

1. Bevezető

A neutrínócsillagászat a neutrínóknak nevezett könnyű, töltésmentes elemi részecskék detektálásával foglalkozó megfigyelési tudományág. Szorosan kapcsolódik hozzá az asztro-részecskefizika, ami a nem földi körülmények között keletkező neutrínók elméleti leírását is adja. A neutrínók 1/2 spinűek, fermionok. Teljesül rájuk a Pauli-ely, miszerint két azonos részecske nem foglalhatja el ugyanazt a kvantumállapotot egy időben. A neutrínók leptonok is, kölcsönhatást nem közvetítő elemi részecskék. Három típusuk ismert: elektronneutrínó, müonneutrínó és tau-neutrínó – attól függően, hogy dominánsan melyik töltött leptonnal vesznek részt a gyenge kölcsönhatásban. A neutrínók csillagászati megfigyelésének fontosságát az adja, hogy ezek a könnyű elemi részecskék a négy alapvető természeti kölcsönhatásból a részecskék világában eddig nem jelentős gravitáción kívül csak a gyenge kölcsönhatásban vesznek részt. Emiatt az anyaggal és sugárzással szemben közömbösek, és a nem termális Univerzum olyan távoli szegleteiből is detektálhatók, amelyek jelenleg más csillagászati eszközökkel nem érhetők el.

Az asztrofizikai, azaz a földi légkörön túlról érkező neutrínók eredete és energiája alapján megkülönböztünk kozmikus neutrínóhatteret, sztelláris neutrínókat, kozmikus és kozmogenikus neutrínókat. A kozmikus háttér neutrínóit az ősrobbanásból, valamint az ősi szupernóva-robbanásokból származó, kb. tízezred eV-tól a megaelektronvoltos nagyságrendig terjedő energiatartományba eső neutrínók adják. A nagyságrendileg 1–100 MeV tartományba eső energiájú, főként termális eredetű, nukleáris folyamatokban keltett sztelláris neutrínók forrásai a csillagok – így a Napunk – és a robbanó szupernóvák. A 10 GeV és 10 PeV közötti energiájú, nem termális eredetű kozmikus neutrínók forrásai (ultra-)nagy energiájú kozmikus részecskegyorsítók, pl. aktív galaxisok, gamma-kitörések, csillagotó galaxisok. A 10 PeV-nél nagyobb energiájú kozmikus neutrínók az ultra-



Kun Emma 2012-ben szerzett csillagász diplomát, majd 2017-ben doktori fokozatot a Szegedi Tudományegyetemen. Junior Prima-díjas magyar tudomány kategóriában (2018). Jelenleg a Ruhr Egyetem Bochum munkatársa (Németország, 2022–), előbb a DFG, majd az Alexander von Humboldt Alapítvány ösztöndíjasaként. Tagja az IceCube Kollaborációnak (2020–). Fő kutatási területe az aktív galaxisok többszörös csillagászata és asztrofizikája.

nagy energiájú kozmikus sugarak és a kozmikus mikro-hullámú háttérsugárzás kölcsönhatásában jönnek létre. A kozmikus neutrínókról és asztrofizikai eredetükről az érdeklődő olvasó a *Fizikai Szemle* 2020. évi 11. lapszámában megjelent „Kozmikus neutrínók égen és Földön” című írásból tájékozódhat¹⁾. Habár neutrínók földi körülmények között is jönnek létre, e cikk a neutrínók csillagászati vonatkozásait tárgyalja.

2. Neutrínócsillagászat régen és ma

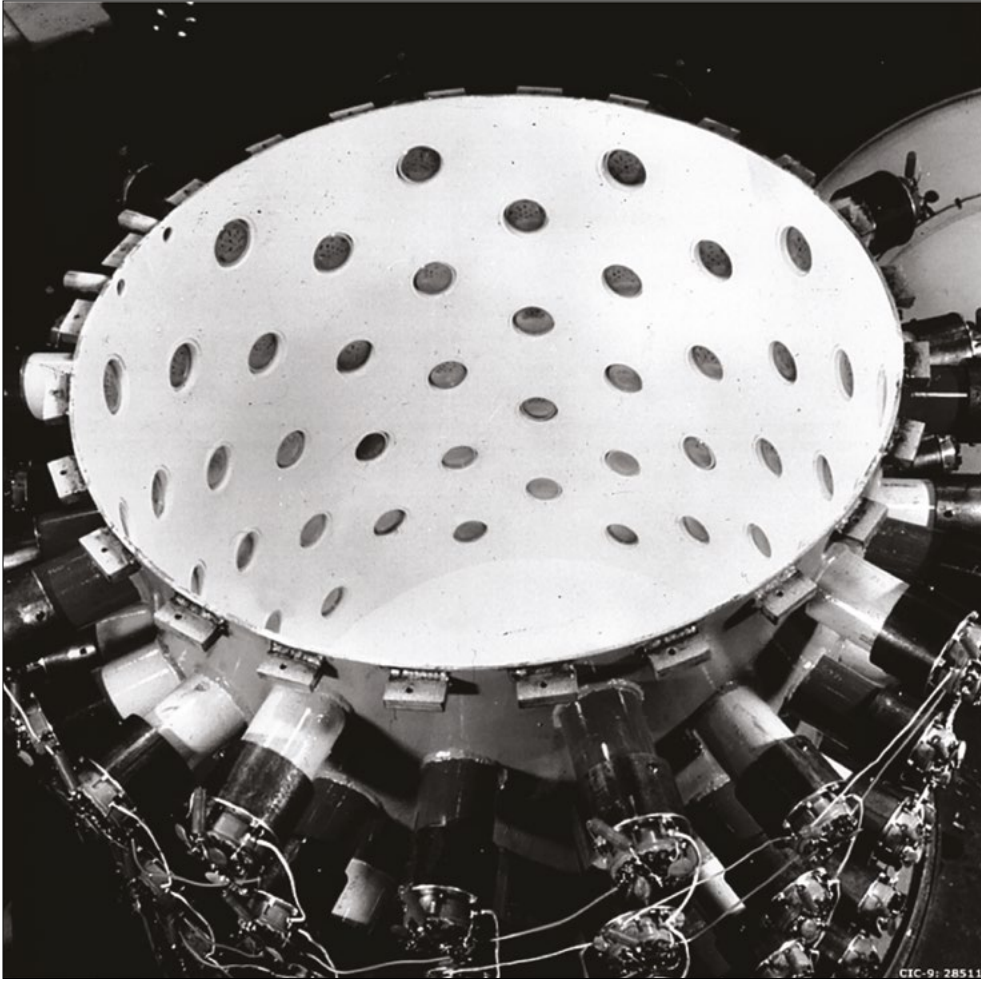
Az alábbiakban áttekintjük a neutrínócsillagászat kialakulásához vezető fontosabb lépéseket, válogatott neutrínócsillagászati problémákat és felfedezéseket.

2.1. A neutrínók első detektálása

A neutrínócsillagászat kialakulásához vezető egyik fontos felfedezés Victor Hess osztrák–amerikai fizikus nevéhez fűződik, aki 1911–1912-ben léggömbön elhelyezett műszerekkel különböző magasságokban részecske-sugárzást mérve megállapította, hogy az általa mért sugárzás forrása a világűrben van [1]. Nappali és éjjeli méréseket is végzett, sőt egy napfogyatkozás alkalmával is levegőbe emelkedett léggömbjével. Mivel a sugárzás erősségét ugyanazon magasságban függetlennek találta a Nap láthatóságától, következtetése szerint az általa mért, majd 1925-ben Robert Millikan által kozmikus sugárzásnak keresztelt, töltött részecskék forrását a Naprendszeren kívül kell keresni. Végül Werner Kolhörster német fizikus 1913–1914-ben érzékenyebb műszerekkel végzett ballonos kísérleteivel megerősítette Victor Hess hipotézisét. Hess felfedezése fizikai Nobel-díjat (1936) ért.

Ezután néhány éven belül kiderült, hogy a béta-bomlás látszólag az energiamegmaradás törvényét sértő módon megy végbe, mintha a bomlás során elveszne egy kis energia. 1930-ban Wolfgang Ernst Pauli osztrák–svájci fizikus ötlete²⁾ szerint a bomlás során egy addig nem ismert, könnyű elemi részecske keletkezik, ami elviszi a hiányzó energiát (ezt először „neutron”-nak nevezte, ami nem keverendő össze az atommag semleges alkotójával). Később ezt az idézőjeles „neutron”-t neutrínónak nevezték át.

