

„MAGFIZIKA ÉS AZ ÉLET”

– a Szilárd Leó fizikaverseny néhány feladatának tükrében

Sükösd Csaba
BME Nukleáris Technika Tanszék

„What a wonderful world”
(Louis Armstrong)

Tehetséggondozás, orientáció

A közoktatásnak – többek között – két lényeges feladata van: az egyik a lakosság minél szélesebb rétegeinek oktatása–nevelése, a másik a *tehetséggondozás*, azaz a kiemelkedő adottságú gyerekek megtalálása és tehetségük minél jobb kibontakoztatása. Amikor arra vagyunk büszkék, hogy ez a kis ország kiemelkedően magas arányban adott Nobel-díjasokat a XX. századnak, akkor múltbeli tehetséggondozásunkat dicsérjük.

A tanulmányi versenyek a tehetséggondozás fontos eszközei. A versenyeknek azonban nem csak a jó képességű tanulók tudásának összemérésében van szerepe! A versenyfeladatokkal *orientálni* is lehet (és kell) a tehetséges gyerekeket a tudomány egy-egy modernebb területe felé, amelyiket esetleg a hagyományos középiskolai órákon nem lehet megfelelő szinten feldolgozni. A versenyre való felkészülés során a gyerekek utánaolvasnak a témának, szélesedik a látókörük, és elgondolkodnak a mélyebb összefüggéseken. Ennek érdekében hozta létre *Marx György* professzor 1998-ban – a Szilárd-centenárium évében – az Országos Szilárd Leó Fizikaversenyt, amely nem titkoltan a modern fizika felé szeretné orientálni a legjobb képességű gyerekeket.

Az Élet és a Fizika

A fizikának az élettel való kapcsolata volt a vezérmotívuma mind a harmadik *Physics on Stage* nemzetközi fizika-tanítási konferenciának (Hollandia, 2003. november), mind pedig az idei miskolci Középiskolai Fizikatanári Ankétnek. Ezért választottam három olyan versenyfeladatot a Szilárd Leó-verseny eddigi történetéből, amelyek kapcsán elgondolkodhatunk azon, hogy az atommagok és az elemi részecskék világának tulajdonságai számítanak-e valamit az Élet létrejöttében és fejlődésében. A feladatok itt csak „ürügyként” szolgálnak a gondolatok kifejtéséhez. Természetesen a középiskolás versenyzőktől az itt leírtaknál kevesebbet vártunk el a feladatok megoldásaként.

Az előadás elhangzott Miskolcon, a 2004. évi Országos Középiskolai Fizikatanári Ankéton.

A makroszkopikus fizika és az Élet

Szinte már közhely az az állítás, hogy a földi élet létrejöttének sok fizikai feltétele van. Erről szólva azonban legtöbbször a makroszkopikus feltételekre gondolunk. A Föld forgására, amely a napszakok váltakozását okozza, a Föld keringésére és a forgástengely dőlési szögére, amely az évszakok váltakozásához vezet. A Föld mágneses tere is eszünkbe juthat esetleg, amely védőernyőként véd bennünket a kozmikus sugárzás káros komponenseitől. Gondolhatunk talán a víz különleges, anomális sajátosságaira is: az igen magas fajhőre, a 4 °C-on mérhető maximális sűrűsége, amely biztosítja, hogy a tavak ne fagyjanak be teljesen, s így a vizek élővilága túlélhesse a kemény teleket. Valószínűleg a felsorolásból majd a légkör és az üvegházhatás sem marad ki, amely a Földet kellemesen meleg bolygóvá teszi. Talán a radioaktív elemek bomlását is megemlíthetjük, amelynek energiája évmilliárdok óta fűti a Föld belsejét, mozgásban tartja a tektonikus lemezeket; hegyeket gyűr fel, és mélytengeri árkokat hoz létre; változatos környezetet, hegyeket, völgyeket teremt, s megakadályozza, hogy az erózió mindent elsimítson, és egyenletes mélységű tenger borítsa a Földet...

Nagyon sok minden eszünkbe juthat tehát, amikor a fizikának az Élet létrejöttében és fennmaradásában játszott szerepéről beszélünk. A szubatomi világ, a nukleonok, az atommagok tulajdonságai azonban általában túl „távolinak”, érdektelennek tűnnek az Élet és létrejötte szempontjából. De vajon tényleg így van ez...?

