

A kölcsönhatásokat egyesítő elméletek közül ma a *szuperszimmetria* (SUSY) a legnépszerűbb, bár igazát egyelőre semmiféle kísérleti megfigyelés nem bizonyítja. Szimmetriát feltételez a fermionok és bozonok között, tehát azt, hogy minden ismert fermionnak és bozonnak van szuperszimmetrikus partnere: a feles spinű leptonoknak és kvarkoknak zérus-spinű részecskék, a kölcsönhatásokat közvetítő, egyes spinű bozonok és a Higgs-bozon szuperpartnerei pedig feles spinű fermionok.

A Standard modell lehető legegyszerűbb szuperszimmetrikus kiterjesztése, a *Minimális Szuperszimmetrikus Standard modell* (MSSM) az elmélet csaknem valamennyi problémáját tetszetősen megoldja, de igen nagy áron: a rengeteg új részecske mellett igen sok új paraméter bevezetésével. Az utóbbi években érdekes versenyfutásnak vagyunk tanúi a kísérleti és elméleti kutatók között: a kísérletek hiába igyekeznek megfigyelni a megjósolt új szuperpartnereket, és eközben mind nagyobb részeket zárnak ki a lehetséges paraméterértékek terében; eközben az elméle-

tek, számításaik, modelljeik finomításával egyre növelik az elméleti alapon megengedett és kísérletileg még nem tanulmányozott paraméter-tartományokat.⁹ Mivel általában feltételezzük, hogy a szuperszimmetria érvénye esetén a legkönnyebb szuperpartner alkotja a sötét anyagot, valóságos áttörést hozott ezen a területen a WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) mesterséges hold vizsgálata, amely óriási területeket törölt (azaz nyilvánított valószínűtlennek) az MSSM elméletileg lehetséges paraméterteréből.

Ajánlott irodalom

- Simonyi Károly: *A fizika kultúrtörténete*. Gondolat, Budapest, 1986; 5.5. fejezet.
 Leon Lederman: *Az isteni a-tom, avagy mi a kérdés, ha a válasz a Világegyetem*. Typotex, Budapest, 2008 (Fordította: Vassy Zoltán).
 Kiss Dezső, Horváth Ákos, Kiss Ádám: *Kísérleti atomfizika*. ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 1998.
 Patkós András, Polónyi János: *Sugárzás és részecskék*. Typotex, Budapest, 2000.

⁹ Ebből a megfogalmazásból az olvasó számára nyilvánvalóvá kell válnia, hogy a szerző maga kísérleti kutató.

A KOZMIKUS HÁTTÉRSUGÁRZÁS KUTATÁSÁNAK TÖRTÉNETE ÉS KILÁTÁSAI

Király Péter
 KFKI RMKI Kozmikus Fizikai Főosztály

A feketetest-sugárzás spektruma egyszer s mindenkorra összefonódott *Max Planck* nevével. Planck 19. század végén és 20. század elején elért eredményei nemcsak a korabeli kutatás élvonalát jelentették, de nagymértékben elősegítették a kvantumfizika, sőt egész modern fizikai világpépünk kialakulását is.

Fontos azonban hangsúlyoznunk, hogy a Planck-spektrum a környezetével termodinamikai egyensúlyban lévő elektromágneses sugárzás fizikai jellemzője, és eredetileg semmilyen kapcsolatban sem állt kozmológiai kérdésekkel, vagyis Univerzumunk múltjának, térbeli kiterjedésének és szerkezetének kérdéskörével. Igaz, hogy Planck a feketetest-sugárzás tanulmányozása során már 1899-ben bevezette abszolút egységrendszerét, amely a c fénysebességen, a G gravitációs állandón, valamint (lényegében) a később h hatáskvantumnak vagy Planck-állandónak elnevezett mennyiségen alapult [1]. Planck kiemelte ennek az egységrendszernek az univerzális, Világegyetemünk bármely részén érvényes, antropomorf mértékegységektől megszabadított jellegét. Ez azonban csupán a fizikai törvények univerzalitásának feltételezését tükrözte, és nem volt közvetlen kapcsolatban a tényleges Univerzum fejlődésének és szerkezetének kérdéseivel.

Az ELFT és az MTA Fizikai Tudományok Osztálya rendezésében Max Planck születésének 150. évfordulója alkalmából tartott emlékülésen elhangzott előadás szerkesztett változata.

Annak vizsgálata, hogy milyen is Világmindenségünk szerkezete, sokáig elsősorban a vallás és filozófia, majd a távcső és *Newton* törvényeinek felfedezése után egyre inkább a csillagászat és a newtoni mechanika vadászterülete volt. A 20. század első harmadában *Einstein* általános relativitáselmélete és az Univerzum tágulásának felfedezése, majd később a csillagok energiatermelésével és a kémiai elemek keletkezésével kapcsolatos számítások hozták egyre közelebb egymáshoz a modern fizikai és csillagászati gondolkodást. A legnagyobb áttörést talán az 1965-ös év hozta, amikor többé-kevésbé véletlenül kiderült, hogy a múlt mélyéből, a tér minden irányából hideg feketetest-sugárzás éri Földünket, és hogy ez a könnyű elemek keletkezéséért is felelős ősi tűzgolyó adiabatikusan lehűlt maradványa. Ettől kezdve hatalmas verseny indult e sugárzás tulajdonságainak minél jobb mérésére, valamint a mérési adatok alapján az ősi Univerzum tulajdonságainak megértésére. Ez az erőfeszítés egyre inkább összekapcsolódott az elemi részecskék fizikájának kutatásával, mivel az ősi tűzgolyó elég korai szakaszában a legnagyobb gyorsítóinkkal elértnél is nagyobb energiájú részecskék fordulhattak elő. Ez az együttműködő versengés most is folyik. A következő lépcsőfok a gyorsítók terén az LHC, a CERN nagy hadronütköztetője, a feketetest-háttérsugárzás irányeloszlásának vizsgálata terén pedig a Max Planckról elnevezett, elsősorban európai kooperációban elkészült űrszonda. Várhatóan mindkettő még 2008-ban munkába áll.



