

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

5. szám

2006. május

A KOZMIKUS INFRAVÖRÖS HÁTTÉR MEGFIGYELÉSE

Kiss Csaba

MTA KTM Csillagászati Kutatóintézete

A modern kozmológia számára az egyik legnagyobb kihívás annak magyarázata, hogy hogyan alakult ki a Világegyetem ma látható szerkezete. A galaxisok és csillagok képződése, valamint ezt követő fejlődésük eredetileg nukleáris és gravitációs energiából nagy mennyiségű sugárzási energiát szabadított fel. Az Univerzum tágulása és a rövidebb hullámhosszú sugárzás elnyelése majd ezen energiának kibocsátása hosszabb hullámhosszakon a sugárzási energia jelentős részét az infravörös tartományba tolta el. Így tehát a *kozmosz infravörös háttér* az Univerzum szerkezetképződésének lenyomata, és vizsgálata új perspektívát jelent ezen folyamatok megismerésében. Jelentősége ellenére – főként technológiai okok miatt – csak az utóbbi években sikerült egyértelműen detektálni ezt a háttérsugárzást. A kozmosz infravörös háttér csak egy része annak, amit *extragalaktikus háttérnek* nevezünk (1. ábra), és ami azoknak a kozmikus távolságban lévő objektumoknak az összedződő fénye, amelyeket nem tudunk egyedi forrásokként megfigyelni. Az extragalaktikus háttér és szűkebb értelemben a kozmosz infravörös háttér kutatása igen szerteágazó terület. Ebben a cikkben egy rövid történeti összefoglalás és a háttérre vonatkozó fontosabb eredmények ismertetése után elsősorban a kozmosz infravörös háttér megfigyelési módszereit kívánjuk bemutatni.

Történeti háttér

Annak a ténynek a felismerése, hogy az éjszakai égbolt fénye (illetve annak hiánya) kozmológiai jelentőséggel bír, a 18. századra nyúlik vissza. Legismertebb formájában ezt a megfigyelést Olbers-paradoxon néven ismerjük (1826): ha az Univerzum végtelen és abban végtelen számú csillag van, akkor az éjszakai égbolt nem lehet sötét, hiszen bármilyen irányba nézzünk is, előbb-utóbb egy csillag felszínével találkozunk a tekintetünk. Ma már természetesen tudjuk, hogy az Univerzum tágulása és

véges kora együttesen okozza az égi háttér sötéttségét, ennek felismerésére azonban a 20. század második feléig kellett várni. Az 1950–60-as években a galaxisokból származó vizuális háttér értékét már az általános relativitáselmélet figyelembevételével próbálták meghatározni, de ezek a számítások még csak integrált csillagfényt tartalmaztak. A 60-as évek közepén már figyelembe vették a látóirányba eső galaxisokban valamint az intergalaktikus térben található por által okozott elnyelést, de az infravörösben történő visszasugárzást még nem. A kozmosz mikrohullámú háttér felfedezése jelentősen hozzájárult a korai forró univerzum elképzelés elfogadásához, és a kozmosz infravörös háttér jelentőségének felismeréséhez. Egy ilyen univerzumban ugyanis léteznie kell egy a mikrohullámú háttértől különböző infravörös háttérnek, amely számot ad a csillagok és galaxisok kialakulásáról. Először Peebles világított rá az infravörös háttér ismeretének évtizedes hiányára a 60-as években. Az egyetlen felső korlát, amely a kozmosz infravörös háttér értékére akkor létezett, a 10^{19} eV energájú protonok kozmosz sugárzásban való jelenlétéből származott. A háttér magas értéke mellett ugyanis a pionképződés miatt ezen protonok fluxusa számottevően gyengült volna. A kozmosz infravörös háttér pontosabb meghatározásához hozzájárult az a felismerés, hogy a korai galaxisoknak sokkal több energiát kellett kisugározniuk a mostaniaknál ahhoz, hogy a ma megfigyelhető fémességet¹ reprodukálni tudják. Az ilyen modell-galaxisokból kiszámított kozmosz infravörös háttér értékében még nem vették figyelembe a por elnyelő hatását, ezért ebben a modellben az infravörös háttér az 1–10 μm hullámhosszak között volt a legfényesebb. Ezt a becslést összehasonlítva az egyéb, naprendszerbeli és galaktikus előtérsugárzások intenzitásával már (helyesen) arra a következtetésre lehetett jutni, hogy a kozmosz infravörös háttér halványabb, mint az előterek. A Tejútrendszer környéki galaxisok magas inf-

