

# Fizikai Szemle

## MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

LVI. évfolyam

11. szám

2006. november

### A 2006. ÉVI FIZIKAI NOBEL-DÍJ

Trócsányi Zoltán  
Debreceni Egyetem

*A természet megismerésének kulcsa  
megfigyeléseink pontosságának fokozása*

Mai, kozmológiai megfigyelésekre alapuló, elképzelésünk szerint a Világegyetem 13,7 milliárd évvel ezelőtt „Ősrobbanásban” született. Egyelőre nem ismerjük sem a robbanás okát, sem a kezdeti pillanat pontos történéseit. A tapasztalati tények *értelmezése* alapján azonban nagy biztonsággal mondhatjuk, hogy harminc perccel az Ősrobbanás után a Világegyetemet  $100 \text{ kg/m}^3$  sűrűségű elektromágneses plazma töltötte ki, amelyben nagyrészt csak elektromágneses sugárzás volt. A hőmérséklet elérte a 300 millió kelvint. Ilyen magas hőmérsékleten az elektromágneses sugárzás leginkább nyüzsgő részecskék – fotonok – halmazaként fogható fel. A fotonok mellett kevéske anyag is volt. Átlagosan 600 millió fotonra jutott egy könnyű atommag – többnyire proton vagy alfa-részecske, ritkábban deuteron, triton,  $^3\text{He}$ ,  $^7\text{Li}$  – és egy-két elektron. Az elektronok és az atommagokban található protonok száma egyenlő, és így a világ összességében elektromosan semleges volt. Helyileg az atommagok és elektronok nem alkottak semleges kötött rendszert, ezért a fotonok nem tudtak szabadon haladni, nagy gyakorisággal ütköztek a környezetükben található töltött részecskékkel. Az ilyen fotongáz ideális gáznak tekinthető, az elemi statisztikus mechanika jól ismert törvényei érvényesek rá. Egy fotonnak két szabadsági foka van.

Minél sűrűbb az anyag, annál rövidebb benne a részecskék átlagos szabad úthossza, annál gyakrabban ütköznek a részecskék egymással. Az ütközések eredményeként a forró, sűrű plazmában levő hőmérséklet-különbségek gyorsan kiegyenlítődték, a hőmérsékleti egyensúly hamar kialakult. A világ tehát átláthatatlan és mindenhol ugyanolyan, szóval nagyon unalmas volt. Volt azonban egy érdekes tulajdonsága, a geometriai tér, amelyben a Világegyetem létezik, tágult és tágul azóta is. Ezt a tágulást *Edwin Hubble* fedezte fel az 1930-as években, és tiszteletére Hubble-féle tágulásnak nevezik. Mennyiségileg azt mondhatjuk, hogy a Világegyetemben egymástól  $r$  távolságra található két pont

$v$  sebességgel távolodik egymástól, és a távolodás sebessége arányos a távolsággal,  $v = H_0 r$ . A  $H_0$  arányossági együttható a Hubble-állandó, értéke  $71 \text{ km/s/Mpc}$ , reciprokának közvetlen fizikai jelentése, hogy megadja a Világegyetem életkorát<sup>1</sup>.

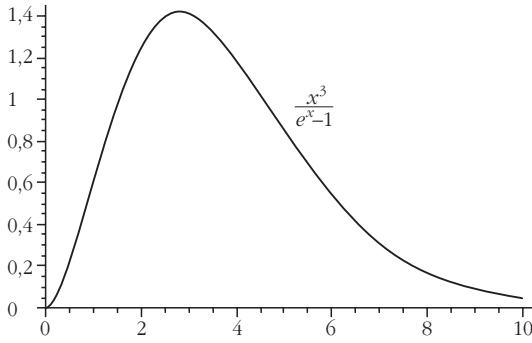
A fotongázban a hőmérséklet-kiegyenlítődések üteme sokkal gyorsabb volt, mint a tágulásé, ezért a tágulás egyensúlyi állapotokon keresztül történt. *Max Planck* munkássága nyomán tudjuk, hogyan lehet jellemezni az anyaggal hőmérsékleti egyensúlyban levő elektromágneses sugárzást. A fotongáz energiasűrűsége a hőmérsékletnek ( $T$ ) és a fotonok frekvenciájának ( $\nu$ ) függvénye. A  $[\nu, \nu + d\nu]$  tartományba eső fotonok energiasűrűségét a Planck-féle képlet írja le,

