NEUTRÍNÓK A GALAXISOK MAGJÁBÓL
Francis Halzen és a 2026. évi fizikai Nobel-díj

Trócsányi Zoltán
ELTE Elméleti Fizikai Tanszék, Budapest
E-mail: trocsanyi.zoltan@ttk.elte.hu



1. ábra. Francis Halzen 2024 szeptemberében. *Fotó:* Althea Dotzour / UW–Madison. *Forrás:* az IceCube Nobel-díjról szóló közleménye [1]

A Déli-sarkon működő IceCube Neutrínó Obszervatórium különös csillagászati műszer: nincsen tükre, kupolája, és nem fordul az égbolt felé. Érzékelői másfél – két és fél kilométerrel a felszín alatt, az antarktiszi jégben figyelik a világegyetem üzeneteit. A 2026. évi fizikai Nobel-díjat Francis Halzen *kapta „az IceCube Neutrínó Obszervatórium létrehozásában játszott meghatározó szerepéért, és az asztrofizikai eredetű, nagy energiájú neutrínók felfedezéséért”. A díj olyan kutatást ismer el, amely új megfigyelési lehetőséget adott a csillagászatnak: segítségével a természet távoli részecskegyorsítóinak működését vizsgálhatjuk.*

Az 1944-ben Belgiumban született Halzen a Wisconsin–Madison Egyetem elméleti fizikusa *(1. ábra)*. Pályája a részecskefizikától vezetett az asztrofizika és a kozmológia határterületére. John Learneddel 1988-ban már a mély sarki jégben történő neutrínóészlelés lehetőségéről írt. A gondolat megvalósításához azonban évtizedes kitartás, mérnöki találékonyság és egy nemzetközi együttműködés felépítése kellett. Halzen tudományos elképzelése köré olyan közösség szerveződött, amely képes volt megépíteni és működtetni a rendkívüli berendezést. Az egyetlen névre szóló Nobel-díj mögött kutatók, technikusok, mérnökök és sarkvidéki munkatársak sokaságának teljesítménye áll [1, 2].

A neutrínó elektromosan semleges, parányi tömegű elemi részecske. A szokásos anyag és a neutrínó között ható erő olyan gyenge, hogy a Földre érkező minden százezer neutrínóból átlagosan csupán egy akad fenn, a többi áthalad anélkül, hogy nyomot hagyna, ami a kutatóknak egyszerre áldás és nehézség: a forrásából kilépő neutrínó szinte zavartalanul eljuthat hozzánk, viszont az észleléséhez óriási detektor szükséges. A mágneses terek sem térítik el, így érkezési iránya a keletkezési helyére utal. Olyan sűrű kozmikus környezetekből is hírt hozhat, amelyekből a nagy energiájú fény nehezen szabadul ki. Például a Nap közepén keletkező neutrínó szinte azonnal kijön, az ugyanott keletkező fotonnak ehhez mintegy tízezer évre van szüksége, és közben rengetegszer szóródik.

A világűrből érkező nagy energiájú protonokat és atommagokat a galaktikus és galaxisközi mágneses terek eltérítik: földi érkezési irányuk nem mutat egyenesen a forrásukra. Ha azonban ezek a részecskék forrásuk környezetében gázzal vagy sugárzással ütköznek, többek között neutrínók is keletkezhetnek. A neutrínók ezért segítenek megállapítani, hol és hogyan gyorsítja a természet rendkívüli, földi laboratóriumban elképzelhetetlen nagy energiákra az anyagot. A fotonokkal együtt megfigyelve őket a gyorsító környezetéről is többet megtudhatunk [3].

Wolfgang Pauli 1930-ban az atommagok béta-bomlásában látszólag eltűnő energia és lendület megmagyarázására javasolt egy addig ismeretlen, általa neutronnak hívott részecskét. A neutrínó nevet Enrico Fermi adta a neutron felfedezése után, és belefoglalta a gyenge kölcsönhatás elméletébe. A részecske kísérleti kimutatása Frederick Reines és Clyde Cowan reaktorkísérletében, 1956-ban sikerült. A neutrínó hamarosan csillagászati

hírvivővé vált: Raymond Davis napneutrínó-mérései közvetlenül a Nap belsejének magreakcióit vizsgálták. A japán Kamiokande és más detektorok 1987-ben egy szupernóva neutrínókitörését is észlelték. A neutrínócsillagászat tehát jóval az IceCube előtt megszületett [4].

