

HOGYAN TEGYÜK LÁTHATÓVÁ A LÁTHATATLANT?

Nobel-díjas neutrínó-kísérletekről a 2015. évi fizikai Nobel-díj kapcsán

Trócsányi Zoltán részecskefizikus, az MTA rendes tagja

2015 december 10-én a fizikai Nobel-díjat egy japáni kutató, **Takaaki Kajita** és a kanadai **Arthur B. McDonald** kapták fele-fele arányban osztva a „*neutrínó-rezgés felfedezéséért, ami bizonyítja, hogy a neutrínóknak van tömegük*” (1. ábra). Ez volt a harmadik Nobel-díj, amelyet neutrínó-kutatók kaptak. Az elsőt Frederick Reines kapta éppen húsz éve (megosztott díj) a neutrínó létezésének közvetlen kimutatásáért. A másodikat (a díj felét megosztva) Raymond Davis Jr. és Masatoshi Koshiba a kozmikus eredetű neutrínók észleléséért 2002-ben. A két évtizeden belül három Nobel-díj ugyanannak a részecskének a kutatásáért azt sejteti, hogy a neutrínóknak egyre fontosabb szerep jut a világ alapvető működésének megértéséhez vezető úton.

A neutrínók felfedezése

A neutrínó feltételezett részecskeként jelent meg a tudományban. Wolfgang Pauli jóslta meg létezését 1930-ban egy konferenciához írt nyílt levélben. Jóslatát a fizikában alapvető fontosságú megmaradási elvek vezérelték. Az akkor már ismert béta-bomlásban, amelynek során a protonnál kicsit nagyobb tömegű neutron magától átalakul protonná és elektronná, Pauli szerint az energia, lendület és perdület megmaradása megköveteli egy további, „láthatatlan” részecske keletkezését. Az elektromos töltés megmaradása megkövetelte, hogy e részecske legyen semleges, az energia megmaradása pedig azt, hogy tömege legyen kicsi, a legkisebb tömegű töltött részecske, az elektron tömegénél is sokkal kisebb.

A Csikai Gyula és Szalay Sándor által készített híres debreceni felvétel (2. ábra) a két protont és négy neutron tartalmazó hélium (${}^6\text{He}$) atommag bomlását örökítette meg. A ködkamra felvételen jól látszik a három protont és három neutron tartalmazó lomha litium (${}^6\text{Li}$) atommag és a gyors elektron nyoma. Nyilvánvaló, hogy a lendület megmaradása megköveteli egy további részecske távozását, amely azonban a ködkamrában nem hagyott nyomot. A bomlás szokásos értelmezése, hogy a hélium egyik neutronja átalakult protonná, elektronná és elektron-antineutrínóvá, $n^{(0)} \rightarrow p^{(+1)} + e^{(-1)} + \text{anti-}\nu_e^{(0)}$ (a felső index az elektromos töltést jelzi a proton töltésének egységében). Ha az átlalkuló neutron egy atommagban van, akkor a folyamat elemátalakulással is jár, ami során eggyel nagyobb rendszámú elem atomja keletkezik, mint a felvételen is látszik. Elemibb szinten a folyamat úgy zajlik le, hogy a neutronban egy d-kvark átváltozik u-kvarkká, $d^{(-1/3)} \rightarrow u^{(+2/3)} + e^{(-1)} + \text{anti-}\nu_e^{(0)}$.

A neutrínók a fotonokkal (a fény részecskéivel) együtt a Világegyetem leggyakoribb részecskéi. Amíg azonban a fény minden elektromos töltéssel bíró részecskére hat, ezért könnyen észlelhető, a neutrínók közvetlen észlelése lehetetlen. Minthogy elektromosan semlegesek, nem hat rájuk sem az elektromágneses erő, de a kvarkokat nukleonokba, és azokat atommagokba kényszerítő erős kölcsönhatás sem. Csupán az elemátalakulásért felelős gyenge kölcsönhatást érzik, amely a nevéhez méltón nagyon gyenge. Olyannyira gyenge, hogy amennyiben egymillió neutrínót „kilőnék egy neutronpuskából a föld felé tartva a fegyvert”, akkor csupán mintegy tízet nyelne el a

Föld, a többi irányváltozás nélkül haladna át rajta, és továbbrepülne a világűrbe a Föld másik oldalán.