A neutrínókat 1956-ban Clyde Cowan és Frederick Reines detektálták elsőként [2], mégpedig inverz béta-bomlás során, amikor is egy (antielektron-) neutrínó kölcsönhat egy, az atommagban lévő protonnal, egy neutront és egy pozitront létrehozva. Ezen másodlagos részecskék pályáját tervezték megfigyelni, ahogy va-



1. ábra. A neutrínók létezését kísérletileg igazoló, Clyde Cowan és Frederick Reines által használt első folyadék-szcintillátor Hanfordban. A kép közepén látható tartályban nehézvíz volt, az elektronneutrínókkal való kölcsönhatásban létrejövő fényimpulzusokat a tartályt körbevevő fotoelektron-sokszorozókkal mérték. *Forrás:* Regents of the University of California, Los Alamos National Laboratory, Amerikai Egyesült Államok

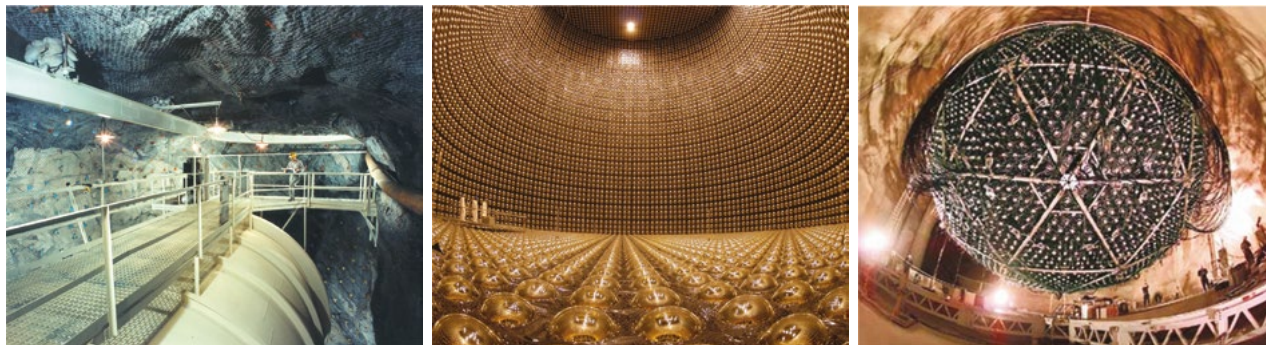
lamilyen detektoranyaggal (ez esetben a tartályokban levő vízzel) kölcsönhatva a pályájuk láthatóvá válik. A kísérlethez neutrínóforrást a Richlandhez közeli plutóniumgyártó Hanford Engineering Works nevű reaktor (Washington, USA) szolgáltatott. A neutrínók detektálásához fotoelektron-sokszorozókkal körbevett nehézvíz-szcintillátorokat építettek (1. ábra). A felfedezést végül a kozmikus részecskéktől jobban védett helyen, a Savannah River erőmű közelében Dél-Karolinában végzett méréssel erősítették meg. A több hónapos megfigyelés során 3 elektronneutrínó/óra gyakorisággal azonosították ezeket a könnyű elemi részecskéket. A neutrínók felfedezésével kapcsolatos kísérleteikért Reines 1995-ben Nobel-díjat kapott (Cowan 1974-ben elhunyt).

Habár elméleti jóslatok már voltak a többféle neutrínó létezésére, az 1960-as évek végéig a neutrínóknak csupán egyetlen típusát, az elektronneutrínó (és antirészecskéje) létezését sikerült kimutatni. Az újabb neutrínótípust (neutrínóíz) Leon Lederman, Melvin Schwartz, Jack Steinberger amerikai fizikusok a Brookhaven Nemzeti Laboratóriumban (New York, USA) végzett kísérleteik

során fedezték fel. A kutatók nagy energiájú protonnyalábot lőttek berillium célpontra, amely kölcsönhatásban keletkező nagy számú pion a másodperc törtrésze alatt müonokká és neutrínókká bomlott. A neonnal töltött szikrakamrába már csak az anyaggal nagyon ritkán kölcsönható neutrínók jutottak el, így sikerült a müonneutrínók pályáját kimérniük, és igazolni a neutrínók ezen ízének létezését [3]. Eredményeikért mindhárman Nobel-díjat kaptak 1988-ban. A neutrínók harmadik ismert típusát, a tau-neutrínót eddig nem sikerült csillagászati detektorokkal megfigyelni.

2.2. Atmoszferikus neutrínók detektálása

A kozmikus sugarak és a földi légkör kölcsönhatásában létrejövő, ún. atmoszferikus neutrínók felfedezésére sem kellett sokat várni: 1965-ben egymástól függetlenül két csoport is bejelentette az áttörést. A Frederick Reines által vezetett, ún. Case-Witwatersrand-Irvine (CWI) csoport az East Rand aranybányában (Dél-Afrika) folyadék-szcintillációs detektorral végzett mérései alapján [4], a



2. ábra. Balra: A Homestake kísérlet perklór-etilén tartálya. Forrás: U.S. Department of Energy, Amerikai Egyesült Államok. Középen: A Super-Kamiokande 39,3 m átmérőjű és 41,4 m magas Cserenkov-neutrínódetektor belülről. Jól látható a tartály falán elhelyezett fotoelektron-sokszorozók sokasága (összesen kb. 13000 darab). Forrás: Kamioka Observatory, Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo, Japán. Jobbra: A Sudbury Neutrino Observatory detektora. Forrás: Roy Kaltschmidt, Berkeley Lab, Amerikai Egyesült Államok

Bombay–Osaka–Durham (BOD) kollaboráció pedig két nagy területű szcintillációs számláló teleszkóppal a Kolar aranymezőn (India) végzett mérései alapján mutatta ki először atmoszferikus neutrínók fluxusát [5]. Habár a CWI csoport a BOD kollaborációhoz képest két hónappal hamarabb végezte a méréseket, utóbbiak hamarabb publikáltak, így formálisan övék volt az elsőbbség és a felfedezés dicsősége.

2.3. A napneutrínó-probléma

Az elméleti fizikai kutatások jóslatainak hatására a 20. század közepén nagy lendületet vett az asztrofizikai neutrínók kutatása, és nem is kellett sokat várni a földi atmoszférán túlról érkező neutrínók első detektálásának bejelentésére. Az eredmény Raymond Davis amerikai kémikus-fizikus és John N. Bahcall amerikai asztrofizikus által vezetett Homestake-kísérletben (Homestake aranybánya, Dél-Dakota, Amerikai Egyesült Államok) végzett méréseken alapul. A Davis által tervezett, 1965–1966-ban épített és 1967-től működő Homestake neutrínódetektor 1478 méteres mélységben 380 köbméter klórban gazdag perklór-etilént használt detektoranyagként a neutrínók detektálása céljából (2. ábra, balra). A Homestake-kísérlet az elektronneutrínókra volt érzékeny, a neutrínók perklór-etilénnel történő kölcsönhatásokor létrejövő argon mennyiségét mérve következtettek a beérkező neutrínófluxusra. 1968-as cikkükben arról is beszámoltak, hogy Davis kísérlete a Bahcall által a sztenberd napmodell alapján számolt napneutrínó-fluxus csupán harmadát mérte [6]. Először mérési vagy számolási hibára gyanakodtak, de igen hamar kiderült, hogy ezekkel minden rendben van, viszont a számolt és a mért napneutrínó-fluxus közötti különbség oka a természetben keresendő: ez az ún. napneutrínó-probléma [7]. A következő évtizedekben a probléma létezését számos detektor mérései alapján megerősítették (pl. Kamioka Observatórium, Sudbury Neutrínóobszervatórium).

Egy bő évtizeddel később, 1982–1983-ban megépült a KamiokaNDE-I, a Kosiba Maszatosi japán fizikus által

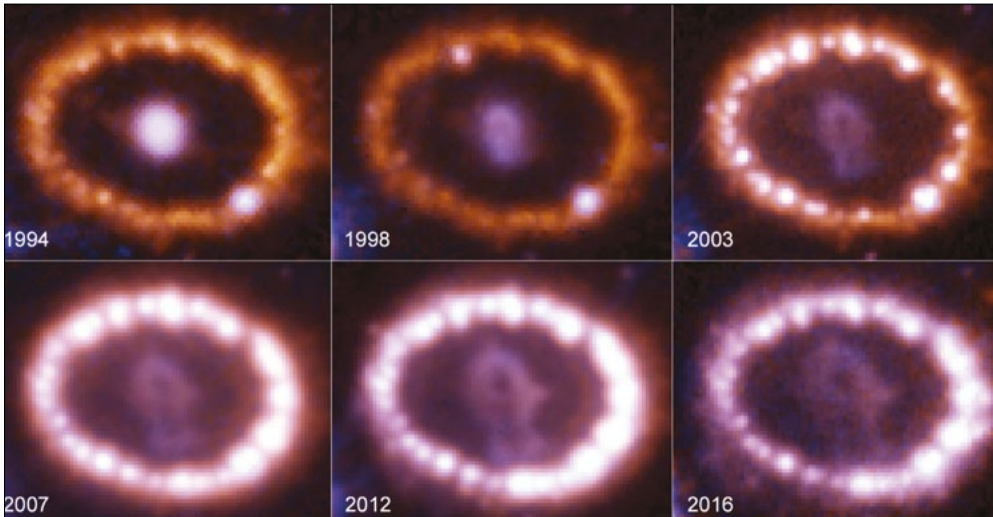
megálmodott és évtizedekig vezetett Kamioka Observatórium első kísérlete. Ez a neutrínódetektor vizes közegben Cserenkov-technikával működött. A KamiokaNDE-I és KamiokaNDE-II detektálásai alapján megerősítették a napneutrínó-problémát [8]. Davis és Kosiba neutrínókkal kapcsolatos felfedezései és munkája 2002-ben fizikai Nobel-díjat ért (Riccardo Giacconival megosztva). Habár az 1996-tól működő Super-Kamiokande (Kamioka-bánya, Hida város, Gifu, Japán, a 2. ábra, középen) adatgyűjtése alapján hamarabb, már 1998-ban publikálták a napneutrínó-oszcillációra vonatkozó sejtések megerősítését, a jelenség első teljesen világos, egyértelmű bizonyítékát a kanadai Sudbury Neutrino Observatory (2. ábra, jobbra) mérései alapján publikálták 2001-ben [9].

