

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

LXII. évfolyam

5. szám

2012. május

A FÉNYNÉL GYORSABB NEUTRÍNÓK TÜNDÖKLÉSE ÉS BUKÁSA – egy téves felfedezés anatómiája

Horváth Dezső, MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest és MTA Atommagkutató Intézet, Debrecen
Nagy Sándor, Debreceni Egyetem és MTA–DE Részecskefizikai Kutatócsoport
Nándori István, MTA Atommagkutató Intézet, Debrecen és MTA–DE Részecskefizikai Kutatócsoport
Trócsányi Zoltán, Debreceni Egyetem és MTA–DE Részecskefizikai Kutatócsoport

Áttekintjük a fénynél gyorsabb neutrínók előéletét, látszólagos megfigyelésük és azok cáfolata történetét, valamint a hozzá fűzött értelmezési lehetőségeket. Megmutatjuk, bizonyos esetekben, a tudomány fejlődése szempontjából milyen hasznos lehet az ilyen – egyébként hibásnak bizonyuló – kísérleti eredmény.

Neutrínókísérletek

A neutrínófizikát története során végig rejtélyek kísérték és kísérik ma is, az olvasó részletes leírást talál *Fényes Tibor* cikkében [1]. *Pauli* már eleve azért vezette be, mint észlelhetetlen semleges részecskét *neutron* néven, hogy rendbehozza az energiamegmaradást az atommagok béta-bomlásaiban. Később, amikor előkerült az *igazi* neutron, *Fermi* lekicsinyítette olaszul *neutrínó*vá. A neutrínókon végletes a gyenge kölcsönhatás paritássértése: gyakorlatilag csak balra (a mozgásirányával ellenkező irányban) polarizált neutrínók és jobbra polarizált antineutrínók léteznek. Sokáig azt hittük, hogy nincs tömegük. Egymásba alakulásuk, a *neutrínóoszilláció* felfedezése vezetett a nullánál nagyobb tömegük felismeréséhez.

A neutrínóoszilláció megfigyelése megoldotta a neutrínófizika számos rejtélyét. Tisztázta, hogy azért látunk a várakozásnál sokkal kevesebb elektron-neutrínót a Nap atommag-reakcióiból és müon-neutrínót a légkörrel kölcsönhatásba lépő kozmikus sugarakból, mert a háromféle töltött leptonhoz (elektron, müon és tau-lepton) tartozó neutrínófajta egymásba tud repülés közben alakulni. A számos működő neutrínókísérlet (1. ábra) közül három földi távolságokon tanul-

mányozza a neutrínóoszillációt: részecskegyorsítóban előállított müon-neutrínó-nyalábot irányítanak a néhány száz km-re fekvő, föld alatti észlelőrendszerhez. Amerikában a Fermilab a 735 km-re, a Soudan-bányában elhelyezett MINOS-detektorhoz¹ (2. ábra), Japánban a KEK-laboratórium a 295 km-re fekvő Kamioka-bánya Super-Kamiokande² detektorához (3. ábra, azon figyelték meg 15 éve először a neutrínóoszillációt), a Genf melletti CERN pedig a 732 km-re, Rómától délre fekvő Gran Sasso föld alatti laboratórium felé.

A neutrínóoszilláció felvet egy újabb problémát. Általában akkor következik be keveredés két részecskeállapot között, ha a tömeg-sajátállapotuk nem egyezik valamelyik kölcsönhatáshoz tartozó sajátállapotukkal. A neutrínó azonban a Standard modell értelmében csak a gyenge kölcsönhatásban vesz részt. A Standard modell egyenleteibe a tömegeket mesterségesen csempésszük be (és annak örülünk, hogy a Higgs-mechanizmus ezt egyáltalán lehetővé teszi). Ha ezt úgy tesszük, hogy a gyenge és a tömeg-sajátállapotok különböznek, akkor nincs szükség ötödik erőre, hogy felbontsa a neutrínó állapotait.

A neutrínóoszilláció felfedezése tehát úgy értelmezhető, hogy a neutrínóknak van tömege. Ezzel kapcsolatban érdekes kérdés, hogy mekkora a neutrínók sebessége. Amíg feltételezzük, hogy a neutrínók tömege zérus, a speciális relativitás elve szerint sebes-

¹ Main Injector Neutrino Oscillation Search, remek fantázianeveket találunk ki.

² Kamioka Nucleon Decay Experiment, eredetileg a protonbomlás ellenőrzésére.



1. ábra. Neutrínókísérletek bányában, alagútban, víz és jég alatt, reaktorok közelében. A föld vagy vízréteg csökkenti a légkörből és a Naptól jövő töltött részecskék hatását, a víz vagy jég egyben észlelőközegként szolgál Cserenkov-sugárzás segítségével.