$$d\varepsilon(\nu, T) = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu d\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1},$$

ahol  $h$  a Planck-,  $k$  a Boltzmann-állandó,  $c$  pedig a fény sebessége üres térben (*1. ábra*). Ha a térben két pont távolsága kétszeresére nő, akkor egy  $\lambda$  hullámhosszúságú foton hullámhossza is a kétszeresére nő, az energiája pedig a felére csökken ( $E_\gamma = hc/\lambda$ ). A fotonok sűrűsége nyolcadára és így a fotongáz energiasűrűsége tizenhatodára esik,

$$d\varepsilon\left(\frac{\nu}{2}, T\right) = \frac{1}{16} d\varepsilon(\nu, T) = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\left(\frac{\nu}{2}\right)^3 \frac{d\nu}{2}}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1},$$

<sup>1</sup> A tágulás csak egymástól távol lévő égitestek között észlelhető. A közeli testek távolodási sebességét az általános tömegvonzás megváltoztatja, stabilizálja vagy akár közeledéssé is alakíthatja.



1. ábra. A Planck-féle eloszlás dimenziótlan változókkal

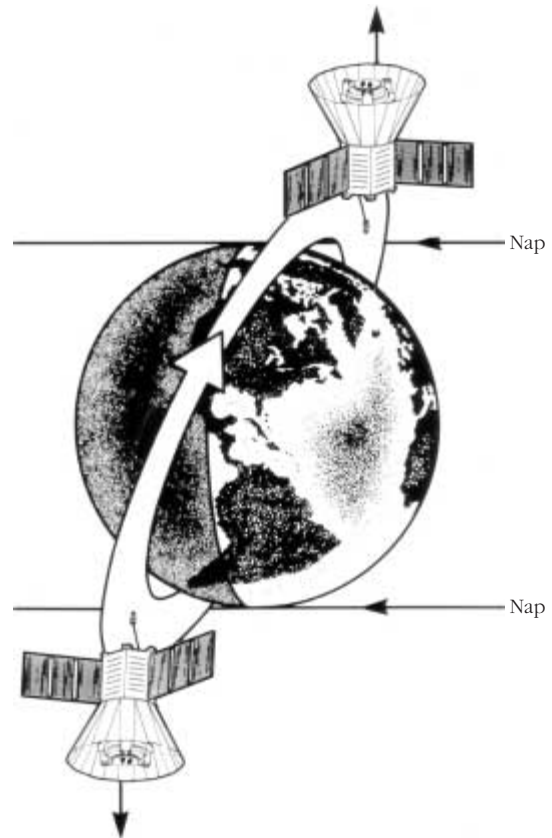
amit úgy is felfoghatunk, hogy az eredeti sugárzási kép-  
letbe feleakkora hőmérséklet került,

$$d\varepsilon\left(\frac{\nu}{2}, T\right) = d\varepsilon\left(\nu, \frac{T}{2}\right),$$

vagyis, hogy a Világegyetem a tágulással fordított arány-  
ban hűlt.

380 ezer évvel később az eredeti 300 millió K hőmér-  
séklet 3000 K-re csökkent. Ezen a hőmérsékleten a plaz-  
mában levő elektronoknak már nem volt elegendő moz-  
gási energiájuk ahhoz, hogy elszökjenek az atommagok  
vonzása elől, ezért kialakultak a semleges atomok. Sza-  
bad töltött részecske hiányában a Világegyetem átlátszó-  
vá vált a fotonok számára. Ettől kezdve a kezdetben hő-  
mérsékleti sugárzásként jellemezhető elektromágneses  
sugárzás szabadon tágult, és tágul mind a mai napig. A  
szabad tágulás eredményeként a sugárzás energiájának  
hullámhossz szerinti eloszlása csak annyiban változott,  
hogy a hőmérséklete a Világegyetem tágulásának mérté-  
kével fordított arányban csökkent. Ez a mindent kitöltő,  
egyenletesen eloszló hőmérsékleti sugárzás ma is megta-  
lálható a Világegyetemben, és 1964-ben *Arno Penzias* és  
*Robert Wilson*, két mérnök, fel is fedezték érzékeny mik-  
rohullámú antennájukkal.

