

A SUDBURY NEUTRÍNÓ OBSZERVATÓRIUM – 2. RÉSZ

– az SNOLAB, célkeresztben a neutrínók és a sötét anyag

Németh Csaba

Pannon Egyetem, Fizika és Mechatronika Intézet

A *Fizikai Szemle* előző, ez év júniusban megjelent számában [6] a 2015. évi fizikai Nobel-díj kapcsán a Sudbury Neutrínó Observatóriumról (SNO) írtam. Az *Arthur B. McDonald* nevéhez kapcsolódó mérésekkel itt sikerült megoldani a „Nap-neutrínó rejtély” néven elhíresült problémát, amelynek során megerősítést nyert a neutrínóoszilláció léte, aminek pedig következménye, hogy léteznie kell nullánál nagyobb tömegű neutrínónak. Ez utóbbi állítás pedig már túlmutat a részecskefizika standard modelljén, azaz a neutrínó(k) tanulmányozása ismét a természet egy eddig nem ismert oldaláról vetheti fel a fátylat. Ebből is látszik, hogy e „szellem-részecskék” vizsgálatára miért fordítanak egyre nagyobb figyelmet (és egyre több

forrást) a világ különböző kutatóhelyein. Így történt/történik a kanadai Sudbury közelében levő – a fent említett eredményeknek köszönhetően jelentős hírnévre szert tett – kutatóbázis esetében is.

Ebben az írásban az SNO-ból kinőtt, kibővített, és immár többféle kutatásnak is helyt adó, új nevén SNOLAB komplexumot szeretném bemutatni.

Az SNO után

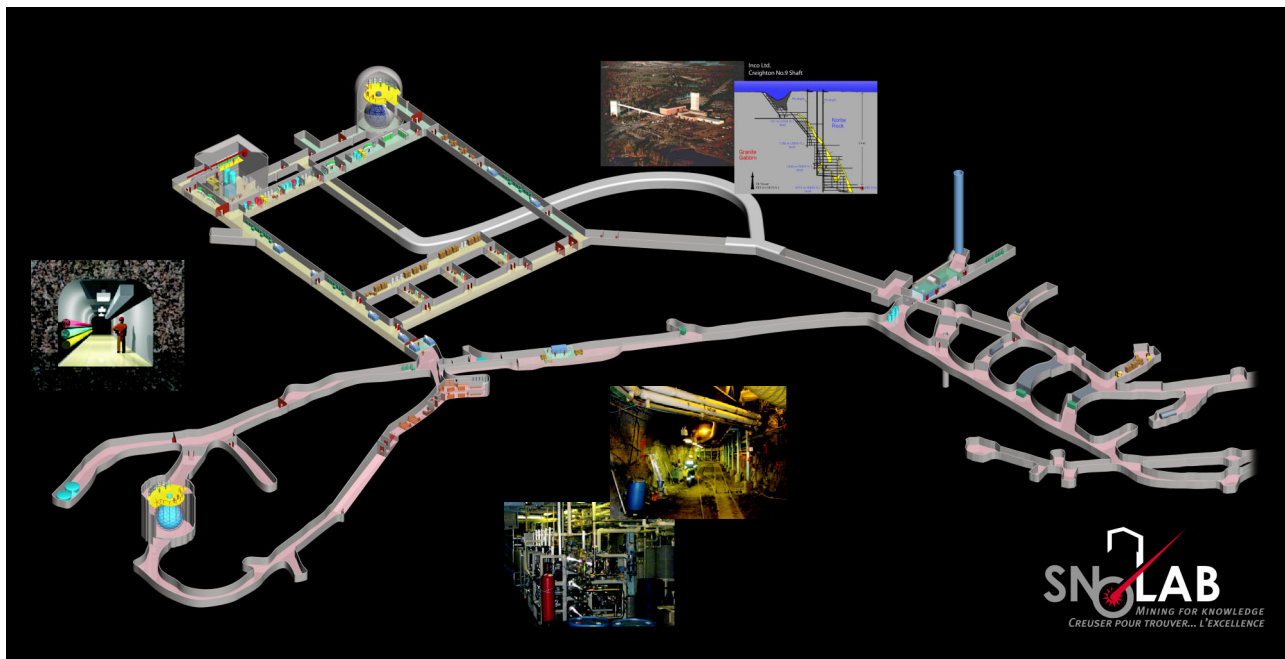
A föld alatti labort jelentősen kibővítették (5000 m²-re), így ott egyszerre már több projekten is dolgozhatnak. Ez 2007-re lett készen. A 4. ábrán a teljes föld alatti komplexum térképe látható, az 5. ábrán levő képek pedig a méreteket érzékeltetik.

Közben, 2005-re a felszínen is elkészült egy nagy épület (3100 m²), irodáknak, konferenciatermeknek, felszíni laboroknak stb. biztosítva helyet (6. ábra). A bővítés következtében előállt mennyiségi és minőségi fejlődést, illetve az immár szélesebb kutatási profilt, az intézmény új neve is kifejezi.

Az SNOLAB-nál folyamatban levő és tervezett kísérletek közül a legnagyobb az SNO+, amely továbbra is a neutrínók természetének felderítésére összpontosít.



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 Laboratory-ban dolgozott, az SNO+ projektben.



4. ábra. Az SNOLAB föld alatti része.

E mellett főleg a *kozmosz sötét anyag* kimutatását célzó kísérleteknek ad helyt, ahol szintén fontos a minél kisebb háttérsugárzást biztosító környezet.

Bár a fent említett – a kozmikus részecske-fizika területére eső – projektek jelentik a fő profilt, a kutatóhely geológusok, biológusok számára is kínál speciális vizsgálatokhoz alkalmas infrastruktúrát.

