

fizikai szemle

AZ EÖTVÖS LORÁND FIZIKAI TÁRSULAT LAPJA

Alapította Eötvös Loránd 1891-ben Mathematikai és Physikai Lapok néven

XXIII. évfolyam

6. szám

1973. június

ÉRTJÜK-E IGAZÁN, HOGY HONNAN ERED A NAP MELEGE?

Marx György
ELTE Atomfizikai Tanszék

*Nap, ki megvoltál, már az élet kezdetén,
gyönyörűen tündökölsz az égen.
Ha keleten megjelenesz,
ragyogásod szépséggel tölti el mindeneket.
Ha világítasz,
fényed elárasztja a világot.
Sugaraid a Földet simogatják
és amit életre hívtál rajta.
Eknaton naphimnusza (i. e. 1400)*

*Mikor ezt írtam, tiszta volt az ég,
Zöld ág virított a Föld ormain.
Vörösmarty: Előszó*

Az élet nem egyensúlyi állapot, hanem folyamat. A Föld bioszférája (éghető erdők tartós létezése egy oxigéndús légkörben) paradoxon az anorganikus kémia és a termodinamika szemszögéből. A Földön felhalmozott szerves anyagot állandóan fogyasztja az élőlények anyagcsereje, a bomlás, a tűz, de az szüntelenül újrakeletkezik. A levélzöld termeli állandóan molekulaműhelyében; azt a hatalmas hőmérsékletkülönbséget használja ki, amely a 300 K hőmérsékletű földszín és a 6000 K hőmérsékletű napsugár közt fennáll. Folyamatos fotoszintézis révén a stabil H_2O -ból és CO_2 -ből oxigén és a szénhidrátok alakulnak ki. Ez utóbbiak így együtt kémiai instabilak, az anyag gerjesztett állapotai. Bennük kémiai konzerválva van a Nap-felszín 6000 fokos melege. Amikor cukrot szopogatunk, kenyeret eszünk, fával tüzelünk, ezt a Nap-meleget vesszük elő molekuláris konzervdobozából, hogy fenn tudjuk tartani az életfolyamatot.

A régi kultúrnépek Istenként tisztelték a Napot, mint az élet forrását. Bennünket is elfog az ősi áhítat, amikor nyáreleji verőfényben a tó partján bőrünket éri a forró napsugár. És ezen ősi, személyes érdeklődésünk miatt fordulunk mindig azok felé a kutatások felé, amelyek tudományos egzaktussággal kívánják megfejteni a Nap-erőmű működésének rejtélyét.

A Nap mint nukleáris reaktor

Az atomok anyaga energetikailag legmélyebb állapotában akkor van, ha vas-kobalt-nikkel a kémiai összetétele. Az alacsony rendszámú elemekben, a *kicsiny* atommagokban kihasználatlan a magerők vonzó hatása, munkavégzőképessége. A magas rendszámú elemekben, a vas csoportnál *nehezebb* atommagokban viszont annyi proton zsúfolódik össze, hogy ezek pozitív elektromos



Előadás az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 1972. december 18-án tartott közgyűlésén.

töltései intenzíven taszítják egymást. A Coulomb-taszítás arra vár, hogy a nehéz magot (radioaktív bomlással) felaprózva munkát végezzen. Az állapotú anyagot találhatjuk meg a Földünkre hulló vasmeteoritokban; valószínűleg ez van bolygónk vasmagjában is.

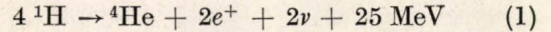
Ha bármilyen anyag tízmilliárd fokra vagy még magasabb hőmérsékletre hevül, az élénk hőmozgás miatt és a hőmérsékleti sugárzás kemény fotonbombázásának hatására minden atommag alkotórészeire hull szét. Ilyenkor semmiféle elem nem létezhet, csak egyetlen egy: az ionizált hidrogén, hiszen az egyetlen részecskéből, mindössze egyetlen protonból áll. Csillagászati tapasztalatok utalnak rá, hogy az univerzum anyaga egy korai forró korszakában, tízmilliárd esztendővel ezelőtt ilyen magas hőmérsékletű állapotban volt [1]. „Big Bang”-nek, „Nagy Bumm”-nak becézett adiabatikus tágulással hűlt le ebből mai alacsony hőmérsékletére. (A világtér mai átlaghőmérséklete a benne megfigyelt izotróp hőmérsékleti sugárzás tanúsága szerint 2,7 K.) A gyors lehűlést nem követte a hidrogén szimultán átalakulása vassá. Amikor a hőmozgás már nem elég az atommagok disszociálására, akkor már arra sincs mód, hogy az atommagok egybeolvadjanak. A protonok nukleáris vonzását nem engedi szóhoz jutni pozitív töltésük elektromos taszítása.

A csillagászati megfigyelések szerint az univerzum anyagának 70–75%-a még mindig hidrogén. A hidrogén-atommagot, protont körülvevő Coulomb-taszítózóna akadályozza, hogy a hidrogénanyag „lecsurogjon” az energiaminimumot kínáló vas-állapotba. Így mondhatjuk: a kozmikus hidrogéngáz az anyag energiadús „túlhűtött” állapota. Benne nukleáris csapdába esett a Nagy Bumm tízmilliárd fokos melege.