1. ábra. Edwin Hubble (1889–1953) a Mount Wilson obszervatórium 2,5 méteres teleszkópjánál 1923-ban. Ezzel a távcsővel mérte meg a galaxisok vöröseltolódását, és fedezte fel, hogy az Univerzum tágul.

Miért sötét az éjszakai égbolt – és miért még sem az?

A nappali égbolt tiszta, felhőtlen időben fényesnek látszik a napfény légköri molekulákon való szóródása miatt, bár felületi fényessége sokkal kisebb, mint a Napé. Az éjszakai égbolt viszont sötét, csak halvány csillagok pislákolnak rajta. Ez a különbség olyan ősi élménye az emberiségnek, hogy sokáig mindenki természetesen tartotta. Pedig mást várnánk, ha világunk statikus, térben és időben végtelen, a térfogategységre jutó csillagok száma pedig térben és időben állandó lenne. Könnyű belátni, hogy ekkor akármerre nézve valamilyen csillag felületére látnánk rá [2]. Tegyük fel ugyanis, hogy minden csillag felületi fényessége és mérete is Napunkéval azonos. Ekkor egy tőlünk adott távolságban, egységnyi vastagságú gömbhéjban lévő csillagok átlagos száma a távolság négyzetével, az egyes csillagokból hozzánk érkező fény viszont a távolság négyzetének reciprokaival arányos. A gömbhéjból hozzánk érkező fény mennyisége tehát független a távolságtól (ha csak a fény egy részét egy közelebbi csillag részben vagy egészen el nem takarja). A végtelen Univerzumban a távolság szerint integrálva az eltakarások nélkül végtelen fényerősséget kapnánk, azokat is figyelembe véve viszont minden látósugarunk csillagban végződné, vagyis az egész éjszakai (és nappali) égboltot is Nap-fényességűnek látnánk.

E látszólagos paradoxon többek között már *Keplert* is izgatta, nevét mégis egy 19. század eleji német orvos-csillagászról (*Heinrich Olbers*) kapta. Az sem jelentené a paradoxon feloldását, ha a nagyon távoli

csillagokat közbeeső porfelhők takarnák el, hiszen akkor e porfelhők is a csillagok hőmérsékletére melegednének.

Az Olbers-paradoxon táguló, véges élettartamú Univerzumunkban nem lép fel, így ma már jól érthető, hogy a tipikus csillagok hőmérsékletének megfelelő optikai frekvenciákon miért sötét éjszakai égboltunk [2]. Egyrészt a fénysebesség és az első csillagok keletkezése óta eltelt idő véges (ez az oka annak, hogy az éjszakai égbolt fényét adó csillagok összességükben is csak az égbolt teljes térszögének parányi részét fedik le), másrészt a nagyon távoli csillagok hozzánk érő fénye a vöröseltolódás miatt is halványabbnak látszik a látható színek tartományban.

Van-e azonban a spektrumnak olyan tartománya, amelyben mégis fényes az éjszakai égbolt? A választ a kozmikus háttérsugárzás felfedezése és későbbi részletes vizsgálata adta meg. Kiderült, hogy az ősi tűzgyőlőből származó sugárzást minden irányban (ahol azt valamilyen előtérben lévő abszorbens nem akadályozza) „láthatjuk”, és e sugárzás spektruma mintegy 2,725 K hőmérsékletű feketetest-sugárzásának felel meg. Éjszakai égboltunk tehát az ilyen hőmérsékletű sugárzásban (a néhány tized mm-től néhány dm-ig terjedő hullámhosszakon) maximális fényességgel ragyog. Spektruma pedig a maximum közelében sokkal közelebb áll a Max Planck által levezetett elméleti feketetestspektrumhoz, mint a Napé és más csillagoké, sőt annál is, mint amit laboratóriumunkban elérhetünk.

Persze a „ragyog” kifejezés talán túlzásnak tűnhet, hiszen egyrészt e sugárzás szabad szemmel nem látható, másrészt a Planck-spektrum maximumától távol lévő hullámhossztartományokban sok közelebbi lévő forrás túlragyogja azt. Nagy hullámhosszakon elsősorban a nagy energiájú elektronok Tejútrendszereink mágneses terében keltett szinkrotronsugárzása, kis hullámhosszakon a kozmikus porfelhők hőmérsékleti sugárzása a fő vetélytárs. Ezek, valamint a csillagok spektruma azonban a számunkra érdekes hullámhossztartományokban nagyon erősen eltér a mikrohullámú kozmikus háttérsugárzásától, így az előtérforrások járuléka több hullámhosszon való méréssel viszonylag jól leválasztható.

Bár Tejútrendszereinknek azon vidékén, ahol Naprendszerünk van, a csillagfény energiasűrűsége valamivel felülmúlja a háttérsugárzásét, Univerzumunk egészében az elektromágneses sugárzás energiasűrűsége szempontjából a mikrohullámú háttérsugárzás dominál.

A kozmikus háttérsugárzás felfedezésének néhány előzménye

A 20. század első évtizedeiben Einstein általános relativitáselmélete és *Edwin Hubble* (1. ábra) táguló világegyeteme adta meg az első lökést a modern kozmológia kialakulásához. A görbült téridő és a benne lévő anyag kapcsolatát leíró Einstein-egyenletek, va-

lamint a távolsággal első közelítésben arányosnak talált vöröseltolódás új, már fizikailag és csillagászati-
lag is megalapozottnak tekinthető világmodellek felé
nyitottak utat.

