

ÚJ ROVAT A FIZIKAI SZEMLÉBEN: »ATOMOKTÓL A CSILLAGOKIG«

Vitathatatlan tény, hogy a fizika felfedezései nélkül sokkal szegényebb lenne civilizációnk: nem lenne villany, távközlés, számítógép, repülés, műhold, internet, bankkártya, tomográfia és még rengeteg más, napjainkban megszokott berendezés és eljárás. Mégis, a fizika iránti társadalmi érdeklődés az utóbbi évtizedekben jelentősen csökkent. A jelenség érinti a természettudományi és mérnöki felsőoktatás egészét: az Eurostat 2003-as adata szerint a 20–29 éves korosztályban az ilyen képzésben diplomát szerzők száma Magyarországon 4,8 fő ezer lakosonként, míg az EU 25 tagállamában az átlag 12,2. Ezzel a számmal Magyarország az utolsó helyet foglalta el az Európai Unióban. Ha ez így marad, akkor valószínűleg le kell mondanunk a fejlett országokhoz való felzárkózásról.

Az okok széleskörűek, nem orvosolhatóak könnyen és gyorsan, de biztosan szerepe van a középiskolai fizikaoktatás mennyiségi, és sajnos – persze fontos kivételektől eltekintve – minőségi hanyatlásának is. E problémát felismerve határoztuk el az Eötvös Loránd Tudományegyetem Fizikai Intézetében egy elsősorban, de nem kizárólag, középiskolásoknak szóló, ingyenes ismeretterjesztő előadássorozat beindítását 2005 decemberében. A sorozat megszervezéséért és lebonyolításáért elsősorban *Cserti Józsefet* illeti köszönet, de sokan segítettek mind oktatóink, mind pedig hallgatóink közül is. Az előadásokon az ELTE Fizikai Intézetének munkatársai általában a modern fizikai kutatások általuk is művelt, rendkívül szerteágazó területeit mutatták és mutatják be közérthető módon. Az előadássorozatnak az *Atomoktól a csillagokig* címet adtuk, hogy érzékeltessük a fizika sokszínűségét. Az előadásokon érintett témák mostanra még ezeket a tág határokat is szétfeszítették. Az előadássorozat folyamatosan frissített honlapján (www.atomcsill.elte.hu) az elhangzott és a tervezett előadások előadói, témái megtekinthetők, sőt, minden megtartott előadás anyaga letölthető módon fenn van az interneten, és a legtöbb előadás videofelvétele is letölthető.

Minden tőlünk telhetőt megtettünk, hogy az előadások híre eljusson a „címzettekhez”, a középiskolásokhoz. Az érdeklődés, legnagyobb örömeinkre, felülmúlta várakozásainkat, nemegyszer a 160 ülőhelyes Eötvös-

terem lépcsői is megteltek. Az előadások sorozata immáron a negyedik félévben, jelenleg is, tart, túl a 25. előadáson, és eddig még nem ismétlődött téma. Néhány esetben az ELTE más intézményeinek munkatársait is felkértük előadásra például a csillagászat, föld- és környezettudomány területéről, hiszen a fizika alapképzésen diplomát szerzők számára az ELTE-n ezeken a mesterszakokon is nyitva áll a továbbtanulás lehetősége. Az előadások után a Csodák Palotája munkatársai látványos és érdekes kísérleti bemutatókat tartanak, amelyek ugyancsak rendkívül népszerűek a hallgatóság körében. Az előadás-sorozatot természetesen folytatjuk a következő tanévben is, az előzetes program már olvasható a honlapon.

Nagy örömeinkre szolgál, és úgy gondolom, hogy az előadások elismerését jelenti, hogy két folyóirat, a *Természet Világa* és a *Fizikai Szemle* szerkesztői is felajánlották, hogy lapjukban az előadók nyomtatásban is közöljék előadásuk anyagát. A cikkeket e két folyóirat között nagyjából fele-fele arányban osztjuk meg,

ami azért is kedvező, mert így az előadások nyomtatott változata rövidebb idő alatt juthat el az érdeklődőkhöz. Ugyanakkor a két folyóirat sajátosságait igyekeztünk a cikkek elhelyezésénél tartalmilag és az írások stílusában is figyelembe venni. Reményeink szerint a nyomtatásban megjelenő változatok, esetleg kiegészítve a sorozat honlapján található anyagokkal, még érthetőbbé és elérhetőbbé teszik minden érdeklődő számára a bemutatott területeket. A hozzáférhetőséget különösen fontosnak tartjuk, hiszen az előadásokra földrajzi vagy időpont-egyeztetési nehézségek miatt nem juthat el minden érdeklődő. (Az ilyen nehézségek leküzdésére ezúton is felajánljuk, hogy az érdeklődő középiskolák meghívására munkatársaink bárhova szívesen ellátogatnak előadást tartani.)