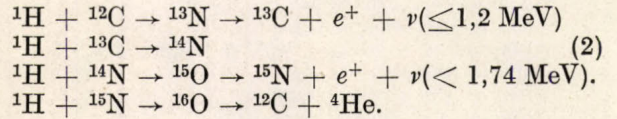
A nukleáris szempontból gerjesztett állapotúnak tekintendő (tízmilliárd foknak megfelelő energiatartalmú) hidrogén és a 2,7 fokos világtér termodinamikai potenciálkülönbségének kihasználásán alapul a csillag-erőművek működése. Innen nyeri sugárzó energiáját Napunk is.

Eddington már 50 évvel ezelőtt felvetette, hogy a Nap-erőmű hidrogén → hélium fúzióval működik.

Hans Bethe mutatta meg 1938-ban, hogy a gravitációs munkavégzés (kontrakciós felmelgedés) által lokálisan kialakított hőmérséklet elegendő a lassú $H \rightarrow He$ fúzióhoz. Ezáltal a Nap centrumában a magerők munkavégzése által $L = 4 \cdot 10^{26}$ watt teljesítménnyel nukleáris energia szabadul fel és alakul át elektromágneses sugárzássá. A lavinaszerű $H \rightarrow He$ egyesülés akadály, hogy az első lépés (${}^1H + {}^1H \rightarrow {}^2He$) nem megy, mert a 2He izotóp nem létezik. (Ezért nem robban fel atombombaként a Nap.) Bethe ezt az akadályt úgy kerülte meg, hogy szén-katalizátorral végeztette el a

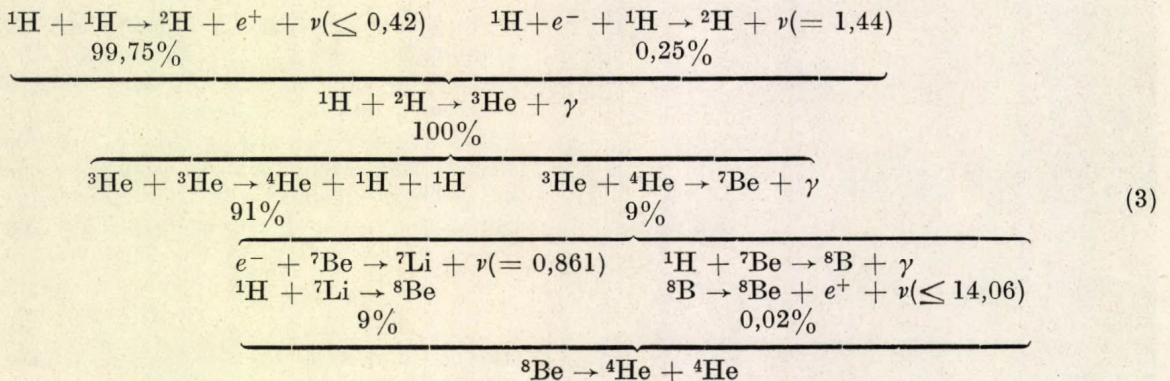


fúziós láncot, a következőképpen:



1938-ban 20 millió fokosnak számították a Nap centrumát. Ez a folyamat 20 millió fokon elegendő energiát szolgáltatna a Nap sugárzástermeléséhez. Azóta pontosabb adataink vannak a Nap atomos összetételéről, a Nap-anyag átlátszóságáról. A látható 6000 fokos felszínről extrapolálva a centrum 15 millió fokosnak adódik. Ilyen „alacsony” hőmérsékleten a hőmozgás nem elegendő (még alagútjelenséggel kombinálva sem) ahhoz, hogy a protonok a $Z = 6$ rendszámú C-atommagok és $Z = 7$ rendszámú N-atommagok Coulomb-taszítását legyőzhessék. A fúzióknak direkt, hidrogénből kiindulva kell végbemennie. Salpeter mutatott rá, hogy az „első lépés” blokádján áttörhetünk, ha az instabil 2He még a gyors szétesés előtt β -bomlást szenved: ${}^1H + {}^1H \rightarrow {}^2He \rightarrow {}^2H + e^+ + \nu$. Erre van némi esély. Egy H-atommag másodpercenként több milliárdszor ütközik, mégis milliárd éveket kell várnia, míg kifogja a „szimultán β -bomlást” és beépülhet nehezebb atommagba. Az anyagot még 15 millió fokon is nehéz kirázni „túlhűtött” H-állapotából. De ennek a nehézségnek köszönhető a Nap milliárd évekre terjedő tartós fénylése.

A fúziós lánc részletesen kiírva a következő:



Hogy az egymással vetélkedő ágakban milyen gyakorisággal történik a fúziós folyamat, az a Nap centrumában uralkodó viszonyoktól függ. Az első lépés ágarányát a *kéttest*: *háromtest* ütközések aránya, végső soron a hőmérséklet szabja meg. A második elágazás ágarányát a ${}^3\text{He}:$ ${}^4\text{He}$ koncentrációviszony határozza meg. A harmadik elágazásban az a döntő, hogy a ${}^1\text{H}$ -mag milyen valószínűséggel talál kvantum-alagutat a $Z = 4$ rendszámú Be-mag Coulomb-gátján; ez a valószínűség erősen hőmérsékletfüggő (a ${}^8\text{B}$ -képződés gyakorisága T^{25} -vel arányos).

