

Rögtön az elején őszinte köszönetet szeretnék mondani azért, hogy én tarthatom az ez évi Marx György-émlék-előadást, hiszen sok évtizeden át nagyon közeli barátok voltunk. A neutrínó fizikájának óriási palettájáról azokat a kérdéseket választottam, amelyek mindkettőnknek a legmélyebben érdekeltek, és amelyekről sokszor folytattunk személyes beszélgetéseket.

Valamikor George hívta fel a figyelmemet egy angol nyelvű elektrodinamika tankönyv kedves ábrájára:

És mondá az Úr:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho,$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0,$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t},$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

– és lőn világosság!

Azonban szerintem ez egy túlzottan leegyszerűsítő megközelítés, hiszen, ami a Földet és a Napot illeti, a fény a Napból származik. Pusztán a Maxwell-egyenletek alapján a Nap nem sugározhatna. Ezért az alábbi kiegészítést célszerű tennünk:

...és mondá *Wolfgang Pauli*: Legyenek neutrínók!

...és mondá *Enrico Fermi*: Hassanak kölcsön gyengén!

És a Nap sugározni kezd!

Tény, hogy Wolfgang Pauli, amikor 1930-ban megjósolta a neutrínót, nem merte publikálni, mert félt, hogy kísérletileg sohasem lesz kimutatható. Végül egy Tübingenben tartott radioaktivitási konferenciára küldött levélben állt elő javaslatával. Ekkor mondta barátjának, *Walter Baadénak*: „Ma valami olyat műveltem, amit elméleti fizikusnak soha életében nem szabad elkövetnie: Olyasmire tettem jóslatot, amit sohasem tudnak kísérletileg észlelni.” [1]

Walter Baade – aki csillagász volt – úgy tűnik, nagyon tisztelhetette a kísérleti fizikusokat, mert fogadást ajánlott Paulinak, hogy a neutrínót egy nap mégiscsak észlelni fogják. Amikor *Reines* és *Cowan* 1956-ban bejelentették a neutrínó felfedezését, Pauli megfizette az elvesztett fogadás tétjét: egy láda francia pezsgőt! Szerettem volna meg-

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat és az ELTE Fizika Tanszékcsoport közös rendezésű Ortway-kollokviumán, 2005. május 19-én elhangzott Marx György-émlék-előadásnak a szerző által beküldött szövege (fordította: *Patkós András*). Az előadást követően *Németh Judit*, az ELFT elnöke a Társulat elnöksége által odaitélt Marx György-plakettet adta át az előadónak.

tudni, hogy igaz-e ez a közismert történet, így egy Aachenben tartott neutrínókonferencián megkérdeztem Fred Reines-t (aki George-nak és nekem is közeli barátom volt), ő hogyan emlékezik mindeyre. Ő iszonyú dühös lett, és azt mondta, hogy a történet valós, ám a pezsgőt kizárólag az elméletiek itták meg, neki és Cowannak egy csepp sem jutott.

De ne szaladjunk oly gyorsan előre!

Reines és Cowan nagy sikere előtt nem nagyon tudták, hogy mi lehetne a legjobb neutrínóforrás. Egy cikkükben [2] *F.G. Houtermans* és *W. Thirring* a Napot javasolták, mert becslésük szerint a Nap neutrínófluxusa 6×10^{10} neutrínó $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. A kefelevonathoz fűzött megjegyzésükben azt mondják azonban: „E cikk közlését technikai gondok késleltették. Eközben úgy tűnik, hogy a neutrínóknak az inverz β -bomlás folyamatában történő abszorpcióját F. Reines és C.L. Cowan kimutatták.” [3]

Ők Reines és Cowan első cikkére utalnak, amelyet kis statisztikája (eseményszáma) miatt kritizáltak. A végső válasz csak 1956-ban született meg [4]. Mielőtt a részletekbe bocsátkoznánk, szeretnék a neutrínó fizikájának a legfontosabb eseményeiről áttekintést adni:

