

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította
A Matematikai és Fizikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

LXI. évfolyam

3. szám

2011. március

AZ ÉG FELTÉRKÉPEZÉSE A TENGER MÉLYÉRŐL: NEUTRÍNÓCSILLAGÁSZAT AZ ANTARES KÍSÉRLETTEL

John Carr

Centre de Physique des Particules de Marseille, Franciaország

A klasszikus csillagászati megfigyelések köre a Naphoz hasonló, látható fényt kibocsátó objektumokra korlátozódik. Az elmúlt században a teljes elektromágneses spektrumra, a rádióhullámoktól a gamma-sugárzásig kiterjesztették a megfigyeléseket. Ez az új típusú, széles hullámhossztartományon működő csillagászat sok, korábban ismeretlen csillagászati jelenséget fedezett fel, például aktív galaxismagokat és gamma-kitöréseket. A neutrínócsillagászat gondolata – a neutrínóra a fotont helyettesítő hírnökként tekintve – még tovább kiterjeszti a Világegyetem objektumainak megfigyelését. Ezen új kutatási terület 20 éve indult a BAJKAL (Szibéria) és az AMANDA (Antarktisz) kísérletekkel. Nemrég a Földközi-tengeren megépítették és elkezdték működtetni az ANTARES neutrínótávcsövet. Jelen munkában az ANTARES első neutrínómegfigyelési eredményeit, továbbá a kísérlet mélytengeri környezetéből adódó egyedi kutatásokat mutatjuk be.

Az ANTARES detektorrendszert egy multidiszciplináris mélytengeri obszervatórium és a hozzá kapcsolódó neutrínótávcső alkotja. A berendezés célja asztro-rezecskefizikai kutatás, azon belül neutrínócsillagászat. A 2008 májusában elkészült távcső tizenkét horgonykábelből áll, amelyek fénydetektorokat tartanak. A tizenkét optikai detektorkábelben tengeri és földtudományi kutatóberendezéseket is elhelyeztek. Van egy tizenharmadik kábel is, ennek feladata a tengeri környezet folyamatos megfigyelése. Az ANTARES fontos jellemzője a fentiekén kívül, hogy állandó nagy sávszélességű adatkapcsolata van a tengerparttal.

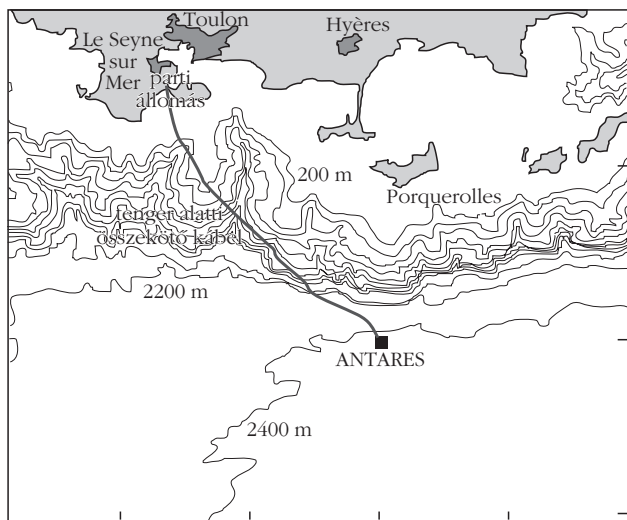
A 2010. május 20-án tartott 8. Marx György Emlékelőadás szerkesztett változata. Fordította Csanád Máté.

A mélytengeri megfigyelő állomás fejlesztése és megépítése sok évig tartott. Az első vizsgálatokat 1996-ban végezték el, ekkor különálló horgonykábeleket használtak. A parttal létesített állandó vezetékcsatlakozás 2002 novemberétől működött, és 2003-ban a horgonykábelek első prototípusait sikerült hosszabb időtartamra összekapcsolni a parttal. Később a detektor egyre több eleme elkészült, a berendezések 2003-tól oceanográfiai adatokat is szolgáltattak.