¹ A héliumnál nehezebb elemek hidrogénhez viszonyított aránya

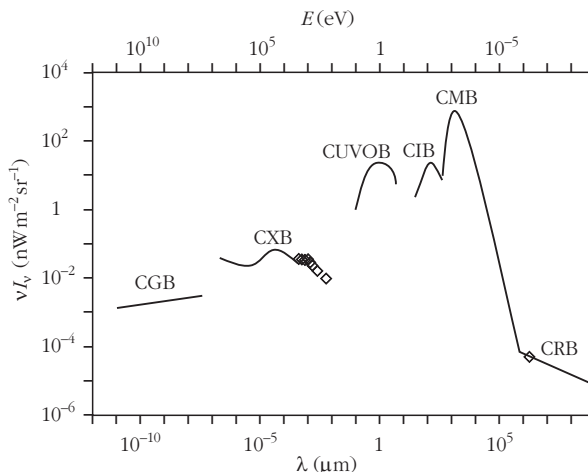
rávörös luminozitása² ahhoz a következtetéshez vezetett, hogy az infravörös háttér csúcsa körülbelül 50 μm -nél lehet, a korábban jósolt 1–10 μm helyett, és teljes energiája mintegy 1–10%-a lehet a mikrohullámú háttér energiájának. *Martin Harwit* irányította rá a figyelmet arra, hogy a kozmikus infravörös háttér mérése fontos egyes diszkrét objektumtípusok (pl. kvazárok) megértésében, amelyeket igen fényesnek találtak az infravörösben. Ugyanő mutatott rá arra is, hogy a kozmikus infravörös háttér jelentős gyengítő hatása a kozmikus sugárzás elektronjai, protonjai és gamma-fotonjai számára az inverz Compton-szórás, fotopionkeltés és elektron–pozitron párkeltés jelenségein keresztül. A 80-as évekig csak felső korlátok léteztek a kozmikus infravörös háttér értékére, és még a viszonylag fényes előterek is csak kevésbé voltak ismertek.

A kozmikus infravörös háttér eredete

A kozmikus infravörös háttérrel kapcsolatban az egyik legfontosabb kérdés, hogy milyen forrásokból származik az energiája. Bár a korai modellek egyszerűen a Tejútrendszer közelében ma láthatókhöz hasonló galaxisok vöröseltolódott színekéből próbálták összerakni a kozmikus infravörös háttér fényét, ma már tudjuk, hogy a kép ennél jóval bonyolultabb. A Világegyetem látható (barionos) anyagában két számottevő forrásból lehet energiát nyerni: magfúzióból és gravitációs helyzeti energiából.