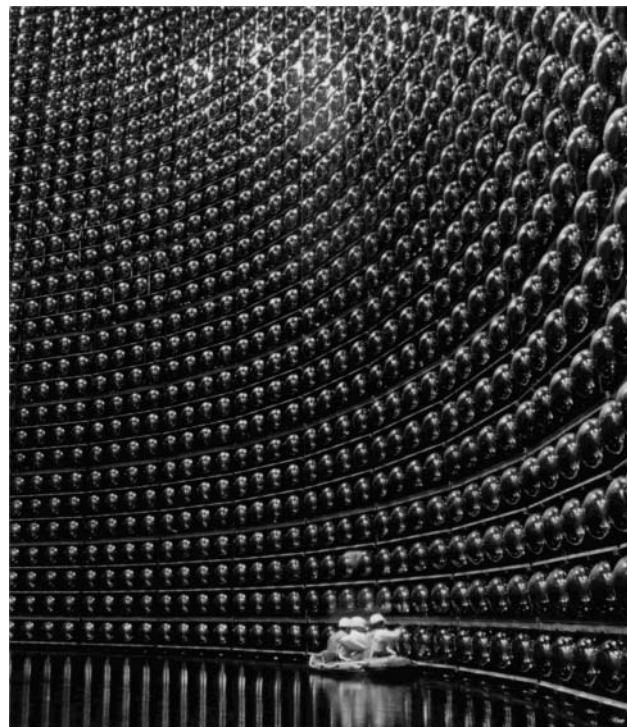
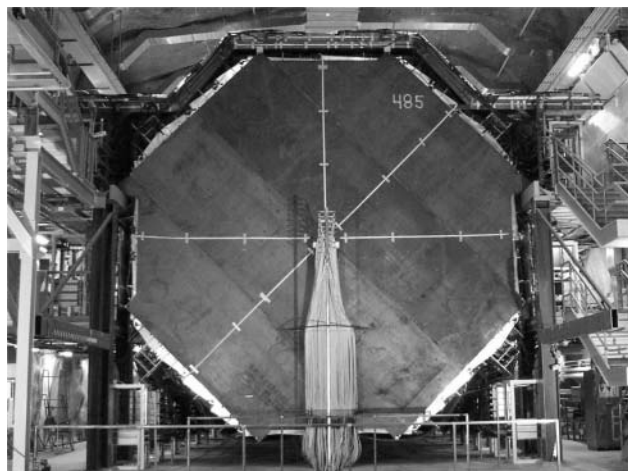
ségük üres térben a vákuumbeli fénysebességgel lesz egyenlő. Véges tömegű részecske a relativitás elvéből következően nem érheti el a fénysebességet, bár azt tetszőlegesen megközelítheti, miközben energiája minden határon túl növekszik.

Részecskék mérésének hagyományos módja adott távolság berepüléséhez szükséges idejük (time of flight = ToF) megmérése. Az ilyen mérés viszonylag egyszerű, amíg a részecske sebessége nem nagy: nem túl nagy távolságot, illetve nem nagyon rövid időt nagy pontossággal tudunk mérni; a kettő hányadosa megadja a sebességet. Ha viszont a részecskesebesség nagyon nagy, akkor vagy nagyon nagy távolságot, vagy nagyon rövid időt, vagy egyszerre mindkettőt igen pontosan kell tudnunk mérni. Sokáig ez tette nehezzé a fénysebesség pontos meghatározását is. A

múlt század második felében már nem is erre a módszerre alapuló mérésekkel sikerült olyan pontosan meghatározni a fény sebességét üres térben, hogy *Bay Zoltán* javaslatára a fény által a másodperc 299 792 458-ed része alatt megtett út lett a méter meghatározásának alapja (1. táblázat).

3. ábra. Technikusok ellenőrzik a Super-kamiokande detektor fotoelektron-sokszorozóit töltés közben. A detektor érzékelő közege 50 000 tonna szupertiszta víz, amelyben a neutrínók ütközése Cserenkov-fényt kelt.

2. ábra. A MINOS (Main Injector Neutrino Oscillation Search) kísérlet észlelőrendszere a Soudan-bányában.



A vákuumbeli fénysebesség meghatározásának időrendi története

Év	kutatók	mérés módja	c (km/s)
1675	Rømer és Huygens	Io periódusából	220 000
1729	James Bradley	asztronómiai fényelhajlásból	301 000
1849	Hippolyte Fizeau	ToF forgó tárcsával	315 000
1862	Léon Foucault	ToF forgó tükörrel	298 000±500
1907	Rosa és Dorsey	elektromágneses állandókból	299 710±30
1926	Albert Michelson	ToF forgó tükörrel	299 796±4
1950	Essen és Gordon-Smith	üregrezonátorral	299 792,5±3,0
1958	K. D. Froome	rádió-interferometriával	299 792,50±0,10
1972	Evenson és mtársai.	lézer-interferometriával	299 792,4562±0,0010
1983	17. Mérésügyi Konferencia	méter meghatározása	299 792,458 (pontos)

A MINOS-kísérlet 2007-ben közölte [2], hogy az oszcilláció tanulmányozása mellett megmérték a neutrínók sebességét. A neutrínók a vákuumbeli fénysebességgel számíthatóhoz képest 126 ± 32 (stat) ± 64 (sziszt) ns-mal ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$) gyorsabban tették meg a 735 km-t, mint a fény vákuumban. Az első bizonytalanság statisztikus, tehát az észlelt neutrínók számától függ, a második szisztematikus, azaz a kísérlet mérési és adatelemzési technikájából következik. A végeredményhez a kétféle bizonytalanságot a statisztika szabályai szerint összegezzük. A számokból látszik, hogy az adatgyűjtést nem volt értelme folytatni, hiszen a statisztikus bizonytalanság már csak a fele volt a szisztematikusnak. A MINOS neutrínóinak a fényhez viszonyított sebességkülönbsége

$$\frac{v_\nu - c}{c} = (5,1 \pm 2,9) \cdot 10^{-5} > 0$$

volt. Eszerint v_ν nagyobb, mint a fénysebesség, de csak kétszeres mérési bizonytalanságon belül, tehát nem szignifikánsan, és a kísérletezők konklúziója az

4. ábra. Az SN1987A szupernóva képe a Tarantula csillagköd szélén.



volt, hogy megerősítették: a neutrínók közel fénysebességgel terjednek.