Tudományos célok

A kombinált neutrínó- és mélytengeri obszervatóriumnak a tudomány széles spektrumában lesz lehetősége, hogy nagy felfedezéseket tegyen. A neutrínó, mint a kozmosz távoli helyeinek hírnöke, egyedülálló tulajdonságai révén sokféle szempontból áttöréshoz vezet a Világegyetem megértésében. A látható fény tartományában működő hagyományos csillagászat leginkább a Naphoz hasonló csillagokat látja. A kiterjesztett, széles hullámhossztartományú csillagászat, amely rádióhullámoktól a gamma-sugarakig képes elektromágneses sugárzás észlelésére, sok új jelenséget fedezett fel: aktív galaxismagokat, gamma-kitöréseket és mikrovavarárokat. A neutrínótávcsövek továbbfejlesztik ezen újfajta csillagászat felfedezőképességét, és alapvető információval szolgálnak majd az ismert források természetét illetően. Ezen túl lehetővé teszik eddig ismeretlen források felfedezését, amelyekből a nagy anyagsűrűségű környezet hatására csak neutrínók tudnak kilépni.

A mélytengeri elhelyezés és a parttal létesített állandó kapcsolat segítségével folyamatosan, hosszú



1. ábra. Az ANTARES helyszíne Toulontól délkeletre, Franciaországban. A parti állomás és az összekötő kábel is látható a térképen.

időn át lehet mérni a tenger paramétereit. Ilyen adatok jelenleg még nem állnak rendelkezésre, így az új mérések várhatóan felfedezéseket és innovációt eredményeznek a tengertudományok széles területein is.

A detektor építésének állomásai

Az ANTARES együttműködés 1996-ban kezdte a neutrínótávcső létrehozására irányuló kutatási és fejlesztési munkát. Az első feladat az automata horgonykábelek telepítése és működtetése volt, ezekkel már lehetett vizsgálni a víz és a környezet tulajdonságait az ANTARES helyszínén, amely a francia partoknál, Toulontól délkeletre található az északi szélesség $42^{\circ} 48'$, keleti hosszúság $6^{\circ} 10'$ ponton, ahogy az 1. ábra mutatja. A terület felmérése [2–4] során hatvannál is több kábelt telepítettek. Mindenhol alapos méréseket végeztek a környezetből jövő fénysugárzás (biolumineszcencia, biolerakódások, üledék és fényszóródás) erősségét illetően.

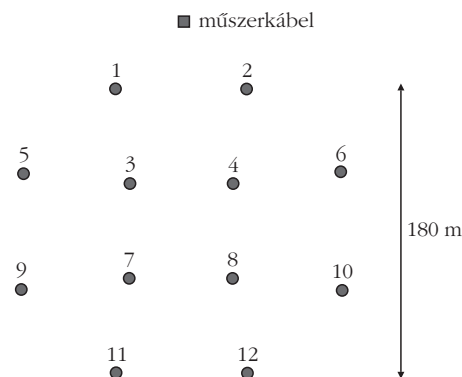
Az ANTARES első, a szárazföldi adatgyűjtő rendszerrel összekötött tesztkábelét 1999 novemberében telepítették, és „demonstrációs kábelnek” nevezték. Ez a kábel egy régi, a tengerfenéken futó France Telecom vezetékét használt, ami összekötötte a kábelt a marseille-i adatfelvevő állomással. A tesztkábel Marseille közelében, egy speciális helyszínen, 1200 méter mélyen helyezték el. Néhány hónapig tartó működtetése során a rendszer koncepciójának helyességét vizsgálták, elsősorban az akusztikus pozicionáló rendszert, de hét optikai érzékelővel a kozmikus müonok észlelhetőségét is ellenőrizték.

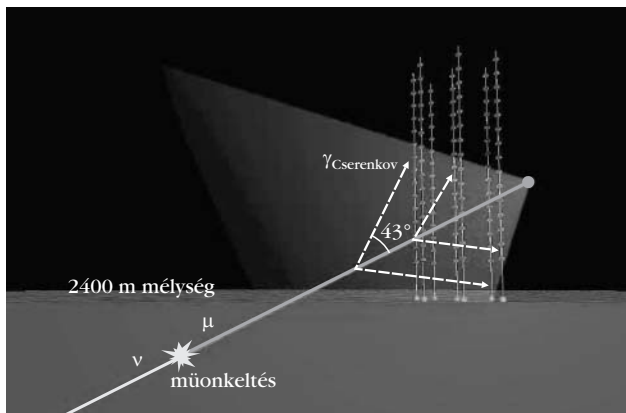
A végleges detektor felépítése 2001-ben kezdődött, ennek első lépéseként egy új vezetékot telepítettek a végleges helyszín és a La Seyne-sur-Merben lévő parti állomás között. Ezt a vezetékot, amely jelenleg a fő elektro-optikai vezeték (Main Electro-Optical Cable, MEOC), 2001 novemberében helyezték el a tengerfe-