Magfúziós energiatermelés a csillagok belsejében zajlik, és ezt a csillagfényt valóban vöröseltolódva látjuk; ez alkotja a kozmikus ultraibolya és vizuális háttér fényének legnagyobb részét (a kozmikus ultraibolya és vizuális háttér még az infravörös háttérnél is halványabb az előterekhez képest, ezért azt direkt mérésekkel a mai napig nem sikerült meggyőző bizonyossággal észlelni). Ennek a csillagfénynek egy jelentős részét azonban nem közvetlenül észleljük. A galaxisokban található por a csillagfényt elnyeli, és az infravörösben sugározza vissza, amely ezáltal az infravörös háttérhez fog hozzájárulni. A mai galaxisok nagy része azonban viszonylag kevés csillagközi anyagot tartalmaz (pl. az elliptikus galaxisok gyakorlatilag „pormentesek”). Vajon így volt ez a múltban is? Már az első infravörös tartományban megfigyeléseket végző űreszközök méréseiből kiderült, hogy léteznek olyan galaxisok a Tejútrendszerhez viszonylag közel is, amelyek szokatlanul fényesek az infravörösben, ugyanakkor halványak, sokszor alig észlelhetők a vizuális tartományban. Mint kiderült, ezek a galaxisok (Ultra Luminous Infrared Galaxy, ULIRG) éppen igen aktív csillagkeletkezési fázison mennek át (valószínűleg „ütőköznak”, vagy éppen összeolvadnak egy másik galaxissal), amit a vizuálisban a nagy mennyiségű por elrejt előlünk, viszont éppen emiatt olyan fényesek ezek a galaxisok az infravörösben. A kozmikus múltban ezek az események gyakoribbak lehettek, mint manapság. Az általános vélekedés szerint $z = 1\text{--}2$ vöröseltolódás érték körül lehetett az Univerzumban a globális

² Az égítést által adott időegység alatt kibocsátott teljes sugárzás energiája



1. ábra. Az extragalaktikus háttér komponensei

csillagkeletkezési ráta maximuma. Ebben az időben 10–50-szer olyan nagy volt az átlagos csillagkeletkezés sebessége, mint ma ($z > 2$ értékekre a csillagkeletkezési ráta a $z = 1$ és 0 között megfigyelhető gyors esésnél jóval lassabban csökken). Emiatt a kozmikus infravörös háttérhez a legnagyobb hozzájárulást a $z = 1$ körüli vöröseltolódású (nagyreszt ULIRG típusú) galaxisok adják, a háttér teljes fényességének körülbelül 50–70%-át.

A kozmikus infravörös háttér másik fontos forrását a gravitációs helyzeti energiát „felhasználó” aktív galaxisok (kvazárok) jelentik. Ezekben a középponti fekete lyuk felé hulló anyag gravitációs energiájának egy része végeredményben röntgensugárzás formájában távozna a rendszerből (ez a kozmikus röntgenháttér fő forrása), a por azonban elnyeli a röntgensugárzás egy részét, s ez az energia aztán ismét az infravörösben jelenik meg. Az ilyen kvazárok/aktív galaxisok a kozmikus infravörös háttér teljes energiájának mintegy 20%-át adhatják, de egyes hosszabb infravörös hullámhosszakon ezek lehetnek a háttér meghatározó objektumai.

Extragalaktikus és egyéb hátterek

Az extragalaktikus háttér komponensei (1. ábra) nem esnek szigorúan egybe az elektromágneses spektrum szokásos felosztásával, mert egy-egy komponenst általában egy jól meghatározott fizikai folyamat hoz létre. Az extragalaktikus háttér az alábbi komponensekre szokás felosztani: kozmikus rádióháttér (CRB), kozmikus mikrohullámú háttér (CMB), kozmikus infravörös háttér (CIB, 3–400 μm), kozmikus ultraibolya és vizuális háttér (egyben!, CUVOB, 0, 1–3 μm), kozmikus röntgenháttér (CXB) valamint kozmikus gammaháttér (CGB)³.

Az extragalaktikus háttér megfigyelése általában nem egyszerű feladat, hiszen az általában igen halvány az égi háttér egyéb összetevőivel képest. Ez a helyzet például a kozmikus ultraibolya- és vizuális, valamint az infravörös háttér esetében, ugyanakkor például a kozmikus röntgenháttér az égi háttér legfényesebb komponense röntgen-

³ A külön nem jelölt hullámhossztartományok egybeesnek az elektromágneses spektrum szokásos felosztásával.

ben. Egy háttérkomponens lehet eredendően diffúz, vagy felépülhet olyan kompakt források fényéből, amelyeket egy adott mérőműszerrel nem tudunk egyenként megfigyelni. Bármilyen legyen is a háttér, adott mérési konfigurációban és az ég adott helyén egy konstans fényességgel (abszolút érték) és egy ezen érték körüli átlagos változékonysággal (fluktuációs amplitúdó) jellemezhető.