20 évvel korábban már történt ilyen sebességmérés. Az 1987A szupernóva [3] neutrínóit néhány órával a felvillanása előtt észlelték a működő nagy detektorok, a japán Kamiokande és az amerikai IMB-kísérlet.³ Szupernóvák esetén a keletkező neutroncsillag felszabaduló kötési energiája túlnyomórészt neutrínók formájában távozik: a Nagy Magellán-felhőben, 168 000 fényévre levő 1987A esetében ez mintegy $\sim 10^{58}$ db, $\langle E_\nu \rangle \sim 10\text{--}15$ MeV energiájú elektron-neutrínót jelentett, amelyek fele az első

1–2 s, a többi 10–100 s alatt lép ki. 1987 február 23-án a 2140 tonnás Kamiokande hajnali 2 óra 52 perckor a jellemző háttérrel, 1 neutrínót észlelt 10 s-ként, 7 óra 35 perckor pedig 11 neutrínót 13 s alatt; a jóval nagyobb tömegű, 6000 tonnás IMB 2 óra 52 perc körül nem észlelt neutrínót, 7 óra 35 perckor viszont 8 neutrínót 4 s alatt. A szupernóva fényjele késve érkezik, mivel a neutrínók gyakorlatilag akadálytalanul lépnek ki, amíg a hőnek ki kell verekednie magát a felrobbant csillag anyagából: az SN1987A fénypontját még másfél évig látni lehetett (4. ábra). Az SN1987A tanulmányozása ahhoz a következtetéshez vezetett, hogy a neutrínók sebessége nagyon pontosan egyezik a fényével vákuumban:

$$v_\nu = (1 + \delta) c, \text{ ahol } |\delta| < 10^{-9}.$$

Az OPERA-kísérlet

Az OPERA-kísérlet⁴ 2011. szeptember 21-én kiszivárogtatta, majd másnap bejelentette, hogy fénysebességnél gyorsabb ($\delta \approx 2,5 \cdot 10^{-5}$) neutrínókat észleltek a CERN⁵ és az olaszországi Gran Sasso Nemzeti Laboratórium között (732 km). Beküldtek egy részletes cikket [4] a nagyenergiás fizika elektronikus könyvtárába és előadást tartottak róla a CERN-ben. Az OPERA-kísérletet is a neutrínóoszcilláció vizsgálatára építették, az eredeti célja a müon-neutrínó tau-neutrínóvá alakulásának kimutatása volt. Igen érdekes a mérőberendezés szerkezete (5. ábra): két egyforma modulból áll, bennük szcintillációs lapszámlálók változtatják egymást fotoemulziós lemezekkel. Amikor a szcintillátor jelzi, hogy tau-neutrínóra valló esemény történt, a megfelelő fotoemulziós lemezeket kiemelik,

³ Irvine–Michigan–Brookhaven együttműködés.

⁴ Oscillation Project with Emulsion tRacking Apparatus.

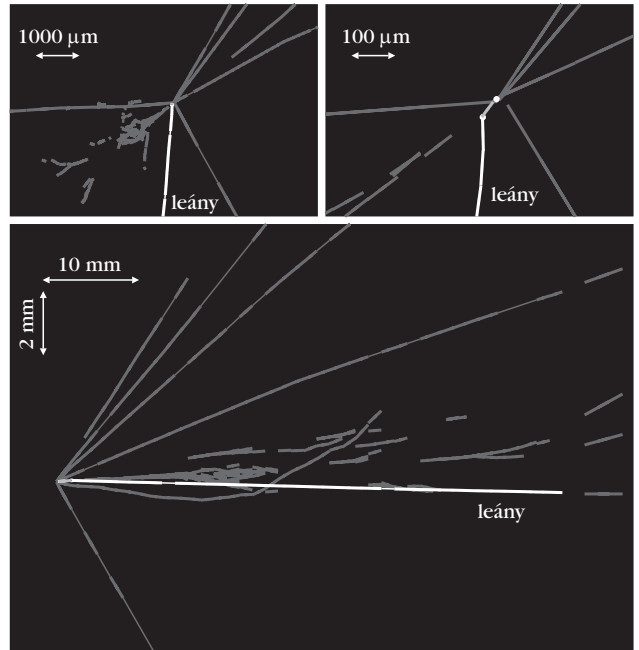
⁵ CNGS, CERN Neutrinos to Gran Sasso, CERN-neutrínók Gran Sasso felé.



5. ábra. Az OPERA-kísérlet a Gran Sasso föld alatti laboratóriumban.

kiolvasásra elviszik, majd idővel – törölve – visszarakják. A szcintillátor gyors, a fotoemulzióknak kitűnő a képalkotása. A CNGS és az OPERA három évi működése alatt sikerült is azonosítaniuk egy tau-neutrínót (6. ábra).

A fénynél gyorsabb neutrínók megfigyelését tudományos körökben igencsak kétkedve fogadták. Az utóbbi évtizedekben számos esetben megjelent híradás a részecskefizika addigi tapasztalatainak ellentmondó kísérleti eredményről, amely később rendre hamisnak bizonyult (dibarionok, pentakvarkok, különböző Higgs-bozonok és más egzotikus részecskék). A kiszivárogtatás miatt a CERN főigazgatója körlevelet küldött a CERN 13 000 kutatójának mértéktartást kérve a témára vonatkozó nyilatkozatokban. Kiadta továbbá a következő közleményt: „Engedélyeztem a CERN-i előadást, mert a laboratóriumnak kötelessége az [OPERA] együttműködésnek lehetővé tenni, hogy a tudományos közösség elé tárja megvitatásra, amit látott.” Az OPERA-kísérlet 200 résztvevője közül 175 jegyezte a cikket (a többi nem adta hozzá a nevét); közölték, hogy fél évet töltöttek a kísérlet ellenőrzésével, de nem találtak hibát rajta. Igazából a hibát csak még fél évvel később találták meg: valószínűleg egy hibás optikai csatolás okozott mintegy 70 ns késlekedést az órákat összehangoló szinkronjelen, ami a neutrínók látszólagos beérkezési idejét ugyanannyival korábbra toltta. Az OPERA sebességmérése a következőképpen működött. A CERN SPS (szuper-proton-szinkrotron) gyorsítója protonokat lő egy céltárgyba és az atommagokon történő szóródás elektromosan töltött pionokat, a legkönnyebb mezonokat kelt. A pionok 1 km hosszú vákuumvezetékben repülnek és elbomlanak müonra és müon-neutrínóra, $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu$. A megmaradt pionokat elnyeletik anyagban, az erős kölcsönhatás hiánya miatt sokkal nagyobb áthatoló képességű töltött müonokat a CERN-ben elhelyezett detektorokon átrepülve azonosítják és utána szintén lefékezik. A nagyenergiás pion bomlásakor a müont és a neutrínót előre löki ki, de a müon bomlása előtt lelassul, és a $\mu^+ \rightarrow e^+ \bar{\nu}_e \nu_\mu$, illetve $\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$ reakció neutrínói szétszóródnak. Az OPERA-kísérlet felé irányított néhány centiméter