Ahogy közvetve a debreceni kísérlet is mutatta, a neutrínók és a szokásos anyag kölcsönhatása nem teljesen nulla, ami mégiscsak lehetőséget nyújt a neutrínók észleléséhez. A fenti példánk szerint mintegy 10^{-5} annak valószínűsége, hogy a 12.740 km átmérőjű Földben elnyelődjenek a neutrínók. Akkor annak valószínűsége, hogy egy 12,74 m vastag (teremnyi méretű) neutrínó-detektoron fennakadjanak milliószor kisebb, 10^{-11} . Ahhoz tehát, hogy néhány neutrínót észleljünk egy nagy detektorban ezer milliárd (10^{12}) neutrínónak kell rajta áthaladni. Ilyen sok neutrínót a Földön atomreaktorok termelnek. A neutrínók létezésének közvetlen kimutatása valóban atomreaktor közelében történt (előbb a hanfordi majd a Savannah riveri reaktornál). 1956-ban Clyde L. Cowan és F. Reines a reaktorban keletkező antineutrínók kimutatásához az $\text{anti-}\nu_e^{(0)} + \text{p}^{(+1)} \rightarrow \text{n}^{(0)} + \text{e}^{(+1)}$ folyamatban keletkező neutronokat és anti-elektronokat (pozitronokat) használták. A detektor anyaga CdCl_2 vizes oldata volt. A pozitronok azonnal találkoznak az anyag valamely elektronjával, és keletkezik belőlük két foton, $\text{e}^{(-1)} + \text{e}^{(+1)} \rightarrow 2\gamma$, amelyeket fénysokszorozó csövekkel észlelnek. A neutronokat az oldott kadmium atommagjai nagy valószínűséggel fogják be, amit átlagosan 5 μs késéssel egy nagy energiájú foton kibocsátása követ, $\text{n} + {}^{108}\text{Cd} \rightarrow {}^{109}\text{Cd} + \gamma$. A fotont szintén a fénysokszorozók észlelik. A két fényjel – közöttük 5 μs késletetéssel – tehát egy antineutrínó befogására utalt. (l. 3. ábra) Az adatgyűjtést elvégezték üzemelő és kikapcsolt reaktor mellett, így meg tudták határozni csupán a reaktorból származó neutrínók ütközésének gyakoriságát, abból pedig a folyamat hatáskeresztmetszetét ($6,3 \cdot 10^{-48} \text{ m}^2$), amely jól egyezett a Fermi-elméletből számolt elméleti jóslattal ($6 \cdot 10^{-48} \text{ m}^2$).

A reaktorból érkező neutrínók csakis pozitronokat keltettek. Később sikerült neutrínót előállítani felgyorsított protonok nyalábjával is. Az anyagra lőtt protonnyalábból azonban csak olyan neutrínók keltek, amelyek az elektronnal mindenben egyező tulajdonságú, de annál mintegy 200-szor nagyobb tömegű müonokat keltettek. Így világossá vált, hogy legalább kétféle neutrínó létezik: az elektronokat keltő elektron-neutrínó, és a müonokat keltő müon-neutrínó (felfedezéséért Leon M. Lederman, Melvin Schwartz és Jack Steinbeiger 1988-ban kapott Nobel-díjat). A semleges és töltött leptonoknak ez a párba rendezése lett az alapja a részecskefizikai standard modellnek, amely olyan sikeresnek bizonyult, hogy amikor M. Perl kutatócsoportja 1975-ben felfedezte a harmadik, a müonnál is 20-szor nagyobb tömegű töltött leptont (megosztott Nobel-díj 1995-ben), a tau részecskét, akkor mindenki egyetértett abban, hogy léteznie kell egy harmadik fajta neutrínónak is, amelyet értelemszerűen tau-neutrínónak neveztek el. Közvetlen kimutatása 2001-ben sikerült.

Neutrínó rejtélyek

Az 1960-as évek második felében R. Davis kezdte vizsgálni a Naptól származó neutrínók áramsűrűségét. Addigra már elég sok ismeret gyűlt össze a Napban folyó energiatermelő folyamatokról, mint például $4\text{p}^{(+1)} \rightarrow {}^4\text{He}^{(+2)} + 2\text{e}^{(+1)} + 2\nu_e^{(0)}$. John N. Bahcall vette számba az összes Napbeli folyamatot, és végzett részletes modellszámításokat, amelyekből meg lehetett jósolni a Földre érkező elektron-neutrínók várható áramsűrűségét a neutrínók energiájának függvényében. Davis munkatársaival a Dél-dakotai Homestake aranybányában a felszín alatt 1480 m mélyen 615 t perklóretilént (vegytisztítószer) tartalmazó neutrínó-detektort telepített.

