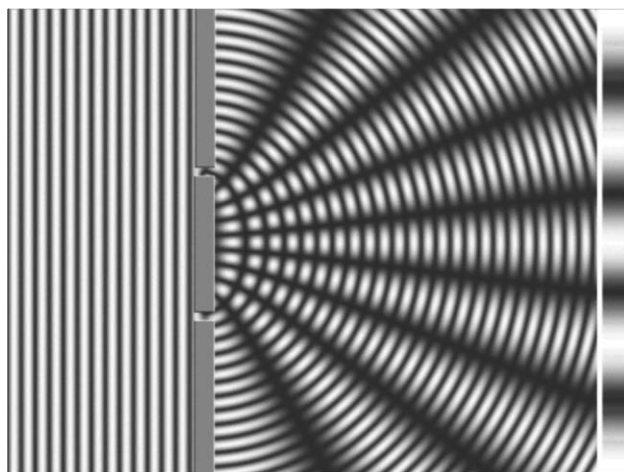


Reményeim szerint kellően felcsigázza olvasóim érdeklődését a címben szereplő két szó szerepeltetése egyetlen összefüggésben. Ha neutrínókra gondolunk, akkor a leginkább tűnékeny elemi részecske képe jelenik meg a szemünk előtt, amely ugyan jelen van mindenhol, de kölcsönhatása az anyaggal olyan gyenge, hogy gyakorlatilag láthatatlan, észlelhetetlen. Ha az interferenciára gondolunk, akkor több dolog is eszünkbe juthat, de többségünknek – várhatóan – mégiscsak a Young-féle kétréses fényinterferencia jut eszébe, amikor lézersugárral (lényegében koherens síkhullámmal) világítunk meg két egymáshoz közeli keskeny (a megvilágító fény hullámhosszával összemérhető szélességű) rést, és a réseken túli ernyőn jellegzetes fénycsíkok sorozata (interferenciakép: a fényintenzitás térbeli szabályos váltakozása, *1. ábra*) látható. Bár interferenciát elemi részecskékkel is létre lehet hozni (például elektronokkal), de rejtélyes, hogy miként lehetséges interferencia neutrínókkal.

A neutrínók elemi részecskék. Jelenlegi tudásunk szerint az elemi részek három családba sorolhatók (*2. ábra*). Egy családba négy részecske tartozik, két kvark és két lepton. A kvarkok építik fel az atommagok protonjait és neutronjait, és mindhárom erőt érzik: színtöltésük révén a magerőket létrehozó erős, elektromos töltésük révén az elektromosságért, mágnesességért felelős elektromágneses és gyenge töltésük révén a radioaktív jelenségekért felelős gyenge kölcsönhatást. A töltött leptonok közismert fajtája az atommag körül mozgó elektron, amely az elektromágneses és a gyenge kölcsönhatást érzi. Semleges leptonpárja a neutrínó, amelyre elektromos semlegessége miatt csak a gyenge erő hat.

A három család egymásnak pontos mása. Az egyetlen kivétel, hogy a mindent kitöltő Brout–Englert–Higgs (BEH) mezőhöz nem egyforma erősséggel kapcsolódnak. Például a másik két töltött lepton – a müon és a tauon – az elektronnál mintegy 200-szor, illetve 3000-szer erősebben kötődik a BEH-mezőhöz. Nincs ismeretünk arról, hogy ez miért van így. Mint hogy az elemi részek standard modelljében a neutrínók nem kapcsolódnak a BEH-mezőhöz, így azokat elemirészecske-kölcsönhatásokban csak az alapján tudjuk megkülönböztetni, hogy melyik töltött leptonnal együtt vesznek részt egy folyamatban. A gyenge



1. ábra. A Young-féle kétréses interferencia.

kölcsönhatás által közvetített erő definíció szerint mindig egy elektron-elektronneutrínó, müon-müon-neutrínó, tauon-tauneutrínó párra hat. A párok fajtája szerint különböztetjük meg a neutrínók „ízét”.

Mint hogy a neutrínó csak a gyenge kölcsönhatásban vesz részt, így egy neutrínó észlelése igen nehéz. Annak valószínűsége, hogy egy teremnyi méretű (10–20 m vastag) neutrínódetektoron fennakadjanak a neutrínók mintegy 10^{-11} . Egy nagy detektoron 10^{12} darab neutrínónak kell áthaladnia, hogy benne néhány neutrínót észleljünk. A Földön ilyen sok neutrínót atomreaktorok termelnek. A neutrínók létezésének közvetlen kimutatása éppen 60 éve atomreaktor közelében történt (előbb a hanfordi majd a Savannah River-i reaktornál). *Clyde L. Cowan* és *Frederick Reines* a reaktorban keletkező antineutrínók kimutatását az $\text{anti-}\nu_e^{(0)} + p^{(+1)} \rightarrow n^{(0)} + e^{(+1)}$ folyamatban egyszerre keletkező neutronok és antielektronok (pozitronok) együttes észlelésével. Az észlelés ilyen módja azonban azt is mutatja, hogy a neutrínókat nem lehet olyan egyszerűen „ernyőn felfogni”, mint a fényt vagy akár töltött részecskéket. Jogosan merül fel a kérdés: hogyan lehet neutrínókkal interferenciát létrehozni? Pedig a neutrínók és az interferencia összeegyeztetésének módjára van lehetőség – ahogy arra a 2015-ben fizikai Nobel-díjjal jutalmazott kísérletek rávilágítottak. A kulcs az, hogy interferencia alatt nem a neutrínók intenzitásának térbeli változását kell érteni, hanem a neutrínók ízének változását lehet megfigyelni. Az angol szakirodalomban *neutrino oscillation*-ként ismert jelenség lényege, hogy a neutrínók haladásuk közben nem őrzik meg azonoságukat, hanem „önmaguktól” másfajta ízű neutrínóvá alakulnak át. Pontosabb és rövidebb tehát, ha magyarul nem neutrínóoszillációként nevezünk a jelenségek, hanem mondjuk *neutrínóíz-rezgésként* (neutrínók ízé-



Trócsányi Zoltán fizikus, az MTA rendes tagja, a DE Fizikai Intézetének igazgatója, az erős kölcsönhatás elméletének nemzetközileg elismert kutatója. *Demény András*-sal társszerzője a *Fizika I.* egyetemi tankönyv *Mechanika* részének, *Horváth Dezső*vel pedig a megjelenés előtt álló *Bevezetés az elemi részek fizikájába* című tankönyvnek. Emellett ismeretterjesztő előadások és művek rendszeres szerzője. Tudományos közleményeire ötvenezernél több független hivatkozást kapott.