A következőkben részletesebben az SNO+ projektet ismertetem, amelyben magam is részt vettem, majd a sötétanyag-kísérletekről szólok rövidebben.

Az SNO+ projekt

Az SNO híres kísérletében sikerrel alkalmazott ezer tonna nehézvizet visszaszállították az adományozó Kanadai Atomenergia Ügynökségnek. A 907 m³-es akriltartály új feladatot kap, ahol a nehézvíz szerepét egy másik folyadék veszi át, egy folyadékszintillátor. Ez, a radioaktív anyagok mérés technikájában széleskörűen használt anyag, az ionizáló sugárzás hatására fényvillanásokat produkál. Többnyire szerves folyadék, amibe a mérendő mintát belekeverik.

Esetünkben ez a szcintillátorfolyadék a LAB-PPO, azaz a lineáris alkil-benzol (LAB), mint oldószer és a PPO (2,5 difenil-oxazol, C₁₅H₁₁NO), mint oldott anyag (fluor), 2 g/l koncentrációban. A LAB egy, a folyékony szappanok / habfürdők készítésénél is nagy mennyiségben használt, ásványi olajokhoz hasonló anyag. Sok jó tulajdonsága (átlátszó, hosszú ideig stabil, jó az optikai hozama, kompatibilis az akrillal, környezetbarát stb.) mellett még olcsó is, és egy kanadai cég szolgáltatja megfelelő minőségben és mennyiségben. Ezt a fajta folyadékszintillátorköztelt már sikerrel használták/ják a KamLAND detektornál. (Ez, a már korábban említett japán Kamiokande helyén létesült, és elsősorban az atom-

5. ábra. Képek az SNOLAB föld alatti – a felszíntől 2 km mélyen fekvő – részéről.

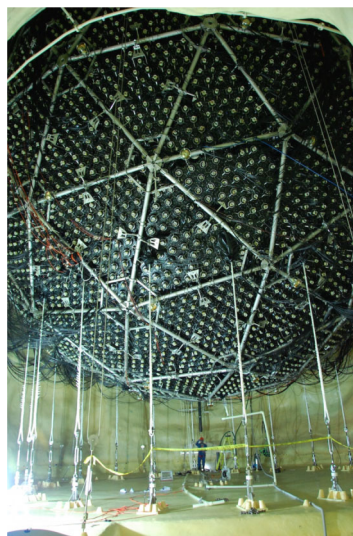
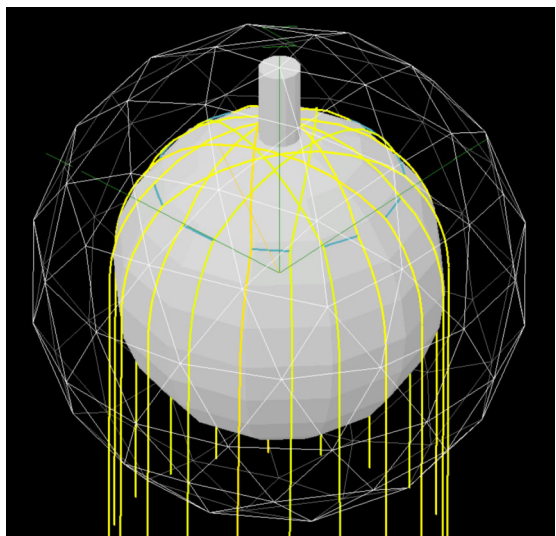


erőművekből jövő antineutrínókra vadászik. Építéskor még 53 működő nukleáris erőmű volt a közelében. Azután jött a cunami...) Az olaszországi Borexino neutrínódetektornál (Gran Sasso Nemzeti Laboratórium) is hasonló folyadékszcintillátort alkalmaznak, csak ott a LAB helyett más az oldószert.

A LAB sűrűsége kisebb a víznél ($0,86 \text{ g/cm}^3$), ezért míg a nehésvíznél alá kellett támasztani a normál vízbe helyezett akrilgömböt, itt egy kötélrendszer segítségével az üreg aljához kell rögzíteni. A 7. ábrán a detektor vázlatja és képe látható, a tartókötélzettel.

A szcintillátort természetesen tisztítani kell. Legfontosabb, hogy minél kevesebb radioaktív szennyező maradjon benne. Ez rendkívül kis koncentrációt jelent a szóban forgó természetes eredetű radionuklidokra: $10^{-17} \text{ g/g}_{\text{LAB}}$ mind a ^{238}U , mind a ^{232}Th sorozatra, ami körülbelül azt jelenti, hogy 3 bomlásra lehet számítani naponta (3 cpd) a Th-sorból: ^{208}Th és ^{228}Ac ; és 9-re az U-sorból: ^{214}Bi és ^{210}Bi , ez utóbbiak főként a bejutó radonnak tulajdoníthatók. Az SNO-nál ez az érték $1,7 \cdot 10^{-15} \text{ g/g}$ volt tóriumra. Az SNO-nál is volt egy nagy tisztítórendszer a föld alatt, ezen havonta átment a nehésvíz teljes mennyiségének 40%-a, azaz 400 tonna. A tisztítás mellett folyamatosan monitorozták a nehésvizet a radionuklidokra. Ez az SNO+ esetében is így lesz. A ^{210}Bi különösen fontos, mert a béta-bomlása során keletkező 1,7 MeV-es maximális energiájú elektronok bezavarnak a CNO ciklusban keletkező napneutrínók mérésénél. Ezért a radonra, és az esetlegesen más forrásból, például az akriltartály anyagában előforduló – hiszen 10^{-17} g/g szintek-

7. ábra. Az SNO+ detektorának vázlatja és képe.