1930: *Wolfgang Pauli*: A neutrínó létezésének megjósolása

1938: *Hans Bethe*: A csillagokban zajló energiatermelés folyamatai

1956: *Fred Reines* és *Clyde Cowan*: A neutrínó felfedezése

1962: *Lederman, Schwartz, Steinberger* és munkatársai: $\nu_e \neq \nu_\mu$

1964: *John Bahcall*: A Nap neutrínófluxusának kiszámítása

1967: *Ray Davis*: Az első Nap-neutrínó-kísérlet (Cl \rightarrow Ar)

1967: *Bruno Pontecorvo* és *V.N. Gribov*: Neutrínóoszilláció

1975: *Martin Perl*: A leptonok harmadik generációja (τ, ν_τ)

1987: A szupernóva-neutrínók első észlelése

1998: Super-Kamiokande: Első jelzések a neutrínóoszillációkra

2002: SNO & KamLAND: A neutrínóoszillációk létezésének végleges bizonyítása

Az sem érdektelen, hogy ki kapott Nobel-díjat a neutrínó fizikájának hősei közül:

1938: E. Fermi ... *nem* a gyenge kölcsönhatás elméleteért

1945: W. Pauli ... *nem* a neutrínóhipotézisért

1988: L. Lederman, M. Schwartz, J. Steinberger „a neutrínónyaláb módszeréért és a müon neutrínójának felfedezése révén a leptonok dublettszerkezetének kimutatásáért”

1995: F. Reines „a neutrínó észleléséért”

2002: R. Davis Jr. és *M. Koshiba* „Úttörő asztrofizikai felfedezéseikért, különösen a kozmikus neutrínók észleléséért”

Most pedig haladjunk tovább a történeti sorrend szerint, és vizsgáljuk meg, miért is volt e lépések mindegyike annyira alapvető a maga idejében.

A kétféle neutrínó

1960 környékén a részecskefizikusok közössége egy mély tartalmú kihívással találta magát szemben. A müon gyenge bomlását jól értették,

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_{(\mu)} + \bar{\nu}_{(e)}, \quad (1)$$

ahol a neutrínók indexeit azért tettem zárójelbe, mert az idő tájt még nem tudták, hogy ez a két részecske különböző. Azonban a nyilvánvalóan lehetségesnek tűnő elektromágneses bomlást nem sikerült észlelni. Annak ágarányára (branching ratio, BR) a következő felső korlát áll fent

$$BR(\mu \rightarrow e + \gamma) \leq 10^{-11}. \quad (2)$$

(A (2) egyenletben a mai legjobb becslés olvasható! [5]) Bármely töltött részecske-antirészecske pár átalakulhat fotonpárba. Minthogy a neutrínónak sem töltése, sem mágneses momentuma nincsen, ez a reakció ebben az esetben lehetetlen. Ha azonban a gyenge kölcsönhatási folyamatokat W -bozonok közvetítik, akkor felléphet az úgynevezett belső fékezési sugárzás, amelynek révén a (2) reakcióbeli bomlás lehetségessé válik, hacsak valamely egyéb megmaradási tétel nem tiltja azt meg. Ezt a szerepet pedig közismerten az elektronok és a müonok számára vonatkozó különálló megmaradási tétel játszhatja. Ez viszont azt jelenti, hogy ν_e és ν_μ különböző részecskék. Tehát a következő alternatív állítások között kellett választani: vagy nem létezik a W közbenső bozon, vagy ν_e és ν_μ különbözőek.

Nyilvánvalóan kulcskérdés volt annak eldöntése, hogy az összes kölcsönhatás Yukawa-típusú-e, avagy van egy kivétel, nevezetesen a gyenge kölcsönhatások alapvetően négy-fermionos jellegűek! Tehát meg kellett tudnunk, hogy kétféle neutrínó létezik-e vagy sem.