néken. Itt a vezeték végén kezdetben csak egy visszacsatoló volt. 2002 novemberében a vezeték végét felszínre hozták, csatlakoztatták a kapcsolódobozhoz (Junction Box, JB), majd újra telepítették a tengerben. Azóta az akkumulátorral üzemeltetett kapcsolódoboz a rendszer paramétereit folyamatosan méri és elküldi a parti mérőállomásra, a rendszer működése pedig immár évek óta tökéletes.

2003-ban a végleges technológiához nagyon hasonló prototípusokat teszteltek. 2002. november és 2003. március között két kábelt telepítettek, a tesztberendezéseket tartalmazó MIL kábelt és a PSL kábelt. Az utóbbi egy tizenöt optikai szenzort tartalmazó detektorkábel volt. Ezeket 2003. május és július között üzemeltették, és a kialakítás helyességét részben igazolták, másrészt néhány problémára is fény derült: az optikai átvitelben adatvesztéséget észleltek és szivárgást találtak több helyen. Mindemellert a PSL négy hónapig mérte a beütések gyakoriságát az optikai detektorokban, és meghatározta a biolumineszcencia okozta háttérsugárzást. A MIL és PSL kábelekkel szerzett tapasztalat alapján néhány ponton megváltoztatták a detektorok felépítését. Ennek nyomán készült el a MILOM nevű kábel, amelyet 2005. március 18-án telepítettek a tengerbe, a parttal pedig április 12-én létesítettek kapcsolatot. E kábel több havi sikeres működtetéséről az [5] hivatkozásban olvashatunk. A végleges detektorkábeleket 2006. február és 2008. május között telepítették és csatlakoztatták. A telepítés a Castor hajó segítségével történt, a tengerfenéken elvégzett munkálatokban a Nautile tengeralattjáró és a francia nemzeti tengerészeti kutatóintézet (IFREMER) Victor nevű távirányítású járműve állt rendelkezésre. Az első detektorkábelt 2006. február 14-én telepítették, majd két hét múlva csatlakoztatták. A második kábel telepítésére 2006 októberében került sor. 2007 januárjában további három kábelt csatlakoztattak, majd még ötöt decemberben. A végleges konfiguráció az utolsó két kábel telepítésével lett teljes 2008 elején, a csatlakoztatás pedig 2009. május 29-én történt meg. A kábelek végleges tengeri elrendezését a 2. ábra mutatja.

2. ábra. Az ANTARES detektor tengeri elrendezése. A rendszert tizenkét neutrínódetektálásra használt kábel (körök) és egy műszerkábel (négyzet) alkotja. A detektorkábeleket 2006. március és 2008. május között telepítették, a műszerkábel két verzióját 2005. márciusban és 2007. decemberben.



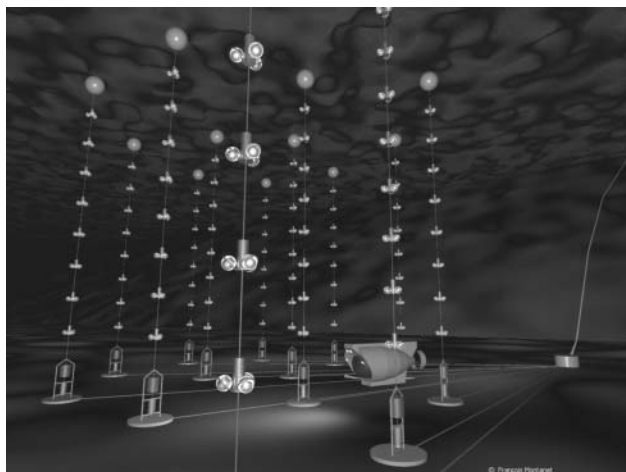


3. ábra. A neutrínók mélytengeri észlelésének elve. Az ábra alján látható, ahogy neutrínó (ν) egy müon (μ) kelt. A tengervízben látható szürke terület a müon Cserenkov-sugárzása által egy adott pillanatban lefedett tartományt jelzi, amelynek hatására több detektor ad jelet. A jobbról rekonstruálják a Föld túloldaláról érkező neutrínó irányát és energiájának nagyságát az általa kiváltott müon tulajdonságai alapján.