6. ábra. Az SNOLAB felszíni épülete.

ről van szó! – beoldódó ^{210}Pb -re kell ügyelni. Itt már nem érvényes az az általános szabály, hogy a szerves oldószerekben a nehézfémek nem oldódnak. Ilyen kis koncentrációban már előfordulnak, ha nem is pontosan ismert milyen kémiai formációban. Például a radioaktív bomlás során visszalökődő mag felszakhathatja a szerves anyag kötéseit, szabad metilgyököket eredményezve, majd ezek a fémmel szerves fémkomplexeket képezhetnek. Ezeket nem könnyű a hagyományos módszerekkel eltávolítani. A tisztítás hatásfokának ellenőrzése is probléma, mert a szokásos radioaktív nyomjelzéses módszereknél is valamilyen nehézfémet kellene bevinni a szerves szcintillátorba, amiben viszont nem oldódik... Tehát sok megoldandó feladat van.

De térjünk vissza a nagy mennyiségű szcintillátor tisztításához! Ehhez egy kisebb (?) vegyi üzemet szükséges felépíteni a föld alatt, ahol több különböző módszerrel szabadítják meg a detektorfolyadékot a zavaró szennyeződésektől. Először is kell egy többfokozatú desztillációs berendezés 1000 kg/óra kapacitással.

Azután következik egy vízgőz-desztilláció ultra tiszta vízzel, majd egy vizes extrakció és/vagy ioncserélő oszlopokon átáramoltatás.⁵ Az eszközöknek a vákuumtechnikában alkalmazott magas követelményeknek kell megfelelniük, a tökéletes szigetelés miatt (ne jusson be például a radon).

A hatalmas akriltartály, amely a „nehésvizes” kísérlet óta üresen állt, először gon-

⁵ Már eleve ezek energiaigénye is jelentős, és a hulladékhőt is el kell vezetni a föld alól.

dosan meg kellett tisztítani. A méréseket már az is befolyásolná, ha valaki egy „újlenyomatot” hagyna a tartály belső falán. A testünkben levő ^{40}K radioaktív izotóp így otthagytott mennyisége már zavaró lehet!⁶

Először ultra tiszta vízzel töltik fel a detektor-edényt, majd ezt fokozatosan kiszorítva kerül bele a szcintillátorfolyadék. A ~9400 fotoelektron-sokszorozótól jövő jelek feldolgozásának elektronikai és számítástechnikai kihívásai szintén jelentősek. Minden rendszert beállítanak, majd a tesztüzem után jöhet a mérés!

A szcintillátorfolyadékot időnként átfuttatják a fent említett tisztítórendszeren (négy nap alatt megy át teljes mennyiség) és közben analizálják is, elsősorban a már említett radioaktív szennyezőket vizsgálva.

De akkor nézzük, hogy mi célra szolgál mindez!

Az SNO+ projekt fő céljai

1) A napneutrínók a korábbi SNO kísérletnél pontosabb mérése.⁷ A Nap magjában az úgynevezett *pep* fúziós folyamatban keletkező neutrínókra az SNO+ tízszer jobb felbontást ad elődjénél, és emellett mérni lehet vele a CNC ciklusban keletkező neutrínókat is. Ez inkább a nagyobb csillagoknál dominál, de valamilyen arányban a Nap esetén is előfordulhat. Erre az arányra adhat választ ezek mérése.

2) A földneutrínók/geoneutrínók mérése. A Föld belsejében lévő természetes radioaktív anyagok béta-bomlásakor keletkező antineutrínók könnyen áthatolnak a vastag rétegeken. Más sugárzás nem képes erre. Azaz, ezeket mérve mintegy „átvilágítjuk” a Föld belsejét. Képet kaphatunk az urán és tórium eloszlásról az alsóbb rétegekben, így végső soron arról, hogy milyen mértékben felelős ezek radioaktív bomlása a Föld belső hőjéért.⁸

3) Ha netán szupernóva robbanna a Tejútrendszerben vagy közvetlen közelében, az abból eredő neutrínókat is mérni a rendszer. Igaz, erre van egy külön projekt az SNOLAB-on belül, ez a HALO, ami már nem az SNO+ része.⁹

4) Az atomreaktorokból származó antineutrínók mérése. Az SNOLAB földrajzi fekvése miatt, egy más eloszlásban adna adatokat erről (észak-amerikai atomerőművekre), mint a korábban említett japán obszervatórium (KamLAND), és az oszcillációra is értékes információkat szolgáltathat a várakozások szerint.¹⁰

5) „Egzotikus fizika” – az SNOLAB alacsony háttére lehetőséget biztosít olyan vizsgálatok számára, ame-

lyek túlmutatnak a standard modellen. Ide tartozik a „láthatatlan nukleonbomlás” és az axion (vagy axionszerű részecskék) utáni kutatás. A láthatatlan nukleonbomlásra példa a neutron három neutrínóra bomlása: $n \rightarrow 3\nu$, amely a víz oxigénjében levő egyik neutron esetleges ilyen átalakulásának megfigyelésével történik: az O^{16} átalakul O^{15} -é és egy 6,15 MeV-es gamma-foton szabadul fel. Ami az axionokat illeti, az elméleti jóslat szerint a Napban a $p+d \rightarrow {}^3\text{He}+A$ folyamat játszódhat le, ahol „A” az „axionszerű részecskét” jelenti, amelynek energiája 5,5 MeV. Az SNO+ ezt képes detektálni.

Ez a két kísérlet, még a vizes fázisban – amikor a detektortartály még ultra tiszta vízzel van töltve – történik.¹¹

6) Itt utolsónak említem, de ez a legfontosabb, ezért többet írok róla. Ez a *neutrínó nélküli kettős béta-bomlás* ($0\nu\beta\beta$) vizsgálata. Először tekintsük át, hogy ez milyen fizikai folyamat!

