

Megfigyelhető kozmológia?

Csillagászati műszereink már Herschel korában sok, kozmológiai szempontból érdekes objektumot mutattak meg, ám ezen objektumok pusztá megismerése nem vezetett, nem vezethetett semmilyen kozmológiai világgéphez. A spektrográf, a fotográfia feltalálásával már felismerhető a távoli galaxisok vöröseltolódása, de az első számítások a Hubble-állandóra a mai érték mintegy tízszeresét szolgáltatták. A vöröseltolódás felismerése a megfigyelés érdeme, ami elvezetett egy egyszerű világgéphez, de ez a világgép („tűgöl az Univerzum”) még mindig nem kozmológia. Az ősrobbanás elméletének a téridő fejlődésének leírásához a teljes elméleti fizikai apparátus felvonultatása volt szükséges, a részecskefizikától az általános relativitáselméletig – a galaxisok, galaxishalmazok kialakulását pedig ismét elsősorban elméleti úton lehetett leírni, miközben leghamarabb a Hubble Mélyvizsgálat mutatott meg valamit abból, ahogyan a galaxisok fejlődését el kell képzelnünk.

A téveszöves megfigyelések eddigi történetében nem sokat láthattunk abból, ami az Egész titkát rejti. Azonban a mai obszervációs alapú kozmológiát bemutató cikkek gyakran azzal kezelnének, hogy a kozmológiai világgép kialakítása régebben jórészt az elméleti asztrofizikára hárult, mára azonban a megfigyelések oldalra is szigorú, progresszív tudományá vált. Három kérdést fogalmazhatunk meg tehát. Miért gondoljuk, hogy a megfigyelések fejlődése mára lehetővé teszi, hogy a megfigyelés az elmélettel egyenlő súllyal alkossa világmodellünket? Milyen új, eddig ismeretlen jelenségeket tudunk megfigyelni, milyen kozmológiai vonatkozása lehet ezeknek? Végül: miért gondoljuk, hogy az a valami, amit megfigyelünk, valóban a Világegyetem szerkezetével lehet kapcsolatban; és nem csupán olyan látszatjelenségeket látunk, amelyeket a megfigyelés bizonyos – szükségképpen szubjektív – elmélet megközelítése esetlegesen hibás szemléletünkől adódóan tényleg fel valószínűsnek?

E három kérdésből az első kettőre keressük a választ az alábbiakban. Különös aktualitást ad az áttekintésnek a 2002. évi fizikai Nobel-díj, amelyet a neutrínó-csillagászat és röntgen-csillagászat utóbbi évtizedekben elért eredményeiért ítéltek meg. A bemutatott anyag az SZTE Kísérleti Fizikai Tanszékén speciálkollégiumon hangzott el, hallgatói szeminárium formájában. Ez a cikk a szeminárium anyagának vázlatos bemutatása; a részletes szemináriumi dolgozat megtalálható a Szegedi Csillagvizsgáló honlapján (www.jate.u-szeged.hu/obs, ismeretterjesztés link alatt).

Az alábbiak elsősorban Bahcall *Az Univerzum nagyleptékű szerkezete*, Steinhart: *Kezdetben vala... és Ostriker *A kozmológia numerikus szimulációjának tanulságai* (men a Princeton Egyetemen elhangzott szemináriumára épülnek (az előadások anyaga megjelent: *Unsolved Problems in Astrophysics*, 1997, Princeton University Press, New Jersey, USA). Feltételezzük Mészáros Attila *Napjaink kozmológiája* (Meteor csillagászati évkönyv 2002, 203. o.) cikkének ismeretét. Mindezek után a legfontosabb, a harmadik kérdés megválaszolását az Olvasóra bizzuk.*

Amit biztosan tudunk

Nézzük meg, mik a mai világgépben a biztos pontok! Milyen bizonyosan „tisztán” kozmológiai jelenségeket tudunk megfigyelni? A világ megfigyelését egy adott elmélet keretein belül értelmezve, milyen állandók értékét tudjuk ésszerű határok közé szorítani?

Tiszán kozmológiai jelenség meglepően kevés látható. Tudjuk, hogy a világ a mai formájában bizonyosan tartalmaz atomokat, molekulákat, szabad elektronokat, neutrínókat és fotonokat, és sejtjük, hogy van benne nagy mennyiségű sötét anyag. Másrészt úgy látjuk, hogy a látható anyag teljes egészében lecsatolódtott a téridő tágulásáról, és nagy mennyiségű egyensúlyba jutott anyagcsomóban (gázfelhők, csillagok stb.) halmozódott fel. A csillagfejlődés modelljei megadják a legöregebb csillagok életkorát, ezen keresztül a Világegyetem minimális korát. Látjuk a vöröseltolódást és a mikrohullámú háttérsugárzást.