Az ANTARES felépítése

A mélytengeri neutrínódetektorok a rendszeren áthaladó müonok Cserenkov-sugárzását észlelik. Ezek a müonok a neutrínó és a tengervíz vagy a tengerfenék szikláinak kölcsönhatásából keletkeznek. Ezért gömb alakú fotoelektron-sokszorozók, azaz optikai modulok mátrixát [6] helyezik el a tengerfenék közelében. A müon pályája a Cserenkov-fotonok beérkezésének idejéből és az optikai modulok helyéből rekonstruálható. Ezzel indirekt módon kereshetők a neutrínók a felfelé menő müonok kiválasztásával, ezeket a müonokat ugyanis az egész bolygót átszelő neutrínók hozták létre. A bejövő neutrínó iránya majdnem párhuzamos a keletkező müonéval, így 10 TeV feletti energiájú neutrínók esetén az irány meghatározásának pontossága eléri a $0,2^\circ$ szöveget. A méretéből és a

4. ábra. A neutrínótávcső fantáziarajza mutatja a kábeleket, a tengerfenéken lévő összekötő vezetékeket, a kapcsolódobozt (JB) és a partra kimenő vezetéket (MEOC). Az érthetőség kedvéért a kábelenkénti emeletek számát csökkentve ábrázoltuk, és a méretarány is torzított.



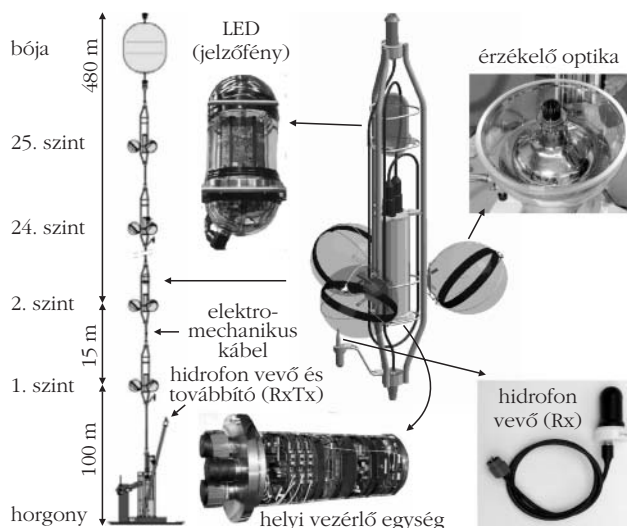
fotoelektron-sokszorozók közötti távolságból adódóan az ANTARES által rekonstruálható neutrínók minimális energiája 20 GeV. Az effektív terület a neutrínó energiájának növelése esetén gyorsan emelkedik, PeV energiájú neutrínók esetén eléri az egy négyzetmétert. A neutrínók mélytengeri detektorokkal történő észlelésének elvét a 3. ábra mutatja.

A neutrínótávcső 12 kábelből áll, amelyek egyenként 480 m hosszúak. A tizenkét kábel hasonló felépítésű: a tengerfenékhez vannak rögzítve, a tetejükön lévő, szintetikus habból készült, a vízben lebegő bója pedig közel függőleges helyzetet biztosít számukra. Az elrendezésről készített fantáziarajzot a 4. ábra, egy kábel tipikus elemeit pedig az 5. ábra mutatja. Minden kábel összesen 75 darab, emeletenként hármast tartalmazó optikai modul található. A tengerfenék a detektorrendszer helyszínén 2474 m mély, az optikai modulok 2000 m és 2400 m között helyezkednek el.

A kábel felett a bóják szabadon úsznak, így a kábelek a tengerárammal együtt mozognak. Ezen mozgások – a tengeráramok esetén tipikusnak mondható 5 cm/s sebesség mellett – néhány méteresek. Az optikai modulok helyzetét a kábeleken és a tengerfenéken elhelyezett akusztikus jeltovábbítók és jelfeldolgozók ellenőrzik, továbbá iránytűk és dőlésszögmérők is vannak minden emeleten. Ez a pozicionáló rendszer valós idejű helyzetmérést tesz lehetővé. Többnyire két percenként történik egy ilyen mérés, amelynek során minden optikai modul helyzete 10 cm pontossággal meghatározható.