A Világegyetem tágulásának matematikai lehetősége már korán, röviddel az általános relativitás elméletének megalkotása után felmerült. Az Einstein-egyenletekre *Willem de Sitter*, majd *Alexander Friedmann* és később *Georges Lemaître* (2. ábra) adott olyan megoldásokat, amelyek táguló univerzumnak voltak értelmezhetőek. Einstein viszont egy statikus, véges, de határtalan megoldást talált, és ezt részesítette előnyben, bár ehhez kénytelen volt bevezetni egy egyenletei esztétikai értékét némileg elrontó új paramétert, a kozmológiai állandót. Az 1920-as évek második felében Edwin Hubble a cefeida-változók vizsgálatával kimutatta, hogy Univerzumunk nem csak a Tejútrendszerből áll, hanem sok ahhoz többé-kevésbé hasonló távoli „ködöt” (galaxist) is tartalmaz. A nagy szenzációt 1929-es dolgozata jelentette, melyben a ködök látszólagos fényességét korábban, mások által mért vöröseltolódásukkal hasonlította össze. Eszerint e ködök nagyjából távolságukkal arányos vöröseltolódást mutatnak, vagyis minél messzebb vannak tőlünk, annál nagyobb sebességgel távolodnak. Ez egyébként de Sitter modellje alapján várható volt, és Hubble munkáját is ez motiválta.

Georges Lemaître belga csillagász volt az, aki a 20-as évek végén legkövetkezetesebben hangsúlyozta, hogy a tágulás tényéből egy korai, sokkal sűrűbb állapotra következtethetünk („kozmosz tojás” hipotézise a nagy űsrobbanásról vallott mai felfogás elődjének tekinthető). Lemaître és Hubble munkássága nyomán a táguló Univerzum koncepciója általánosan elfogadottá vált, sőt a 30-as évek elejétől Einstein is feladta korábbi álláspontját. Maga Lemaître viszont később, főleg *Fritz Zwicky* hatására, hajlott a „fáradt fény” hipotézis elfogadására, amely szerint a távolsággal növekvő vöröseltolódás nem Doppler-sebességgel, hanem gravitációs vagy más hatásokkal magyarázható. Később Hubble is hasonló következtetésekre jutott. A tisztánlátást az is akadályozta, hogy az akkori megfigyelések szerint a tágulás sebességét jellemző Hubble-állandó túl nagynak, az Univerzum ebből származtatott kora túl kicsinek adódott a csillagok, sőt Földünk más módszerekkel meghatározott korához képest. Ezeket az ellentmondásokat később a cefeida-változók típusainak megkülönböztetése és jobb megismerése révén sikerült kiküszöbölni.

A 30-as és 40-es években a magfizika fejlődése elérhető közelségbe hozta a csillagok energiatermelésének és az elemek keletkezésének megértését. Hamar világossá vált, hogy az energiatermelésben a fő szerepet a hidrogén héliummá alakulása játssza, a részfolyamatok és a többi elem kialakulásának megértéséhez azonban számos magfizikai adat hiányzott. *Hans Bethe* és *Fred Hoyle* neve említhető talán elsőként a csillagok belsejében végbemenő magfizikai folyamatok leírásánál, de *George Gamow* eredményei is fontos szerepet játszottak. Sokáig úgy látszott, hogy a

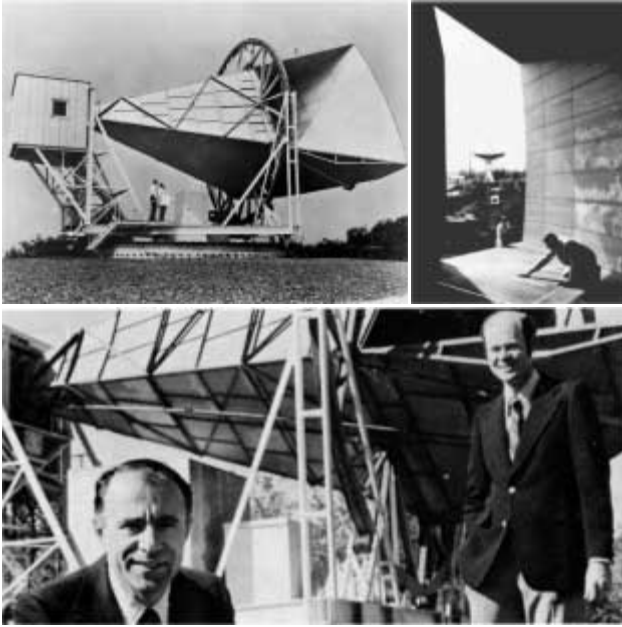


2. ábra. Willem de Sitter (1872–1934), Alexander Friedmann (1888–1925) és Georges Lemaître (1894–1966) a táguló univerzum hipotézis úttörői.

héliumnál nehezebb elemeket az 5 és 8 tömegszámú stabil izotópok hiánya miatt nem lehet a csillagok belsejében szintetizálni, és e nehézségen csak az 50-es években sikerült túllépni.