A fenti gondolatokkal örömmel bocsátom útjára az előadássorozat címét átvevő cikksorozatot a *Fizikai Szemlében*, minden olvasónak hasznos és kellemes időöltést kívánva a cikkek tanulmányozásához. Minden kérdést, észrevételt, javaslatot szívesen fogadunk, és nem hagyjuk válasz nélkül.

Lendvai János
ELTE Fizikai Intézet



Hosszú évek tapasztalata, hogy a fizika felsőfokú tanulását választó középiskolások első számú ösztönzői a csillagos éghez kapcsolódó jelenségek és azok megfigyelésének egyre gazdagodó eszköztára. Az Univerzumról szerzett ismereteink jórészt elektromágneses hullámok észlelése révén bővülnek. A rádióhullámoktól az infravörösön és a látható spektrumon át a röntgen- és gamma-sugárzás tartományáig a földi és a légkörön kívüli megfigyelések sokasága ad rendszeres képet a Világegyetemben állandósultan jelenlévő sugárzásokról, csakúgy, mint a néhány hetes vagy hónapos fénygörbével jellemezhető, óriási energiát felszabadító robbanásszerű jelenségekről.

Ebben az előadásban a *nem-elektromágneses* sugárzás két fajtáját mutatom be. Az alapvető ismeretek összefoglalásán túl az is célom, hogy a hallgatóság megismerhesse az Eötvös Egyetem Fizikai Intézetének folyamatos szerepét e kutatások élvonalában. A két jelenségkör, amellyel foglalkozni kívánok: a kozmikus sugárzás és a természetes eredetű neutrínósugárzás.

A kozmikus sugárzás

1912-ben *V.F. Hess* osztrák–amerikai fizikus 5000 méter magasra emelkedő léggömbjén a sztatikus elektromossággal feltöltött elektroszkópok kisülésének sebességét vizsgálta (1. ábra). A lamellák töltésvesztését a levegőben lévő szabad töltéshordozók előfordulási gyakorisága határozza meg. Azt tapasztalta, hogy a magasság növekedésével e töltéshordozók sűrűsége nőtt. Következtetése szerint a levegő alkotórészeit a Földet kívülről érő „nagy áthatolóképeségű sugárzás” ionizálja.

A kozmikus sugárzás Nobel-díjjal jutalmazott megfigyelését követően e sugárzás összetevőinek vizsgálata az elemi részek korai történetének legfontosabb felfedezéseire vezetett. 1932-ben *C. Anderson* a sugárzás ködkamrás megfigyelése során felfedezte az elektron antirészecskéjét, a *Dirac* által alig valamivel korábban megjósolt pozitront. 1937-ben ugyanő *S. Neddermayer*-ral kimutatta a „nehéz elektron”, azaz a müon létét is (az akkori kevésbé következetes névadási szokások miatt kezdetben mü-mezonként emlegették, de már a negyvenes években kiderült, hogy az erősen is kölcsönható mezonokhoz e részecskének semmi köze).

A kozmikus sugárzás vizsgálatában a Hess-t követő legnagyobb jelentőségű felfedezést *Pierre Auger* tette 1938-ban. Ő értette meg, hogy a kozmikus sugárzás bejövő részecskéi óriási energiájukat nem egyetlen ütközésben, hanem ütközések sorozatában veszítik el. Mind-egyik ütközésben a légkör atomjainak nagy energiát adnak át, amelyet a létrejött ionok további, lavinaszerű

ütközéssorozatban részecskék ezreinek terítenek szét. Így jönnek létre a sok négyzetkilométernyi területet befedő kozmikus záporok. A jelenséget Auger-vel egyidőben felismerte egy Manchesterben pályáját kezdő fiatal, emigráns családban felnövekedett magyar fizikus, *János Lajos* is, aki a II. világháború után hazatelepítette a kozmikus sugárzások kutatását, és az ELTE Atomfizikai Tanszékének alapító vezetője volt. Az ő közleménye a méréseknek a matematikai statisztika törvényeit kielégítő gondos értékelése miatt néhány hét késéssel jelent meg. A tudománytörténet így is „kötelezően” említi őt a kozmikus sugárzás szisztematikus vizsgálata első nagy egyéniségei között, a manchesteri laboratóriumában készült fénykép nem hiányzik az ottani egyetem fizikai intézetének fényképgalériájából.

