

A neutrínók 2005-ben vonultak be a földtudományok kísérleti eszköztárába. A *Nature* folyóirat azon év legfontosabb felfedezései közé sorolta a Föld radioaktív U- és Th-tartalmú kőzeteiből származó neutrínók létét kimutató japán KamLAND-mérést [1]. A földneutrínók kutatásának története azóta folyamatosan íródik. A legújabb lapokat 2010-ben az olaszországi Gran Sasso-ban végrehajtott Borexino-mérés [2], majd 2011-ben a KamLAND újabb publikációja [3] töltötte meg, amelyek a négyszeres hibahatárt meghaladó biztonsággal észlelték az urán 238-as izotópjának bomlási láncában keletkező elektron típusú antineutrínókat.

Az antineutrínók forrása egyértelműen azonosítható. A Naptól elektron-antineutrínók nem jönnek, a kozmikus sugárzás alapvetően protonokat tartalmazó áramának légköri atomokkal történő ütközéséből pedig túlnyomórészt pozitív töltésű pionok keletkeznek, amelyek kétlépcsős bomlástermékeiből szintén hiányzik az elektron antineutrínója. A kiértékelésben kizárólag a mérés közelében működő atomreaktorok „szennyezésére” kell figyelemmel lenni, ami a reaktoroktól távoli Borexino-mérésnél lényegében fel sem lép.

A téma vezető elméleti szakértői, *G. Fiorentini* és munkatársai még a 2005-ös első észlelés eredményeinek közzététele előtt jelentették meg földszerkezeti modellszámításukat a KamLAND-mérésben várt neutrínófluxus nagyságára [4]. Cikkük történeti áttekintő része a következő mondattal kezdődik: „Geo-neutrinos were introduced by *Eder* in the sixties and *Marx* soon realized their relevance.”¹

A geoneutrínók jelentőségének megértése egyik legszebb példája Marx György természettudósi kíváncsiságának, amellyel a szűken vett fizika vizsgálati területén túllépve, a természet jelenségeinek titkait mindig teljességükben kutatta. A témakörben közölt munkáinak [5] megjelenését követő bő harminc év múltán világos, hogy a neutrínók hordozta földszerkezeti információk megismerését vázoló víziója hosszú távú kutatási irányzat kezdetét jelezte. A megfigyelések értelmezésével egyre biztosabb adatok származtathatók a Föld globális hőháztartásának meghatározó radioaktív komponensére és a Föld közvetlen mintavétellel nem elérhető mélyrétegeinek anyagösszetételére. A kapott információk pontossága közel került ahhoz, hogy a neutrínófluxus részletes jellemzése dönthesse a Föld szerkezetére és keletkezésére vonatkozó számos modell versengésében.

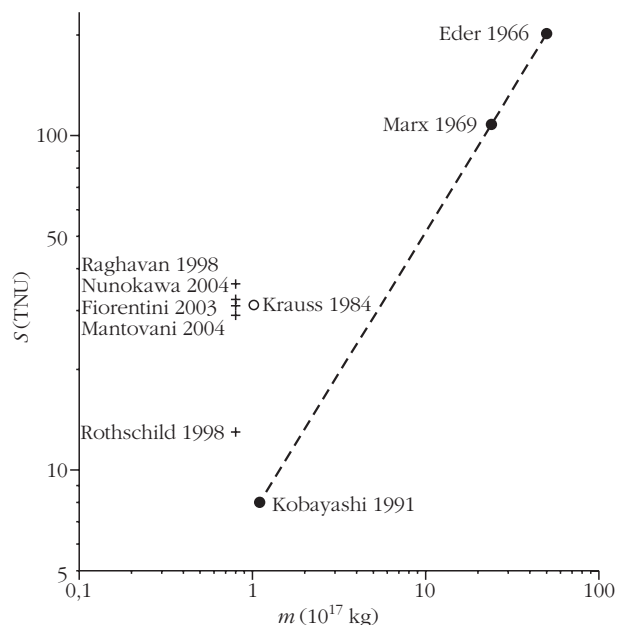
A következő évtizedekben várható, hogy a Kamioka és a Gran Sasso hegyek mélyén kiépített föld alatti laboratóriumok mellett egyre több neutrínó-obszervatóriumban, majd végül a Földet behálózó mérések sorával megméri a földneutrínók fluxusának felszíni eloszlását. Rövid ismertetésemben Fiorentini csoport-

jának munkáját [4, 6] követve bemutatom a neutrínófluxus előrejelzésében használt modellt. Megismerése alapján világos lesz, hogy a növekvő számú mérés értékeléséből miképp kapunk egyre pontosabb választ arra a kérdésre, hogy hol és mennyi urán van a Földön?