A neutrínóoszillációnak nevezett jelenség szerint a neutrínó háromféle típusa átalakulhat egymásba. A neutrínóoszilláció magyarázza meg a Napból származó elektronneutrínók mennyiségi deficitjét: a Nap–Föld-távolságot megtéve egész egyszerűen az elektronneutrínók kb. kétharmada müon- és tau-neutrínókká alakul, így az elektronneutrínókra érzékeny detektorok a számolt mennyiséghez képest csak annak a harmadát mérték. A neutrínóoszilláció jelenségének létezése egyébként azt is bizonyítja, hogy a neutrínók tömege nem nulla.

2.4. Sztelláris asztrofizikai neutrínók

Az 1950-es évek végén John Linsley amerikai és Livio Scarso olasz fizikusok 19 műanyag szcintillátor detektorból álló detektorhálózatot építettek Volcano Ranch-en (Albuquerque, Új-Mexikó, USA). 1962 februárjában egy 10^{20} eV energiájú kozmikus részecskét detektáltak, az első ultranagy energiájú kozmikus sugarat, ami sokáig abszolút rekord volt a megfigyelt energia tekintetében. Az ilyen nagy energiájú kozmikus sugarak kölcsönhatásában nagy energiájú neutrínók keletkeznek, ami tovább motiválta az asztrofizikai eredetű neutrínók keresését.

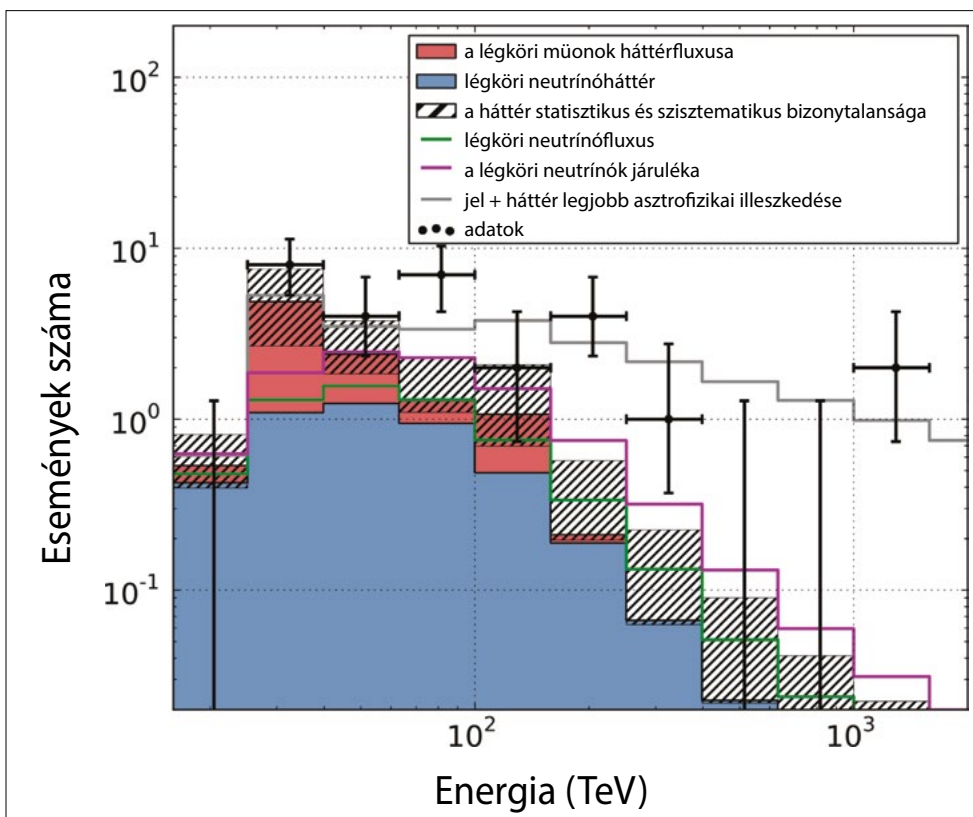
Az 1985 és 1990 között működött KamiokaNDE-II neutrínódetektorhoz köthető a neutrínócsillagászat



3. ábra. Az SN1987A jelű szupernóva táguló maradványa. Forrás: NASA, ESA és R. Kirshner (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Gordon és Betty Moore Foundation), valamint P. Challis (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics)

következő nagy mérföldköve, amiért Kosiba 2002-ben megosztott a fizikai Nobel-díjat kapott. Galaxisunk szomszédságában, kb. 160 000 fényévre tőlünk a Nagy Magellán-felhőben felrobbant egy szupernóva (SN1987A,

3. ábra). A KamiokaNDE-II 1987. február 23-án észlelte a robbanásból származó neutrínókat, egy nappal a szupernóva felfénylése előtt, ezzel lehetővé téve a szupernóva fénygörbéjén a felfényesedő szakasz kimérését. Ez volt az



4. ábra. Az IceCube közel két éves (662 napos) adatgyűjtéséből származó nagy energiájú neutrínók számolt és detektált gyakoriságának energiafüggése [16]. A pirossal és kékkel jelölt, valamint az átlósan satírozott részek az atmoszferikus háttér neutrínóinak járulékát mutatják, míg a szürkével határolt üres terület az atmoszferikus háttérneutrínókat és a kozmikus neutrínókat közösen tartalmazó modell jóslata. Jól látható, hogy a fekete, hibahatárokkal ellátott mérési pontok az utóbbi modellre illeszkednek, kb. 50 TeV felett egyértelmű a kozmikus neutrínók járuléka. (A légköri neutrínók járuléka vonatkozóan 90% a megbízhatósági szint.)

első alkalom, amikor a Naprendszer határain túlról érkező neutrínókat detektálták. Érdekes, hogy 22 évvel korábban, éppen február 23-án detektálta először a CWI kísérlet az atmoszferikus neutrínókat.

Az 1980-as évek elején egy másik asztrofizikai neutrínódetektor is megkezdte az adatgyűjtést. Az Irvine–Michigan–Brookhaven (IMB) nevű vizes Cserenkov-detektort 600 méterrel a föld alatt, a Morton Salt társaság Fairport nevű bányájában, az Erie-tó partján (USA) telepítették. Az építés 1979-től 1981-ig tartott, az első eredményekről 1982-ben számoltak be [10]. 1987-ben 8 neutrínót detektáltak a híres 1987A szupernóvaeseményből. Az IMB 1991-ig gyűjtött adatokat.

1969-ben Venjaminek Berezinszkij és Georgij T. Zacepin írták le [11] először a nagy energiájú asztrofizikai neutrínók egy olyan populációját, amelyet ma kozmogenikus neutrínóknak hívunk. Ezek a neutrínók az ultranagy energiájú kozmikus sugarak és a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás kölcsönhatásában jönnek létre. Ezzel egy időben Kenneth I. Greisen amerikai fizikus, Zacepin orosz elméleti fizikus és Vagyim A. Kuzmin orosz kozmológus kiszámolták az ultranagy energiájú kozmikus sugarak energiájának felső határát ($5 \cdot 10^{19}$ eV, az ekkora energiájú proton sebessége a fénysebesség kb. 99,999999999999999998%-a!), illetve az ehhez tartozó láthatósági horizont távolságát [12, 13]. Az ún. GZK-neutrínók becült energiája PeV (10^{15} eV) és milliós PeV (10^{21} eV) közötti. Kozmogenikus neutrínókat ez idáig nem sikerült detektálni.

2.5. Nagy energiájú kozmikus neutrínók észlelése Cserenkov-detektorokkal

A kozmikus neutrínókat észlelő detektorok következő generációját megalapozó módszert, a vízfelszín alatti neutrínódetektálás ötletét először Mojszej Markov orosz fizikus fogalmazta meg 1960-ban [14], miszerint „a Cserenkov-sugárzás mérésén alapuló detektorokat kell telepíteni egy tó vagy tenger mélyére, a töltött részecskék égi forrásának pozíciómeghatározása céljából”. Markov ötlete alapján több projektet is terveztek, valamint kb. két évtizeddel később el is kezdték építeni a neutrínódetektorok következő generációját, amelyek az eddigieknél jóval nagyobb tömegű detektoranyagot, vizet vagy jeget használtak detektoranyagként. A 4. fejezetben ezekről részletesen lesz szó, az alábbiakban rövid kronológiai összefoglalást adunk a neutrínóteleszkópok fejlődéséről és a működésük során elért eredményekről.

