

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította
A Matematikai és Physikali Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

LIX. évfolyam

11. szám

2009. november

CSILLAGÁSZAT ÉS RÉSZECSEFIZIKA

Patkós András
ELTE Atomfizika Tanszék

A gyakran hallott állítás, hogy a két tudományterületen folyó kutatások szorosan összekapcsolódnak, leginkább a következő jelenségekre alapozható:

- a csillagokban zajló nukleáris reakcióhálóban akár stacionárius csillagállapotban, akár a szupernóva-robbanásokban a részecskefizikai kutatás számára elsősorban érdekes elemi részecskék keletkeznek;

- a Világegyetem nagy anyagsűrűségű kompakt objektumainak belső szerkezete, amely az elemi kölcsönhatásokra alapozva érthető meg, lényegesen befolyásolja megfigyelhető sajátjaikat;

- az Univerzum történetének korai, extrém nagy energiasűrűségű szakaszában létrejöhetnek hosszú élettartamú, igen kis intenzitással kölcsönható, nagy tömegű elemi maradványok, amelyek kézenfekvő jelöltek a csillagászatilag meggyőzően kimutatott sötét anyag alkotórészeinek szerepére.

Alább ebből a három kategóriából mutatok be egy-egy témát. Nevezetesen a neutrínóoszillációról, továbbá a kompakt csillagászati objektumok magja kvarkszerkezetének feltárását és a sötét anyag elemi kölcsönhatásainak kimutatását célzó kutatások helyzetéről lesz szó.

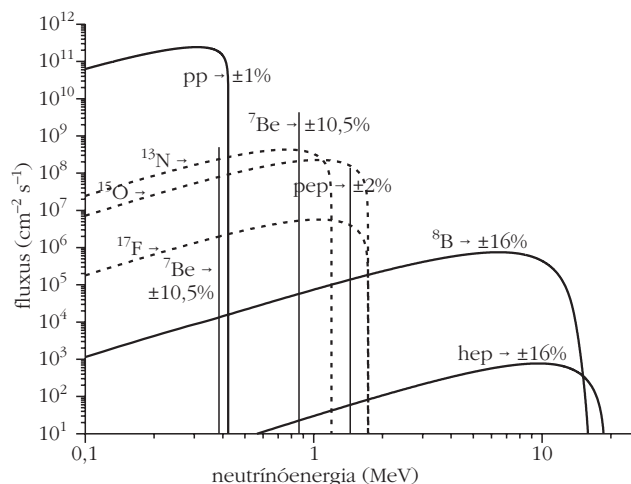
Tudatában vagyok annak, hogy a csillagászat klaszikus stílusú művelői számára ezek nem feltétlenül központi fontosságú témák. Sokuk kifejezetten félti az asztronómiát a részecskefizikai behatolástól. *Simon White*, a garchingi MPI für Astrophysik megfigyelő



csillagász igazgatója 2007-ben, amikor a kizárólag csillagászati eszközökkel megfigyelhető „sötét energia” köré szerveződött kooperáció került a NASA alapkutatói projektjeinek élére, kemény hangvételű kritikát tett közzé [1]: „... ez a konvergencia káros lehet a csillagászat számára. A két közösség eltérő módszertant alkalmaz, tudományos kultúrájuk különböző. Kritikátlanul elfogadva egy idegen rendszer értékeit, a csillagászok kockára teszik jelenlegi sikereiket és területük jövőbeli életképességét. A sötét energia csillagászati eszközökkel történő vizsgálata tagadhatatlanul érdekes feladat, de csak egy a sok közül...”. A válasz nem késett soká. *Edward (Rocky) Kolb*, a Chicagói Egyetem részecskefizikus indulású asztrofizika professzora válasz-esszéjében [2] a két kutatási stílust összekötő két erős „szálnak” nevezte a sötét energia és a sötét anyag megismerésének kihívását. „Természetesen a két területnek vannak sajátos intellektuális és együttműködési hagyományai, amelyek egyike sem tekinthető ideálisnak. Két különböző kultúrájú szakterület egyike sem ítélné önmagában jónak vagy rossznak; egy adott feladatra alkalmazva derül ki, hogy használhatóak-e vagy sem. A csillagászat és a részecskefizika közösségei előtti kihívás a legjobb hagyományaik összekapcsolását követeli.”

A részecskefizika jól reprodukálható események statisztikus értékelésével tesz kísérletet egy tipikus univerzum tipikus jelenségeinek értelmezésére. Ez a stílus tükröződik a részecskefizikai szemléletű asztrofizikai vizsgálati tervekben (pl. galaxistérképek alapján a látható anyag eloszlásának két- és soktest-korrelációs értékelése, amihez hasonlók az Univerzum röntgenforrás-térképei vagy neutrínóobszervatóriumok segítségével a kozmikus neutrínóforrásokról megalkotandó globális-átlagos kép). Gyakran hangoztatott tény, hogy a kísérleti részecskefizikában az individuális kutatási hozzájárulás pontos körülhatáro-

A Csillagászat Nemzetközi Éve alkalmából az MTA XI. Osztálya által rendezett 2009. november 10-ei ülészakon tartott előadáson alapuló cikk. Apróbetűs részleteit a technikai kérdések iránt érdeklődőknek szánta a szerző.



1. ábra. A Nap neutrínóságzásának a Standard Napmodell alapján számolt spektrális teljesítménye Bahcall–Serenelli–Basu idézett munkájából.

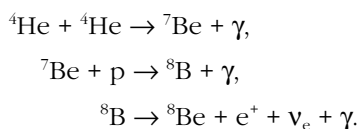
lása egyre nehezebb. A csillagászok erősen hangsúlyozzák a megfigyelt univerzum vagy annak akár egyetlen csillaga vagy galaxisa egyediségét, részletes tulajdonságai általánosíthatóságának nehézségét. Ehhez a szemlélethez látszik illeszkedni a megfigyelő személyiségének szerepét, akár egyetlen objektum kitarító megfigyelésére áldozott kutatói pályáját megbecsülő tudósképük.