A földneutrínó-áram adott földrajzi helyen lévő detektorban várt értékének kiszámításához elvben a Föld teljes térfogatában modellezni kell annak K(40), U(238) és Th(232) tartalmát. Valójában csak az utóbbi kettőre érzékeny az inverz béta-bomlás ($\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+ - 1,8 \text{ MeV}$) reakciójával működő detektálás, miután a kálium izotópjának bomlásából származó neutrínó maximális energiája 1,31 MeV. A legegyszerűbb modell azon a feltevésen alapul, hogy a kondritos meteoritokban talált mennyiséghányaduk megfelel földi gyakoriságuknak. Ez a K/U $\approx 13\,000$, Th/U $\approx 3\text{--}4$ arányt jelenti, amit Fiorentini és társai első cikkükben fel is használtak, mert abban csak az urán elterjedtségének földszerkezeti modelljét alkották meg. A kondritos meteoritokbeli előfordulást használó modellt, amelyet a Föld teljes térfogatára alkalmaznak „bulk silicate Earth”, rövidítve BSE-modellnek hívják. Eder, majd kisebb finomítással Marx ennek alapján a mai becslések 30-50-szeresének megfelelő nukleáris hőteljesítményt prognosztizáltak (1. ábra).

A geokémiai vizsgálatok mai álláspontja szerint az urán vegyületeinek előfordulása csak a litoszférában, azaz kizárólag a földkéregben és a köpeny megszilárdult legfelső részében várható, ami összesen 70–140 km vastagságú rétegre korlátozza a neutrínók forrá-

1. ábra. A földneutrínók S beütési intenzitására 2005 előtt végzett 9 becslés eredménye a kőzetek feltételezett teljes m urántartalmának függvényében. A tömeget 10^{17} kg egységben, a beütési intenzitást TNU egységben (definícióját lásd a szövegben!) ábrázolják [4].



¹ A földneutrínók fogalmát Eder vezette be a hatvanas években, majd Marx mutatott rá fontosságukra.

sát. A kéregben végzett kísérleti fúrások 10–12 km mélységre hatolva közvetlen információszerezésre adnak módot. Ennek alapján az átlagosan 30 km-esnek modellezett kéregben található teljes U-mennyiséget $(0,3-0,4) \cdot 10^{17}$ kg-ra becsülik.

Fiorentini és munkatársai 2005-ben a KamLAND-detektor 200 km-es sugarú környezetében végzett mérések alapján készült (166 minta 37 független geofizikai mérésből) felszíni $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ -os szögfelbontású U-előfordulási térképre építették a felső kéreg lokális forráseloszlási modelljét. A térkép elkészítéséhez a Japán-szigetív lemezdinamikai sajátosságai miatt speciális megfontolásokat is tudtak alkalmazni. 562 sekély epicentrumú földrengés 13 000 jelének érkezési ideje alapján a geofizikusok közvetlenül meg tudták határozni a Japán-szigetek alatti két mélységi szakadási felület elhelyezkedését. A felső (Conrad) kéreg alja 14–19 km mélységben, az alsó (Moho) kéreg 32–40 km mélységben végződik. Az egyes $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ -os csempék alatti felső kéregben 0,5–3,5 ppm értékek között ingadozott a kéregek térkép alapján hozzárendelt előfordulási U-gyakoriság. Az alsó kéregben a Kínai–Koreai kontinentális tömb átlagértékét, 0,85 ppm-et használták. Az antineutrínó-fluxus tóriumkomponensének értékét 2005-ben a Th:U = 4:1 előfordulási arány feltételezésével állapították meg.