Egy „átlagos” csillagász általában akkor találkozhat az égi háttérrel, ha valamilyen mérésben meg kell szabadulnia ettől a zavaró hatástól. Ha bármilyen mérésben egy egyedi forrás fényességét szeretnénk meghatározni, akkor ismernünk kell az égi háttér értékét is a forrás környezetében. Az égi háttér értéke azonban – a háttéralkotó komponensek fluktuációi miatt – minden irányban kissé eltérő. Minthogy a háttér értékét nem ismerjük pontosan, forrásunk fényességét sem tudjuk teljes pontossággal megállapítani. Ezt a bizonytalanságot nevezzük *konfúziós zaj*-nak. A konfúziós zaj egy adott mérési konfigurációban néhány praktikus okból alkalmazott transzformációtól eltekintve ekvivalens az autokorrelációs függvény (lásd később) értékével. Bár minden hullámhosszon jelen van, részben technikai, részben asztrofizikai okok miatt a konfúziós zaj az infravörösben különösen nagy jelentőségű. Egy adott műszer számára a konfúziós zaj a mérések pontossága szempontjából végső határ: ellentétben más típusú „zajokkal” (pl. műszerzaj, fotonzaj) az integrációs idő növelésével a jel/zaj viszony nem javítható.

A kozmikus infravörös háttér megfigyelése

A kozmikus infravörös háttérnek kevés olyan karakterisztikus tulajdonsága van, amelyre a mérés könnyen felépíthető lenne. Az extragalaktikus eredet miatt a sugárzásnak nagy skálákon izotrópnak kellene lennie. Az infravörös háttérnek nincsen egyedi színképi jellegzetessége sem, a végső spektrum bonyolult módon függ a háttér felépítő egyedi források színképétől, ezek kozmikus történetétől, valamint a forrásokban található por tulajdonságaitól. Minthogy a háttér legalább részben diszkrét források alkotják, az izotróp háttérre fluktuációk rakódnak. A kozmi-

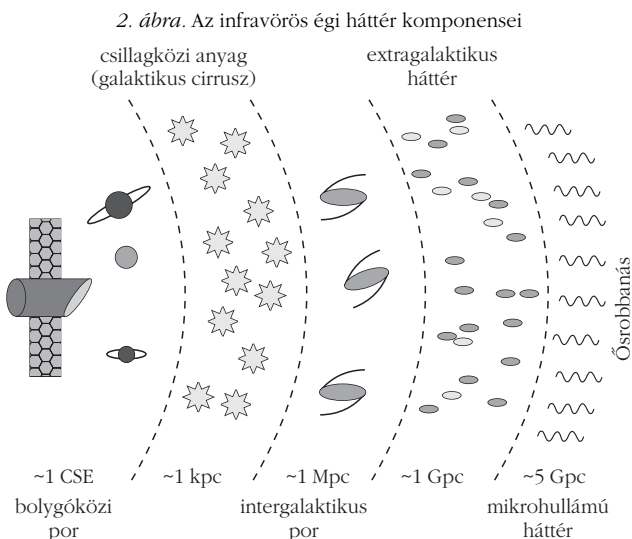
kus infravörös háttér mérése mind technikailag, mind asztrofizikai értelemben igen nagy kihívás. A háttér közvetlen méréséhez (lásd részletesen később) abszolút égboltnyesség-méréseket kell végezni egy nagyon jól meghatározott abszolút nullaponthoz képest, amihez ki kell küszöbölni a távcső alkatrészeinek emisszióját, valamint a földi légkörből származó sugárzásokat (hőmérsékletüknél fogva ezek mind erősen sugároznak az infravörösben). A közeleli fényes égi forrásokból származó szórt fényt (Nap, Föld, Hold, fényesebb bolygók) szintén ki kell zárni. Ez a gyakorlatban csak nagy figyelemmel tervezett, alacsony hőmérsékletre (<4 K) hűtött és az atmoszféra fölé emelt berendezésekkel, műholdakról lehetséges (a légkör egyébként is szinte tökéletesen elnyeli a 20 μm -nél hosszabb hullámhosszú infravörös sugárzást).