1976-ban elindult a (sohasem befejezett) mélytengeri DUMAND projekt. 1993-ban elkezdődött az AMANDA építése az Antarktiszon, a Déli-sark közelében. Szenzormátrixa első négy fűzérjének telepítése után a Bajkál-tavi neutrínóteleszkóp az első Markov-típusú neutrínódetektor, amely ún. „felfelé igyekvő” (up-going) neutrínót detektál (még hozzá kettőt). Ezek a neutrínók a Föld tömegén keresztül jutottak el a detektorba.

2000-ben befejezik az AMANDA-II építését. 2001-ben az AMANDA kollaboráció publikálja a nagyenergiás asztrofizikai neutrínóég első térképét [15]. 2004-ben elkezdődik az IceCube Neutrínódetektor építése, ami az AMANDA projektből nőtt ki. 2008-ban befejezik az ANTARES építését a Földközi-tengerben Toulonnál. 2009-ben elkezdődik az IceCube DeepCore egységének építése. 2010-ben befejezik az IceCube építését. 2011-ben megkezdődik az IC86-os adatgyűjtés, a már teljes, 86 fűzérből álló IceCube-bal. 2012-ben elkezdik a több állomásból álló KM3NeT neutrínódetektor és a kapcsolódó infrastruktúra építését a Földközi-tengerben. 2013-ban 2 PeV energiájú neutrínót detektál az IceCube [16]. Még ebben az évben publikálják a két éves adatgyűjtésből származó úttörő eredményt, miszerint az IceCube mérései alapján erős bizonyítékot találtak a nagy energiájú asztrofizikai neutrínófluxusra (4. ábra, [16]). A „Big Bird”-nek nevezett 2 PeV energiájú neutrínó detektálása a 2014-es év jelentős eredménye [17]. 2016-ban telepítik a Baikal-GDV első teljes egységét. 2017-ben az IceCube detektálja az IC-170922A nevű neutrínóeseményt, aminek (pont-) forrásaként a TXS 0506+056 jelű aktív galaxismagot, blazárt azonosították [18, 19]. Ezzel az IceCube megtalálta a nagy energiájú kozmikus neutrínók első szignifikáns forrását. 2021-ben az IceCube elsőként detektál egy 6,3 PeV energiájú, a Glashow-rezonanciából (rezonáns elektron–antineutrínó ütközésből) származó neutrínót [20]. 2022-ben az IceCube mérései alapján az NGC 1068 Seyfert-galaxist neutrínók pontforrásaként azonosítják [21]. 2023-ban pedig az IceCube publikálja a Tejútrendszer fősíkjának első neutrínóterképét [22].

3. Asztrofizikai neutrínódetektálási módszerek

Ebben a fejezetben a neutrínócsillagászatban legtöbbször alkalmazott detektálási módszereket tekintjük át.

3.1. Radiokémiai módszerek

A radiokémiai módszereken alapuló detektálás során a beérkező neutrínó kölcsönhat a detektortömegként szolgáló kémiai anyagokkal, és a kölcsönhatásban létrejövő másodlagos radioaktív izotópok sugárzásának méréséből következtetnek a beérkező neutrínófluxusra. Klóros detektorok, például a már említett Homestake-kísérlet esetén a beérkező elektronneutrínó keltette argont mérik, amely a $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$ folyamatban keletkezik. A radioaktív argon elektronbefogással visszaalakul klórrá. Galliumos detektorok esetében, amilyen például a Gran Sasso-ban (Olaszország) működött GALLEX (1998-tól GNO, [23]) vagy a Bakszanban (Oroszország) működött SAGE [24], a detektálás alapja a $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$ folyamat. A radioaktív germánium elektronbefogással visszaalakul galliummá. A radiokémiai módszereken alapuló detektorokat a csillagászatban elérhető energia-

szintek miatt szinte kizárólag a Napból érkező neutrínók észlelésére használják.

3.2. Szcintillációs technika

A vizes Cserenkov-detektorokkal (lásd lejjebb) néhány MeV alatt nem igazán lehet kimutatni a detektorba érkező napneutrínókat, egyrészt a fotoelektronok alacsony száma, másrészt a detektor 3 MeV körül dominánssá váló természetes radioaktivitása miatt. Ilyen kis energiákon a szcintillációs technikák lehetnek sikeresebbek, mivel a szcintilláció folyamata kb. két nagyságrenddel több foton hoz létre a Cserenkov-folyamathoz képest, illetve lehetőség nyílik a detektoranyagként használt víz kémiai tisztítására (radiokémiai módszerek esetén az ilyen művelet a méréseket lehetetlenné tevő háttérrel hoz létre). Szcintillációnak nevezzük azt a folyamatot, amikor atomi gerjesztés következtében fényfelvillanás történik az anyagban. Szcintillátorok esetén a detektoranyag szerves vagy szervetlen is lehet. A szcintilláció során felvillanó fényt fotoelektron-sokszorozókkal mérik.

Folyadékos szcintillációs technikán alapul például a 2007-től adatokat gyűjtő Borexino-kísérlet (Gran Sasso, Olaszország), amellyel főként a Napban végbeménő pp ciklusból származó neutrínókat mérték, amelyek a ${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Be} + \nu_e$ (886 keV) folyamatban keletkeznek. A Borexino-kísérlet 280 tonna szerves szcintillációs detektoranyagot használt, a neutrínóesemények során felszabadult szcintillációs fényt 2212 darab fotoelektron-sokszorozó mérte. A neutrínócsillagászatban nem igazán használt szcintillátorokban a műanyag mátrixban eloszlott aromás szerves molekulák elektronjai gerjesztődnek valamilyen sugárzás által, és ezen gerjesztett állapotok relaxációja eredményezi fotoelektron-sokszorozók által mérendő fotonokat.

3.3. Cserenkov-módszer

A módszer alapja, hogy a beérkező neutrínók a detektorközeggel kölcsönhatva másodlagos részecskéket (elektronokat, müonokat, tauonokat) hoznak létre, amelyek – mivel a nagy neutrínóenergia miatt sebességük a közegbeli fénysebességnél nagyobb – kékes színű, ún. Cserenkov-fényt bocsátanak ki. Ezt a fényt mátrixszerűen elhelyezett fényérzékeny optikai modulokkal mérve a másodlagos részecske pályája és így a neutrínó forrásának égi pozíciója is rekonstruálhatóvá válik. Ez az ötlet a neutrínódetektorok több generációjának szolgált alapjául, és a Cserenkov-sugárzás mérésén alapuló detektálás mindmáig a neutrínócsillagászat egyik vezető észlelési technikája.

Vizes Cserenkov-detektorok esetén az érzékelő aktív részét képező fényérzékeny optikai modulok a beérkező és vízzel kölcsönható neutrínók által keltett másodlagos részecskék által kibocsátott Cserenkov-fényt mérik. Habár a vizes Cserenkov-detektorok elméleti feloldása jobb a jegesekéhez képest, a neutrínók rekonstruálható ener-

giaszintjének alsó határa magasabb, és a háttér szűrése még nehezebb, mint például a detektoranyagként jeget használó IceCube esetében (lásd később). Ennek oka az, hogy a vízben kevésbé szóródik a fény, mint a jégben; további ok a vízben található parányi élőlények által keltett biolumineszcencia, valamint a radioaktív izotópok és a tenger hullámozgása.

A neutrínódetektorok építhető méretükből fakadóan sokáig csak az elektronneutrínókra voltak érzékenyek. Már említettük, hogy a neutrínók három típusa – vagy ahogyan a részecskefizikában említik, íze – aszerint különböztethető meg, hogy az adott neutrínó melyik másodlagos leptonnal hozható kapcsolatba. A neutrínó és a detektoranyag közötti kölcsönhatásnak legalább a létrejövő másodlagos leptonok nyugalmi energiáját fedeznie kell. Viszont ez a tömeg a Cserenkov-fény létrejöttéhez nem elég, hiszen a kékes színű fény megjelenéséhez a másodlagos részecske sebességének a közegbeli fénysebességnél nagyobbaknak kell lennie. Szerencsére a neutrínóknak óriási – a nyugalmi tömegüknél akár 20-szor nagyobb nagyságrendű – mozgási energiájuk is lehet (ami fedezi a kölcsönhatásban létrejövő részecskék relativisztikus tömegét). Az elektron nyugalmi tömege kb. $0,511 \text{ MeV } c^{-2}$ (ahol c a fénysebesség), míg a müoné kb. $105 \text{ MeV } c^{-2}$, a tauoné pedig $1777 \text{ MeV } c^{-2}$. Míg az elektron oda-vissza szóródik pl. a vízben vagy a jégben, ezzel ún. zápor típusú szférikus eseményt keltve a detektor szenzormátrixában, a müonok és tauonok sokkal hosszabb úton adják le az extra mozgási energiájukat. Ezért a müonok pályájának minél nagyobb lefedettségéhez és a neutrínó forrásának, valamint energiájának minél pontosabb rekonstruálásához nagyobb detektort kell építeni, mint az elektronneutrínó esetében. A tau-neutrínó-események során két, kauzális szférikus neutrínóeseményt várunk, ezek detektálásához kellenek a legnagyobb neutrínódetektorok.

