

# 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

LVII. évfolyam

12. szám

2007. december

## AZ UNIVERZUM SZERKEZETE

Csabai István, Purger Norbert, Dobos László  
ELTE TTK, Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék

Szalay Sándor, Budavári Tamás  
The Johns Hopkins University,  
Department of Physics and Astronomy, Baltimore, USA

A kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás az Univerzumnak az általunk jelenleg észlelhető legrégebbi állapotáról ad számot. Az Univerzum akkori képe meglehetősen homogénnek és izotrópnak tűnik, a relatív fluktuációk nagyságrendje csupán  $10^{-5}$  nagyságrendű. Ezzel szemben a mai Világegyetemben hatalmas sűrűségkontrasztot mutató struktúrákat látunk minden skálán: bolygókat, csillagokat, galaxisokat, galaxishalmazokat és szuperhalmazokat. Míg az intergalaktikus térben kevesebb mint 1 hidrogénatom van köbméterenként, addig például egy neutroncsillag tömegét  $10^{18}$  kg/m<sup>3</sup>-re becsüljük, ami lokálisan  $10^{45}$  mértékű sűrűségkülönbséget jelent. Noha számos részlet még nem világos, és néhány új, rejtélyes szereplő is megjelent a színen, a különböző skálákon végzett, egyre szaporodó észlelési eredményekre támaszkodva mindinkább tisztul a kép, hogy hogyan jöttek létre a struktúrák, hogyan alakult ki az Univerzum komplex szerkezete a kezdetben szinte homogén ősállapotból.

Az Univerzum jelenleg legáltalánosabban elfogadott modelljét a részecskefizikához hasonlóan „standard modell”-nek nevezik. Mindjárt látni fogjuk, hogy olyan szempontból nagyon találó a hasonló elnevezés, hogy a modell nagyon kiváló egyezéseket mutat az összes észleléssel, viszont számos olyan részlet van benne, melynek elméleti alapjait, finoman szólva, nem teljesen kielégítően értjük még. Az Univerzum fejlődésének történiáját nagyon sokan, nagyon sok helyen elmondták már, de azért, hogy az aktuális új eredmények is helyet kaphassanak benne, valamint rávilágíthassunk a struktúrák kialakulásával kapcsolatos mozzanatokra, tekint-

sük át először nagyon röviden a történetet és az elméleti hátteret, majd az észlelések tükrében vizsgáljunk meg részletesebben bizonyos eseményeket.

### Az Univerzum nagyon rövid története

Kezdetben volt az ősrobbanás. Ennek pontos mikéntjét itt nem tárgyaljuk részletesen, számunkra most csupán az a fontos, hogy olyan kvantumfluktuációk játszanak benne szerepet, melyek már ekkor, nagyon kis mértékben ugyan, de inhomogenitást hoznak be a térbeli eloszlásba. A további folyamatok ugyanis nagyrészt ezeket a térbeli fluktuációkat módosítják: ha minden egyzaktul homogén lett volna kezdetben, akkor nem kapnánk meg a jelenleg látható struktúrákat. Az ősrobbanást követő nagyon gyors kitágulással járó inflációs fázis szinte teljesen homogénné és izotróppá teszi az Univerzumot, csupán apró, nagyjából skálafüggetlen Gauss-fluktuációk maradnak meg. Fontos megjegyezni, hogy ezeknek a fluktuációknak a nagysága és eloszlása nagyon érzékenyen befolyásolja, hogy később, például a gravitáció hatására mikor és mekkora anyagcsomók állhatnak össze, lesznek-e csillagok és galaxisok, mekkora lesz azok tipikus tömege. Az infláció az Univerzum  $10^{-32}$  másodperces korára lezajlik, a táguló és hűlő világban kialakulnak a hadronok és leptonok nagyjából a 3. perc végére (1. ábra).

A következő szakaszban a struktúráképződés szempontjából újabb, fontos jelenségek játszódnak le. Az Univerzum ekkor forró, táguló ionizált gáznak tekinthető. A magas hőmérséklet miatt a fotonok dominálják az eseményeket egészen az Univerzum nagyjából 380 ezer éves koráig. A fotonoknak nagyon rövid a szabad úthosszuk, nagyon gyakran ütköznek. A rendszer állapot-

A szerzők köszönetet mondanak az OTKA-T047244, MSRC-2005-038 és MRTN-CT-2004-503929 jelű pályázati témák keretében kapott kutatási támogatásért.

egyenletét és dinamikáját megvizsgálva kiderül, hogy ebben a plazmában olyan rezgések indulnak be, amelyek leginkább akusztikus rezgésekhez hasonlatosak, és ezéért hanghullámoknak nevezik őket. Ezek azért fontosak, mert, mint ahogy látni fogjuk, a hanghullámok sűrűségfluktuációkat okoznak, és ezek nyoma még a jelenlegi galaxiseloszlásban is kimutatható. Miután a plazma annyira lehűlt és kiritkult, hogy kialakulhattak az első atomok, és a fotonok szabadon repülhettek, egyre inkább a gravitáció vette át a struktúra formálásában a vezényszert. A kezdeti kis sűrűségfluktuációk a gravitáció vonzása alatt egyre növekedtek. A jelenlegi, úgynevezett hideg sötét anyag modell (Cold Dark Matter, CDM) szerint a sötét anyag gravitációs völgyeket hozott létre, és az ebbe belezuhanó hidrogéngáz addig sűrűsödött, míg begyűltek az első csillagok, és/vagy az első aktív galaxisok. Erről a „sötét” korszakról jelenlegi műszereinkkel nem tudunk sokat megállapítani a semleges hidrogéngáz elnyelése miatt. A csillagok ultravioleta fénye később ionizálta a semleges hidrogént, valamint a szupernóva-robbanások legyártották a nehezebb elemeket is. A kisebb galaxiskezdemények összekapcsolódtak, és a fokozatos összeolvadások során kialakultak a ma is látható galaxisok.