A rendkívül invenciózus, de gyakran kissé felületes Gamow látott hozzá, hogy az elemek csillagok előtti, forró és táguló Univerzumban való keletkezésének lehetőségeit doktoranduszával kidolgoztassa. Bár 1948-ban a kémiai elemek eredetéről *Ralph Alpher*rel közösen írt dolgozata [3], amelynek szerzői közé Gamow tréfából Bethe nevét is bevette ($\alpha\beta\gamma$ -elmélet), ezer sebből vérzett, az ősi nukleosintézis fő folyamatát lényegében jól írta le. Feltételezve, hogy kezdetben csak neutronok álltak rendelkezésre, a bomló és a bomlástermékekbe befogódó neutronok megfelelő kezdeti hőmérséklet és sűrűség esetén a folyamat végén a tapasztalathoz közeli hélium/hidrogén arányra vezettek. Az egész folyamat a neutron bomlásidejével összehasonlítható időtartam, vagyis percek alatt kellett hogy végbemenjen, ami nagy szenzációt keltett (Alpher védésén mintegy 300 érdeklődő vett részt, az újságok pedig szalagcímekben hozták a híreket). Kritikusai hamar rámutattak arra, hogy a javasolt folyamat nehéz elemek előállítására nem alkalmas, emellett közvetlen megfigyelésekkel bizonyították, hogy a csillagokban viszont létrejönnek nehéz elemek (ha az nem is volt világos, hogyan).

Gamowék más fiatal munkatársakkal közös munkában finomították a számításokat, és elég pontos becsléseket kaptak arra, hogy a folyamat a táguló Univerzum milyen hőmérséklete és sűrűsége mellett mehet végbe. A csillagok belsejéhez képest entrópiában sokkal gazdagabb, nukleononként mintegy 10^9 fotont tartalmazó környezetre van szükség, amelyben a fotongáz energiasűrűsége sok nagyságrenddel felülmúlja a nukleonkomponensét. Az e folyamatokat biztosító ősi tűzgolyó létéből következett, hogy az Univerzum tágulása során a fotonokkal szoros kapcsolatban lévő plazma előbb-utóbb különválik semleges gázra és szabad fotonokra, majd a fotongáz további adiabatikus lehűlés után minden irányban terjedő háttérsugárzást alkot. Az ősi tűzgolyó paraméterei alapján körülbelül 5–10 K hőmérsékletű mai háttérsugárzásra számítottak, bár ezeket a számokat többször is módosították, és dolgozataikban sem e sugárzás spektrumát, sem megfigyelésének lehetőségeit nem tárgyalták. Későbbi visszaemlékezésekből kiderült,



3. ábra. Felül balra: a Bell-laboratórium kürtőszerű rádióantennája Holmdale-ben (New Jersey), ezzel fedezte fel Arno Penzias (alul balra) és Robert Wilson (alul jobbra) a maradványsugárzást. Jobbra fent: a Nobel-díjhoz vezető út antennatisztítást is tartalmaz.

hogy Alpher próbált tapogatózni rádiócsillagász ismerőseinél, hogy kimutatható lenne-e esetleg ilyen sugárzás, de a technika akkori állása mellett erre nem látszott lehetőség. A spektrum vizsgálata pláne irreálisnak tűnhetett, így azzal nem is foglalkoztak. Pedig a Planck-spektrum fontos tulajdonsága, hogy adiabatikus tágulás után is feketetestjellegű marad, csak hőmérséklete csökken a lineáris tágulással fordított arányban.

Az 50-es években ez a Fred Hoyle által gúnyosan *Nagy Bummnak* (Big Bang) nevezett elmélet nem vált népszerűvé az elméleti csillagászok körében. Hoyle és munkatársai egyrészt részletesen kidolgozták az elemek csillagok belsejében végbemenő nukleoszintézisének elméletét, másrészt kozmológiai szempontból a „folytonos teremtés” hipotézisét támogatták, amely szerint a lokális feltételek időben lényegében állandóak. Érdekes viszont, hogy 1964-ben éppen Fred Hoyle mutatott rá arra, hogy ha az összes megfigyelhető hélium csillagokban jött volna létre, akkor a megfigyeltnél mintegy 10-szer több csillagfényt kellene látnunk. E problémát a csillag-előtti nukleoszintézis és az azt követő adiabatikus lehűlés (vagy vörösel-tolódás) kényelmesen elkerüli.

Aki keres – és aki talál

A 60-as évek első felében a részecskefizika és az űrkutatás látványos eredményei miatt megnőtt az érdeklődés a kozmikus fizika alapkérdései és a kozmológia iránt. Princetonban *Robert Dicke* és csoportja minden korábbinál pontosabb *Eötvös*-kísérlettel igazolta a gravitáció ekvivalencia-elvének érvényességét. Dicke javaslatára ezután hozzákezdtek a táguló Univerzum-

ból esetleg visszamaradt sugárzás elméleti vizsgálatához (*Peebles*) és egy ezzel kapcsolatos megfigyelés előkészítéséhez (*Wilkinson* és mások). A Szovjetunióban *Zeldovics* és *Doroskevics* vizsgálta az ősrobbanás maradványainak kimutathatóságát, de a rádiócsillagász-zsargon egyes kifejezéseit félreértve azt hitték, hogy az amerikai kutatók korábbi megfigyelései már kizárták a várt hőmérsékletű háttérsugárzást. *Steven Weinberg* eredetileg 1977-ben írt, magyarul is megjelent könyvében [4] részletesen tárgyalja annak okait, hogy 1965 előtt miért nem keresték nagyobb erőbedobással a forró Univerzum mai maradványait.