Szerencsére, tudunk már olyan, vitathatatlanul tudománytörténeti jelentőségüként számon tartott kutatási eredményekre hivatkozni, amelyek a két kutatási terület összehangolt tevékenységét hasznosították. Elsőként elevenítsük fel a legnevezetesebb példát!

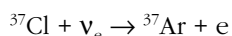
Neutrínócsillagászat

2002-ben a három részre osztott Nobel-díj felén *Raymond Davis Jr.* (1914–2006) és *Masatoshi Koshiba* (1926–) osztozott „úttörő hozzájárulásukért az asztrofizikához, különösen a kozmikus neutrínók észleléséért”. A részletesebb sajtóközlemény záró kulcsmondata a következőképpen fordítható magyarra: „Davis és Koshiba munkája váratlan felfedezésekhez és egy új, intenzíven kutatott területhez, a *neutrínócsillagászat* kialakulásához vezetett”.

Davis kísérlete a Homestake-bányában tárolt széntetraklorid (CCl_4) felhasználásával a Nap magfúziós folyamatai során lejátszódó reakciósorban keletkező nyolcas atomszámú bór béta-bomlásából származó neutrínók kimutatását tűzte ki céljaul:



Az észlelésre használt neutrínó-indukált reakció



volt. Bekövetkezésének kimutatása az argon-atomok kémiai kinyerésén alapult. A kísérlet végső változatát



2. ábra. A Nap képe a neutrínófluxus irány szerinti intenzitásának detektált eloszlása alapján.

1970-ben indították be és közel negyedszázadig működtették. 1998-ban közölték végső eredményét [3], miszerint 1970 és 1994 között 2200 argon-atomot nyertek ki az „uszodából”. *John Bahcall* (1934–2005) már 1964-ben elméleti becslést adott a Nap-neutrínók spektrális teljesítmény-eloszlására a fúziós reakcióháló adatainak akkori ismerete alapján. Az ő modelljét nevezik Standard Napmodellnek. A javuló mérési adatokkal folyamatosan korrigálva számolásait, 2005-ben az 1. ábrán látható spektrumot tette közzé [4]. A mai észlelési eredmények egybehangzóan mutatják, amit Davis már 1972-ben az első (balatonfüredi) Neutrínó-konferencián jelzett [5]¹: a Naptól érkező elektron-neutrínók fluxusa energiafüggő, de mindenképpen csak fele-harmada az előre jelzett értéknek.

A kanadai Sudbury-bányában 1000 m³ nehézvízzel töltött tartályban a Naptól érkező neutrínófluxust azok úgynevezett semleges és töltött árama révén egyaránt lehet észlelni. A 2001-ben elvégzett észlelés értékelése szerint a semleges árammal indukált reakció a Standard Napmodellel egyező fluxusértéket jelzett, míg a töltött áramú reakció Davis kísérletével megegyezően a várt fluxus harmadát mutatta. A látványos ellentmondást a *Bruno Pontecorvo* (1913–1993) és *Vlagyimir Gribov* (1930–1997) által már 1969-ben, a korai Davis-mérések értelmezésére ajánlott neutrínóoszilláció feltételezése oldja fel. Ezt az értelmezést azóta további három perdöntő érv is alátámasztja.² A kozmikus neutrínók észlelésének programja az elemi részek fizikájában egy alapvetően új, a részecskefizikai Standard Modellen túlmutató fejezet megnyitásában játszik kiemelkedő szerepet.

¹ A Nobel-díj részletes szakmai indoklása ezt a cikket is felsorolja Raymond Davis díjazott felfedezéseinek publikációi között!

² Lásd Ligeti Zoltán friss áttekintését a *Fizikai Szemle* 2009. októberi számában!

A Kamioka-hegységben Koshiba vezetésével az 1990-es évek közepére létrehozott SUPER-K neutrínó-obszervatóriumban H₂O-töltésű tartályban az elektron-neutrínók a víz elektronjain szóródnak, és a meg-lökött elektronok Cserenkov-sugárzását észlelik:

$$\nu_e + e \rightarrow \nu_e + e + \gamma.$$

Ez a technika lehetővé teszi a neutrínóforrás irányának meghatározását, sőt elég finom szögfelbontással és az intenzitáseloszlás hamis színezésével elkészíthető a Nap neutrínófényvel rajzolt képe [6] (2. ábra). A Nap ilyen módon való azonosítását az égbolton kétségtelenül neutrínócsillagászati észlelésként fogadhatjuk el.

Koshiba ¼ Nobel-díja kifejezetten a csillagászat és a részecskefizika kooperációjának első (nem-tervezett) példáját jutalmazta. A szenzációs megfigyelés 1987-ben történt, amikor a Kamiokande-detektor csapata eredeti célkitűzésén, a proton bomlásának megfigyelésén dolgozott. Koshiba párhuzamos célja a Nap-neutrínók valós idejű megfigyelése volt a fenti reakcióval. A detektor érzékenységének ehhez szükséges fokozását 1986 végére el is érte. Ettől kezdve a Cserenkov-detektorok folyamatosan működve a proton hipotetikus bomlása mellett a kozmikus neutrínók jelére is „figyeltek”.

A proton véges élettartamára vonatkozó elképzelések mindmáig nem igazolódtak, viszont 1987. február 23-án az obszervatórium spontán átalakult neutrínó-csillagászati berendezéssé.