## A modell és paraméterei

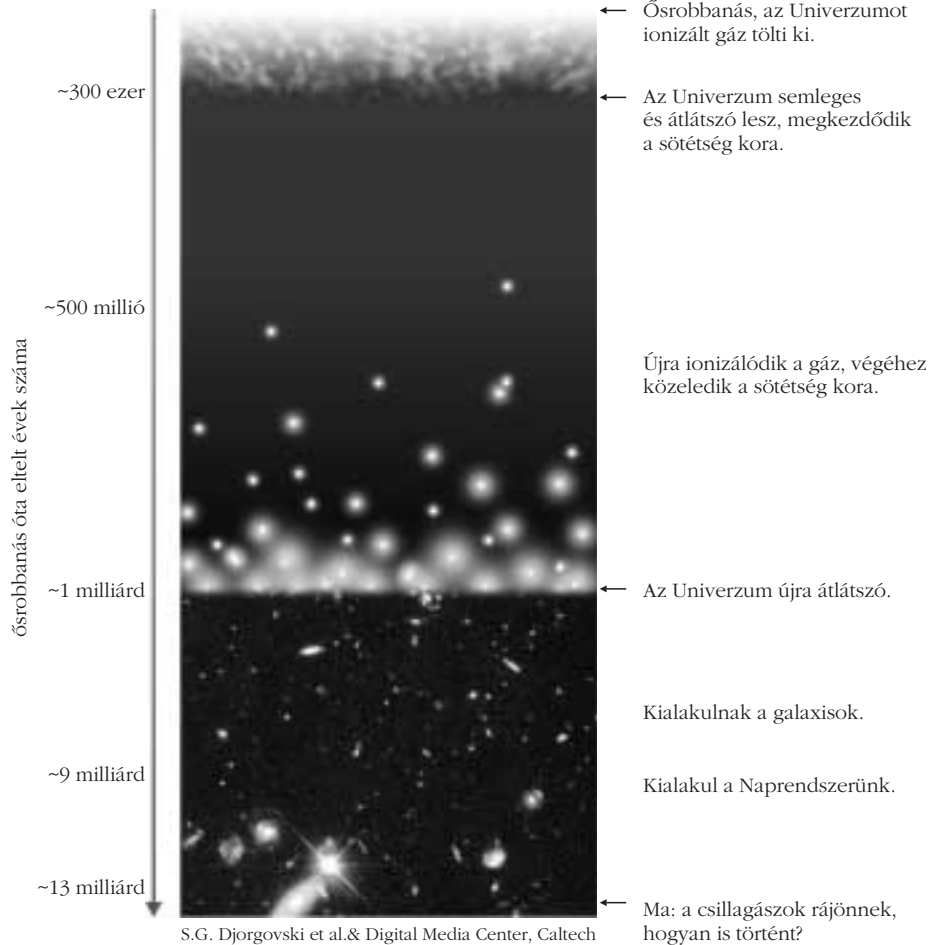
A Világegyetem tágulását legegyszerűbb közelítésben a Friedman-egyenletek írják le:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 \equiv H^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho + \frac{\Lambda}{3} - \frac{k}{a^2},$$

$$-\frac{\ddot{a}}{a} = \frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p).$$

Az első egyenlet a tágulás mikéntjét mutatja, a második pedig az állapotegyenlet. A képletekben  $a$  jelöli a skálafaktort, ami a relatív tágulás mértékét fejezi ki, a felülponozás szokott módon az időderiváltat jelöli. Az  $\dot{a}/a$  arány, a Hubble-paraméter megmondja, hogy adott távolságon lévő két pont milyen látszólagos sebességgel távolodik egymástól. Ezt a távolodási mérésekkel is ki lehet mutatni, és a Hubble-törvény

Az Univerzum története



S.G. Djorgovski et al. & Digital Media Center, Caltech

1. ábra. Az Univerzum rövid története

értelmében egy tőlünk  $D$  távolságra lévő galaxis látászó radiális távolodási sebessége  $v = H \cdot D$ . Itt jegyezzük meg, hogy sem a távolságot, sem pedig a távolodási sebességet nem lehet közvetlenül mérni, ezek észlelése volt az elmúlt évtizedek egyik nagy kihívása a kísérleti kozmológiában. A jobb oldalon az első tag az anyag hatását írja le,  $G$  a gravitációs állandó,  $\rho$  pedig az anyagsűrűség, magában foglalva a barionikus anyagot, a fotonokat és a sötét anyagot is. Gyakran a sűrűséget nem közvetlenül, hanem a

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} = 1,9 \cdot 10^{-29} \text{ b}^2 \text{ g cm}^{-3}$$

kritikus sűrűséggel normálva használjuk:

$$\Omega_m \equiv \frac{\rho}{\rho_c}.$$

A kritikus sűrűséget az jelöli ki, hogy ennél nagyobb sűrűségekre (0 görbület és kozmológiai konstans mellett) az Univerzum végül összeesik, ennél nagyobb értékekre pedig a végtelenségig folyamatosan tágul.

Az első egyenletben még két tagról nem szölgünk:  $\Lambda$  az egyelőre titokzatos sötét energiát, vagy kozmológiai konstans írja le,  $k$  pedig az euklideszitől esetlegesen

eltérő tér görbületét. A mérések eddigi tanúsága szerint a tér lapos, tehát ez utóbbi faktor kiesik az egyenletből. Mint ahogyan az anyagsűrűségnél tettük, hasonlóan normált, dimenziótlan változókra térhetünk át a kozmológiai konstans és a görbület esetében is. Így a tágulást kifejező egyenletből az alábbi formát kaphatjuk:

$$1 = \Omega_0 = \Omega_b + \Omega_d + \Omega_r + \Omega_\Lambda + \Omega_b.$$

Ez egyfajta mérlegegyenlet, amely a különböző összetevők arányát írja le. Jelenlegi legjobb tudásunk szerint az Univerzum euklideszi, vagyis  $\Omega_b$ , valamint a sugárzás (fotonok) járuléka jelenleg csekély, tehát  $\Omega_r$  is 0. Csupán egy évtizede gyűlnek az egyre biztosabb jelek, hogy a kozmológiai konstans értéke nem nulla, sőt elég jelentős  $\Omega_\Lambda = 0,74$ , de, sajnos a sötét energiáról ennél több információ nem igen áll rendelkezésünkre. A fennmaradó 0,26-on osztozik a sötét és „világító” anyag. Ebből is jelentős hányad ( $\Omega_d = 0,22$ ) a sötét anyagra esik, amelynek természetéről szintén keveset tudunk, annyi bizonyos, hogy csak gravitációs hatását tapasztaltuk eddig. A teljes mérlegből csekély 4% marad a minket és bolygónkat alkotó, valamint főként a csillagokban és szabad hidrogén- és héliumgáz formájában jelen lévő barionikus anyagra ( $\Omega_b = 0,04$ ).