Általában igaz, hogy a neutrínódetektorokat nagy mélységbe teszik a zavaró atmoszferikus háttér minimalizálása miatt, illetve igen nagy detektortérfogattal dolgoznak a neutrínó és a detektoranyag közötti kölcsönhatások számának maximalizálása érdekében. A legtöbb asztrofizikai célú neutrínódetektor a Cserenkov-módszeren alapul. A teljesség igénye nélkül ilyenek például az ANTARES (jelenleg az épülő KM3NeT része), az AMANDA (jelenleg az IceCube Neutrínódetektor részeként), a BDUNT (később Baikal-GVD), az IceCube Neutrínódetektor, a KM3NeT, a Kamioka neutrínóobszervatórium detektorai (KamiokaNDE I-III, Super Kamiokande, Hyper Kamiokande), a kanadai Sudbury-i neutrínóobszervatórium (SNO), a Dél-kínai-tengerbe tervezett TRIDENT, valamint az Európában, a CERN égisze alatt tervezett, folyékony argon detektorközeggel működő GLACIER.

Fontos megjegyezni, hogy a nagyenergiás neutrínócsillagászatban a detektálás egészen más, mint például az optikai teleszkópok esetében. A neutrínóesemények valódisága mindig valamilyen szignifikanciaszinten ér-

tendő. Ez a szám arra utal, hogy mekkora annak a valószínűsége, hogy csupán a keresett jel háttéréhez tartozó véletlenek összjátékaként mérjük az éppen várt jelet. Az asztrofizikában általában a 3σ fölötti szignifikanciájú jeleket fogadják el felfedezésnek. Ez azt jelenti, hogy ha (normál eloszlás esetében) képesek volnánk 370-szer ugyanazt a neutrínóeseményt teljesen megegyező mérési környezetben detektálni, akkor csupán egyetlen esetben fogadnánk el a mért jelet tévesen valódinak.

3.4. Rádióhullámhosszakon végzett mérések

Érdekes neutrínódetektálási lehetőség alapszik az Aszkarjan-sugárzás vagy Aszkarjan-effektus mérésén. A Gurgen Aszkarjan örmény fizikus által 1962-ben posztulált jelenség akkor játszódik le, amikor egy részecske nagyobb sebességgel halad valamilyen dielektrikumban (például jégben), mint a fény fázissebessége az adott anyagban. Az IceCube-Gen2 projekt részeként a Déli-sarkon épülő Askaryan Radio Array (ARA) a beérkező ultranagy energiájú neutrínók és az antarktisi jég kölcsönhatásában létrejövő rádióhullámhosszú jeleket fogja mérni [25, 26]. Az ARA célja a kozmogenikus neutrínók fluxusának kimutatása, a remények szerint évente néhány 10^{17} eV feletti energiájú GZK-neutrínót lesznek képesek detektálni. Az első, 16 antennából álló demonstrációs célú ARA Testbed detektorhálózatot a 2010–2011-es szezon alatt telepítették. Az első építési fázis célja 37 darab ilyen detektorhálózat telepítése mintegy 200 km^2 területen, 10^{16} – 10^{19} eV neutrínóérzékenységet elérve ezzel.

4. Cserenkov-neutrínódetektorok

4.1. Első generáció

4.1.1. DUMAND

Az első víz alatti neutrínódetektor a Deep Underwater Muon and Neutrino Detector volt [27, 28]. A projekt 1976-ban kezdődött, és annak ellenére, hogy a DUMAND detektor soha nem végzett tudományos méréseket, az 1995-ben végül törölt projekt több évtizedre meghatározta a neutrínódetektorok építésének irányát. A DUMAND projekt után három fejlesztési irány mutatkozott, amelyek végül a Földközi-tengerben a francia partoknál létesített Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch (ANTARES [29]), a görög Neutrino Extended Submarine Telescope with Oceanographic Research (NESTOR [30]) és az olasz NEutrino Mediterranean Observatory (NEMO [31]) projektekhez vezettek.

4.1.2. BDUNT

A Bajkál Mélyvízi Neutrínóteleszkópot (Baikal Deep Underwater Neutrino Telescope, BDUNT) az orosz-

országi Bajkál-tó déli partjainál, 1,1 km közepes mélységben építették [32]. A projekt kivitelezése 1980-ban, a tudományos mérések pedig 2003-ban kezdődtek. A BDUNT-tal detektáltak először atmoszferikus neutrínókat Cserenkov-technikával [33].

4.1.3. ANTARES, NESTOR, NEMO

Markow ötlete alapján tervezett első víz alatti neutrínódetektor, az ANTARES építését 2008-ban fejezték be [29]. A detektor 12 darab, kb. 350 méter hosszú detektorfüzérből áll, amelyeken egyenként 75 fényérzékeny optikai modul helyeztek el, a tengervíz összesen kb. $0,05 \text{ km}^3$ térfogatát detektoranyagként használva. Az ANTARES a jelenleg építési és tesztelési fázisban lévő nagy víz alatti neutrínódetektor-hálózat, a KM3NeT elődje. Az első NESTOR optikai modulok 2003-ban kerültek a Földközi-tenger 3800 méteres mélységébe, kb. 30 km-re a görög partoktól. Később a NESTOR a következő generációs neutrínódetektor, a KM3Net részévé vált. A NEMO projekt első tesztelési fázisa (2007–2011) után szintén a KM3NeT-be olvadt.

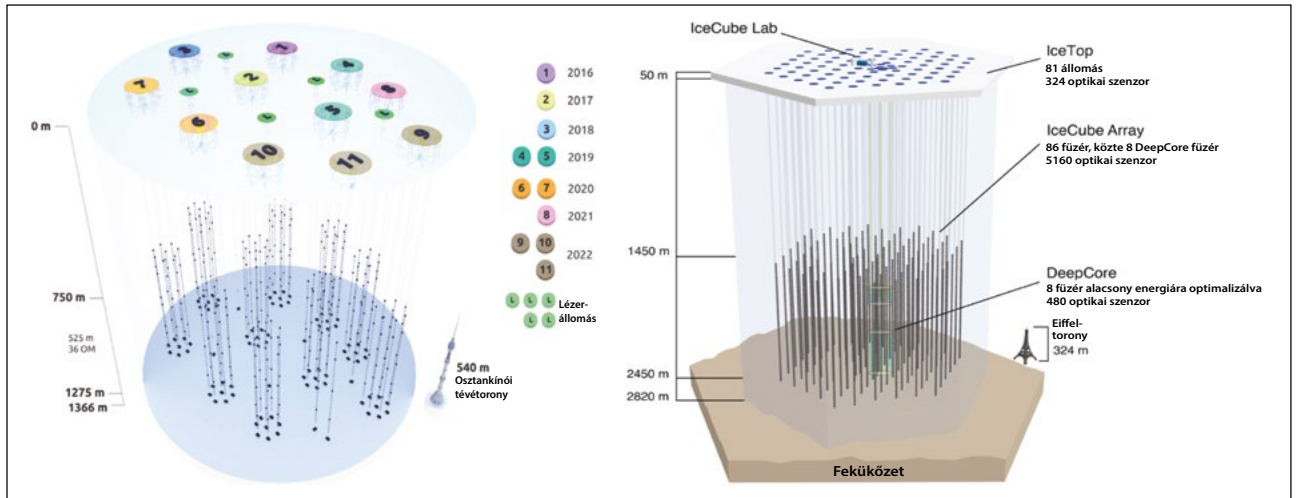
4.1.4. AMANDA

Az 1990-es évek elejétől a kozmikus neutrínókat észlelő, eddigi legsikeresebb detektorok otthonául az Antarktisz szolgál. A hatodik földrészen, a Déli-sark közvetlen közelében épültek és épülnek mai napig a világ legnagyobb jég alatti Cserenkov-neutrínódetektorai: az AMANDA, az IceCube és a jelenleg fejlesztés és építés alatt álló IceCube-Gen2 neutrínódetektorok. Az Antarctic Muon and Neutrino Detector Array (AMANDA) építését 1995-ben kezdték a Déli-sarktól néhány száz méterre, közel a déli-sarki Amundsen–Scott-kutatóállomáshoz. A konstrukció során 60 cm átmérőjű lyukakat fúrtak a 3 km vastag jéggrétegtakaróba nagy nyomású és tisztaságú forró vízzel. A 2000-es teljesítésig összesen 19 füzéren elhelyezkedő 667 digitális optikai modul (DOM) telepítettek a jégtakaró 1500–2000 méteres mélységei között. A 10 füzéres AMANDA-val sikerült először megmérni a nagy energiájú atmoszferikus eredetű neutrínók fluxusát: 1997-ben összesen 16 db, az AMANDA „talpa alól érkező”, ún. felfelé igyekvő, a Föld tömege által természetes módon megszűrt légköri eredetű neutrínót észleltek. Az analízis technikáinak jelentős fejlődésével ez a szám később 300-ra, majd az AMANDA-II idején több ezerre emelkedett. Pontforrások után is kutattak, de ekkor még nem volt elég jó a mérés és az analízis technikája a kozmikus neutrínóforrás-jelöltek felderítésére.