Első Példa: (Szilárd-verseny 2000. évi döntő, 1. feladat)

Milyen lenne a világ, ha a neutron tömege egy ezreléssel kisebb lenne (a jelenlegi tömeg 0,999-szerese)?

Adatok: A neutron tömege $1,6749543 \cdot 10^{-27}$ kg, a proton tömege $1,6726486 \cdot 10^{-27}$ kg, az elektron tömege pedig $0,9109534 \cdot 10^{-30}$ kg.

Nem tudjuk, hogy pontosan miért akkorák az egyes részecskék tömegei, mint amekkorák. A részecskefizikusok remélik, hogy ha a régóta keresett Higgs-részecskét megtalálják, akkor talán erre is fény fog derülni. Addig azonban kicsit elgondolkodhatunk, hogy milyen következményei lennének, ha a neutron tömege kicsit más lenne, mint amekkora most?

Jelenleg a neutron tömege valamivel nagyobb, mint a proton és az elektron tömegének az összege: $m_n - (m_p + m_e) = 0,0013947 \cdot 10^{-27}$ kg. Ezért a neutron – szabad állapotban – negatív béta-bomlással el tud bomlani: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$. (A többlettömeg az $E = \Delta m c^2$ képletnek megfelelően a bomláskor keletkezett részecskék energiáját fedezi.) Mivel a bomlást a gyenge kölcsönhatás teszi lehetővé, a szabad neutron felezési ideje – részecskefizikai időskálán – nagyon hosszú: 12,8 perc. Ez az idő azonban az Univerzum időskáláján – de még emberi időskálán is – eléggé rövid. Emiatt szabad állapotban a neutron nem tud sokáig létezni, számára csak atommagok belsejében van lehetőség a továbbélésre.¹

Neutronok és az Univerzum összetétele

Ez nemcsak most van így, hanem így volt az Ósrobbanás után is. Az Univerzum történetében volt egy olyan korszak (az első néhány perc), amikor a neutronok bomlása döntő szerepet játszott. A gyorsan táguló Univerzumban gyorsan csökkent a hőmérséklet, és a részecskék közötti kötések már nem verte szét a hőmozgás. Ekkor jöhettek létre az atommagok. Először a neutronok protonokkal *deuteronokat* (nehézhidrogénmagok) alkothattak, és ezzel további atommagok felépülése előtt is megnyílt az út. Ebben a korszakban a neutronbomlás „versenyzett” az atommagba való beépüléssel: azok a neutronok maradtak csak meg, amelyek még elbomlásuk előtt idejében be tudtak fogódni egy atommagba. Ez a reakciólánc végül a különösen stabil ^4He atommagok létrejöttébe torkollott. A neutronok ezekben az atommagokban találtak olyan menedéket, ahol át tudták vészelnéni a következő milliárd éveket. Az Univerzum jelenleg 73,5% hidrogénből, 26,4% Héből, és körülbelül 0,1% egyéb anyagból áll. Az Ósrobbanás után a neutronok bomlása alakította ki az Univerzum kezdő összetételét! Rövidebb felezési idő kevesebb ^4He létrejöttére, hosszabb felezési idő több ^4He létrejöttére adott volna lehetőséget.

Ha a neutron tömege más lenne (kicsit kisebb, vagy akár kicsit nagyobb is), a bomlásakor felszabaduló energia is kicsit több vagy kevesebb lenne, s ez érzékenyen befolyásolná a neutronbomlás felezési idejét. Emiatt az Univerzum Ósrobbanás utáni „kezdő” összetétele is más és más lenne. Itt most nem vállalkozhatunk annak a továbbgondolására, hogy ez a változás pontosan hogyan befolyásolná a csillagok kialakulását és fejlődését, de annyi biztos, hogy másképpen zajlana a csillagfejlődés, mint ahogy megszoktuk. Vizsgáljunk meg ehelyett egy sokkal egyszerűbb kérdést: mi történne, ha *most*, a már kialakult, és többé-kevésbé ismert világunkban – mintegy varázsütésre – a neutron tömege 1 ezrelékkal kisebbé válna?