A rádiócsillagászat az 50-es években nagy technikai fejlődésen ment át, és a műholdas megfigyelések is hozzájárultak új antennák és detektálási módszerek kifejlesztéséhez. Az Egyesült Államokban a Bell Laboratóriumok egy korábban műholdas mérésekre használt igen érzékeny, kiterjedt források abszolút intenzitásának mérésére is alkalmas, kürtőszerű rádióantennája (3. ábra) a 60-as évek elején feleslegessé vált. Két fiatal kutató, *Arno Penzias* és *Robert Wilson* kapott lehetőséget arra, hogy ennek az új típusú antennának a rádiócsillagászatban való felhasználhatóságát megvizsgálják, majd tudományos méréseket is végezzenek vele. A kalibrációs mérések után korábbi doktori témáik, a galaktikus elektronok szinkrotronsugárzása és a semleges hidrogén 21 cm-es rádiósugárzása pontosabb vizsgálatát tervezték. Előmérésként egy olyan hullámhosszon (7,35 cm) kezdtek méréseket, ahol a korábbi, nagyobb hullámhosszú mérések és a várható hullámhosszfüggés alapján Tejútrendszerünk fősíkjától távol már igen kis intenzitású szinkrotronsugárzás volt várható. Azt akarták ellenőrizni, hogy a különböző irányokban mért rádió zaj valóban jól leírható-e a talaj, a légkör, valamint a műszer egyes komponensei járulékaiknak összegeként. 1964-ben végzett méréseik azt mutatták, hogy a különböző járulékok levonása után is marad egy 3–4 K hőmérsékletű feketetest járulékaának megfelelő maradék. Először gyanakodtak a kürtő-antennájukba beköltözött galambok által termelt „fehér dielektrikumra”, de ennek eltávolítása, sőt a galambcsalád elköltöztetése sem segített. Volt bennük elég türelem és következetesség, hogy a közel izotróp háttér minden általuk lehetségesnek tartott okát kiküszöböljék.

1965-ben véletlenül, egy közös ismerős révén tudták meg, hogy a közeli Princetonban *Robert Dicke* és csoportja pont ilyesfajta háttérsugárzást keres. Bár a számukra ismeretlen elmélet hipotetikus következményeiben nem nagyon bíztak, a két csoport megegyezett abban, hogy az elméleti várakozásokat és a mérési eredményeket két egymás utáni cikkben közölik. Ezután hamar kiderült, hogy a két gyanútlan, de lelkiismeretes kutató eredménye forradalmasította a kozmológiát, és a 20. század egyik legnagyobb felfedezésének bizonyult. A fizikai Nobel-díjat 1978-ban kapták meg. Bár kevéssel utánuk az elméleti értelmezést megadó *Dicke*-csoport kutatói is megfigyelték a háttérsugárzást, nekik már sokkal kevesebb elismerés jutott.

A felfedezés közvetlen következményei

A maradványsugárzás felfedezését követően nagy verseny indult mind tulajdonságainak pontosabb mérésére, mind a korai Univerzum elméleti leírására és mai következményeinek feltárására. A felfedezés fő üzenete az volt, hogy az Univerzum tágulását és forró eredetét komolyan kell venni, és nem csak kozmológiai, de részecskefizikai következményeit is vizsgálni kell. Hiszen az ősi nukleoszintézis előtti időben sokkal nagyobb energiájú részecskék is léteztek, mint amiket ma gyorsítóinkban elő tudunk állítani, és az elektromágneses háttérsugárzás ezeknek az ősi kölcsönhatásoknak valószínűleg nem egyedüli maradványa. Így a forró Univerzum természetes következménye, hogy neutrínó-háttérsugárzás is létezik, és ennek jelenlegi hőmérséklete, sűrűsége jól kiszámítható. De létezik-e gravitációs háttérsugárzás? Termodinamikai egyensúlyban volt-e valaha a gravitációs sugárzás az anyag többi formáival? És az ősi kölcsönhatásokban létrejöttek-e olyan, esetleg nagy tömegű részecskék, amelyek ma minimális kölcsönhatásban állnak világgunk látható anyagával?

Ahogy Földünk történetét is nagyrészt kővületek alapján ismerjük meg, régi Univerzumunk „kővületeit”, fosszilis maradványait is érdemes keresni. Az eddig talált legfontosabb ilyen kővület a kozmikus háttérsugárzás mellett Univerzumunk mai anyagi összetétele és hierarchikus szerkezete.

Röviddel a háttérsugárzás felfedezése után *Andrej Szabarov* hívta fel a figyelmet arra, hogy milyen feltételek mellett alakulhatott ki az ősi Univerzumban a közönséges anyag parányi túlsúlya az antianyaghoz képest, ami később, a nukleonok és antinukleonok nagy annihilációja után gyakorlatilag antianyag nélküli Univerzumhoz vezetett. *Joseph Silk* hangsúlyozta először a háttérsugárzás kis anizotrópiáinak fontosságát, amelyek feltételezése szerint mai galaxishalmazaink és szuperhalmazaink kialakulásának csíráit alkották. Ismét intenzív vizsgálat tárgyává vált az úgy-

4. ábra. A Pierre Auger detektorrendszer (Argentína) 1600 Cserenkov-detektorából egy az előtérben, háttul az első fluoreszcens detektor épülete Los Leones mellett.



nevezett „sötét anyag”, amelynek gravitációs hatását Fritz Zwicky már a 30-as években kimutatta (a sötét anyagról és kozmológiai vonatkozásairól *Fényes Tibor* a *Fizikai Szemle* 2008. márciusi számában írt összefoglaló elemzést [5]). A háttérsugárzás tulajdonságai közül derült ki később, hogy a sötét anyag nem állhat barionokból (protonokból és neutronokból), mert akkor az ősi nukleoszintézis során nem a megfigyelt mennyiségű deutérium jött volna létre. A mikrohullámú háttérsugárzás hatásainak elemzésekor fontos következtetésre jutott *Greisen*, *Zacepin* és *Kuzmin* a legnagyobb energiájú kozmikus sugárzás spektrumával kapcsolatban is (GZK-hatás). Megmutatták, hogy mintegy $5 \cdot 10^{19}$ eV felett a spektrum elég éles csökkenést kell, hogy mutasson, mivel ilyen energiájú protonok a mikrohullámú háttérsugárzás fotonjaival ütközve már pionokat keltenek, ami jelentős energiavesztéssel jár. Az idén elkészülő, *Pierre Auger*-ről elnevezett 3000 km² kiterjedésű detektorrendszer (4. ábra) eddigi adatai szerint ez a gyors csökkenés valóban megfigyelhető.¹