Az ANTARES alapértelmezett működési módja során minden optikai modul esetén az egyharmad fotoelektronnak megfelelő szintet meghaladó jeleket és a hozzájuk tartozó időt továbbítja. Az időmérés referenciapontja egy központi órajel, amelyet minden elem felé továbbítanak. A jeleket a partra lévő számítógépfarmra küldi a rendszer, ami majd a müonoknak, vagy más, fényt létrehozó fizikai folyamatnak megfelelő beütési mintázatot keres. Az optikai modu-

5. ábra. Az ANTARES neutrínótávcső egyik kábele, mellette az egyik szint műszeregyüttese. Az érthetőség kedvéért a 25-ből csak négy emeletet mutat az ábra, nem méretarányosan.

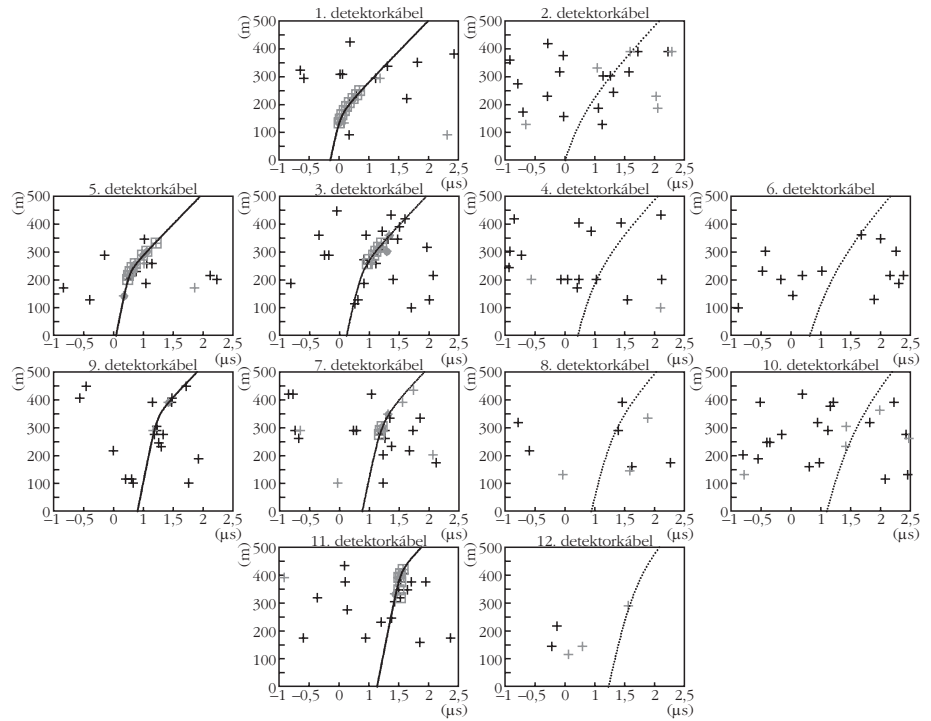
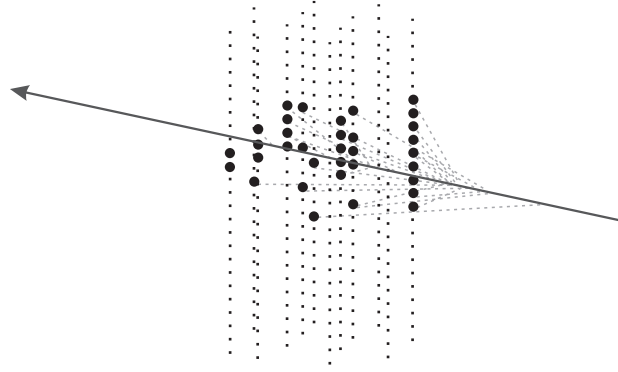


lok hármas csoportosítása lokális koincidenciafeltétel felállítását teszi lehetővé, megkönnyítve ezzel a mintázatkeresést. A front-end elektronika (amely a beérkező jeleket feldolgozza) lehetővé teszi a teljes jelalak vizsgálatát, 128 mintára bontva, amelyek egyenként 2 ns eltéréssel érkeznek be. Ez az elektronika kalibrációja során nyújt segítséget.