A fúziós reakciók gyakoriságának meghatározásához tehát részletes Nap-modellt kell kidolgozni. A Nap kialakulásakor homogén eloszlásban x_0 súlykoncentráció H, y_0 súlykoncentráció He és z_0 súlykoncentráció nehézelem összetételből indulnak ki. $x_0 + y_0 + z_0 = 1$. (z_0 nem változik, de befolyásolja a Nap átlátszóságát, vele a hőmérsékletesést). Innen indul el a Nap fejlődése, ismert hatásereztszmettszettel játszódhatnak le a fúziós folyamatok, lassan növekszik a Nap L fényessége. Egy t_0 pillanatban eléri a ma megfigyelt $L(t_0) = 4 \cdot 10^{26}$ watt értékét. Ez a t_0 a Nap életkora.

Az Apolló-űrhajók által talált legrégebb Holdszikla, a Genesiz Köve 4,15 milliárd éves. Ez a Naprendszer legrégebb ismert darabja. Létéből arra következtetnek, hogy a Nap életkora legalább $t_0 = 4,7$ milliárd év. A Nap ennyi idős korára akkor mutatja éppen a mai fényességét, ha kezdeti felépítése a következő volt: $x_0 = 72,6\%$, $y_0 = 26,0\%$, $z_0 = 1,4\%$. Ennek megfelelően a jelenlegi centrális hőmérséklet 15,3 millióK. Az innen adódó százalékos ágarányokat tüntettük fel a fúziós reakciólánc felírásánál. (Ha a Napot öregebbnek tételezzük fel, magasabb belső hőmérséklet adódna.)

Ez az 1972-es modell jelenti a legjobb képet, amit az asztrofizika a Napról eddig megalkotott. A modelltől kiadódó z_0 érték jól egyezik a Nap felszínén spektroszkópiailag megfigyelt nehézelem-gyakorisággal.

Megtanultuk Napunknak, a bolygórendszer központi atomerőművének egyenletes, milliárd év alatt is alig változó működését és tanítjuk azt. Kiszámítottuk, milyen úton-módon szívárogi ki a Nagy Bumm melege hidrogén-csapdájából, hogy az életteremtő napfényt táplálja.

A Nap neutrínó-szemmel

A Nap-reaktorban magerő végzi a munkát. A gyenge β -kölcsonhatás pedig az a szelep, amely az első lépésben lefékez a nukleáris fúzió romboló áradását, milliomod másodperc helyett milliárd évekre adagolja szét a felhalmozott atomenergiát, így megteremti a földi élet evolúciójához szükséges időt.

A magerő és β -bomlás összjátékára azért van szükség, hogy a hidrogén protonjait 50%-ban neutronná alakítsa át, hiszen a hélium csak akkor

stabil, ha protonok mellett neutronokat is tartalmaz. (A magban a proton \rightarrow neutron átalakulás csökkenti a Coulomb-taszítást a magerő-vonzás változatlan szinten tartása mellett.) A $p^+ \rightarrow n^0$ átalakulásban az elektromos töltés megváltozásához elektronbefogás vagy pozitronemisszió szükséges. Ezt a leptontöltés megmaradási törvénye értelmében szükségszerűen egy semleges leptonnak, a neutrínónak a kisugárzása kíséri.

A neutrínók egyetlen kölcsonhatás a gyenge β -kölcsonhatás, ezért szabad úthosszuk nagyságrendekkel nagyobb a Nap vagy a Föld méreteinél. A Nap centrumában született neutrínók gyakorlatilag ütközésmentesen haladnak át a Nap rétegein, veszteség nélkül lépnek ki a Napból. A Nap energiateljesítménye 96%-ban fénysugárzás, 4%-ban neutrínósugárzás alakjában jelentkezik. Mivel négy hidrogénatom egy héliumatommá történő egyesülésekor $\epsilon_0 = 25$ MeV energia szabadul fel, és ezalatt két neutrínó születik, Földünkre ν távolságban

$$I = 2 \frac{L}{\epsilon_0 \cdot 4\pi r^2} = 10^{11} \frac{\nu}{\text{cm}^2 \text{ s}} \quad (4)$$

intenzitású neutrínósugárzás esik. Tenyerünkön egy másodperc alatt több billió neutrínó halad át!

A neutrínósugárzás energiaeloszlását a (2), (3) reakcióisorban MeV egységekben tüntettük fel. Látjuk, hogy a neutrínók túlnyomó része a 0–1 MeV tartományban emittálódik. Egész kicsiny (10^{-4}) gyakorisággal azonban előfordulnak 10–14 MeV energiájú neutrínók is. (Hogy a neutrínósugárzás energiaspektruma pontosan milyen, az éppen a reakciólánc ágarányaitól függ.)