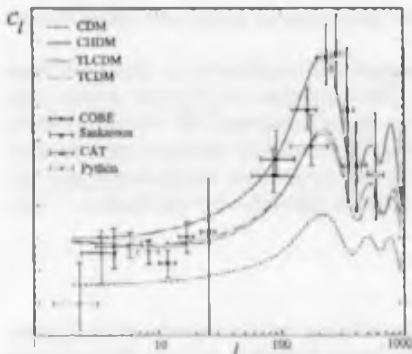
Az első megszorítás olyan kozmológiát ír elő, amelyben az anyag megfigyelhető módosulatai kialakulhattak. Ez a Hubble-állandó és az Univerzumban lévő anyag mennyisége közti teremt szigorú, fordított arányú összefüggést. A második a standard modellre épülő elméletek számára a sűrűségparaméter alsó korlátait szabja meg: túl ritka világegyetemben az anyag nem csomósodna, hanem a téridővel együtt tágulna, ezért a sűrűségparaméter legalább 0,2. A gravitációsense statisztikák szerint a kozmológiai állandó szükségképpen kisebb, mint 0,75. A vöröseltolódás mérésével a H értékét valószínűleg elég pontosan meg tudjuk határozni. Végül a kozmológiának olyannak kell lennie, hogy a mikrohullámú háttérsugárzásban megfigyelhető anizotrópiák a ma látható világgal fejlődjenek. Így a sűrűségparaméter 0,25 és 0,5 közé esik, $H >$ kb. 70 km/s/Mpc esetén nyíll, egyébként zárt téridőt adva.

A mikrohullámú háttér mérése

A COBE műhold mérései először mutattak olyan részletes térképet a háttérsugárzásról, amelyben bár nem túl jó felbontással, mégis analizálni lehet a háttérsugárzás anizotrópiáját. A további földi felmérések először foknyi felbontással működtek (Saskatoon, Python), majd 10 fperce körül pontosságot tudtak elérni (BOOMERANG, MAXIMA, DASI, stb.). A Planck szonda indításával a 10 fperces felbontást nagyszabású űrprogram keretében lehet kihasználni. Sajnos az ESA költségvetésének visszavágása miatt a Planck 2003 helyett csak 2007 elején indul útjára.

A kozmológiai elméletek szerint a háttérsugárzás keletkezésekor az anyag meglehetősen homogén és izotrop módon töltötte ki a teret, ám eloszlásában kismértékű perturbációk voltak. Később ezek a perturbációk fejlődtek az anyag ma megfigyelhető szerkezetévé: az anyag saját gravitációjának és termodinamikájának hatása alatt levált a tér tágulásáról, és önálló rendszereket: csillagokat, gázfelhőket alkot. A kozmológiai elméleteknek a mai Univerzumot úgy kell produkálnia, hogy a modellben a háttérsugárzás leválásakor egy homogén anyageloszlásban a mérésekkel összeegyeztethető (nem kisebb és nem nagyobb) perturbációk legyenek. F. felismerés: hármely elmélet paramétereit erős korlátok közé szorítja, az elméletek egy részével pedig összeegyeztethetetlen.

„Csinyán” fogalmazva: a háttérsugárzásban lévő perturbációk jellemzésére a háttérsugárzás látószög szerinti autokorrelációs függvényének hullámszám szerinti spektrumát (C -függvény) használjuk. Vagyis egészen egyszerűen, azt vizsgáljuk, hogy a háttérsugárzásban meglévő melegebb vagy hidegebb foltok mekkorák, meddig éreztetik hatásukat. A C -függvény vizsgálatánál két tartományt érdemes megkülönböztetni: a kis hullámszámok fölött a tapasztalat szerint konstans, utána körül gyorsan növekedni kezd. A 220-as hullámszám helyen C maximumát éri el, majd enyhén lecsengés után hullámozni kezd.