Az egyre nagyobb kiterjedésű detektormezőkön egymással összefüggésben (koincidenciában) észlelt részecskék energiáinak összességéből rekonstruálható a záport indító részecske energiája. A végső részecskék energiáját a víztartályokbeli ütközésük során meglökött töltött részecskék Cserenkov-sugárzásának elemzéséből lehet megmérni, amivel még a bejövő részecske érkezési irányára is következtetni lehet. A sok évtizedes, egyre tökéletesedő észlelési technikát használó kutatás eredménye az, hogy mindig találtak egy előzetesen elképzelt többszöröse határenergiát meghaladó energiájú elsődleges részecskét, bár az energia növekedésével egyre csökkent előfordulási gyakoriságuk. Így 1991-ben a Utah állambeli (Egyesült Államok) Fly's Eye (összetett légy szemre emlékeztető struktúrájú) detektorral (2. ábra) 10^{19} eV összenergiájú záport észleltek. Összehasonlításul: 2007 őszén kezd meg működését a mindaddig legnagyobb energiá-

1. ábra. *V.F. Hess* (középen) léghajójával, amelyen a Föld magaslégkörében jelenlévő ionizáló sugárzást felfedezte.



Az ELTE Fizikai Intézet *Atomtól a csillagokig* előadássorozatán 2006. februárban tartott előadás írott változata.



2. ábra. A Légyszem (Fly's Eye) kozmikus sugárzási detektortelep. A jól megkülönböztethető tartályokban haladó töltött részecskék keltette Cserenkov-sugárzás révén mérik a zápor részecskéinek sebességét, amelyből számított mozgási energia segítségével számolják vissza a záport indító kozmikus részecske energiáját.

jú földi részecskegyorsító, a Nagy Hadron Ütköztető (LHC) Genfben, amellyel 100 TeV-es (10^{14} eV-os) protonokat állítanak majd elő. A 1990-es évtized elején angliai és japán kutatók 10^{21} eV-ot meghaladó energiájú zápor-események méréséről is beszámoltak.

Elfogadhatóak-e ezek a felfedezések? Nincs-e mégis valamilyen felső korlát a kozmikus sugárzás részecskéinek energiájára? Az egyik válaszlehetőséget a kozmikus sugárzás forrásainak számbavétele jelentheti. Ezekre vonatkozóan azonban nincs világos, megfigyelésekkel egyértelműen alátámasztott elképzelés. A legbiztosabbnak tekinthető *E. Fermi* 1950-ben tett gyorsítási javaslata, amely a felrobbanó csillagokból kiáramló és lökeshullámot képező plazmából történő energiaátadást feltételez. Lökeshullámok világos nyomát többször sikerült lefényképezni szupernóva maradványok áramlását követve. Egy másik, nagy energiatartalmú forrás az aktív galaxismagokból (AGN) sugárszerűen kiáramló anyag lehet. A legnagyobb energiakibocsátással (10^{53} J) járó, robbanásszerű eseményeket, a gamma-kitöréseket kísérő részecskeáram megértése kezdeti lépéseinél tart.