Az ANTARES tizenharmadik kábele egy műszerkábel, amelynek fő feladata a neutrínótávcső kalibrálása, de több tenger- és földtudományi mérőeszközt is tartalmaz. Ezt az IL07 jelű kábelt a fent említett, 2005. március és 2007. június között üzemelő MILOM kábelből alakították ki, és 2007. decembere óta működik.

A MILOM-on négy optikai modul volt, egy hármas modul a második emeleten és egy egyedüli modul a legfelső szinten. A kábelen három erős fényforrás is található, főként a modulok időzítésének kalibrációja céljából: egy lézer irányfény a kábel alján lévő csatlakozón (Bottom String Socket, BSS) és két optikai LED irányfény a legelső és a legfelső emeleten. A kábel alakjának meghatározásához a MILOM minden emeletét ellátták két duplatengelyes dőlésszögmérővel és iránytűkkel. Ezen felül elhelyeztek két akusztikus pozicionáló modult is minden emeleten: egy adó-vevő modult (RxTx) jelátalakítóval a BSS-en, és egy hidrofonnal ellátott vevő modult (Rx) a legelső emeleten.

A fent említett kalibrációs műszereken kívül (amelyek a neutrínótávcső céljait szolgálják) a MILOM több környezeti megfigyelésekre szolgáló berendezést is tartalmazott. Elhelyeztek rajta egy akusztikus Doppler-elvű áramlásprofil mérőt (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP) a mélytengeri áramlások irányának és intenzitásának mérésére; egy hangsebességmérőt (a lokális hangsebesség mérésére); egy műszert a tengervíz vezetőképességének és hőmérsékletének mérésére (Conductivity and Temperature Probe). A MILOM része volt továbbá egy átvitmérő a víz fényelnyelésének vizsgálatára; egy hidrofon (Spy Hydrophone), amellyel a pozicionáló berendezések, a felület vagy biológiai források akusztikus aktivitását mé-

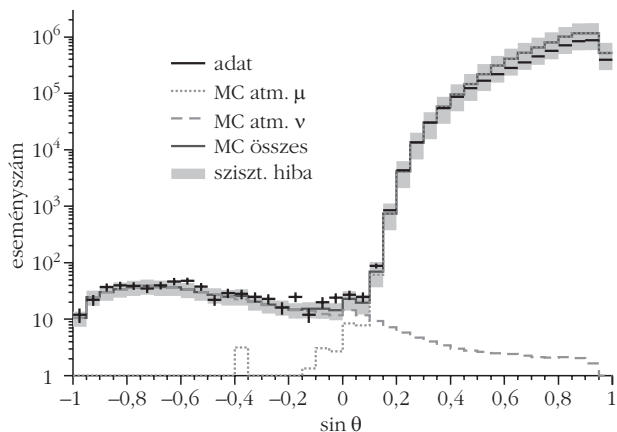


6. ábra. Egy neutrínó esemény. Fent: a beütések háromdimenziós szemléltetése és a rekonstruált pálya. A szürke szaggatott vonalak a pályáról az optikai modulokba beérkező fotonokat mutatják. Lent: A kétdimenziós ábrák mindegyike egy-egy detektorkábelre vonatkozik. A függőleges tengelyeken a beütést észlelő optikai modul vertikális pozíciója, míg a vízszintes tengelyeken a foton beérkezésének ideje látható. A pontok az észlelt fotonoknak felelnek meg, a vonalak a rekonstruált pályának.

rik; végül egy szélessávú szeizmométer, amelyet a tengerfenék üledékében helyeztek el, 50 méterre a MILOM-tól, és a területen mérhető szeizmikus aktivitást vizsgálja.

A neutrínótávcső által felvett adatok

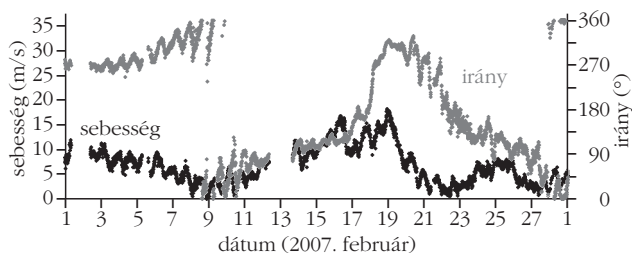
A neutrínótávcső fő célja a távoli kozmoszból érkező neutrínók észlelése. A 6. ábra egy felvett neutrínó eseményt mutat. A kísérletek távlati célja neutrínókat kibocsátó távoli csillagászati objektumok, például aktív galaxismagok vagy mikrovazárok azonosítása. Ezek az objektumok az égbolt egy adott pontjáról jövő eseményként jelennek meg a kísérletben. A detektorok fotoelektron-sokszorozója a Föld felé fordul, mert a kísérlet a bolygót átszelő neutrínók azonosítá-



