

*Kovách Ádám*

## **Újabb eredmények a kozmológiában**

A 2006. évben immár századik alkalommal kiadott fizikai Nobel-díjat a díj odaítélésében illetékes Svéd Királyi Tudományos Akadémia egyenlő arányban megosztva John C. Mather és George F. Smoot amerikai fizikusoknak ítélte oda, a rövid hivatalos indokolás szerint „a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás feketetest-jellegének és anizotrópiájának felfedezéséért”.

A Világegyetem ma ismert felépítésének kialakulására vonatkozó modern elméletek az előző évszázad 20-as éveinek munkáiban gyökereznek. A. Friedmann [1] valamint G. Lemaître [2] alapozták meg a ma elfogadottnak tekinthető ősrobbanás („Big Bang”) elméletét, bár – az elméletet alátámasztani hivatott kísérleti adatok hiányában – egyenrangú feltételezésnek volt tekinthető az a sokak által preferált elmélet is, amely az Univerzumot végtelen időközön át lényegét tekintve változatlan állapotban („steady state”) fennálló rendszerként képzelte el.

Az Univerzum geometriai értelemben vett állandósága ellen szóló első kísérleti tapasztalat a múlt század harmincas éveiből származik, amikor is E. Hubble a távoli galaxisok fénye frekvenciájának a tőlünk mért távolságuktól függő csökkenését (a vörös tartomány felé történő eltolódását) mutatta ki. E jelenség a Doppler-hatás alapján értelmezhető, amely szerint a frekvencia csökkenése a fényt kibocsátó és ugyanakkor tőlünk távolodó galaxis hozzánk képest ellentétes irányban jelentkező sebessége folytán lép fel. A távolodás sebessége a fényesség alapján számított távolsággal arányosnak adódott. Mivel a Föld nem foglal el kitüntetett helyet a Világmindenségben, e jelenség a Világegyetem által képviselt tér egészének folytonos, iránytól független tágulására mutat rá. Azt mondhatjuk tehát, hogy a Világegyetem bármely két pontja egymástól mért távolságukkal arányos sebességgel távolodik egymástól. Az arányossági tényező, az ún. Hubble-állandó reciproka értéke idő dimenziójú, és könnyen belátható, hogy a jelenleg ismert Univerzum életkorát (ez a Hubble-állandó értéke alapján mintegy 13,7 milliárd év) szolgáltatja. Az ősrobbanás elmélete szerint ez az az időpont, amikor a Világegyetem egy szinguláris állapotból kiindulva robbanásszerűen tágulni kezdett.

Az Univerzum kezdeti állapotát – szükségszerűen – rendkívül magas hőmérséklet, nagy sűrűség és nagy belső nyomás jellemezte. Ilyen állapot-határozók

mellett a Világmindenség teljes anyaga egy a mai Univerzumban jelenlévő elemi részek szabad részecskéként nem ismert belső összetevőinek keveréke által alkotott, plazmaszerű állapotban kellett hogy létezzen, amelyben a sugárzás játszott meghatározó szerepet. Mivel a csak virtuális értelemben létező, elektromosan töltött részecskék nem alkothattak lokálisan kötött rendszert, ez a plazmaszerű anyag átlátszatlan volt a fotonok számára, így a gyakori ütközések következtében a termikus egyensúly igen gyorsan kialakulhatott. A tágulás ugyan folyamatos hőmérséklet-csökkenéssel járt, de ezzel a fotongáz sugárzási egyensúlya lépést tudott tartani.

A Világegyetem korai állapotában megjelentek már az anyagi részecskék, protonok, elektronok, valamint – kis számban, tranzien állapotként – egyes könnyű atommagok (pl.  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^7\text{Li}$ ) is. Mintegy 380000 évvel az ősrobbanást követően azonban a hőmérséklet kb. 3000 K-re csökkent, ezen a hőmérsékleten már adott volt a kötött állapotú atommagok és atomok kialakulásának lehetősége. Ezzel a „plazma” átlátszóvá vált a fotongáz számára, amely így önálló fejlődésnek indult, ami azt jelenti, hogy a tágulás következtében lassan lehűlt.

Egy ilyen „maradék” háttérsugárzás létezését már 1946-ban Gamow [3], majd 1949-ben Alpher és Herman [4] is feltételezte, kimutatására azonban csak 1964-ben került sor. A.A. Penzias és R.W. Wilson [5] a rádióvételben tapasztalható zajok elemzése során jutott arra a következtetésre, hogy egyes zajok forrását a kozmikus térben kell keresni, továbbá hogy – bár méréseiket csak egyetlen, szűk frekvenciatartományban végezték, mégis termikus eredetet és egyensúlyt feltételezve – e zajhoz mintegy 3 K sugárzási hőmérséklet rendelhető. Felfedezésükért, amelynek hatására – feladva a térgeometria időbeli állandóságának gondolatát – egyre többen fogadták el az ősrobbanás elméletét, 1978-ban Nobel-díjat kaptak.