A béta (β) bomlás esetén egy neutron alakul át protonná és a magból egy elektron és egy elektronantineutrínó lép ki: $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$. Ez olyan atommagoknál fordul elő, amelyekben a stabil állapothoz képest neutronfölösleg van. De léteznek olyan atommagok is, ahol ugyan neutrontöbblet van (instabil a mag), de a béta-bomlás energetikai okok miatt tiltott. Ha a kettővel nagyobb rendszámú mag már stabilabb, akkor energetikailag megengedett, hogy kettős béta-bomlás történjen egyszerre. Ekkor két neutron két protonná alakul át, és egyszerre két elektron és két elektronantineutrínó repül ki. Ez a *kettős béta-bomlás* ($2\nu\beta\beta$). Bár már 1948 óta keresik, először csak 1987-ben sikerült kimutatni.¹²

A kettős béta-bomlás a legritkább ismert radioaktív bomlásfajta. Eddig 12 izotópnál figyelték meg, és a felezési idejük $10^{18} - 10^{21}$ évnek adódott.¹³

A kettős béta-bomlásnak van egy *elméleti lebetősege*, aminél a folyamatban nem lép ki két elektron-antineutrínó, hanem ezek megsemmisítik egymást. Ez a neutrínó nélküli kettős béta-bomlás. Ez akkor történhet meg, ha a neutrínók úgynevezett Majorana-részecskék, azaz olyan részecskék, amelyek megegyeznek saját antirészecskéikkel.¹⁴

A neutrínómentes kettős béta-bomlást eddig meggyőzően még nem tudták kimutatni. Ugyan volt, aki már állította, hogy megfigyelte [7], de ezt kétségbe vonja a tudományos közösség. *Ennek kimutatása lenne az SNO+ kísérlet legfontosabb célja*. A neutrínómentes kettős béta-bomlásról olvashatunk például egy, a *Fizikai Szemlében* 2008-ban megjelent cikkben [8].

⁶ Ezért is csak dupla gumikesztyűben mehetett le bárki a gömb belsejébe.

⁷ Itt már az alacsonyabb energiájú napneutrínókat is lehet mérni, és sokkal jobb spektrális felbontás nyerhető.

⁸ A különböző modellek szerint itt nagy eltérések vannak, ezért ez nagyon érdekli a geológusokat.

⁹ Lásd lejjebb!

¹⁰ Pontosabb megszorítás várható a Δm_{12}^2 neutrínóoszillációs paraméterre.

¹¹ A következő pontban részletezett *neutrínó nélküli kettős béta-bomlás* tulajdonképpen szintén ide tartozik, de, mint a legfontosabb kísérletet, külön tárgyalom.

¹² A ^{82}Se esetében, geokémiai folyamatok vizsgálata során már az ötvenes években találtak erre utaló nyomokat: Se- és Te-ásványokban Kr és Xe volt.

¹³ Összehasonlításként a Világegyetem életkora $\sim 10^{10}$ év.

¹⁴ No meg akkor, ha nem zéró tömegűek, de ezt már bizonyította a neutrínóoszilláció.

De miért ilyen fontos ez?

Ha létezik és mérni tudnánk, akkor ez egy lehetőség lenne a neutrínók tényleges tömegének meghatározásához.¹⁵ Segítené megoldani a rejtélyt, hogy világunkban miért dominál a „hagyományos” anyag az antianyag felett, azaz az Univerzum keletkezésekor lezajló folyamatokról (leptogenezis) is információt adhat.

A neutrínómentes kettős béta-bomlás még a „normál” kettős béta-bomlásnál is jóval ritkább. A jelenlegi mérések érzékenysége 10²⁵ éves felezési időt enged meg, ami azt jelenti, ha létezik, akkor ennél nagyobb a felezési ideje. Az új kísérletek az említett érzékenységet egy-két nagyságrenddel növelhetik.

Az SNO+ projektben két nuklid merült fel, mint „kísérleti alany”. Az egyik a neodímium egy kettős béta bomlást mutató izotópjá: a ¹⁵⁰Nd. A másik a tellúr hasonló tulajdonsággal bíró izotópjá: a ¹³⁰Te. Ott tartózkodásom alatt született meg a döntés: a ¹³⁰Te lesz a kiválasztott.

A kiválasztott izotópot kell a 907 m³ folyadékszcintillátorban megfelelő koncentrációban feloldani, majd figyelni az eseményeket. Az első fázisban 0,3% természetes tellúrt oldanak fel a szcintillátorban ez ~800 kg ¹³⁰Te izotópot jelent a teljes térfogatban, mivel a természetes tellúr 34%-a ¹³⁰Te. Ha a második fázisban, a tervek szerint, 3%-ra mennek fel, ez már 8 tonna ¹³⁰Te izotópot jelent. A neutrínómentes kettős béta-bomlást a „normál” kettős béta-bomlástól a felszabaduló energia különböztetné meg.¹⁶

Tehát a korábban leírt folyadékszcintillátor tisztításához, még hozzájön, hogy a neutrínómentes kettős béta-bomlás folyamat vizsgálatához szükséges tesztanyagot – megfelelően nagy tisztaságban – bevigyük a folyadékba, majd a végén kivonjuk belőle.¹⁷

Az első fázis (0,3% Te) 5 évig fog tartani. Ez a bomlás felezési idejének 9 · 10²⁵ éves alsó határát jelölheti ki. Ez a Majorana-neutrínó tömegre ($m_{\beta\beta}$) 55–133 meV megszorítást jelent.