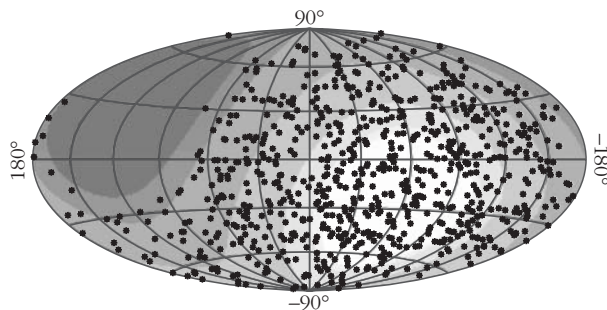
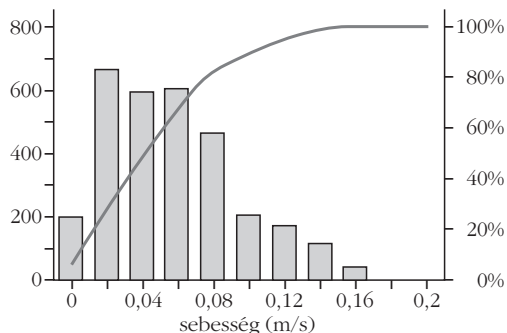
7. ábra. Rekonstruált események eloszlása a vízszintessel bezárt θ szög szinuszában függvényében. Negatív érték felfelé menő pályának felel meg, és többnyire neutrínóból származik. Az adatokat feketével, a Monte Carlo (MC – atmoszférikus müonokra és neutrínókra) szimulációkat szürkével ábráztuk, ahogy a jelmagyarázat mutatja.

sára koncentrálnak. A 7. ábra a 2007 és 2008 során felvett és rekonstruált neutrínóesemények szögeloszlását mutatja. A felfelé menő (a Földet átszelő) események többnyire neutrínókból származnak, míg a lefelé menő pályák leginkább a tengerbe a detektor mélységéig behatoló kozmikus müonokból adódnak. A felfelé menő események galaktikus koordináta-rendszerben vett beérkezési irányát mutatja a 8. ábra. Jelen állás szerint az ANTARES által felvett események eloszlása konzisztensen magyarázható kizárólag a Föld légkörébe érkező kozmikus sugárzásból keletkező neutrínókkal és müonokkal.

9. ábra. Az ábrán MILOM kábelre szerelt ADCP-vel egy egyhónapos mérési periódus során mért áramlási sebesség (fekete) és irány (szürke) látható.



10. ábra. Az előző ábrával megegyező időtartam során mért sebességek eloszlása. A vastag szürke vonal a hisztogram integrálját jelenti; ennek segítségével megállapítható, hogy az időszak 75%-ában az áramlási sebesség 8 cm/s alatt volt.



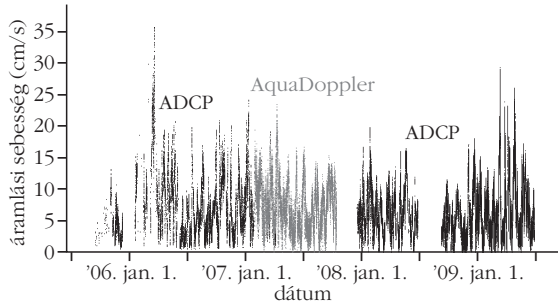
8. ábra. Az észlelt neutrínóesemények eloszlása a 2007-ben és 2008-ban felvett adatok alapján. A koordináta-rendszert a Tejútrendszer jelöli ki: a galaxisunk középpontja az origó, míg a síkja az x tengely mentén van. (A tudományos következtetések levonását elkerülendő a mérési pontok valamelyest elkenve vannak ábrázolva.)

