

A SUDBURY NEUTRÍNÓ OBSZERVATÓRIUM – 1. RÉSZ

– a 2015. évi fizikai Nobel-díj apropóján

Németh Csaba

Pannon Egyetem, Fizika és Mechatronika Intézet

A 2015. évi fizikai Nobel-díj kapcsán már két cikk is megjelent a *Fizikai Szemlében* [1, 2]. *Pázsit Imre* közleményében [2] leírást és képeket/vázlatokat is láthattunk a japán KamLAND detektorról, ahol a „Nobel-díj felét” (*Takaaki Kajita* része) eredményező mérések történtek. Írásomban a Sudbury Neutrínó Observatóriumot (SNO) szeretném bemutatni, ahol a díj „másik felét” (*Arthur B. McDonald* része) kiérdemlő eredmények születtek. Az ebből kinőtt, új nevén SNOLAB komplexumot, ahol 2012 és 2014 között volt szerencsém dolgozni, a következő cikkben ismertetem.

Előtörténet

A könnyebb megértés miatt röviden felvázolom az SNO megépítéséhez vezető (tudomány)történeti utat. Itt óhatatlanul ismétlek néhány tény, amelyet a két fent idézett kiváló cikkben [1, 2] már olvashattunk.

A történetet a „Nap-neutrínó rejtély” néven elhíresült problémával kezdjük. *William Fowler* 1960-ban kidolgozott napmodellje nagy mennyiségű neutrínó keletkezését jósolja a Nap magjában végbemenő fúzió révén. 1968-ban érte el első eredményeit az első nap-neutrínók kimutatására szolgáló híres kísérlet: *Raymond Davis* a dél-dakotai Homestake aranybánya mélyén 380 ezer liter perklor-etilént tartalmazó detektorral.¹ Ezek a mérések azt mutatták, hogy a modellek által jósolt mennyiséghez képest csupán mintegy egyharmadnyi neutrínó jön a Naptól. Ezt később más mérések is – például a Kamioka Neutrínó Observatóriumban (Japán) – megerősítették. Ez a híres „Nap-neutrínó rejtély”, ami sokáig izgatta a fizikusokat. Többen már alternatív napmodellek kidolgozásán kezdtek tórní a fejüket.

Közben a neutrínó „nagytestvérei” is feltűntek a színen. A müon-neutrínót a Brookhaveni Nemzeti Laboratóriumban mutatták ki először. A 1960–62 között végzett kísérletekben (kétnutrínó-kísérlet) *Leon M. Lederman*, *Melvin Schwartz* és *Jack Steinberger* bebizonyította, hogy nem csak egyféle neutrínó létezik. Itt sikerült elsőként kimutatni a müon-neutrínó kölcsönhatásait. E kutatásokért a három fizikus 1988-ban megosztott Nobel-díjat kapott.



Németh Csaba 1990-ben kémia-fizika-filozófia szakon végzett a JATE-n. Kutatómérnöki oklevelet és egyetemi doktorátust a Veszprémi Egyetemen (1996), majd PhD-t az ELTE–SOTE közös doktori programjában (2000) szerzett. Fő kutatási területe a környezeti radioaktivitás és a radioökológia, érdeklődési körébe tartozik még a kísérleti neutrínókutatás. Jelenleg a Pannon Egyetem docense. 2012–14 között az SNOLAB-ban, illetve a Brookhaven National Laboratórium-ban dolgozott, az SNO+ projektben.

2000-ben a Fermilabban felfedezték a tau-neutrínót is, ezzel teljessé vált a család (no és a standard modell – még a Higgs-bozon nélkül).

A Szuper-Kamiokande együttműködés 1998-ban jelentette be első eredményét a neutrínóoszilláció létezésére, amelynek az a következménye, hogy a neutrínónak tömeggel kell rendelkeznie, pontosabban a három típus/íz közül legalább az egyiknek nullánál nagyobb tömegűnek kell lennie. *Takaaki Kajita* ezért kapta a 2015. évi fizikai Nobel-díjat. Korábban csak annyit tudtunk, hogy a neutrínók tömege olyan kicsi, hogy az adott módszerekkel kimutathatatlan, azaz a neutrínó tömegére csak felső korlát létezett, de ez a tömeg nulla is lehetett, hiszen azt addig egyetlen kísérlet sem zárta ki, és a standard modellbe is ez illett bele. Ettől kezdve tudjuk, hogy nem nulla (a három típus/íz közül legalább egyik nem nulla), de pontos értéke még ma sem ismert.

