

PATKÓS ANDRÁS

Túl a részecskefizikai Standard Modellel

Az ismert elemi részecskék legtünékenyebb családjának, a neutrínók fizikájának különleges jelenségeihez tért vissza a fizikai Nobel-díjat odaítélő bizottság 2015. évi döntésével, amikor *A. Kajita* japán és *A.B. MacDonal*d kanadai fizikusnak ítélte oda a díjat. Az 1988 óta díjazott neutrínófizikai felfedezések sorához negyedikként újból a kísérleti fizika eszközeivel feltárt jelenség csatlakozott. Mintha a bizottság a neutrínók létezésének hipotézisét megalkotó Wolfgang Paulit igyekezne döntésével újra és újra cáfolni, aki egykor elborzadva konstatálta, hogy olyat tett, amit fizikusnak tilos: feltételezett egy részecskét, amelynek létezése kimutathatatlan.

A neutrínókutatás Nobel-díjai

A friss Nobel-díjasok méltatása lehetőséget ad a neutrínók észlelésének útján történt előrehaladás áttekintésére, a négy, Nobel-díjas mérést megvalósító kutatónak, valamint a kísérleteik gondolatát üttörőként felvető, ám a legmagasabb tudományos díjban nem részesült tudósoknak a megismerésére (1. ábra).

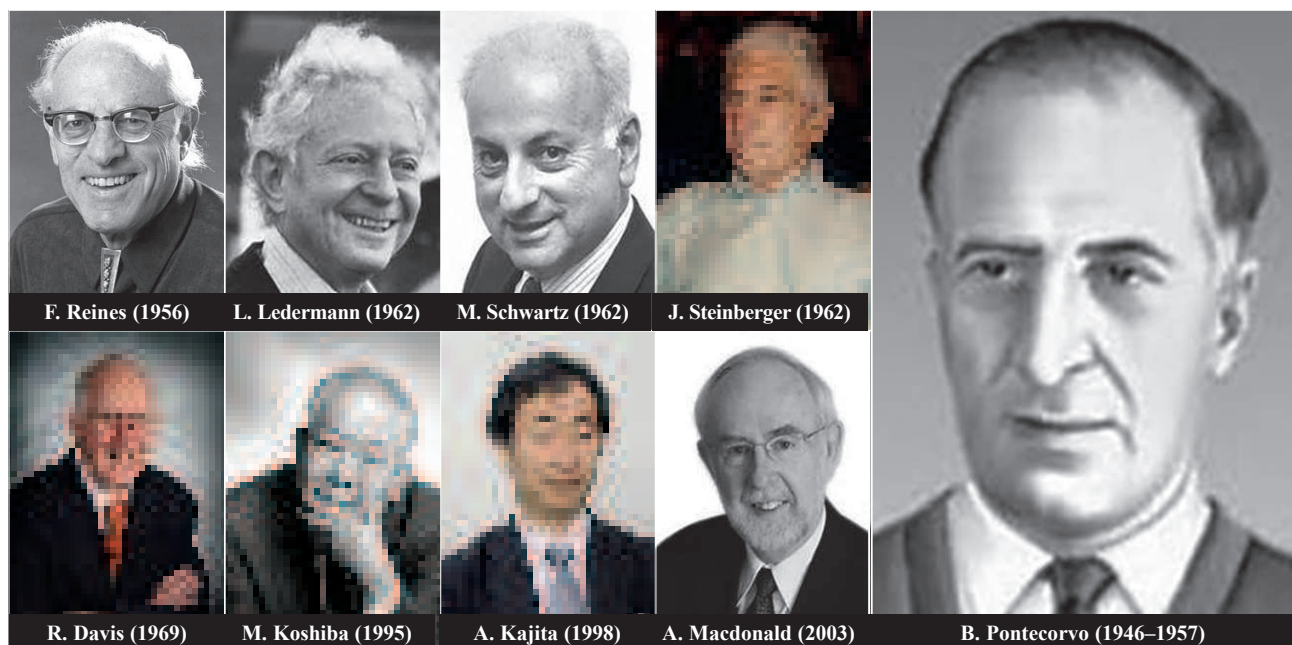
A neutrínók létezésének kimutatásáért Frederick Reines 1995-ben részesült Nobel-díjban, közel negyven évvel a sikeres mérést követően (munkatársa, Clyde Cowan időközben elhunyt). A gyenge kölcsönhatás elmélete szerint a hasadási reaktorokban elektronok társaságában keletkező, ám láthatatlan elektron-típusú antineutrínók feltételezett útjába helyezett anyagminta protonjaival bekövetkező kölcsönhatás során észlelték a protonok átalakulását neutronná egy pozitron keletkezésének kísérletében. A Nobel-bizottságnak az idei díj előtörténetét bemutató tanulmánya úgy fogalmaz, hogy ennek az ún. inverz béta-bomlási folyamatnak a kimutatását „B. Pontecorvo bátorításával F. Reines és C. L. Cowan tervezte meg és hajtotta végre Dél-Karolinában, a Savannah River atomreaktornál.”