4.2. Második generáció

4.2.1. Baikal-GVD

A Baikal Gigaton Volume Detector (Baikal-GVD) a BDUNT neutrínóteleszkóp TeV–PeV energiataromány-

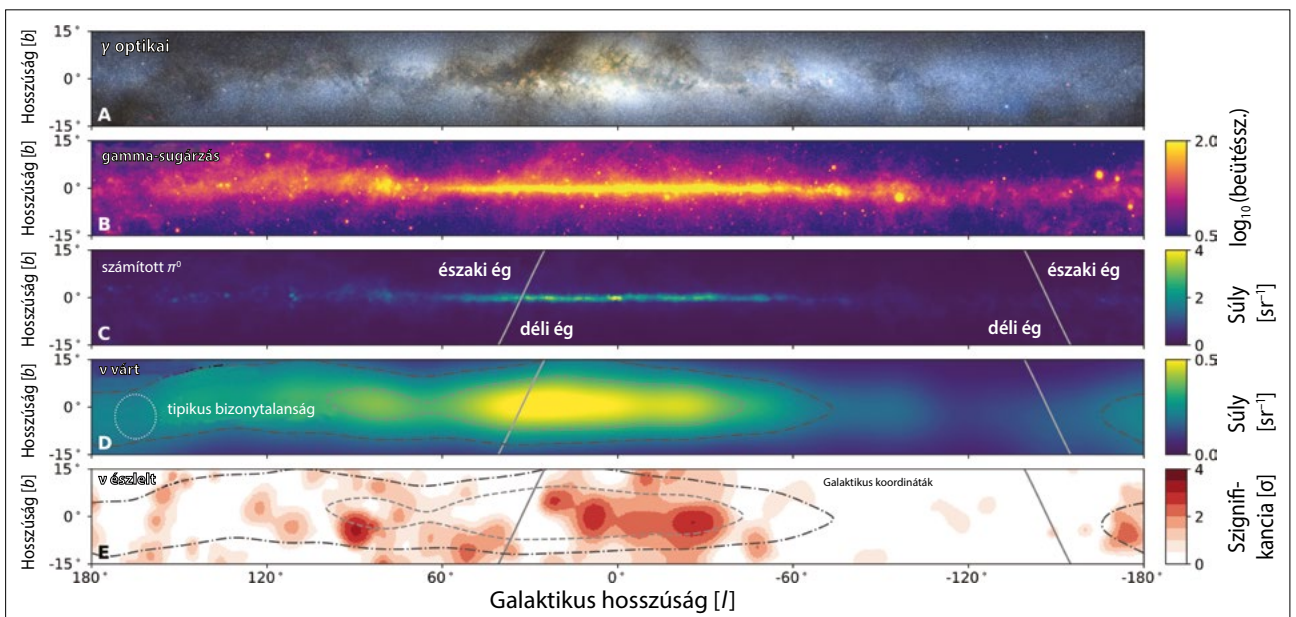


5. ábra. Balra: A Baikal-GVD neutrínódetektor [34]. Jobbra: az IceCube Neutrínódetektor. Forrás: IceCube/WIPAC. <https://icecube.wisc.edu>

ban érzékeny, továbbfejlesztett változata³). A 2017–2022-es építési fázis végén a Baikal-GVD összesen 10 füzérhálózatot tartalmaz, hálózatonként 8 füzérral (7 füzér 60 méterre a központtól), és 288 fényérzékeny optikai modullal (5. ábra, balra). A szomszédos füzérhálózatok központi füzérei kb. 300 méterre találhatók egymástól. Az első építési fázis után az összesen 2880 fényérzékeny optikai modul kb. 0,4 km³ térfogatú vízben helyezkedik el. A 2018–2021-es időszak adatgyűjtéséből származó adatbázisa alapján a Baikal Kollaboráció nemrég jelentette be, hogy először sikerült megfigyelniük a diffúz kozmikus neutrínóhátteret a Baikal-GVD neutrínódetektszakkal [34].

4.2.2. IceCube

Francis Halzen amerikai–belga elméleti fizikus 1995-ben fogalmazta meg egy köbkilométeres neutrínódetektor ötletét [35], ami végül az AMANDA neutrínódetektor köré épült meg. Az IceCube Neutrínódetektor⁴ az antarktisi jég 1 km³-ét használja detektortérfogatként (5. ábra, jobbra). Az IceCube az AMANDA detektormátrixát jelentősen bővítve, 86 füzéren összesen 5160 ún. digitális optikai modult használ a beérkező nagy energiájú neutrínók által keltett másodlagos részecskék Cserenkov-sugárzásának mérésére. Az IceCube működéséről, detektálási technikájáról és a neut-



6. ábra. Galaxisunk fősíkjának foton- és neutrínótérképe. A legfelső, A jelű panelen a galaktikus sík optikai (A. Mellinger), a B jelű panelen pedig a gamma-térképe (Fermi gamma-űrtávcső) látható. A C és D panelek a számolásokhoz felhasznált várt neutrínófluxus eloszlását mutatják, míg az E jelű panel az észlelt neutrínófluxust. A kép forrása: IceCube/WIPAC [22]. Az E panelel minél sötétebb árnyalatú egy rész, annál valószínűbb, hogy az adott égtérületen a galaktikus sík neutrínóit látjuk

rínóazonosítás kihívásairól bővebb leírás olvasható a *Fizikai Szemle* 2020. évi 11. lapszámában „Kozmikus neutrínók égen és Földön” címmel megjelent cikkben⁵⁾. A jelen sorok szerzője 2020 óta tagja a Francis Halzen vezette IceCube Kollaborációnak.

Az IceCube Neutrínódetektor úttörő jelentőségű kísérlet. A 2011–2013-as adatgyűjtésből származó kétéves adatbázist elemezve először sikerült azonosítani vele a kozmikus részecskegyorsítókból érkező, nagy energiájú kozmikus neutrínók fluxusát [16]. Először sikerült egy nagy energiájú neutrínóesemény pontforrását 3σ (TXS 0506+056 [18, 19]), majd 4σ szignifikanciaszint felett megtalálni (NGC 1068 [21]). Először sikerült egy 60 éve megjósolt jelenséget, az ún. Glashow-rezonanciát kimutatni [20], ami egy W-bozon elektron- és antielektron-neutrínó kölcsönhatása általi rezonáns keltése. Az IceCube Kollaboráció legfrissebb eredménye a galaktikus sík nagy energiájú neutrínókban való azonosítása (6. ábra, [22]). Az IceCube bővítése jelenleg is tart, az IceCube-Gen2 már az antarktisi jég ezer köbkilométerét fogja detektoranyagként használni, számos új felfedezéshez vezető kaput megnyitva ezzel. Jelenleg összesen két pontforrását ismerjük a nagy energiájú kozmikus neutrínóknak. Az IceCube 2008–2018-as észlelési periódusában 100 GeV és 1 PeV között kb. 700 000, 10 és 100 GeV között pedig kb. 200 000 neutrínót észlelt. Ezek között viszont csupán nagyságrendileg 200 neutrínó lehet nagy valószínűséggel asztrofizikai eredetű. Az IceCube Real Time Alert System észleléseinek köszönhetően öt év alatt ez a szám kb. megduplázódott, ami