¹ Itt a Földön szabad neutronok nem elsősorban a neutronbomlás miatt nem találhatók, hanem azért, mert – ha létrejönnek is valamely reakcióban (kozmikus sugárzás, atomreaktor stb.) – még elbomlásuk előtt, sokkal rövidebb idő alatt befogódnak valamely atommag belsejébe.

Kisebb neutrontömeg, most...!

Ha a neutron tömege egy ezrelékkal kisebb lenne, azaz $1,6732794 \cdot 10^{-27}$ kg, akkor a neutron bomlása energetikailag már nem lenne lehetséges, hiszen a tömege kisebb lenne, mint a protontömeg és az elektrontömeg összege. Első pillantásra azt gondolhatjuk, hogy ez nem jelentene nagy változást, hiszen amúgy sincs sok szabad neutron a közelünkben! Vegyük azonban észre, hogy ezzel a *fordított* folyamat ($p + e^- \rightarrow n + \nu$) energetikailag lehetségessé válna! Azaz a protonok *elektronbefogással* neutronná (és neutrínóvá) alakulhatnának! Gondoljuk csak el, ha a proton elektronbefogása lehetséges lenne, nem léteznének hidrogénatomok, hiszen a proton – rövidebb-hosszabb idő után – befogná a körülötte levő elektront, és neutronná alakulna! A Föld nagy részét óceán borítja, s a vízmolekulákban is vannak protonok és elektronok. Vízmolekulák sem létezhetnének tehát! A testünkben lévő vegyületek nagy része ugyancsak tartalmaz protonokat és az azokat körülvevő elektronokat: ezek sem jöhethetnének létre! Létezhetne Élet akkor, ha a neutron tömege csak egy *ezrelékkal* kisebb lenne?

Második Példa: (Szilárd-verseny 2000. évi döntő 3. feladat)

A Napban (több lépésen át) a $4^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu$ magfúzió termeli az energiát, ami a napfényt táplálja.

a) Milyen lett volna a Nap sorsa, ha a ^2He atommag stabilan létezne?

b) Milyen lett volna a Nap sorsa, ha a ^2H izotóp nem létezne?

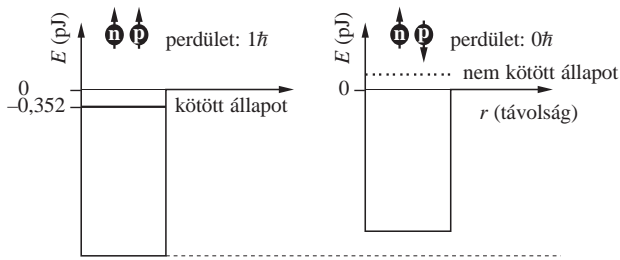
A földi Élet kialakulásának és fennmaradásának egyik legfontosabb tényezője a Nap, amely évmilliárdok óta megbízhatóan, állandó ütemben szolgáltatja az Élet létrejöttéhez és az evolúcióhoz szükséges energiát. Egészen más sors várna azonban a Napra, ha a nukleonok közötti kölcsönhatás egy kicsit más lenne, mint amilyen!

Kölcsönhatás két nukleon között (magerők)

Taníttuk, hogy a magerők rövid hatótávolságúak, vonzóak és nem tesznek különbséget protonok és neutronok között (töltésfüggetlenek). Ha csak ennyi lenne igaz, akkor nehéz lenne megmagyarázni, hogy mi az oka annak, hogy a neutron és a proton kötött állapotba tud kerülni (*deuteron* kötési energiája 0,352 pJ), de például két neutron már nem alkot „dineutron”?

A nukleonoknak van saját perdületük (spinjük), és a magerők függenek a két nukleon spinjének relatív irányától is. A nukleonok spinjének nagysága ($\hbar/2$), ahol $\hbar = h/2\pi$ és h a Planck-állandó. A deuteron eredő perdülete $1\hbar$, ezért benne a két nukleon spinjének párhuzamosan kell állnia. A magerők potenciálját, illetve a deuteron kötését az *1. ábra* szemlélteti vázlatosan:

A magerők spinfüggése miatt a vonzó potenciál kissé mélyebb, amikor a két nukleon spinje egy irányba mutat (az ábra bal oldala), mint amikor ellenkező irányba. Ez ahhoz vezet, hogy az egyik esetben létre tud jönni egy



1. ábra

(elég gyengén) kötött rendszer – a deuteron –, míg a másik esetben a vonzó potenciál nem elég erős a kötött állapot létrehozásához. Mivel a magerők nem tesznek különbséget proton és neutron között, ezért ugyanilyen ábra érvényes a két protonból és a két neutronból álló rendszerekre is.