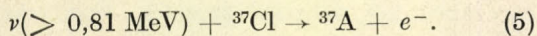
Ha derús nappal az égre pillantunk, a Nap-felszín optikai fénysugárzását látjuk: fél fok látószög alatt ragyog egy 1,4 millió km átmérőjű korong. A fotoszféra sárga színe a 6000 K hőmérsékletű felület által kisugárzott, 2eV energiájú fotonoknak tulajdonítandó. (Rádiótávcsöveinken át a Nap nagyobbának látszik, mert azok a ritka Napkorona sugárzását is felfogják.) Ha neutrínóra érzékeny szemünk is lenne, egészen más kép tárulna eléink. Közvetlenül a 10 millió foknál melegebb Nap-centrumot pillanthatnánk meg, ahol az energiefelzabardító termonukleáris fúzió folyik. Ez az optikai Napkorongnál tízszerese kisebb ragyogó foltot jelentene. Az innen érkező neutrínók színképe sem a Nap „hűvösebb” periferiáján gerjedő atomokról, hanem a centrum fúziós reakcióiban résztvevő atommagokról tudósítana. A színkép közvetlenül elárulná a reakció relatív gyakoriságát, ezáltal Nap-centrum hőmérsékletét is. A centrum hőmérséklete ezerszerese a fotoszféra hőmérsékletének, de az egyes Nap-neutrínók energiája milliószorosa a Nap-fénykvantumok energiájának. Hiszen a neutrínók nem 10 millió fokra jellemző hőmérsékleti sugárzásként keletkeznek, hanem a fúziós ütközések során születnek a hidrogénmagokból, a hidrogénmagokba pedig az ősi Nagy Bumm tízmilliárd fokos melege van bezárva.

Neutrínószemmel azt pillantanók meg, ami számunkra, élő emberek számára oly lényeges a Napon. Meglehetnének, hogy az univerzum fejlődését kiobbantó Nagy Bumm ragyogásának hidrogénba zárt parazsa hogyan adagolja éltető melegét.

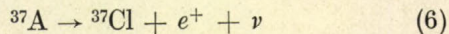
Davis kísérlete

Ha a β -kölcsönhatás neutrínók születését eredményezi, létre kell hoznia a neutrínók elnyelését. A neutrínónak (a semleges leptonnak) elnyelődése a leptontöltés megmaradási törvénye értelmében együtt jár egy töltött lepton (tehát elektron) keletkezésével. 15 évvel ezelőtt mutattunk rá, hogy ez lehetővé teszi a neutrínósugárzás kimutatását [2].

Pontecorvo és Alvarez már 1940 táján utaltak arra, hogy neutrínók kimutatására talán legalkalmasabb a neutrínóbefogás klórtartalmú anyagon:



Ebben a folyamatban a stabil klórból 34 nap felezési idejű radioaktív argon keletkezik, amelyeknek



elbomlása a ν -befogást észrevehetővé teszi. A fő nehézség az, hogy a gyenge ν -befogás hatáskeresztmetszete igen kicsiny. A legtöbb nap-neutrínó az (5) folyamat 0,81 MeV küszöbenergiája alatt marad. A Nap-neutrínók átlagos befogási hatáskeresztmetszete mindössze $5 \cdot 10^{-46} \text{ cm}^2$. Szemléletesen ez azt jelenti, hogy klórtartalmú anyagban (pl. konyhasóban) egyetlen Nap-neutrínó közepes szabad úthossza sok-sok fényév. Annak valószínűsége, hogy a Nap (4) neutrínósugárzása egyetlen klór-atomon a következő másodpercben kiváltsa az (5) átalakulást, $9 \cdot 10^{-36}$. (A klóratom átlagos élettartama a napsütés által indukált (5) átalakulással szemben $5 \cdot 10^{27}$ év!) Valóban érzékeny szemet kellene növesztenünk, ha a Nap centrumának titkát neutrínófényben akarnók kilesni.

Raymond Davis, az Egyesült Államok egyik legkiválóbb radiokémikusa 1964-ben hozzáfogott a szükséges érzékenységgű neutrínószem megépítéséhez. A kozmikus sugárzástól védve, másfél km mélyen a dél-dakotai Homestake aranybányában helyezte el berendezését. (Ilyen mély lyukat csak az arany kedvéért fúr az ember.) Jelenlegi berendezése 380 000 liter perklóretilént tartalmaz. (A C_2Cl_4 a vegytisztítás viszonylag olcsó folyadék.) A kisebbfajta uszodának beillő folyadéktömegben óránként várható egyetlen radioaktív argon-atom keletkezése.

A bányaréteget vízzel árasztották el, hogy távol tartsák a hasadás gyors neutronjait ($n + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{A} + p$ hasonló hatású lenne.) Néhányhetes besugárzás után a tartályban levő C_2Cl_4 -folyadékot héliumgázzal „mosták át”, ez az argont magával ragadta. A héliumgázból az argonatomokat aktív szénabszorbensen vonták ki, majd számlálócsőbe víve észlelték (6) bomlásukat. A berendezés elektronikája csak olyan alakú jeleket engedett

át, amelyek éppen a (6) bomlásnak megfelelő pozitronoktól származhattak. Davis 95% biztonsággal ki tudott halászni minden egyes radioaktív argonatomot.

Így épített meg többször nekirugaszkodva Raymond Davis millió dolláros költséggel egy neutrínószemet, amely már nagyságrenddel érzékenyebb, mint amennyi a Nap megjósolt neutrínósugárzásának kimutatásához szükséges.

Davis megfigyelése szerint az ${}^{37}\text{A}$ -atomok keletkezésének gyakorisága naponta $0,18 \pm 0,10$ atom. A kozmikus sugárzás távoltarthatatlan műonjai egy nap alatt $0,12 \pm 0,04$ atomot keltenek. Így a Nap-neutrínók hatása $0,06 \pm 0,11$ atom keltése naponta. Ez megfelel $(0,30 \pm 0,55) \cdot 10^{-36}$ befogás/ ${}^{37}\text{Cl}$ -atom sec gyakoriságnak, szemben a csillagászok által jósolt $9,1 \cdot 10^{-36}$ befogás/ ${}^{37}\text{Cl}$ -atom sec gyakorisággal.