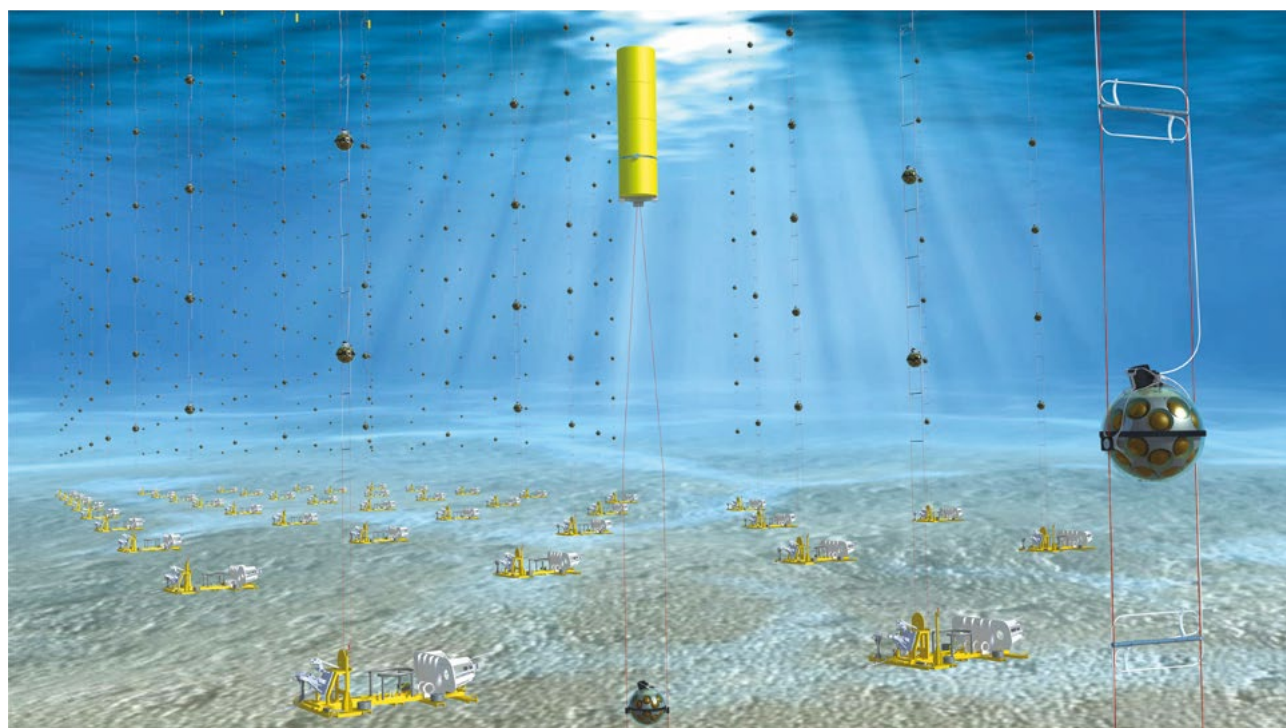
még mindig elképesztően kevés a teljes égboltra nézve. Az IceCube Gen-2-vel viszont már pontforrások neutrínóspektrumát is lehet majd detektálni, azaz több tíz, akár száz neutrínót egy forrásból. Ez minden bizonnyal forradalmasítani fogja a nem termális Univerzumról alkotott elképzelésünket.

A kozmikus neutrínók forrásainak keresésén túl az IceCube detektor számos más kutatási irányt is kiszolgál, például a légköri neutrínók, a sötét anyag, a mágneses monopólusok kutatását, a Hold és a Nap kozmikus-sugár-árnyékának kimérését. Az IceCube működéséről további információforrásként ajánljuk a *Fizikai Szemle* 2020. évi 11. lapszámában megjelent, korábban említett írást⁵⁾.

4.2.3. KM3NeT

A következő generációs, víz alatti neutrínódetektor a jelenleg építés és tesztelés fázisában lévő KM3NeT⁽⁶⁾ a Földközi-tenger kb. 5 km³-es térfogatát fogja detektoranyagként használni, több ezer fényérzékeny modullal mérve a beérkező nagy energiájú neutrínók és a víz kölcsönhatásakor létrejövő másodlagos részecskék Cserenkov-sugárzását (7. ábra [36, 37]).

A KM3NeT „Astroparticle research with cosmic in the Abyss” (ARCA) detektora a kozmikus részecskegyorsítókból, például szupernóva-robbanások és gamma-kitörések során, illetve kompakt objektumok összeolvadásakor keletkező nagy energiájú neutrínókat méri majd az 1 TeV és 10 PeV közötti energiatartományban.



7. ábra. A Földközi-tenger mélyén épülő KM3NeT neutrínódetektor fantáziarajza. A beérkező neutrínók és a tengervíz kölcsönhatásakor létrejövő másodlagos részecskék Cserenkov-sugárzását a felülről bójákkal, alulról pedig horgonyokkal feszített fűzereken lévő digitális optikai modulok mérik majd. *Forrás:* KM3NeT, Edward Berbee/Nikhef

Az ARCA-t befogadó helyszín a KM3NeT-It kb. 100 km-re található a szicíliai partoktól, délkeleti irányban Portopalo di Capo Passerótól. A KM3NeT „Oscillators Research with Cosmics in the Abyss” (ORCA) detektorának geometriáját úgy alakították ki, hogy az az ARCA-hoz képest a jóval alacsonyabb, 1–100 GeV tartományban legyen érzékeny, mivel ezt a neutrínódetektort a légköri eredetű neutrínókkal kapcsolatos kutatásokhoz tervezték. Az ORCA-t befogadó helyszín, a KM3NeT-Fr a francia partokhoz közel, kb. 40 km-re található Toulontól délre, 2450 méter mélyen, kb. 10 km-re nyugatra az ANTARES-től.

A KM3NeT teleszkópjait az ún. mélytengeri hálózat elektrooptikai kábeleik kötik össze. Az ARCA és ORCA detektorfüzéreit a vízfelszínen bóják, a tengerfenéken pedig horgonyok tartják vertikális pozícióban. A KM3NeT neutrínódetektorainak aktív részei az ún. észlelési egységek. Ezekhez az egységekhez kötik be a digitális optikai modulokat („digital optical module”, DOM). Az elődhöz, az ANTARES-hez képest ezek a DOM-ok nem egy, hanem már 31 fotoelektron-sokszorozót tartalmaznak. Ezzel nagyobb fotokatód-területet lehet elérni, és sokkal jobban elkülöníthetővé válnak az egy- és többfoton-események, valamint sokkal pontosabban lehet majd meghatározni a beérkező fotonok, végső soron pedig a beérkező nagy energiájú neutrínók érkezési irányát. Minden észlelési egység kb. 700 méter hosszú. Habár teljesen hasonló módon működnek, az ARCA és ORCA különböző kutatási célokat szolgál majd ki, ezért az eltérőre tervezett geometriájuk különböző energiatartományokban teszi őket érzékenyebbé. Az ARCA (ORCA) digitális optikai moduljai 90 (20) méteres horizontális, és 39 (9) méteres vertikális távolságban találhatóak egymástól, úgy, hogy a legmélyebb modulok 70 (30) méterre helyezkednek el a tengerfenéktől. A tervek szerint az ORCA egy, az ARCA pedig két építési blokkot fog tartalmazni, blokkonként 115 észlelési egységgel. A cél a KM3NeT ARCA egységénél a sáv (zápor) típusú neutrínóesemények irányrekonstrukciós pontosságának 0,1 (2) fok alá csökkentése, 10 TeV feletti energiákon mérve.

A figyelmes olvasó az ARCA és az ORCA geometriájából könnyen levonhatja azt a következtetést, hogy az alacsonyabb energiákon érzékeny neutrínódetektor kisebb, és szenzormátrixát sűrűbbre kell tervezni. Ennek a fizikai oka egyszerűen az, hogy nagyobb energiákon beérkező neutrínók nagyobb energiájú másodlagos részecskéket keltenek, amelyek így hosszabb utat megtéve adják le mozgási energiájukat, Cserenkov-sugárzást kibocsátva, és nem szükséges (már csak költségvetési okokból sem) olyan sűrűre tervezni a szenzormátrixot, mint a légköri eredetű, több nagyságrenddel kisebb energiájú neutrínók detektálásánál.

Az IceCube déli-sarki elhelyezkedése miatt csak majdnem két nagyságrenddel rosszabb érzékenységgel képes a déli égboltot mérni az északihoz képest. Ez amiatt van, hogy a déli égbolt az IceCube „feje felett”

található, és az ún. „lefelé haladó” kozmikus neutrínók esetében nagyon erős az atmoszferikus háttér, sokkal nehezebben lehet azokat megtalálni. Az északi égboltot az IceCube a „talpa alól” észleli, a „felfelé haladó” kozmikus neutrínók esetében pedig a Föld tömege kiválóan megszüri a kozmikus neutrínóktól kisebb energiákon érkező légköri neutrínókat. A KM3NeT elhelyezkedése miatt nem várnak ekkora aszimmetriát a déli és északi égbolton elérhető érzékenységek között. Így a KM3Net például kiváló megfigyelési eszköze lesz a galaktikus sík neutrínóemissziójának.

5. Globális neutrínóhálózatok, a jövő neutrínódetektorai, további horizontok

A Global Neutrino Network (GNN)⁷⁾ célja a nagy neutrínóteleszkópok közötti együttműködés stratégiai megtervezése. A GNN jelenlegi tagjai az ANTARES, a Baikal, az IceCube és a KM3NeT kollaborációk. A SuperNova Early Warning System (SNEWS)⁸⁾ a szupernóva-neutrínókra (is) érzékeny neutrínókísérletek globális hálózata [38]. A SNEWS fő célja a Galaxisunkban a közeljövőben robbanó magösszeomlásos szupernóvák neutrínóinak detektálása, és a robbanás tényének kommunikációja a tudományos közösség felé. Az SN1987A példáján láthattuk, hogy a Super-Kamiokande a robbanás elektromágneses spektrumban való megjelenése előtt egy nappal már észlelte a robbanásból származó sztelláris neutrínókat. Az SNEWS a várakozások szerint lehetővé teszi a szupernóvák teljes, többcsatornás megfigyelését az elektromágneses spektrumban, gravitációs hullámok és neutrínók formájában. A hálózat résztvevői jelenleg: Super-Kamiokande, IceCube, KM3NeT, KamLAND, SNO+, NOvA, HALO.