Az elméleti spekulációk mellett további, pontosabb mérések is elkezdődtek. Fontos kérdés volt, hogy a háttérsugárzás színképeloszlása valóban Planck-spektrumnak felel-e meg. Dicke csoportja kisebb hullámhosszon, 3,2 cm-en mért, és 2,5 és 3,5 K közötti hőmérsékletet talált.

A hosszabb hullámhosszakon végzett mérések is 3 K körüli hőmérsékletet mutattak. Léggömbök és rakéták segítségével is végeztek méréseket. Kiderült, hogy egy 1941-es, csillagközi gázfelhők abszorpciós vonalaira vonatkozó mérés szerint 2,6 mm-en is hasonló a hőmérséklet. Bár a közvetlen méréseket a Planck-görbe maximuma környékén légkörünk akadályozta, 1972-re általánossá vált a meggyőződés, hogy a spektrum nagyjából megfelel a feketetest-sugárzásnak (persze volt egy pár eltérő eredményt adó mérés is). A hetvenes évek közepére az is nyilvánvalóvá vált, hogy a spektrum és az esetleges anizotrópia pontosabb vizsgálatához légkörünkön kívüli, mesterséges holdon végzett mérésekre van szükség.

A precíziós kozmológia kezdetei: a COBE-időszak

A kozmikus háttérsugárzás tulajdonságait vizsgáló első műholdra (COBE, COsmic Background Explorer) 1974-ben már született javaslat, de felbocsátására csak 1989-ben került sor. A lassan forgó szonda a Nap–Föld-tengelyre nagyjából merőleges síkban, a Földtől 900 km

¹ Noha nehéz elhinni, az argentin pampákon körülbelül 1400 méter magasságban valóban 3000 négyzetkilométeren (Nógrád megyénél nagyobb területen) helyezkednek el a mintegy 12 négyzetméteres vízzel töltött Cserenkov-detektorok. A detektorok háromszöges elrendezésben, szomszédjuktól 1,5 km-es távolságban vannak. Mivel ilyen nagy energiákon (a GZK-levágás fölött) egy-egy részecske a földfelszínen több km-es sugarú részecskezéport kelt, ilyen nagy távolságok esetén is jó néhány detektor ad jelet, s ezek megbízhatóan jellemzik az eredeti részecske érkezési irányát és energiáját.

távolságban keringett. Fő feladata a spektrum és az anizotrópia pontos vizsgálata volt, de fontos szerep jutott egy olyan műszernek is, amely elsősorban az előtérforrások (csillagok, gázfelhők, por, elektronok fékezési és szinkrotronsugárzása) járulékait vizsgálta.

Egyik leglátványosabb eredményt a távoli infravörös abszolút spektrofotométer (FIRAS, Far Infrared Absolute Spectrophotometer) műszer érte el. Kimutatta, hogy a háttérsugárzás hőmérséklete 0,001 K pontossággal 2,725 K, még a Planck-görbe maximumánál rövidebb hullámhosszakon is. A feketetestspektrumon olyan pontosan ültek a mérési pontok, hogy az általában egyszeres szórást jelölő függőleges vonalakat legalább 50-szeresre kellett növelni, hogy az elméleti vonalból „kilógjanak”. Ilyen pontos Planck-görbét a laboratóriumban sem tudunk rekonstruálni.

A másik fontos kozmológiai műszer, a differenciális mikrohullámú radiométer (DMR), az abszolút hőmérséklet helyett a különböző irányokból jövő sugárzás parányi eltéréseit mérte. A mikrohullámú technikában alapvető fontosságú Dicke-kapcsoló segítségével a műszer másodpercenként több ezerszer hasonlított össze a különböző irányokból érkező intenzitást. Ezzel egyrészt mérte a fluktuációk átlagos négyzetes eltérését és részben kiküszöbölte az elektronikus eredetű zajokat is, másrészt a szonda forgása és keringése során feltérképezte az égbolt hőmérsékleti különbségeit. A kapott relatív eltérések mindössze százazrednyi nagyságrendűnek adódtak, természetesen a csillagászati előtérforrások hatásának elég sok számolást igénylő levonása után. Mivel a műszer irányfelbontása elég gyenge (7° körüli), a hőmérsékleti térkép finomszerkezetére nem lehetett következtetni. Az izotrópiától való eltérés kimutatása és az ősi Univerzum hőmérsékleti térképének megrajzolása viszont óriási jelentőségű volt. A nagy szögtávolságokon is fellépő korreláció kimutatása azért is volt fontos, mert a standard kozmológiai modellek szerint azon tartományok „rezgése”, amelyek a semleges hidrogén kialakulása (rekombináció) idején több fok szögtávolságra voltak egymástól, elvileg nem lehettek volna egymással kauzális kapcsolatban, hiszen az ősrobbanástól a rekombinációig nem telt el elég idő ahhoz, hogy akár fény-, akár hangrezgések útján kommunikáljanak egymással. Ilyen kommunikáció a számítások szerint csak mintegy 1° -os szögeltérésekig lehetséges. Erre az ellentmondásra csak a 80-as évek elején kifejlesztett felfűvódás- (infláció-) elmélet adott magyarázatot, amely szerint a nagyon korai Univerzum igen rövid idő alatt exponenciálisan kitágult, és a közös, tágulás előtti múlt teremtett kauzális kapcsolatot a később már külön fejlődő tartományok között. Ebből viszont az következik, hogy a mikrohullámú háttérsugárzás világunk rekombináció-kori, sőt nukleoszintézis-kori állapotánál sokkal régebbi történésekről is hordozhat információt. Ez az információ azonban jól el van rejtve, és a hozzáférés sok további mérést és számítást igényel.