Az asztrofizikai kihívás a kozmikus infravörös háttér elkülönítése a többi, általában fényesebb égi forrástól. Ezek részben diszkrét források (csillagok és egyéb kompakt források a Tejútrendszerben), valamint ezek összeolvadó fénye, részben diffúz források, mint a Naprendszerben található interplanetáris poron szóródott napfény és ennek termikus emissziója (az *állatövi fény*), a Galaxis csillagközi anyagának kvázi-termális emissziója (ún. *galaktikus cirrusz emisszió*), valamint az intergalaktikus por emissziója. Minthogy ezen komponensek elkülönítése az infravörös égi háttérben az egyik legfontosabb feladat, ezért alapvető tulajdonságaikat röviden összefoglaljuk.

Előterek

Állatövi fény: A klasszikus állatövi fény elnevezés a napkelte előtt, vagy napnyugtá után feltűnő, a Nap közelében akár szabad szemmel is látható halvány derengésre vonatkozik, amely a bolygóközi poron szóródott napfény. Az infravörös csillagászatban azonban szintén állatövi fénynek nevezzük az ugyanezen porszemcsékből származó termikus, infravörös emissziót. A bolygóközi por az ekliptika⁴ síkjában, tórusz alakban koncentráliódik, s nagyrészt kitölti a teljes belső Naprendszert, egészen a Jupiter pályájáig. A felhő teljes tömege körülbelül egy üstökös tömegével egyezik meg. A porszemcsék hőmérséklete körülbelül 270 K (a hőmérséklet-eloszlás bizonyos szektorszerkezetet mutat), ezért legerősebben körülbelül 25 μm -en sugároznak, és a 3–70 μm tartományban az állatövi fény az ég fényességének domináns forrása. Mivel a Föld ezen felhő belsejében kering, a keringés során változó irányból látjuk a felhő egyes részeit. Az évszakos változásokból tehát kikövetkeztethető a felhő nagyléptékű szerkezete. A térbeli eloszlás eddigi legpontosabb modelljét a COBE műhold DIRBE műszerének mérései alapján készítették, és az ISO műhold ISOPHOT műszere határozta meg a hőmérséklet-eloszlást a felhőben [1].

Cirrusz emisszió: A galaktikus cirrusz emissziót az IRAS műhoddal fedezték fel 1984-ben nagy skálákon jelentkező, speciális szálas szerkezetet mutató, diffúz sugárzásként [2]. A galaktikus cirrusz nevet a földi légkörben található cirrusz felhőkhöz való hasonlóságáról kap-