Apropó, neutrínóoszilláció. A jelenség lehetőségét 1957-ben (1968-ra volt készen a matematikailag korrekt formulázás) *Bruno Pontecorvo* vetette fel. Lényege, hogy a neutrínó három típusa/íze (elektron-, müon-, tau-) átalakulhat egymásba. Ez megmagyarázná a nap-neutrínók rejtélyét, azaz miért észlelünk csak harmadannyi elektron-neutrínót a Naptól, mint amennyit az elmélet jósol, hiszen a neutrínóoszilláció révén a Naptól a Földig tartó út során, az ott keletkező elektron-neutrínók egy másik típusúvá/ízűvé alakulnak át. A korábbi detektálási módszerek csak az elektron-neutrínót tudták kimutatni.

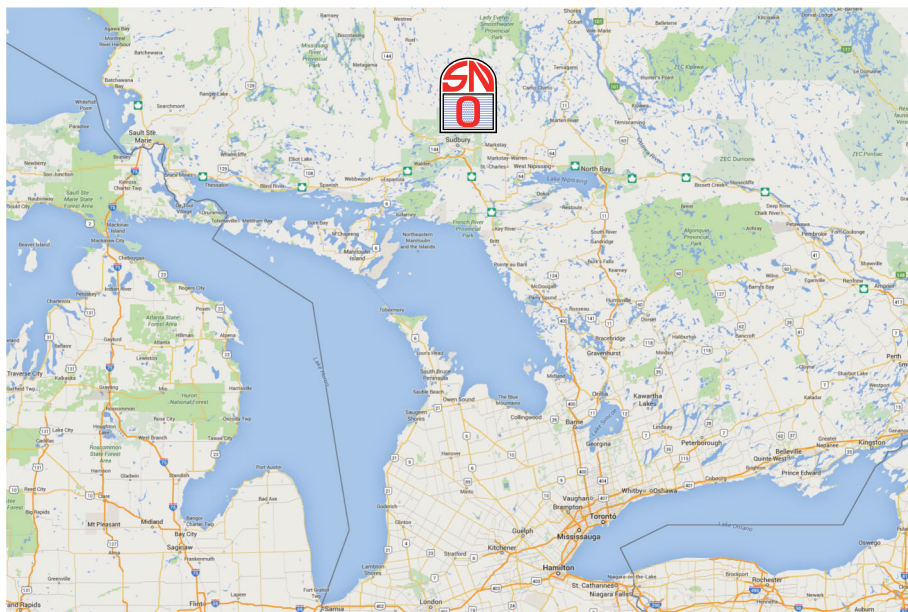
A japán Szuper Kamiokande obszervatóriumban a Föld légkörében a kozmikus sugárzás hatására keletkező müon-neutrínók „eltűnését”, azaz tau-neutrínóvá alakulását mutatták ki elsőként.

A nap-neutrínók oszcillációját, átalakulását müon-, illetve tau-neutrínókká, a Sudbury Neutrínó Observatóriumban mérték meg 2001-ben. Ezzel az eredménnyel került SNO a neutrínókutatás élvonalába és a folyóiratok címlapjára. Itt sikerült kimutatni, hogy a Naptól (meg)érkező neutrínóknak csak egyharmada elektron-neutrínó, a maradék pedig müon-, illetve tau-neutrínó.

A Sudbury Neutrínó Observatórium

Egy nemzetközi tudóscsoport 1980-ban javasolta az SNO létrehozását a „Nap-neutrínó probléma” megoldására. 1984-ben *Herb Chen* vetette fel, hogy a nehézvíz lehetne az a detektoranyag, amely segítene a probléma tisztázá-

¹ A Nap belsejében végbemenő magreakciók során keletkező ⁸B bomlásakor felszabaduló neutrínókat tudta kimutatni úgy, hogy a ³⁷Cl-ből ennek hatására keletkező ³⁷Ar-t mérte. Habár az ebben a folyamatban keletkező neutrínók az összes nap-neutrínónak csak körülbelül 0,02%-át teszik ki, ezek a legnagyobb energiájúak, ezzel a módszerrel ezek detektálhatók.