A számítások alapján 1 SNU, azaz 10^{36} db klór atommagra egyetlen $\nu_e^{(0)} + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^{(-)}$ folyamat volt várható másodpercenként. 10^{36} db klór atom tömege mintegy 45 ezer tonna, tehát a neutrínó kölcsönhatások észleléséhez nagy tömegű detektorra van szükség. A mélységi elhelyezés célja a kozmikus sugárzás által keltett argon atomok elnyomása volt. A klór atommag és a neutrínó ütközésében radioaktív argon és elektron keletkezik. A folyamathoz szükséges energiájú neutrínó leginkább bór bomlásából keletkezik a Napban. A radioaktív argont kéthavonta kivonták a detektorból, és megmérték a radioaktivitását, amelynek erősségéből a keletkezett argon atomok számára lehetett következtetni: $2,56 \pm 0,23$ SNU, azaz egyetlen argon atom keletkezett 48 óránként! Az eredményben az volt a meglepő, hogy Bahcall modellszámítása $8,2 \pm 1,8$ SNU volt várható, azaz a mért érték jóval kisebb volt a jóslatnál. Az eltérés megerősítése érdekében több más kísérletben is megmérték a Naptól érkező neutrínók áramsűrűségét. A mérési eredmények mind megerősítették egymást, és mind jóval kisebbnek adódott a Nap-modell jóslatánál, ami *Nap-neutrínó hiány* (vagy *rejtély*) néven vált ismertté.

A radiokémiai kísérlet, bár egyszerűnek hangzik, nagyon sok nehézség leküzdését kívánta. A legnagyobb kihívást a 70 nap alatt keletkező 17 db Ar atom kivonása jelentette. A módszer pontosságát erősen befolyásolta az argon atomok kivonásának hatékonysága, amit ugyan Davis nagyon gondosan meghatározott, de mégis érdemes volt más módszert is használni a Nap-neutrínók áramsűrűségének méréséhez. 1980-as években M. Koshiba csoportja a Kamiokande japáni cinkbányában épített egy 2140 t tiszta víz befogadására alkalmas acélhordót, amelynek a falára fénysokszorozó csöveket szerelt. A kísérlet eredeti célja az volt, hogy a protonok esetleges bomlását megfigyeljék. Akkor divatos elmélet szerint 1000 t vízben évente mintegy 300 proton bomlása volt várható, amelynek a végtermékei gyorsan (majdnem az üres térben mért fénysebességgel) mozgó töltött részecskék. Anyagban azonban a fény lassabban halad az anyag törésmutatójának hányadában. Így a detektorban a proton esetleges bomlásakor keletkező töltött részecskék gyorsabban mennek, mint a fény, aminek jellegzetes kísérő jelensége fény kibocsátása a részecske haladási irányát körülölelő kúp mentén. Az ilyen Cserenkov-sugárzásnak hívott fény a detektor falán ovális fényfoltot hagy, amelyet az ott elhelyezett fénysokszorozóval lehet mérni (4. ábra). Nos Koshibáék detektora nem talált proton bomlására utaló Cserenkov-sugárzást.

Az együttműködés tagjai hamar rájöttek, hogy kísérleti berendezésük alkalmas lehet nem csupán neutrínók észlelésére, hanem a különböző (ν_e és ν_μ) megkülönböztetésére is. Amennyiben müon-neutrínó ütközik a vízben található protonnal, akkor müon lökődik ki, amely lényegében egyenes pályán halad tovább, jól körülhatárolt Cserenkov-kúpot indítva (5. ábra). Ha azonban elektron-neutrínó érkezik, az elektront lök ki a protonból. Az elektron nagy energiájú fotont kelt, amely csakhamar elektron-positron párrá alakul, és így tovább. A ν_e tehát elektromágneses részecskék záporát kelti, és így a Cserenkov-kúp határa elmosódottá válik (6. ábra). Az eredeti detektor érzékenysége azonban messze nem volt elegendő. A proton tömege viszonylag nagy ($940 \text{ MeV}/c^2$), így az abból esetlegesen keletkező töltött részecskék energiája is nagynak volt várható, ezért nem volt szükség olyan kis energiájú ($< 10 \text{ MeV}$) neutrínók észlelésére alkalmas érzékenységgű detektorra, mint a Naptól érkezők. Az érzékenység javítása céljából 1000 db nagy méretű (50 cm átmérőjű) fénysokszorozót helyeztek a hordó falára, és a hordót magát egy másik tartályba helyezték. Így 1500 t vízzel vették körül a belső hordót a háttérsugárzás kiszűrése érdekében (ún. antikoincidencia módszerrel). A feljavított *Kamiokande II kísérlet elrendezése*

érzékeny volt a beérkező neutrínók irányára, és megerősítette a Davis kísérletében észlelt Nap-neutrínó hiányt.