6. ábra. Az OPERA-kísérlet által azonosított esemény tau-neutrínó keletkezésével. Ez annak bizonyítéka, hogy a müon-neutrínó valóban át tud alakulni tau-neutrínóvá [5].

átmérőjű nyaláb tehát gyakorlatilag kizárólag müon-neutrínót tartalmaz. Mire Gran Sassióig ér, a becslések szerint több km-re szétterül és várhatóan részben más neutrínókká alakul, azonban az OPERA csak a müon-neutrínókra összpontosított a repülési idő mérése során. A CERN SPS gyorsítója a nagyenergiájú protonokat 10 µs hosszú csomagokban küldte a céltárgyra, tehát ugyanilyen hosszú neutrínócsomag indult Gran Sasso irányába.

A neutrínók repülési idejét a protonok indítása és a neutrínók észlelése között mérték, a gyorsítónál és az OPERA-kísérletnél elhelyezett atomórákkal, amelyek szinkronizálását a GPS-rendszer segítségével folyamatosan ellenőrizték (7. ábra). A távolság és az idő mérést ellenőrizték a római geodéziai szakemberek végezték és a német mérésügyi hivatal ellenőrizte. Az időmérés fő szisztematikus bizonytalansága abból eredt, hogy az időszinkronizálás fényjeleit a földfelszínen levő GPS-vevőből el kellett juttatni az 1400 m mélyen fekvő Gran Sasso laboratóriumba.

Az órát a protonok kilökö mágneze indította. Ez a lehető legpontosabb módszer, hiszen a részecskenyaláb energiája 450 GeV volt, mélyen relativisztikus protonokkal és pionokkal, a neutrínó keletkezéséig a fény vákuumbeli sebességéhez rendkívül közeli sebességgel. Nagyon keveset számított tehát az időmérésben, hogy a 730 km-ből az első km-t másik részecske teszi meg fénysebességgel.

A kísérletezők azt kapták, hogy a neutrínók $57,8 \pm 7,8$ (stat.) $\pm 7,4$ (sziszt.) (azaz a hibaforrásokat összegezve 58 ± 10) ns-mal előbb érkeznek, mint azt a fénysebességből várni lehet. Az OPERA neutrínói alapján könnyű kiszámítani, ha a neutrínók sebessége állandó, akkor a 168 000 fényévre levő SN1987A hasonló neutrínóinak, vagy legalább az év részüknek 4 évvel

korábban kellett volna érkezniük. Az 1980-as évek elején két nagy neutrínódetektor működött, a szovjet Baksan és az amerikai IMB, de egyik sem észlelt a szokásosnál nagyobb neutrínóáramot akkoriban. A Baksan 1980 és 1986 között átlagosan 0,16 neutrínót észlelt naponta, az IMB pedig 2 neutrínót, amíg az SN1987A 1987. február 23-i kitörésekor a Baksan 5 neutrínót 9 s alatt, az IMB pedig 8 neutrínót 4 s alatt. Ilyenkor mutatkozik igazán meg a részecskefizikai eseményregisztrálás óriási előnye: ha valami érdekes történik az észlelőrendszerben, minden adatot felírunk és tárolunk, tehát évtizedekkel később is ellenőrizni lehet, mi történt.

Jelentős volt azonban a különbség a szupernóva- és a gyorsító kísérletek körülményei között. A szupernóva elektron-neutrínókat bocsátott ki, a gyorsító müon-neutrínókat, a szupernóva neutrínói sokkal kisebb, MeV-es energián, vákuumban repülnek, amíg a gyorsítók GeV-es neutrínókat röptetnek földkéregben.

Az OPERA-eredmény értelmezése

Az első reakció mindkét alapvető társadalmi közösségre jellemző volt. Az újságok szerint: *Megdőlte a relativitáselmélet!* A tudományos közösség reakciói általában kételkedést tükröztek, szinte valamennyien azt gondoltuk: *Ez lehetetlen, biztosan hibás a mérés!* Ennek megfelelően a fizikusok közleményei általában (1) hibát kerestek a kísérletben, (2) ellentmondásokat mutattak ki a korábbi elméleti és kísérleti munkákkal, és (3) ellenőrző kísérleteket javasoltak. Persze óhatatlanul felmerül a gondolat: *Mi van, ha mégis igaz?*, tehát volt aki (4) megpróbálta beilleszteni a fizika világképébe, amelyet persze ehhez meg kellett változtatni.

Hiba a kísérletben

Az egyik azonnali ellenvetés az OPERA megfigyelése ellen az volt, hogyan lehet 10 ns pontossággal megállapítani egy 1000-szer olyan hosszú részecskecsomag érkezését. A CERN ezért 2011 végén két hétig egészen rövid, mindössze 3 ns-os impulzusokat küldött Gran Sasso felé, és azok is megerősítették a közel 60 ns-os sietést.