Elsősorban *Gilberto Bernardini* vetette latba minden személyes tekintélyét, hogy a CERN végezze el ezt a neutrínókísérletet. Hogy érzékeltessük a kísérlet nehézségét, idézzük fel a neutrínós kölcsönhatások bizonyos alaptulajdonságait. A T céltárgyon E_ν energiával szóródó neutrínó hatáskeresztmetszetét a következő képlet adja:

$$\sigma_{\text{tot}}(\nu + T \rightarrow X) = \text{konst. } M_T E_\nu, \quad (3)$$

ahol

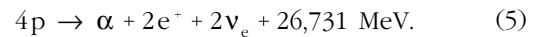
$$\text{konst.} \cong 10^{-38} \text{ cm}^2/\text{GeV}^2. \quad (4)$$

Így egy GeV nagyságrendű neutrínónak egy nukleonon való szórási hatáskeresztmetszete 10^{-38} cm^2 , míg a MeV tartományba eső energia esetén ugyanez 10^{-41} cm^2 . (Ez utóbbi hatáskeresztmetszetet kellett Reinesnek és Cowannak kísérletükben megmérniük.)

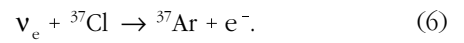
Az akkor éppen hogy megalapított, fiatal CERN számára nagy lehetőség lett volna a neutrínók kérdésének tisztázása, de a CERN egy nagypontosságú kísérletet tervezett, mintegy 1000 esemény észlelésével. A döntő fizikai kérdés azonban néhány esemény észlelésével is megválaszolható volt; a pionbomlásból származó neutrínónyalábot túlnyomórészt ν_μ alkotja, ha kétféle neutrínó létezik. Azaz az általuk indukált „inverz β -bomlás” kizárólag müonokat termelhet. A kísérletet rohamtempóban elvégezték az akkor „újszülött” brookhaveni gyorsítónál, és bebizonyították a kétfajta neutrínó létezését [6].

Nap-neutrínók

Immár több mint 40 éve, hogy *John Bahcall* elvégezte az első részletes számításokat a Nap neutrínófluxusára. A Napban zajló hidrogénégetés alapfolyamata a következő:



Ám a részletes reakcióháló sokkal bonyolultabb, mint-hogy egyebek mellett abban a ${}^3\text{He}$ -, ${}^7\text{Be}$ -, ${}^7\text{Li}$ - és ${}^8\text{B}$ -magok is részt vesznek. A legnagyobb energiájú neutrínók a ${}^8\text{B}$ -ból származnak (átlagos energiájuk 7,4 MeV). A ${}^7\text{Be}$ -ből egy éles vonalat kapunk $E_\nu = 0,862 \text{ MeV}$ energiával. Mindkét neutrínót az inverz β -reakcióval lehet kimutatni:



Ray Davisnek volt elegendő mersze e kísérlet elvégzéséhez. Egy óriási, 100 000 gallonos (kb. 400 000 literes) tartályt megtöltött tisztítószerezrel (C_2Cl_4) mélyen a föld felszíne alatt a Homestake bányában, és egyesével mosta ki abból az argonná átalakult atomokat egy számlálóba [7]. A várt eseménygyakoriság szélsőségesen kicsiny volt! A Nap-neutrínós kísérletekben erre külön egységet vezettek be: Solar Neutrino Unit (SNU). Ennek definíciója:

$$1 \text{ SNU} = 10^{-36} \text{ befogás atom}^{-1} \text{ s}^{-1}. \quad (7)$$

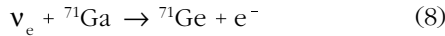
1984-re Davis már elegendő mennyiségű eseményt gyűjtött össze, hogy statisztikailag meggyőző becslést adhasson a Nap-neutrínók fluxusára: $2,1 \pm 0,3 \text{ SNU}$ [8]. De Bahcall jóslata ennél jóval nagyobb volt [9], 6–8 SNU attól függően, hogy a Nap-modell paramétereit hogyan választotta. Ez nagy felfordulást okozott a szakmai közösségben. Jól emlékszem a Marx György által szervezett egyik Balaton-konferencián a Davis előadását követő vitára. A végén egyetértés volt abban, hogy az alábbi állítások valamelyike biztosan igaz:

1. A kísérlet rossz
2. A Nap-modell rossz
3. A magfizika elmélete rossz
4. A részecskefizika elmélete rossz

Az idő tájt senki sem várta, hogy az utolsó állítás legyen a helyes! A helyzet annyira kritikus volt, hogy Hans Bethe az 1988-ban Bostonban Marx György által szervezett Ne-

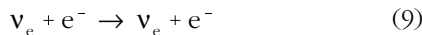
utrínó Konferencián megjegyezte, hogy kezd bizonytalan lenni, vajon jó indoklással kapta-e meg a Nobel-díjat.