A Napon kívül más forrása is van a Földön kívülről származó neutrínóknak. A világűrben érkező kozmikus sugárzásban érkező protonok a Föld légkörébe érve ütköznek a felső rétegekben (felszíntől 15-20 km-re) található atommagokkal (jellemzően nitrogén és oxigén magok), aminek következtében elsősorban töltött π -mezonok, pionok keletkeznek. A pionok bomlókonyak. Jellemző folyamat például a $\pi^{(+)} \rightarrow \mu^{(+)} + \nu_{\mu}^{(0)}$ bomlás. A keletkező müon szintén bomlókony, $\mu^{(+)} \rightarrow e^{(+)} + \text{anti-}\nu_{\mu}^{(0)} + \nu_e^{(0)}$. Hasonlóan bomlik a negatív töltésű pion (és a többi ritkábban megjelenő mezon) is, $\pi^{(-)} \rightarrow \mu^{(-)} + \text{anti-}\nu_{\mu}^{(0)} \rightarrow e^{(-)} + \nu_{\mu}^{(0)} + \text{anti-}\nu_e^{(0)}$. A folyamat végén tehát neutrínók jelennek meg a légkörben (légköri neutrínók), méghozzá kétszer annyi müonhoz kapcsolódó, mint elektronhoz kapcsolódó (7. ábra). Így a $(\nu_{\mu} + \text{anti-}\nu_{\mu})$ részecskék áramsűrűségének és a $(\nu_e + \text{anti-}\nu_e)$ áramsűrűségnek a várható aránya 2. (Pontosabban az arány függ a neutrínók energiájától is: 1 GeV alatt kettő, felette monoton növekszik.) A Kamiokande detektorral ez az arány is mérhető, de mérés tervezéséhez, és az eredmények értelmezéséhez meg kell értenünk egy különleges, csak a neutrínókra jellemző jelenséget.

Neutrínók keveredése

A neutrínók tulajdonságainak kutatása tehát több rejtélyes jelenséget is mutatott, amelyekről utóbb kiderült, hogy közülük van a neutrínók tömegéhez. A neutrínók tömegének megmérése közvetlenül a trícium bomlásban, $t \rightarrow {}^3\text{He} + e + \text{anti-}\nu_e$, keletkező elektronok legnagyobb energiájának mérésével lehetséges. Minél nagyobb a neutrínó tömege, annál kisebb a lehetséges legnagyobb energiája az elektronnak. Minden eddigi mérés eredménye arra utal, hogy a neutrínó tömege nem különbözik nullától a mérés bizonytalanságát is figyelembe véve. Így a részecskék standard modelljében a neutrínók tömegét nullának feltételezzük annak ellenére, hogy nincs rá semmilyen komoly elméleti indok, hogy így legyen. Éppen ezért sok kísérlet célkitűzése a neutrínók tömegének megmérése.

Bruno Pontecorvo már 1960-ban felvetette, hogy a különböző fajtájú (szaknyelven ízű ☺) neutrínók átalakulhatnak egymásba, ha egy rögzített ízű neutrínó, mondjuk ν_{μ} tömege nem egyértelmű, hanem több (valószínűleg három) különböző rögzített m_i tömegű neutrínó keveréke. Ilyen esetben elemi kvantummechanikai számítással megkapható, hogy egy szabadon repülő müon-neutrínó meghatározott L távolságot befutva átalakulhat másik ízű, például tau-neutrínóvá. Annak valószínűsége, hogy nem alakul át L távolság után $P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}) = 1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin^2(\pi/2 \cdot \Delta m^2 \cdot c^4 \cdot L / (h \cdot c \cdot E_{\nu}))$, ahol $\Delta m^2 = m_j^2 - m_i^2$ a keveredő neutrínótömegek négyzetének különbsége, $h \cdot c = 1,24 \cdot 10^{-9}$ eV·km a Planck állandó és a fénysebesség szorzata, E_{ν} a neutrínó energiája, θ pedig a „neutrínó keveredés szöge”, amely megszabja hogy mennyi az i és j tömegkomponensek részesedése ν_{μ} -ben. Ha $\theta = 0^\circ$ (vagy 90°), akkor ν_{μ} tisztán ν_i (vagy ν_j), és nincs keveredés. Ha $\theta = 45^\circ$, akkor ν_{μ} -ben egyenlő arányban van ν_i és ν_j . Ebben az esetben a legnagyobb a neutrínókeveredés, és – kizárólag $\nu_{\mu} \leftrightarrow \nu_{\tau}$ keveredést feltételezve – meghatározott L távolságot megtéve ν_{μ} teljesen ν_{τ} -vá alakul. Amennyiben a neutrínó ezután továbbhalad, akkor újabb L távolság megtétele után visszaalakul az eredeti müon-neutrínóvá, és így oda-vissza alakul. Ezt a jelenséget nevezzük *neutrínó-regésnek* (8. ábra).