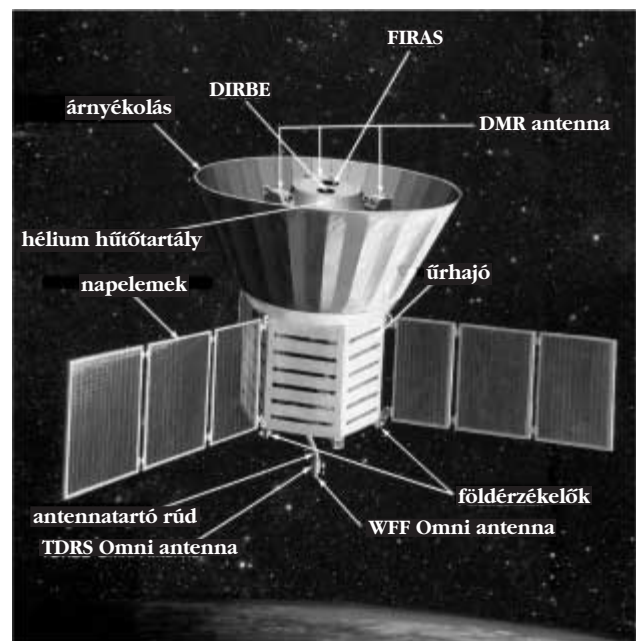
Penzias és Wilson csak egy frekvencián mérték a vil-  
lágűrből jövő sugárzás intenzitását, azt csak feltételez-  
ték, hogy a sugárzás teljes spektrumát a Planck-féle el-  
oszlás írja le. Ennek alapján a kozmikus eredetű sugár-  
zás hőmérsékletét 3 K-nek mérték. Ha valóban a rég-  
múltban jelen levő 3000 K-es hőmérsékleti sugárzás  
maradványát találták, akkor a keletkezése óta a Világ-  
egyetem 1000-szeresére tágult! Ez a sugárzás messze a  
legrégebbi, és így legtávolabbról jövő jel, amelyet a csil-  
lagászok valaha is észleltek – jóval a galaxisok és csilla-  
gok keletkezése előtt indult útjára. Természetesen ah-  
hoz, hogy a sugárzás eredetére vonatkozó értelmezés  
helyes legyen, be kell tudni bizonyítani, hogy valóban  
hőmérsékleti sugárzást észleltek. Ehhez pedig meg kell  
mérni a sugárzás erősségét különböző hullámhossza-  
kon, és be kell látni, hogy a mérési eredmények az el-  
mélet által jóslt eloszlásgörbére illeszkednek. Csak-  
hogy ilyen mérést földi antennával nem lehet kivitelez-  
ni, mert a Föld légköre, amely átlátszó a mikrohullámok  
számára, tehát az 1 cm-es, vagy annál hosszabb elektro-  
mágneses sugárzás számára, elnyeli a rövidebb – infra-  
vörös, ultraibolya, röntgen – hullámokat. A sugárzás in-



2. ábra. A COBE műhold Föld körüli pályájának vázlatos rajza. A mű-  
hold mindig úgy fordul, hogy a Földnek hátat fordítson és a napsuga-  
rakra merőlegesen álljon.

tenzitásának az 1 mm-es hullámhossznál van maximu-  
ma, ahol a légkör erősen átlátszatlan. Bár az 1960–70-es  
években sok olyan mérést végeztek különböző hullám-  
hosszakon a kozmikus sugárzás spektrumának kiméré-  
sére, amelyik alátámasztotta a Planck-féle eloszlást,  
mégsem lehetett egyértelmű következtetést levonni.