Az írás az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2016. évi Közgyűlése előtt elhangzott tudományos előadás bővített változata.

Az anyagi részecskék három családja (fermionok)

	I	II	III		
tömeg	2,3 MeV/c ²	1,27 GeV/c ²	173 GeV/c ²	0	125 GeV/c ²
töltés	2/3	2/3	2/3	0	0
spin	1/2	1/2	1/2	1	0
név	u-kvark	c-kvark	t-kvark	foton	Higgs-bozon
	u	c	t	γ	H
	u-kvark	c-kvark	t-kvark	foton	Higgs-bozon
	d	s	b	g	
	d-kvark	s-kvark	b-kvark	gluon	
	d	s	b	g	
	d-kvark	s-kvark	b-kvark	gluon	
	v_e	v_μ	v_τ	Z⁰	
	elektron-neutrínó	műion-neutrínó	tau-neutrínó	Z-bozon	
	v_e	v_μ	v_τ	Z⁰	
	elektron-neutrínó	műion-neutrínó	tau-neutrínó	Z-bozon	
	e	μ	τ	W[±]	
	elektron	műion	tau	W-bozon	
	e	μ	τ	W[±]	
	elektron	műion	tau	W-bozon	

Bozonok (kölsönhatások)

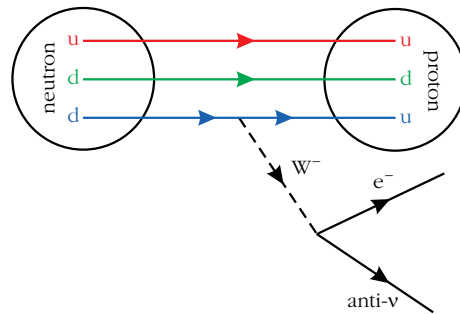
2. ábra. Az elemi részecskék három családja, illetve a kölcsönhatásokat közvetítő bozonok.

nek rezgése) illetjük, ha némiképp hűek akarunk lenni az idegen nyelvű szakirodalomhoz.

Fent idéző jelbe tettem az *önmaguktól* szót. Eddigi tapasztalatunk szerint ugyanis az „önmagától” változás nem következik be a természetben. A látszólag ok nélküli változás okát mélyebb szinten eddig mindig megleltük. Gondoljunk például a radioaktív bomlásra, amely egy elem látszólag ok nélküli átváltozása másik elemé. Ma már pontosan tudjuk, hogy ilyenkor a kiindulási elem atommagjában található egyik neutronban egy d-kvark a nála kisebb tömegű u-kvarkba alakul, miközben kibocsát egy, az elektronnal azonos töltésű látszólagos W⁻ bozont, amely szinte azonnal elektronnal és semleges anti-elektronneutrínóra bomlik (3. ábra). A kvantumtérelméleti leírás szerint ebben a folyamatban minden átalakuláskor mind az energia, mind a lendület megmarad. (Ezért csak látszólagos a W⁻ bozon, hiszen a d-kvark nyugalmi energiája több mint három nagyságrenddel kisebb a W⁻ bozon nyugalmi energiájánál.)

Első lépések a neutrínóíz-rezgés felfedezése felé

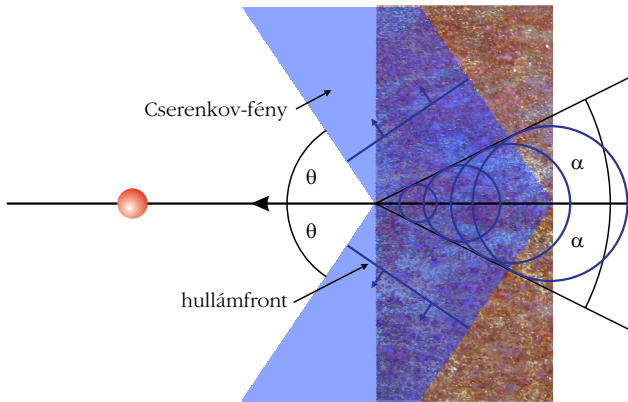
Az 1960-as évek második felében *Raymond Davis* a Naptól származó neutrínók áramsűrűségét kezdte vizsgálni. Addigra már elég sok ismeret gyűlt össze a Napban folyó energiatermelő folyamatokról, mint például $4p^{(+1)} \rightarrow {}^4\text{He}^{(+2)} + 2e^{(+1)} + 2\nu_e^{(0)}$. *John N. Bahcall* részletes modellszámításai alapján meg tudta jósolni a Naptól a Földre érkező elektronneutrínók várható áramsűrűségét a neutrínók energiájának függvényében. Davis munkatársaival a dél-dakotai Homestake aranybányában, a felszín alatt 1480 m mélyen 615 tonna perklóretilént (vegytisztítószert) tartalmazó neutrínó-



3. ábra. A béta-bomlás mélyebb magyarázata a kvarkok átalakulásának szintjén.