A háttérsugárzás modellezett (vonalak) és megfigyelt (szimbólumok) hullámszám-spektruma. A modellek: standard CDM, tömeges neutrínó (CHDM), kozmológiai állandó (TLCDM), tilt-elmélet (TCDM). A standard CDM-kozmológián kívül mindegyik számítás összeegyeztethető a megfigyelésekkel (Gross és mtsai., 1990, MNRAS 301, 81. alapján)

E viselkedés magyarázata hosszabb tárgyalást igényelne. A lényeg, hogy azt mondhatjuk, a kis hullámszámok értékeire valószínűleg az inflációt látjuk. A további tartományban, úgy véljük, a korai Univerzum gravitációs hullámait látjuk. A kozmológiai modellek numerikus szimulációinak tanulsága szerint az első csúcs helyzete erősen függ a sűrűségparaméter értékétől, míg jóval kevésbé függ a Hubble-állandótól. A görbe átlagos értéke pedig a kezdeti perturbációk nagyságát mutatja, ebből az anyag csomósodási hajlamára következtethetünk. Ha a korai Univerzum simábbnak mutatkozik, és ebből állt elő a mai inhomogén eloszlás, akkor az anyag csomósodási hajlama szükségképpen nagyobb volt.

Kozmikus távolságskálák

Az Univerzum megmérésekor azzal a nagyon nehezen áthidalható problémával állunk szemben, hogy egy teljesen relativisztikus rendszerben kell távolságokat mérnünk. A távolságméréshez koordináta-rendszert kell rögzítenünk a görbült tér-időben, vagyis pontosan meg kell mondani, hogy mi az idő, hogy távolságokat tudjunk mérni. Az idő definiálására elvben alkalmas a kozmikus háttérsugárzás hőmérsékletének változása, így látszólag megoldottuk a kérdést. Azonban ezt a *valódi távolságot* sem tudjuk megmérni, hiszen a látóirányunkba eső összes pontra lehetetlenség lokális idő-koordinátát definiálni.

Egyetlen dolgot tehetünk: kitalálunk néhány független módszert kozmikus távolságok mérésére, és pontosan megmondjuk, az Univerzum görbületét leíró mennyiségek segítségével kifejezve, hogy mikor milyen mennyiséget mérünk. A különböző módszerek különböző komponenseit mérik a görbületnek, így az eltérő módszerekből származtatott eltérő eredmények a görbület milyenségére vizsgálhatnak rá.

Jelenleg három egyszerű eljárásunk van: luminozitás-távolságok, átmérő-távolságok és voroseltolódások mérése. Az első két méréshez valamilyen kozmikus objektum luminozitására vagy méretére kell becslést adnunk, amit a látható megjelenéssel összehasonlítva egyfajta definíciószerű távolságot kapunk. A harmadik módszer elvileg előzetes feltevések nélkül, önmagában alkalmazható. A három módszer távolságát lokálisan lehet kalibrálni; nagy távolságokra azonban a három módszer így is elvileg három különböző távolságot ad. Ennek oka az, hogy az így definiált távolságok nem invariánsak, továbbá hogy a tér-idő görbült. Az, hogy manapság a sík Univerzum modelljei olyan sikeresek, valószínűleg nem utolsósorban annak eredménye,

hogy ha összehasonlítható módon szeretnénk távolságokat mérni, sík Univerzumot kell feltételeznünk.

Ha az Univerzum nem sík, a három távolságskála divergálni fog, a divergencia elvileg megadná a téridő görbületét. Újabbon toh független megfigyelés is utal arra, hogy a távolságskálaink divergálnak. Az Ia típusú szupernóvák vöröseltolódása alapján, ha valóban a luminositás-távolság és a vöröseltolódás divergenciáját mérjük, a nagyobb vöröseltolódású szupernóvák abszolút fényessége szisztematikusan nagyobbak tűnik. Ha ez a jelenség reális, ez kozmológiai állandót implikálna (l. Mézszáros Attila idézett cikkét).

A hiányzó barionos anyag

Lehet, hogy a közeljövőben független módszerrel meg tudjuk mérni a sűrűségparaméter értékét, mégpedig a Hubble-állandótól eléggé független módon. Ehhez távoli kvazárok szinképében kell statisztikus módszerekkel tanulmányoznunk a galaxisközi forró felhők abszorpciós vonalait, amely mérésekből a felhők fejlődésére következtethetünk. Így látjuk a gáz csomósodásának ütemét, amiből fontos kozmológiai jóslat következik.

Cen és Ostriker 1999-ben összegezte azon elméleti és gyakorlati vizsgálatok eredményét, amelyek egyre inkább arra utalnak, hogy a közelünkben jóval kevesebb barionos anyagot találunk, mint az az ősrobbanás-elméletből vagy a távoli kvazárok vizsgálatából következne. Azonban a közeli Univerzumban, annak csillagaiban, molekulafelhőiben és alapállapotú atomfelhőiben összesen jelen lévő tömegből az adódik, hogy a mai Világegyetem barionos anyagának legfeljebb a harmada van jelen a vizsgált, látható formában.