A Penzias és Wilson felfedezését követő évtizedben született munkák egyrészt elméleti úton igyekeztek feltárni a kozmikus háttérsugárzás várható sajátosságait, másrészt földi és magaslégköri (rakétákat és léggömböket alkalmazó) kísérletekkel törekedtek meghatározni jellegzetes tulajdonságait. Az elméleti számítások előre jelezték, hogy a Földnek a Tejútrendszeren belüli mozgása következtében a kozmikus háttérsugárzás – egyébként iránytól függetlennek feltételezhető – eloszlásában egy dipólus jellegű anizotropia fellépése várható, ezt a 70-es évek elején kísérletileg is sikerült kimutatni. Becslések történtek a korai Univerzum anyagában a gravitáció következtében fellépő sűrűség-fluktuációk hatását tükröző, a háttérsugárzás hőmérsékletében jelentkező általános anizotropia lehetséges mértékére nézve. Az eredetileg  $10^{-2}$ – $10^{-4}$  nagyságrendűnek becsült korlát a 80-as években  $10^{-5}$  nagyságrendűre módosult, előre jelezve e jelenség kísérleti kimutatásának várható nehézségeit.

A NASA 1974-ben felhívást tett közzé, amelyben asztronómiai kísérletekre kért javaslatot. Hosszas, több mint ezer munkatárs közreműködését igénylő elő-

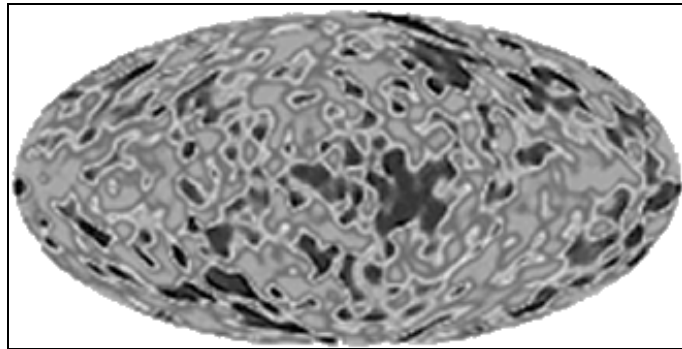
készületek után végül 1989. november 18-án bocsátották fel a Goddard Űrkutatói Központban kifejlesztett COBE (COsmic Background Explorer) mesterséges holdat [6], amelynek célja és feladata a kozmikus háttérsugárzás vizsgálata volt. A COBE három kísérleti berendezést tartalmazott, a teljes programot J. Mather koordinálta, aki egyúttal a FIRAS (Far InfraRed Absolute Spectrophotometer) berendezés felelőse is volt. A DMR (Differential Microwave Radiometer) kísérleti programját G. F. Smoot vezette, a DIRBE (Diffuse InfraRed Background Experiment) programot M. Hauser koordinálta. Míg a korábbi, földi megfigyelésekre alapozott vizsgálatok csak az égbolt egyes részterületeire korlátozódkhattak, a COBE keringési pályájának megfelelő választása a teljes égboltra kiterjedő méréseket tett lehetővé, kizárva egyúttal a légkör egyes, a program szempontjából meghatározó jelentőségű frekvencia-tartományokban jelentkező abszorpciójának korlátozó hatását is.

A FIRAS berendezés egy folyékony héliummal hűtött, igen kis frekvenciakülönbségek meghatározására alkalmas, polarizációs Michelson-interferométer volt, amely a beérkező sugárzást hasonlította össze váltakozó üzemben egy belső feketetest-felület sugárzásával. A két mérési csatorna a 0,1–10 mm közötti hullámhossz-tartományt fedte át. Már az első kilenc (!) perc mérési eredményei meggyőzően igazolták a kozmikus háttérsugárzás feketetest-jellegét, a hosszabb időt átfedő mérések eredményeként a spektrum sugárzási hőmérsékletére  $2,725 \pm 0,002$  K értéket kaptak (ez a spektrum a fizikatörténet valaha is mért legtökéletesebb feketetest-spektruma!). A kapott eredmények közé tartozik a Tejútrendszer  $>120 \mu$  hullámhosszú infravörös sugárzásának a majdnem teljes égboltra kiterjedő meghatározása, továbbá egyes, a csillagközi térből származó egyedi spektrumvonalak kimutatása is.