1. ábra. Az SNO – logójával jelezve – földrajzi fekvése Kanadában, a Nagy-tavak közelében.

jelentős infrastruktúrával. Mai állapotában ez magában foglalja az állandó hűtést, a légkondicionálást (a környezet hőmérséklete 42 °C), a világon egyedüli 2 km (2073 m) mélyen működő vízöblítéses WC-t, zuhanyzót, amely teljesen visszaforgatott vizet használ (csak a Nemzetközi Űrállomáson van hasonló, a lebontó mikroorganizmusokat kutyaeleddel etetik, ha nincs elég lebontani való táplálék...), az áramot, a szuper tiszta környezethez szükséges minden felszerelést.

A mély elhelyezésre azért van szükség, hogy a kozmikus sugárzás minél kevésbé zavarja a mérést. A két km vastag kőzet (körülbelül 6 km

sában. Ugyanis a nehézvízben különböző reakciók révén (lásd lejjebb!), különbséget lehetne tenni a beérkező különböző típusú/ízű neutrínók között. 1990-ben kezdtek el építeni és 1998-ban készült el. Építésében Kanada mellett az USA és az Egyesült Királyság is részt vett.

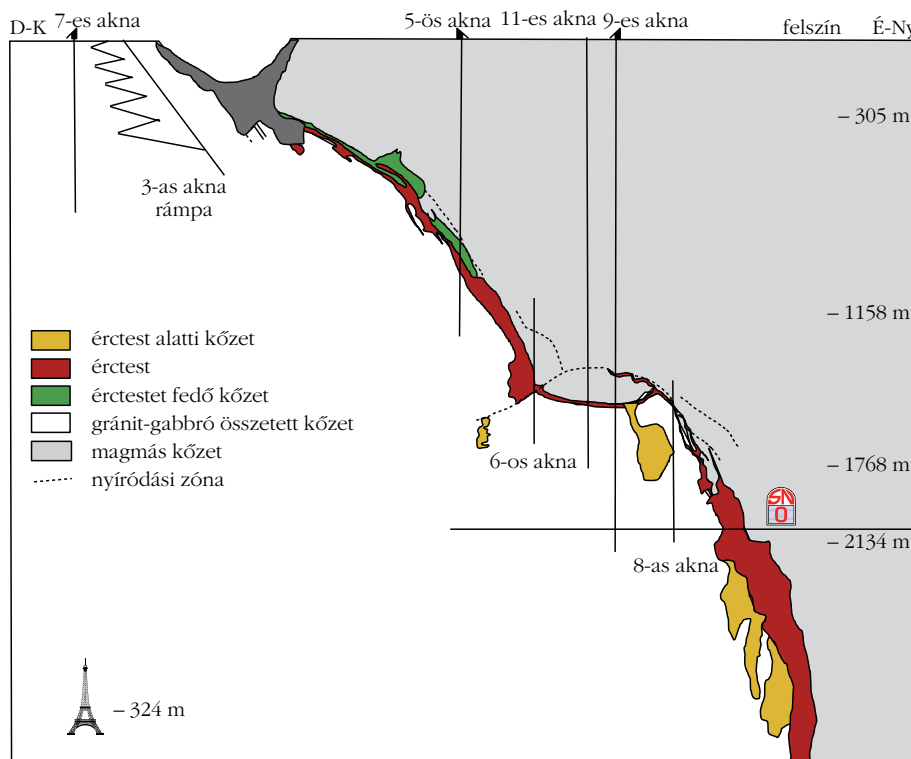
A kísérlet helyéül egy működő nikkeltűzést választottak (ez a Vale Inco cég Creighton bányája), amely a kanadai Sudburytól körülbelül 25 km-re helyezkedik el (1. ábra). Ennek egyik tárnájából leágazva alakították ki az SNO-t (2. ábra). Közel 90 ezer tonna követ vájtak ki és egy szuper tiszta labort alakítottak ki lent,

vastag vízréteggel egyenértékű) árnyékolást ad. Ebben a mélységben körülbelül 3 naponként várható egy-egy kozmikus sugárzásból származó esemény négyzetméterenként. Ez körülbelül 50 milliomod része a Föld felszínét érő kozmikus sugárzásnak. A szupertisztaságú környezetre pedig azért van szükség, hogy a földkérgi eredetű természetes sugárzó anyagoktól is minél mentesebb legyen a rendszer.