Miért nincs tehát dineutron? A két neutronra – azonos részecskék lévén – a *Pauli-elv* is érvényes, ezért a spinjük csak az ábra jobb oldalán rajzolt módon állhatna be! Ez viszont nem kötött állapot! Hasonló ok miatt nem jöhet létre a *diproton* (${}^2\text{He}$) sem. A proton–neutron rendszernél (deuteron) a Pauli-elv nem tilt, hiszen különböző részecskékről van szó! A magerők spinfüggése miatt létezik tehát a deuteron, és nem létezik a ${}^2\text{He}$, és a dineutron.

Ez idáig nagyon szép, de mi köze van ennek az Élethez?

Energiatermelés a Napban

Az Ősrobbanás után a lehűlt Univerzum anyaga csaknem teljes egészében hidrogénből és héliumból állt. Ilyen összetételű felhőből sűrűsödtek össze az első csillagok, ebből az „üzemanyagból” kellett „gazdálkodniuk”.² Ezekből a kiindulási anyagokból a következő reakciók képzelhetők el első pillantásra:

- $p + p \rightarrow {}^2\text{He}$
- $p + {}^4\text{He} \rightarrow {}^5\text{Li}$
- ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^8\text{Be}$

Az első reakció nem megy végbe, hiszen a diproton a fentiek alapján nem kötött állapot. A második reakció sem megy végbe, mert a ${}^5\text{Li}$ atommag sem létezik. A ${}^4\text{He}$ ugyanis annyira erősen kötött rendszer (minden nukleon a legalacsonyabb energiájú, 1s állapotban van, és üres hely már csak egy új héjon lenne), hogy nem képes újabb nukleont magához kötni. A ${}^8\text{Be}$ atommag tömege egy kicsivel nagyobb, mint két ${}^4\text{He}$ atommag tömegének az összege, ezért – ha energia befektetésével létre is jön valahogyan – nem marad stabil. *Csikai Gyula* Debrecenben megmérte, hogy a ${}^8\text{Be}$ atommag ténylegesen létrehozható, de élettartama roppant rövid: 10^{-17} s. Ilyen rövid idő után szétesik két α -részecskére. A négy protonnak és

négy neutronnak kedvezőbb tehát két α -részecskében lenni, mint egyetlen ${}^8\text{Be}$ atommagban.

A legkézenfekvőbb fúziós reakciók tehát a magerők tulajdonságai miatt nem mehetnek végbe, a végtermékek nem fordulnak elő stabilan a Természetben. Ha csak a magerőkön múlna, a Nap sötét maradna. A gyenge kölcsönhatás azonban segít a fúzió elindulásához! Magas hőmérsékleten a protonok eléggé meg tudják közelíteni egymást, és a rövid idő alatt, amíg éppen egymás közelében tartózkodnak, az egyik proton pozitív béta-bomláson esik át, és neutronná alakul. Mivel a proton és a frissen keletkezett neutron éppen közel vannak egymáshoz, kötésbe kerülnek, és deuteronra alkotnak:³ $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu$.

Ez a folyamat elképesztően kis valószínűségű: egyetlen kiszemelt proton másodpercenként sokmilliárdszor kerül más proton közelébe, mégis évmilliárdokig kell bolyongania a Napban, amíg egyszer véletlenül egy ilyen folyamat részese lehet! Ez a szerencse, mert ez a roppant kis valószínűség *fékezi* a fúzió sebességét a Napban! Ez teszi lehetővé, hogy a Nap hosszú időn át nagyjából egyenletes teljesítménnyel tudjon sugározni, lehetőséget adva az Életnek a kialakulásra és az élővilágnak az evolúcióra.