Az IceCube feladata más energiatartomány meghódítása volt. A Napból érkező neutrínóknál milliószor, sőt akár milliárdszor energiadúsabb részecskék olyan ritkák, hogy észlelésükhöz természetes vízvagy jégtömegek bevonása látszott célszerűnek. Már 1960-ban felmerült a nagy víztömegekben elhelyezett fényérzékelők használatának lehetősége. Később a DUMAND tengeri program nem jutott el a tervezett teljes detektorig, de fontos technikai tapasztalatokat hagyott örökül. A Bajkál-tó és a mélytengerek mellett az antarktiszi jég is ígéretes helyszínné vált [5, 6].

Halzenék először az AMANDA-kísérlettel próbálták ki a jégbe telepített érzékelőket. A kezdeti nehézség magában a jégben rejlett: körülbelül egy kilométeres mélységben a légbuborékok erősen szétszórták a neutrínó és az anyag ütközése nyomán keletkező fényt. Mélyebben azonban megfelelően tiszta, átlátszó rétegeket találtak. Az AMANDA légköri neutrínók észlelésével igazolta az eljárás működőképességét, és megnyitotta az utat a lényegesen nagyobb IceCube előtt. Az eredeti berendezés utolsó érzékelőláncát 2010 decemberében engedték le; a teljes kiépítésű detektor 2011-ben kezdte meg az adatgyűjtést.

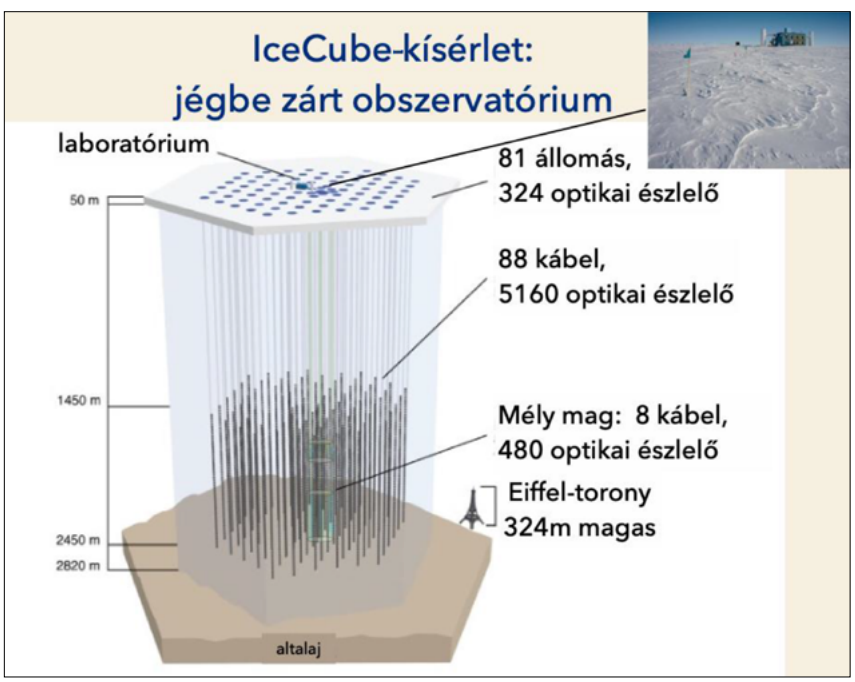
Az IceCube nagyjából egy köbkilométernyi jégkockát használ megfigyelési térfogatként. Eredeti mélyjégi hálózatában 86 függőleges kábelen 5160 optikai modul helyezkedik el, 1450 és 2450 méter közötti mélységben *(2. ábra)*. A gömb alakú házak fényérzékelőt és elektronikát rejtenek. A neutrínót közvetlenül nem látják: ritkán előfordul, hogy töltött részecskék keletkeznek a jéggel való kölcsönhatásakor, amelyek ott, a jégben gyorsabban haladhatnak, mint a fény. A jelenséget kísérő Cserenkov-sugárzás halvány fényét rögzítik az érzékelők [5, 6].