A neutrínó-rezgés feltétele, hogy a *neutrínóknak legyen tömege* (egyébként $\Delta m^2 = 0$, és $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1$). Annak érdekében, hogy kézzelfogható képet nyerjünk, mekkora távolságokon számíthatunk átalakulásra, tegyük fel, hogy $\Delta m^2 = (1 \text{ eV}/c^2)^2$, a neutrínó energiája pedig $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$. Ekkor $\Delta m^2 \cdot c^4 \cdot L / (h \cdot c \cdot E_\nu) = L/1,24 \text{ km}$, tehát $L = 1,24 \text{ km}$ esetén a szinusz függvény értéke éppen 1, ami a legnagyobb $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ átalakulást jelenti. Tízszor nagyobb neutrínó energia esetén tízszer ekkora távolságra van szükség, $\Delta m^2 = (0,1 \text{ eV}/c^2)^2$ esetén százszor nagyobbra az átalakuláshoz. Amennyiben sikerül észlelni a neutrínó-rezgést és meghatározni az átalakuláshoz szükséges távolságot, akkor következtetést tudunk levonni a neutrínók tömegére.

Amennyiben a neutrínó-rezgés létezik, akkor az átalakulás miatt a légköri neutrínók keletkezésekor várt $(\nu_\mu + \text{anti-}\nu_\mu)/(\nu_e + \text{anti-}\nu_e) = 2$ aránytól eltérő arányban várhatjuk a kétfajta neutrínók észlelt arányát. A Kamiokande II detektorral észlelt neutrínók között 1988-ban 93 ± 9.6 volt elektronhoz kapcsolódó és csupán 85 ± 9.2 müonhoz kapcsolódó. Míg az előbbieket száma jól egyezett az elméleti modell becslésével, az utóbbiból sokkal kevesebbet sikerült észlelni. A kutatók megoszlottak az eredmény értelmezését tekintve. Egyesek szerint a mérés eredménye hibás volt, a modell megbízható adatokra támaszkodva adta a becslést. Mások szerint a müon-neutrínókra vonatkozó eredmény a neutrínó-rezgésnek tudható be. A légkörben keletkező neutrínók ugyanis érkehetnek a detektor feletti égbolt felől, vagy éppenséggel a Föld túloldaláról, áthaladva a Földön (természetesen minden irányból, de ez a két szélsőséges helyzet), azaz a keletkezésüktől számítva 10–12700 km utat megtéve (9. ábra). Így lehetőségük nyílt az átalakulásra az energiájuk és a megtett út függvényében. A kételkedők kifogása az volt, hogy a különböző irányokból érkező neutrínók esetén átlagosan legfeljebb a neutrínó-rezgés hatásának 50 %-a észlelhető, az is csak akkor, ha a keveredés szöge 45° , amit valószínűtlennek gondoltak. Ezért a jelenséget légköri neutrínó anomáliának nevezték.

A Kamiokande II detektor irányérzékenysége lehetőséget nyújtott a mérés érzékenységének növelésére. A detektor feletti légkörben várhatóan ugyanannyi neutrínó keletkezik, mint a Föld túloldalán található légkörben. Így ha nem létezik a neutrínó-rezgés, akkor ugyanannyi neutrínó érkezését várjuk felülről, mint alulról. Ha azonban van neutrínó-rezgés, akkor ez a fel-le szimmetriája a müon-neutrínók áramsűrűségének megszűnik, mert a felülről, illetve alulról érkező neutrínók lényegesen különböző utat tesznek meg a keletkezésüktől számítva, így különböző valószínűséggel alakulnak át. Különösen igaz ez a nagy-energiájú, több GeV-es neutrínókra. A Kamiokande II 1994-ben közölte először, hogy a felfelé repülő müon-neutrínókból kevesebbet észlelnek, mint a lefelé repülőkből (10. ábra). A mérési eredmény azonban kevés eseményen alapult, csupán annyit tudtak kijelenteni, hogy 1%-nál kisebb a valószínűsége annak, hogy egyszerűen az eseményszám ingadozásának köszönhető a fel-le szimmetria sérülése. A részecskefizikában felfedezésnek akkor neveznek egy mérési eredményt, ha az eredmény eseményszám-ingadozással adott értelmezésnek a valószínűsége kisebb mint $10^{-5}\%$.