Mi történne, ha a magerők kicsit *erősebbek* lennének? A fenti ábra jobb oldalán „mélyebb” lenne a potenciálgödör, a nem kötött állapot is „lejjebb” csúszna, s a ${}^2\text{He}$ „diproton” is létrejöhetne. Ezzel a $p + p \rightarrow {}^2\text{He}$ reakció lehetővé válna, s mivel ebben nincs beépített gyenge-kölcsönhatási „fék”, a csillag nagyon rövid idő alatt – szinte szétrobbanva – szabadítaná fel a fúziós energiát. Lehetne így Élet...?

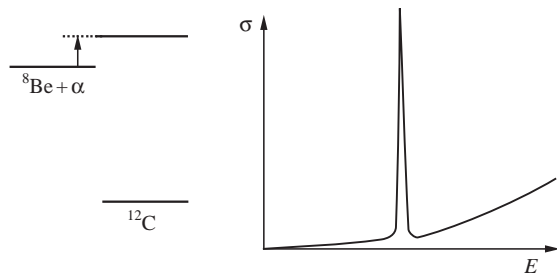
Mi történne, ha a magerők kicsit *gyengébbek* lennének? Az ábra bal oldalán kicsit sekélyebb lenne a potenciálgödör, s a deuteron sem létezne. Megszűnne tehát az a „kiskapu” is, amelyet a gyenge kölcsönhatás nyitott a fúzió számára, hiszen ha nincs deuteron, a fenti „induló” reakció sem jöhetne létre. Lenne így Élet, világító Nap nélkül...?

Harmadik Példa: (Szilárd-verseny 2000. évi döntő 6. feladat)

A vörös óriás csillagokban ${}^4\text{He}$ -ből fúzióval épülnek fel a magasabb rendszámú elemek. Ennek a fúziós folyamatláncnak nehéz az indulása, mert a ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^8\text{Be}$ atommag-reakció végterméke nem stabil, hanem szinte rögtön szétesik. *Fred Hoyle* feltételezte, hogy elegendően nagy sűrűség esetén az is előfordulhat, hogy a ${}^8\text{Be}$ igen rövid élettartama alatt egy harmadik ${}^4\text{He}$ atommaggal találkozik, s akkor a ${}^8\text{Be} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C}$ folyamatban ${}^{12}\text{C}$ atommag keletkezhet. Miután ehhez 3 db α -részecske igen rövid időn belül való találkozására van szükség, ezt a folyamatot *3 α -folyamatnak* nevezik. Hoyle számításai szerint azonban ennek is csak akkor lehet számottevő szerepe, ha a ${}^{12}\text{C}$ atommagban van olyan gerjesztett álla-

² Napunk nem az Ősrobbanás utáni „tisza” gázfelhőből alakult ki, hanem egy körülbelül 4,5 milliárd évvel ezelőtti szupernóva-robbanás által beszennyezett gázfelhőből. Ezért az anyaga kis mennyiségben tartalmaz más, nehezebb elemeket is. A továbbiak szempontjából azonban ezeknek a kis mennyiségben jelen lévő „szennyeződéseknek” a hatása elhanyagolható.

³ Természetesen egy szabad proton nem tud neutronná alakulni, hiszen nincs erre elég energia. A folyamatot csak a könnyebb megjelezhetőség kedvéért bontottuk ilyen lépésekre. A valóságban ez az átalakulás egyetlen reakcióként megy végbe. Az energiafeltétel természetesen teljesül, hiszen a deuteron kötési energiája fedezni tudja a proton neutronná alakulásához szükséges többletenergiát.



2. ábra

pot, amely a 3 db α -részecskéből könnyen létrejöhet, s amely azután γ -foton kibocsátásával alapállapotba bomlik. Hoyle jóslatát követve Fowler, a California Institute of Technology munkatársa hamarosan kísérletileg is megtalálta ezt a gerjesztett állapotot a ^{12}C atommagban.

Vajon mekkora gerjesztési energia közelében kellett Fowlernek ezt az állapotot keresnie a ^{12}C atommagban?