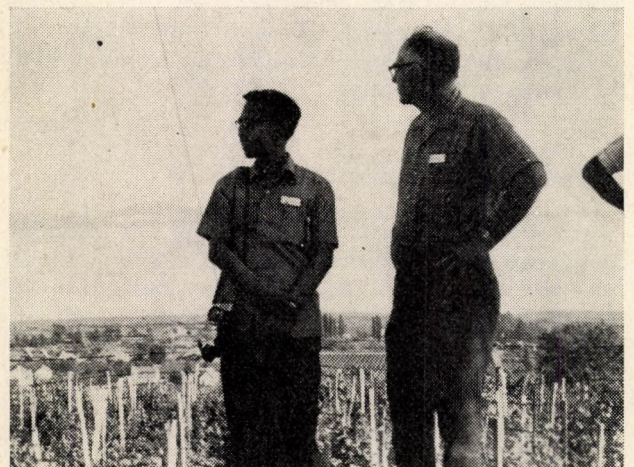
Davis neutrínó-szeme olyan érzékeny volt, hogy a Nap várt neutrínósugárzásának egytizedét is biztosan észlelnie kellett volna. Semmit sem látott. Csak a kozmikus sugárzási háttér halvány villódzását. Hová tűnt a Nap, a működő Nap-atomerőmű az égről?

Az évtized rejtélye?

Davis professzor többször járt nálunk. Szerény mosolyát és konok kitartását személyesen ismerjük. Méréseinek eredményéről 1972 nyarán számolt be Balatonfüreden, a „Neutrínó '72” konferencián [3]. Hogy a Nap centrumának neutrínósugárzása nem létezik (legalábbis észlelhetetlenül gyenge), szenzáció erejével robbant. A Nap-neutrínó rejtélye nem csak a nemzetközi tanácskozóan, hanem a világ fizikus-csillagász közvéleményénél is az érdeklődés gyújtópontjába került. Megingott minden elképzelésünk, amelyet az asztrofizika alapproblémájára: a csillagok energia-termelésére és csillagfejlődésére vonatkozóan felépítettünk.

Természetesen hiba is lehet a mérésében vagy a következtetésben.

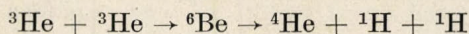
Davis hibázott volna? Valahol elrejtőzik, valahová megszökik a néhány radioaktív argonatom,



R. Davis (jobbaldalt) a Balatonnál 1972-ben

amit a Nap neutrínósugárzása termel? Davist a legmegbízhatóbb kísérletezők egyikének ismerik. Kísérletét többszörösen ellenőrizték, a legjobb szakemberek sem találtak elnézést. Szokták mondani: „egy kísérlet nem kísérlet”. Jó volna, ha valaki máshol megismételné. Sajnos, a kísérlet kivitele annyira egyedülálló, hogy erre nincs közeli remény. Mint Pontecorvo megjegyezte: „Davis nyugodtan elutazhat hosszabb szabadságra. Nem kell félnie, hogy valaki megelőzi” [4]. Legfeljebb saját maga. Azt tervezi, hogy új kísérletbe fog: az olcsó klórt a költségesebb lítiummal helyettesíti, $\nu + {}^7\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Be} + e^-$ folyamatban keletkezett berillium — az argonnal ellentétben — nem nemesgáz. Még jobban kell majd rá vigyázni, hogy el ne rejtőzködjék valahol, pl. az edény vagy a csövek falában. Viszont a Li-folyamat küszöbenergiája alacsonyabb, így nem csak a Be- és B-neutrínókat, hanem az első lépés $\text{H} + e + \text{H}$ neutrínóit is ki lehet vele mutatni.

A $\text{Cl} \rightarrow \text{A}$ kísérletnél a jelentkező neutrínók 75%-át a B bomlásából, 15%-át a Be bomlásából várjuk. A többi jut az egyéb folyamatokra. Ha véletlenül rosszul becsültük meg a (3) alatt feltüntetett ágarányokat, ha a ${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be}$ elágazás gyakorisága sokkal kisebb, mint a számítás sejteti, az a Nap-reaktor hőtermelését nem befolyásolná, viszont megszüntetné a nagyenergiájú, sokmillió elektronvoltos neutrínók termelését. A Davis-féle „neutrínó-szem” pedig csak ezeket képes megpillantani. Az arányok elcsúszását okozhatja, ha az amúgyis domináló ${}^3\text{He} + {}^3\text{He}$ csatornában fellép egy rezonancia. A ${}^6\text{Be}$ atommag elegendően hosszúéletű gerjesztett állapota magyarázná a hatáskeresztmetszet olyan felnövekedését, amely kizárólagossá tenné a fúziós lánc



lezáródását. Sajnos, olyan alacsony energián, amilyen a magfúzió folyik lelassítva a Nap centrumában, laboratóriumi méréseket az alacsony hozam miatt nem tudunk végezni. A közvetett elméleti és kísérleti ellenőrzés folyamatban van. 10 keV szélességű éles rezonancia léte az atommag 10 MeV gerjesztési energiájánál meglepetésszámba menne.