Mint említettük, az OPERA-kísérlet nagyon pontosan leírta a mérési módszert, és az igen gondosan végrehajtott, helyes mérésnek tűnt. Az idő és a távolság mérését szakemberek ellenőrizték. A távolság mérésénél kimutatták a laboratórium cm-es eltolódását egy földrengés következtében, a 20 cm-es

bizonytalanság tehát ésszerűnek tűnt fel. A nemzetközi irodalomban megjelent néhány nevetséges kifogás: egy szerző, például, azt állította, hogy a GPS-műhold mozgása a Genf–Gran Sasso vonal mentén okozhatott 60 ns-os eltérést, egy másik pedig az ide-oda cipelt atomórák menet közbeni elállítódásával próbálta a különbséget magyarázni, de a GPS-műholdak különböző irányokban repülnek, az időmérésüket még a gravitációs potenciál változásának hatására is korrigálják, az atomórákat pedig folyamatosan szinkronizálták. Másik lehetséges ellenvetés volt a távolság hőmérsékletfüggése a Föld felszínén és mélyén. Ezzel szemben télen és nyáron azonos különbséget mértek és a GPS-rendszer az eurázsiai kontinenshez rögzített koordinátarendszert használ, tehát mindentől független.

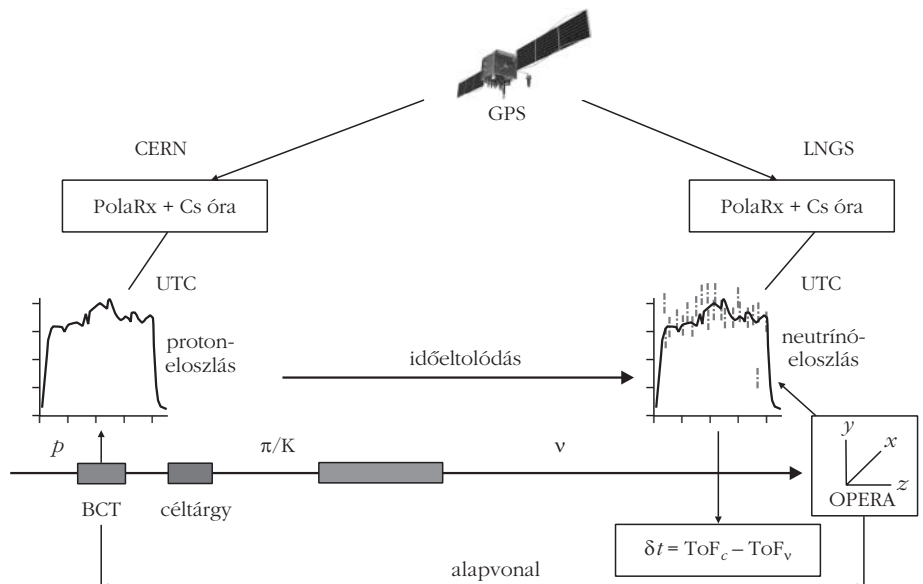
Végül, mint látjuk, a hibát maguk a kísérletezők találták meg, fél évvel a bejelentés után, és azt követően a kísérlet két vezetője, a szóvivő (így hívják a nagy együttműködések választott vezetőit) és az adott analízist végző csoport fizikai koordinátóra lemondott tiszttségéről. A hivatalos közlemény két technikai problémát említett, a szóbeszéd pedig egy optikai kábel nem megfelelő érintkezése következtében fellépő késleltetést emlegetett.

Elméleti és kísérleti ellenvetések

A Cohen–Glashow-batás: fékezési sugárzás

Az OPERA bejelentése után szinte azonnal megjelent *Cohen* és *Glashow* cikke [6], amely *Coleman* és *Glashow* korábbi klasszikus közleménye nyomán kifejtette, hogy egy fénynél gyorsabb neutrínó gyenge kölcsönhatásban, a Cserenkov-sugárzáshoz hasonlóan, elektron-pozitron párok keltésével nagyon gyorsan veszítene energiát, és az teljesen eltorzítaná a mért energiaeloszlásokat. Az OPERA közelében levő

7. ábra. Az OPERA-kísérlet időmérési rendszere. Az időmérést a protoncsomag belövése indítja és a neutrínó észlelése állítja le. Az atomórákat GPS-műholdak segítségével szinkronizálják. A neutrínó-észlelések időbeni eloszlását a mért protoneloszlás görbéjével illesztik (az ábra mindkettőt mutatja kicsinyítve), így határozzák meg a neutrínók átlagos érkezési idejét a protonok indításához képest.



ICARUS-detektor⁶ fizikusai ellenőrizték és nem láttak ilyen részecskéket. Ráadásul a szerzők becslése szerint a 12,5 GeV-nél nagyobb energiájú müon-neutrínóknak el kellene tűnnie emiatt, de sok-TeV-eseket is látni a kozmikus sugarakban. Az a tény, hogy az Antarktisz jegébe süllyesztett IceCube-kísérlet 500 km fölötti távolságról érkező, 100 TeV fölötti energiájú neutrínókat észlelt, a neutrínók és a fény vákuumbeli sebességének különbségét

$$\delta = \frac{|v_\nu - c|}{c} < 1,7 \cdot 10^{-11}$$

értékre korlátozza, amely 6 nagyságrenddel kisebb az OPERA által megfigyeltnél.

A Cohen–Glashow-cikk csaknem ugyanannyi hivatkozást kapott, mint az eredeti OPERA-közlemény, egészen komoly hatása volt a neutrínófizikára. Gondolatmenetüket követve számos kísérleti és elméleti ellenőrzési javaslat született az OPERA-hatásra.

