókat ( $\nu_e$ ), másrészt képes detektálni a Napból érkező minden neutrínót, a típusától függetlenül ( $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  és  $\nu_\tau$ ). Összehasonlítva a két módon mért neutrínók számát egyértelműen el lehet dönteni, hogy az elektron-neutrínók átalakultak-e más típusú neutrínókká vagy sem. Canadában készítettek egy ilyen kísérletet. Ez a kísérlet most végleges megoldást adott a napneutrínók problémájára.

## Sudbury Neutrino Observatory

A SNO a napneutrínó-kísérletek legutolsó generációjához tartozik. A detektor 2073 m mélyen van a Creighton bányában, Sudbury Ontario, Canada. Ez a mélység 6010 m vastag víréteggel azonos védelmet nyújt a kozmikus sugárzás ellen. A SNO egy Čerenkov detektor<sup>4</sup>, amely azonos időben (real time) méri a napneutrínókat. A detektor mérő térfogata 1000 tonna D<sub>2</sub>O nehéz vizet tartalmaz, amelyet 4 m vastag H<sub>2</sub>O víz réteg vesz körül<sup>5</sup>. A detektor céltárgyát (mérő térfogatát) körülötte koncentrikusan elhelyezett 9456 fotoelektron-sokszorozó figyel. A kívánt jel/zaj arány eléréséhez a nehéz és könnyű vizet annyira meg kell tisztítani a rádióaktív szennyeződésektől, hogy 1 g mennyiségű vízben legfeljebb 10<sup>-15</sup> g rádióaktív szennyeződés lehet.

Amikor az elektron-neutrínó ( $\nu_e$ ) a töltött áram közvetítésével hat kölcsön a deutériummal, akkor egy  $W^+$  bozon átadására kerül sor és a deutérium neutronja protonná változik:

$$\nu_e + D \rightarrow p + p + e^-, \quad (\text{CC}) ,$$

ahol CC – charged current (töltött áram). Ebben a reakcióban csak az elektron-neutrínó vehet részt. A két proton taszítja egymást így az atommag részeire esik szét és reakció végterméke két proton és egy elektron lesz. A vízben az elektron gyorsabban halad a féynél, így Čerenkov sugárzást hoz létre. A neutrínó energiáját és haladási irányát meg lehet határozni a fotoelektron-sokszorozók jeleiből.

Amikor a neutrínó a deutériummal a semleges áram közvetítésével hat kölcsön, akkor egy  $Z^0$  bozon átadására kerül sor:

$$\nu + D \rightarrow \nu + n + p, \quad (\text{NC}) ,$$

ahol NC – neutral current (semleges áram). Ebben a reakcióban valamennyi típusú neutrínó ( $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$ ) egyforma valószínűséggel vesz részt. A deutérium atommagja, ebben az esetben is alkotórészeire esik szét. Ezen kívül az elektronokon is valamennyi típusú

---

<sup>4</sup>Čerenkov sugárzás akkor jön létre, ha egy elektromosan töltött részecske egy átlátszó közegben gyorsabban halad, mint a fény  $v > v_t = c/n$ , ahol  $v$  a részecske sebessége,  $v_t$  a fény sebessége az átlátszó anyagban,  $c$  a fény sebessége vákuumban,  $n$  pedig az átlátszó anyag fénytörés mutatója. A töltött részecske polarizálja az átlátszó anyag molekuláit, amelyek gyorsan visszatérnek alapállapotukba és közben fotonokat bocsátanak ki. A kibocsátott sugárzás hullámfrontja  $\delta$  szöget zár be a részecske haladási irányával:

$$\cos \delta = v_t/v = c/(vn) = 1/(\beta n) ,$$

ahol  $\beta = v/c$ .