A környezetfigyelő műszerek adatmintái

A parttal vezetékessé kapcsolatban álló mélytengeri megfigyelőállomás kivételes lehetőséget kínál a különféle tengertudományi területek számára. Az állandó összeköttetés eredményeként lehetséges az adatok valós idejű feldolgozása. A mélytengeri környezet megfigyelése mellett a valós idejű adatfelvétel lehetővé teszi az adatminőség és különféle átviteli paraméterek folyamatos ellenőrzését. Az ANTARES műszereinek többségét a fizikus és a tengertudós közösség is használja, de vannak külön oceanográfiai vagy biológiai kutatásokra kifejlesztett eszközök is. Kulcsfontosságú a tengertudományok számára az is, hogy a multidiszciplináris megfigyelőállomáson hosszú távú mérések is elvégezhetők. Az adatfelvételi paramétereket is folyamatosan állítani lehet, a tipikus mintavételi idő egy perc és fél óra között változik a használt eszköztől függően.

Az óceánok áramlása – és globális változásokra való hatása – szempontjából kiemelkedő fontosságú a tengeráramlatok vizsgálata. Az állomás helyszínén 2005. március óta közel folyamatosan mérik az áramlási sebességet, különböző műszereket használva: az ADCP a MILOM kábelre, a két ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler, lásd fent) az IL07-en, ezen felül az ötös számú kábelre elhelyeztek egy Aquadopp áramlásmérőt is. Az ADCP típusú áramlásmérők a sebesség nagyságát és irányát nagyfrekvenciás hanghullámok Doppler-eltolódásával mérik. Az ANTARES ADCP berendezései 300 kHz frekvenciával végzik méréseiket, és 150 méter magas oszlopban megadják a tengeráramlatok paramétereit. A 9. ábra egy egyhónapos mérési időszak adatait, az áramlás sebességét és irányát ábrázolja. Tisztán kivehető az áramlás 17 órás periódusidővel történő oszcillációja. A különböző sebességértékek eloszlását a 10. ábra mutatja.

A 11. ábra a négyéves adatfelvételi periódus során mért áramlási sebességek egy sorozatát mutatja. Az áramlási irányok polárkoordináta-rendszerben vett eloszlását a 12. ábra mutatja. Az eloszlást a földrajzi helynél ábráztuk, így látható, hogy esetenként ellentétesre forduló, többnyire kelet-nyugati áramlást tapasztaltunk.



11. ábra. A 2005 júliusa óta mért áramlási sebességek. Az adatok többnyire az ADCP-től származnak, de 2007. június és december között az ANTARES ötös számú kábelén található Aquadopp mérési adatait ábráztoltuk.

Összegzés

Többévi kutatás és fejlesztés után 2008. márciusban az ANTARES neutrínótávcső tervezése és megépítése befejeződött. A detektor különféle elemei több mint négy éven át megbízhatóan működtek, és mind a neutrínócsillagászat, mind a környezetkutatás számára rengeteg adat gyűlt össze. Az eredmények a hosszú időtartamra tervezett, akár állandó mélytengeri tudományos megfigyelőállomások jogosultságát bizonyítják.

Irodalom

1. M. Ageron et al.: Performance of the First ANTARES Detector Line. *Astroparticle Physics* 31 (2009) 277.



12. ábra. A tengeráramlás irányeloszlása az ANTARES helyszínén.

2. P. Amram et al. (ANTARES Collaboration): Sedimentation and fouling of Optical Modules at the ANTARES site. *Astropart. Phys.* 19 (2003) 253.
3. P. Amram et al. (ANTARES Collaboration): Background light in potential sites for the ANTARES undersea neutrino telescope. *Astropart. Phys.* 13 (2000) 127.
4. J. A. Aguilar et al. (ANTARES Collaboration): Transmission of light in the deep sea at the site of the ANTARES neutrino telescope. *Astropart. Phys.* 23 (2005) 131.
5. J. A. Aguilar et al. (ANTARES Collaboration): First results of the Instrumentation Line for the deep-sea ANTARES neutrino telescope. *Astropart. Phys.* 26 (2006) 314.
6. J. A. Aguilar et al. (ANTARES Collaboration): Study of large hemispherical photomultiplier tubes for the ANTARES neutrino telescope. *Nucl. Inst. Meth.* A555 (2005) 132.
7. J. A. Aguilar et al. (ANTARES Collaboration): The data acquisition system for the ANTARES Neutrino Telescope. *Nucl. Inst. Meth.* A570 (2007) 107.