Neutrínóoszilláció

Neutrínóoszillációt mindhárom fajta neutrínó között megfigyelték, és a kísérletek szerint közöttük a tömegkülönbség nagyon kicsi,

$$|m_i^2 - m_j^2| \sim 10^{-3} - 10^{-4} \text{ eV}^2.$$

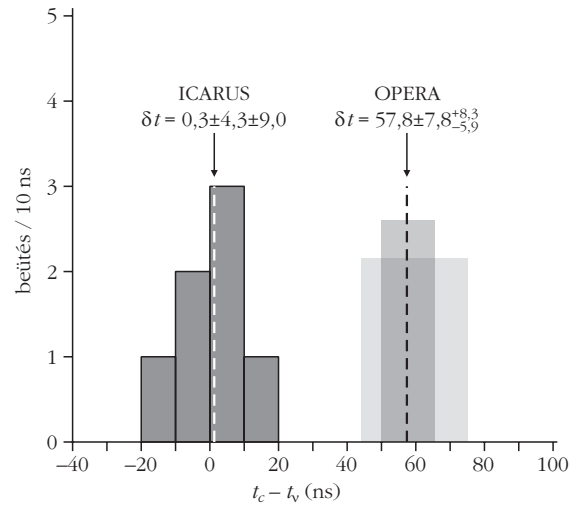
Még a Los Alamos-i LSND-kísérlet⁷ által megfigyelt, de más kísérlet által meg nem erősített negyedik-féle (*steril*: töltött leptonhoz nem kapcsolódó) neutrínó nagyobb tömegkülönbsége sem elegendő a féynél gyorsabb mozgáshoz. Egyébként is nagyon nehéz megmagyarázni a féynél gyorsabb müon-neutrínó és féynél lassúbb elektron-neutrínó egymásba alakulását, de még a féynél gyorsabbakat is egymás között. Ráadásul a MINOS-kísérlet megállapította, hogy az eredetileg tiszta müonneutrínó-nyaláb a MINOS távoli detektorához érve 34%-ban elektron-neutrínóvá változott az érkezési idők különösebb torzulása nélkül. Megjegyezzük, hogy az SN1987A szupernóva féynél gyorsabb neutrínóinak – ha voltak is – időben annyira szét kellett terülniük, mire hozzánk elértek, hogy lehetetlen lett volna észlelni őket, az tehát, hogy az SN1987A-ból nem láttunk olyanokat, önmagában nem cáfolja, hogy az elektron-neutrínók egy része a féynél gyorsabban haladhatna.

Ellenőrző kísérletek

Az általános vélekedés szerint addig nem szabad elfogadni az OPERA-éhoz hasonló eredményt, amíg azt másik független kísérlet meg nem erősíti. Erre kitűnő példa a már említett LSND-kísérlet, amely több, mint 20 éve egy negyedik típusú neutrínót figyelt meg: azt eddig sem megerősíteni, sem megcáfolni nem sikerült, tehát általános kételkedés övezi.

⁶ Imaging Cosmic and Rare Underground Signals.

⁷ Liquid Scintillator Neutrino Detector.



8. ábra. A CNGS-neutrínók érkezési ideje az OPERA és az ICARUS-detektorhoz a vákuumbeli fénysebességhez viszonyítva [7]. Az OPERA neutrínói a fénysebesség alapján vártnál 60 ns-mal korábban érkeztek, amíg az ICARUS-éi a fénysebességnek megfelelő repülési idővel.

A japán Tokaiban⁸ épült J-PARC-laboratórium⁹ T2K-kísérlete¹⁰ közölte, hogy az időmérésük nem elég pontos ehhez, de a MINOS meg akarta ismételni az sebességmérést. Több más javaslat is született. A jelen cikk szerzői, például javasolni szándékoztak egy rövid távolságú, 2 km-es kísérletet, ahol a neutrínók mellett fény is futna, lehetővé téve a közvetlen összehasonlítást, a bizonytalanság túlnyomó része ugyanis a GPS-szinkronizációból és az időmérés hosszú optikai kábeleiből származik. Mindez, természetesen, okafogyottá vált, amikor az OPERA tudósított a mérési hibáról, és az OPERA-detektorhoz igen közel fekvő ICARUS-kísérlet közölte [7], hogy analizálták a tavaly októberi CNGS-adatokat és az OPERA-val ellentétben azt kapták, hogy a neutrínók a fénysebességnek megfelelően érkeztek meg (8. ábra).

Technikai jellegű ellenőrzést is végeztek 2012 márciusában és az eredményeket a Gran Sasso laboratóriumban rendezett szemináriumsorozatban foglalták össze [8]. Az OPERA és szomszédos LVD-kísérlet¹¹ együttműködve összehasonlította a vízszintesen beselő, mindkét detektort egymás után megszólaltató, nagyenergiás kozmikus müonok időzítését a két detektorban, és azt kapták, hogy az időzítési különbség a két rendszer között 2008 augusztusa és 2011 decembere között $\Delta t = -73 \pm 9$ ns-mal különbözött a 2008. augusztus előtt és a 2012-ben mértnél, tehát az OPERA-rendszer a CNGS-adatgyűjtés folyamán – valószínűleg a felfedezett laza kábelkapcsolat miatt – Δt -vel korábbi időket mérhetett, mint előtte és utána. Az OPERA maga is végzett technikai ellenőrzést és az megerősítette az LVD eredményét: a laza kábel kijavítása visszavítte 2012-ben az időzítést a 2007 előtti szintre.

⁸ Nem tévesztendő össze a borvidékünkkel.

⁹ Japan Proton Accelerator Research Complex.

¹⁰ Tokai to Kamioka, 295 km-es neutrínóröptetés.

¹¹ Large Volume Detector, ugyancsak Gran Sasso-ban.