⁴ A Nap látszó évi útja az égbolton

ta. A cirrusz emisszió nem koncentrálódik a Tejútrendszer síkjában, mint általában a csillagközi gáz és por, hanem magas galaktikus szélességeken is az égi háttér legmeghatározóbb összetevője 70 μm -nél hosszabb hullámhosszakon. Ma a cirrusz emissziót a Tejútrendszer kis sűrűségű semleges hidrogénfelhőiben található por kvázi-termális sugárzásával azonosítjuk. Ilyen felhőkben a sűrűség körülbelül 20 cm^{-3} , a porszemcsék hőmérséklete pedig körülbelül 18 K. A cirrusz emisszió jellegzetes szerkezete a molekulafelhőkéhoz hasonlóan egy fraktállal írható le. A szerkezet megismerése egyrészt fontos a csillagkeletkezés legelső lépcsőfokának, a csillagközi anyagban létrejövő sűrűsödések kialakulásának megértésében, másrészt a szerkezet ismeretének alapján a cirrusz emissziót el lehet különíteni az égi háttér egyéb összetevőinek fluktuációitól. Az cirrusz szerkezetét először az IRAS műhold 100 μm -es mérései alapján tanulmányozták, és $\alpha = -3$ spektrálindeket (hatványfüggvény-spektrum kitevője) találtak több égi terület vizsgálata során. Később ezt az értéket széles körben alkalmazták hosszabb hullámhosszakra is. Azonban megkérdőjelezhető, hogy a cirrusz emisszió szerkezete ugyanolyan lenne, bármilyen hullámhosszon vizsgáljuk is azt. Hosszabb hullámhosszakon ugyanis a „hagyományos” cirrusz hőmérséklettől (18 K) eltérő hőmérsékletű, hidegebb (körülbelül 15 K) területek is láthatóvá válnak a cirrusz emisszióban, amelyek a 100 μm -es hullámhosszon alacsonyabb hőmérsékletük miatt még nem sugároznak erősen, de 170–200 μm körül már az emisszió domináns forrásai lehetnek. Ha ezen területek szerkezete más, mint a 100 μm -en látható területeké, akkor más az α index hosszabb hullámhosszakon. ISO/ISOPHOT mérések alapján [3] sikerült kimutatni, hogy az α spektrálindeket valójában hullámhosszfüggő; a teljesítményspektrum mindig meredekebb (kisebb negatív szám) hosszabb hullámhosszakon. Emellett sikerült összefüggést találni a mező fényessége és a teljesítményspektrum meredeksége között, ami lehetővé tette a cirrusz teljesítményspektruma meredekségének meghatározását a leghalványabb, kozmológiai mezőkre is. Erre $\alpha = -2,3 \pm 0,6$ adódott, ami fontos különbség az eddig használt $\alpha = -3$ -hoz képest, mivel a cirrusz teljesítményspektrumának előzetes ismerete elengedhetetlen a kozmikus infravörös háttértől való korrekt szétválasztáshoz.

Intergalaktikus por: Már évtizedekkel ezelőtt feltételezték, hogy por nemcsak a Tejútrendszer belsejében, hanem azon kívül, a Tejútrendszert is magába foglaló Lokális csoport tagjai között is létezik, s mint ilyen, hozzájárulhat az infravörös égi háttérhez. Természetesen ez nemcsak a Lokális csoportban, hanem minden más galaxishalmazban is így lehet. Az első ilyen jellegű méréseket az ISO műhold ISOPHOT műszerével végezték 120 és 200 μm -es hullámhosszakon, a Coma galaxishalmaz irányában. Bár az intergalaktikus port sikerült kimutatni, a mért intenzitás igen kicsiny volt, amiből arra következtethetünk, hogy a jelenlegi mérési pontosság mellett a Lokális csoportban található intergalaktikus por csak elhanyagolható mértékben járul hozzá az égi háttér fényességéhez.

A kozmikus mikrohullámú háttér: A kozmikus mikrohullámú háttérrel azért kell az infravörös háttér mellett megemlítenünk, mert bár energiájuk teljesen más forrás-

ból származik, a mikrohullámú háttér tartalmazza az extragalaktikus háttér teljes energiájának legnagyobb részét, és a körülbelül 2,7 K-es feketetest-sugárzásnak megfelelő spektruma „átlóg” a hosszú infravörös hullámhosszak tartományába, ahol a két komponens meg kell különböztetni egymástól.