A második egyenletben  $p$  a nyomást jelöli. Attól függően, hogy az Univerzum különböző korszakokban milyen anyagféleség dominálta a világot, a sűrűség és a nyomás között különböző relációk álltak fenn. Ezek a különböző állapotegyenletek persze más és más tágulási történeteket eredményeznek. Nézzük meg a tiszta egykomponensű eseteket.

Kezdetben, amikor a vákuum energiája dominálta az Univerzumot, az állapotegyenletbe a

$$p = -\rho$$

alakot beírva exponenciálisan gyorsuló felfűvődést kapunk:

$$a(t) \sim \exp(Ht).$$

Később a forró plazma állapotban a fotonok játszották a főszerepet. Tiszta fotongázra

$$p = \rho/3,$$

ami az idő négyzetgyökével arányos, jelentősen lassabb tágulást eredményez:

$$a(t) \sim t^{1/2}.$$

Végül jelenlegi, ritka anyag dominálta Univerzumunkban a nyomás zérus,

$$p = 0,$$

amely összefüggés, a gravitáció hatását figyelembe véve, egy más kitevőjű hatvánnyal való tágulást eredményez:

$$a(t) \sim t^{2/3}.$$

Itt jegyezzük meg, hogy a kozmológiai konstans nullától különböző értékének alig egy évtizede történt kísérleti megalapozása óta számosan úgy kalkulálnak,

hogy a gyorsulva táguló Világegyetemben az anyag dominanciája ismét a vákuumnak adhatja át a stafétabotot, mintegy széttépve ezzel a Mindenséget.

A fenti egyenletek persze csak nagy vonalakban adják meg a fejlődést, számos részletet kell még hozzátenni, hogy a kép kisebb skálákon is teljes legyen, és a struktúrák kialakulását részletesen megérthessük. Ilyenek a nukleoszintézis, a csillag- és galaxiskeletkezés szabályai, vagy például a szupernóva-robbanások lökéshullámainak hatása. Noha nagy utat kell még megtenni, de eme jelenségek körök részletei szinte napról napra tisztulnak, és egyre nyilvánvalóbb, hogy a teljes megértéshez sokkal komplexebb képet kell kialakítani.

## A szerkezet leírása

Az Univerzum nagy léptékű (galaxisok, galaxisok mérete fölötti) szerkezetét statisztikai módszerekkel írjuk le. Ehhez az anyagsűrűségnek az átlagostól ( $\bar{\rho}$ ) való eltérését, azaz fluktuációit vizsgáljuk:

$$\delta_{\bar{x}} = \frac{\rho(\mathbf{x}) - \bar{\rho}}{\bar{\rho}},$$

A fluktuációknak vizsgálhatjuk a korrelációit, például a leggyakrabban használt kétpont-korrelációs függvény segítségével:

$$\xi(r) = \langle \delta_{\mathbf{x}} \delta_{\mathbf{x}+\mathbf{r}} \rangle.$$

A korrelációs függvény azt méri, hogy a tér két,  $r$  távolságban levő pontja belső relatív sűrűség-eltérése mennyire hasonlít egymáshoz. Ha nincsenek korrelációk, akkor ez a függvény lapos, ha pedig, például, valamilyen karakterisztikus méret fordul elő, akkor az annak megfelelő értékeknél csúcsokat kapunk. Matematikailag ezzel ekvivalens, ha a korrelációs függvény Fourier-transzformáltját, a teljesítménysűrűség-spektrumot vesszük:

$$P(k) = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\infty dr \xi(r) \frac{\sin(kr)}{kr}.$$

Noha matematikailag ekvivalensek, technikai okok miatt, valamint azért hogy a mérési hibákat korrekten kezelhessük, a méréstől függően egyik vagy másik statisztika használata célszerűbb.

Mivel a Friedman-egyenletek a kisebb skálák nemlineáris jelenségeit nem írják le, az általánosan elfogadott nézet szerint azokat leginkább a csak gravitációsan kölcsönható sötét anyag evolúciójának kiszámítására használhatjuk fel. A galaxisok „világító” anyagának eloszlása nem követi pontosan ezt az eloszlást, hanem a sötét anyag által kialakított gravitációs völgyek legmélyén gyűlnek csak be. Ez az úgynevezett „biasing” jelenség, amelyet a legegyszerűbb, lineáris esetben egyetlen  $b$  faktoralal jellemezhetünk:

$$\left( \frac{\delta \rho}{\rho} \right)_{\text{galaxisok}} = b \left( \frac{\delta \rho}{\rho} \right)_{\text{sötét anyag}}.$$

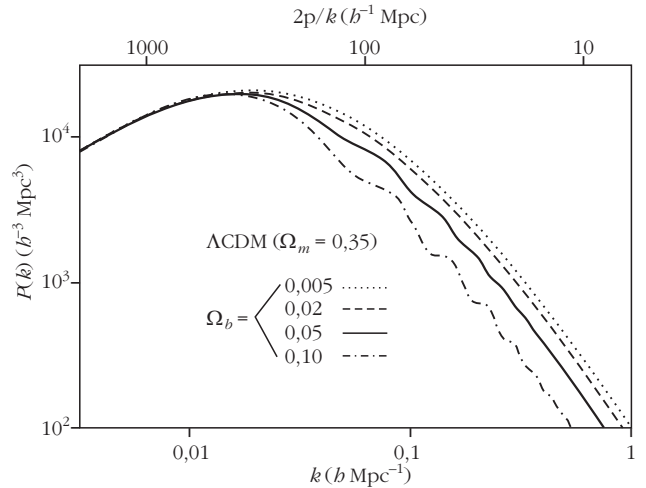
Nézzük meg konkrétan, hogyan néz ki a teljesítménysűrűség-spektrum a hullámszám (illetve a felső skálán a hullámhossz) függvényében (2. ábra).

A hullámszám 1/hosszúság mértékegységű, a hosszúságot megaparsecban (Mpc) mérjük, ahol 1 parsec = 3,26 fényév vagy nagyjából  $3 \cdot 10^6$  méter. A mértékegység előtt lévő  $b$  faktor a Hubble-állandó dimenziótlan, normált változata ( $H = b \cdot [100 \text{ km/s/Mpc}]$ ), és azért szokott szerepelni a kifejezésekben és ábrákon, mivel pontos értéke, (az eddigi mérések alapján 0,72) sokáig bizonytalan volt, de tőle függően minden méret átskálázódik.