A csillagászok február 24-én(!) észlelték a Nagy Magellán-felhőben felrobbant szupernóva fényét. A nukleáris fűtőanyagának kifogyása révén instabillá vált csillag gravitációs összeomlása egy sűrű objektum kialakulásával zárul. Az egyik lehetőség a neutroncsillag, amelynek elfajult, hideg neutron-anyaga Fermi-nyomásával ellensúlyozza a gravitációs vonzást. A robbanásban az összes fajta könnyű neutrínó és anti-neutrínó egyenlő mértékben keletkezik, részben inverz béta-bomlással, részben annihilációs reakciók

végtermékeként (utóbbiakban antineutrínók is keletkeznek). Ezek szállítják el a robbanás 10⁵⁹ MeV-re becsült energiájának 99%-át. Koshiba és munkatársai 1987. március 10-én küldték el beszámolójukat a *Physical Review Letters* szerkesztőinek arról, hogy a felfedezést egy nappal megelőzően egy 13 másodperces intervallumban megtalálták annak a 12 neutrínó által meg-lökött elektronnak a Cserenkov-lenyomatát, amelyek beérkezési irányuk és észlelésük időpontja alapján azonosíthatók voltak a felrobbant objektumból származó, négyzetcentiméterenként milliárdnyi neutrínót tartalmazó részecskeáramnak a detektorral kölcsönhatásba lépett kisszámú alkotórészével.

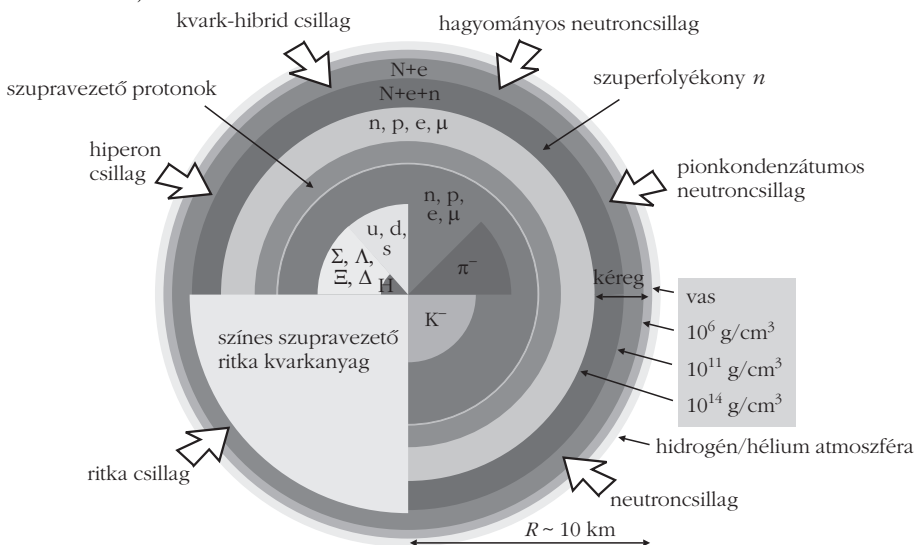
Ez az eset mintát ad a csillagászok elektromágneses (optikai, infravörös vagy röntgentartománybeli) megfigyeléseinek összekapcsolására a kevésbé hagyományos sugárzások észlelésével. Akár a neutrínók, akár a gravitációs sugárzás kibocsátása megelőzi a kozmikus robbanásokat követő elektromágneses energia-kisugárzást (az elektromágneses sugárzáshoz vezető felforrósodás a robbanáskor keletkező lökeshullámban következik be). Ezért e két egzotikus sugárzás perspektivikusan kiváló eszköze lehet a „korai riasztásnak”, amellyel teljesebbé válhat például a szupernóvák robbanási folyamatának vagy például a kettős objektumok összeolvadásának megfigyelése és ennek révén asztrofizikájuk megértése.

Egzotikus kompakt csillagászati objektumok nyomában

A szupernóva-robbanás említése az annak nyomán legtöbbször visszamaradó pulzárokkal átvezet a kompakt csillagászati objektumok világába, amelyek természetének megértésében várható, hogy a hideg, nagy sűrűségű maganyag mellett fontos szerep jut az erősen kölcsönható anyag részecskefizikai alkotórészei termodinamikai állapotgyenletének is.

Az erős kölcsönhatás termodinamikai elmélete óriási léptekkel fejlődött az elmúlt három évtizedben a kvantumkromodinamika megjelenése óta. Jóslatai alapján biztosra vehető, hogy a „neutroncsillag” kategóriája valójában különböző belső szerkezetű égitesteket fog át, amelyeknek közös jellemzője a maganyagét többszörösen fölülmúló sűrűség mellett a 10 kilométert nem meghaladó sugár. Az elképzelések sokaságát a 3. ábra érzékelteti legjobban, amelyen megkísérelték ábrázolni a neutron-„kéreg” alatt feltételezeten elkülönült fázist alkotó mag különféle hadron kondenzátumait. A

3. ábra. A neutroncsillag felszíne alatti kondenzált állapotú közeg lehetséges összetételére vonatkozó elméleti javaslatok.



vázlaton megjelennek olyan kompakt objektumok is, amelyeknél a közbenső fázisban sincs szerepe a neutronagnak.

A neutroncsillag a magfúziós üzemmód végén, a Fe^{56} magokat tartalmazó legalacsonyabb energiasűrűségű maganyag alkotta végállapotú csillag gravitációs összeomlásakor jön létre. A protonok közötti Coulomb-taszítás emelte gátat a gyenge kölcsönhatás révén „szakítja át” a természet, inverz béta-bomlással semleges neutronná alakítva a proton-összetevőket. A Chandrasekhar-határt a Pauli-elvből származó taszítás és a gravitációs vonzás új egyensúlya kialakulásának feltétele adja meg: a Nap tömegének 1,4–1,5-szeresénél nagyobb tömegű maradványcsillagok összeomlása fekete lyuk keletkezésével jár. Hacsak nem derül ki az összeomlás folyamatában elért hadronszintű vagy kvarkszintű anyag állapotegyenletéről, hogy elegendően kemény az összezuhanás megállításához. A sok elképzelésből azt emeljük alább ki, amely a részecskefizikai ismereteket leginkább hasznosítja: a *ritka anyag hipotézist* és következményeinek megfigyelési kutatását.