A neutrínók létezésének 1956-os kimutatását követően 1962-ben L. M. Ledermann, M. Schwartz és J. Steinberger végzett olyan kísérletet, amivel bebizonyították, hogy az elektron, illetve a müon (az elektron nehezebb testvére) részvételével végbemenő neutrínótermelő reakciókban nem ugyanaz, hanem két különböző neutrínó keletkezik. A kvarkokból álló legkönnyebb elemi ré-

szecske, a pion pozitív elektromos töltésű állapotának bomlásában egy müon és egy neutrínó keletkezik. Ez a neutrínó protonokkal ütközve szintén inverz béta-bomlási folyamatot kezdeményezhet. Ebben a reakcióban soha nem keletkezik pozitron, hanem kizárólag pozitív töltésű müon. Ezt a felismerést már 1988-ban Nobel-díjjal ismerték el. Melvin Schwartz, az egyik díjazott, Nobel-előadásában a következőképpen fogalmazott: „Elképzeléseink közül számosra B. Pontecorvo is előterjesztett javaslatot. Megállított pionokból nyert neutrínókkal kívánta elvégezni a kísérletet, sőt egy a Szovjetunióban rendezett konferencián nagyenergiájú pionok alkalmazását is felvetette. A neutrínófizikához mindenképpen kiemelkedően járult hozzá.”

A harmadik Nobel-díjat 2002-ben R. Davis és M. Koshiba megosztva kapta a Napban zajló fúziós reakciókban keletkező neutrínók kimutatásáért. A két díjazott alapvetően eltérő technikát alkalmazott. Koshiba a Kamioka-hegység mélyén elhelyezett óriási víztartály anyagának a napneutrínókkal bekövetkező ritka kölcsönhatásában meglökött

1. ábra. A neutrínófizika Nobel-díjasai a felfedezéseik dátumával, és akinek intuíciója előrevetítette mindnyájuk felfedezéseit. A jobb oldalon B. Pontecorvo (1914-1993)



negatív elektromos töltésű részecskék Cserenkov-sugárzásának kimutatásával szolgált rá a díjra. Raymond Davis módszerét így mutatta be Nobel-előadásában: „A neutrínók észlelésére a Pontecorvo által 1946-ban leírt radio-kémiai kísérlet megvalósításán kezdtem dolgozni. Ez a neutrínók befogását a $^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$ reakcióval valósítja meg, amiről Pontecorvo rövid cikke egészen részletes leírást adott.” Ezt a cikket, amely a kanadai Chalk River Laboratórium közleményeként kapott sorszámat, titkosították, mert „a módszer alkalmas a reaktorok teljesítményének külső eszközzel történő észrevétlen mérésére”.

Am közzismert, hogy mind Davis, mind Koshiba kísérlete a Hans Bethe által kifejlesztett Nap-modellből várt (és John Bahcall által a magfizika aktuális kutatási színvonalán naprakészen tartott számításokból adódó) neutrínóáramnak csak nagyjából harmadát észlelte. Az 1960-as, 1970-es évek fordulóján számos elképzelés született a hiány magyarázatára, a neutrínók elbomlásától (Bahcall), a Nap-modell módosításáig (pl. Marx György és Ruff Imre). Vlagyimir Gribov és Bruno Pontecorvo 1969-es cikkükben felvetették, hogy esetleg az (akkor ismert) kétféle neutrínó egymásba alakulhat és a „neutrínó-oszcilláció csökkenti az észlelhető napneutrínók számára vonatkozó előrejelzést ahhoz képest, amikor a kétfajta neutrínók számát külön-külön szigorúan megmaradó tulajdonságként kezelik.”