Adatok: A ^4He atommag tömege $6,64296669 \cdot 10^{-27}$ kg, a ^{12}C atommag tömege pedig: $19,91593977 \cdot 10^{-27}$ kg, s tegyük fel, hogy az alfa-részecskéknek 4 fm-re meg kell közelíteniük egymást, hogy az összeolvadás létrejöheszen.

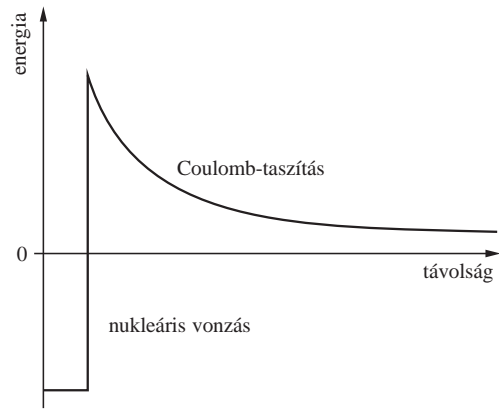
A feladat megoldása az adatok ismeretében nem különösebben nehéz. A 2. ábra mutatja, hogyan is jön létre a feladatban említett „rezonancia”. A $^8\text{Be} + \alpha$ együttesnek valamivel kisebb az energiája, mint a ^{12}C atommag gerjesztett állapotáé (2. ábra bal oldal). Ezért a részecskéknek valamekkora mozgási energiával kell rendelkezniük, hogy a ^{12}C atommag gerjesztett állapota létrejöheszen. Amikor azonban ez a mozgási energia megvan, a keletkezés valószínűsége ugrásszerűen megnő. A jobb oldali ábra azt mutatja, hogy adott energián a reakció σ „hatáskeresztmetszete” (ami a reakció bekövetkezési valószínűségének mértéke) hirtelen, „rezonanciaszerűen” megnő. A csillagban a részecskék mozgási energiáját a csillag hőmérséklete szabja meg.

A fúzióhoz elektromos töltésű részeknek (atommagoknak) egymáshoz közel kell kerülniük, le kell győzniük az atommagokat szétaszító Coulomb-gátat (ld. 3. ábra). A Coulomb-gát magassága, ahol Z_1 és Z_2 a reakcióban résztvevő atommagok rendszáma, e az elemi töltés, és R pedig az a távolság, amennyire meg kell közelítsék egymást ahhoz, hogy a magerők nukleáris vonzása győzzön az elektromos taszítás fölött.

Magától értetődő, hogy a Coulomb-gát a $p+p$ fúzió esetén a legalacsonyabb, hiszen ott mindkét partner rendszáma $Z_1 = Z_2 = 1$. Ezért ez a folyamat indul be legelőször – ha van elég hidrogén a csillagban. Ahhoz, hogy a $Z_1 = 4$ rendszámú ^8Be és a $Z_2 = 2$ rendszámú ^4He egymáshoz ugyanilyen közel kerüljön, 8-szor nagyobb energia szükséges.

A csillag belsejében a hőmozgás energiája teszi lehetővé a Coulomb-gát „megmászását”, ezért a fúzió sebessége a csillag hőmérsékletétől függ.⁴ A hőmérsékletet tulajdon-

⁴ A Coulomb-gát „megmászására” természetesen az *alagúteffektus* és a részecskék Maxwell-Boltzmann sebességeloszlása is besegít, ezért a hőmérsékletnek elég csak a Coulomb-gát csúcsának „közelébe” emelkednie.



3. ábra

képpen a fúzió és a gravitáció együttesen „állítja be”. A csillag akkor van egyensúlyban, amikor a felületén kiszugárzott teljesítményt a belsejében termelődött fúziós teljesítmény éppen fedezi. Ha a fúziós teljesítmény túl alacsony, a gravitáció győz, és a csillag elkezdi összehúzódni. Az összehúzódás során egyrészt nő a sűrűség (gyakoribbak lesznek az ütközések a részecskék között), másrészt a felszabadult gravitációs energia (a központi anyagrétegekre zuhanó külső anyag) felmelegíti a csillag belsejét. Mindkét hatás növeli a fúzió sebességét. Az összehúzódás – a sűrűség növekedése és a csillagbelső melegedése – addig folytatódik, amíg a belső fúziós teljesítmény akkorára nem növekszik, hogy fedezni tudja a kiszugárzott teljesítményt, azaz amíg a csillag egyensúlyba nem kerül.