A kísérletet jobb (alacsonyabb) küszöbértékkel meg kellett ismételni. A



reakció küszöbenergiája elég alacsony ahhoz, hogy az (5) elsődleges folyamatból származó összes neutrínót megfigyelhessék. Két galliumot használó kísérletet hoztak létre, a Gallex az olaszországi Gran Sasso hegység mélyén, a SAGE (Soviet–American Gallium Experiment¹) a Kaukázusban működött. Ám azok is neutrínóhiányt mutattak ki a Nap-modell jóslatához képest, mely utóbbi időközben egyre pontosabbá vált.

Végül, Japánban működni kezdett a Super-Kamiokande elnevezésű Cserenkov-óriásdetektor. Ez a



rugalmas ütközések észlelése révén nemcsak kimutatta, de meg is határozta a Nap-neutrínók beesési irányát is, miután a (9) reakció differenciális hatáskeresztmetszete erős csúcsot mutat a beesés irányában. Hans Bethe bizonyára megkönnyebbült az eredmények láttán, amely szerint valóban a Napban keletkeztek a detektált neutrínók, még ha kevesen voltak is. (Élénken emlékszem, milyen izgatottan mutatta meg nekem Marx György az első ábrákat, amelyeken a neutrínók érkezési iránya egyértelműen a Nap felé mutatott.)

A 2002. évi müncheni Neutrínó Konferencia idején (ez volt az utolsó, amelyen George részt vehetett) a megfigyelt neutrínóáramnak a Nap-modell által jóslathoz viszonyított aránya a következő volt:

A klór–argon kísérlet	$0,30 \pm 0,03$
A galliumos kísérletek	$0,53 \pm 0,03$
Super-Kamiokande	$0,403 \pm 0,013$

Mielőtt rátérnénk a Nap-neutrínók rejtélyének megoldására, vissza kell lépünk a neutrínók keveredésének Bruno Pontecorvo által felvetett elképzelésére.

A neutrínóoszillációk

Bruno Pontecorvo (Marx György közeli barátja) már 1957-ben javaslatot tett a neutrínóoszilláció lehetőségére [10] (ez analóg a semleges kaonrendszerben bekövetkező jelenséggel). A különböző neutrínófajták egymásba oszcillálásának javaslata Ziro Makitól és munkatársaitól származik [11]. Ennek előfeltétele, hogy a különféle neutrínóknak különböző tömegük legyen, tehát semmiképpen sem lehet mindegyik zérus tömegű. Minthogy a részecskefizika Standard Modellje tömeg nélküli neutrínókat tételez fel [12], ez a javaslat az új fizika felé mutató bátor elképzelés.

Ha kétféle neutrínó keveredik, akkor a „tömeg-sajátállapotok” – mondjuk, (ν_1, ν_2) – különböznek a „gyenge sajátállapotoktól”: (ν_e, ν_μ) . A $\nu_l \rightarrow \nu_{l'} (l, l' = e, \mu)$ folyamat átmeneti valószínűsége:

$$P_{l,l'} = \sin^2 2\alpha \sin^2 \left(\frac{L}{2\lambda} \right), \quad l \neq l'. \quad (10)$$

ahol α a keveredés szöge. Háromféle neutrínóra több pár képezhető, és a forrástól L távolságra az E energiájú nyalábban fellépő oszcillációt meghatározó mennyiség kifejezése az elmélet szerint

$$\lambda_{k,k'} = \frac{2E}{\Delta m_{k,k'}^2}, \quad k, k' = 1, 2, 3, \quad (11)$$

amelyben fellép a tömegkülönbség

$$\Delta m_{k,k'}^2 = |m_{\nu_k}^2 - m_{\nu_{k'}}^2|. \quad (12)$$

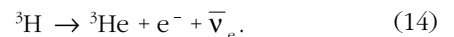
A kísérlet leírására numerikusan az

$$\frac{L}{\lambda_{k,k'}} = 2,54 \frac{\Delta m_{k,k'}^2}{\text{eV}} \frac{L/E}{\text{km/GeV}} \quad (13)$$

hányados használandó (10)-ben.