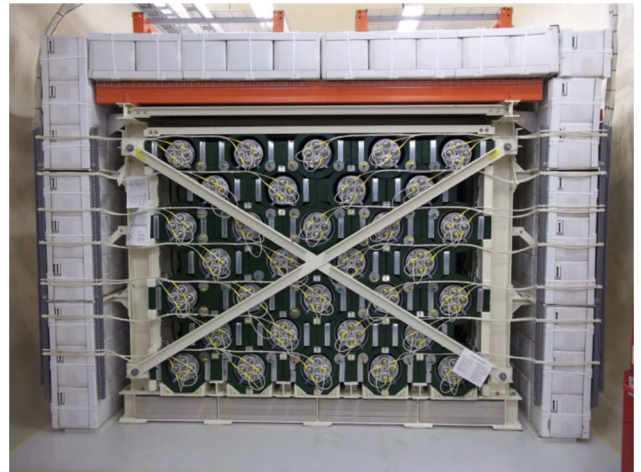
Az ezt tízszeresen meghaladó Te bevitele (2. fázis) még kidolgozás alatt van, ebben az esetben a felezési idő alsó limitje 7 · 10²⁶ év lenne. Ez a Majorana-neutrínó tömegre ($m_{\beta\beta}$) 19–46 meV megszorítást jelent.

Kétségtelenül az SNO+ a legnagyobb és legfontosabb projekt most az SNOLAB-nál, de futnak még egyéb érdekes kísérletek is.

¹⁵ A neutrínóoszilláció csak az egyes neutrínófajták közti tömegkülönbséget – pontosabban tömegnégyzet-különbséget – adja meg.

¹⁶ A neutrínó nélküli esetben monoenergiás elektronpár keletkezik, ami a „normál” kettős béta bomlásban keletkező folytonos spektrumú elektronpároktól megkülönböztethető.

¹⁷ Például a tellúrt tellúrsav, Te(OH)₆, formájában vízben oldjuk, újrakristályosítással tisztítjuk, majd egy felületaktív anyag segítségével visszük be a szcintillátorfolyadékba. Ennek kidolgozása elsősorban az SNO+ kollaborációhoz tartozó, Egyesült Államokbeli Brookhaven Nemzeti Laboratórium (BNL) Kémiai Részlegében történt/történik. Én részben ebben a kutatásban vettem részt. Rövid brookhaveni tartózkodásom után, az SNOLAB felszíni laboratóriumában ezen dolgoztam, illetve – munkaidőm nagyobbik részében – a föld alatti rendszer összeállításában, tesztelésében segítkeztem.



8. ábra. A HALO detektor.

Egyéb projektek az SNOLAB keretén belül

HALO – Helium and Lead Observatory

A Hélium és Ólom Observatórium elnevezés oka, hogy a HALO 79 tonnányi ólomtéglát és 128 darab, ³He-at tartalmazó, neutrondetektáló csövet (proporcionális számlálót) tartalmaz (8. ábra).

Ez a program kifejezetten a szupernóva-neutrínókra van kihegyezve. A szupernóva egy nagytömegű csillag felrobbanása, amelynek során iszonyatos energiamennyiség szabadul fel viszonylag rövid idő alatt.¹⁸ Ez az energia egyrészt az általunk közvetlenül érzékelhető, látható tartományba eső fény formájában szabadul fel, de jelen van az elektromágneses spektrum szélesebb tartománya, illetve jelentős az anyag- és részecskekibocsátás. A mi szempontunkból érdekes, hogy míg egy „normál” csillag, mint például a Nap, a teljes energiakibocsátásának körülbelül 99%-át az elektromágneses sugárzás (fény) teszi ki és csak 1%-át a neutrínókibocsátás, addig a szupernóváknál ez éppen fordítva van, sőt. Itt a neutrínók az energia 99,9%-át teszik ki, ami szinte elképzelhetetlenül hatalmas energiamennyiség, hiszen a szupernóva fénye is már több milliárd csillagéval ér fel!¹⁹

A neutrínóknak tehát fontos szerep jut a szupernóva-robbanás mechanizmusában és az ennek során keletkező nehéz elemek kialakulásában.

Az is fontos szempont, hogy míg a neutrínók azonnal elhagyják a robbanó csillag magját, addig az elektromágneses sugárzásnak (fénynek) ehhez – az ütközések és a szóródás miatt – több idő kell. Így az innen jövő (úgynevezett korai) neutrínók észlelése lehetővé teszi, hogy az optikai csillagászok még idő-

¹⁸ Lásd például a *Fizikai Szemlében* Németh Judit cikkét [9]!

¹⁹ A fenti kijelentést finomítva, hozzá kell tenni, hogy a szupernóva-robbanáskor neutrínó formájában felszabaduló energia részaránya változó – például a kozmológiai szempontból igen fontos Ia típusúaknál valószínűleg viszonylag kicsi – és a fényhez képest a robbanást követő lökéshullámban felszabaduló mozgási energia is jelentős, sőt ezen energia egy része például kozmikus sugárzás forrasként is szolgálhat.

ben (még a felfénylés előtt) felvigyjenek a szupernóvára. Így a fontos kezdeti viszonyokat lehetne tanulmányozni.

Ezért hoztak létre egy nemzetközi hálózatot SNEWS (Supernova Early Warning System – Szupernóva Korai Figyelmeztető Rendszer). Ha ez szupernóva-robbanásból érkező neutrínókat jelez, azonnal riasztják a csillagászoknak.