Mit is látunk az ábrán? Az egyes görbék egy olyan sík Univerzum spektrumát ábrázolják, ahol a sötét és barionikus anyag ( $\Omega_m$ ) együttes aránya 0,35, és ebből a görbéken felülről lefelé haladva rendre 0,005, 0,02, 0,05, illetve 0,1 a barionikus anyag mennyisége. Láthatjuk hogy az arány változtatásával más görbéket kapunk. A jelenlegi kozmológiai vizsgálatok éppen erről szólnak: számoljuk ki az Univerzum modelljeit különböző paraméterekkel, és rajzoljuk fel valamilyen mérhető mennyiség vagy statisztika, mint például a fent mutatott sűrűségfluktuáció-spektrum görbéjét. Végezzünk méréseket, és vessük össze, hogy mely modell, milyen paraméterek mellett illeszkedik legjobban az észlelésekhez. Így egyre nagyobb statisztikával, egyre több irányú és pontosabb mérésekkel, egyre jobban rögzíthetjük modellünket és paramétereit. Pár éve ez még csak álom volt, de a jelenlegi nagy skálás mérések a nem olyan régen még szinte csak filozofikus kérdéseket tárgyaló kozmológiát precíziós kísérleti tudományá alakították.

## Nagyszabású szimulációk

Ahhoz tehát, hogy feltárjuk a kozmológiai struktúra-képződés részleteit, lehetőleg az ég minél nagyobb területéről, minél több adatot kell begyűjteni. Szerencsénkre a fotonok sebessége véges, így nem csupán az Univerzum jelenét, hanem a múltját is direkt módon tanulmányozhatjuk, hiszen vannak olyan fotonok, amelyek már milliárd évekkel ezelőtt indultak el útjukra, de csak most érnek detektorainkhoz. Ha elég érzékeny műszerrel tekintünk az égre, akkor optikai és ahhoz közeli tartományokban visszatekinthetünk egészen addig a korszakig, amikor az Univerzum csupán pár százmillió éves volt. Itt, mint ahogy az 1. ábrán láthatjuk, elérjük a reionizáció előtti „sötétség korát”, amikor is az összefüggő neutrális hidrogénfelhő nem engedi át a fényt. A hidrogéngázzal az iskolában azt tanuljuk ugyan, hogy színtelen, átlátszó gáz, de jól ismert, hogy az ultraibolya-tartományban lévő fotonokat elnyeli (gerjesztési és ionizációs vonalak). Mivel a fény vöröselölődést szenved miközben felénk tart, ezek az elnyelési vonalak végigvonulnak a teljes látható színekben, és mindent nullával tesznek egyenlővé. Sokkal távolabba egyébként se látnánk, ez a kor azért is sötét, mert nincs amit láthatnánk. Ugyanis nem túl sokkal a reionizáció előtt gyulladtak



2. ábra. A kozmikus sűrűségfluktuációk teljesítménysűrűség-spektrumának elméleti görbéi

be az első csillagok és esetleg aktív galaxismagok (létrehozván magát a reionizációt is), amelyek egyáltalán fényt bocsátanak ki.

Szerencsénkre azonban van még egy csecsemőkori képünk is az Univerzumból, abból az időből, amikor nagyjából 380 ezer éves volt. Ennek megértéséhez ismét a történelmi bevezetőre és az 1. ábrára utalunk vissza. Amikor a korai Univerzum forró plazmája a tágulás során egyre hűlt, elérkezett az a pillanat, amikor a fotonok szabad úthossza végtelenre nőtt. Az akkori, néhány ezer fokos plazmauniverzum hőmérsékleti sugárzásának fotonjai tehát attól kezdve repülnek felénk, de mivel a tér azóta jelentősen kitágult, ezek a fotonok annyira megnyúltak, hogy átkerültek a mikrohullámú tartományba, és mintegy 2,7 kelvin a karakterisztikus hőmérsékletük. A plazmakorszak szimulációja viszonylag egyszerű, a kezdeti, véletlenszerű kvantumfluktuációkat kell a tágulás során nyomon követni, és hozzákombinálni azokat az akusztikus sűrűsödési hullámokat, amelyeket a forró plazma rezgése keltett. Természetesen, ha más például a barionikus és sötét anyag aránya, akkor hasonlóan ahhoz, mint ahogy a különböző fémekből öntött harangok más és más hangszínen csengenek, az Univerzum „szférájának zenéje”, vagyis a fluktuációspektrum is más és más lesz. Wayne Hunak a Chicagói Egyetemen lévő weboldalán (<http://background.uchicago.edu/~whu/metaanim.html>) például különböző animációkat láthatunk arra vonatkozóan, hogy miként változik a fluktuációk spektruma, ha változtatjuk a barionikus anyag arányát vagy a többi kozmológiai paramétert. A 2. ábra ilyen jellegű görbék közül mutat néhányat.

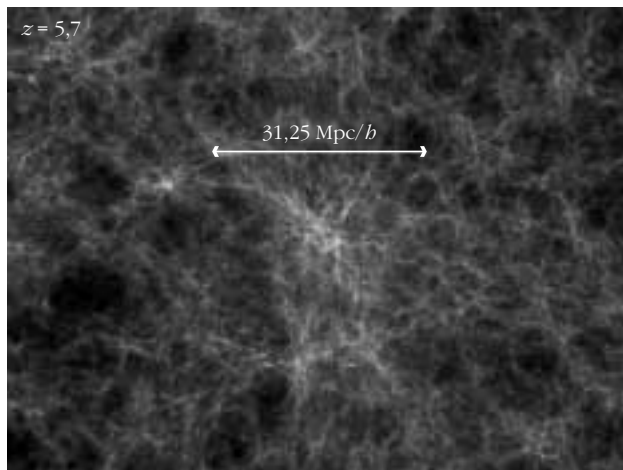
Valamivel komplikáltabb az anyag csomósodásának végigkövetése, melyet a végtelen hatótávolságú gravitáció hatása hoz létre. Egy ilyen N-test szimulációban az anyagnak kis darabjait, „részcskéit” vesszük és számoljuk ki mozgásukat a többi részecske gravitációs terében. Ha nagy skálán nagyjából homogén az anyag eloszlása, akkor egy adott ponttól  $R$  távolságra lévő gömbhéjban foglalt anyag összes tömege  $R^2$ -tel arányos. Mivel a gravitációs erő éppen  $1/R^2$ -tel cseng le, a közeli és távoli pontoknak a hatá-