Kísérletileg vagy azt vizsgálhatják, hogy az E energiájú nyalábban, a forrástól L távolságra milyen mértékben jelenik meg egy abban eredetileg nem található neutrínófajta (*felbukkanási kísérlet*), vagy ennek alternatívájaként az eredeti nyaláb intenzitáscsökkenését („vékonyodását”) mérhetik (*eltűnési kísérlet*) az eredeti részecskének másfajta neutrínókba történt átoscillálása eredményeként.

Amint fentebb állítottuk, a neutrínóoszillációkból a tömegkülönbségre lehet következtetni, az legalább egy neutrínónak nemzérus tömeget jelez. Közvetlen tömegkorlátot elegendő pontossággal mérni igen nehéz. A legjobb felső korlát a trícium elbomlásából származtatható:



Az elektron energiaspektrumát a végpontja környezetében határozzák meg a Kurie-diagramon, amelyen a következő mennyiséget ábrázolják az E_e függvényében:

$$K(E_e) = \frac{G U_{ud} \sqrt{\xi}}{\pi \sqrt{\pi}} \sqrt{(E_0 - E_e)^2 - m_\nu^2}, \quad (15)$$

ahol ξ a nukleáris mátrixelem, E_0 pedig az E_e elektronenergia maximuma. A függvényalak pontos meghatározásához nagyon sok eseményre van szükség, miközben a spektrum éppen ott minimális.

A kísérlet elvégzése során igen furcsa jelenségek léptek fel (George-ot mindig a váratlan fejlemények izgatják!). A legutóbbi időig, az összes(!) kísérlet negatív értéket adott m_ν^2 -re, miközben ez statisztikai hibaként csak a méréssorozatok felénél lenne elképzelhető. Továbbá, volt egy furcsa fél éves periódusidejű, szisztematikusnak tűnő változás is a kísérlet eredményében, amelyet

¹ A Szovjetunió felbomlása után a kísérletet *nem* keresztelték át RAGE-re, az első szóban a Sovietnek Russianra való cserélésével (ui. rage = düh)!

„Troitsk-hatásnak” hívták. Ennek magyarázatául az Ősrobbanásból visszamaradt neutrínók óriási lapos lemezét tételezték fel, amelyen a Föld évente kétszer áthalad pályamozgása közben. Szerencsére mindezek a jelenségek eltűntek a kísérlet feletti kontroll javításával, és az elektron-neutrínó tömegére a jelenlegi legjobb felső korlát, amely a Mainzban és Troitskban folytatott két kísérletről származik, egységesen 2,2 eV.

A neutrínó tömegének fontossága miatt Karlsruheban új kísérletet terveznek KATRIN névvel. Ennek célja az elektronvoltage alatti érzékenység (2013-ra a 0,2 eV) elérése.

A harmadik generáció

A részecskefizikus közvélemény nagy meglepetésére Martin Perl [13] és munkatársai 1975-ben felfedezték a leptonok harmadik generációját. Elsőként nyilván a töltött τ -leptonot találták meg az

$$e^+ + e^- \rightarrow \mu^\pm + e^{\mp} + \text{hiányzó energia} \quad (16)$$

reakció révén.

Felmerült a kérdés, hogy a közvetlenül nem észlelt neutrínó vajon szintén az új, harmadik generációhoz tartozik, vagy a már ismert két fajta valamelyike. Utóbbi lehetőségeket hamarosan kizárták a kísérletek. Elég sok időbe telt, amíg a neutrínók harmadik generációját közvetlenül is „láthatóvá tették” a τ -lepton keltő reakciója révén a DONUT-kísérletben. (Idetartozik az a mulatságos eset, amely 1977-ben a Strbské Plesón tartott Hadronspektroszkópiai Háromszög-szemináriumon történt, ahol én az *Ötödik lepton*, George pedig a *Hatodik lepton* címmel tartott előadást.)