A hiányzó barion hollétére egyre inkább az a konszenzus alakul ki, hogy ez az anyag forró, millió K hőmérsékletű, galaxishalmazokhoz kapcsolódó gázfelhőkben található. Ez a felhő valószínűleg földúsult nehéz elemekben, amelyek abszorpcióját a röntgen-hullámhosszakon meg lehet figyelni – hasonlóan a kvazárok jól ismert Lyman-alfa erdejéhez. Így a távoli kvazárok szinképére vetülő felhők oszlopsűrűsége, illetve annak fejlődése a vöröseltolódással nyomon követhető. Végül az Univerzum csomósodását fogjuk látni, amely elvezet a sűrűségparaméter meghatározásához is. A kívánt mérésekhez a Chandra teljesítménye még épp elégtelen, a közeljövőben induló Constellation-X misszió egyik fő feladata azonban épp e jelenség megfigyelése lehet.

A különböző modellek vizsgálata szerint három fő tanulságot tehetünk. A röntgen-abszorpciós vonalak eloszlása erősen modellfüggő. Ennek oka, hogy a standard CDM modellben a halmazok nemrég alakultak ki. A többi modellben a lassabb fejlődés miatt több távoli vonalat látunk. Ugyanilyen okból a felhők hőmérséklete is erősen modellfüggő módon fejlődik. A módszer továbbá nagyon érzékeny a sűrűségparaméterre, mégpedig a felhők össz-sűrűségén és sűrűsödési hajlamán keresztül.

A gyakorlatban nincs másra szükség, mint számos kvazár spektrumában megnéznük egy adott elem abszorpciós vonalainak eloszlását, a vonalak erőssége és vöröseltolódása szerint. A különböző kozmológiai jóslatok alapján, amelyek a fenti levezetéssel megjósolják ezeket az eloszlásokat, eldönthető, hogy összeegyeztethető-e a megfigyelésekkel a kozmológiai modell, amit a vonalak modellezésére használtunk.

Numerikus szimulációk

Az anyag fejlődését korábban a CDM, „cold dark matter” modell alapján vizsgálták. E modellben a kezdeti perturbációk skálafüggetlenek, az Univerzumban csak nemrelativisztikus anyag van (hideg), nincs benne fény (sötét). A modell bemenő paramétereit a kozmikus háttérsugárzás perturbációinak skálahossza, amplitúdója, a sűrűségparaméter és a Hubble-állandó. Kimenetként a mai Univerzumot kell kapnunk.

A szimulációk szerint a CDM majdnem biztosan rosszul írja le a világunkat. CDM modellekben az anyag túl gyorsan csomósodik, így – visszafelé gondolkodva – a háttérsugárzás perturbációi a megfigyelteknél jóval kisebbek lennének. Jól előállítható viszont a háttérsugárzásból a jelenlegi Univerzum még egy szabad paraméter bevezetésével, amely az anyag csomósodását fékezi. A két legsikeresebb módosított CDM elmélet a kozmológiai állandó és a tömeges neutrínó bevezetése.

A neutrínó tömege

A neutrínóról kialakult klasszikus kép nem zárja ki, hogy a neutrínónak tömege legyen. Amiután a megfigyelések szerint sokáig csak felülről tudták becsülni a neutrínó tömegét, általában tömeg nélküli részecskének tekintettük.

A neutrínó kozmológiai szempontból nulla vagy nem-nulla nyugalmi tömegű relativisztikus fermion, amely különösebb csomósodás nélkül tölti ki a téridőt – illetve sűrűségük lassan fogy a neutrínó antineutrínó \rightarrow elektron pozitron párkeltés miatt. Miután homogen eloszlású gravitációt ad, a tömeges neutrínók fékezik az anyag csomósodását. A neutrínó tömegének felső becslésére jó kozmológiai módszer a csomósodás figyelemmel követése. Crott, Hu és Davé távoll kvazárok Lyman-alfa erdejéből, annak fejlődéséből a kvazárok körül kialakuló abszorpciós felhők csomósodására következtetett. Ezt összevetve a háttérsugárzással és a jelenlegi Univerzummal, felső korlát adható a neutrínó tömegére: léteznek olyan tömeg-konfigurációk, amelyben az Univerzum már nem csomósodna a mai állapotára, szélsőséges esetben a tér tágulásáról sem válik le az anyag. Eredményeik szerint az összes fajta neutrínó átlagos tömege (módosított CDM modellben) legfeljebb 5,5 eV.