3. ábra. A COBE műhold vázlatos felépítése



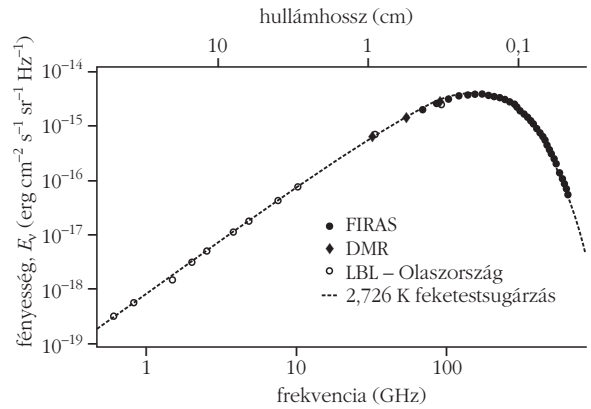
Egyrészt voltak olyan mérések is, amelyek eredménye jelentősen eltért a hőmérsékleti sugárzás intenzitáseloszlásától, másrészt a Földről csak a spektrum hosszuhullámú tartományát lehetett ellenőrizni. A mérések mindaddig nem lehettek bizonyító erejűek, amíg az antennát fel nem vitték a világűrbe. Ezzel a céllal indították útjára 1989-ben a COBE (Cosmic Background Explorer) űrszondát. A világútból való észlelésnek előnye az is, hogy napszaktól függetlenül hosszú méréseket lehet végezni, növelve a mérés pontosságát. Az antennákat mindig úgy forgatták, hogy se a Nap fénye, se a Földről kiinduló sugárzás ne zavarja a mérést (2. ábra).

A COBE története 1974-ben kezdődött, amikor a NASA felhívást adott ki az űrből végezhető csillagászati megfigyelésekre. A szerződés kötés, majd a több mint 1000 mérnökből és kutatóból álló kísérleti együttműködés közel másfél évtizedes előkészületi munkálatai után 1989. november 18-án lőtték fel a műholdat három antennával a fedélzetén (3. ábra). Az antennák különböző hullámhossztartományokban mérték a világútból érkező fotonok intenzitását. A COBE együttműködés és rajta a FIRAS (Far InfraRed Absolute Spectrometer) kísérlet vezetője *John C. Mather* volt. A céljuk a háttérsugárzás intenzitásának mérése volt a 0,1–10 mm hullámhossz tartományban, és a mérés eredményét az Planck-görbével hasonlították össze. A COBE rendkívüli jelentőségű eredményt szolgáltatott. A COBE-ra szerelt antennákkal mért spektrum volt a legtekélyesebb hőmérsékleti sugárzási színekép, amelyet valaha is láttunk (4. ábra), így erős bizonyítékot kaptunk arra nézve, hogy a Világegyetem valamikor legalább 1000-szer kisebb és sokkal forróbb volt, mint ma. A mai hőmérséklet 2,728 K.

## A kozmikus háttérsugárzás irányfüggése

A műholdra szerelt antennával ellenőrizni lehet még a sugárzás iránytól való függését is (a sugárzás nem szóródott a légkörön). Ha a Világegyetem valóban termikus egyensúlyban volt az atomok keletkezésekor, akkor a visszamaradt sugárzás hőmérséklete nem függhet attól, milyen irányba fordítjuk az antennánkat. A DMR (Differential Microwave Radiometer) antennák 3,3, 6,5 és 9,5 milliméteres elektromágneses hullámok észlelése céljából készültek. Ebben a tartományban a legerősebb a háttérsugárzás, és így viszonylag legkisebb a Tejútból jövő zavaró sugárzás. Minden hullámhosszon két antennát működtettek, amelyek egymással 60°-os szöget zártak be. Ennek az volt a célja, hogy a különböző irányból érkező háttérsugárzás intenzitását össze lehessen hasonlítani. A DMR kísérletet *George F. Smoot* vezette. A COBE döntő jelentőségűnek bizonyult a kozmikus háttérsugárzás irányfüggetlenségének igazolásában is.