És mi lenne, ha a Nap termelne neutrínókat, de azok nem jutnának el a Földre? Hátha elbomlanak 8 perces útjuk folyamán!? A neutrínók stabilitását eddig földi laboratóriumokban, néhány méteres útszakaszon ellenőrizték. A fő nehézség itt az, hogy a kicsiny tömeg miatt nem tudjuk elképzelni, mire bomolhatna a neutrínó. A foton a bomlástermékek közül — laboratóriumi megfigyelések szerint — ki van zárva.

„Nem hiszek el egyetlen kísérleti eredményt sem mindaddig, amíg az elmélet meg nem erősíti” — mondta egyszer Eddington. Talán tréfának szánta, talán komolyan gondolta. A Davis-kísérlet negatív eredményét nem sikerült értelmezni magfizikai vagy részecskefizikai ismereteink kis korrekciójával. Ne felejtjük el: a Nap centrumában „csak” tizenötmillió fok meleg van, a magreakciók néhány

keV energián folynak. Ez pedig nem „terra incognita”. Földi laboratóriumokban jóval szélsőségebb viszonyok közt tanulmányoztuk már az anyag viselkedését. Éppen mert jól ismert a terület, mesterkelt feltevések sorozatát kellene bevezetnünk, hogy feloldjuk az elméleti asztrofizikai Nap-modell és a Davis-megfigyelés éles ellentmondását.

Balatonfüreden Pontecorvo adott hangot az egyre általánosabbá váló véleménynek, hogy a hibát nem fizikai alapismereteinkben, hanem a Napról kialakított elképzelésünkben kell keresnünk.

A csillagászok boldogok voltak, hogy legalább a legjobban ismert, legegyszerűbb égitestre: a Napra sikerült „ab initio” elméletet kidolgozni, amely a kezdeti paraméterek megfelelő illesztésével egyetlen adatot: a Nap mai L energiatermelését (optikai fényességét) reprodukálni képes. Most mód nyílt az elmélet ellenőrzésére. Egy második adatot is kimértek (a neutrínó-fényességet), amelyet az elmélet egyértelműen meghatároz, és nem találtak egyezést. Napról alkotott elképzelésünk megmértett és könnyűnek találtatott.

Mégsem értjük eléggé, miként születik a nap-sugár?

Időjárás-távprgonózis egymillió évre?

Ha a Nap gázatomjainak hőmozgásában felhalmozott belső energiát elosztjuk a Nap időegységre vonatkoztatott energiakisugárzásával, tízmillió évet kapunk. Ha tehát a Nap centrumában a nukleáris reaktor beszüntetné működését (vagy jelentősen megváltoztatná teljesítményét), annak hatása csak több millió év múlva jelentkezne a Nap felszínének optikai fényességében. Ennyi ideig tart, amíg a fotonok átvergődnek az átlátszatlanul sűrű plazma milliós kilométerein. A centrumban született neutrínók viszont minden fennakadás nélkül, 8 percen belül elérik a Földet.

Ha fenntartás nélkül hiszünk a szemünknek, azt kell mondanunk, a májusi napfény közvetett tapasztalati bizonyítékul szolgál arra, hogy a Nap-reaktor néhány millió évvel ezelőtt 15,4 millió fokon a (3) fúziós lánc értelmében működött. Ha fenntartás nélkül hiszünk annak, amit Davis neutrínóérezlelő berendezése lát, ezt kell mondanunk a Nap-reaktor 8 perccel ezelőtt *nem működött* ekkora teljesítménnyel. A két következtetés között nincsen ellentmondás, hiszen a Nap-reaktor kikapcsolását csak millió év múlva veszi észre szemünk a napfény elhalványulásában.

A Nap-paradoxont elemezve 1972-ben többen rámutattak, hogy az eddig kidolgozott Napmodellek mind állandó reaktorüzemmel számoltak. Stacionárius üzemmódban lehetetlen elérni, hogy a Nap optikai teljesítménye a megfigyelt $4 \cdot 10^{26}$ watt legyen, a neutrínó-teljesítmény pedig — legalábbis a színekép nagyenergiájú szélén — a számított érték tizedére csökkenjen. De időben változó működés esetén ez lehetséges. William Fowler (California Institute of Technology) észrevette,

hogy ha a Nap anyagát egy t_1 pillanatban hirtelen összekeverjük, a nukleáris reaktor működése számottevően megváltozik. (A külső rétegekből friss hidrogén kerül a centrumban, így alacsonyabb hőmérsékleten is létrejöhet a hidrosztatikus egyensúly fenntartásához szükséges sugárnyomás. A He egy része eltávozik a centrumból, a hőmérséklet is csökken, így a (3) folyamat Be—B ága visszaszorul.) Végeredményben egy rövid felvillanás után a centrális hőmérséklet 10—20%-os csökkenése miatt némileg mérséklődik a Nap felületi hőmérséklete, a Stefan—Boltzmann-törvény szerint 5%-kal gyengül a Nap sugárzása is, de millió éves késéssel. Viszont a Be—B ág meggyengülése miatt azonnal megszűnik a nagyenergiájú neutrínók termelése.

A nagy keveredés után, ingadozásokon keresztül lassan, 10 millió év alatt visszaáll az eredeti egyensúlyi állapot, ismét kialakulnak a kémiai különbségek centrum és külső zóna között.