Az 1987a szupernóva

1987 februárjában egy szupernóva robbant fel a közeli Nagy Magellán-ködben. A tudománytörténetben először detektálták az ebben az eseményben keletkező neutrínófelvillanást is [14]. Bár sikerült ennek révén a ν_e neutrínó tömegére felső korlátot kapni [15], még több információ lett volna nyerhető, ha a sikeres észlelés két fő detektorának, egy japán és egy USA-beli detektornak az óráit megfelelően szinkronizálták volna. Sajnos ez nem történt meg. (Emlékszem az 1987-ben Santa Fében tartott workshopon, amelyet a gyenge kölcsönhatásokról és a neutrínókról szerveztünk, a Kamiokande-kísérlet képviselője a következő szavakkal sajnálkozott e hiányosságon: „Nagyon zavarbaejtő ez a pontatlanság, hiszen országom egyebek között a jó minőségű karórák exportjáról is nevezetes.” Ugyanis egy doktorandusz ült a detektor mellett a nevezetes esemény időpontjában, aki a detektor megszólalásának pillanatát egyszerűen karórája állásából olvasta le, mert senki sem látta előre, hogy a pontos időnek bármiféle jelentősége lesz.)

Ezt a nagy föld alatti detektort eredetileg a proton bomlásának észlelésére építették. A kísérlet neve Ka-

miokande, s a *Kamioka Nucleon Decay Experiment* szöösszetételre utal. Miután kiderült, hogy a protonnak hosszabb az élettartama, mint aminek kimutatására ez a detektor képes, ugyanakkor pedig bekövetkezett a történelmi neutrínóészlelés, a kísérlet irányítói a rövidítést átértelmezték: a Kamiokande szó immár a *Kamioka Neutrino Detection Equipment* kifejezésre utal.

Neutrínók az atmoszférából²

Amikor a kozmikus sugárzás egy részecskéje behatol a földi légkörbe, ütközései főleg pionokat keltenek. Ezek pedig a $\pi \rightarrow \mu + \nu_\mu$ reakció révén bomlanak, majd a müon tovább bomlik az (1) reakcióval. Ebből az egyszerű reakciósorból világos, hogy a Földet elérő kozmikus sugárzásban kétszer annyi a ν_μ , mint ν_e .³ Ehhez korrekciók és zavaró háttér is társul (pl. a kozmikus sugárzás által a pionok mellett keltett kaonok bomlásából). Ezeket a korrekciókat figyelembe vették, mégis a megfigyelt hányados tartósan alacsonyabb volt a vártnál.

A Super-Kamiokande detektornál egy gyönyörű szép kísérletben megmérték a neutrínók detektálásakor keletkező müonok közül külön a felfelé és külön a lefelé haladóknak a számát. Amíg a müonokat keltő, lefelé haladó neutrínók csak 10 km-t haladtak a müonkeltést megelőzően, a felfelé jövőknak nagyságrendileg 10000 km-t kellett megtenniük. Ez pedig azt jelenti, hogy az utóbbiaknak elegendő idejük volt arra, hogy a (10) egyenletnek megfelelően oszcillációval „eltűnjenek”. A részletes elemzés azt mutatta, hogy a ν_μ -k ν_τ -kba oszcillálnak át, mégpedig a lehetséges legnagyobb keveredési szögnek megfelelően, azaz $\sin^2 2\theta = 1$. A tömegkülönbségre pedig $\Delta m^2 = 2,5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ adódott.

Amint kísérleti érvet sikerült találni a neutrínók oszcillációjára, azonnal elfogadhatóvá lett a Nap-neutrínók rejtélyének a ν_e -nyaláb oszcillációs gyengülésével való magyarázata. De ezt a lehetőséget még valamilyen pozitív méréssel illet ellenőrizni. Mindaddig, amíg csak a töltött gyenge áramhoz kapcsolódó események detektálására volt mód, csak eltűnési kísérletet lehetett tervezni. Az eltűnő fluxusból létrejövő másfajta neutrínó keletkezési kimutatására a semleges áramok révén végbemenő neutrínóreakciókra érzékeny új detektort kellett építeni.