Értelmezés új fizika feltételezésével

Ha egyszer elfogadjuk a fénynél gyorsabb neutrínók létezését, sok kérdés merül fel. Megtaláltuk volna az elméletileg már régen leírt, fénynél gyorsabb részecskéket, a *tachionokat*? Vajon lokális vagy globális a hatás? Függe-e a térbeli távolságtól vagy iránytól, az időtől, a neutrínó fajtájától, a közvetítő közegtől, vagy egyéb anyagi körülménytől? Vagy esetleg egy olyan újabb kölcsönhatás, *ötödik erő* következménye, amely csak a neutrínókhöz kötődik? Ha az utóbbi, mi lehet az ötödik erő forrása? Esetleg magához a Földhöz, annak anyagához kötődik? A továbbiakban összefoglaljuk az irodalomban található főbb gondolatokat; sajnos, a számtalan hivatkozásra nincs a cikkünkben hely, ahhoz kéretik a nemzetközi irodalmat tanulmányozni [9]. Az áttekintésünk célja azt bemutatni, hogy még egy téves kísérletnek is lehet jótékony hatása a tudomány fejlődésére.

Tachionok?

Közlemények tucatjai mutatták meg, hogy ellentmondáshoz vezet, akármilyen tachionos, fénynél gyorsabb neutrínót feltételezünk. A hipotetikus, fénynél gyorsabb részecskék, a *tachionok* annál nagyobb sebességűek, mennél kisebb az energiájuk, a fénysebességet végtelen energián közelítik meg, a méréssel ellentétben tehát a különböző energiájú müon-neutrínóknak különböző időkülönbséggel kellett volna megérkeznie. Másik érv a tachion-neutrínó ellen energia-alapú: az OPERA-mérte sebességű tachion tömege 100–130 MeV/c² kellene, hogy legyen, de az adott pionbomlásban a töltött müon kibocsátása után legfeljebb 40 MeV marad egy tachionszerű neutrínóra.

A tachionok sebessége energiafüggéséből az következne, hogy ha a CNGS 10 GeV körüli neutrínói 730 km-en 60 ns-mal korábban érkeztek, akkor az SN1987A neutrínóinak 137000 évvel kellene korábban, tehát esélytelen az észrevételük. Ha azonban a különböző fajta neutrínók között csak az egyik tachionos, az a nagy tömegkülönbség miatt nem oszcillálhat a többivel.

Ötödik erő, távolságfüggés?

Feltételezhetjük, hogy az erős, elektromágneses, gyenge és gravitációs kölcsönhatáson kívül létezik egy ötödik, amely nem egyformán csatolódik a neutrínókhöz és más részecskékhez. Az ötödik erő úgy is értelmezhető, hogy a neutrínók másféle metrikát (azaz tér-idő-távolságokat) éreznek, mint a többi részecske, és ezért látszólag a fénynél gyorsabban közlekednek. Különböző szerzők különféle erőtereket bevezetve próbáltak egy ilyen világot felépíteni és vele az OPERA-hatást reprodukálni. Többen bedobták az extra térdimenziók lehetőségét, mintegy átvágva térbeli távolságokat. Figyelembe véve a korábbi méréseket, korlátozni lehetett az új erők és dimenziók mérőszámait. Felmerült annak a lehetősége is, hogy a müon-neutrínó egy *sötét* neutrínóba oszcillál, amelyre nem érvényesül a Cohen–Glashow-hatás.

Talán a fénynél gyorsabb mozgás lokális, valamilyen a Földhöz kötődő ötödik erő következménye. Ha az új

kölcsönhatás tipikus hullámhossza összemérhető a Föld átmérőjével, akkor hatása csillagközi méretekben elhanyagolható, ez magyarázhatja az SN1987A közel fénysebességű neutrínóit. A Föld gravitációs tere is tartalmazhat olyan anomális tagot, amely megváltoztatja a neutrínó számára a tér szerkezetét. Egy ilyen modellel is leírható valamennyi mérési eredmény.

Számos szerző felveti, hogy keveredés egy negyedik fajta (például steril) neutrínóval szintén okozhat fénynél gyorsabb mozgást, ha az extra neutrínó tud extra dimenziókban terjedni. Ekkor a közönséges neutrínók látszólag a fénynél gyorsabbak lehetnek, és a sebességkülönbség távolságfüggését a keveredés határozza meg, amit fokozhat a *barionos*¹² anyag jelenléte. Ha a sebességkülönbség függ a Földben megtett úttól, akkor meg lehetne próbálni a CERN-ből küldött neutrínókat az Égei-tengerben levő NESTOR-teleszkóp¹³ felé küldeni, mert az 1676 km-es távolságon a neutrínóknak 140 ns-mal *előbb* kellene beérkezniük (lineáris távolságfüggést feltételezve).

Létezik olyan elképzelés is, amely szerint a fénynél gyorsabb neutrínók (a vákuumban terjedő) fényhez viszonyított sebességkülönbsége nem függ a megtett úttól. Ekkor úgy módosul a neutrínók számára a tér-idő metrikája, hogy a fotonokhoz képest mindig (repülési távolságtól függetlenül) közel ugyanannyi idővel érkeznek korábban. Ezzel könnyen megmagyarázható, hogy miért nem tapasztaltak az SN1987A szuper-nóva esetén szupergyors neutrínókat.

Anyagfüggés?

Felmerül, hogy a fénynél gyorsabb mozgás függhet a közvetítő közegtől. Az előzőekben már említettük, hogy van olyan modell, amely szerint a barionos anyag felerősíti a közönséges és a steril neutrínók közti keveredést, így okozva szupergyors mozgást. Egy másik elképzelés szerint barionos anyagban minden részecske fénynél gyorsabb. Vagyis például a szikla belsejében mozgó nagyenergiás részecskék sebességét nagy pontossággal meghatározza fénynél gyorsabb mozgást tapasztalnánk. Ez a hatás a sziklától néhány milliméter távolságon túl el kell, hogy tűnjön, hogy ne kerüljünk ellentmondásba korábbi kísérletek eredményeivel. Az ilyen típusú elméletek egyik fontos támasza az, hogy az OPERA, illetve MINOS-eredmények előtt, sűrű anyagban, kellő pontossággal, kellően nagy energián végrehajtott terjedési sebességre vonatkozó mérések nem léteztek.

A Lorentz-invariancia sérülése?