sa azonos nagyságrendű, így a mozgásegyenletek kiszámolásakor minden pont minden másik ponttal való kölcsönhatását figyelni kell, azaz  $N$  részecske esetében  $N \times N$  számítást kell elvégezni minden időlépésben. Ahhoz hogy a szimuláció kellően pontos legyen, a Virgo Consortium néven ismert nemzetközi kutatócsoport Millennium Projektje (<http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/>) például 10 milliárd „részecske” pályáját követte egy 2 milliárd fényév oldalhosszúságú kockában, több mint 10 milliárd éven át. Nem csoda, hogy a szimuláció még számos numerikus programozási trükk felhasználásával is 30 napig futott 1500 processzoron, és több mint 25 terabájtnyi adatot eredményezett (3. ábra). A szimuláció igazából a sötét anyag viselkedését követte, és a méretfelbontás alsó határa a galaxis-halmazok tartományába esik.

Lehet, hogy csupán azért, mert keveset tudunk róla, a sötét anyag viselkedését egyszerűbbnek gondoljuk, mivel csak gravitációsan hat kölcsön. A sötét anyag szimuláció által így kialakított gravitációs völgyek legmélyebb részein gondoljuk, hogy a hidrogéngáz annyira összesűrűsödhetett, hogy begyulladhattak a csillagok, kialakulhattak a galaxisok. A galaxiskeletkezés pontos mikéntjének megértése még időbe telik, hiszen olyan komplex jelenségek tartóztatják, mint a csillagokban lejároló magfizikai folyamatok, a szupernóva-robbanások lökéshullámaival szétszórt nehéz elemek turbulens keveredése, vagy például a galaxisok aktív magjában lévő fekete lyukakba áramló anyag dinamikája.

## Kozmikus távolságok

Mielőtt rátérünk a kozmikus struktúra észlelésének két kísérleti pillérére, hadd szóljunk röviden a harmadikról, amely közvetve ugyan nem a struktúrát vizsgálja, de azal, hogy a kozmikus távolságskálát kalibrálja, a másik két vizsgálat eredményeit is nagyban befolyásolja. Az égi hosszúsági és szélességi koordinátákat ugyanis nagyon könnyen mérhetjük, viszont egy galaxisnak tőlünk vett távolságáról nehéz információhoz jutni. Nincs is igazán más módszer rá, mint egyre nagyobb skálákon használható módszerek összeillesztésével egy úgynevezett távolságlétrát bekalibrálni. A kalibráció első lépcsőfoka a parallaxis. A közeli csillagok ugyanis olyan távolságokon vannak, amelyek gondos vizsgálatokkal összemérhetőek a földpálya átmérőjével. Ha ugyanis ugyanarra a csillagra a Föld Nap körüli pályájának két átellenes pontjáról nézünk rá, akkor egy nagy egyenlő szárú háromszöget feszítünk ki, melynek alapja a földpálya átmérője. A háromszög magassága az alaphoz képest nagyon nagy, s így a vele szembe levő szög nagyon kicsi. Ha távcsövünkkel azért le tudjuk mérni ezt a kicsi szögeltérést, akkor ki tudjuk számítani a csillag távolságát. Sajnos ez csak a legközelebbi csillagokra működik, viszont közöttük vannak érdekes változó csillagok, a cefeidák, amelyek fényének változási periódusa kapcsolatban áll abszolút fényességükkel. Ha így abszolút fényességüket bekalibráltuk, nyert



3. ábra. A sötét anyag eloszlása a Millennium-szimuláció egy „pillanatfelvételén” (<http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/>)

ügyünk van, hiszen a fényintenzitás  $1/\text{távolság}^2$ -es csökkenése alapján tetszőleges helyen meg tudjuk határozni távolságukat. Persze, praktikusán nem tetszőleges távolságban, hiszen egy adott távolságon túl már túl halványak távcsöveink számára. A cefeidák távoli rokonai a szupernóvák, különösen az Ia típusúak szintén standard gyertyaként használhatók, még nagyobb távolságokon is, hiszen robbanásukkor fényük akár egy galaxis milliárd csillagát is képes túlragyogni. Segítségükkel tehát kiléphetünk a galaktikus skálákra. Sajnos egy-egy galaxisban átlagosan csak 100 évente látunk ilyen felvillanást, a nagyon távoliakban pedig nem igazán észlelhetőek, így mindegyik galaxist nem tudjuk ily módon bekalibrálni. A szupernóvák észlelése és a távolságskála rögzítése a kozmológiai modell tisztázása szempontjából nagyon kritikus, ezért számos felmérést indítottak a közelmúltban, hogy minél több és minél távolabbi galaxisra szerezzünk be adatokat. A kérdés fontossága persze mindig vonzza a kritikus hangokat is, hiszen ha az adatokat rosszul kalibráljuk, például a galaktikus por miatt, vagy nem megbízhatóak a szupernóvamodelljeink, akkor a jelenlegi kozmológiai modellek érvényessége kétségbe vonható. A vitákat itt is, reméljük mihamarabb, az adatok gyarapodása fogja eldönteni.

Ha elfogadjuk a Hubble-törvényt, és a cefeidák valamint a szupernóvák segítségével bekalibráljuk, akkor nagyobb skálákon a vöröseltolódás szolgálhat a távolság analógiájának. A vöröseltolódás a galaxisok látszó radiális távolodásának eredménye, és a spektrumvonalak vörös tartomány felé eltolódásában jelentkezik. Ennek pontos méréséhez spektrumokat kell felvenni, ami nagyon időigényes mérés. A majd később tárgyalt SDSS például észlelési idejének 80%-ban a maradék 20%-ban lefényképezett galaxisok csupán 1%-ának tudja a vöröseltolódását megmérni. Számos nemzetközi csoporttal együtt kollégáimmal és diákjaimmal sokat dolgoztunk azon a kérdésen, hogy pusztán a fényképekből nyerhető fotometriai információ alapján hogyan lehet a vöröseltolódást minél pontosabban megbecsülni.