Davis kísérletét csak az 1990-es évek elején zárta le, és a neutrínódetektálás modern módszerei is csak erre az időszakra érték el azt a hatékonyságot, ami a statisztikai ingadozások okozta hamis konklúziók kizárására elegendő beütésszám regisztrációját tették lehetővé. Egyben párhuzamos részecskefizikai fejlemények (az ún. Standard Modell kialakulása) világossá tette, hogy a neutrínófajták egymásba alakulása, amennyiben ez a neutrínóhiány oka, nem értelmezhető az egyébként átfogó sikerű elmélet keretében.

Neutrínók a Standard Modellben és egymásba alakulásuk hipotézise

Miközben a neutrínók észlelésének technikája tisztán empirikus kutatási feladatként fejlődött a XX. század második felében, a neutrínók bizonyos sajátos tulajdonságai főszerepet játszottak a Standard Modell elméleti kiépülésében is. Ugyanis a neutrínók keletkezésével kísért gyenge kölcsönhatási folyamatokban ismerték fel a természet tükrözési szimmetriájának sérülését, amelyről kiderült, hogy éppen a neutrínók természetében nyilvánul meg a legradikálisabban.

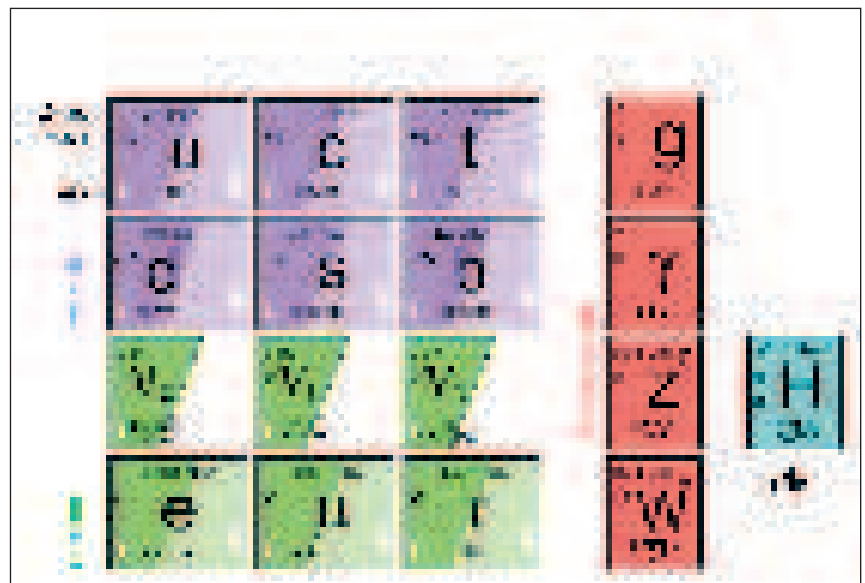
A váratlan viselkedés legegyszerűbb bizonyítékára korlátozódva emlékeztetünk

arra, hogy 1957-ben Garwin, Ledermann és Weinrich, illetve velük párhuzamosan Friedmann és Telegdi az elektromosan töltött pion elbomlásában keletkező müonokat vizsgálta. A müon melletti másik bomlásterméket, a (müon)neutrínót nem tudták észlelni, annak tulajdonságaira a müon viselkedéséből következettek. A pion saját perdülete nulla, tehát a bomlástermékek perdületének eredője is az lesz, a perdület megmaradásának törvénye alapján. A müon ún. feles spinű részecske, amelynek a kvantumfizika törvénye alapján a repülési irányához képest előre vagy hátra mutathat a perdület-vektora. Ezt a vetületet a másik bomlástermék, a neutrínó perdülete kell, hogy ellensúlyozza. A ki-

nem-nulla tömeg ugyanis folyamatosan keveri a jobb- és balcsavarodású állapotokat. Az ismert elemi részecskék táblázata tükrözi ezt a helyzetet (2. ábra).

A részecskefizika Standard Modelljének nagy sikere volt, hogy a neutrínókat a tükrözési szimmetria maximális sérülésének megfelelően úgy sikerült beilleszteni az elméletbe, hogy tömegük nulla legyen és a részecskefizikai táblázatban csak egyféle spinvetületű neutrínóállapotnak maradjon hely. Ez azt jelenti, hogy a részecskék tömegét generáló Brout-Englert-Higgs-mechanizmus nem határos a neutrínók családjában.