<sup>5</sup>A közönséges víz ("könnyű" víz) molekulájában (H<sub>2</sub>O) egy oxigén (O) és két hidrogén (H) atom van. A "nehéz" víz molekulájában (D<sub>2</sub>O) a hidrogén helyett deutérium (D) van. Kémiai szempontból a "nehéz" és "könnyű" víz egyformán viselkedik. A hidrogén atommagjában egy proton ( $p$ ), a deutérium atommagjában pedig egy proton és egy neutron ( $n$ ) van. A deutérium a hidrogén izotópja.

neutrínó rugalmasan szóródhat:

$$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^- \quad (\text{ES}) ,$$

ahol ES – elastic scattering (rugalmas szórás).

Így a kísérlet méri az összes neutrínót, amely a Napból érkezik, attól függetlenül, hogy a detektorig megtett úton a neutrínók átalakultak-e egymásba vagy sem és méri csak az elektron-neutrínókat, amelyek a Napból érkeznek. A két fluxust összehasonlítva egyértelműen el lehet dönteni, hogy a Napban keletkező elektron-neutrínók átalakulnak-e vagy sem más típusú neutrínókká.

## Az első eredmények

A SNO együttműködés első méréseiben a (CC) és (ES) kölcsönhatásokat mérte és a mérési eredményekből meghatározták a  $\phi(\nu_e)$  és  $\phi(\nu_x)$  fluxusokat. Később mérni fogják a  $\phi(\nu_x)$  fluxust a (NC) kölcsönhatás segítségével is. Az első mérések eredményei:

$$\phi_{SNO}^{CC}(\nu_e) = 1.75 \pm 0.07(\text{stat.})_{-0.11}^{+0.12}(\text{sys.}) \pm 0.05(\text{theor.}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} ,$$

$$\phi_{SNO}^{ES}(\nu_x) = 2.39 \pm 0.34(\text{stat.})_{-0.14}^{+0.16}(\text{sys.}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} .$$

A  $\phi_{SNO}^{CC}(\nu_e)$  értéket összehasonlítva a Szuper Kamiokande (SK) nagy pontossággal megmért  $\phi_{SK}^{(ES)}(\nu_x)$  értékével, azt kapták, hogy az elérés a hiba 3.3-szorosa:

$$\phi_{SK}^{ES} = 2.32 \pm 0.03(\text{stat.})_{-0.07}^{+0.08}(\text{sys.}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} ,$$

$$\phi_{SK}^{ES}(\nu_x) - \phi_{SNO}^{CC} = 0.57 \pm 0.17 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} .$$

Ez pedig annyit jelent, hogy nagy megbízhatósággal állíthatjuk, hogy a teljes neutrínó-fluxusban nem csak elektron-neutrínók vannak.

Kiszámították a teljes  $^8\text{B}$ -neutrínó fluxust is:

$$(5.44 \pm 0.99) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} .$$

Ez pedig kitűnő egyezésben van az elméleti értékkel:

$$5.05 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} .$$

A kísérleti eredmények alapján új határokat lehet megadni a neutrínók tömegére. Azt is meg lehet becsülni, hogy a neutrínók mennyivel járulnak hozzá az Univerzumban található sötét anyaghoz.

Összefoglalva, azt mondhatjuk, hogy az itt említett eredmények első esetben igazolják direkt módon, hogy a detektált napneutrínók között az elektron-neutrínókon kívül más típusú neutrínók is vannak. Ez pedig annyit jelent, hogy létezik a neutrínó-oszcilláció jelensége és így legalább egy neutrínó típusnak zérustól nagyobb véges tömege van.

## References

- [1] <http://sno.phy.queensu.ca/>
- [2] John N. Bahcall, How the Sun Shines, Nobel e-Museum,  
<http://www.nobel.se/physics/articles/fusion/index.html>
- [3] John N. Bahcall, Neutrino Astrophysics, Cambridge University Press, Cambridge, 1989.
- [4] Manno István, A napneutrínók, Természet Világa 127. évf. 4.sz. 1996. április.
- [5] Manno István, “Csendes fizika”, Természet Világa, 131. évf. különszám, 2000. március.