2005-ben még friss, de már szilárd elfogadottságú jelenség volt a neutrínók oszcillációja. Ez azt jelenti, hogy a keletkező antineutrínók egy része átalakul olyan neutrínófajtába, amely nem tud a protonon inverz béta-bomlást előidézni. A detektorig tartó sok oszcillációs hossznyi útra átlagolva az elektron típusú antineutrínók „életbenmaradási” valószínűségére $p = 0,59$ adódik, ami fontos módosító tényező a kimutatható fluxus becslésekor.

Figyelembe véve a fenti hatásokat a Kamioka-hegység 200 km-es környezetéből jövő földkéreg eredetű neutrínófluxusra $1,59 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ adódott, ami a megfigyelt neutrínók által indukált inverz béta-bomlási reakciók számára 12,74 TNU-t ad.²

A becslés legnagyobb bizonytalansági forrásának a Japán-szigetív térségében alábukó két kőzetlemez (a Fülöp és a Pacifikus) járuléka mutatkozott. Az előbbi 40 mm/év, az utóbbi 80 mm/év sebességgel mozog Eurázsia felé, nagyjából 100 millió éve. Egyetlen 60 mm/év sebességű réteggént vették figyelembe, amely mozgásának megkezdése óta 6000 km-nyi réteget préselt be az eurázsiai lemez alá. A 6,5 km vastagságú réteg tetején 350 m vastagságú, üledékes eredetű, az átlagnál nagyobb U-tartalmú (1,4 ppm) rész van. Feltételezve, hogy a bepréselődő rétegről az ülepedési rész 100 millió éve teljes mértékben lenyíródik és a Japán-szigetek környezetében marad, a fluxusban maximum 4,4 TNU többlet adódik. A Japán-tenger sajátos kéregszerkezetét is figyelembe véve, a régió kéregjáruléka rá végül $15,41 \pm 3,07$ TNU-t kaptak.

² A mérésekkel összevethető TNU egység (Terrestrial Neutrino Unit) évenként 1 inverz bétabomlási esemény bekövetkezését jelenti egy olyan detektorban, amely 10^{32} protonot tartalmaz.

A távolabbi területeken $2^\circ \times 2^\circ$ -os csempeméretű felbontásban használták a geofizikai mérésekből nyert változó vastagságú felső és alsó kéregméretet. Két vizsgált esetükben a kéregben lévő urán teljes mennyiségét 0,3, illetve 0,4 értékűnek választották 10^{17} kg egységben. Ezt az anyagmennyiséget az egyes csempék alatti rétegek vastagsága szerint osztották szét. A kisebbik tömeg 6,45 TNU, a nagyobbik 8,65 TNU neutrínóáramra vezet.

A köpenyben szakmai közmegegyezés szerint a centrum felé haladva nő az urántartalom. Két modellt vizsgáltak meg. Az egyikben a BSE-modell szerinti átlagsűrűséget gömbszimmetrikusan és egyenletesen osztották el a felső köpeny egészében, a másikban a teljes tömeget a köpeny szilárd részének aljára helyezték. A köpenyben tárolt teljes tömeget m_M -mel jelölve az elsőből 12,15 m_M TNU, az utóbbiból 17,37 m_M TNU detektálási gyakoriság adódott a KamLAND-detektornál.

A két távoli járulékot úgy kombinálták, hogy a teljes U-tartalom m tömegét (10^{17} kg egységben) szabad paraméternek hagyták. Ezzel

$$S_{\text{távolsági, min}} = 6,45 + 12,15(m - 0,3) \text{ TNU},$$

$$S_{\text{távolsági, max}} = 8,65 + 17,37(m - 0,4) \text{ TNU}.$$

A kettő átlagához adták hozzá a közeli tartomány részletes modellel becsült járulékat. Összességében