A Gribov-Pontecorvo-javaslat a Napból származó elektron-típusú neutrínóknak müon-típusúakba történő periodikus átala-



2. ábra. A jelenleg eleminek ismert részecskefizikai objektumok. A bal oldalon a felső két sorban a kvarkok, az alsó kettőben a leptonok fajtáinak egyezményes jele található egy-egy aszimmetrikusan sötétített négyzetben. A bal oldali sötétebben árnyékoltt rész jelképezi a kvarkok és a leptonok mindegyikének létező balcsavarodású polarizációs állapotát. A négyzetek jobb oldalán található világosabb részzel szimbolizálják a jobb-csavarodású polarizációs állapotot, ami a harmadik sorban található neutrínók esetében hiányzik! A függőleges negyedik oszlop a kölcsönhatásokat közvetítő erők kvantumait jeleníti meg. A jobb szélén magányosan a részecskéknek tömeget generáló Higgs-bozon áll

sérletezők meglepetésére a kirepülő müon perdülete kivétel nélkül a repülési iránnyal ellentétes volt. Ez azt jelentette, hogy a másik vetület létrejöttére egyáltalán nincs esély a bomlás során. Ennek természetes magyarázataként kínálkozott, hogy a neutrínóknak nem is létezik a másik perdületvetületű állapota. A neutrínó természetét tekintve tehát a gyenge kölcsönhatás tükrözési aszimmetriája maximális.

Annak a körülménynek, hogy a háromfajta neutrínó mindegyikéből csak a balra csavarodó spinvetületű (illetve antineutrínóból csak a jobbra csavarodó spinvetületű) változat létezik, közvetlen következménye, hogy a neutrínók tömege nulla kell legyen. A

kulását a két részecske tömegkülönbségével fordítottan arányos periódushosszal jósolja. Így kezdetől fogva világos volt, hogy a jelenség megvalósulásához legalább egyik neutrínóknak nem-nulla tömege kell legyen. Ez pedig azt jelentette, hogy a neutrínó-oszcilláció meggyőző kimutatása a Standard Modelen túli fizika létezésének lenne bizonyítéka.

Hogyan illesztik be mégis a neutrínókat az elektromos kölcsönhatás egységes elméletébe? Miért nem cáfolja, hanem csak kiegészítőnek minősíti az oszcilláció hipotézise a Standard Modellt? A helyzet az, hogy továbbra is igaz lehet, hogy ebben a kölcsönhatási körben a neutrínóknak csak az egyik spinvetületű állapota vesz részt.

Csak balkezes neutrínó keletkezhet és csak balkezes neutrínó léphet kölcsönhatásba a protonokkal, elektronokkal és bármelyik ismert elemi részecskével. Az oszcilláció lehetőségét az a feltételezés adja meg, hogy a pion bomlásából születő müon-neutrínónak nincs határozott nyugalmi tömege, hanem három különböző tömegű neutrínóállapot kombinációja. Ugyanez igaz a neutron elbomlásakor keletkező elektron-neutrínóra és a tau-leptonnal együtt keletkező tau-neutrínóra is. A három határozott tömegű állapotot az elektroyenge kölcsönhatásban résztvevő három állapottal összekapcsoló kombinációk adatait az ún. Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata-mátrixban foglalták össze és az oszcillációs mérésekből kívánják konkrét számértékeiket meghatározni.

A lineáris kombinációban keletkező állapotok időbeli továbbfejlődése a kvantummechanika egyszerű alkalmazásával