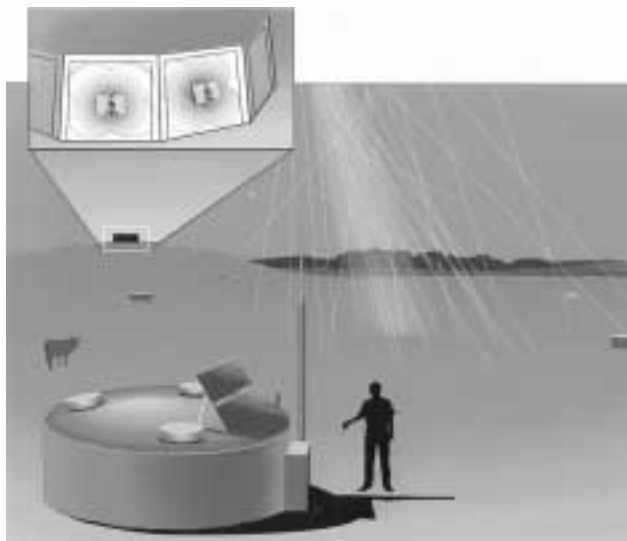
Biztosabb kép alakult ki a kozmoszon átszáguldó részecskék energiájának változásáról az út során bekövetkező kölcsönhatások okán. A Világegyetemet a korai forró korszakban elemi részecskék sokasága töltötte meg. A forró Univerzumban ezek reverzibilis részecskereakcióival állandósult a sűrűségük, amely egyensúlyi koncentráció a tágulás során a reakció-egyensúly eltolódása miatt csökkent, majd a reakciók egyirányúvá válását követően az instabil részecskék elbomlásával egyensúlyi koncentrációjuk a zérushoz került közel. Mára a stabil részecskék egyre kisebb átlagenergiájú gáza vesz körül bennünket, közülük is elsősorban a fotonoké és a neutrínóké.

A hideg kozmikus fotongáz létét a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzással 1965-ben kimutatták, a neutrínógáz létének bizonyítása még előttünk álló feladat. Már 1966-ban, egymástól függetlenül az USA-beli *Greisen*, valamint a szovjet *Zatsepin* és *Kuzmin* rámutattak arra, hogy egy 10^{20} eV-ot meghaladó energiájú kozmikus sugárzásbeli protonnak a háttérsugárzás tipi-

kus fotonjával való ütközése akkora összenergiának felel meg, amely meghaladja a pion nyugalmi energiáját, tehát ezen energia fölötti kozmikus sugárzás részecskéi energiát veszítenek pionok fotoprodukciónál ($p + \gamma \rightarrow p + \pi^0$). Kiszámolták, hogy e folyamat szabad úthossza, azaz az a távolság, amelynek megtétele során legalább egy reakció várhatóan bekövetkezik, nagyjából 50 Mpc (150–160 millió fényév). Ha tehát a sugárzás forrása ennél távolabb van, akkor földi obszervatóriumokban nem szabad 10^{20} eV-nál nagyobb energiájú eseményeket regisztrálni. A kilencvenes években észlelt tucatnyi nagyobb energiájú esemény nem hozható kapcsolatba semmilyen, e távolságon belüli szupernóva-robbanással vagy kozmikus katasztrófával.

Rejtély tehát, hogyan keletkezhetnek ilyen óriási energiájú záporok a földi légkörben. Vizsgálatának elméleti útja sok feltételezett mechanizmusra mutatott rá. Itt az 1990-es évek második felében nagy figyelmet kapott magyar javaslatot említtem meg, amelyet *Fodor Zoltán* és *Katz Sándor* az ELTE Fizikai Intézet Elméleti Fizikai Intézetének munkatársai *Andreas Ringwald* hamburgi kutatóval együtt dolgoztak ki. Ez a javaslat a kozmikus fotongáznál kissé hidegebb (kb. 1,96 K-es) kozmikus antineutrínó-gáz létén alapszik. Ezt ugyan még nem sikerült kísérletileg láthatóvá tenni (szemben a mikrohullámú háttérsugárzás kiemelkedően informatív eredményekre vezető tanulmányozásával), de létezésében abszolút biztosak a forró Univerzum történetének szakértői. Ugyanakkor neutrínók nagy intenzitással keletkeznek például a szupernóva-robbanások során is. Ezek a részecskék csak gyenge kölcsönhatásban vesznek részt, ezért energiájukat nem korlátozza a Greisen–Kuzmin–Zatsepin-határ. A Fodor–Katz–Ringwald-javaslat lényege, hogy a nagy energiájú kozmikus neutrínók a Föld közelében antirészecskékkel fuzionálhatnak (összeolvadhatnak) a gyenge kölcsönhatás erőterkvantumába, a Z-bozonba, amelynek óriási energiáját aztán bomlása olyan nagyenergiájú részecskékbe konvertálja, amelyek képesek kozmikus zápor indítására. Ennek a szép gondolati építménynek az elejéről hiányzik a neutrínók „gyorsítási” mechanizmusa, azaz arra a kérdésre a válasz, hogy mekkora lehet a kozmikus neutrínók maximális energiája? Ez jelenleg intenzíven kutatott asztro-részecskefizikai kérdéskör.