Ez nagy kihívás a felhasznált anyagokkal szemben. (Például az akriltartály, a fotoelektron-sokszorozók üvegének anyaga, a víz és nehézvíz – szerepüket lásd lejjebb! – különleges követelményeknek kellett megfeleljen a radioaktív szennyezők tekintetében.) A levegő szűrése, a személyzet védőöltözet stb. is ezt a célt szolgálja. Az esetleges szennyezéseket folyamatosan monitorozzák. Így a detektor belsejében a radioaktivitás körülbelül 100 milliomod része az átlagos környezeti értéknek.

A rendszer legfontosabb része egy hatalmas tartály, amit nehézvízzel töltöttek meg. Tehát van egy nagy, körülbelül tíz emeletes épület nagyságú (34 m magas és 22 m átmérőjű) üreg. Ezt ultratiszta vízzel töltötték fel. Ebbe merül egy közel ezer köbméteres (907 m³), speciális, 4 cm falvastagságú, 30 tonnás, gömb alakú akriltartály² – a világon ez a

2. ábra. A bánya és benne az SNO elhelyezkedése.



² Akril: átlátszó műanyag, mint a szemüveglencse.

legnagyobb ilyen tartály (3. ábra). Ezt nehézvízzel töltötték fel, és itt érdemes egy pillanatra megállni: a projekt legdrágább tétele ez a ~330 millió kanadai dollárt érő ~1000 t nehézvíz volt, amelyet a Kanadai Atomenergia Ügynökség ingyen kölcsönzött e célra. A meglévő bánya (illetve a bánya tulajdonosának beleegyezése és támogatása) mellett ezért is esett a választás Kanadára. A kanadai fejlesztésű és gyártású reaktortípus, a CANDU³ (CANada Deuterium Uranium) nehézvízzel működik. A kanadai ipar ezért jelentős mennyiségű nehézvizet gyártott, amiből sok fölösleg volt/van. A logisztikai nehézségekre egy példa: a 12 m átmérőjű akriltartályt 125 darabban lehetett levinni a helyére, majd ott kellett összeilleszteni. Az ultra tiszta víz előállításá szintén a helyszínen történt, erre egy kis üzemet kellett odalent építeni.

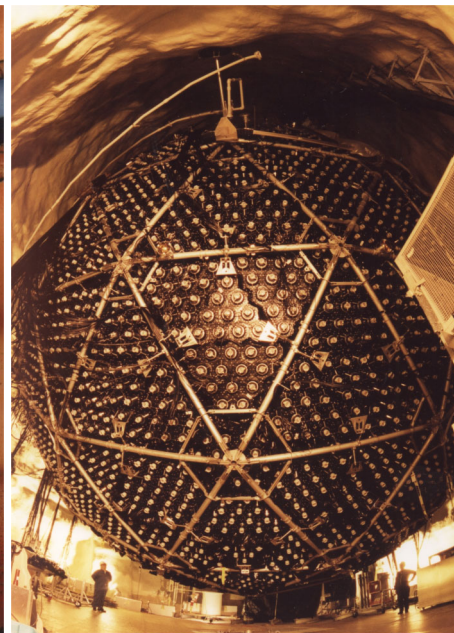
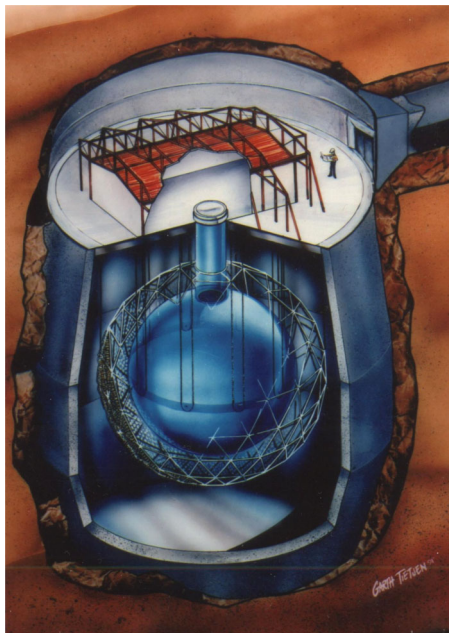
Tehát van a tízemeletnyi üreg benne körülbelül 5000 m³ ultratiszta vízzel (normál H₂O). Ebbe merül a közel ezer köbméteres akriltartály, amit megtöltöttek nehézvízzel (D₂O). Ezt az akrilgömböt (a tiszta vízben) körbeveszi egy 17,8 m átmérőjű rozsdamentes acélszerkezet, amelyre közel tízezer (9522 darab) egyenként körülbelül 20 cm átmérőjű fotoelektron-sokszorozót erősítettek, amelyek gömbszerűen körbeveszik a tartályt. Mivel a nehézvíz nehezebb a normál víznél, még egy, a tartályt alátámasztó állványzatra is szükség volt. Az egészet a nap-neutrínók mérésére találták és élezték ki.