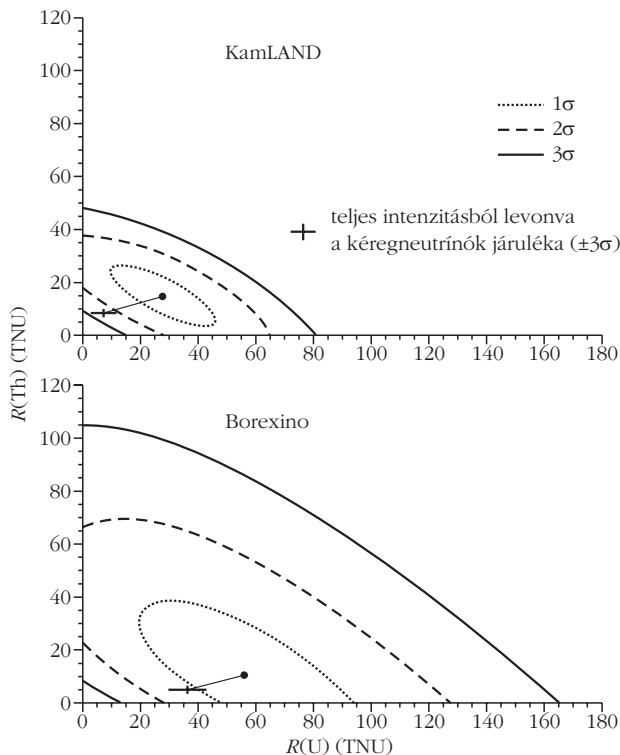
$$S = (17,66 + 14,76 m) \text{ TNU}$$

az eredmény. (A részletes hibabecslést és eredményét itt most nem ismertetem.)

A bomlásokban felszabaduló energiát a Föld saját hőtermeléséhez adott járulékként értelmezik. A Föld saját hőteljesítményét 40 TW körüli értékkel becsülik. Ez az érték az uráneloszlás adott geometriájával felső korlátot ad a radioaktív források teljes tömegére.

A geológiai meghatározott U-mennyiséget minimális ösztömegeként elfogadva ($m = 0,3$) 19 TNU, a Föld teljes hőleadását az U+Th+K bomlásból származó hővel azonosítva ($m = 1,8$) 49 TNU volt a fluxusra vonatkozó jóslat. Itt megemlíthető, hogy a köpenyre és a kéregre különbségtétel nélkül alkalmazott BSE-modell 295 TNU-ra vezet. A KamLAND-mérés *Nature* címlapját is meghódító közleménye a bemutatott részletes modellel összhangban lévő neutrínódetektálási eredményre jutott. Pontosabban úgy fogalmazhatunk, hogy 2,5-szeres hibahatárral kizárták azt a lehetőséget, hogy a földneutrínóknak tulajdonított jel pusztán statisztikai ingadozásból származna. A legutóbbi két közlemény [2, 3] a földneutrínók észlelésének bizonyosságát 4,5-szeres megbízhatósági határra emelte. (A Higgs-bozon felfedezését – bizonyos önkénnyel – akkor fogják bejelenteni, ha a felfedezés jelének statisztikai ingadozasként való értelmezésére az ötszörös hibahatárnál kisebb esély marad.)

Az újabb kísérleti közleményekben (különösen a japán csoportéban) a detektált neutrínók energiaeloszlását már olyan pontossággal mérik, hogy a spektrum elméleti rekonstrukciójánál megkülönböztethetőek a különböző urán-tórium keverékekből száрма-



2. ábra. A KamLAND (felső ábra) és a Borexino (alsó ábra) kísérletben mért földneutrínó események energiaeloszlását a földkéreg részletes modellje alapján reprodukáló urán- és tóriumeredetű neutrínófluxusból származó beütésszámok, $R(U)$ és $R(Th)$, TNU egységben (a legjobb egyezés a kövér pontokhoz tartozik). A pontok körül a kísérleti adatokat $n = 1, 2, 3$ -szoros szórással reprodukáló forrásintenzitások kontúrjai láthatók. Háromszoros hibahatárral feltüntetjük mindkét ábrában azt a tartományt (keresztek) is, amelybe ez a pont átmegey, amikor a teljes intenzitásból levonjuk a földkéregből származó számított neutrínófluxust [6].