A fényjelek idejéből és erősségéből számítógéppel lehet visszakövetni a tényleges eseményt. A müonok hosszú nyomokat hagynak, amelyekből viszonylag pontos irány határozható meg; az elektronok tömörebb részecskezáporokat keltenek. Ezek energiája jól becsülhető, irányuk viszont bizonytalanabb. A rekonstrukcióhoz az érzékelők óráit nanoszekundumos pontossággal kell összehangolni. Ráadásul a jég optikai tulajdonságai mélységenként változnak: az ősi porrétegek befolyásolják a fény elnyelését és szóródását. A detektor megértéséhez így a jégtakaró részletes feltérképezése is hozzátartozik.

Az építés önmagában mérnöki bravúr volt. Forró vízzel kellett nagyjából hatvan centiméter átmérőjű, két és fél kilométer mély furatokat olvasztani. A mintegy nyolcvan Celsius-fokos vizet hosszú tömlők vezették a mélybe. A gyors visszafagyás miatt az érzékelőláncot gyorsan kellett leengedni. A beépített műszerekhez később már nem lehetett hozzáférni, ezért a megbízhatóságuk alapkövetelmény volt. Mindezt rövid antarktiszi nyarakon, korlátozott szállítási lehetőségek mellett kellett végrehajtani. Az üzemanyag, az alkatrészek és az emberi munka gondos összehangolása nélkül a terv megvalósíthatatlan lett volna.

A kozmikus neutrínók észlelésében a legnagyobb akadályt a háttér jelenti. A kozmikus sugárzás a Föld légkörében rengeteg müont és neutrínót hoz létre. Ezeket meg kell különböztetni a távoli égitestektől érkező neutrínóktól. Az egyik módszer magát a Földet használja szűrőnek: az alulról érkező müonnyom mögött neutrínókölcsönhatás állhat, mert egy légköri müon nem jutna át a bolygón. Más elemzések olyan eseményeket választanak, amelyek a detektor belsejében kezdődnek; a külső érzékelők az előzőleg belépő részecskéket jelzik. A megmaradó légköri neutrínóhátteret energiaeloszlásokkal és statisztikai módszerekkel választják szét az asztrofizikai összetevőtől [7, 8].

A fordulatot a 2013-ban közölt eredmény hozta. Huszonnyolc nagy energiájú esemény együttes tulajdonságait már nem lehetett kielégítően pusztán légköri háttérrel magyarázni. A mintában két esemény is szerepelt petaelektronvolt (10^{15} eV)



2. ábra. Az IceCube eredeti felépítése. A fényérzékelők 1450–2450 méter mélységben helyezkednek el; a sűrűbben műszerezett DeepCore (mély mag) kisebb energiák mérését is lehetővé teszi. Az Eiffel-torony a méreteket szemlélteti (*Forrás:* IceCube Collaboration, képgaléria)

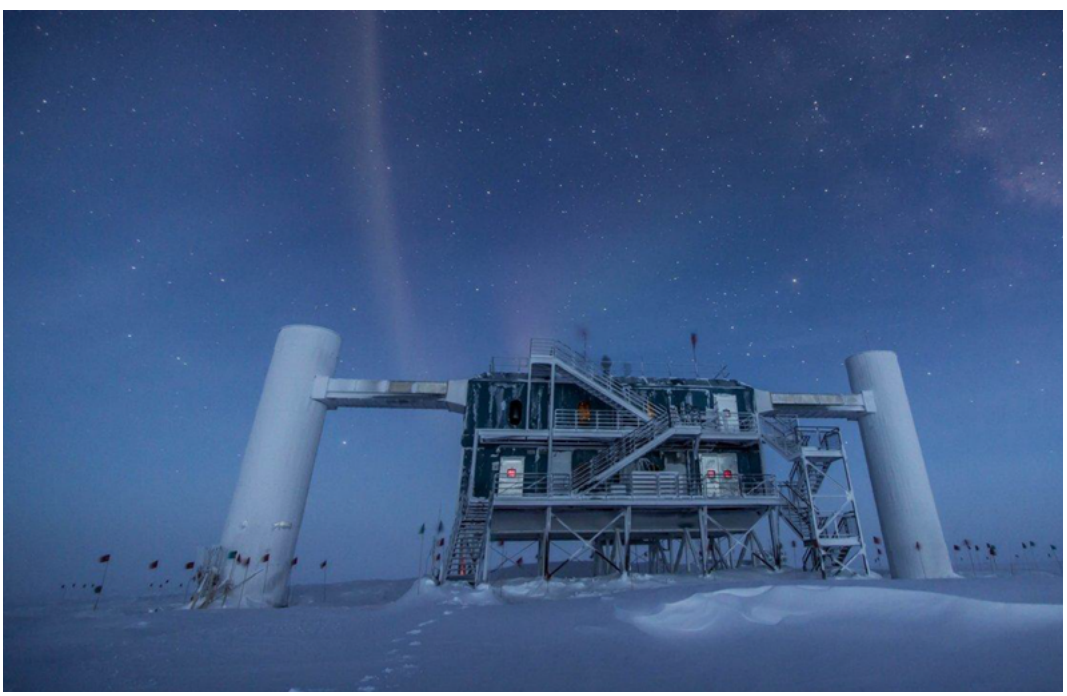
körüli energiával. Ekkora mozgási energiája van egy repülő méhecskének, amely ugyan kicsiny, de mégis csak szemmel látható méretű. A felfedezés az asztrofizikai neutrínóáram létezését jelezte. Azt viszont nem mondta meg, mely égitestek küldték az egyes részecskéket. A források felkutatásához további adatokra és más obszervatóriumok együttműködésére volt szükség [8].