Az erősen kölcsönható elemi részecskékből álló anyag legstabilabb állapotának keresése egy máig aktívan kutatott elképzelésre vezetett 1971-ben. *A. R. Bodmer* a hadronok zsákmodelljével arra a következtetésre jutott, hogy a magagnál az úgynevezett ritka anyag alacsonyabb energiasűrűségű. *E. Witten* 1984-es elemzése irányította igazán a kutatók figyelmét arra a feltételezésre, hogy az atommagokból álló közeg valójában metastabil, amelynek léte csak annak köszönhető, hogy az igazi alapállapotba történő átmenet nagyon hosszú. Az igazi alapállapot az *u*, *d* és *s* kvarkot azonos sűrűségben tartalmazza.

A zsákmodell feltételezi, hogy a belső tartomány (a „zsák”) többlet energiasűrűséggel (*B*) jellemezhető a hadronmentes vákuumhoz képest, amely egyben negatív járulékot ad a teljes *P* nyomáshoz:

$$E = \text{kvark-gáz energiasűrűsége} + B,$$

$$P = \text{kvark-gáz nyomása} - B.$$

Amikor a végtelen kiterjedésű kvarkanyag energiaviszonyait nulla hőmérsékleten ideális kvarkgáz közelítésben vizsgáljuk, a kvarkok minden egyes „íze” (*flavour*) saját Fermi-gömbjét tölti fel. Az *f* fajta sűrűség-, energia- és nyomásjelükára könnyen kapható (ha a kvark tömege elhanyagolható), hogy

$$\rho_f = \frac{\mu_f^3}{\pi^2}, \quad \varepsilon_f = 3 \frac{\mu_f^4}{4\pi^2}, \quad P_f = \frac{\mu_f^4}{4\pi^2} = \frac{\varepsilon_f}{3}.$$

Ezekben a képletekben μ_f az *f* kvarkiz kémiai potenciálja. A környezetünkben létező, kétfajta könnyű kvark, az *u* és *d* alkotta két-izes kvarkanyag elektromos semlegességét a

$$2\rho_u - \rho_d = 0$$

mellékfeltétel biztosítja. Ez a reláció a sűrűségek fenti kifejezését használva, megköveteli a $2^{1/3}\mu_u = \mu_d$ kapcsolatot. A hadronon kívül a külső nyomás zérus, ezért a kvarkok nyomásával a *B* zsákállandó egyedül tart egyensúlyt. Ez viszont azt eredményezi, hogy az energia sűrűsége éppen $4B$. A kvarkok mindegyike $1/3$ bariontöltést hord, ezért az energysűrűnyi bariontöltésre jutó energiát az

$$\frac{E}{\rho/3} = \frac{4B}{(\rho_u + \rho_d)/3}$$

hányados adja. A sűrűségek és a zsákállandó vázolt módon számolható kapcsolatát felhasználva

$$\frac{E}{\rho/3} = 6,44 B^{1/4}.$$

A zsákállandó negyedik gyökének legjobb értéke 145 MeV, amit például a proton tömegének zsákmodelles kiszámítása határoz meg. A kétfajta könnyű kvarkból felépülő sűrű fázis egységnyi bariontöltésre jutó energiájára ezzel 934 MeV becslés adódik. Ez kicsit magasabb, mint a vasanyagra a kötési energia figyelembevételével számolt 930 MeV, azaz a két-ízű kvarkanyag a magagnál kevésbé stabil.

Három kvarkiz ideális Fermi–Dirac-gázából álló (az *u* és *d* mellett az *s* ritka kvarkot is tartalmazó) közegben a semlegességi feltétel:

$$2\rho_u - \rho_d - \rho_s = 0,$$

aminek $\rho_u = \rho_d = \rho_s$, azaz $\mu_u = \mu_d = \mu_s$, a következménye a kémiai potenciálokra. Ezt a közegét a két-ízű közeggel hozzuk kontaktusba, megkövetelve, hogy ugyanakkora legyen a nyomása. Az ebből a követelményből meghatározott kémiai potenciállal kiszámolva az egységnyi bariontöltésre jutó energiát,

$$\frac{E}{\rho/3} = \frac{6,44}{1,127} B^{1/4}$$

az eredmény (a fenti zsákállandó értékkel: 829 MeV). Az „igazi” alapállapot tehát egyenlő sűrűséggel tartalmazza mindhárom kvarkot.

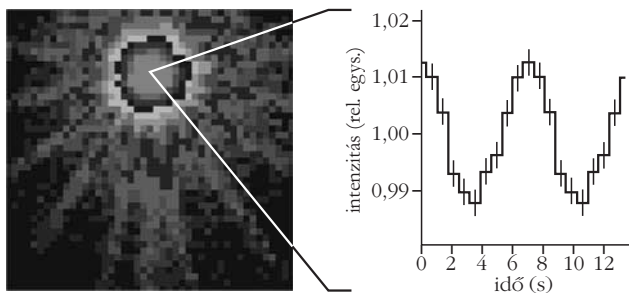
A korai egyszerű becslésekből induló, egyre technikusabb megközelítés eredményeként létrejött a kondenzált kvantum-kromodinamikai anyag fizikájának [7] (egyelőre elméleti) kutatása. Az aszimptotikus szabadság következtében a nagy sűrűségű kvarkközegben az alkotórészek között gyengül a kölcsönhatás, ezért a perturbációs számítás legalacsonyabb rendjében elvégzett számolás elegendően pontos eredményt ad. Eszerint vonzás lép fel a Fermi-gömb átellenes felületén lévő kvarkok között, amennyiben szín-triplettet alkotnak. Végeredményben az erősen kölcsönható anyag alapállapota nagy barionsűrűségen az elektromágneses szupravezető állapothoz hasonló *színes szupravezető* lesz. (Mióután a szupravezetés felületi hatás, a térfogati jellemzők fenti becslései néhány százaléknál többet nem változnak.)