A neutrínók detektálása az alábbi három reakció alapján történik:

1. Amikor az elektron-neutrínó (úgynevezett töltött gyenge áram közvetítésével) kölcsönhatásba lép a deutériummal, akkor a deutérium neutronja protonná alakul: $\nu_e + D \rightarrow p + p + e$. Vagy csak a neutronra felírva: $\nu_e + n \rightarrow p + e$. A reakció energiaküszöbe 1,4 MeV. E reakcióban kizárólag elektron-neutrínó vehet részt. A két keletkezett proton taszítja egymást, így az atommag alkotórészeire esik szét. A detektor anyagában (itt nehézvíz) az elektron gyorsabban halad az anyagbeli fénysebességnél, így Cserenkov-sugárzást kelt. Ezt érzékelik a fotoelektron-sokszorozók.

2. Amikor a neutrínó (úgynevezett semleges gyenge áram közvetítésével) kölcsönhatásba lép a deutériummal (tulajdonképpen szétbontja azt): $\nu_x + D \rightarrow \nu_x + n + p$. A reakció energiaküszöbe 2,2 MeV. Ebben a reakcióban valamennyi típusú/ízű neutrínó azonos valószínűséggel részt vesz.

³ Ebből a viszonylag ritka reaktortípusból például Európában csak Romániában található egy.



3. ábra. Az akriltartály (SNO detektor) vázlata és képe (továbbá lásd a címlapot is).

A detektálás ebben az esetben úgy történt, hogy (körülbelül 2 t) nagy tisztaságú konyhasót (NaCl) keverték a nehézvízhez, amellyel mérhetővé vált a semlegesáram-reakció: a neutron lelassul (termalizálódik), és a klór elnyeli a termikus neutronokat, majd gamma-sugárzást bocsát ki. A gamma-fotonok által meglökött (Compton-effektus) gyors elektronok ismét Cserenkov-sugárzást keltenek, amit a fotoelektron-sokszorozók mérnek.

3. Ezenkívül valamennyi típusú/ízű neutrínó rugalmasan szóródhat az elektronokon: $\nu_x + e \rightarrow \nu_x + e$. Itt gyakorlatilag nincs energiaküszöb. Itt is a gyors elektronok keltette Cserenkov-sugárzást érzékelik a fotoelektron-sokszorozók.

A detektor működésének első fázisában csak a rugalmas szórás és a töltött áram volt mérhető. A második fázisban következett a konyhasó hozzáadása a nehézvízhez.

A harmadik fázisban kivonták a konyhasót, majd semlegesáram-detektoroként ³He tartalmú proporcionális számlálókat használtak a konyhasó helyett. A ³He elnyelve a termikus neutrontró trícium-atommaggá (tritonná) és nagy energiájú protonná alakul át, amely a számlálóban elektromos impulzust hoz létre. Ez már 2004-ben történt, megerősítendő a NaCl-os méréseket.

Összefoglalva

Az SNO detektora a berendezések kalibrálása után 1999. májusban kezdett el működni, és 2006. november 28-án állt le.