Annak érdekében, hogy növeljék az eseményszámot, új detektort terveztek nagyobb térfogattal (22500 t vizet magába foglaló belső, és azt 27500 t vízzel körülölelő külső henger) és több (a belső henger falán 11200 db 50 cm átmérőjű, a külsőn pedig 1900 db 20 cm átmérőjű) fénysokszorozóval. Ez lett a Szuper-Kamiokande kísérlet (11. ábra). A Kamiokande-detektorhoz képest mintegy hússzor nagyobb belső térfogat a neutrínó-események számának gyakoriságát hússzorosára növelte. A nagy számú

fénysokszorozó lehetővé tette a neutrínó-események részletes elemzését. A detektor 1996-ra készült el, és 1998 tavaszára már 5400 neutrínó-eseményt figyeltek meg. Szinte 100%-os hatásfokkal tudta a müon-neutrínókat észlelni, és gyorsan sikerült megerősíteni a Kamiokande II-nek az $R_{\mu/e} = (v_{\mu} + \text{anti-}v_{\mu})/(v_e + \text{anti-}v_e)$ hányadosra kapott eredményét, amely szerint a mért adatok és a neutrínó-rezgést nem feltételező elmélet hányadosa $(R_{\mu/e})_{\text{mérés}}/(R_{\mu/e})_{\text{elmélet}} = 0.688 \pm 0.053$, amit akár a müon-neutrínók átalakulásaként is lehet értelmezni.

Amint korábban érveltünk a neutrínó-rezgés egyértelmű jele a fel-le szimmetria sérülése müon-neutrínók esetén. A Szuper-Kamiokande adataiban jól szét lehetett válogatni az elektron- és müon-neutrínókat, csoportosítani azokat energiájuk és érkezési irányuk szerint. Így egyértelműen sikerült kimutni, hogy a légköri neutrínók esetében a fel-le szimmetria erősen sérül müon-neutrínók esetén: a fefelé, illetve lefelé mért áramsűrűség hányadosa 0.54 ± 0.04 , míg elektron-neutrínókra ugyanez a hányados nagy pontossággal 1. Az 1998-ban, éppen 10 évvel a légköri neutrínó-anomália észlelése után bejelentett eredmény a felfedezés erejével erősítette meg a korábbi Kamiokande II mérést, és tudományos tényé emelte a kozmikus sugárzás hatására a légkörben keletkező neutrínók átalakulását repülésük közben.

Az új tudományos eredmények nem azért izgalmasak, mert választ adnak egy kérdésre, hanem azért, mert új kérdések sokaságát vetik fel. Így volt ez a neutrínó-rezgés felfedezésével is. Meg kellett mérni a rezgéshez szükséges Δm^2 tömeg-négyzet különbséget, a keveredés θ szögét. A mérésben csak a müon-neutrínók eltűnédezését sikerült észlelni. Vajon a várakozásnak megfelelően tau-neutrínóvá alakultak? (Emlékezzünk: az elektron-neutrínók száma nem változott.) Van-e keveredés más neutrínók között? Nem utolsó sorban: a légköri neutronokra talált átalakulást meg lehet-e figyelni a Naptól érkező neutrínók esetében is? A korábban fejtegetett Nap-neutrínó rejtélyre is a neutrínó-rezgés a magyarázat?

Az utóbbi kérdés megválaszolása végett építették a Sudbury Neutrino Observatory SNO detektorát, és telepítették 2000 m-re a felszín alá a kanadai Sudbury melletti bányában (Ontario állam). A Kamiokande detektorokhoz hasonlóan ez is közvetlenül a neutrínó-eseményekkor keletkező Cserenkov-kúpokat észlelte fénysokszorozó csövekkel. Minthogy azonban a Naptól érkező neutrínók energiája lényegesen kisebb (néhány MeV), ezért a működés elve más volt.