A gluonok közvetítette vonzás okán színes kondenzátum alakul ki:

$$\begin{aligned} \langle \Psi_{iL}^{a\alpha}(\mathbf{p}) \Psi_{jR}^{b\beta}(-\mathbf{p}) \varepsilon_{ab} \rangle &= -\langle \Psi_{iR}^{a\alpha}(\mathbf{p}) \Psi_{jL}^{b\beta}(-\mathbf{p}) \varepsilon_{ab} \rangle = \\ &= \Delta(p^2) \varepsilon_{ijA} \varepsilon^{\alpha\beta A}. \end{aligned}$$

A nulla tömegű Ψ kvarktér balcsavarodású (*L*) és jobbsavarodású (*R*) komponense független szabadsági fokként külön-külön kondenzálódik. A háromértékű színindexet görög betűkkel, a szintén háromértékű kvarkiz-indexet az (*i, j, ...*) sorozatból választott latin betűkkel jelöljük. Feltüntetjük a Weyl-spinor indexeket is (*a, b, ...*), amelyekben antiszimmetrizált kombináció alkot kondenzátumot. A kondenzátum antiszimmetrikus mind az íz-, mind a színindexekben. Miután az „A” indexre összegezés van, a kondenzátum összeresztolja a szín- és íz-komponenseket, ezért a QCD megfelelő fázisának neve: *egybezárt-szín-íz* (color-flavor locked, CFL) *fázis*. Az aszimptotikusan nagy sűrűségre elvégzett perturbatív számítás szerint ez a fázis a QCD valódi alapállapota. A maganyag sűrűségéhez közelebbi tartományban számos más jellegű közbenső fázis létezését javasolták, ezek viszont csak közelítő eredmények.

A 3. *ábra* bal alsó, világosszürke sarkában jelzett *ritka csillag* létezésének asztrofizikai kimutatásában az egyik fő irányzat ezen anyag kis darabkáinak, a *strangeleteknek* földi észlelése. A kozmikus sugárzásnak a régi kőzetekbe beépült alkotórészei között keresnek speciális, nagy tömegszámú magokat. A kozmikus sugárzás jó okkal feltételezett egyik fő forrása a kompakt csillagok ütközései, amelyek kvarkanyag tartalommal (is) bíró objektumok lehetnek. Egy-egy



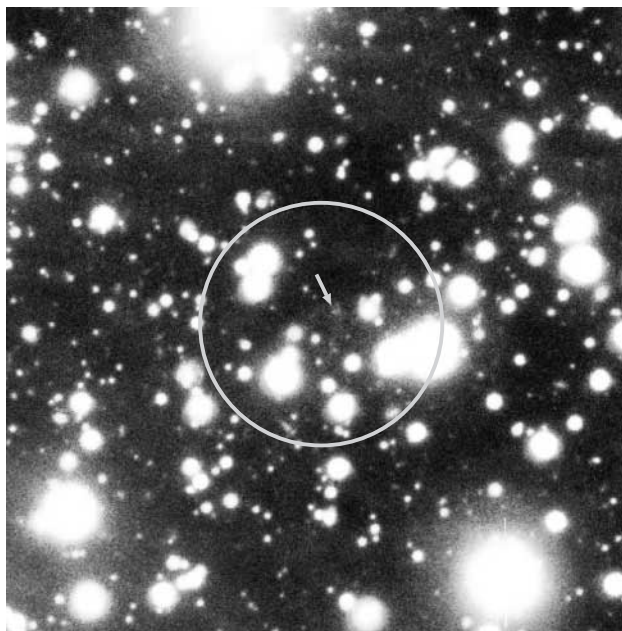
4. ábra. Az RXJ1856 képe röntgensugárzással történt leképezéssel és 7 s periódusú pulzációja.

robbanásszerű ütközés óriási mennyiségű ritka anyagdarabkát szórhat szét, amelyek legfontosabb jellemzője a kis töltés/tömegszám arány ($Z/A \sim 0,08$), miután a közel egyenlő arányú $u-d-s$ összetétel a semlegeshez közeli töltésű kvarkzsákokra vezet. Érdekes megemlíteni, hogy az egykor nagy szenzációként bejelentett $Z = 1$, $A \sim 1000$ esemény, amelyet 1975-ben mágneses monopólusként igyekeztek interpretálni, megfelel a fenti elvárásnak.

Az anyag érintettségét fokozandó, a Holdon gyűjtött közetek 15 grammnyi mintáján végeztek tömegspektroszkópiai vizsgálatot a Yale Egyetemen. $Z = 5-11$, $A = 42-70$ tartományba eső magok koncentrációjára adtak ez évben felső korlátot [8], miután ilyen objektumot nem tudtak kimutatni.

A közel makroszkopikus klasztereket a bolygókereg nem tudja megállítani, azok átrepülnek a teljes térfogaton. Szeizmikus jelük a szokásos földrengésektől lényegesen eltér. 2006-ban az Apollo-11 által a Holdon elhelyezett szeizmográfok adatainak vizsgálatával a Nap által megkötött sötét anyag mennyiségéhez viszonyított korlátot adtak a ritka anyagdarabok jelenlétére a 10 kg – 1 tonna tömegtartományban [9]. A kis Z/A arány miatt ezen anyagdarabok elektromágneses sugárzása tömegükhöz képest igen csekély, azaz hozzájárulhatnak a sötét anyaghoz. A közölt becslés szerint koncentrációjuk tizedét sem éri el a Nap gravitációs terében várt sötétanyag-többletnek.