A legújabb kutatások fényében azonban úgy tűnik, létezik a neutrínó oszcilláció jelensége – ez esetben legalább az egyik neutrínónak lenne tömege. Az oszcillációt a légköri neutrínófluxusból is ki lehet mutatni (szisztematikusan jóval több müon-neutrínó érkezik a detektorokba fölülről, mint a Föld centruma felől), a részecskegyorsítóknak is fellép (csökken a müon-neutrínó fluxusa) és a Nap-neutrínók problémáját is a neutrínó-oszcilláció jelenségének felismerése oldotta meg.

Ha a neutrínók állapotai nem keverednek, vagy tömegük megegyezik, nem lép fel oszcilláció. Azonban a fizikában, úgy tűnik, három olyan neutrínó-probléma is van (Nap-neutrínó, légköri neutrínó, gyorsító-neutrínó), amelyek magyarázatához a neutrínó-oszcilláció lehetne a (szinte) egyetlen út. Miután valószínű, hogy a neutrínó-oszcilláció tényleg reális fizikai jelenség, fel kell teteleznünk, hogy van nem nulla tömegű neutrínó és hogy a neutrínók állapota keveredik. A nem 0 nyugalmi tömegű neutrínó az Univerzumban zömmel a neutrínó-háttérsugárzásban található meg, nagyjából olyan mennyiségben, mint a fotonok. Ha feltételezzük, hogy a kozmikus neutrínók és a fotonok energiája hasonló spektrumú, a neutrínók effektív hőmérséklete valamivel kisebb lesz a kozmikus háttérsugárzás fotonjainak hőmérsékleténél: a neutrínó-háttér hőmérsékletét 1,9 K és 2 K között becsülhetjük. Ez energiával kifejez-

ve 0,00017 eV. Ha ezeknek a neutrínóknak a jelenleg feltételezett kb. 1 eV nyugalmi tömege lenne, úgy ezen neutrínók nyugalmi tömege nagyságrendekkel múlna fölül impulzusukat, ez a járulék az Univerzum láthatatlan tömegének jelentős részét szolgáltatná. Mivel ez az energia csomósodás nélkül oszlana szét az Univerzumban, az anyag csomósodásai is a kívánatos mértékben lékeznék. Ez a szerencsés összhatás az oka a tömeges neutrínót feltételező kozmológiák sikerének.

Eddig a neutrínó-problémák megoldásához mindig több különféle neutrínót kellett egyidejűleg kimutatni, hogy meggyőzően állíthassuk: a hiányzó neutrínófluxus nem tűnt el, csak más típusú neutrínókká alakult. A neutrínó-oscilláció megfigyelésében bizonyos feltételek mellett elegendő lenne egyetlen, fajtájú neutrínó megfigyelése is. Az oszcillációs úthossz ugyanis arányos a neutrínó energiájával, tehát egy távoli forrás megfigyelésekor a kisebb energiájú neutrínóknak már nagyobb része vett részt oszcillációban. Bizonyos feltételek mellett tehát az adott típusú neutrínóból kevesebb lesz a kisebb energiájú, mint a nagyobb energiájú képviselő. A kapott összefüggés (pl. pulzárok, szupernóva-maradványok neutrínó spektrumának kimérése) megmutathatna egy második, nagy úthosszú oszcillációt, 1 kpc távolságból 10–11 eV tömegkülönbség is megfigyelhető lenne, 10 kpc távolságból egy nagyságrenddel kisebb különbség is. Egyelőre a műszertechnika nem teszi lehetővé ezeket a méréseket, de talán egy évtized múlva ezek a megfigyelések is elvégezhetővé válnak.

Az itt bemutatott módszerek, elvégzendő mérések (és talán az ebből adódó váratlan jelenségek felfedezése) hamarosan alaposan megváltoztatják világképünket. Az új lehetőségek felfedezése, a műszertechnika fejlődése, a röntgenszállagászat, neutrínó-szállagászat és a mikrohullámú háttér megfigyelése a közeljövőben sok ismeretlen aspektusból világítja majd meg az Univerzum szerkezetéről alkotott elképzeléseinket, hogy így is közelebb kerülhessünk a világ alapos megismeréséhez.

SZABÓ M. GYULA

×

Belépési nyilatkozat

Kérem felvételemet a Magyar Csillagászati Egyesületbe rendes tagként 2003-ra (a tagdíj összege 4200 Ft, illetmény: Meteor csillagászati évkönyv 2003 és a Meteor c. folyóirat)

Név:

Cím:

Szül. dátum: év hó nap

Telefonszám: E-mail:

A tagdíjat az MCSÉ postacímére (1461 Budapest, Pf. 219.)
kérjük feladni rózsaszín postautalványon!

M2003/2