Az SNO detektor anyaga 1100 t tiszta nehézvíz (D_2O) volt egy 6 m sugarú gömbben. Az ebben lévő deutérium-atomokkal ütköző neutrínók folyamatai lehetnek töltött részecskét keltő $v_e^{(0)} + d^{(+1)} \rightarrow p^{(+1)} + p^{(+1)} + e^{(-1)}$, illetve semleges részecskét keltő $v_x^{(0)} + d^{(+1)} \rightarrow p^{(+1)} + n^{(0)} + v_x^{(0)}$ folyamatok, amelyek a bór béta-bomlásából eredő neutrínókra érzékenyek. A töltött folyamatban csakis az elektron-neutrínók vesznek részt, míg a semlegesben mindhárom neutrínó egyformán ($x = e, \mu, \tau$), amennyiben energiájuk nagyobb a deutronban kötött proton és neutron 2,2 MeV-os kötési energiájánál. A két folyamat mellett lehetséges még a neutrínók rugalmas szóródása a nehézvíz elektronjain: $v_x + e \rightarrow v_x + e$, amelyben ugyan mindhárom neutrínó részt vehet, de elsősorban az elektron-neutrínókra érzékeny. Minthogy a detektor egyszerre méri az érkező elektron-neutrínók áramsűrűségét magában és az összes neutrínó áramsűrűségét, így neutrínó-rezgés létezése esetén egyértelmű választ lehet adni arra, hogy mi történik a Nap-neutrínó rejtélyben eltűnt elektron-neutrínókkal: az elektron-neutrínók átalakulnak másfajtvá, így az összes neutrínó áramsűrűsége nem

csökkenhet. A mérés értelmezéséhez nincs szükség összehasonlításra a Nap-modell által becsült neutrínó áramsűrűségekkel.

A töltött és rugalmas folyamatra közvetlenül a keletkező elektronok Cserenkov-kúpja utalt. A semleges folyamatban a keletkező neutront észlelték, ami lényegesen bonyolultabb, három lépésben történt. Az első lépésben a keletkező neutronokat a detektor anyagában található deutronok megkötötték, ami 6,25 MeV energiájú foton kibocsátásával jár. Az utóbbi Cserenkov-kúpját érzékelik a fénysokszorozó csövek. A második lépésben 2,2 t konyhasót oldottak a nehézvízben. Az oldatban található klór ionokon nagyobb valószínűséggel kötődnek meg a neutronok, közben 8,6 MeV energiájú foton keletkezik. A neutronreakciókban keletkező fotonok Cserenkov-kúpjai tisztábban kör alakú jelet hagynak, mint a többi folyamatban keletkező elektronok, így a kétféle folyamat eseményei (statisztikusan) szétválaszthatók. A harmadik lépésben a sót kivonták, a fénysokszorozó csöveket proporcionális számlálókkal helyettesítették, amelyekkel közvetlenül a neutronokat lehet észlelni.

Az SNO 2002-ben közölt eredményei egyértelműen a neutrínó-rezgést támasztották alá: az elektron-neutrínók áramsűrűsége a Föld felszínén a töltött folyamat alapján $\Phi_e = (1,59 \pm 0,1) \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, míg az összes neutrínóé a semleges folyamat alapján $\Phi_s = (5,21 \pm 0,47) \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Minthogy a Napból elektron-neutrínók indulnak, az eredmény úgy értelmezhető, hogy a repülés közben azok egy része másfajta neutrínóvá alakult. Ezt az értelmezést nem elhanyagolható módon erősíti, hogy a Nap-modell szerint a várható neutrínó-áramsűrűség $\Phi = (5,82 \pm 1,34) \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, jó egyezésben a mért Φ_s -vel. Az SNO tehát szintén neutrínó-rezgést észlelt, de a SzuperKamiokande felfedezésével ellentétben itt elektron-neutrínók alakultak át másfajta neutrínóvá.