nódetektort telepített. A számítások alapján 1 SNU, azaz 10³⁶ darab klór atommagra másodpercenként egyetlen $\nu_e^{(0)} + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^{(-1)}$ folyamat volt várható. A folyamathoz szükséges energiájú neutrínó leginkább a bór bomlásából keletkezik a Napban. 10³⁶ darab klóratom tömege mintegy 45 ezer tonna, tehát a neutrínókölcsönhatások észleléséhez nagy tömegű detektorra van szükség. A mélységi elhelyezés célja a kozmikus sugárzás által keltett argonatomok elnyomása volt. A klóratommag és a neutrínó ütközésében radioaktív argon és elektron keletkezik. A radioaktív argont kéthavonta kivonták a detektorból, és megmérték radioaktivitását, amelynek erősségéből a keletkezett argonatomok számára lehetett következtetni. Bahcall modellszámítása szerint 8,2±1,8 SNU volt várható. Mindenki meglepetésére a mért érték jóval kisebb volt a jóslatnál: 2,56±0,23 SNU, azaz egyetlen argonatom keletkezett 48 óránként! 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 nagyon sok nehézség leküzdését kívánta. A legnagyobb kihívást a 70 nap alatt keletkező 17 darab Ar atom kivonása jelentette. A módszer pontosságát erősen befolyásolta az argonatomok kivonásának hatékonysága, amit ugyan *Davis* nagyon gondosan meghatározott, de mégis érdemes volt más módszert is használni a Nap-neutrínók földfelszíni áramsűrűségének méréséhez. Az 1980-as években *Masatoshi Koshiba* csoportja a japán Kamiokande cinkbányában épített egy 2140 tonna tiszta víz befogadására alkalmas acélhordót, amelynek falára fénysokszorozó csöveket szerelt. A kísérlet eredeti célja az volt, hogy a protonok esetleges bomlását megfigyeljék. Akkor divatos elmélet szerint 1000 tonna vízben évente mintegy 300 proton bomlása volt várható, amelynek végtermékei gyorsan (majdnem az üres térben mért fénysebességgel) mozgó töltött részecskék. Az anyagban azonban a fény – az anyag törésmutatójának hányadában – lassabban halad. Így a detektorban a proton esetleges bomlásakor keletkező töltött részecskék gyorsabban repülnek, 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, ame-



4. ábra. Az anyagi fénysebességnél gyorsabban haladó részecske Cserenkov-kúpjának keletkezése. A jelenség a hangsebességnél gyorsabban haladó repülő hangrobbanásához hasonlít, csak nem hang-, hanem fényjelenség.

lyet 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 nem csupán neutrínók észlelésére lehet alkalmas, hanem a beérkező különböző ízű neutrínók (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 elektron-neutrínó érkezik, akkor 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 MeV/c²), így az abból keletkező töltött részecskék energiája is nagyak volt várható, ezért nem volt szükség olyan kis energiájú (< 10 MeV) neutrínók észlelésére alkalmas érzékenységű detektorra, mint a Napból érkezők. Az érzékenység javítása céljából 1000 darab nagy méretű (50 cm átmérőjű) fénysokszorozót rögzítettek a hordó falára, és a hordót magát egy másik tartályba helyezték. Így a belső hordót a háttérsugárzás kiszűrése érdekében (úgynevezett antikoincidencia módszerrel) 1500 tonna vízzel vették körül. A feljavított *Kamiokande II* kísérlet elrendezése érzékeny

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

A Napon túl más forrása is van a Földön kívülről származó neutrínóknak. A világegyeterről érkező kozmikus sugárzásban érkező protonok a Föld légkörébe érve ütköznek a felső rétegekben (felszíntől 15-20 km-re) található atommagokkal (jellemzően nitrogén- és oxigénmagok), aminek következtében elsősorban töltött π -mezonok, pionok keletkeznek. A pionok bomlékonyak. Jellemző folyamat például a $\pi^{(+)} \rightarrow \mu^{(+)} + \nu_\mu^{(0)}$ bomlás. A keletkező müon szintén bomlékony, $\mu^{(+)} \rightarrow e^{(+)} + \text{anti-}\nu_\mu^{(0)} + \nu_e^{(0)}$. 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), még hozzá kétszer annyi müonhoz kapcsolódó, mint elektronhoz kapcsolódó (7. ábra). Így a $(\nu_\mu + \text{anti-}\nu_\mu)$ részecskék áramsűrűsége és a $(\nu_e + \text{anti-}\nu_e)$ áramsűrűségnek a várható aránya 2. (Pontosabban az arány függ a keletkező neutrínók energiájától is: 1 GeV alatt kettő, felette monoton növekszik.) A Kamiokande-detektorral ez az arány is mérhető, de a mérés tervezéséhez, és az eredmények értelmezéséhez meg kell értenünk egy különleges, csak a neutrínókra jellemző jelenséget.

Neutrínók keveredése

Általában *Bruno Pontecorvo* nevéhez kötik a felvetést, hogy a különböző ízű neutrínók átalakulhatnak

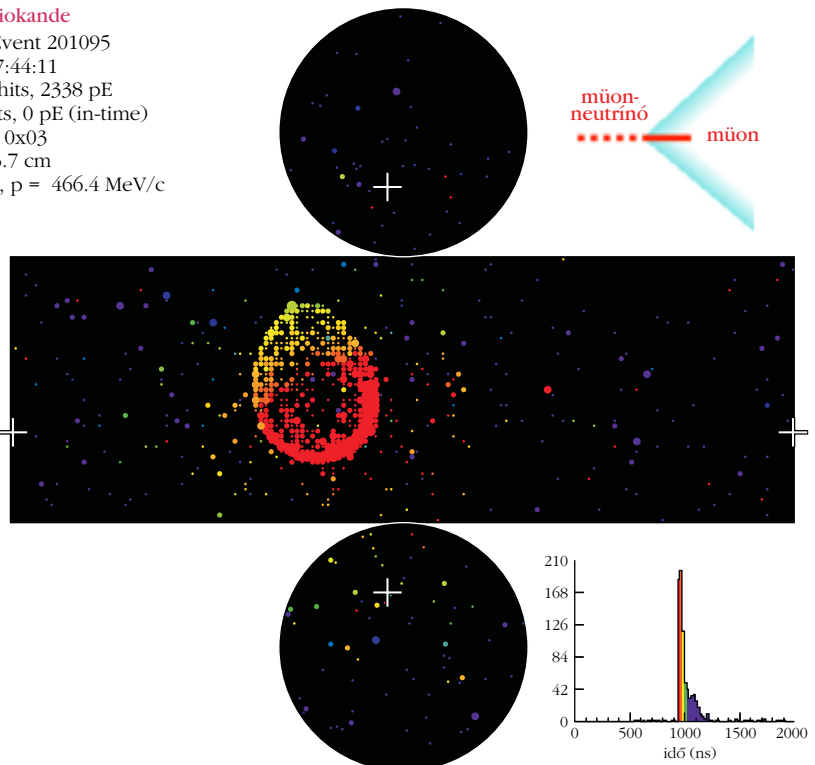
5. ábra. Müon-neutrínó Cserenkov-kúpja által keltett fényfelvillanások nyoma a Kamiokande-detektor felszínének kiterített képén.