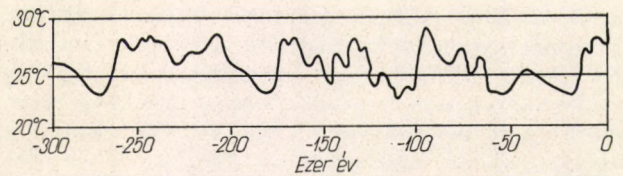
Ha nemrég valaki egy óriási kanállal összekeverte a Napot, akkor neutrínó-szemünk számára átmenetileg eltűnt a Nap az égről, optikai szemünk pedig millió éves késéssel veszi majd észre pár százalékos elhalványulását.

Odáig eljutottunk tehát, hogy a reménytelenül összekuszálódott helyzetet — rossz regényírók mintájára — „deus ex machina” által vagyunk képesek megoldani.

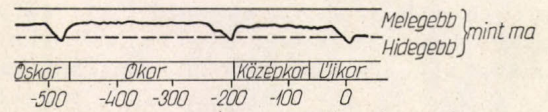
1972. őszén Pasadenában jártam. A Csendes-óceán partján a californiai napfény cáfolni igyekezett minden közelgő világhátrófiát. A Cal Tech menzáján, ebéd közben hallottam meg, hogy egy egészen fiatal asztrofizikus talán rábukkant az instabilitás okára. Egyidejűleg nagyon hasonló következtetésre jutottak odaát Európában is a cambridgei egyetem csillagásza.

Hosszú idő alatt a Nap-reaktorban új izotópok termelődnek. Egyre magasabb a centrum hőmérséklete. Az aktív zóna határán olyan meredek koncentrációesés és hőmérsékletcsökkenés alakulhat ki, amelyet a diffúzió és a hőmérsékleti sugárzás önmaga már nem képes kiegyensúlyozni. A helyzet instabillá válhat. Az egyensúlyi eloszlást a legkisebb zavar felboríthatja, és bekövetkezik a hirtelen kémiai keveredés. Az első becslések szerint kb. 250 millió év működés szükséges az instabilitás felépüléséhez. A fizikai törvények következetes alkalmazásával, indokolatlan leegyszerűsítést elkerülve tehát azt kell várnunk, hogy a Nap 250 millió évre kiterjedő nyugodt korszakát egy-két millió évre szükségszerűen megszakítja a gyors keveredés, a fény- és neutrínóteljesítmény ingadozásának átmeneti időszaka. Ezután megnyugodva újra állandó üzemre tér át a Nap. Ha véletlenül egy átmeneti *instabil* szakaszban próbáljuk ellenőrizni a *stacionárius* Nap-modellt, akkor — Davis legnagyobb pechjére — semmi nem fog stimmelni.

Élet hárommilliárd éve nyílik a Földön. Az utolsó egymilliárd évben rohamosan kizöldül bolygónk. Az élet történetét vizsgálva mindig úgy tekintünk a Napra, mint az életfolyamathoz szükséges 6000 fokos fény megbízhatóan nyugodt



Jelenleg instabil éghajlatú időszakban élünk: a trópusi óceán vízhőmérsékletének változása az utolsó 300 ezer évben



A Föld egyenletes éghajlatát 200–250 millió évenként szakítják meg a lehűlés időszakai: Középeurópa éghajlatának alakulása az utolsó 500 millió esztendőben

3. ábra

forrására. A Nap ingatag változócsillag jellege rácsáfol optimizmusunkra?

Az amerikai kontinens másik partján, Philadelphiában Primakoff iskolája — megelőzve a californiai számításokat és nem tudva róluk — vallatóra fogták azokat a geológiai információkat, amelyek a Föld éghajlatára vonatkozóan sok millió esztendőre visszamenőleg rendelkezésünkre állnak.

Az utolsó egymillió esztendő Földünknek klímaitikailag nagyon változékony, ingatag időszaka. Jégkorszakok váltakoztak enyhébb periódusokkal. Az őszember Európában szenvedő tanúja volt jégtakaró, sztyeppe és lomboserdő cserélődésének. Ma enyhe felmelegedést élvezünk, amely mintegy tízezer esztendeje indult meg az utolsó jégkorszak után. Közép-Európa átlagos hőmérséklete jelenleg $+10^\circ\text{C}$, szemben a jégkorszak 0°C körüli átlagával.

50 millió évvel ezelőtt és még régebben jóval állandóbb és számottevően melegebb volt az éghajlat, 20°C körül. Az utolsó évmilliárdra általában ez az egyenletes éghajlat jellemző, amelyet csak 200—250 millió évenként szakítanak meg rövid (10 millió éves) lehűlések. Összesen öt változékony hideg szakasról tudunk. Ilyen minimum előzte meg a geológiai ókort (a pekambrium) és zárta le azt (a permben).

A geológiai minimumok Balatonfüreden Landé által idézett periódusideje egyezik a napszerkezet instabil gradiensének kiépüléséhez szükséges idő előbbtől független csoportok (Cal Tech, Cambridge) által kiszámított értékével. Ennek bizonyító erejéről azonban még korai volna beszélni.

Az átmeneti lehűléseket a Nap-aktivitás rövid felélénkülésének kell megelőznie. Az Apolló-űrhajók által lehozott Hold-kövek kristályhibáinak nagy száma azt bizonyítja, hogy a töltött részecskéket szállító Nap-szél egymillió évvel ezelőtt lényegesen intenzívebb és roncsolóbb volt, mint ma.