A fizikai modellek megalkotásánál a szimmetriák fontos szerepet játszanak. A részecskefizikában szimmetriák alatt nem geometriai szimmetriákat, hanem matematikai transzformációk alatti invarianciát értünk.

¹² A Világegyetem látható anyagának túlnyomó része protonokat és neutronokat tartalmaz, ezért *barionosnak* hívjuk, hogy megkülönböztessük az egyébként sokkal nagyobb tömegben előforduló *sötét anyagtól* és *sötét energiától*.

¹³ Neutrino Extended Submarine Telescope with Oceanographic Research.

A modellek szimmetriái nagymértékben egyszerűsítik a leírást (és nem utolsó sorban a kutatók számára esztétikai élményt nyújtanak). A szimmetriákhoz többnyire megmaradó mennyiségek tartoznak, és a szimmetriához tartozó transzformációk segítségével osztályozhatjuk a Standard modell elemi részecskéit és származtathatjuk az alapvető kölcsönhatásokat. A Lorentz-invariancia következtében a vákuumbeli fénysebesség értéke minden inerciarendszerben megegyezik.

Ha a fénysebességnél gyorsabb részecskét keresünk, akkor meg kell sértenünk a Lorentz-szimmetriát. Ennek egyik lehetséges módja az, hogy új, a szimmetriát explicit módon sértő tagokat adunk a mozgásegyenlethez. Általában megköveteljük a bevezetett új tagoktól, hogy a szimmetrikusak legyenek a CPT (töltés-, paritás- és idő-) tükrözéssel és a forgatással szemben. A mérések felső határt szabnak arra vonatkozóan, hogy mennyivel haladhatja meg egy adott részecske a vákuumbeli fénysebességet és ez az explicit Lorentz-szimmetriasértő tagok nagyságára is felső határt ad. Az új tagok megváltoztatják az energia, a tömeg és a lendület összefüggését, azaz a diszperziós relációt az adott részecskére:

$$p^2 = E^2 - \mathbf{p}^2 = m^2 + f(\mathbf{p}, E),$$

ahol $p = [E, \mathbf{p}]$ az energia-impulzus négyesvektor, m a részecske tömege és $f(\mathbf{p}, E)$ a kis anomális összetevő, amely sérti a Lorentz-invarianciát. A módosított diszperziós reláció leírhat a fénynél gyorsabb részecskéket. A hatás új tagjai a neutrínótér új típusú kölcsönhatását írja le a Standard modell részecskéivel vagy újonnan bevezetett (többnyire skalár) terekkel, de az új tagokat létrehozhatják gravitációs, sötétenergia-, vagy akár sötétanyag-kölcsönhatások is. Ezek más-más energia- és impulzusfüggést adnak az $f(\mathbf{p}, E)$ anomális tagban.

Vannak olyan elméleti elképzelések is, amelyek szerint a Lorentz-szimmetria egy bonyolultabb szimmetria alacsonyenergiás megjelenési formája, amely akár spontán módon is sérülhet, például Finsler-féle téridő-metrika bevezetésével (amely a Lorentz-metrika általánosítása) szintén kaphatunk a fénynél gyorsabb elemi

részecskéket. A Lorentz-szimmetria spontán sérülhet akkor is, ha fermionkondenzátum jelenik meg modellben. Más elképzelések szerint a fizikai állapotokon ható Lorentz-szimmetria deformált, anizotróp lehet, és szintén adhat fénynél gyorsabb neutrínókat.

Zárszó

Az OPERA-kísérlet közleménye a fénynél gyorsabb neutrínók megfigyeléséről óriási izgalmat váltott ki a tudományos közvéleményben. Habár a megfigyelés maga hibás volt, a tévesnek bizonyult kísérlet valóságos gondolatvihart gerjesztett (e cikk megírásának pillanatában, mintegy fél évvel a bejelentés után több, mint 230 közlemény hivatkozta a hibás mérésről szóló OPERA-cikket). Sokan számbavették a kísérletek buktatóit, a kísérleti és elméleti ellenvetéseket és végiggondolták a lehetséges következtetéseket. Kitűnő példája a gondolatébresztő tudományos tévedéseknek.

Irodalom

1. Fényes Tibor: Neutrínóoszilláció, leptogenezis, neutrínógyarak. *Fizikai Szemle* 62/2 (2012) 37–45.
2. P. Adamson és mtársai (MINOS Collaboration): Measurement of neutrino velocity with the MINOS detectors and NuMI neutrino beam. *Phys. Rev. D* 76 (2007) 072005.
3. D. N. Schramm, J. W. Truran: New physics from Supernova SN1987A. *Physics Reports* 189 (1990) 89–126.
4. OPERA Collaboration (T. Adam és mtársai): Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam. arXiv: 1109.4897 (2011)
5. OPERA Collaboration (N. Agafonova és mtársai): Observation of a first ν_τ candidate in the OPERA experiment in the CNGS beam. *Phys. Lett. B* 691 (2010) 138.
6. A. G. Cohen, S. L. Glashow: Pair Creation Constrains Superluminal Neutrino Propagation. *Phys. Rev. Lett.* 107 (2011) 181803.
7. ICARUS Collaboration (M. Antonello és mtársai): Measurement of the neutrino velocity with the ICARUS detector at the CNGS beam. arXiv: 1203.3433 (2012)
8. *LNGS results on the neutrino velocity topic*. Mini-workshop, Gran Sasso, 2012 március 28. <http://agenda.infn.it/conference/Display.py?confId=4896>
9. A témakör tudományos irodalma előhívható a következő böngészős címen: http://inspirehep.net/search?ln=en&p=refersto%3A%28OPERA_experiment%29 és angolul részletes leírás található a Wikipédiában: http://en.wikipedia.org/wiki/Faster-than-light_neutrino_anomaly_%28OPERA_experiment%29