E hálózat tagja volt a korábbi SNO is, benne lesz az SNO+ is, de ebben a direkt erre a célra épített HALO viszi a fő szerepet. Ez tulajdonképpen már a „neutrínócsillagászat” része, amelynek kezdetét 1987-re datálhatjuk, amikor a Nagy Magellán-felhőben felvillanó szupernóvától (SN 1987A) eredő neutrínókat több neutrínódetektor is észlelte (Kamiokande II, IMB, Baksan). A jelenlegi technikával csak a Tejútrendszeren belüli, vagy annak közvetlen közelében lévő szatelit galaxisokban (mint a Nagy Magellán-felhő) levő szupernóvákban származó neutrínók észlelhetők. A neutrínócsillagászok nagyon várják már, hogy az utolsó dokumentált Tejútrendszeren belüli szupernóva-robbanás (1604, Kepler kora!) után, végre egy újabb esemény történjen. Az 1987-es neutrínóészlelés tulajdonképpen véletlen volt, ma már egy kiépített rendszer várja a jeleket. Galaxisunkban évszázadonként elvileg egy-két szupernóva várható, így már nagyon itt az ideje...

De lássuk kicsit részletesebben, mi történik ebben a detektorban! Az ólom nagy neutronöbbllettel bír, ezért esetében a $\nu_e + n \rightarrow p + e^-$ reakció jó eséllyel végbemegy, azaz: $\nu_e + \text{Pb} \rightarrow e^- + \text{Bi}^*$ (gerjesztett bizmut mag). A gerjesztett bizmut egy neutron és egy gamma-foton kibocsátásával stabilizálódik: $\text{Bi}^* \rightarrow \text{Bi} + n + \gamma$.

A neutron polietilénben termalizálódik (lelassul), majd a ^3He -mal a proporcionális csövekben (több száz méternyi van) az alábbi reakcióba lép: $^3\text{He} + n \rightarrow ^3\text{H} + p$, ($Q = 764 \text{ keV}$) Ezt szépen lehet mérni.

EXO – Enriched Xenon Observatory

A Dúsított Xenon Obszervatóriumban a fent említett neutrínómentes kettős béta-bomlást vizsgálják egy másik módszerrel, a $^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$ átmenet segítségével, ahol a xenon egyben a detektoranyag szerepét is betölti.

Vadászat a sötét anyagra

A következő projektek az úgynevezett „kozmosz sötét anyag” kutatását célozzák. Mi is ez a titokzatos sötét anyag? Világegyetemünk megismerése során egyre több jel utalt arra, hogy a látható, sugárzó anyag csak kis részét alkotja az egésznek. Mai ismereteink szerint, a sugárzó/látható anyag (például csillagok, sugárzó ködök stb.) a teljes anyag/energia csak mintegy 0,5-1%-át teszi ki. Hozzávéve a nem sugárzó, hagyományos anyagot (hideg gázok, por, kihunyott csillagok stb.) a teljes mennyiség ~5%-a adódik csupán. Itt nem részletezett okok miatt az is kiderült, hogy a maradék 95% nem is lehet hagyományos

anyag,²⁰ hanem valami ismeretlen szubsztancia. Az is ismert, hogy ebből ~27% az a sötét anyag, amely biztosan nem barionos és nagy léptékben csak gravitációs kölcsönhatásában mutatja meg magát. A maradék ~68% pedig a még ennél is rejtélyesebb „sötét energia”, amelynek hatása abban nyilvánul meg, hogy Világegyetemünk gyorsulva tágul, azaz a gravitáció ellenében valami szétlökő a nagy galaxishalmazokat.²¹

Régebben a neutrínó esélyes volt a sötét anyag szerepére, mert, bár tömege kicsi, de sokkal több van belőle minden más részecskénél.²² De azóta kiderült, hogy ez a tömeg biztosan kisebb annál, semhogy a neutrínók – nagy számuk ellenére – kiadják a sötét anyag tömegét.²³

Most az egyik legesélyesebb jelölt a sötét anyagot alkotó részecskére, WIMP-re (Weakly Interacting Massive Particles – gyengén kölcsönható nagytömegű részecskék, magyarul lehetne akár „gyent”) az úgynevezett „neutralínó”. Ez, az egyelőre hipotetikus részecske, a standard modellen túlmutató, ma még felderítetlen új fizikához tartozik. Az úgynevezett *szuperszimmetria* (SUSY) szerint minden ismert elemi részecskének van egy nagy tömegű, „árnyék” partnere. Az elképzelés szerint a neutrínó szuperszimmetrikus árnyékpartnere, a neutralínó lenne a keresett WIMP. Az elméleti modell jóslatai jól egybevágnak a várt tulajdonságokkal: a hagyományos anyaggal szinte csak gravitációs kölcsönhatásba lép, és „hideg anyag”, azaz mozgási energiája kicsi, és a jósolt össztömeg nagyjából kiadja a sötét anyagra várt értéket.²⁴

Tehát a sötét anyag rejtélye erősen összekapcsolja a részecskefizikát és a kozmológiát, a mikro- és a makrovilágot.²⁵

Nézzük az itt folyó, sötét anyaggal kapcsolatos kísérleteket!

DEAP/CLEAN

A DEAP a Dark Matter Experiment using Argon and PulseShape discrimination (Sötétanyag-kísérlet, ahol argont és jelalak-diszkriminációt használnak), míg a CLEAN a Cryogenic Low Energy Astrophysics with Noble liquids (Kriogén kisenergiás asztrofizika folyékony nemesgázokkal) rövidítése [11].

Itt folyékony argon (vagy neon) segítségével mutatják ki, ha egy WIMP esetleg kölcsönhat egy „evilági” részecskével.²⁶

A DEAP-1 2007-ben indult, és inkább csak a koncepció tesztelése volt a cél. Itt 7 kg argont használtak.

²⁰ Barionos, azaz protonból és neutronból álló, mindennapi életünkben jól ismert anyagfajta.

²¹ Sötét anyag témakörben lásd például a 2006-os *Fizikai Szemlében* Németh Judit cikkét [10]!