2017 szeptemberében egy nagy energiájú neutrínó automatikus riasztást váltott ki. Érkezési irányában a TXS 0506+056 jelű blazár éppen erős gamma-sugárzást bocsátott ki. A blazár olyan aktív galaxismag, amelynek egyik részecskenyalábja közel felénk mutat. A 2018-ban közölt közös megfigyelések fontos bizonyítékot szolgáltattak arra, hogy az ilyen objektumok neutrínóforrások lehetnek. Ezt követte 2022-ben az NGC 1068 aktív galaxis neutrínósugárzására utaló eredmény, majd 2023-ban a Tejútrendszer síkjából érkező nagy energiájú neutrínók kimutatása. A forrástérkép fokozatosan kirajzolódik, de még korántsem teljes [3, 9, 10].

Az IceCube jelentősége a többféle kozmikus hírvivőt összekapcsoló csillagászatban bontakozik ki. A fény, a neutrínók és a gravitációs hullámok eltérő fizikai folyamatokról adnak információt; együttes vizsgálatuk szigorúbban ellenőrizhetővé teszi az égitestek működéséről alkotott elképzeléseket. A detektor emellett maguknak a neutrínóknak a tulajdonságait is kutatja. A 2025–2026-ban telepített bővítés érzékenyebb műszerei és kalibrálóberendezései ezen a területen is új lehetőségeket kínálnak. Halzen munkájának maradandó eredménye, hogy az alig észlelhető részecskékből használható megfigyelési eszköz lett: a déli jégmező ma távoli galaxisok fizikáját teszi hozzáférhetővé [3, 11].

Irodalom

1. IceCube (2026. október 6.): Francis Halzen, IceCube principal investigator, wins 2026 Physics Nobel Prize.
2. Francis Halzen: szakmai önéletrajz, benne az 1988-as, John Learneddel közös munka adatai.
3. IceCube és társkísérletek: Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A. *Science,* 361, (2018)eaat1378.
4. Trócsányi Zoltán: Neutrínók interferenciája. *Fizikai Szemle,* (2016) 182–189.; Trócsányi Zoltán: Hogyan tegyük láthatóvá a láthatatlant? *Magyar Tudomány,* 2016/4 (2016) 478–487.
5. IceCube: a detektor felépítése és működése. IceCube: a neutrínófizika és az obszervatórium történeti idővonala. IceCube: Drilling IceCube: a story of innovation, expertise and strong will (2014).
6. NobelPrize.org: a 2002. évi fizikai Nobeldíj tudományos háttere.
7. M. G. Aartsen, et al.: The IceCube Neutrino Observatory: Instrumentation and online systems. *JINST,* 12, (2017) P03012.
8. M. G. Aartsen, et al.: Evidence for high-energy extraterrestrial neutrinos at the IceCube Detector. *Science,* 342, (2013) 1242856.
9. R. Abbasi, et al.: Evidence for neutrino emission from the nearby active galaxy NGC 1068. *Science,* 378, (2022) 538–543.
10. R. Abbasi, et al.: Observation of high-energy neutrinos from the Galactic plane. *Science,* 380, (2023) 1338–1343.
11. IceCube: The IceCube Neutrino Observatory gets a major upgrade beneath the ice. (2026. február 12.)



Az IceCube adatközpont a Déli-sarkon. (*Forrás:* IceCube Collaboration, képgaléria)