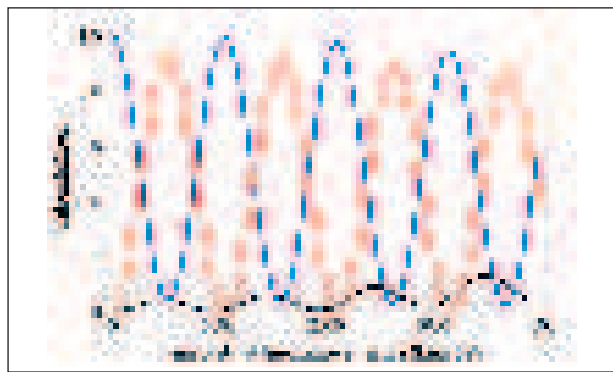
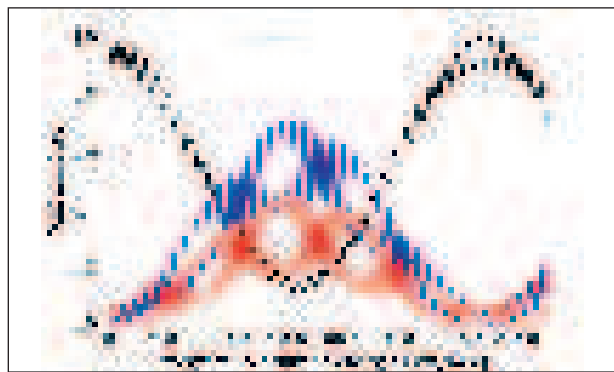
Tehát a Standard Modellt a neutrínó-oszcilláció létezése esetén nem kell elvetni, hanem meg kell érteni azt a kiegészítő mechanizmust, amely a gyenge kölcsönhatás természetét úgy alakította, hogy abban a határozott tömegű neutrínó állapotok speciális kombinációi vesznek részt.

A neutrínó-oszcilláció hipotézisének asztrofizikai igazolása

A 2015. évi Nobel-díj felét A.B. MacDonald kanadai fizikus, a Sudbury Neutrino Observatory igazgatója nyerte el, miután kísérleti csoportjának nehézzvízzel töltött 1000 tonnás gömbjében megfigyelhető háromféle eredetű Cserenkov-sugárzással képes volt a Napból érkező bármelyfajta neutrínó észlelésére. A mérésekből kiderült,

atommagjaival bekövetkező ütközésekben nagyszámú pion is keletkezik. Ezek bomlásából, amint azt már említettük az 1957-es kísérleti vizsgálatok kapcsán, egy müon és egy müon-neutrínó keletkezik. A müon maga sem stabil, így a bomlási sor a müon \rightarrow elektron + müon-neutrínó + elektron-neutrínó reakcióval zárul le. (Nem érdemes valamely neutrínó és az antineutrínója között különbséget tenni, mivel a kísérleti kimutatásra használt vizes közegben fellépő Cserenkov-sugárzással nem is lehet észlelni természetük különbségét.) A pionok elbomlásából tehát kétszer annyi müon-típusú neutrínó repül szét, mint elektron-típusú.

Az elektron-típusú neutrínók müonba történő oszcillációjának elhanyagolható a hatása, akármilyen irányból is érkeznek a Superkamiokande detektorba ez a fajta neutrínó. Miután jellemző osz-



3. ábra. A Napban keletkező elektron-neutrínók (fekete vonal) megtalálási valószínűsége 150 millió km-es úton átlagosan 1/3-ra csökken a müon-neutrínóba (kék) és a tau-neutrínóba (piros) történő átoscillálással (bal oldali ábra). A légkörben keletkező müon-neutrínó (kék) elsősorban tau-neutrínóba oszcillál a Föld túlsó feléről megtett néhány ezer km-es útján (Meszéna Balázs animációjával készült ábrák a kísérleti helyzetnek megfelelő tömegkülönbségeket használva)

megadható. A három tömeg különbsége határozza meg annak az útnak a hosszát, amely alatt pl. egy elektron-típusú állapot átfejlődik müon-típusúvá (amely tehát müonos inverz béta-bomlást tud indukálni) vagy egy müon-típusú átalakul tau-típusúvá. Ha megadjuk a tömegkülönbségeket és a gyenge kölcsönhatásban keltett kezdőállapotot, akkor az interneten szabadon elérhető Wolfram Demonstration projekt programkódja segítségével látványosan kirajzolható az állapot észlelési valószínűségének továbbhullámszerűsége, amelyet a megtett út (L) és a neutrínó energiája (E) hányadosa szabályoz (3. ábra).¹

¹ Ennek a programnak néhány eredményét grafikus formában a Wikipedia Neutrino Oscillation címszava alatt lehet megtekinteni. Alkotója Meszéna Balázs, 2010-ben az ELTE fizika szakán BSc záródolgozatként készítette ezt a szabadon használható programot e cikk szerzőjének témavezetésével. Eredményeiből tudományos folyóiratban publikált közlemény is készült.

hogy ebben a kísérletben a Napból induló elektron típusú neutrínó nem vészett el a Föld felé vezető útján, hanem több tízezer kilométeres átalakulási hosszal jellemzett oszcillációban első lépésben müon-típusúvá alakult, ami ezt követően tau-típusúba oszcillál. Így alakul ki az 1/3:1/3:1/3 arány közöttük. Ezt a mérést egy közelmúltbeli cikkemben (még a Nobel-díj odaítélése előtt) ismertettem², ezért most csak a másik Nobel-díjjal jutalmazott kísérlet bemutatására korlátozodom, amellyel a Superkamiokande elnevezésű mérési együttműködés A. Kajita professzor vezetésével a Föld légkörében keletkező müon típusú neutrínóknak átalakulási adatait derítette ki.