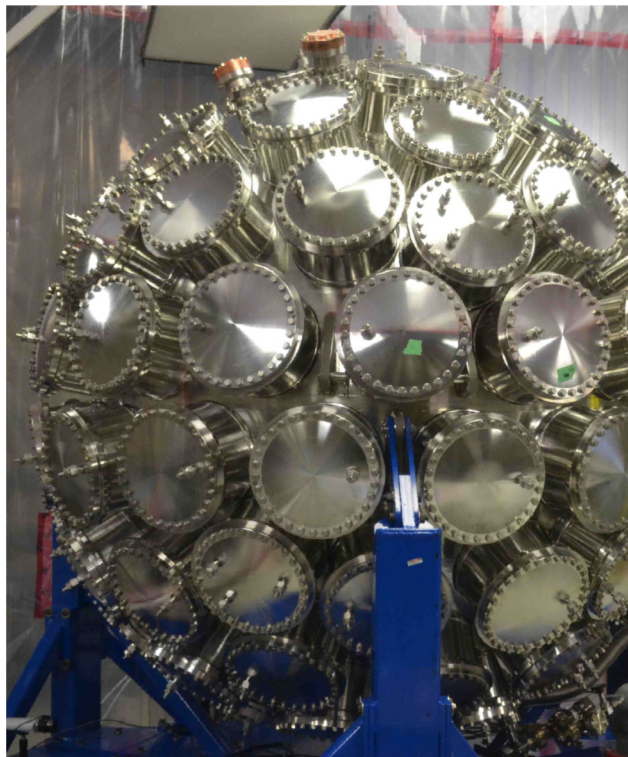
²² A zérus nyugalmi tömegű fotonokat kivéve.

²³ Másrészt, a sötét anyag „hideg” (lassú) kell legyen (cold dark matter), a neutrínók pedig közel fénysebességgel mozognak.

²⁴ A másik jelölt az „axion”, erről az SNO+ / „Egzoitikus fizika” pontban írtam.

²⁵ Ez a neutrínóra is elmondható.

²⁶ Ebben az esetben ez rugalmas szóródást jelent az argon atommagon.



9. ábra. A miniCLEAN sötétanyag-detektor.

Az ezt követő miniCLEAN 500 kg argont vagy neont, az utána jövő DEAP-3600 már közel 1000 kg folyékony argont használ. Az argon itt is egy akril-edényben lesz és 260 darab fotoelektron-sokszorozó veszi körbe. Az egész berendezést – az SNO/SNO+hoz hasonlóan – ultratiszta víz veszi majd körbe, csökkentve a háttérrel (9. ábra).

Az argon használatának előnyei:

- nemesgáz lévén könnyű tisztán (azaz radioaktív szennyeződések nélkül) előállítani;
- nagy mennyiségű foton keletkezik benne, ha ionizáló sugárzás éri;
- aránylag olcsó és van tapasztalat az ilyen célokra történő használatára tekintetében;
- nagy különbség van a háttérsugárzás okozta jel és az esetleges WIMP kölcsönhatás kiváltotta jel időbeli lefutásában, azaz könnyen megkülönböztethető a zavar és a hasznos jel.

Mindenesetre a háttérrel nagyon kicsire kell szorítani, mivel a várt eseménygyakoriság: 1 jel/év! Ezért is fontos az SNOLAB biztosította alacsony háttér.

PICO

A PICASSO és a COUP mozaikszavak egyesítéséből. A PICASSO (Project In Canada to Search for Supersymmetric

Objects) a kanadai projekt szuperszimmetrikus objektumok keresésére rövidítése. A detektálási elv ötletes, hallgatózni kell! Itt freont (C_4F_{10} , illetve C_3F_8) használnak amit (50-100 μm -es) kis cseppekben, egy viszkózus anyagban (polimerben) oszlatnak el. Ha egy fluoratommag találkozik egy WIMP-pel, akkor a visszalökődés kinetikus energiája felhevíti és elpárologtatja a freont. A képződő buborék nő és az egész cseppecske gyorsan elpárolog. Az így kialakuló kis robbanás nyomáshulláma (körülbelül 4 ms) piezodetektorokkal mérhető. Itt is egyre nagyobb méretekben épülnek az újabb detektorok, így csökkentve az érzékenységi küszöböt. Az utolsó (eddig tervbe vett) már ezer kg freont használ majd.

COUPP (Chicagoland Observatory for Underground Particle Physics) a chicagói föld alatti részecskefizika obszervatórium. A nevéből látszik, hogy ezt nem itt, az SNOLAB-ban, hanem Chicagóban, a Fermilabnál kezdték, még 2004-ben, de jelenleg már itt folyik a kísérlet. Ez egy 4 kg CF_3I -ot tartalmazó buborékkamra. A trifluor-jód-metán folyadék túlhevítve várja a WIMP-pel való találkozást. Ha ez megtörténik, akkor a keletkező buborékok révén detektálható az esemény (10. ábra). A 4 kg-os prototípust követi egy 60 kg-os, majd végül egy 500 kg-os.