A fenti és egy-két hasonló magyarázatot adó elméleti mechanizmus mellett nem zárható ki az a lehetőség sem, hogy az 1994-es japán mérés valamilyen, a berendezés energiaskálájának hitelesítésében előfordult hibát tükröz, és a Greisen–Kuzmin–Zatsepin határ mégis érvényesül. Erre a kételyre csak újabb, nagyobb energiájú záporok észlelésére alkalmas, a jelenleginél megbízhatóbban kalibrált mérések adhatnak választ. Ennek a feladatnak kíván megfelelni a 2005 óta működő Auger Kozmikus Sugárzás Obszervatórium. Argentínában, az Andok vörösbortermő lábainál, Mendoza városának környékére telepítették azt a Párizsénál nagyobb területet beborító detektorhálózatot, amely Cserenkov-detektorainak jelét egyesítve eldönthető lesz a 10^{20} eV-ot meghaladó összenergiájú záporok létezésének gyakorisága. A Cseren-



3. ábra. Plakátszerű ábrázolás az argentinai Pierre Auger Koszmikus Sugárzási Observatórium bemutatására. A Cserenkov-tartály mellett egy magaslat tetején kinagyítva ábrázolja az atmoszférára irányított fotodetektorokat, amelyek észlelik a záporbeli ütközésekkel gerjesztett légköri atomok, molekulák lumineszcens fénykibocsátását. A két észlelés megnövelt biztonsággal rekonstruálja a zápor kifejlődésének téridő-szerkezetét.

kov-detektorokból származó információt kiegészítik a légköri molekulák röntgenfluoreszcens sugárzását 15 km magassáig észlelni képes teleszkópok (3. ábra). Ezekkel a záporok légköri kifejlődését lehet nyomon követni, amivel a Cserenkov-detektorok közötti tartományban leérkező (tehát általuk nem észlelt) részecskék eloszlására kiegészítő információ kapható. A széles nemzetközi együttműködésben felépített és működtetett intézményhez az érdeklődő hazai asztrofizikusok *Mészáros Péterrel*, a Pennsylvania State University magyar–amerikai–argentín professzorával, az ELTE vendégprofesszorával végzett közös kutatómunka révén tudnak kapcsolódni.

4. ábra. A Sudbury Neutrino Observatory (Kanada) 1000 t nehézvízzel feltöltött tartálya, amelyben a Naphól érkező neutrínók bármely fajtája reakciót vált ki, így lehetőség van a teljes neutrínófluxus észlelésére.



Kozmikus neutrínók

A neutrínók létezésére az első közvetlen bizonyítékot *Cowan* és *Reines* adta 1956-ban, amikor a reaktorokban végbemenő béta-bomlási reakciókból feltételezett neutrínóáramot használva a láthatatlan nyalábbal fordított (inverz) béta-bomlást idéztek elő. Alig négy év múlva jelent meg az első cikk, amely sorbavette a természet lehetséges neutrínóforrásait. *Marx György* és *Menyhárd Nóra* német nyelven írott cikke a Csillagászati Kutató Intézet közleményei között jelent meg, ennek ellenére komoly figyelmet keltett. A *Science*-ben közzétett rövid változatára mint a neutrínócsillagászat első tudományos publikációjára szokás hivatkozni.

Marx és Menyhárd a következő neutrínóforrásokat jelölték meg:

- A Nap fúziós folyamatai.
- A kozmikus záporokban keletkező részecskék bomlástermékei.
- Szupernóva-robbanásoknak a neutroncsillagállapothoz vezető reakciói.
- A Föld anyaga radioaktív összetevőinek béta-bomlásai.
- A forró Univerzumban zajló gyenge kölcsönhatási folyamatokból visszamaradt kozmikus háttér.