Következmények

A részecskefizika standard modelljében a neutrínóknak nincs tömegük. A neutrínó-rezgések felfedezése csak úgy értelmezhető, ha elfogadjuk, hogy a háromból legalább kettőnek van tömege, ami megköveteli a standard modell módosítását. Abban ugyanis a neutrínók csupán a gyenge erőt érzik. Részecskeátalakulás azonban csakis úgy lehetséges, ha a részecske legalább két erőt érez, és az egyikhez tartozó állapot a másiknak keveréke. Arról azonban egyelőre nincs kísérleti tapasztalatunk, hogy mi lenne a másik erő. Kézenfekvő lenne feltenni, hogy a neutrínók ugyanúgy érzik a mindent kitöltő Brout-Englert-Higgs (BEH) mezőt, mint a többi elemi részecske, amelyek tömege ebből az erőből származik. A Higgs-mechanizmus azonban megkövetelné, hogy a szokásos neutrínóknak legyen olyan *steril neutrínó*nak nevezett párja, amely csak a BEH mezőt érzi, semmilyen más erőt nem. Nyilvánvaló, hogy ilyen részecske észlelése még nehezebb, mint a hagyományos neutrínóé, de természetesen próbálkozások vannak észlelése érdekében – mindeddig hiába.

Másik lehetőség a neutrínó-tömeg rejtélyének megoldására, ha a neutrínók önmaguk antirészecskéi, ami szintén természetes lenne elméleti szempontból. Az elméletben ugyanis a részecske-antirészecske megkülönböztetés egyedüli forrása elemi részek esetén az ellentétes elektromos töltés. Semleges neutrínók esetén ilyen megkülönböztetés nyilvánvalóan nem lehetséges. Az ilyen, úgynevezett *Majorana* neutrínók létezésének következménye lenne az olyan kettős béta-bomlás, amelyben nem keletkezik neutrínó: $n^{(0)} + n^{(0)} \rightarrow 2 p^{(+1)} + 2 e^{(-1)}$. A folyamatban sérülne a

leptonok számára vonatkozó megmaradási törvény (kezdetben nincs elektron, a végén van kettő), amit eddig nem sikerült megfigyelni a természetben.

Zárszó

Korunk részecskefizikájának kiemelkedően fontos része a neutrínók tulajdonságainak kutatása. Jól mutatja ezt a 2015-ben a neutrínó-rezgésé felfedezéséért adott Fizikai Nobel-díj, de az is, hogy 2015 november 8-án jelentették be San Fransiscoban, hogy a 2016. évi Fizikai Áttörés díjának (Breakthrough prize in Fundamental Physics, 3 millió USD) kitüntetettjei öt neutrino-kísérlet – a kínai Daya-Bay, a japáni KamLAND, K2K/T2K, Szuper Kamiokande és a kanadai SNO – kutatócsoportjai. Sok kutató úgy véli, hogy a neutrínók vizsgálata révén lehet választ kapni a részecskefizika és a kozmológia több megválaszolatlan kérdésére.

1. ábra A 2015. Évi Fizikai Nobel-díj díjazottjai: Akaaki Kajita és Arthur B. McDonald
2. ábra Csikai Gyula felvétele a ${}^6\text{Li}$ atommag béta-bomlásáról.
3. ábra Antineutrínó és proton ütközésének termékei a Reines-Cowan kísérletben.
4. ábra Az anyagbeli fénysebességnél gyorsabban haladó részecske Cserenkov-kúpjának keletkezése. A jelenség a hangsebességnél gyorsabban haladó repülő hangrobbanásához hasonlít, csak nem hang- hanem fényjelenség.
5. ábra Müon-neutrínó Cserenkov-kúpja által keltett fényfelvillanások nyoma a Kamiokande detektor felszínének kiterített képén.
6. ábra Elektron-neutrínó Cserenkov-kúpja által keltett fényfelvillanások nyoma a Kamiokande detektor felszínének kiterített képén.
7. ábra Kozmikus részecske által a légkör felső rétegében keltett részecskezapor vázlatos rajza.
8. ábra Annak valószínűsége az L/E_ν függvényében, hogy a neutrínó-rezgés eredményeként a müon-neutrínó nem alakul át.
9. ábra A zenittől mért szög függvényében a légkörben keletkező neutrínók más-más távolságot tesznek meg mire a detektorba (SK) érkeznek. Neutrínó-rezgés létezése esetén ez az útkülönbség különböző mértékű átalakuláshoz vezet az alulról és felülről érkező neutrínók között.
10. ábra A Kamiokande II detektor eredménye a neutrínó-események számára a zenittől mért szög (Θ) függvényében. a) Az elektron-neutrínók száma Θ -ban szimmetrikus eloszlást mutat, tehát fel-le ugyanakkora az áramsűrűség. b) A müon-neutrínó események száma sérti a fel-le szimmetriát ($\cos \Theta = -1$ az alulról jövő müon-neutrínókat jelzi). A pontozott vonal mutatja a neutrínó-rezgés létezését feltételező elméleti becslést.
11. ábra A SzuperKamiokande detektor belseje üres állapotban.