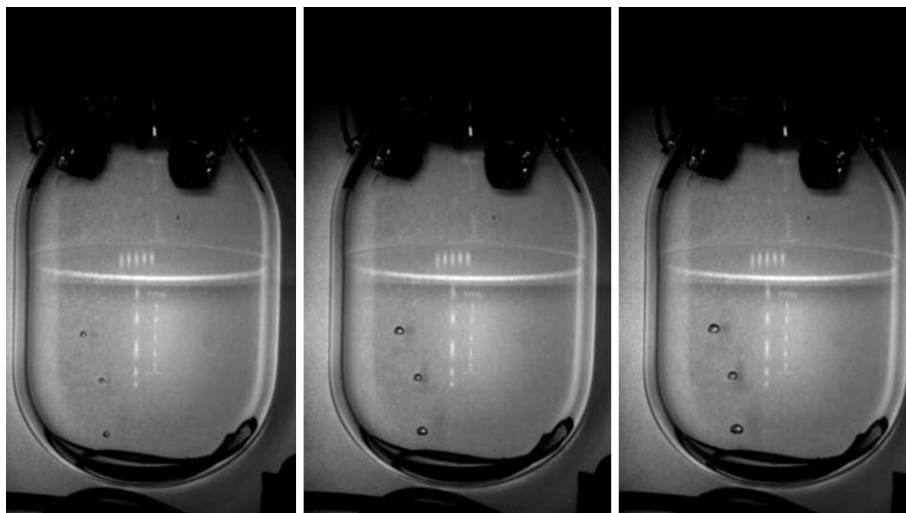
DAMIC

A Dark Matter In CCDs (sötét anyag CCD-kben) kísérletben a digitális kamerákban is használatos CCD egy „felturbózott” változatát alkalmazzák. 250 μm vastag – a szokásos 30 μm helyett –, és belső zajszintje alacsony. Ezt a Berkeley Laboratóriumban (USA) fejlesztették ki.

SuperCDMS

A Super Cryogenic Dark Matter Experiment (szuper kriogén sötét anyag kísérlet) projekt egyelőre a Berkeley Egyetemen folyik, de a terv szerint az SNOLAB-ba „költöznek”. Itt nagy germánium szilárdtestdetektorok és a WIMP-ek várt kölcsönhatását tanulmányozzák, közel abszolút zérus hőmérsékleten.

10. ábra. A COUPP sötétanyag-detektor.





11. ábra. Stephen Hawking látogatása az SNOLAB-nál.

ciális balesetvédelmi és „bányahasználatra” vonatkozó vizsgákat le kell tennie, amelyek a bányászok számára is kötelezően előírtak.

Tehát a laborba úgy lehet eljutni, hogy a felszíni épületben átöltözünk, a speciális „bányafelszerelést” felöltjük, majd lent, a labor bejárata előtt egy alapos csizmosást követően az öltöző „piszkos” részén mindent (szó szerint) levetünk. A „tisztá” oldalra csak egy alapos zuhanyozás, hajmosás után mehetünk át, ahol frissen mosott alsónemű és overálok várnak bennünket. A tisztalabor területére csak ezután „hajfagó”-ban, védősisakban, védőszemüvegben, kesztyűben stb. léphetünk be.²⁸ A tüsszentésre is fokozottan kell ügyelni, és minden módon óvni kell a tisztaságot.

Az SNOLAB honlapján virtuális utazást tehetünk a laboratóriumban [12], és egy film is bemutatja nekünk a helyet [13].

Kint tartózkodásom alatt látogatta meg az intézetet *Stephen Hawking*. Számára egy kocsit készítettek, amely

a lifttől a laboratóriumig vezető úton, a bányavasúton közlekedett.²⁹ A 11. ábrán a látogatás során készült képek láthatók.

A Youtube-on is több, az SNOLAB-bal kapcsolatos videó található [14].

Irodalom:

- Németh Csaba: A Sudbury Neutrínó Observatórium (SNO) bemutatása, a 2015. évi fizikai Nobel-díj kapcsán. *Fizikai Szemle* 66/6 (2016)
- Klapdor-Kleingrothaus, Dietz, Harney, Krivosheina: Evidence for neutrinoless double beta decay, *Modern Physics Letters A* 16 (2001), S. 2409–2420.
- Ettore Fiorini: A neutrínó tömege. *Fizikai Szemle* 58/10 (2008) 331.
- Németh Judit: Szupernóva robbanás. *Fizikai Szemle* 47/5 (1997) 163.
- Németh Judit: Sötét anyag. *Fizikai Szemle* 54/11 (2006) 362.
- arXiv.org > physics > arXiv:1403.4842v1
- <https://www.snolab.ca/facility/vr-tour>
- <https://www.snolab.ca/outreach>
- <https://www.youtube.com/user/TheSNOLAB>

²⁸ A laboratórium megfelel a CLASS 2000-es szabványnak, ami azt jelenti, hogy a 0,5 µm-t elérő, illetve azt meghaladó méretű részecskék száma egy köblábnyi levegőben nem lehet több 2000-nél. Egy átlagos helyiségben ez az érték 1 millió.

²⁹ Ezen a vasúton szállítják az anyagokat, eszközöket is a laboratóriumba.

Egyéb érdekességek

Ahogy korábban már említettem, a föld alatti komplexum egy működő nikkelbánya (a Vale Inco cég Creighton bányája) egyik tárnájának leágazásaként került kialakításra. Az ott végzett munka során a bánya által üzemeltetett liftet használják a kutatók is. Ez egy kétszintes, körülbelül 2×40 főt befogadó, meglepően gyors közlekedési eszköz. A 2 km már észrevehető nyomáskülönbséget (25%) jelent a felszínhez viszonyítva, ezért, ha valakinek eldugult a füle (náthás), akkor az komoly fájdalmat, rosszullétet okozhat. Gyakran megtörtént, hogy félútról vissza kellett fordulni, mert valaki menet közben rosszul lett.

Téli napokon „nagy élmény” a hőmérséklet-különbség is, magam is megtapasztaltam, hogy milyen, amikor a kinti közel –40 °C-ról a lenti több mint +30 °C-ba érkezik az ember.²⁷

A liftből kiszállva még egy körülbelül 20 perces, közel vízszintes, föld alatti séta visz a labor bejárataig. A bányában szigorú biztonsági előírások érvényesek. Minden kutatónak ugyanazokat az általános és spe-

²⁷ A kőzet itt 42°C-os, de a folyamatos szellőztetésnek köszönhetően a tárna levegője és a közvetlen fala, ennél hűvösebb.