Direkt mérések

A kozmikus infravörös háttér direkt mérései tulajdonképpen precíz abszolút fotometriát jelentenek. A mérés elve igen egyszerű, megfelelő kivitelezése azonban igen nagy kihívás: távolítsunk el minden előttersugárzást, ami marad, az a kozmikus infravörös háttér. Minthogy a kozmikus infravörös háttér jele gyenge az előterekéhez képest, ezért ehhez minimalizálni kell az adott hullámhosszon az előterek hozzájárulását. A műszerekből származó hatások minimalizálásán túl elsősorban az állatövi fény, rövidebb infravörös hullámhosszakon a Tejútrendszer csillagai, hosszabb hullámhosszakon a galaktikus cirrusz hatásával kell számolnunk. Az állatövi fény hatását csökkenthetjük magas ekliptikai szélességű mező, a csillagközi anyag (cirrusz) hatását pedig például olyan terület választásával, amely irányában csak minimális mennyiségű HI gázt sikerült megfigyelni. Még az ilyen „kozmosz ablakokban” sem elhanyagolhatók azonban az előttersugárzók. Fluktuációs mérések, illetve forrásszámlálások esetén csak ilyen kozmikus ablakokban van esélyünk a kozmikus infravörös háttér megfigyelésére. Direkt mérések esetén általában szükség van előterekkel „szennyezett” területek megfigyelésére is, hogy hozzájárulásuk mértékét pontosabban meghatározhatjuk.

Az első direkt méréseket a COBE műhold DIRBE műszere végezte. Az állatövi fény megfelelő modelljéből megjósolható volt ennek járuléka. A csillagközi anyag esetében várható, hogy a cirrusz intenzitása arányos az adott irányban található hidrogénatomok (HI) oszlopsűrűségével (az alacsony sűrűség miatt sem molekuláris hidrogén, sem bonyolultabb molekulák nincsenek). Az állatövi fény kivonása után az infravörös intenzitás és a hidrogén-oszlopsűrűség korrelációban megjelenő konstans, pozitív infravörös intenzitás nagy valószínűséggel a kozmikus infravörös háttér járuléka. A COBE/DIRBE műszerrel 1,25 és 240 μm között összesen 10 hullámhosszon próbálkoztak meg a kozmikus infravörös háttér detektálásával, amiből csak a 60 μm -t meghaladó hullámhosszaknál jártak sikerrel. Később 2MASS (Two Micron All Sky Survey) csillagszámlálási adatokkal kombinálva a DIRBE méréseket 2,2 és 3,5 μm -en is sikerült a kozmikus infravörös háttérrel nagy bizonyossággal detektálni. A 60 μm -nél rövidebb hullámhosszakon pusztán a forrásszámlálásokból kaphatunk alsó korlátot az infravörös háttér értékére.

Bár az ISO műholdat nem kifejezetten abszolút felületifényesség-fotometriára tervezték, bizonyos mérési módjai lehetőséget kínálnak a fentihez hasonló vizsgálatok elvégzésére. Ez a munka jelenleg is folyik a MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézetében, német és finn intézetekkel együttműködésben.

Fluktuációs mérések

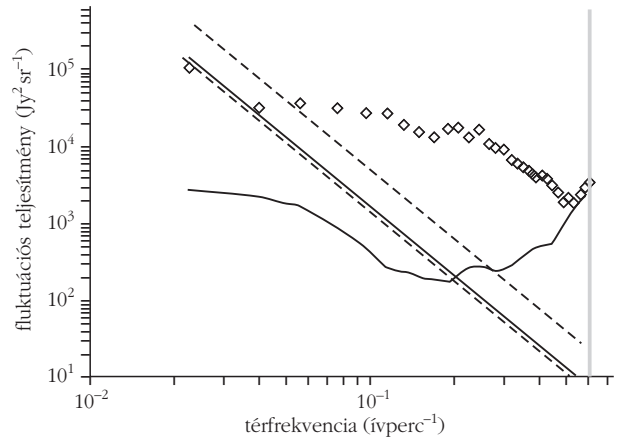
Míthogy a kozmikus infravörös háttér fénye diszkrét forrásokból származik, a megfigyelő látómezejében különböző égi irányokban megjelenő források eltérő száma fluktuációkat okoz a mért háttérfényességben is. Ezért a fluktuációk mérése információt hordoz a források számáról és eloszlásáról. A fluktuációk a kétdimenziós autokorrelációs függvényvel ($C(\theta)$), vagy a megfelelő kétdimenziós teljesítményspektrummal jellemezhetők. A fluktuációs mérések nem szolgáltatnak közvetlen információt a háttér abszolút értékéről; két fő módszer létezik, amelyekkel a fluktuációs mérésekből megszorításokat tehetünk a kozmikus infravörös háttér értékére. Egy adott kozmikus galaxisfejlődés-modellből a háttér teljes fényessége mellett kiszámítható az autokorrelációs függvény értéke is egy meghatározott térbeli skálán, a fluktuációk méréséből így kiszámítható a háttér értéke a modell keretein belül. A másik megközelítésben a fluktuációkat a forrásszámlálások eredményeivel hasonlítják össze, majd ezt alkalmazzák a források integrált fényére, amelyből a kozmikus infravörös háttérre alsó korlát kapható.