Super-Kamiokande

Run 3011 Event 201095
96-10-24:07:44:11
Inner: 811 hits, 2338 pE
Outer: 0 hits, 0 pE (in-time)
Trigger ID: 0x03
D wall: 913.7 cm
FC mu-like, p = 466.4 MeV/c

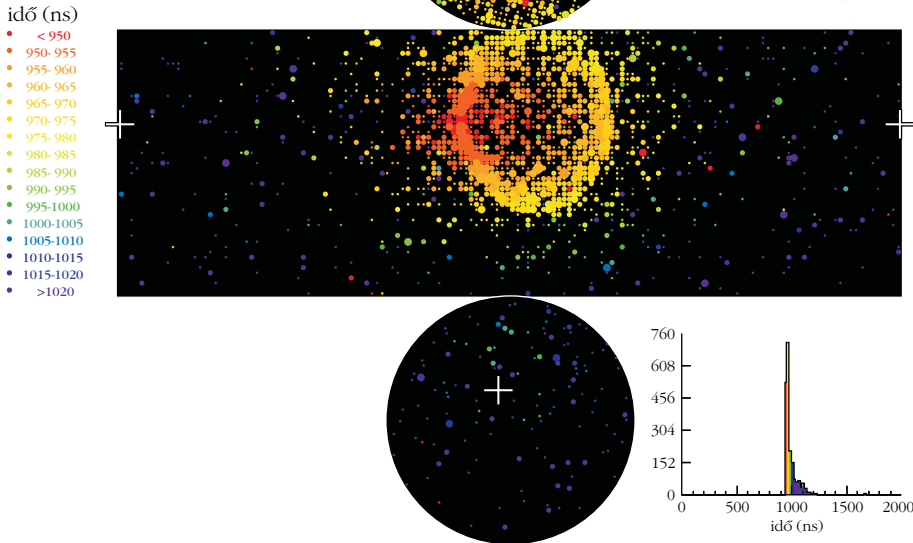
idő (ns)

- < 972
- 972-976
- 976-980
- 980-984
- 984-988
- 988-992
- 992-996
- 996-1000
- 1000-1004
- 1004-1008
- 1008-1012
- 1012-1016
- 1016-1020
- 1020-1024
- 1024-1028
- > 1028



Super-Kamiokande

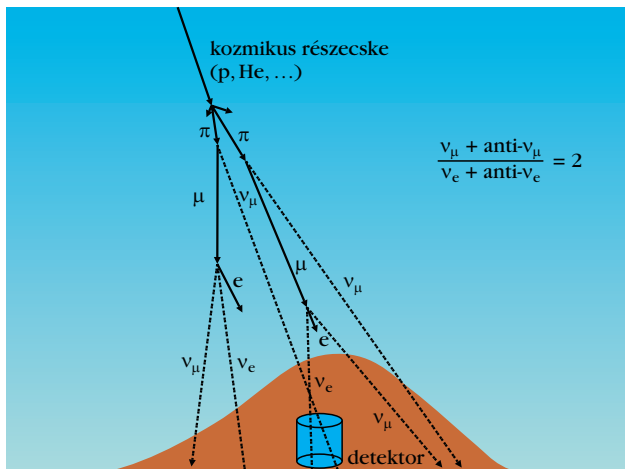
Run 3003 Event 287420
 96-10-21:10:50:45
 Inner: 2004 hits, 4749 pE
 Outer: 2 hits, 1 pE (in-time)
 Trigger ID: 0x03
 D wall: 1243.0 cm
 FC e-like, $p = 571.0 \text{ MeV}/c$



6. ábra. Elektronneutrínó Cserenkov-kúpja által keltett fényfelvillanások nyoma a Kamiokande-detektor felszínének kiterített képén.

egymásba, ha egy rögzített ízű neutrínó, mondjuk ν_μ tömege nem egyértelmű, hanem több (valószínűleg három) különböző rögzített m_i tömegű neutrínó keveréke. A legújabb kutatások szerint valójában *Maurice Pryce*-től hallotta Pontecorvo a javaslatot, amelynek elvi alapját a jóval később született standard modell alapján lehet könnyen megérteni. A standard modell Lagrange-függvényében a kvarkok íz-sajátállapotban szerepelnek, azonban a modell megoldásaként használt perturbatív térelméletben tömeg-sajátállapotok vannak. Az íz- és tömeg-sajátállapotok nem azonosak. Ráadásul a családokban szereplő három kvarkpár pozitív, illetve negatív elektromos töltésű tagja a három

7. ábra. Koszmikus részecske által a légkör felső rétegében keltett részecskeszópor vázlatos rajza.



tömeg-sajátállapotnak különböző keveréke. Ennek eredményeként a tömeg-sajátállapotokat használó leírásban a két kvark és egy töltött mértékbozon kölcsönhatásában megjelenik egy számszorzó, a Cabibbo–Kobayashi–Maskawa (CKM) mátrixnak a megfelelő kvarkízeket összekötő eleme, amely meg is mérhető.

A töltött leptonok ilyen szempontból nagyon különböznek, mert esetükben az íz- és tömeg-sajátállapotok egybeesnek. Minthogy a neutrínóknak a standard modell feltevése szerint nincs tömegük, így a modell szerint tömeg-sajátállapotukat nem lehet megkülönböztetni, ezért nem is keveredhetnek. Mi van azonban akkor, ha a neutrínóknak mégis van tömegük? Keverednek-e mint a kvarkok, vagy a tömeg- és íz-sajátállapotaik a töltött leptonokhoz hasonlóan egybeesnek?

Amennyiben a neutrínók is keverednek, akkor annak mérhető hatása van. A neutrínók ugyanis szabad részecskéként nagy távolságot tudnak megtenni. Az íz-sajátállapotban keletkező neutrínó három tömeg-sajátállapot keverékeként repül, és a repülés alatt az egyes tömeg-sajátállapotok egymáshoz viszonyított aránya megváltozik, mert a diszperziós összefüggés $E_m^2 = p_m^2 c^2 + m^2 c^4$ miatt a különböző tömegű neutrínók energiája és lendülete nem lehet ugyanakkora, és így viszonylagos fázisuk az időben változik. Ez a változás azonban azt jelenti, hogy a neutrínó íze magától átalakul: például egy keletkező müon-neutrínót az energiájától függő út megtétele után elektronneutrínóként észlel a detektor.