A kozmikus sugárzás protonjai minden irányból egyenletesen érik a földi atmoszféra tetejét. A légköri molekulák

cillációs hossza több tízezer kilométer, akár 20 km magasból közvetlenül, akár közel 13000 km távolságból, a Föld áttelene pontjáról érkeznek, az ő oszcillációjuknak nincs hatása. Azonban a müon-neutrínók esetleg rövidebb, a Föld átmérőjével azonos nagyságrendbe eső oszcillációs hosszal tudnak oszcillálni. Még mindig két eset van. Az elektron neutrínókba való átalakulást kizárta az a körülmény, hogy az elektron-neutrínók minden irányból azonos és az eredeti reakcióból várt fluxust mutatták. Maradt az a következtetés, hogy a müon-neutrínók árama azért csökken, mert a harmadik fajta, a tau-neutrínóba tudnak átalakulni. A csökkenés mértéke függ attól, hogy a földgömbön átvezető út milyen hosszú. A függőleges irányhoz mért szögtől a kétfajta neutrínó fluxusának hányadosa a koszinusz függvényt követve kell függjön. Ezt a várakozást a különböző energiatartományokban végzett észlelés megerősítette.

² Patkós András: *Létezhet-e anyag fény nélkül?*, Természet Világa 2015. évi II. különszám.

A léggöri neutrínók fluxusában bekövetkező oszcillációnak az ún. eltűnési jelenséggel 1998-ban történt kimutatását ismerték el Nobel-díjjal, de csak az után, hogy további kísérletekkel sikerült kimutatni néhány tau-neutrínót, amelybe az oszcilláció történt.

A neutrínó-oszcilláció kimutatása földi laboratóriumban

Az atmoszferikus neutrínók áramának változási hossza 1 GeV-os energiatartományban kb. 500 km. Ez a felismerés lehetőséget ad arra, hogy a müon-neutrínók tau-neutrínókba történő átalakulását tisztán földi forrású neutrínóárammal is kimutassák. Elsőként 2006-ban a japán kutatók közölték eredményt a pion bomlásából keletkező neutrínóknak a Superkamiokande detektor irányába küldött nyalábjának gyengüléséről. A nyalábot Japán Nemzeti Gyorsítóközpontjából (KEK) indították 250 km-es útjára (4. ábra). A léggöri neutrínók mérésénél alkalmazott technikával mérték meg a müon-neutrínók áramának gyengülését, amelyet összhangban találtak a léggöri mérések eredményeire épülő előrejelzésekkel. Nagyjából egyidejűleg tették közzé a Fermi Nemzeti Laboratóriumból (Chicago közelében) 735 km-es útra indított nyalábbal egy Minnesota állam-beli bányában végzett mérések egybevágó eredményét. Megemlítjük még, hogy 2012 és 2014 között a Superkamiokande detektor hatásos térfogatánál jóval nagyobb vízmennyiséggel dolgozó tenger-alatti ANTARES neutrínó-teleszkóp és a Déli-sarkvidék jegét detektoranyagként használó IceCube detektor is reprodukálta Kajita és munkatársai 1998-ban bejelentett eredményét.

Az eltűnési jellegű effektusok helyett az átoszcillálásból létrejövő más típusú neutrínókkal indukált reakciók kimutatására az elmúlt 3–4 évben került sor. Először a müon-neutrínó oszcillációja során kis eséllyel megjelenő elektron-típusú neutrínók kimutatása sikerült 2011-ben a japán kutatóknak. A detektálás eszköze a Superkamiokande obszervatórium volt, ahol az elektron-neutrínók kimutatásának biztos alapjai vannak. Csak éppen az oszcillációból sokkal kisebb gyakorisággal jönnek, mint a Napból. A Cserenkov-hatás irányfüggése alapján azonban biztonságosan el lehetett különíteni a tsukubai laboratórium felől érkező nyaláb okozta eseményt. A nagyobb eséllyel keletkező tau-neutrínók kimutatására új technikára volt szükség. A Róma közelében lévő Gran Sasso hegy-ség mélyén felépített OPERA-detektor tudta kimutatni a tau-neutrínók megjele-