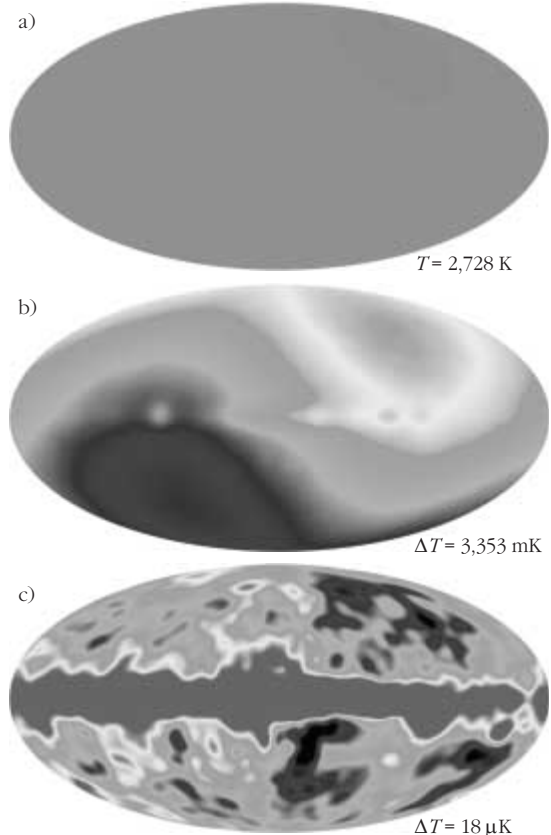
Mint említettük, az elsődleges elméleti várakozás szerint a mindenütt megtalálható háttérsugárzás hőmérsékletét minden irányban ugyanakkorának kell találnunk. Ezt a képet azonban egy lényeges hatás árnyalja. A Föld mozog a háttérsugárzáshoz képest, ezért a mozgásirányával szemben beérkező fotonok észlelt hullámhossza rövidebb (így a mért hőmérséklet magasabb), az ellentétes

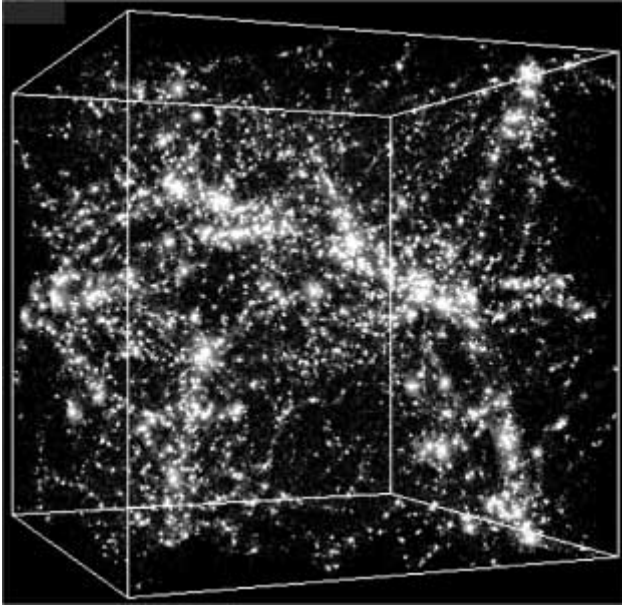


4. ábra. A FIRAS és DMR antennák által mért hőmérsékleti spektrum összehasonlítása a Planck-görbével. A vízszintes tengelyen a sugárzás hullámhossza/frekvenciája, a függőleges tengelyen a fényintenzitás van feltüntetve logaritmikus skálán.

irányban pedig az észlelt hullámhossz nagyobb (így a mért hőmérséklet alacsonyabb), mint a valóság. A mért hullámhosszaknak ez a torzulása a jól ismert Dopplereffektusnak köszönhető. A hőmérsékletnek az előre-hátra irányokban való eltérését dipólus anizotrópiának nevezik a kozmológusok. A DMR valóban felfedezte a dipólus anizotrópiát (5.b ábra). Az előre-hátra irányok között a hőmérséklet-különbség igen kicsi, 3,353 mK. Ebből az adatból meg lehet határozni a Föld sebességét a háttérsugárzáshoz képest.

5. ábra. DMR által készített hőmérsékleti térkép. a) A háttérsugárzás átlagos hőmérséklete. b) A dipólus anizotrópia. A piros melegebb, a kék hidegebb tartományt jelent. A relatív eltérés mintegy 1%. c) A háttérsugárzás hőmérséklete a dipólus anizotrópia levonása után. A középső széles sáv a Tejútrendszerből származó sugárzási háttér.