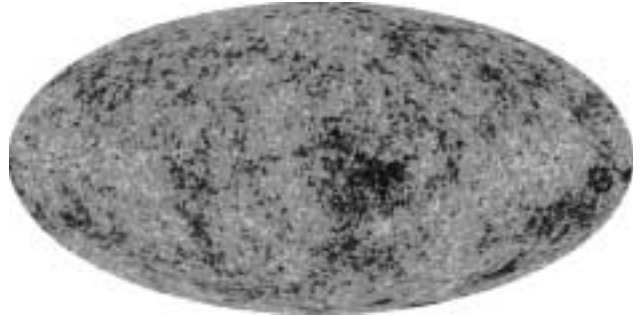


## Nagyszabású észlelések

A kozmikus távolságokról szóló kitérő előtt említett, különböző korokat leíró szimulációkat kell tehát összevetnünk az észlelésekkel, hogy modelljeink helyességéről meggyőződjhessünk, illetve azok paramétereit meghatározhassuk. Az észleléseknek hasonlóan nagy skálát kell átfogniuk, és persze még nagyobb anyagi és időbeli ráfordítást igényelnek a kutatóktól, mint a szimulációk. Szerencsére a mikroelektronika és a technológia fejlődése lehetővé tette, hogy az elmúlt évtizedben számos nagyszabású felmérés végrehajtására alkalmas eszközt hozzanak létre a kutatók. Az egyik felmérés, amely egyik sarokköve a modern kísérleti kozmológiának, a kozmikus háttérsugárzás detektálására alkotott COBE és WMAP műholdakon nyugszik. Magának a kozmikus mikrohullámú háttérnek felfedezéséért *Arno A. Penzias* és *Robert W. Wilson* 1978-ban kaptak Nobel-díjat. *John C. Mather* és *George F. Smoot* pedig 2006-ban azért kapták meg ezen elismerést, mert a fenti műszerekkel ki tudták mutatni a kozmológiai modellek által előrejelzett  $10^{-5}$  nagyságrendű fluktuációkat a homogén háttérhez képest. Ez nem volt könnyű dolog, hiszen a fent említett nagyságrend szemléletesen azt jelenti, hogy ha a sűrűségfluktuációkat kidomborodásoknak tekintenénk egy gömb felszínén, akkor egy biliárdgolyó tükörfényes felszínén kell tizedmikronnál kisebb egyenetlenségeket feltérképezni, és korrelációit meghatározni. A földi atmoszféra és rádiózavarok elkerülése érdekében műholdról zajlottak a mérések, és az égen végigpásztázva két-két pont hőmérsékletkülönbségét mérték. A kapott eredményeket még korrigálni kellett a galaxis és ismert extragalaktikus források zavaró hatásainak kiküszöbölésére, de végül 1992-ben elkészült a COBE nagyjából 7 fok felbontású, majd 2003-tól egyre több adattal a WMAP pár tized fok felbontású térképe (4. ábra).

Természetesen nem a konkrét térképet lehet összevetni a szimulációkkal, hiszen ennek pontos képét nagyban befolyásolja a kezdeti véletlen fluktuációk elrendeződése, hanem a fent már említett korrelációs függvényeket vagy fluktuációs spektrumokat kell összevetni. Mivel egy gömb felületét látjuk, célszerű a gömb-függvények szerint kifejezni a fluktuációkat, kezdve a lassan változó hosszú hullámúaktól a nagyobb frekvenciás rövid hullámúakig. Az észleléseknél minden skálán ki tudjuk számolni a zajból és a műszer tökéletlenségéből adódó hibákat is.

Az 5. ábráról leolvashatjuk, hogy a becült mérési hibák rendkívül kicsik, és a legjobb illeszkedő modell jóslatát szinte minden skálán nagyon jól követi. Megjegyezzük, hogy a legnagyobb szögskálákhoz tartozó egyetlen kilógó pont szignifikanciája nagy vihart kavart. Vannak, akik nagy jelentőséget tulajdonítanak ennek, illetve a különböző multipól módusok fázisai egybeesésének, és a modellek alaposabb revízióját javasolják. A többség inkább kívárja, amíg a hamarosan üzembe állítandó, még precízebb Planck műhold több adatot gyűjt be. Mindenesetre az ábrán jól látszik, hogy a modellek által jóslott úgynevezett

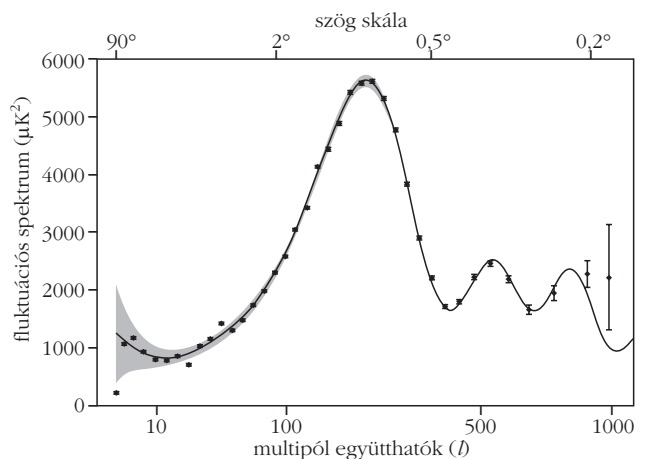


4. ábra. A WMAP műhold által készített kép az éggömbön látható hőmérsékletfluktuációkról. (<http://map.gsfc.nasa.gov/>)

akusztikus csúcsok létét a mérések kiválóan igazolják, és a mérési pontosság határain belül az első két csúcs pontosan illeszthető, szűk határok közé szorítva bizonyos kozmológiai paraméterek értékeit.

Láttuk tehát az Univerzum csecsemőkori képét. Ha modelljeink jók, akkor azt is pontosan vissza kell adniuk, hogy az „ifjú”, majd a mai Univerzum hogyan néz ki. Ehhez a galaxisok nagy léptékű eloszlását kell megvizsgálni minél nagyobb vöröseltolódás-tartományban. Az ég felületén nagy tartomány azért kell, hogy a fluktuációs spektrumnak minél nagyobb részéhez illeszthessük modelljeinket, a mélyebb vöröseltolódások pedig az említett Hubble-törvény értelmében nagyobb távolságokat jelentenek, ahonnan a fény hosszú idő alatt ér ide, vagyis távolabbi galaxisokat észlelve az időskálát tágíthatjuk. Persze, ez a két követelmény kompromisszumokra kényszeríti az észlelő csillagászokat. Ha felnézünk az égre, a népdalok tanúsága szerint ragyognak a csillagok. Őszintebben fogalmazva inkább pislákolnak, a galaxisok pedig még szerényebben küldenek felénk néha-néha egy pár kóbor fotont. Az észlelési idő (nem is beszélve a pályázatok és doktori terminusok idejéről) viszont véges, és ha műszerünk adott számú foton észlelésére képes, akkor választhatunk, hogy egy kis területről készítsünk mélyebb felvételt, vagy pedig a teljes égboltról egy sekélyebbet. Annak következtében, hogy