Vörös óriás

Amikor egy H-égető csillagban „kiég” az üzemanyag, lecsökken a H-koncentráció (és persze megnő a fúzióban keletkezett He koncentrációja). A csillag elkezdi tehát összehúzódni, és a közepén a sűrűség és a hőmérséklet jelentősen növekszik. Ez a folyamat akkor áll meg, amikor a hőmérséklet olyan nagyra nő, hogy a részecskék energiája eléri „magfizikai rezonanciát”. Ekkor beindul a „ 3α -folyamat”, a csillag belsejében elkezdődik a hélium széné történő fúziója, és nagy energia szabadul fel. A nagy sebességgel kifelé áramló energia egyrészt megállítja a csillag további összehúzódását, másrészt „felfújja” a csillag külső rétegeit: a csillag óriásira tágul, felülete megnő, és a nagy felületen már alacsonyabb felületi hőmérséklet mellett le tudja adni a belsejében megtermelt energiát. Alacsonyabb felületi hőmérsékletű felület sugárzási spektruma a vörös felé tolódik el. A csillag vörös óriássá válik.

A vörös óriásokban a „fék” szerepét az játssza, hogy a 3α -folyamatban a ^8Be élettartama nagyon rövid (10^{-17} s). A harmadik α -részecskének ezen a nagyon rövid időn belül kell odaérni a megfelelő energiával ahhoz, hogy a fúzió létrejöheszen. Ez a „hármastalálka” pedig – még azon a hőmérsékleten és sűrűségen is – nagyon kis valószínűségű folyamat.

Ha már van szén atommag, a $^{12}\text{C} + ^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O}$ folyamat le tudja gyártani az oxigént. A csillag anyaga nagyrészt ^4He -ből áll, így a 3α -folyamatban keletkezett ^{12}C atomma-

gok másodpercenként sokmilliárdszor ütköznek α -részekkel. Természetesen a hőmérsékletnek itt is nagy szerepe van: minél magasabb a hőmérséklet, annál nagyobb valószínűséggel keletkezik oxigén a szénből, hiszen itt a Coulomb-gát még magasabb ($Z_1 = 6$, $Z_2 = 2$)!

Önmagában is nagyon izgalmas a vörös óriások elemépítő kohójának működése, de vajon van-e ennek valami köze az Élethez?

Szén/oxigén arány

A szerves élet azért tudott létrejönni, mert nagyjából ugyanannyi szénatom van a Földön, mint oxigénatom. Ha bármelyik fajta hiányozna, nem jöhettek volna létre magas fejlettségű élőlények. A szén- és az oxigénatomokat vörös óriások „gyártják le”, s ezek belső hőmérsékletének döntő szerepe van a szén/oxigén arány beállításában! Ha túl alacsony a hőmérséklet, akkor csak szén atommagok jönnek létre, oxigén atommagok nem. Ha pedig túl magas, akkor valamennyi keletkezett szén atommag a héliummal oxigén atommaggá fuzionál. Ilyenkor oxigén lesz, de szén nem.

Érdekes véletlen, hogy a vörös óriások belső hőmérsékletét a feladatban említett magfizikai rezonancia éppen olyan értékre „hangolja be”, hogy szén is marad és oxigén is keletkezik nagyjából olyan arányban, amilyen az Élethez szükséges. *Csótó Attila* (KLTE–ELTE) és munkatársai számításai szerint, ha a magerők intenzitását *egy-két ezreléssel* kisebb vagy nagyobb értékre választanánk, akkor a rezonancia helye úgy toródna el, hogy vagy csak szénatomok, vagy csak oxigénatomok keletkeznének a vörös óriásokban. Lehetne Élet szén vagy oxigén nélkül, vagyis ha a magerők egy egészen kicsit mások lennének, mint amilyenek...?