6. ábra. A Világegyetem nagyléptékű szerkezete. A kocka élhossza mintegy 40 Mpc. A fehér pontok csillagrendszereket jelölnek. A sűrűsödések galaxishalmazok.

A COBE legfontosabb felfedezése azonban az volt, hogy a mérés hibabátáránál nagyobb eltérések vannak a háttérsugárzás hőmérsékletében a különböző irányokban akkor is, ha a Föld mozgásából származó batást levonjuk (5.c ábra). A DMR szögfelbontása  $7^\circ$  volt, és azt találta, hogy  $18 \mu\text{K}$ -es hőmérséklet-különbségek fordulhatnak elő a  $7^\circ$ -nál nagyobb látószög alatt látszó tartományokban. A kozmológusok a  $10^{-5}$ -es relatív eltérést az irányfüggetlenségtől annak bizonyítékeként fogják fel, hogy az újszülött Világegyetemben eleve voltak olyan sűrűség-ingadozások, amelyek a gravitációs vonzás erősítő hatása révén a ma megfigyelt szerkezet (galaxisok, galaxishalmazok) kialakulásához vezettek (6. ábra). Hogy mi okozta ezeket a sűrűség-ingadozásokat, egyelőre nem tudjuk, de feltehetően elemirész-fizikai oka van.

A 2006. évi fizikai Nobel-díjat Mather és Smoot kapták „a kozmikus háttérsugárzás Planck-formájának és irányfüggésének felfedezéséért” (7. ábra).

## Hogyan látjuk ma a világot?

A Világegyetemről alkotott képünk pontosításához a háttérsugárzásnak az iránytól való piciny függését mennyiségileg kell tudnunk megfogalmazni, hogy a kapott eredményt a különböző ősrobbanás-modellek által jósolt irányfüggéssel pontosan össze tudjuk hasonlítani, lehetőséget teremtve ezáltal egyes modellek megerősítéséhez, mások kizárásához. Hogyan lehet ezt a mennyiségi megfogalmazást megtenni? Ennek megértése céljából egy kis kirándulást kell tennünk a hangtan területére.

A hangokat három fizikai tulajdonsággal, a hangerőséggel, a hangmagassággal és a hangszínnel szoktuk jellemezni. Ezek közül a harmadik nem független az első kettőtől. A hangerősség az észlelt hanghullámok által idő és felületegységenként szállított energia jellemzője. A



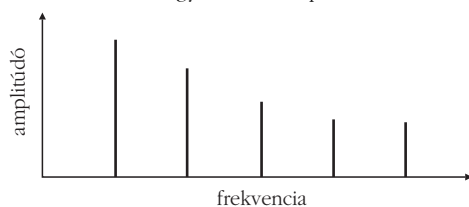
7. ábra. A 2006. évi fizikai Nobel-díj kitüntetettjei: John C. Mather (NASA Goddard Űrközpont) és George F. Smoot (Kaliforniai Egyetem, Berkeley).

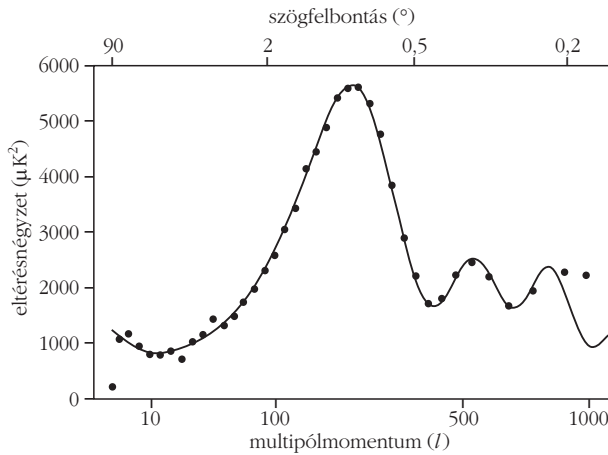
hang a hullámokat szállító rugalmas közeg, többnyire levegő rugalmas rezgése. A szállított energia a rezgés amplitúdójának négyzetével arányos, tehát az erősebb hang nagyobb amplitúdójú rezgést jelent.