Az elmúlt fél évszázadban a lista első négy helyén álló folyamatokat sikeresen megfigyelték, sőt segítségével alapvető információkat szereztek a neutrínók tulajdonságairól. Elsőként *R. Davis* követte nyomon egy uszodányi mennyiségű szén-tetraklorid klóratomjainak a neutrínósugárzás hatására bekövetkező átalakulását argonná. Első eredményeit 1964-ben tette közzé. Kísérletének a hetvenes évek elejére véglegesített tanulsága az volt, hogy a Napban zajló fúziós folyamatok *Hans Bethe* által javasolt modelljével számított gyakoriságnak harmadrészét észlelte. A sokféle értelmezési próbálkozás közül a *B. Pontecorvo* által már 1957-ben felvetett lehetőség bizonyult a helyes útnak: a különféle neutrínófajták egymásba alakulása miatt a Naphól induló fajta a Földre csökkentett intenzitással érkezik meg. A végső bizonyíték 2003-ban született meg, a kanadai Sudbury bányában 1000 köbméter nehézvíz felhasználásával végzett megfigyelések eredményeként (4. ábra). A deuteron nemcsak az eredeti neutrínófajtaival (az elektron-neutrínóval) lép reakcióba, hanem a nyalábban az átalakulás eredményeképpen megjelenő müon-neutrínókkal is. A két reakció összesített gyakorisága csodálatosan egyezik a Nap-modell alapján várt teljes áram által kiváltott reakciók várt számával.

A szupernóva-robbanás energiájának jelentős részét képviselő neutrínólökést 1987. február 23-án a japánbeli Kamioka hegység mélyére rejtett óriási víztartályt határoló Cserenkov-detektorok (*címkép*) jeleztek először. A Magellán-felhőben történt robbanás közelsége lehetővé tette a váratlan esemény különösebb felkészülés nélküli észlelését. A kísérlet vezetője *M. Koshiba* 2002-ben kapott *R. Davisszel* megosztva Nobel-díjat. Ezt követően a Kamiokande-kísérlet továbbfejlesztett változatával, a Szuperkamiokande-kísérlettel az atmoszférába belépő kozmikus sugárzás által keltett pio-

nok elbomlásából származó neutrínók tulajdonságait vizsgálták. A 2001-ben közzétett megfigyelések szerint a megfigyelt elektron-típusú és müon-típusú neutrínók aránya irányfüggő volt. A függést tökéletesen lehetett értelmezni a két fajta neutrínónak egymásba és egy harmadik fajta (a tau-típusú) neutrínóba történő átalakulásával, amelynek mértéke a keletkezés és az észlelés közötti távolság periodikus függvénye. Ezt a függvényt Pontecorvo és *Gribov* 1969-es elméletének finomításával úgy lehetett meghatározni, hogy a Föld levegőburkának különböző pontjaiból (tehát különböző távolságról) érkező neutrínók átváltozásának mértékét és a Napból érkező neutrínók átalakulását egyszerre tudták segítségével értelmezni.

Az átváltozási valószínűség így meghatározott távolságfüggését teljes mértékben földi forrásokkal is ellenőrizni kívánták. A Kamioka körzetében lévő 13 atomerőmű teljesítményére vonatkozóan a kísérleti csoportnak időben nagy pontosságú információt sikerült kapni. Ebből kiszámítható volt az erőművekben zajló hasadási folyamatokból származó induló elektron-antineutrínó áram. Az egyes erőművek távolságát ismerve a korábbi kísérletekben meghatározott függvényt arra használták, hogy a beérkező nyaláb átváltozás miatti gyengülését megjósolják. A 2005-ben közzétett eredmény gyönyörűen egyezett a várakozással (egy alább részletezendő kis korrekció erejéig, amelyre a kísérletezők előre készültek).

Az átváltozási jelenség (a neutrínóoszilláció) csak akkor lehetséges, ha a három fajta neutrínó közül legalább kettőnek nullától különbözik a tömege. Ez bizonyossá teszi, hogy a részecskefizika Standard Modelljén, amely az elemi részek közötti kölcsönhatásokat mindaddig tökéletesen látszott leírni, túl kell lépni! Eddig ez az egyetlen kísérleti utalás új fizikai törvények szükségességére. (Elméleti utalás sok van, de nem mind ennyire közvetlenül értelmezhető, mondhatnánk, hogy nem ennyire közérthető.)