A lehűlési periódusban a Földfelszín átlaghőmérséklete 10—20 fokkal, tehát — abszolút skálán mérve — 3—6%-kal alacsonyabb szokásos állandó értékénél. Ez egybevág azzal az elméleti asztrofizikai adattal, hogy a Nap anyagának hirtelen

Sorry we could not find a solar
neutrino for your wonderful conference
but that's the way it goes!
Ray Davis

Hope that a new future
in high energy neutrino
physics will emerge soon -
instead of just promises!

Bary C Barish
Keep the faith! There are
solar neutrinos. Someone will
see them yet!
Lolita Lorenz

Részlet a balatonfüredi „Neutrino '72”
konferencia vendégkönyvéből

len összekeverése (az izotópkoncentrációk kiegyen-
lítése) később a Nap fényességének 10%-os le-
csökkenését eredményezi. A (3) fúziós lánc B-
ágának gyakorisága (a csupán kvantum-alagúton
átjárható magas Coulomb-gát miatt, a Gamov-
faktor exponenciális alakja folytán) a hőmérséklet
25. hatványával arányos. Ugyanezt az érzékeny
hőmérsékletfüggést mutatja a Nap neutrínó-
sugárzásának számukra egyedül megfigyelhető

nagyenergiájú komponense. A centrális hőmérsék-
letnek 15,4 millió fokról 14 millió fokra való csök-
kenése azzal jár, hogy a neutrínó-fényesség tize-
dérére zuhan vissza. Az energiatermelésben, vagyis
a teljes fényességben sokkal kisebb arányú a
visszaesés. Utóbbit a milliós éves relaxációs idő
mégjobban kisimítja. Landé egy neutrínó-archeoló-
gia lehetőségét kutatja. Földi izotópeloszlási ano-
máliákból szeretne a Nap neutrínósugárzásának
múltbeli intenzitására következtetni.

Mindez még friss ötlet, kidolgozatlan hipotézis
csupán.

Békés nyárspolgárnak vélt Napunkban izgal-
masan újszerű változócsillagra ismerünk? Lehet-
séges, hogy a neutrínócsillagászat első empirikus
eredményként a Nap nukleáris üzemében váratlanul
éles minimumot fedezett fel? A Nap-reaktorban
találjuk meg a földtörténeti nagy lehűlési periódus-
ok magyarázatát? A biológiai fejlődéstörténet
szempontjából is fontos eljegesedések megértésé-
hez a Nap centrumában végbemenő magfizikai-
hidrodinamikai folyamatokat kell tisztáznunk?
A neutrínó-szemek évmilliókkal előrelátják földi
jégkorszakok bekövetkezését?

A Nagy Bumm ősi melegét csapolja meg a Nap.
Tudtuk, hogy ő az életfolyamat fenntartója a
zöldülő bolygón. Meglehet, azt is meg kell tanul-
nunk, hogy a Nap-reaktor szabályos időközönként
bekövetkező teljesítménykiesései a Földön klíma-
változásokat robbantanak ki, amelyek az élőlények
fennmaradására és elterjedésére gyakorolnak be-
folyást. A legutolsó milliós évek éghajlatváltozásai
során oroszlánál erősebb ragadozók, elefántnál
nagyobb mammutok pusztultak ki. Közben a
meztelen majom megtanult gondolkodni, hogy túl-
élje a jégkorszakok megpróbáltatásait.

IRODALOM

- [1] Ja. B. Zeldovich, Fizikai Szemle **19** (1959), 353.
- [2] Marx György – Menyhárd Nóra, Science (1960), 299.
- [3] R. Davis, Neutrino 72 Proceedings (1972).
- [4] B. Pontecorvo, Fizikai Szemle **23** (1973), 97.

A GUMI TERMODINAMIKAI RUGALMASSÁGA

A gumi rugalmas viselkedését matematikailag
ugyanazon koefficienssekkel vagy modulusokkal
írhatjuk le, mint bármely más anyagát csak a nu-
merikus értékek mások. Azt gondolhatnók tehát,
hogy a rugalmas jelenségek létrejöttének a ter-
mészetudományi oka is ugyanaz a guminál, mint
a többi anyagféleségeknél és pusztán kvalitatív
különbségekről van szó. De amint a következők-
ben látni fogjuk ez egyáltalában nincsen így. A
gumiszerű anyagok rugalmassága egy egészen más
fizikai okon alapszik mint más közegeké.

Erre vonatkozóan már régen két érdekes ta-
pasztalat felhívta a fizikusok figyelmét: Az első
ezek közül az, hogy amíg minden más anyag nyúj-
táskor lehül, a gumi felmelegszik, a másik pedig,

hogy a gumi nem nyújtott állapotban egy amorf
anyag röntgendiffrakciós képét adja, míg nyújtott
állapotban egy kristályosót.

1. A rugalmasság elméletének elemei

Mielőtt ezen kérdések részletesebb tárgyalására
rátérnénk, lássuk röviden a rugalmas állandók
elméletét [1]. A deformációmennyiségek egy más-
odrendű tenzort képeznek, ennek tehát kilenc
komponense van. De már a legáltalánosabb eset-
ben is igazolni lehet, hogy ez a tenzor szimmetrikus,
tehát csak hat különböző komponens marad.
Hasonlóan a feszültségkomponensek is egy másod-
rendű tenzor komponensei, de ezen esetben is iga-

Neugebauer Tibor
ELTE Elméleti Fizikai Tanszék