A levegő rezgését valamilyen rezgésre képes rugalmas anyag kelti. Például az emberi beszéd esetén a gégefőben található hangszalag. Könnyebben tanulmányozhatóak egy kifeszített rezgő húr rezgései, például a hegedűhúr. A két végén rögzített, véges hosszúságú húron nem tud akármilyen hullámhosszú, vagy ezzel egyenértékűen akármilyen frekvenciájú rezgés tartósan fennmaradni, csak olyan, amelynek a félhullámhossza egész számszor ráfér a húr. Ilyen módon a keltett hang frekvenciája sem lehet akármekkora. Amikor a húron csak egyetlen egy félhullám rezeg, a keltett hangot a húr alapharmonikusának nevezzük, amikor több, az úgy keltett hangok a felharmonikusok.

A rezgő húron egyszerre többféle hullámhosszú rezgés is kialakulhat, ilyenkor egyszerre halljuk az alap- és felharmonikusokat. Az alap- és felharmonikusok amplitúdójának viszonya határozza meg a hallott hang hangszínt. A hangszínt a hang spektrumával, azaz az egyes harmonikusokhoz tartozó hanghullámok amplitúdójával – tehát lényegében az erősségével – lehet jellemezni. Egy véges hosszúságú húron kialakuló bármilyen rezgés egyértelműen felbontható az alap- és felharmonikus rezgésekre, tehát egyértelműen jellemezhető a hang spektrumával (a hangszínnel, 8. ábra). Ugyanez elmondható egy kifeszített rugalmas hártya (például dob) rezgéseiről is, csak a felbontás matematikailag összetettebb: a húr esetében Fourier-sor, a hártya esetén gömbi harmonikusok szerinti sor együtthatói adják a spektrumot.

8. ábra. Egy ideális húr spektruma





9. ábra. A háttérsugárzás spektruma. Vízszintes tengelyen a Legendre-polinomok indexe, illetve a megfelelő szögfelbontás, a függőleges tengelyen az átlaghőmérséklettel való eltérés amplitúdójának négyzete.

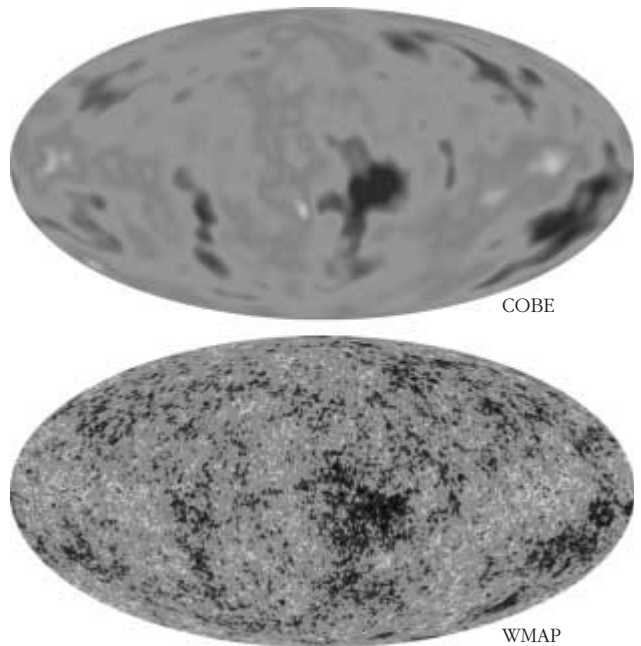
A háttérsugárzás hőmérsékletfüggése és egy kifeszített hártya rezgése között párhuzamot vonhatunk, és így meghatározhatjuk a háttérsugárzás határozatát (9. ábra). Ez a spektrum mennyiségileg határozza meg mennyire hirtelen változik a kozmikus sugárzás hőmérséklete, ha különböző irányokba tekintünk az égen. A spektrumot össze lehet vetni az ősrobbanásmodellek által számított spektrumokkal, és így egyes modelleket ki lehet zárni, másokat meg lehet erősíteni. A COBE adatai azonban nem elegendően pontosak, a hőmérsékleti térkép felbontása durva, így a spektrumnak csupán az első néhány elemét lehet meghatározni. Az adatok pontosítása érdekében 2001. június 30-án egy új műholdat, a WMAP-ot (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) bocsátották Föld körüli pályára. A WMAP minden korábbi mérésnél pontosabban határozta meg a háttérsugárzás hőmérsékleti térképét. A csecsemő Világegyetemről készített fénykép egyszerre kitisztult (10. ábra).