5. ábra. A mikrohullámú háttérsugárzás fluktuáció spektruma a szögskála függvényében. A pontok körüli függőleges szakaszok a mérési hibát, a beszínezett sáv pedig a modell bizonytalanságát jelzi. (<http://map.gsfc.nasa.gov/>)



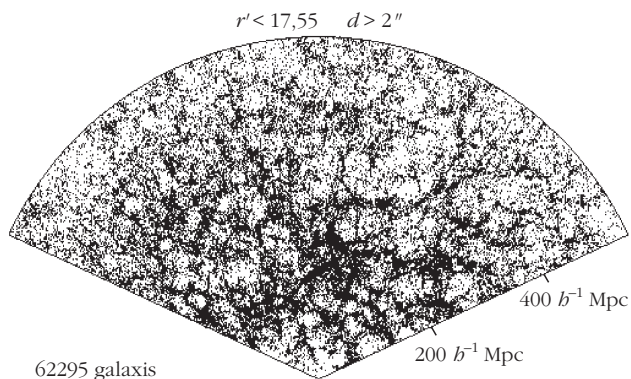


6. ábra. Az SDSS CCD-kamerája, háttérben tervezőjével, Jim Gunnal. A kis négyzetek különálló CCD-chipek, a rájuk szerelt színszűrőkkel. (<http://www.sdss.org>)

a csillagászok az eddig használt fotolemezekről a 90-es évek közepétől kezdtek áttérni a CCD-eszközökre, a vizsgálható térfogat szerencsére fokozatosan kitágul. Az újfajta nagy skálás és viszonylag mély felmérések prototípusa a Sloan Digital Sky Survey (SDSS, <http://www.sdss.org>, illetve magyarul <http://skyserver.elte.hu>). Ezen a projekten a cikk egyik szerzője és diákjai (*Győry Zsuzsanna, Purger Norbert, Dobos László*) jó ideje dolgoznak, de számos más magyar kutató, mint a tervezésben és adatfeldolgozásban kulcsszerepet játszó *Szalay Sándor* és volt diákjai (*Budavári Tamás, Szokoly Gyula, Szapudi István*) is hozzájárultak sikeréhez.

Az SDSS távcsöve egy földi távcső, 2,5 méteres tükrőátmérőjével a jelenlegi távcsövek középmezőnyétől is lemarad. Különlegessége abban áll, hogy működését több éven át teljes mértékben erre a projektre koncentrálták, és két, a maga nemében és idejében egyedülálló műszer helyezhető különlegesen nagy látószögű torzítatlan fókuszsíkjaiba. Az egyik műszer, egy összesen 120 megapixeles kamera (6. ábra), amely az optikai tartomány 5 sávjában készít felvételeket az égboltról. Tervezésekor, illetve gyártásakor a 90-es évek végén ez az egy távcső tartalmazta az összes csillagászati CCD-pixelék nagyobbik hányadát. Ha arra még kell is egyikét évet várni, hogy mindannyiunk mobiltelefonjának kamerája elérje ezt a felbontást, azért ma már számos hasonló kaliberű csillagászati kamera áll rendelkezésre, és hamarosan üzembe áll a Pan-Starrs projekt 1,4 gigapixeles kamerája, amely az SDSS 5 éves munkáját alig egy hét alatt lesz képes elvégezni.

Érdekességként jegyezzük meg, hogy a távcső, részben azért, hogy a követő mechanikával spórolhassanak, részben pedig azért, hogy a CCD-k kiolvasási holtidejétől megszabaduljanak, úgynevezett „drift scan” üzemmódban dolgozik. Ez azt jelenti, hogy miközben a Föld forgása következtében az ég egy szelete végigpásztázza az érzékelőt, ugyanebben az ütemben léptetik a CCD-ből kifelé az adatokat. Így egy pontszerű forrás képe egy CCD-oszlopon végighaladva integrálódik ki, kiátlagolva az egyes pixelek különbségéből adódó esetleges hibákat is, és megtakarítva a kiolvasási holt-

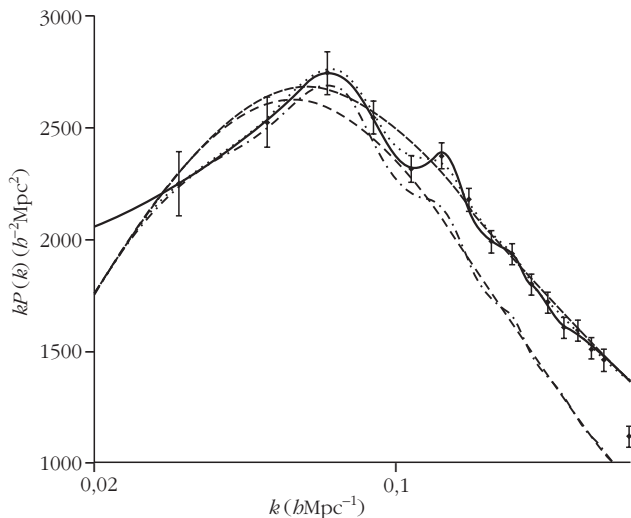


7. ábra. Az SDSS által felvett 3 dimenziós térkép egy szelete. Minden kis pont egy-egy galaxis térbeli elhelyezkedését jelöli.

időt. Persze, ha mozgó objektumokat (pl. aszteroida) fényképezünk, akkor, mivel a különböző színszűrők időben követik egymást, azok színes gyöngysorként jelennek meg a kombinált színes képeken.