Bár a keveredés egyetlen neutrínóra is érvényes, kísérleti kimutatása egy részecskével lehetetlennek tűnik, hiszen nem tudunk neutrínót egyesével előállítani és észlelni. Tudunk azonban neutrínónyalábot előállítani, igaz sem a forrás, sem az észlelés helyét nem tudjuk nagy pontossággal meghatározni, a jellemző bizonytalanságuk a forrás, illetve detektor mérete. Az utóbbi például néhányszor 10 m. Ugyanígy nem tudjuk pontosan megmérni egyetlen neutrínó repülési idejét, energiáját, lendületét, csupán a nyalábra érvényes átlagértékeket. Ezért célszerű a fényinterferenciánál használt síkhullám-közelítésben kezelni a neutrínókat. Egydimenziós leírásra szorítkozva az x helyen és t pillanatban a neutrínó állapotvektora tömeg-sajátállapotban,

$$|v_m(x, t)\rangle = e^{-i\phi_m(x, t)} |v_m(0, 0)\rangle$$

van, ahol a fázis

$$\phi(x, t) = \frac{1}{\hbar} (E_m t - p_m x).$$

Ha $m_i \neq m_j$, akkor T idő alatt megtett L távolság után a fáziskülönbség ($\Delta E = E_j - E_i$, $\Delta p = p_j - p_i$):

$$\begin{aligned} \hbar \Delta \phi_{ij} &= (E_i T - p_i L) - (E_j T - p_j L) = \Delta E T - \Delta p L = \\ &= \frac{\Delta E^2}{E_i + E_j} T - \frac{\Delta p^2}{p_i + p_j} L = \frac{L}{2} \left(\frac{\Delta E^2}{\langle E \rangle} \frac{T}{L} - \frac{\Delta p^2}{\langle p \rangle} \right). \end{aligned}$$

Könnyű belátni, hogy a fáziskülönbség ezen alakja Lorentz-invariáns, így bármely nem gyorsuló vonatkoztatási rendszerben a neutrínó sebességének reciproka

$$\frac{T}{L} = \frac{E}{p c^2}.$$

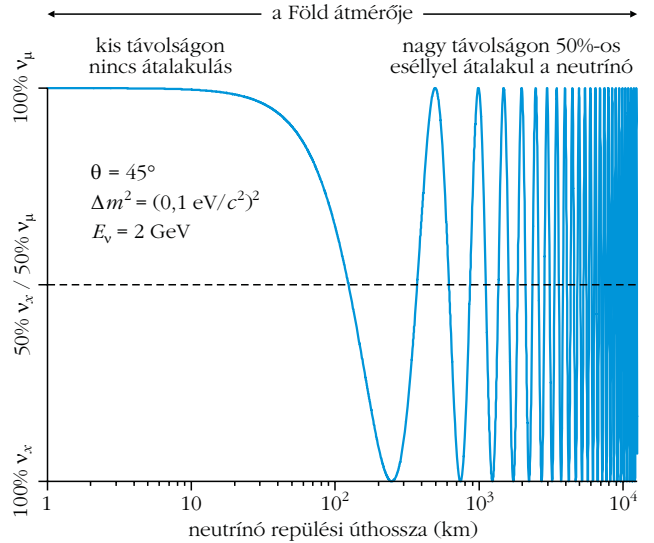
A kísérletekben jellemzően a neutrínók repülési hosszát, L -t mérik, ezért a fáziskülönbség célszerű alakja

$$\begin{aligned} \Delta \phi_{ij} &= \frac{L}{2 \hbar} \left(\frac{\Delta E^2}{\langle E \rangle} \frac{T}{L} - \frac{\Delta p^2}{\langle p \rangle} \right) = \\ &= \frac{L}{2 \hbar c^2} \left(\frac{\Delta E^2}{\langle p \rangle} - \frac{\Delta p^2 c^2}{\langle p \rangle} \right) = \frac{\Delta m_{ij}^2 c^4}{2 \hbar c^2 \langle p \rangle} L, \end{aligned}$$

ahol az utolsó lépésben használtuk a diszperziós összefüggést, és $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$ a két neutrínó tömegnégyzetének különbsége. A fáziskülönbség ismeretében – az egyszerűség kedvéért két neutrínóíz keveredését feltételezve – elemi számítással megkapható, hogy egy szabadon repülő müonneutrínó meghatározott L távolságot befutva átalakulhat másik ízű, például tauneutrínóvá. Annak valószínűsége, hogy *nem alakul át L távolság után*

$$P^{2\nu}(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \frac{\Delta m^2 c^4}{\hbar c E_\nu} L \right),$$

ahol $\Delta m^2 = \Delta m_{ij}^2$, $\hbar c = 1,24 \cdot 10^{-9}$ eV km a Planck-állandó és a fénysebesség szorzata. E_ν a neutrínók átlagos energiája, amelyre $E_\nu \cong p_\nu c$, mert az észlelt neutrínók energiája legalább 1 MeV, míg nyugalmi energiájukról biztosan tudjuk, hogy legfeljebb 1 eV, tehát a neutrínók lényegében fénysebességgel haladnak. A θ szög 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 müonneutrínóvá, és így oda-vissza alakul. Ezt a jelenséget nevezzük *neutrínóíz-rezgésnek*, ami tulajdonképpen jellegzetes interferenciajelenség, csak az erősítési-kioltási helyek az íztérben váltogatják egymást, miközben a neutrínó repül (8. ábra).



8. ábra. Annak valószínűsége az L/E_ν függvényében, hogy a neutrínóíz-rezgés eredményeként a müonneutrínó nem alakul át.