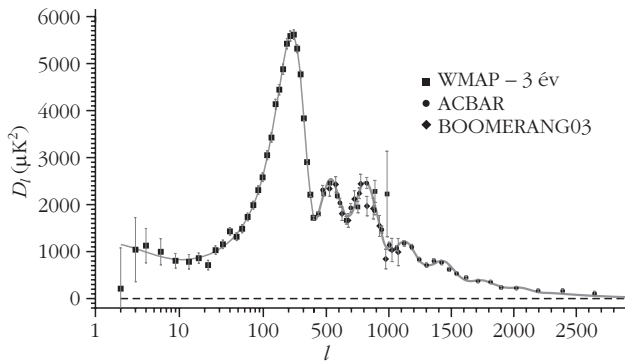
A COBE mindkét kozmológiai műszerének vezető kutatója, *George Smoot* és *John Mather*, eredményeikért 2006-ban Nobel-díjat kaptak.

Kisszögű korrelációk és WMAP-eredmények

A COBE után egy sokkal érzékenyebb és jobb szögfelbontású detektorokkal felszerelt szonda, a 2001-ben pályára állított Wilkinson Mikrohullámú Anizotrópia Szonda (WMAP, Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) következett. Neve emléket állít David Wilkinsonnak, aki *Charles Bennett*-tel együtt készítette elő a WMAP missziót, de 2002-ben elhunyt. A WMAP műszerei megerősítették a COBE lecsatolódás kori hőmérsékleti térképének helyességét, de jobb szögfelbontásuk miatt sokkal több részletet tártak fel. Az új szonda által mért szögkorrelációs függvény is sokkal kisebb szögtávolságokig megbízható. A szögkorrelációs módszer némileg emlékeztet a Föld és a Nap belső szerkezetének szeizmológiai vizsgálatára, bár a háttérsugárzásba befagyott rezgési módusok időbeli változása túl lassú a mi időskálánkhoz képest, ezért csak iránybeli korrelációkat tudunk mérni.

A szögkorrelációs függvény helyett általában annak Fourier-transzformáltját, illetve gömbi geometria esetén gömbfüggvények szerinti kifejtését használják. A háttérsugárzás fluktuációiról feltételezik, hogy négyzetes várható értékük csak a bezárt szögtől, illetve az azzal ekvivalens l multipólus-paramétertől („kvantumszámától”) függ, az irányt jellemző m paramétertől nem. Míg a COBE gyenge szögfelbontása miatt homályban maradt a csak a felfűvódás után kauzális kapcsolatba került ősi tartományok közötti korreláció, a WMAP műszerei már ezt is mérik. A mintegy 380 ezer évvel az ősrobbanás után végbemenő rekombináció (fotonok lecsatolódása, hidrogénatomok kialakulása) előtt a forró plazmában a hangsebesség jó közelítésben $c/3^{1/2}$ volt, ahol c a fénysebesség. Így az igen korai perturbációk (a későbbi rezgések csirái) hangsebességgel terjedve legfeljebb mintegy 220 ezer fényév távolsáig fejthették ki hatásukat a fotonok lecsatolódása előtt. Az, hogy ma ezt az ősi „mérőlécet” milyen szög alatt látjuk a háttérsugárzásban, és ez hogyan jelenik meg a fluktuációk teljesítményspektrumában, az Univerzumunkat leíró kozmológiai paraméterektől függ. A spektrum első maximumának helyéből elsősorban a háromdimenziós tér görbületére, s egyben az Univerzum tömegsűrűségére következtethetünk. Ennek alapján kiderült, hogy a térgörbület lényegében zérus, vagyis háromdimenziós terünk euklideszi. A maximumok és minimumok helye (l -értéke) és amplitúdója alapján más paramétereket is meghatározhatunk, de ezek értékének hibája attól is függ, milyen paraméterezésből indulunk ki. A teljes paraméterrendszer diszkussziójától, valamint a becslési módszerek és az elméleti háttér tárgyalásától itt eltekintünk, de az 5. ábrán bemutatjuk, hogy a WMAP és két más jó szögfelbontású műszer mérési eredményei milyen jól illeszkednek a mindössze 6 becsült paraméterrel számolt elméleti görbére.