A Sudbury Neutrínó Observatórium (SNO)

A semleges áramok által leírt neutrínóreakciók kimutatására egy óriási Cserenkov-detektort építettek az északkanadai Sudbury bánya mélyén. Ennek tartályát 1000 tonna tiszta nehézzvízzel töltötték meg. A deutérium a következő neutrínóreakciókban vehet részt:

$$\nu_l + d \rightarrow \nu_l + n + p, \quad l = e, \mu, \tau, \quad (17a)$$

² Légköri neutrínókat először Indiában és Dél-Afrikában figyeltek meg [16].

³ Az idődilatáció miatt ez az érvelés csak alacsony neutrínóenergiákra alkalmazható.

$$\nu_e + d \rightarrow e^- + p + p, \quad (17b)$$

Így a (17a) reakcióval a teljes, csökkenésmentes neutrínófluxust is megmérhették.

Nagy megkönnyebbülést okozott és egyben csodálatos siker volt, amikor 2002-ben Münchenben a Napból származó teljes neutrínófluxusra a

$$\phi_{\text{SNO}} = 5,09 + 0,44 + \frac{0,46}{-0,43} - 0,43 \quad (18a)$$

értéket tették közzé, amely tökéletes egyezésben van a Standard Nap-Modellből számított

$$\phi_{\text{SSM}} = 5,05 + \frac{1,01}{-0,81} \quad (18b)$$

értékkel. De ez nem volt elegendő arra, hogy a légköri neutrínók elemzéséhez hasonlóan részletes oszcillációs adatokat kapjanak, hiszen a mérést csak egyetlen távolságon tudták elvégezni. A hiányzó ismeretet egy újabb csodálatos szépségű kísérletből nyerték: a KamLAND-kísérletből (*Kamioka Liquid Scintillator AntiNeutrino Detector*). Ez a Kamioka hegységben található, 1000 tonna szcintillátor-folyadékmal működő neutrínódetektor, amellyel sikerült megmérni a környező 13 atomerőműből származó neutrínófluxust!

A két kísérletből együttesen a Nap-neutrínók oszcillációját jellemző adatokra a következő paramétereket kapták az elektron-neutrínónak müon-neutrínóba történő átalakulását feltételezve:

$$\begin{aligned} \Delta m^2 &= 8,3 \times 10^{-5} \text{ eV}^2, \\ \sin^2 2\theta &= 0,83. \end{aligned} \quad (19)$$

Neutrínók három generációját és kétféle neutrínóoszcillációt feltételezve (azaz két tömegkülönbséget vezetve be) a fenti mérési eredményekkel a megfigyelések jó leírását kapnánk még akkor is, ha csak a tömegek különbségeit ismerhetjük meg belőlük, az abszolút értékeket nem. Azonban még egy megoldandó rejtély maradt fenn, így végül a jövőre is kell egy pillantást vetnünk.

Steril neutrínók?

Los Alamosban végezték el az LSND nevű oszcillációs kísérletet. Amikor egy reakcióban π^+ keletkezik, az a $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ reakcióval bomlik, majd a müon $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$ reakcióval maga is tovább bomlik. Azaz, egy tisztán pozitív pionokból álló nyalábból nem jelenhet meg anti- ν_e . Ha ilyet látnak, akkor az csak oszcillációból származhat, feltéve, hogy a hátteret gondosan levonták.

Az LSND-kísérletben éppen ezeket az anti- ν_e részecskéket figyelték meg. Ez egy 4σ konfidenciaszintű esemény. A gondot az jelenti, hogy a becsült tömegkülönbség messze nagyobb, mint amelyet a fent leírt kísérletekből származtattak. Azt viszont tudjuk, hogy nem lehet könnyen beilleszteni egy negyedik neutrínógenerációt a létező részecskék közé. 1976-ben mutattam rá [17], hogy a különféle neutrínófajták N_G számát a Z-bozon szélességéből a

$$\Gamma_Z = \Gamma(Z \rightarrow \text{látható}) + N_G \Gamma(Z \rightarrow \nu \nu) \quad (20)$$

összefüggés segítségével megbecsülhetjük.