A legérdekesebb kihívás a csillagászati kimutatás. A szupernóva-robbanások nyomán visszamaradó kompakt objektumok közül a nagy tömegűek és anomálishan kis sugarúak ($R < 10$ km) keltik fel a ritka kvarkcsillag gyanúját. Hangsúlyozni kell, hogy a neutroncsillagok belsejében meghúzódó kvarkfázist tartalmazó úgynevezett hibrid csillagoktól a ritka anyag alkotta csillag különbözik. Utóbbinak csak vékony (néhány száz méternyi) felszíne lehet kis nyomású állapotban. A leghíresebb jelölt az ESA XMM-Newton röntgensugárzási űrteleszkópjával az 1990-es évek második felében felfedezett RXJ1856 forrás, amelynek különlegessége, hogy rádióhullám tartományban nem észlelhető, de környezetének hőmérséklete elég magas a röntgensugárzás emissziójához (4. és 5. ábra). Ez különbözteti meg a többi ismert (kb. 1500) pulzártól. A kategóriájában összesen ismert hét forrás („The Magnificent Seven”) közül ez a legfényesebb, ami lehetővé tette távolságának és méretének meghatározását. Az 500 fényévre lévő objektum sugara ígéretesen kisebbnek adódott 10 km-nél.



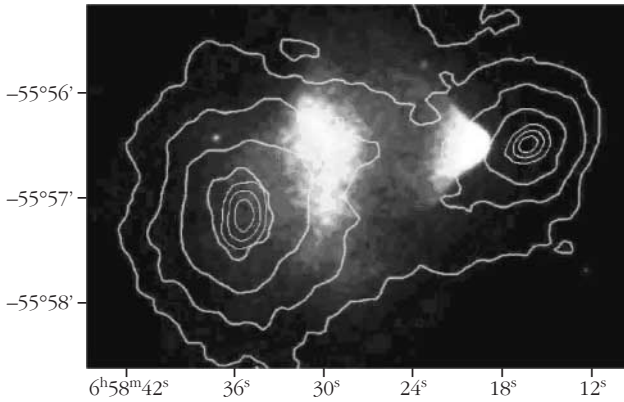
5. ábra. Az RXJ1856 környezetének a Very Large Telescope-pal készült képe.

Fontos újabb információt jelent, hogy a 2002 és 2006 között gyűjtött adatok alapján két olasz kutató kimutatta pulzációját 7 másodperces periódussal [10]. Ez a viselkedés hagyományos neutroncsillag modellekkel is értelmezhető. A neutroncsillagokat jellemző forgó mágneses térhez kapcsolt elektromágneses sugárzási veszteség miatti lassulás jövőbeli megerősítése vagy anomális hiánya nagy súlyt kaphat az objektum természetének eldöntésében.

Bár a ritka anyag kozmikus előfordulására irányuló eddigi kutatások nem hoztak egyértelmű eredményeket, a csillagászatot jellemző kitartó megfigyeléssel, az űrteleszkópok felvételeinek egyre finomodó adatbányászatával feltárható lesz a ma még egységesen neutroncsillag megnevezésű objektumok valódi természete.

Elemi részecskékből áll-e a kozmikus sötét anyag?

2006-ban szemmel is jól látható, közvetlenül érzékelhető érvet publikáltak a gravitációs hatást kifejtő, ám elektromágneses sugárzást ki nem bocsátó „sötét anyag” létezése mellett. A 6. ábrán látható az 1E 0657-56 jelű „puskagolyó-halmazról” készült felvétel elemzése. A halmaz valójában két ütközésben lévő galaxishalmazból áll, amelyek tömegeloszlását az elemzést elvégző csillagászok a kozmikus környezet képére gyakorolt lencsehatásuknak rekonstrukciójával rajzolták ki [11]. A két különállóan zárt görberendszer vonalai a gravitációs ekvipotenciális szintekkel jelzik a szétrepülő anyag tömegközéppontjainak helyzetét. A Chandra röntgenteleszkópnak ugyanerről az objektumról készült felvételével az elektromágnesesen világító forró intersztelláris gáz eloszlását is letepogetták (lásd a szürke skálával jelzett intenzitáseloszlást). Azonnal látható módon az elektromágnesesen



6. ábra. Az 1E 0657-56 „puskagolyó-halmaz” tömegeloszlása lencsehatásból származtatott gravitációs terének ekvipotenciális görbéi, valamint röntgensugárzó anyagának eloszlása.

is kölcsönható plazma lemarad az anyageloszlást meghatározó alig kölcsönható komponens mögött.

Ezen bizonyító erejű példa mellett a sötét anyag létezésére a galaxisok skálájától (rotációs görbék) a Világegyetem globális méretskálájáig (kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás anizotrópiájának értelmezése) állnak rendelkezésre bizonyítékok. A csillagászok hajlamosak a különböző skálán jelentkező láthatatlan tömeget különböző hatásoknak (esetleg éppen a gravitáció Newton-törvénye módosulásának) tulajdonítani. Ezzel szemben a részecskefizikusi megközelítés az egységes értelmezés lehetőségét keresi. A legkézenfekvőbb olyan nagy tömegű, hosszú élettartamú elemi részek kozmikus gázát feltételezni, amelyek az Univerzum forró korszakában keletkeztek és a Standard Modellt alkotó részecskékkel igen gyengén hatnak kölcsön. E tulajdonságaik összefoglaló rövidítése adja nevüket: a WIMP-ek (Weakly Interacting Massive Particles).

A Standard Modell minimális szuperszimmetrikus kiterjesztése minden ismert elemi részecskéhez egy ellenkező kvantumstatisztikát követő partner létezését tételezi fel. A legkönnyebb elektromosan semleges, feles spinű részecskét *neutralínó*nak nevezik, és ez akár abszolút stabil részecske is lehet. Feltételezik, hogy ön-maga antirészecskéje, azaz Majorana-típusú fermion. Ez azt jelenti, hogy két neutralínó annihilálódhat az ismert részecske-antirészecske párokba vagy fotonokba is. Az annihilációs reakció tartja termikus egyensúlyban a forró Univerzum többi alkotórészével.