A fotometria, vagyis a színes képek mellett a távcső színképeket, spektrumokat is vesz fel. Hagyományosan egy távcső egyszerre egy-két objektumról tudott csak spektrumot készíteni, és mivel a fényt a hullámhossz szerint szét kell szórni, nagyon sokáig kell exponálni, hogy a zajból jól kiemelkedő jelet kapjunk. Így olyan galaxis, amelyről teljes spektrum, így vöröseltolódás, és a Hubble-törvény révén távolságinformáció is rendelkezésre állt, az SDSS előtti időkben csupán pár ezer volt. Az SDSS távcsövébe egy speciális spektroszkóp került, amely a fókuszsíkba helyezett üvegszálak által elvezetve, egyszerre 640 színképet tudott felvenni. A fenti műszerek tették lehetővé, hogy az SDSS működésének nagyjából 5 éve alatt mintegy 150 millió galaxis és ugyanennyi csillag képét készítse el, és közülük közel 1 milliónak a spektrumát is felvegye. Az eredmény tehát egy több mint 1 milliószor 1 millió pixeles, 5 színben készült kép, és az objektumok nagyjából 1 százalékának 3 dimenziós pozíciója. Mindezen adatok nyilvánosak, sőt a több mint 3 terabájtnyi adat, mely hatékony kezelésének bonyolalmi külön kihívást jelentenek, magyarországi szerverről is elérhető.

Habár az 7. ábra nem tudja visszaadni a 3 dimenziót, egyből láthatjuk, hogy a galaxisok eloszlása nem homogén, sőt, örömmel fedezhetjük fel, hogy a hálószerű szövedék struktúrája hasonló a Millennium-szimulációban kapott eloszlásokhoz. A kozmikus mikrohullámú háttér csekély  $10^{-5}$ -es fluktuációit a gravitáció vonzó hatása galaxishalmaz méretű skálákon kétszeres relatív sűrűségeltérésekké növelte, amelyet a korábban említett *bias* tovább növel. Természetesen nem csak szemünkre kell hagyatkozni, amikor a galaxiseloszlást össze akarjuk hasonlítani a modellekkel. Erre is kiszámolható a fluktuációspektrum, hasonlóan, mint ahogy a kozmikus mikrohullámú háttér esetében tettük. A két spektrumnak nem direkt módon kell illeszkedni, hiszen az Univerzum más korszakáról készültek a felvételek, de az akusztikus csúcsok jelenlétére itt is számítunk, illetve az illesztett modellparamétereknek az ott kapottakkal konzisztensnek kell lenniük.



8. ábra. Az SDSS fényes elliptikus galaxisainak térbeli eloszlásából származó fluktuációs spektrum és a rá illesztett különböző modellek. (Eisenstein et al., *Astrophys. J.* 633 (2005) 560–574.)

Az úgynevezett fényes elliptikus galaxisok a sötét anyag völgyekben összegyűlő galaxishalmazok központi objektumai, ezért viszonylag jó nyomjelzői a sötét anyag eloszlásának. Mivel fényesek, elég nagy távolságban is detektálni tudjuk őket, így kiválóan alkalmasak arra, hogy eloszlásukat összevessük a sötét anyag szimulációkból kapottakkal. A 8. ábrán az ilyen galaxisok térbeli eloszlásának sűrűségfluktuáció spektruma látható. Valóban felismerhetőek a hanghullámok nyomai, sőt, a legjobban illő modell paraméterei összhangban vannak a WMAP-észlelésekből kapott értékekkel. Ezen kulcsfontosságú kozmológiai eredmények mellett az SDSS „mellékterméként” még számos érdekes új eredményt hozott, kezdve az aszteroidák méret- és összetétel-eloszlásának

pontosabb meghatározásától a galaxisunk szerkezetének és dinamikájának feltérképezésén át a látható Univerzum határáról is felénk sugárzó gigantikus fekete lyukakig, melyek tanulmányozása a galaxisok korai fejlődését teljesen átírta.

## Összefoglalás

Láttuk, hogy az elmúlt évtizedben az extragalaktikus csillagászatban és kozmológiában forradalmi átalakulások játszódtak le. Egyre pontosabbak a kozmológiai paraméterek mért értékei, az Univerzum és a galaxisok fejlődésének történetét egyre részletesebben értjük, méréseinkhez jól illeszthetőek a modellek. A forradalmi változásokat elsősorban az észlelési lehetőségekben bekövetkezett technológiai ugrásnak, és az adatok feldolgozását, valamint a részletes szimulációkat lehetővé tevő informatikai fejlődésnek köszönhetjük. Ez a technológiai fejlődés, amennyire előre láthatunk, folytatódni fog. Számos nagyszabású terv van folyamatban, amelyek ha megvalósulnak, számos új műhold és gigantikus távcső fogja ontani az új mérési adatokat az elektromágneses tartomány minden részében, sőt, akár a gravitáció hullámait is észlelni tudjuk.

Persze szükségünk is van minél több adatra, hiszen ne feledkezzünk meg arról, hogy bár a modell körvonalai pontosan illeszkednek a mérésekhez, az energiamérleg nagy részét kitevő sötét energiáról és sötét anyagról vajmi keveset tudunk. Ahhoz, hogy a beáramló adatokat hatékonyan kezelni tudjuk, és ki tudjuk belőle hámozni a rejtélyek megoldását, sok-sok olyan lelkes jövődó kutatóra van még szükségünk, akik a hagyományos matematikai és szaktudományos ismeretek mellett fejlett informatikai tudással is fel vannak vértezve.

## SZÉL HOZOTT, SZÉL VISZ EL

A Naphoz hasonló csillagok keletkezését külső hatások indítják el?

Tóth L. Viktor

ELTE FFI Csillagászati Tanszék,  
MTA KTM Csillagászati Kutatóintézet

*Jelentős szerepe van-e a külső hatásoknak a kis tömegű csillagok keletkezésében a pre-protosztelláris felhőmagok kialakulásától kezdve? – Igen. Állnak-e még a Sas-köd Hubble-űrtávcső által híressé tett felhőoszlopai? – Igen.*

Kell-e nagyobb motiváció az indukált csillagkeletkezés vizsgálatához, mint az az 1970-es években körvonalazódott, és azóta széles körben elfogadott elmélet, miszerint a preszoláris csillagközi felhőben külső hatásra indult el a Nap és a Naprendszer kialakulása? Mintha csak a csillagok nevében szólna a költő:

„Köd előttem, köd mögöttem,  
Isten tudja, honnan jöttem.  
Szél hozott, szél visz el.  
Minek kérdjem, mért visz el?”

Szabó Lőrinc, 1923, *Szél hozott, szél visz el*

## A csillagközi anyag a Naprendszer közelében

A csillagok átmérőjéhez képest óriási távolságok vannak csillagok között. Egy csillagközi utazónak a (millió km-es) csillagátmérő 20 milliószorosát kell meg-