A negyedik forrás figyelembevételének szükségessége éppen a neutrínóoszillációk tisztán földi kísérletben történő kimutatásakor vált elkerülhetetlenné. Ugyanis a reaktorok mellett van egy elkerülhetetlen, 14. neutrínóforrás, a Kamioka hegység anyagában, valamint a Japán tenger üledékes aljzatában található radioaktív izotópok (^{232}Th , ^{238}U , ^{40}K) bomlásából származó antineutrínók. Ez a mennyiség intenzitásában sokkal kisebb a Nap-neutrínókéénál, de szerencsére a Napból az ő antirészecskéik árama érkezik, amely más reakciókat képes kiváltani, ezért megkülönböztethető. A Szuperkamiokande-kísérlet előkészítői két klasszikus munkára támaszkodtak, amikor megbecsülték ezt a természetes háttérrel. Az egyik *G. Eder* 1966-os cikke, a másik Marx György 1969-ben írott cikke. Az Ederék által tartott konferencia-prezentációk fóliáiból egyértelműen látszik, hogy ismerték Marx és Menyhárd 1960-as *Science*-beli cikkét, sőt megjegyzik, hogy az általuk adott intenzitásbecslés nagyságrendileg jól egyezik a mai számításokkal.

Az említett izotópok bomlásaiból meghatározott energiatarományokban összesen 4 többletneutrínó

észlelését várták, ami pontosan be is következett. Ezzel először sikerült kimutatni a földi kőzetből származó neutrínókat. Ezt az eredményt a *Nature* magazin a 2005. év 25 legfontosabb fizikai eredménye közé sorolta (korábban címlapján hozta a jelenség kimutatásának híretét).

Ahogy 1987. február 23. a neutrínócsillagászat születésnapja, ugyanúgy tekinthető 2005. május 25. a neutrínó-geofizika kezdő dátumának. Bár egyelőre a tudományos álmódosítások közé sorolható, mégis komoly lehetőség a radioaktív elemek földi eloszlásának neutrínósugárzásuk révén történő megállapítása, amelynek a földkéreg kialakulását leíró modellek értékelése szempontjából fontos szerepe lehet. Még fontosabb a Föld hőháztartása szempontjából annak megértése, hogy a körülbelül 40 TW-nyi teljesítmény milyen jellegű energiából származik. Nem becsülhető le a Föld ma is változó anyageloszlásában felhalmozott rugalmas energia, de sokaknak az a véleménye, hogy a hőteljesítmény szinte teljes mértékben radioaktív eredetű.

A kozmológiai háttér neutrínógázának kimutatása maradt az egyetlen hátralévő felfedezési feladat. Az említett Fodor–Katz–Ringwald folyamat kimutatására vagy megcáfolására a Hold talajának lumineszcens sugárzását igyekeznek megfigyelni, amelyet az oda becsapódó Z-részecskék okozhatnak. *Zeldovics* és *Gerstein* már a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás felfedezésének másnapján felvetették, hogy elegendően nagy tömeggel rendelkező neutrínók jelentős mértékben részesedhetnek az Univerzum átlagos energiasűrűségéből. Marx és *Szalay* az 1970-es évek elején vizsgálták meg, hogy mekkora tömeget enged meg az a tény, hogy az általunk megfigyelt kozmikus környezet nagyjából 13–14 milliárd éves és még jelenleg is tágul. A kapott érték (kb. 10 eV) a legújabb mérések tükrében túl nagy (a háttérsugárzás 2003 és 2006 közötti újabb megfigyelése a WMAP-misszióban a neutrínók össztömegére 0,3 eV-ot enged meg). Ennek ellenére a magyar kutatók közel negyven évvel ezelőtti becslése fontos mérföldkő volt a neutrínó tömegére vonatkozó elméleti és kísérleti kutatásokban. A legújabb becslések alapján a kozmikus neutrínók által ma hordozott energiasűrűség a teljes energiasűrűségnek körülbelül ezredrésze. Ez kozmológiai jelentőségét illetően túl kicsi, de nem felejthető el, hogy az Univerzum anyagának aktuálisan fényt kibocsátó hányada (a csillagok és a csillagközi gáz anyaga) ugyanebbe a nagyságrendbe esik.

A neutrínók asztrofizikájának legújabb kísérleti eszköze az Antarktiszon épül. A legnagyobb víztartályok térfogatát ezerszer meghaladó méretű Cserenkov-detektort építenek, amelynek anyaga a természetes állapotában meghagyott jég. Az Icecube kísérlet térfogata 1 km³. Ez a berendezés együttműködik majd a bányák, valamint a tengerek-tavak (Bajkál-tó, Földközi-tenger, Csendes-óceán) mélyére rejtett Cserenkov-detektorokkal. Hálózatuk együttes észlelései esetén komoly esély van arra, hogy nemcsak a Nap, de a nem túl távoli szupernóvák természetét is lehet majd neutrínócsillagászati eszközökkel tanulmányozni.