A jelenleg kivitelezés alatt álló TRopIcal DEep-sea Neutrino Telescope (TRIDENT) projekt a Dél-kínai-tenger kb. 8 km³-ét használja majd detektoranyagként, Cserenkov-módszerrel azonosítva a nagy energiájú neutrínókat [39]. A tervek szerint 20 000 digitális optikai modul alkotja majd a szenzormátrixot, mintegy 1000 füzéren egyenlőtlen módon elosztva. A jelenlegi tervek szerint az adatgyűjtés 2030-ban kezdődhet. A jelenleg előkészítési fázisban lévő Giant Liquid Argon Charge Imaging Experiment (GLACIER), 100 kilotonnás föld alatti neutrínóteleszkóp a tervek szerint a néhány 10 keV és néhány 10 GeV közötti tartományban lesz érzékeny, célja a sztelláris neutrínók detektálása lesz.

Ezek és a korábban már említett IceCube-Gen2, valamint a KM3NeT neutrínódetektorok jövőbeli működése nyomán jó néhány, a neutrínócsillagászathoz és asztro-részecskefizikához köthető felfedezés várható. A jelen sorok szerzője szubjektív módon ezek közül a legjobban a pontforrások neutrínóspektrumának mérését, az összeolvadó szupernagy tömegű feketelyuk-kettősök többcsatornás jelének szimultán detektálását az IceCube

Gen-2-vel és a tervezett LISA gravitációshullám-detektorral, valamint egy nagy energiájú tau-neutrínó első igazolt detektálását várja.

A neutrínócsillagászat a 20. században született, fiatal megfigyelési tudományág. A nagy energiájú neutrínók fluxusának első tudományos bizonyítéka a közelmúltból, 2013-ból származik. Habár azóta nagy áttörések születtek, biztosak lehetünk abban, hogy még számos neutrínócsillagászati és asztro-részecskefizikai felfedezés tanúi lehetünk, ami igazán izgalmassá teszi eme tudományágat és annak művelését.

Jegyzetek

- ¹⁾ <https://fizikaiszemle.elft.hu/archivum/2020>
- ²⁾ <https://www.pp.rhul.ac.uk/~ptd/TEACHING/PH2510/pauli-letter.html>
- ³⁾ <https://baikalgvd.jinr.ru/>
- ⁴⁾ <https://icecube.wisc.edu>
- ⁵⁾ Kun E.: Kozmikus neutrínók égen és Földön. Fizikai Szemle, 2020/11, 370–375. <https://fizikaiszemle.elft.hu/szemle/tartalom/86>
- ⁶⁾ <https://www.km3net.org>
- ⁷⁾ <https://www.globalneutrino.org/>
- ⁸⁾ <https://snews2.org/>

Irodalom

1. Hess V. F.: Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten. Phys. Z., 13 (1912) 1084.
2. Cowan C. L. et al.: Detection of the Free Neutrino: a Confirmation. Science, 124 (1956) 103.
3. Danby G. et al.: Observation of high-energy neutrino reactions and the existence of two kinds of neutrinos. Phys. Rev. Lett., 9 (1962) 36.
4. Reines F. et al.: Evidence for high-energy cosmic-ray neutrino interactions. Phys. Rev. L., 15 (1965) 429.
5. Achar C. V. et al.: Detection of muons produced by cosmic ray neutrinos deep underground. Physics Letters, 18 (1965) 196.
6. Davis R., Harmer D. S., Hoffman K. C.: Search for neutrinos from the Sun. Physics Letters, 20 (1968) 1025.
7. Bahcall J. N., Davis R.: Solar neutrinos: A scientific puzzle. Science, 191 (1976) 264.
8. Nakahata M. et al.: Atmospheric neutrino background and pion nuclear effect for KAMIOKA nucleon decay experiment. Journal of the Physical Society of Japan, 55 (1986) 3786.
9. Ahmad Q. R. et al.: Measurement of the rate of $e + d \rightarrow p + p + e^-$ interactions produced by 8B solar neutrinos at the Sudbury Neutrino Observatory. Phys. Rev. Lett., 87 (2001) 071301.
10. Sinclair D. et al.: IMB detector: The first 30-days. Proceedings, Science Underground, (1982) 138.
11. Beresinsky V. S., Zatsepin G. T.: Cosmic rays at ultra high energies (neutrino?). Phys. Lett. B., 28 (1969) 423.
12. Greisen K.: End to the cosmic-ray spectrum? Phys. Rev. L., 16 (1966) 748.
13. Zatsepin G. T., Kuz'min V. A.: Upper limit of the spectrum of cosmic rays. ZhETF Pisma Redaktsiiu, 4 (1966) 114.
14. Markow M. A.: On high-energy neutrino physics. Proceedings of the 1960 Annual International Conference on High-Energy Physics, (1960) 578.
15. Andrés E. et al.: Observation of high-energy neutrinos using Cherenkov detectors embedded deep in Antarctic ice. Nature, 410 (2001) 441.
16. IceCube Kollaboráció: Evidence for high-energy extraterrestrial neutrinos at the IceCube detector. Science, 342 (2013) 196.
17. IceCube Kollaboráció: Observation of high-energy astrophysical neutrinos in three years of IceCube data. Phys. Rev. Lett., 113 (2014) 101101.
18. IceCube, Fermi-LAT, MAGIC, AGILE, ASAS-SN, HAWC, H.E.S.S., INTEGRAL, Kanata, Kiso, Kapteyn, Liverpool telescope, Subaru, Swift/NuSTAR, VERITAS, and VLA/17B-403 teams: Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A. Science, 361 (2018) eaat1378.13
19. IceCube Kollaboráció: Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert. Science, 361 (2018) 147.
20. IceCube Kollaboráció: Detection of a particle shower at the Glasgow resonance with IceCube. Science, 591 (2021) 2020.
21. IceCube Kollaboráció: Evidence for neutrino emission from the nearby active galaxy NGC 1068. Science, 378 (2022) 538.
22. IceCube Kollaboráció: Observation of high-energy neutrinos from the Galactic plane. Science, 380 (2023) 1338.
23. Kirsten T.: Retrospect of GALLEX/GNO. Journal of Physics Conference Series, 120 (2008) 052013.
24. Abdurashitov N. J. et al.: The Russian-American Gallium Experiment (SAGE) Cr neutrino source measurement. Phys. Rev. L., 77 (1996) 4708.
25. ARA Kollaboráció: Design and initial performance of the Askaryan Radio Array prototype EeV neutrino detector at the South Pole. Astroparticle Physics, 35 (2012) 457.
26. ARA Kollaboráció: Performance of two Askaryan Radio Array stations and first results in the search for ultrahigh energy neutrinos. Phys. Rev. D., 93 (2016) 082003.
27. Kotzer P.: DUMAND-75. Proc. 1975 Summer DUMAND Study, Western Washington State College, Bellingham, WA (1976).
28. DUMAND Kollaboráció: DUMAND II: Proposal to construct a deep-ocean laboratory for the study of high energy neutrino astrophysics and particle physics. Tech. Rep. HDC-2-88, Hawaii DUMAND Center, University of Hawaii (1988).
29. ANTARES Kollaboráció: ANTARES: The first undersea neutrino telescope. Nucl. Inst. Meth. A, 656 (2011) 11.
30. NESTOR Kollaboráció: NESTOR: A neutrino particle astrophysics under-water laboratory for the Mediterranean. Nucl. Phys. Proc. Suppl., 35 (1994) 294.
31. NEMO Kollaboráció: Recent results and perspectives of the NEMO project. Nucl. Inst. Meth., 602 (2009) 47.
32. Baikal Kollaboráció: Progress Report on Lake Baikal Neutrino experiment: site studies and stationary string. Proc. XI. Conf. on Neutrino Physics and Astrophysics Nordkirchen, Germany (1984) 550.
33. Baikal Kollaboráció: Reconstruction of atmospheric neutrinos with the Baikal neutrino telescope NT-96. Astropart. Phys., 12 (1999) 75.
34. Baikal Kollaboráció: Diffuse neutrino flux measurements with the Baikal-GVD neutrino telescope. Phys. Rev. D, 107 (2023) 042005.
35. Halzen F.: The case for a kilometer-scale high energy neutrino detector. Nucl. Phys. Proc. Suppl., 38 (1995) 472.
36. Katz U. F.: KM3NeT: Towards a km³ Mediterranean neutrino telescope. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 567 (2006) 457.
37. Adrián-Martínez S. et al.: Letter of intent for KM3NeT 2.0. Journal of Physics G Nuclear Physics, 43 (2016) 084001.
38. Kharusi S. A. et al.: SNEWS 2.0: a next-generation supernova early warning system for multimessenger astronomy. New J. Phys., 23 (2021) 031201.14
39. Ye Z. P. et al.: Amulti-cubic-kilometre neutrino telescope in the western Pacific Ocean. Nature Astronomy, 7 (2023) 1497.

fizikaiszemle.elft.hu

A honlapon megtalálhatja régebbi és új lapszámainkat, valamint számos mellékletet!