A neutrínóíz-rezgés feltétele, hogy a *neutrínóknak legyen tömege* (egyébként $\Delta m^2 = 0$, és $P^{2\nu}(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1$, tehát a neutrínó nem alakul át). 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 GeV = 10^9 eV. Ekkor

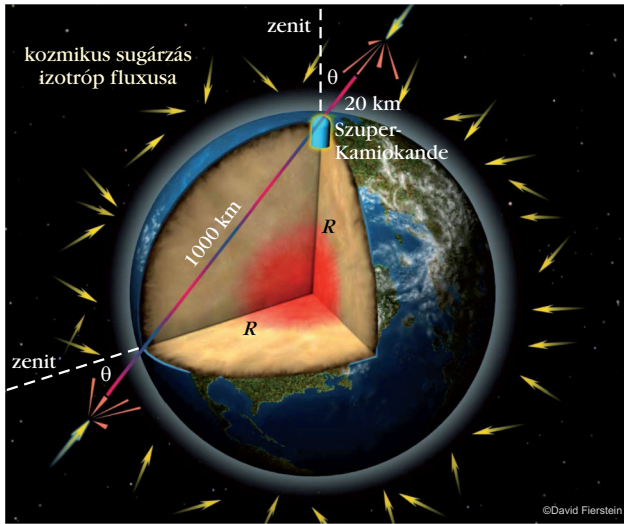
$$\frac{\Delta m^2 c^4 L}{\hbar c E_\nu} = \frac{L}{1,24 \text{ km}},$$

tehát $L = 1,24$ km esetén a szinuszfüggvény értéke éppen 1, ami a legnagyobb $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ átalakulást jelenti. Tízszer nagyobb neutrínóenergia 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 neutrínóíz-rezgést és meghatározni az átalakuláshoz szükséges távolságot, akkor következtetést tudunk levonni a neutrínók tömegére.

Amennyiben a neutrínóíz-rezgés létezik, akkor az átalakulás miatt a légköri neutrínók *keletkezésükori*

$$\frac{\nu_\mu + \text{anti-}\nu_\mu}{\nu_e + \text{anti-}\nu_e} = 2$$

arányától eltérő arányban várhatjuk a kétfajta neutrínók *észlelt* arányát. A Kamiokande II detektorral észlelt neutrínók között 1988-ban $93 \pm 9,6$ volt elektronhoz és csupán $85 \pm 9,2$ müonhoz kapcsolódó. Míg az előbbieket száma jól egyezett az elméleti modell becsülésével, 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 müonneutrínókra vonatkozó eredmény a neutrínóíz-rezgésnek tudható be. A légkörben keletkező neutrínók ugyanis érkehetnek a detektor feletti égbolt felől, vagy éppenséggel a Föld túloldaláról, áthaladva a Földön (természe-

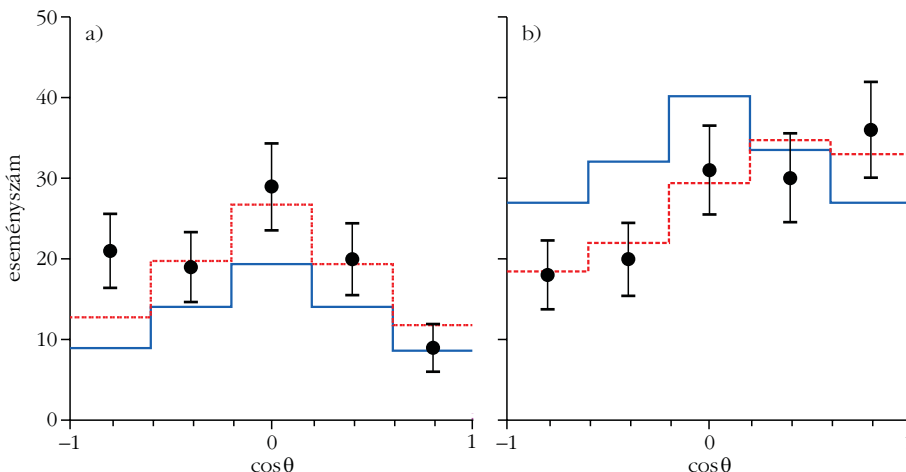


9. ábra. A zenittől mért szög függvényében a légkörben keletkező neutrínók más-más távolságot tesznek meg mire a detektorba (SK) érkeznek. Neutrínóíz-rezgés létezése esetén ez az útkülönbség különböző mértékű átalakuláshoz vezet az alulról és felülről érkező neutrínók között.

tesen minden irányból, de ez a két szélsőséges helyzet), azaz a keletkezésüktől számítva 10–12 700 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 neutrínóíz-rezgés hatásának 50%-a észlelhető, az is csak akkor, ha a keveredés szöge 45°, amit valószínűtlennek gondoltak. Ezért a jelenséget légkörineutrínó-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 neutrínóíz-rezgés, akkor ugyanannyi neutrínó érkezését várjuk felülről, mint alulról. Ha azonban van neutrínóíz-rezgés, akkor

10. ábra. A Kamiokande II detektor eredménye a neutrínóesemények számára a zenittől mért Θ szög függvényében. a) Az elektronneutrínók száma Θ -ban szimmetrikus eloszlást mutat, tehát fel-le ugyanakkora az áramsűrűség. b) A müonneutrínó események száma sérti a fel-le szimmetriát ($\cos \Theta = -1$ az alulról jövő müonneutrínókat jelzi). A pontozott vonal mutatja a neutrínóíz-rezgés létezését feltételező, a folytonos pedig az a nélküli elméleti becslést.



a müonneutrínók áramsűrűségének ez a fel-le szimmetriája 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 müonneutrínókból 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%.

Az eseményszám növelésének érdekében új detektort terveztek nagyobb térfogattal (22 500 tonna vizet magába foglaló belső és azt 27 500 tonna vízzel körülölelő külső henger) és több (a belső henger falán 11 200 darab 50 cm átmérőjű, a külsőn pedig 1900 darab 20 cm átmérőjű) fénysokszorozóval. Ez lett a Szuper-Kamiokande kísérlet (11. ábra). A Kamiokande-detektorhoz képest mintegy hússzor nagyobb belső térfogat a neutrínóesemények számának gyakoriságát hússzorosára növelte. A nagy számú fénysokszorozó lehetővé tette a neutrínóesemények részletes elemzését. A detektor 1996-ra készült el, és 1998 tavaszára már 5400 neutrínóeseményt figyeltek meg. Szinte 100%-os hatásfokkal tudta az észlelt müonneutrínókat azonosítani, és gyorsan sikerült megerősíteni a Kamiokande II-nek az

$$R_{\mu/e} = \frac{v_{\mu} + \text{anti-}v_{\mu}}{v_e + \text{anti-}v_e}$$

hányadosra kapott eredményét, amely szerint a mért adatok és a neutrínóíz-rezgést *nem feltételező* elmélet hányadosa

$$\frac{R_{\mu/e}^{\text{mérés}}}{R_{\mu/e}^{\text{elmélet}}} = 0,688 \pm 0,053,$$

amit akár a müonneutrínók átalakulásaként is lehet értelmezni.