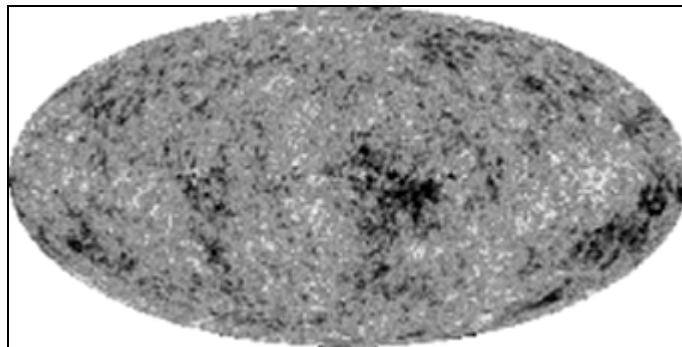
A DMR berendezést hat differenciális sugármérő alkotta, amelyek 3 frekvencián (31,5; 53 és 90 GHz) mérték két, egymással  $60^\circ$  szöget bezáró antenna szimultán, a mikrohullámú tartományba eső jeleinek különbségét. A mérőfrekvenciák megválasztása a Tejútrendszerből származó mikrohullámú sugárzás zavaró hatásának kiküszöbölését tette lehetővé, az antennák – és így a segítségükkel nyert kép – szögfelbontása  $7^\circ$  volt. A műszerekből eredő egyes hatások kiküszöbölése érdekében  $10^\circ$  szögfelbontásra simított adatok szerint a hőmérséklet mért, iránytól függő ingadozása  $30,5 \pm 2,7 \mu\text{K}$ , igen jó egyezésben a „forró” Univerzum fejlődési modellje által jósolt, az átlaghőmérséklethez viszonyított mintegy  $10^{-5}$  relatív értékkel.

A COBE által mért, irányfüggő hőmérséklet-ingadozásokat az 1. ábra, a későbbiekben a WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) mesterséges hold berendezéseivel 33-szorosra növelt szögfelbontással és 45-szörös érzékenységgel végzett hasonló mérések eredményeit a 2. ábra szemlélteti. Mindkét ábra a Tejútrendszerhez kötött, ún. galaktikus koordinátarendszerben (ahol is a közép-

pont a Tejútrendszer központjának, a vízszintes tengely a galaktika központi síkjának felel meg) mutatja be a kozmikus háttérsugárzás mért, az átlaghoz viszonyított ingadozásait. Mindkét ábra a Doppler-hatásra visszavezethető dipólus jellegű, valamint a Tejútrendszerből származó mikrohullámú sugárzástól megtisztított adatokat tartalmazza.



1. ábra. A kozmikus háttérsugárzás irányeloszlása a COBE mérései alapján



2. ábra. A kozmikus háttérsugárzás irányeloszlása a WMAP mérései alapján

A DIRBE kísérlet célja a kozmikus infravörös háttérsugárzás széles hullámhossz-tartományban (1 és 1000  $\mu$  között) történő felmérése és térképezése volt, kiegészítve a FIRAS spektrumok révén a rövid hullámhosszak tartományában nyert adatokat. Az infravörös háttér ugyanakkor a csillagok és galaxisok keletkezése során az infravörös tartományban kibocsátott szinte teljes sugárzási energiát magában foglalja, így ismerete alapvető adatokat szolgáltat a csillagok kialakulása kozmológiai folyamatának, a hidrogénnél nehezebb atommagok létrejöttének, valamint a csillagközi anyag keletkezésének és fejlődésének megismeréséhez.

A Nobel-díjjal méltán honorált megfigyelési eredmények meggyőzően igazolták az Univerzum keletkezésének és fejlődésének leírását célzó elméleti kutatások helyes irányát. Ez nem jelenti azt, hogy ma már a teljességet megközelítő ismereteink lennének e területen: gondoljunk csak arra, hogy a Világegyetem teljes anyagának és energiakészletének túlnyomó részét kitevő ún. sötét anyag és sötét energia mibenlétét illetően – bár hatásukat a kozmológiai modellek figyelembe tudják venni – egyelőre csak feltevésekre vagyunk utalva (lásd pl. [8]).

\*

John C. Mather (\*1946) tanulmányait a Swarthmore College-ben kezdte, ahol BA diplomát kapott 1968-ban fizika szakterületen. PhD fokozatot ért el a Kaliforniai Állami Egyetemen (Berkeley) 1974-ben. A Goddard Space Center (Greenbelt, Md., USA) vezető kutatója, munkáját a Nobel-díjon kívül számos más tudományos díj és elismerés honorálta.

George F. Smoot (\*1945) tanulmányait a Massachusetts Institute of Technology-ban végezte, BS fokozatot ért el matematika és fizika szakterületen 1966-ban. PhD fokozatot ugyanitt nyert 1970-ben részecskefizikai munkájával. A Berkeley-i Egyetem (California, USA) Csillagászati és Kozmológiai Intézetének vezető professzora, de közreműködik számos más intézmény kutatómunkájában is.

#### *Irodalom*

- [1] FRIEDMANN, A.: Z. Phys. **10**, 377 (1922)
- [2] LEMAÎTRE, G.: Ann. Soc. Sci. Bruxelles, **47A**, 49 (1927)
- [3] GAMOW, G.: Phys. Rev. **70**, 572 (1946)
- [4] ALPHER, R.A., Herman, R.C.: Phys. Rev. **75**, 1089 (1949)
- [5] PENZIAS, A.A., Wilson, R.W.: Astrophys. J. (Letters) **142**, 419 (1965)
- [6] lásd: <http://lambda.gsfc.nasa.gov/products/cobe/>
- [7] lásd: <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/current/>
- [8] NÉMETH, J.: Fizikai Szemle **56**, 362 (2006)