Összefoglalás

Három példa kapcsán csodálkozhattunk rá a Természet egységére. A „legkisebbek”, a magfizikai részecskék tulajdonságainak is hajszálfinomán „hangoltaknak” kell lenniük ahhoz, hogy az Élet ki tudjon nyílni a maga bámulatos bonyolultságában és szépségében. A neutron tömege, a magerők spinfüggése és a 3α -folyamatot irányító magfizikai rezonancia helye nem vezethető vissza egyetlen közös okra – legalábbis jelenlegi tudásunk szerint nem. Ezért azt kell mondanunk, hogy több, egymástól független *véletlen* kellett ahhoz, hogy olyan hajszálpontosan hangolt Univerzum jöjjön létre az Ősrobbanás után, amelyben valamikor, valahol létrejöttek az Élet kialakulásának közvetlen feltételei.

Ezen a ponton nehéz elkerülni, hogy gondolataink olyan – filozófiai – területre tévedjenek, amely már nem a fizikáról szól. Az ilyen jellegű kérdésekre kinek-kinek magának kell megadnia a választ. Hadd idézzem Marx György professzort (*Fizikai Szemle* 50/11 (2000) 365. oldal): „*Ha a ^{12}C virtuális energiaszintje százaléknival odébb volna, az ilyen világban nem lennének asztrofizikusok, akik elcsodálkoznak a nívó szerencsés beállításán. Mi nem ok vagyunk, hanem következmény.*”

Panaszkodunk, hogy diákjainkat nem érdekli a fizika. Talán, ha megmutatjuk nekik a fizika és az Élet kapcsolatát, jobban felkelthetjük az érdeklődésüket a Természet csodái iránt! Voltak diákok, akik elgondolkoztak a Szilárd Leó-verseny feladatain, és megoldották azokat. Biztos vagyok benne, hogy a verseny óta ők még érdekesebbnek találják a modern fizikát, még nagyobb tisztelettel néznek a csodálatosan összehangolt Természetre, és még jobban óvják itt a Földön az Életet és az Élet további fennmaradásához szükséges földi környezetet. S ha ez így van, akkor a Verseny elérte a célját.

VII. SZILÁRD LEÓ NUKLEÁRIS TANULMÁNYI VERSENY

2004 tavaszán rendezte meg a Szilárd Leó Tehetséggon-
dozó Alapítvány és az Eötvös Loránd Fizikai Társulat
hetedik alkalommal a Szilárd Leó Nukleáris Tanulmányi
Versenyt. A Versenybizottság a 2004-es verseny meghir-
detésekor kibővítette a hagyományos tematikát: a nukle-
áris témák mellé egyéb „modern fizikai” területeket is
bevontak a verseny tematikájába.

Ebben az évben 345 középiskolás indult csaknem fél-
száz iskolából, az eredmények tanúsága szerint jó felké-
szültséggel. Néhány esetben érzékelhető volt, hogy a
tematika kibővítése „meglepte” mind a felkészítő tanáro-
kat, mind pedig a versenyzőket. Az új területekről kítű-
zött feladatokra kevesebb jó megoldás érkezett, mint a
„hagyományos” nukleáris feladatokra. Ez jól mutatja,
hogy a versenyeknek milyen fontos szerepük van az ok-
tatott tananyagterületek formálásában. Erős biztatás ez a
jövő számára, mert remélhető, hogy a tematika kibővíté-

sével a nukleáris alapismeretek mellé egyéb modern fizi-
kai területek oktatása is felzárkóztatható.

Az első forduló (válogató verseny) 10 példáját az isko-
lákból lehetett megoldani 3 óra alatt. Kijavítás után a
tanárok azokat a megoldásokat küldték be az Eötvös
Társulatba, ahol a 9–10. osztályos (junior) versenyzők
legalább 40%-os, a 11–12. osztályos (senior) versenyzők
legalább 60%-os eredményt értek el. Ezeket ellenőrizve a
bírálóbizottság a legjobb 8 junior versenyzőt és a legjobb
20 senior versenyzőt hívta be a paksi Energetikai Szak-
középiskolában 2004. április 17-én megrendezett döntő-
re. A behívott senior versenyzők közül ketten nem tud-
tak megjelenni, így 18 senior és 8 junior versenyző vett
részét a döntőn. A versenyeken bármilyen segédeszköz
használható volt (mobiltelefon és az Internet kivételével).
Az alábbiakban ismertetjük a válogató verseny, valamint
a döntő feladatait, és a megoldások lényeges gondolatait.