A WMAP szonda mérési eredményeit és az azokon alapuló kozmológiai paramétereket először 1, majd 3 éves adatok alapján publikálták, végül idén márciusban megjelentek az előzetes dolgozatok az 5 éves



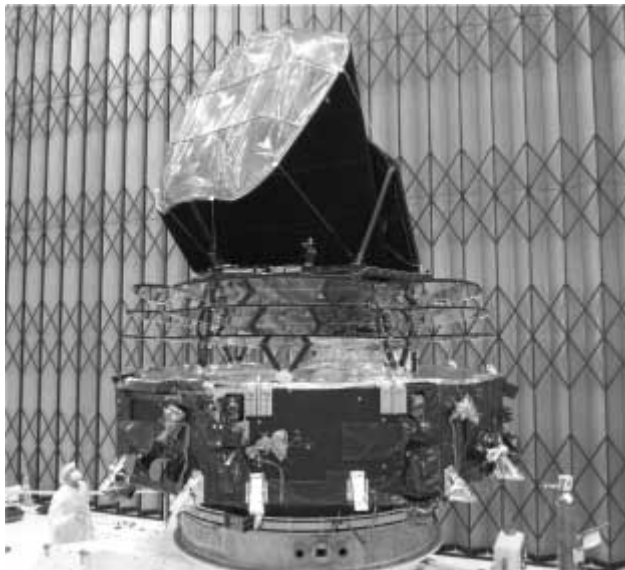
5. ábra. A hőmérséklet-korrelációk teljesítményspektruma

mérési eredményekről is [6]. A főbb paraméterek értéke ugyan nem sokat változott a korábbiakhoz képest, de a jobb kalibráció és nagyobb statisztika néhány területen fontos előrelépést tett lehetővé. Szignifikánsan sikerült kimutatni a neutrínó-háttérsugárzás létezését, amelyre eddig csak elméleti indikáció volt. Emellett a korábbiaknál sokkal pontosabb adatokat sikerült kapni arra, hogy a foton-háttérsugárzás polarizációja kicsiny ugyan, de nem zérus, és az égbolt egy elég gyenge felbontású polarizációs térképét is sikerült elkészíteni.

Hol tartunk ma, és mi várható?

Elsősorban a COBE- és WMAP-szonda eredményei mutatták meg, hogy a mikrohullámú háttérsugárzás ma a kozmológia legfontosabb információforrása. A sugárzás igen pontos Planck-spektrumának kimérése után a legnagyobb erőfeszítést a kis hőmérsékletfluktuációk korrelációs, illetve teljesítményspektrumának mérésére fordították. Igen fontos további információ várható a teljesítményspektrum még pontosabb és

6. ábra. A Planck-szonda Noordwijkben, az Európai Űrügynökség hollandiai telephelyén. A szonda fellövését 2008 végére vagy 2009 elejére tervezik.



kisebb szögekre kiterjedő mérésétől, valamint a polarizációs mérésektől. A polarizáció az elméletek szerint több forrásból származik, és különösen fontos lenne az úgynevezett B-típusú, örvényes komponens megtalálása, mivel ez az ősi forrásokból származó gravitációs sugárzás létét is igazolná. Azonban a sokféle előtérforrás miatt ez igen nehéz feladatnak látszik.

A kozmikus háttérsugárzás méréseinek értelmezésénél fontos szerep jut a távoli szupernóvák megfigyelésének és a galaxisok, galaxishalmazok vöröseltolódása mérésének és iránykorrelációjuk meghatározásának is. A kozmikus szerkezetképződésre vonatkozó adatok jó összhangban vannak a háttérsugárzás-mérésekkel, de a kozmikus csomósodások kései, nemlineáris fejlődése bonyolult modellvizsgálatokat igényel, és nem vezethető le egyszerűen a háttérsugárzásban is tükröződő korrelációkból.

Azt, hogy az Univerzum ma gyorsulva tágu, 1998-ban a távoli szupernóvák vártnál kisebb fényessége alapján fedezték fel, és nem a háttérsugárzás adataiból. Ma valamennyi megfigyelés összhangban van azzal, hogy a barion-alapú „közönséges” anyag az átlagos tömegsűrűségnek legfeljebb 5%-át teszi ki, míg az ismeretlen részecskékből álló hideg, sötét anyag mintegy 22%-ot, az Univerzumban lényegében egyenletesen eloszlott és Einstein kozmológiai állandójával hasonló viselkedést mutató sötét energia pedig 73%-ot. A CERN idén induló nagy hadronütköztetője (LHC, Large Hadron Collider) talán segít valamit legalább a sötét anyag azonosításában, de az is lehet, hogy még tovább bonyolítja a képet. Hasonló várakozások vannak az elemi rész-fizika iránt az Univerzum korai felfűvődési időszakának megértésével kapcsolatban is.

A háttérsugárzás polarizációs szerkezetének és a spektrum feketetesttől való kis eltéréseinek vizsgálatában sokat várhatunk a Max Planckról elnevezett szondától, ami rövidesen megkezdte működését (6. ábra). Érzékenységében, szögfelbontásában és különösen polarizációs mérési pontosságában a korábbiakhoz képest nagyságrendnyi előrehaladás várható. És ez lesz a háttérsugárzást vizsgáló első olyan szonda, amely nagyrészt európai együttműködésben épült.

A feketetest-sugárzásnak kulcsszerepe volt a kvantummechanika őskorában, és Planck aligha gondolhatta volna, hogy egy évszázaddal később ismét kulcsszerepe lesz a mikro- és makrovilág együttes megértéséért folyó kutatásokban.

Irodalom

1. Max Planck: Über Irreversible Strahlungsvorgänge, Fünfte Mittheilung (Schluss). *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften, Berlin* (1899) 440–480.
2. http://en.wikipedia.org/wiki/Olbers'_paradox
3. R.A. Alpher, H. Bethe, G. Gamow: The origin of chemical elements. *Phys. Rev.* 73. (1948) 803–804.
4. Steven Weinberg: *Az első három perc*. Gondolat, Budapest, 1982. (Eredeti: *The first three Minutes. A modern view of the origin of the Universe*. Basic Books, New York, 1977.)
5. Fényes Tibor: Az Univerzum uralkodó anyagfajtája, a „sötét anyag”. *Fizikai Szemle* 58/3 (2008) 81.
6. E. Komatsu et al.: Five-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: cosmological interpretation. arXiv:0803.0547v1 [astro-ph], 4 March 2008.