Mivel naponta 10-es nagyságrendű esemény jött létre, ezért hosszú időre volt szükség az analízishez elegendő esemény összegyűjtéséhez.

2001 júniusában nagy tisztaságú konyhasót (NaCl) keverték a nehézvízhez, amellyel a semlegesáram-reakció mérhető.

2001. június 18-án adtak ki először hivatalos közleményt a tudományos eredményekről: megvan a neutrínóoszilláció!

2003 szeptemberében eltávolították a sót, hogy behelyezhessék a semlegesáram-detektorokat.

2004. február 12-én felszerelték a ^3He tartalmú semlegesáram-detektorokat (proporcionális számlálókat).

2006 novemberében leállították az SNO-t.

Az SNO képes volt érzékelni a Naphól jövő viszonylag kis energiájú neutrínókat, mégpedig azok mind egyik típusát. Képes volt megmutatni, hogy a Naphól származó neutrínók száma megfelel a napmodelljeinknek, csak az elektron-neutrínók egy része átalakul („eloszcillál”) más típusúakká, amelyeket a korábbi detektorok képtelenek voltak érzékelni. A detektor kimutatta, hogy a neutrínóoszilláció a nap-neutrínók esetén is létezik. (Ezt korábban a Super-Kamiokande csak a légkörben keletkező neutrínókra igazolta.)

A neutrínóoszilláció egyik következménye, hogy legalább az egyik neutrínónak (nyugalmi) tömeggel kell rendelkeznie. A kísérletről felső értéket kaptak a háromféle neutrínó össztömegére.⁴

Az első perdöntő eredményeket 2001-ben tették közzé [3]. Az ezeket közlő két cikk 2001-ben és 2002-ben jelent meg a *Physical Review Letters*-ben [4, 5]. 2002-ben – külön-külön is – ezek voltak a legtöbbet idézett cikkek a fizikai szakfolyóiratokban.

⁴ Az össztömeg kozmológiai jelentősége abban rejlik, hogy bár nagyon sok neutrínó létezhet a Világegyetemben, de teljes tömegük akkor sem elegendő az összes sötét anyag mennyiségének magyarázatára.

A kísérlet befejezése után a nehézvizet megtisztítva visszaszállították a kanadai Atomenergia Ügynökségnek. Minden cseppjét, az utolsókat például szemcsep-pentővel szedték fel! Csak ez körülbelül fél évet vett igénybe, mivel itt a bányába kell le-, majd a végén felvinni mindent, köztük a nehézvizet is kisebb tartályokban, azt átpumpálni stb. – közben a bánya működik és a bányászok is ugyanazt a liftet használják.

Ezen feladatának elvégzésével az SNO-kísérlet lezárult. Jöhet a következő!

A föld alatti labort kibővítették, ott egyszerre már több projekten is dolgozhatnak. Közben 2005-re a felszínen is felépült egy nagy épület, az irodáknak és a felszíni tisztalabornak biztosítva helyet. Az intézet új neve / vagy az új intézet neve SNOLAB lett.

Az SNOLAB-nál folyamatban levő és tervezett kísérletek közül a legnagyobb az SNO+, amely szintén a neutrínó kutatást célozza, de ez már egy másik történet.

Irodalom

1. Király P.: Kvantumjelenségek kozmikus méretekben: a 2015. évi fizikai Nobel-díj és háttere. *Fizikai Szemle* 65/12 (2015) 420–424.
2. Pázsit I.: Atomerőművek az alap kutatás szolgálatában. *Fizikai Szemle* 66/2 (2016) 42–45.
3. http://www.sno.phy.queensu.ca/sno/first_results
4. Q. R. Ahmad et al. (SNO Collaboration): Measurement of the Rate of $\nu_e + d \rightarrow p + p + e$ – Interactions Produced by ^8B Solar Neutrinos at the Sudbury Neutrino Observatory. *Physical Review Letters* 87/7 (2001) 071301. arXiv: nucl-ex/0106015. Bibcode: 2001PhRvL..87g1301A. DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.071301>
5. Q. R. Ahmad et al. (SNO Collaboration): Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory. *Phys. Rev. Lett.* 89/1 (2002), 011302; DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.011302>