zó együttes eloszlások. Fiorentini csoportja az olasz geológiai szolgálat segítségével az Appenninek detektorhoz közeli kéregtartományára is elkészített egy finomabb felbontású urán- és tórium-előfordulási térképet. A távoli tartományokra pedig a folyamatosan fejlesztett $2^\circ \times 2^\circ$ -os immár háromrétegű kéregtér-

kép jelenlegi verziójából kiszámítható járulékat használták. A KamLAND- és Borexino-kísérletek spektrumainak U+Th forrásokkal történt reprodukálásából a források erősségére levonható következtetést mutatja a 2. ábra. A spektrumoktól a legkisebb eltérésre vezető összetételből várt urán-, illetve tóriumeredetű neutrínó-beütésszámot reprezentáló vastag pont körül az 1-, 2-, 3-szoros szórás tartományának határait is feltüntették. A két detektorból származó becslés a jelenlegi hibahatárokon belül kompatibilis.

A kéregmodell járulékat a méréseket legjobban reprodukáló összetétel eredményéből levonva, mindkét mérésből a kétszeres hibahatárt meghaladó biztonsággal állítható, hogy zérustól különböző a maradék, amelyet a 2. ábra kereszttel jelzett pontjai mutatnak. Ezt azonosítják a köpenyből származó fluxussal.

A maradék értéket a köpeny hat különböző földszerkezeti modelljében becsült urán- és tóriumtartalommal hasonlították össze. Bár a jelenlegi hibahatárok mellett egyik modell sem zárható ki, arra a konklúzióra jutottak, hogy a magasabb U-Th tartalmú modellekből számolható fluxus áll közelebb a levonás utáni maradékfluxushoz. Ezek adataival számított radioaktív eredetű hőteljesítményre 14–20 TW adódik, amely a Föld teljes hőteljesítményének 40–50%-a. Továbbra is fennáll tehát a „hőrejtély”, mivel a Föld saját hőtermeléséhez adott járulékat tekintve a radioaktív bomlásokon kívül az egyéb lehetséges forrásokra az ismertetethez hasonló szinten számszerűsített becslés egyelőre nem ismert.

Irodalom

1. T. Araki és mtsai, *Nature* 436 (2005) 499.
2. G. Bellini és mtsai, *Phys. Lett. B* 687 (2010) 299.
3. A. Gando és mtsai, *Nature Geoscience* 4 (2011) 647.
4. G. Fiorentini, M. Lissia, F. Mantovani, R. Vanucci, *Phys. Rev. D* 72 (2005) 033017.
5. G. Marx, *Czech. J. Phys.* B19 (1979) 1471; C. Avilez, G. Marx, B. Fuentes, *Phys. Rev. D* 23 (1981) 1116.
6. G. Fiorentini, G. L. Fogli, E. Lisi, F. Mantovani, A. M. Rotunno: *Mantle geoneutrinos in KamLAND and Borexino*. arXiv: 1204.1923 [hep-ph], 2012. április

BALATONFÜREDI EMLÉKEIM MARX GYÖRGY PROFESSZOR ÚRRÓL

Vastagh György

Marx professzor úr kötődése Balatonfüredhez akkor kezdődött, amikor szülei megvásárolták a Munkácsy utca 8. szám alatti telket (akkor Arácshoz tartozott és a 3. számot viselte) a kis házikóval együtt, amelyet nyaralóként használtak.

Később, első fizetéséből már ő vásárolta hozzá a mellette lévő telket is, így lett elegendően nagyméretű az egyre növekvő családhoz és a sok-sok kedves – tudományos, művész-, munkatársi, tanítványi körökből érkező – vendéghez. A professzor úr ugyanis nem-

csak idehaza alakított ki alkotó baráti kapcsolatokat, de a külföldön élő magyar tudósokkal is korán elkezdte a kapcsolatok felvételét azzal a céllal, hogy e tudósok kötődjenek szülőföldjükhöz, legyenek büszkék magyar gyökereikre. Így került személyes barátságba Wigner Jenővel, Teller Edével, Gábor Dénessel, Kürti Miklóssal, Lánosz Kornéllal és Telegdi Bálinttal. Közülük nem egyet (Wigner, Teller, Kürti, Lánosz) sikerült Magyarországra „hozni” (például Wignert már 1972-ben, Tellert 1990-ben).