Világegyetembeli előfordulási gyakoriságának időbeli változását a megfelelő Boltzmann-egyenlettel lehet követni:

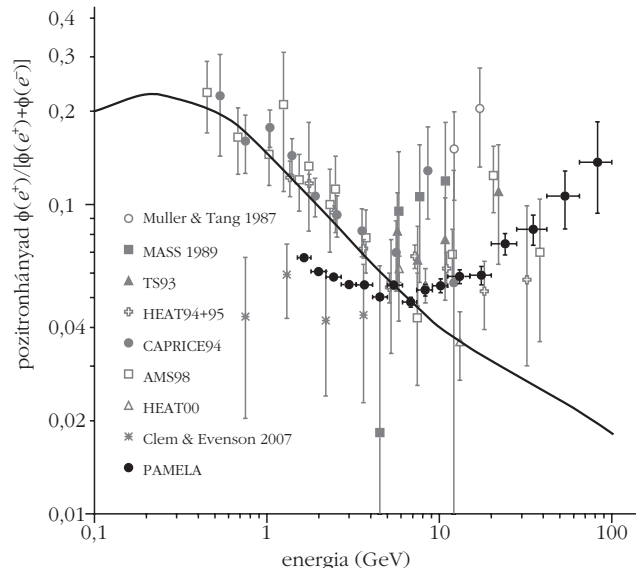
$$\frac{dn(t)}{dt} = \langle \sigma v \rangle [n_{\text{egyensúly}}^2 - n^2(t)] - 3Hn(t),$$

ahol $n(t)$ a WIMP sűrűségének időfüggését írja le, $H(t)$ a Világegyetem tágulását jellemző Hubble-paraméter, amelynek időbeli változását az egyidejűleg megoldandó Fridman-egyenletből kapjuk. $\langle \sigma v \rangle$ az annihiláció hatáskeresztmetszete és az annihilálódó részecskék relatív sebessége szorzatának átlagos értéke. Az időbeli változást a termikus egyensúlytól eltérő sűrűség, illetve a Világegyetem tágulása hajtja, amint az egyenlet jobb oldalán ez nyilvánvaló. A sötét anyag lecsatolódás utáni, ma megfigyelhető átlagos koncentrációja éppen akkor kerül a kozmológiai megfigyelések alapján elvárt tartományba, ha annihilációs hatáskeresztmetszete a Standard Modell szuperszimmetrikus kiterjesztéséből számolttal nagyságrendileg megegyezik. Ezt az egybeesést szokás a szuperszimmetria természeti megvalósulása melletti erős érvként hangoztatni.

Amikor a tágulás üteme meghaladja az annihilációs ütközések időbeli gyakoriságát, a sötét anyag koncentrációjának annihilációs csökkenése leáll. Ettől kezdve az alkotórészek gáza a tágulás ütemében hűl tovább, és alkothatja a globálisan homogén eloszlású sötét anyagot. Kis sűrűségigadozásai gravitációs instabilitás révén felerősödnek, anyaguk csomósodik és a formálódó galaxisok csíráit hozza létre. Csillagászati kimutatásuk egyik irányzata feltételezi, hogy a sötét anyag a galaxisunk centrumát uraló szupermasszív fekete lyuk környékén feldúsulva fordul elő. Hideg univerzumbeli átlagsűrűsége lokális megnövekedésével részecskéinek annihilációs rátája helyileg újból átlépheti az észlelhetőségi határt. Ezért remélhető a sötét részecskék kimutatása a galaxisunk centrumából érkező annihilációs termékek, például kemény (nagyenergiás) fotonok, pozitronok vagy antiprotonok észlelésével.

A 2006 júniusában egy orosz műhold fedélzetén felbocsátott PAMELA (Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics) misszió mágneses spektrométerével 2008 februárjáig mért antiproton- és pozitronspektrumokat 2009 elején két, nagy visszhangot kiváltott közleményben tették közzé [12]. A szokásos elképzelés szerint antianyag csak a kozmikus sugárzás nagyenergiás részecskéinek ütközéseiben bekövetkező másodlagos párkeltéssel kerülhet kozmikus környezetünkbe. A PAMELA által talált antiprotonfluxus és annak energia szerinti eloszlása jól magyarázható ezzel a kiindulással. Ugyanakkor a pozitronspektrum a korábbi mérésekhez képest a kisenergiás (< 5 GeV) tartományban kisebb fluxust, a nagyobb energiákon (> 10 GeV) a korábbiakkal szemben az energiával határozottan növekvő fluxust jelez (7. ábra). Előbbire a napszél hatásának a Nap 22 éves mágneses ciklusa során bekövetkező polaritásváltása kínál magyarázatot, míg utóbbi szignifikánsan meghaladja a kozmikus sugárzás

7. ábra. A PAMELA űrspektrométerrel mért energia szerinti kozmikus pozitroneloszlás egyéb korábbi mérésekkel együtt ábrázolva. A pozitronspektrum nagyenergiás szélé ellentmond a kozmikus sugárzás másodlagos keltési mechanizmusán alapuló várakozásnak (folytonos vonal).



galaxison belüli terjedése során bekövetkező ütközésekre épített elméleti becslést (a 7. *ábra* folytonos görbéje). A modellek minden bizonytalansága ellenére egyértelmű, hogy a másodlagosan keltett pozitronoknak a töltött leptonokhoz viszonyított arányában az energia növekedésével csökkenést kellene tapasztalni. A mért többletfluxus valamiféle elsődleges forrás(ok) jelenlétét valószínűsíti.

Az elmúlt közel egy év asztrofizikai irodalma tele van a lehetséges elsődleges forrásokra vonatkozó javaslatokkal. Ezek a pontszerű (pulzár) forrásoktól egészen az úgynevezett kozmikus húrok bomlástermékeiig terjednek. Természetesen számos elemzés született a sötét anyag eredetére is, amelyet az anti-protonspektrumban nem észlelt extra komponens nagyon erős korlátok közé kényszerít.