A Részecskeadatok Csoportja (*Particle Data Group*) 2004-ben a következő értéket tette közzé [5]:

$$N_G = 2,994 \pm 0,012. \quad (21)$$

Tehát egy negyedik neutrínó tulajdonságai mások, mint az első háromé, nevezetesen az nem csatolódhat a Z-bozonhoz. Általában ezért „steril neutrínónak” hívják, és az én szememben egy igencsak ronda teremtmény. Miután az LSND eredményét független mérések nem reprodukálták, nyitott kérdés, hogy helyes-e? Az elmúlt években a Nemzetközi Neutrínó Konferenciákon (ez is George „gyermeké”) a záró összefoglalókat tartó előadók bevett szokása volt előadásukat így kezdeni: összefoglalóban nem veszek tudomást az LSND-kísérletről. Ezt a problémát azonban objektíven kell tisztázni. Ezért előkészületben van egy újabb kísérlet – a Mini-Boone –, hogy tisztázza az LSND állításait. Az első kísérleteket 2005-re ígérték, de késésben vannak, mert igen pontos és gondos méréssel lehet csak tisztázni ezt a nagyon fontos kérdést. Ezt pedig izgatottan várja a neutrínófizikusok közössége.

A müncheni Nemzetközi Neutrínó Konferencia volt az utolsó (2002-ben), amelyen George részt vett, amelyet megnyitott, és ahol a zárszót is ő mondta. Két évvel ez után Párizsban én kaptam a megtisztelő feladatot, hogy a megnyitón emlékezzek rá [18]. Ez a konferenciasorozat nem csökkenő lelkesedéssel folytatódik, de nagyon mélyen átérezzük alapító atyjának, Marx Györgynek a hiányát.

Megköszönöm *Walter Grimus*-nak, hogy elolvasta a kéziratot.

Irodalom

1. G. MARX – Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 38 (1995) 518
2. F.G. HOUTERMANS, W. THIRRING – Helvetica Physica Acta 27 (1954) 81
3. F. REINES, C.L. COWAN – Phys. Rev. 92 (1953) 830, 1088
4. C.L. COWAN et al. – Science 124 (1956),
F. REINES, C.L. COWAN – Phys. Rev. 113 (1959) 273
5. PARTICLE DATA GROUP – Phys. Lett. B592 (2004) 33
6. G. DANBY et al. – Phys. Rev. Lett. 9 (1962) 36
7. R. DAVIS JR. et al. – Phys. Rev. Lett. 20 (1968) 1205
8. R. DAVIS JR. et al. – AIP Proc. 123 Steamboat Springs Conf. (1984) 1037
9. J.N. BAHCALL et al. – Rev. Mod. Phys. 54 (1982) 767
10. B. PONTECORVO – Sov. Phys. JETP 33 (1957) 549, 34 (1958) 247, 53 (1967) 1117
V. GRIBOV, B. PONTECORVO – Phys. Lett. B28 (1969) 493
11. Z. MAKI, M. NAKAGAWA, S. SAKATA – Progr. Theor. Phys. 28 (1962) 870
12. D. HAIDT, H. PIETSCHMANN: *Electroweak Interactions* – Landoldt-Börnstein New Series Group I, Vol. 10. Springer-Verlag, Berlin (1988) 14
13. M.L. PERL et al. – Phys. Rev. Lett. 35 (1975) 1489
14. K. HIRATA et al. – Phys. Rev. Lett. 58 (1987) 1490
R.M. BIONTA et al. – Phys. Rev. Lett. 58 (1987) 1494
15. D. SCHRAMM – Proc. Int. Symp. Lepton Photon, Hamburg (1987) 471
16. C.V. ACHAR et al. – Phys. Lett. 18 (1965) 196
F. REINES et al. – Phys. Rev. Lett. 15 (1965) 429
17. R. BERTLMANN, H. PIETSCHMANN – Phys. Rev. D15 (1977) 683
18. H. PIETSCHMANN: *In Memoriam George Marx* – Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 143 (2005) ix