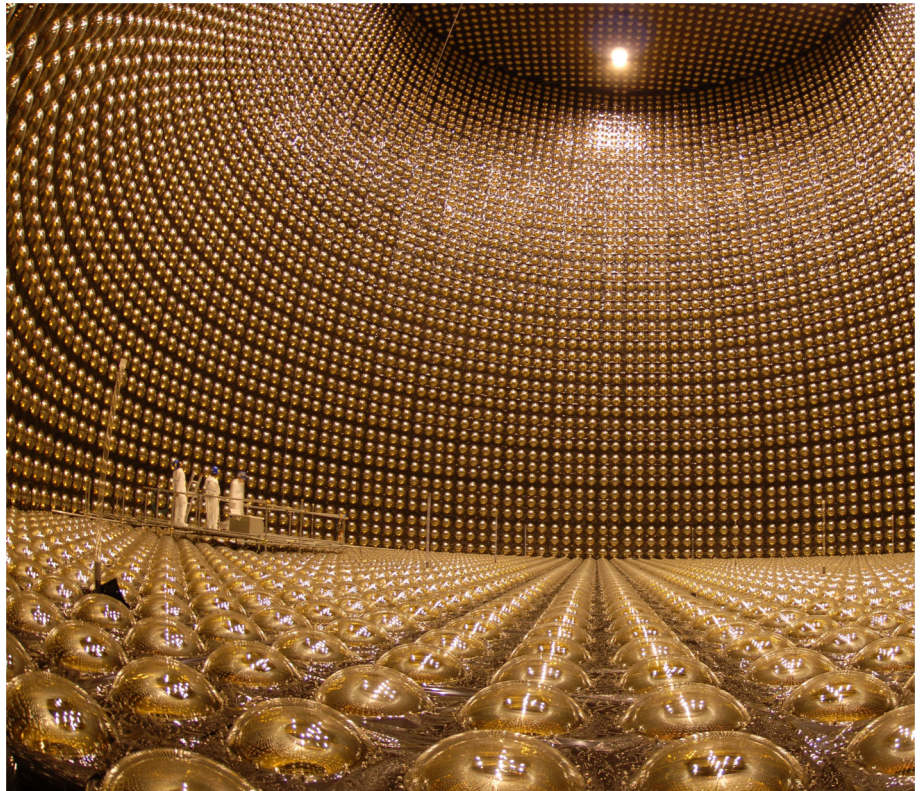
Amint korábban érveltünk a neutrínóíz-rezgés egyértelmű jele a fel-le szimmetria sérülése müonneutrínók esetén. A Szuper-Kamiokande adataiban jól szét lehetett válogatni az elektron- és müonneutrínókat, csoportosítani azokat energiájuk és érkezési irányuk szerint. Így egyértelműen sikerült kimutatni, hogy a légköri neutrínók esetében a fel-le szimmetria erősen sérül: müonneutrínók

esetén a felfelé, illetve lefelé mért áramsűrűség hányadosa $0,54 \pm 0,04$, míg elektron-neutrínókra ugyanez a hányados nagy pontossággal 1. Az 1998-ban, éppen 10 évvel a légkörineutrínó-anomália észlelése után bejelentett eredmény a felfedezés erejével erősítette meg a korábbi Kamiokande II mérést (12. ábra), és tudományos tényként emelte a kozmikus sugárzás hatására a légkörben keletkező neutrínók repülésük közbeni átalakulását.

Az új tudományos eredmények nem azért izgalmasak, mert választ adnak egy kérdésre, hanem azért, mert új kérdések sokaságát vetik fel. Így volt ez a neutrínóíz-rezgés felfedezésével is. Meg kellett mérni a rezgéshez szükséges Δm^2 tömegnégyzet-különbséget, a keveredés θ szögét. A mérésben csak a müonneutrínók eltűnédezését sikerült észlelni. Vajon a várakozásnak megfelelően tauneutrínóvá alakultak? (Emlékezzünk: az elektronneutrínók száma nem változott.) Van-e keveredés más neutrínók között? Nem utolsó sorban: a légköri neutrínókra talált átalakulást meg lehet-e figyelni a Naptól érkező neutrínók esetében is? A korábban fejtegetett Nap-neutrínó rejtélyre is a neutrínóíz-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 neutrínóeseményekkor keletkező Cserenkov-kúpokat észlelte fényszorzó csövekkel. Minthogy azonban a Naptól érkező neutrínók energiája lényegesen kisebb (néhány MeV), ezért a működés elve más volt.

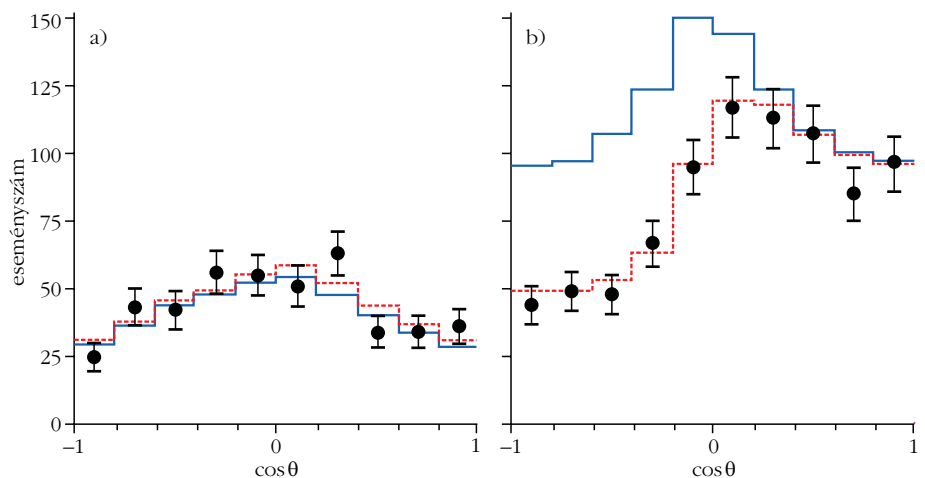
Az SNO detektor anyaga 1100 tonna tiszta nehézvíz (D_2O) volt egy 6 m sugarú gömbben. Az ebben lévő deutérium-atomokkal történő ütközés során keletkező részecskéket keltő $\nu_e^{(0)} + d^{(+1)} \rightarrow p^{(+1)} + p^{(+1)} + e^{(-1)}$, illetve semleges részecskét keltő $\nu_x^{(0)} + d^{(+1)} \rightarrow p^{(+1)} + n^{(0)} + \nu_x^{(0)}$ folyamatok, amelyek a bór béta-bomlásából eredő