A PAMELA misszió adatgyűjtése legalább 2009 végéig tart. Az adatsor továbbnövelése lehetővé teszi a spektrum 300 GeV-ig statisztikailag megbízható meghatározását. Az annihilációs mechanizmus az annihiláló részecskék tömegének közelében éles levágást követel. Ez a karakterisztika nagyon világos útmutatást adna a CERN LHC kísérleteiben az új (szuperszimmetrikus) részecskék kereséséhez. Ugyanakkor a környezetünk galaktikus röntgenforrásait minden korábbi részletebben feltérképező FGST (Fermi Gamma Ray Space Telescope) misszióval a pozitrontöbblet esetleg járulékot adó pulzárforrások megtalálásában is jelentős előrehaladás várható. Ugyanez a berendezés a galaxisunk centrumában lévő szupermasszív fekete lyuk környezetéből észlelt röntgenfotonokkal alkalmas a sötét anyag annihilációjából származó fotonok kimutatására, bár ezek leválasztása az egyéb forrásokról erősen modelfüggő.

A példák alapján világos lehet e cikk szándéka: a csillagászati és részecskefizikai szemléletű kutatási programok összehangolt megvalósítása előnyeinek hangsúlyozása. Remélhetőleg az egymás törekvéseit kölcsönösen kioltó ellenpropaganda-kampányok korszakát a világ szerkezetére vonatkozó tudásunkat kölcsönösen kiegészítő ismeretekkel gazdagító együttműködés korszaka váltja le.

Irodalom

1. S.D.M. White: Fundamental physics: why Dark Energy is bad for Astronomy. *Rept. Prog. Phys.* 70 (2007) 883–898.
2. E.W. Kolb: A Thousand Invisible Cords Binding Astronomy and High-Energy Physics. *Rept. Prog. Phys.* 70 (2007) 1583–1596.
3. Cleveland, B. et al.: Measurement of the solar electron neutrino flux with the Homestake chlorine detector. *Astrophys. Journal* 496 (1998) 505.
4. J. N. Bahcall, A. Serenelli, S. Basu: New solar opacities, abundances, helioseismology, and neutrino fluxes. *Astrophys. Journal Letters* 621 (2005) L85.
5. Davis, R. et al., 1972 *Proc. of the Neutrino '72 Conference, Balatonfüred, Hungary.* (szerk. A. Frenkel, G. Marx) OMKDK-TECHNOINFORM, Budapest 1972, vol. 1, p. 3.
6. Forrás: <http://apod.nasa.gov/apod/ap980605.html>
7. K. Rajagopal, F. Wilczek: The Condensed Matter Physics of QCD. in *Handbook of QCD* (szerk. M. Shifman) World Scientific, 2001, vol. 3, pp. 2064–2138.
8. Ke Han et al.: Search for stable Strange Quark Matter in lunar soil. *Phys. Rev. Lett.* 103 (2009) 092302.
9. E. T. Herrin, D. C. Rosenbaum, V. L. Teplitz: Seismic search for strange quark nugget. *Phys. Rev. D* 73 (2006) 043511.
10. A. Tiengo, S. Mereghetti: XMM-NEWTON discovery of 7s pulsations in the isolated neutron star RX J1856.5-3754. *The Astrophysical Journal* 657 (2007) L101–L104.
11. Clowe, Douglas, et al.: A Direct Empirical Proof of the Existence of Dark Matter. *The Astrophysical Journal* 648 (2006) L109–L113.
12. O. Adriani et al.: New Measurement of the Antiproton-to-Proton Flux Ratio up to 100 GeV in the Cosmic Radiation. *Phys. Rev. Letters* 102 (2009) 051101; An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1,5–100 GeV. *Nature* 458 (2009) 607–609.

A JÁNOSSY-KÍSÉRLETEK – III.

Varga Péter
Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

Egyfotonos kísérletek

A Jánossy vezette kísérletek ismertetésénél rámutatunk, hogy ezeket szigorú értelemben véve nem egy fotonnal végezték el. Valójában a fénynyalábban a részben áteresztő tükör és a detektorok közötti (lásd I. rész a [11] koincidenciakísérlet) szakaszon, illetve a részben áteresztő tükör és a reflektáló tükrök (lásd I. rész a [13] interferenciakísérlet) közötti szakaszon a fény energiájának *várható értéke* nem haladta meg egyetlen foton $h\nu$ energiáját. A fényforrás a kiválasztott hullámhosszon minden irányban sugároz, a teljesítménye ugyan csak mikrowattokban mérhető, de a fotonok száma így is nagy. Mi csak egy szűk nyalábot választottunk ki, ezzel nem a fotonok számát csökkentettük, hanem annak a valószínűségét, hogy egy adott foton a nyalábon belül tartózkodik. Ez a megállapítás nemcsak Jánossy kísérleteire vonatkozik, ha-

nem a többi, eddig ismertett kísérletre is. Ezért fordulhatott elő, hogy az előző részben tárgyalt kísérletekben (II. rész [5, 21]) legalább két foton esett be a két detektorra a feloldóképességnek megfelelő időtartam alatt.

Aspect [1] és társai állítottak elő olyan fényforrást, amely lehetővé tette, hogy kijelenthessük, hogy egy adott időintervallumon belül nagy valószínűséggel nincsen egynél több foton a térnek abban a tartományában, amelyet fent definiáltunk. A fényforrás kalciumgőzt tartalmazott, az atom termsémája az 1. *ábrán* látható. Legyen az atomok sűrűsége olyan kicsi, hogy a gerjesztett atom csupán sugárzással vesztheti el energiáját. Amennyiben egyedül a $4p^2$ nívó van gerjesztve, akkor csak a $4s5p$ és a $4s4p$ nívóra van sugárzásos átmenet. A $4s4p$ nívóra való átmenetnél a kisugárzott fény hullámhossza 422,7 nm, a kaszkád második lépésőjében kilépő pedig 551,3 nm. A közbülső $4s4p$