4. ábra. A japán nemzeti laboratórium proton szinkrotron gyorsítójával előállított pionnyaláb bomlásából keletkező müonok közeli detektorbeli észlelése ad információt az induló müon-neutrínó nyaláb intenzitásáról. A Superkamiokande detektorban indukált reakciók az abból oszcillációval létrejövő elektron-neutrínókat mutatták ki

nését a CERN-ből 732 km-es út megtétele után érkező nyaláb által indukált reakciókat elemezve. A mérés nehézségét jól mutatja, hogy a csoportnak 2011-től 2015 nyaráig összesen 5 tau-részecskét sikerült meggyőzően azonosítani.³

A Földön kiépült számos neutrínóteleszkóp és a gyorsítócentrumok együttműködése szilárdan megerősítette a neutrínó-oszcilláció tényét. A fizikai Nobel-díj odaítélése jelzi, hogy a Standard Modell részleteinek ellenőrzése mellett immár a Standard Modellen túli fizika felé fordul a részecskefizikai kutatás. A neutrínók kis tömegkülönbségeinek meggyőző kimutatása után nyilvánvaló feladat legalább egyikük tömegének kísérleti meghatározása. Erre a leginkább előrehaladott kísérletek a béta-bomlásban keletkező elektronok energia szerinti eloszlásának nagy pontosságú megmérést tűzték ki céljuknak.

Túl a Nobel-díjon: Bruno Pontecorvo, a neutrínók fizikájának „atyamestere”

2014-ben Olaszországban és Oroszországban azonos tisztelettel ünnepelték Bruno Pontecorvo centenáriumát. Enrico Fermi legfiatalabb munkatársa, az 1930-as évek közepén a lassú neutro-

3 Ez a kísérleti csoport, mintegy mellékesen, megkísérelte megmérni a neutrínók haladási sebességét (a nem átváltozott müon-neutrínók nagyobb gyakoriságú észlelését használva). Elsietett hibás közleményük a fénynél gyorsabban haladó neutrínókról nagyban nehezítette eredeti feladatukban elért eredményük elfogadtatását.

nokon végzett kísérletekben fő segítője, Mussolini rendszere elől 1936-ban Párizsba menekült és csatlakozott az Irène Curie és Frédéric Joliot vezetésével végzett magfizikai vizsgálatokhoz. A csoport kísérletileg igazolta a gyenge kölcsönhatások Fermi-féle elméleteinek (1934) helyességét. A nációk elől menekülve jutott az Egyesült Államokba, ám ott nem vehetett részt a katonai kutatásokban, feltételezhetően a Curie és Joliot hatására vallott kommunista meggyőződése miatt. 1943-tól 1948-ig Kanadában dolgozott a brit nukleáris programhoz kapcsolódó kutatásokon, de nem volt közvetlen köze a fegyverkutatásokhoz. Ebben az időszakban dolgozta ki nagy fantáziával a neutrínó kimutatására vonatkozó elképzeléseit, amelyeket korábban már felsoroltunk. 1948-50 között Angliában dolgozott a brit atom-programban.


1950-es eltűnését, majd felbukkanását a Szovjetunióban időről időre összekapcsolják atomtitkok átadásával, amire azonban nem merült fel konkrét bizonyíték, sem korábban, sem halálát követően. 1955-től a dubnai Egyesített Atomkutató Intézet munkatársa volt, ahol elsősorban a leptonokra érvényes megmaradási törvények természetével foglalkozott. A többféle neutrínó létezésének bizonyítása és a neutrínó-oszcilláció lehetőségének felvetése fűződik munkássága ezen szakaszához. Az internetes életrajzok szerint a Szovjetuniót először 1978-ban hagyhatta el. Ez az erősen pontatlan adat valószínűleg szülőhazájába tett első visszalátogatásának dátumát jelöli. 1993-ban bekövetkezett halálát követően hamvait megosztották Róma és Dubna temetője között.