11. ábra. A Szuper-Kamiokande detektor belseje üres állapotban.

neutrínókra érzékenyek. A töltött folyamatban csak az elektronneutrínók vesznek részt, míg a semlegesben mindhárom neutrínó egyformán ($x = e, \mu, \tau$), amennyiben energiájuk nagyobb a deuteronban kötött proton és neutron 2,2 MeV-os kötési energiájánál. A két folyamat mellett lehetséges még a neutrínók rugalmas szóródása a nehézvíz elektronjain: $\nu_x + e \rightarrow \nu_x + e$, amelyben ugyan mindhárom neutrínó részt vehet, de elsősorban az elektronneutrínókra érzékeny. Minthogy a detektor egyszerre méri az érkező elektronneutrínók áramsűrűségét magában és az összes neutrínó áramsűrűségét, így neutrínóíz-rezgés létezése esetén egyértelmű választ lehet adni arra, hogy mi történik a Nap-neutrínó rejtélyben el-

12. ábra. Mint a 10. ábra, csak a Szuper-Kamiokande adataival.



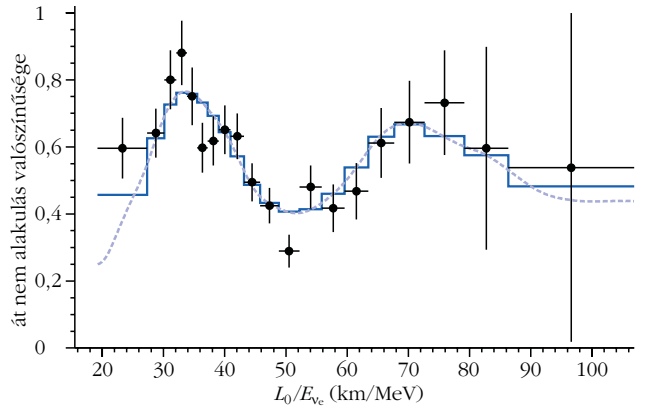
tűnt elektronneutrínókkal: az elektronneutrínók más fajtává alakulnak át, így az összes neutrínó áram-sűrűsége nem csökkenhet. A mérés értelmezéséhez nincs szükség összehasonlításra a Nap-modell felhasználásával elméleti úton becsült neutrínóáram-sűrűségekkel.

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 deuteronok megkötötték, ami 6,25 MeV energiájú foton kibocsátásával jár. Az utóbbi Cserenkov-kúpját érzékelik a fényszokszorozók csövek. A második lépésben 2,2 tonna konyhasót oldottak a nehézvízben. Az oldatban található klórionokon 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 söt kivonták, a fényszokszorozók csöveket proporcionális számlálókkal helyettesítették, amelyekkel közvetlenül a neutronokat lehet észlelni.

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

Következmények

A részecskefizika standard modelljében a neutrínóknak nincs tömegük. A neutrínóíz-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 akkor lehetséges, ha a részecske legalább két erőt érez, és az egyikhez tartozó állapot a másik keveréke. Arról azonban egyelőre nincs kísérleti tapasztalatunk, hogy mi lenne a másik erő. Kézenfekvő lenne feltenni, hogy a neutrínók ugyanúgy érzik a mindent kitöltő BEH-mezőt, mint a többi elemi részecske, amelyek tömege ebből az erőből származik. A BEH-mechanizmus azonban megkövetelné, hogy a szokásos neutrínók-



13. ábra. Az át nem alakulás valószínűsége az ízrezgés elmélete szerint (folytonos vonal), összevetve a Daya-Bay kísérletben mért adatokkal (pontok a bizonytalanságot jellemző vonalakkal).

nak legyen olyan *steril neutrínóknak* nevezett párja, amely csak a BEH-mezőt érzi, semmilyen más erő nem. Nyilvánvaló, hogy ilyen részecske észlelése még nehezebb, mint a hagyományos neutrínóé, de természetesen próbálkozások vannak észlelése érdekében – mindeddig hiába.

Zárszó

2015. december 10-én a fizikai Nobel-díjat egy japán kutató, *Takaaki Kadzsita* és a kanadai *Arthur B. McDonald*¹ kapták fele-fele arányban osztva a „neutrínóíz-rezgés felfedezéséért, ami bizonyítja, hogy a neutrínóknak van tömegük”. Ez volt a harmadik Nobel-díj, amelyet neutrínókutatók 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 észleléseért 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.

Korunk részecskefizikájának kiemelkedően fontos része a neutrínók tulajdonságainak kutatása. Jól mutatja ezt a 2015-ben a neutrínóíz-rezgés felfedezéséért adott fizikai Nobel-díj, de az is, hogy 2015. november 8-án jelentették be San Fransiscóban, hogy a 2016. évi Fizikai Áttörés díjának (Breakthrough prize in Fundamental Physics, 3 millió USD) kitüntetettjei öt neutrínókísérlet – a kínai Daya-Bay, a japáni KamLAND, K2K/T2K, Szuper-Kamiokande és a kanadai SNO – kutatócsoportjai. A 13. ábra mutatja a neutrínóíz-rezgés mérésének mai helyzetét a Daya-Bay kísérletben: az ízrezgés határozottan látszik. Sok kutató úgy véli, hogy a neutrínók vizsgálata révén lehet választ kapni a részecskefizika és a kozmológia több megválaszolatlan kérdésére.

¹ Fényképüket lásd a *Fizikai Szemle* 65/12 (2015) 420. oldalán, Király Péter 2015. évi Nobel-díjról szóló írásában.