A WMAP adatai és más csillagászati megfigyelések alapján a következő egységes képünk alakult ki a Világegyetemről:

- A Világegyetem születése után mintegy 2 századmásodperccel, 13,7 milliárd évvel ezelőtt igen nagy sűrűségű és hőmérsékletű elektromágneses plazmával volt kitöltve. A plazmát nagyrészt elektronok, pozitronok, elektromágneses sugárzás töltötte ki, ezenkívül volt benne kevéske proton és neutron. A kor meghatározás hibája alig több mint 1%.

- A Világegyetem születése után gyorsan tágult és hűlt. Amikor a hőmérséklete 900 millió kelvin alá süllyedt, a harmadik perc végén hirtelen kialakultak a könnyű elemek (a hidrogén, a hélium, a lítium, a berillium és a bór) atommagjai.

- 379 ezer évvel később, amikor a hőmérséklet mintegy 3000 K alá süllyedt az elektromágneses plazmából kialakultak a semleges atomok, és így a sugárzás és az anyagi részecskék közötti kölcsönhatás gyakorlatilag megszűnt. Ettől kezdve a sugárzás szabadon tágult a Világegyetemmel, és hűlt a ma mérhető 2,73 K-es értékre.



10. ábra. A COBE és a WMAP által készített hőmérsékleti térképek

- Az első csillagok mintegy 200 millió évvel később gyulladtak ki a tömeggel rendelkező anyagi részecskék között fellépő gravitációs vonzás következtében keletkező sűrűsödés és felmelegedés hatására.

- A Világegyetem tágulását meghatározó Hubble-állandó jelenlegi értéke  $H_0 = 71 \text{ (km/s)/Mpc} = 1/(13,7 \text{ milliárd év})$ . A mérés relatív hibája 5%.

- Az adatok jelenlegi értelmezése szerint a Világegyetem örökké tágulni fog, azonban az erre vonatkozó ismereteinket újabb, pontosabb mérési adatok módosíthatják.

- A Világegyetem 4%-a áll a bennünket is felépítő atomokból. 23%-a olyan úgynevezett „sötét anyag”, amelyet laboratóriumban eddig nem sikerült előállítani, így tulajdonságait sem ismerjük. A Világegyetem energiájának 73%-a ismeretlen „sötét energia” formájában van jelen. (Mielőtt bárki szeretné a sötét energiát az emberiséget érintő energiaválság megoldására felhasználni, hangsúlyozni szeretném, hogy ezek az adatok a tágulással egyetemben csak elképzelhetetlenül nagy, mintegy 100 Mpc-nél nagyobb léptékben érvényesek. A Földön nincs sem titokzatos sötét anyag, sem sötét energia.) A részecskefizikusok arról álmodnak, hogy a Genf mellett épülő részecskegyorsító, a Large Hadron Collider (LHC) proton–proton ütközéseiben talán sikerül olyan újfajta részecskéket előállítani, amelyek a sötét anyag nagy részét alkotják.

A WMAP tehát megerősítette a COBE méréseit, Nobel-díjat hozva a COBE vezéregyéniségeinek. Adatai alapján azonban olyan kérdéseket is feltehetünk, hogy milyen volt a Világegyetem az első 2 századmásodpercben. A modellek által jósolt hőmérsékleti spektrum és a mért spektrum összevetése azt sugallja, hogy a nagyon korai időszakban volt egy rövid „felfűvódási” szakasz, amikor egyelőre ismeretlen fizikai ok miatt a Világegyetem lényegesen gyorsabb ütemben tágult. A mai kutatások elsősorban a felfűvódási szakasz jobb megértésére irányulnak.