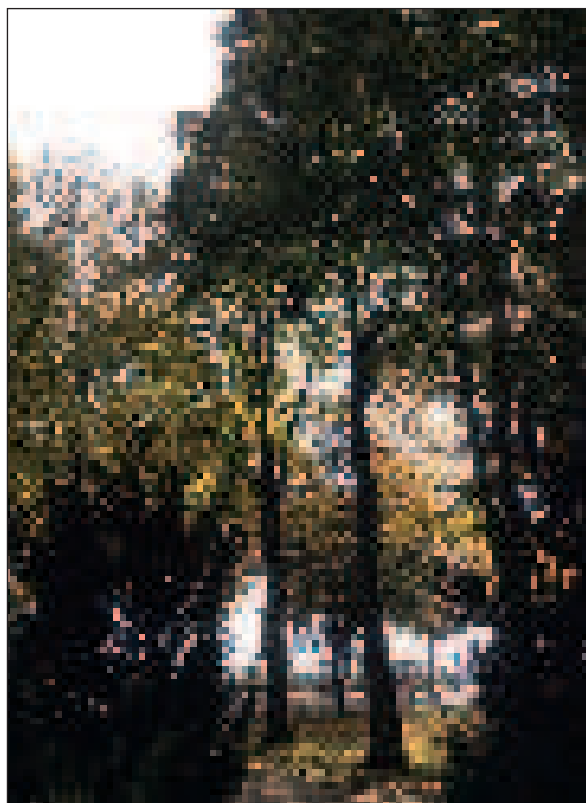
5. ábra. A neutrínófizika első világkonferenciája résztvevőinek csoportképe. Az ülő sorban balról jobbra: T. D. Lee (Nobel-díj 1958), L. Radicati, R. P. Feynman (Nobel-díj, 1965), B. Pontecorvo, Marx György, V. Weisskopf, F. Reines (Nobel-díj, 1995), C. Cowan és P. Budini

Pontecorvo éppen Magyarországon rendezett tudományos események személyes résztvevőjeként és főszereplőjeként igen jelentős szerepe volt már az 1970-es évek elejétől a neutrínófizika nagy korszakának kibontakozásában. Az első neutrínófizikai világkonferencián, 1972-ben Balatonfüreden (**5. ábra**) F. Reines, J. Bahcall és R. Davis társaságában elemzte a napneutrínók detektálásában mutató hiány lehetséges okait. Óvatosan, de egyértelműen képviselte a magyarázatok között az oszcillációs mechanizmus lehetőségét. Tekintélyét jól mutatja, hogy a balatonfüredi Tagore sétány Nobel-díjas fasorán az első két fa elültetésére Richard Feynman és Pontecorvót kérte fel a konferenciát szervező Marx György⁴ (**6. ábra**). 1975-ben újból ott volt Balatonfüreden a Neutrínó'75 konferencián, majd 1977-ben Budapesten az Európai Fizikai Társaság Nemzetközi Nagyenergiás Fizikai Konferenciáján plenáris előadást tartott a neutrínó-oszcilláció elméletéről és létezésének kísérleti kimutatását kínáló asztrofizikai lehetősé-

gekről. Pontecorvónak és Jakov Zeldovicsnak kétségtelenül döntő szerepe volt abban, hogy Marx György és Szalay Sándor minden előítélet nélkül vizsgálták ebben az időszakban a tömeges neutrínók lehetséges kozmológiai szerepét.

A 2015. évi Nobel-díjjal Pontecorvo negyedik neutrínófizikai javaslata is elnyerte a legmagasabb tudományos elismerést. Amikor 2038-ban nyilvánosak lesznek az 1988-as Nobel-díj odaítélésének körülményei, megtudhatja majd a tudományos közösség, miért nem lehetett a jutalmazottak között. Am minden fizikus számára magától értetődő, hogy a tudománytörténet neutrínó-fejezetében Wolfgang Pauli és Enrico Fermi mellett Bruno Pontecorvo neve a többi Nobel-díjast megelőzve áll az alapvető felismerések szerzői listáján. 

6. ábra. Feynman és Pontecorvo 1972-ben ültetett „ikerfái” Balatonfüreden, a Tagore sétány tudósfasorában



⁴ Fiatal mozarajongó konferencia asszisztensként a faültetési rituálénál izgalmasabbnak találtam, hogy Marx Györgynek Nemeskürty Istvánhoz fűződő kapcsolata révén Pontecorvót egy napon autóval felfuvarozták Budapestre a filmgyárba, ahol levetítették neki öccse, Gillo világsikerű filmjét, az Algíri csatát.