A fluktuációk detektálása az infravörösben könnyebb, mint a direkt mérések kivitelezése, mert nem kell meghatározni az abszolút fotometriai nullpontot. Ugyanakkor a fluktuációs méréseknek jórészt ugyanazokkal a kihívásokkal kell megküzdeniük, mint a direkt méréseknek, mivel az előtérforrások és a műszereffektusok jelentősen hozzájárulnak az infravörös égi háttér fluktuációihoz. A fluktuációs mérésekben feltétlenül szükséges az izotrópia igazolása is, azaz hogy a fluktuációk az égen bármely irányban ugyanakkorák.

A kozmikus infravörös háttér teljesítményspektruma

Bár a kozmikus infravörös háttér teljesítményspektrumának tulajdonságai önmagukban is érdekesek, hiszen információt szolgáltatnak a háttér felépítő források eloszlásáról, a teljesítményspektrum vizsgálata elsősorban azért lett népszerű, mert az infravörös égi háttér teljesítményspektrumában viszonylag könnyen elkülöníthetők az egyes komponensek. A kozmikus infravörös háttér teljesítményspektruma 1 ívpercnél nagyobb térbeli skálán (alacsony térfrekvenciákon) jó közelítéssel egy vízszintes egyenes, míthogy a háttér alkotó források eloszlása körülbelül a Poisson-statisztikának megfelelő. Ezen térbeli skála alatt (magasabb térfrekvenciákon) a teljesítményspektrum „letörik”, eltér a Poisson-eloszlásnak megfelelőtől: a háttér forrásai ezeken a skálán már nem véletlenszerűen oszlanak el, a domináns hatás a galaxisok halmazokba rendeződése.

Bár a Naprendszer interplanetáris porfelhőjének nagyon határozott alakja van, a felhőben a por eloszlása igen egyenletes, és teljes mértékben hiányoznak a kis skálájú fluktuációk (10 ívperc és alatta, [4]). Ezért bár az állatövi fénynek az égi háttér abszolút értékéhez való hozzájárulása az égen lassan változik, adott égtérület teljesítményspektrumára (vagy autokorrelációs függvényére) nincsen számottevő hatással. Alacsony intenzitása miatt ugyanez mondható el az intergalaktikus porról is. A



3. ábra. A kozmikus infravörös háttér teljesítmény-spektruma 170 μm -en, az ELAIS-N2 mezőben. A kozmikus infravörös háttér teljesítményspektrumát a szürke négyzetek jelölik. A két szaggatott vonallal jelölt egyenes a cirrusz emisszió két különbözőképpen meghatározott járulékát jelöli. A folytonos fekete görbe a pontforrás-leképezési függvény teljesítményspektruma.

Tejútrendszer csillagai mellett az előterek részéről a legnagyobb hozzájárulást a cirrusz emisszió adja a fluktuációkhoz, mind a közeli-közepes, mind pedig a távoli infravörös hullámhosszakon. A kozmikus infravörös háttér teljesítményspektrumát eddig csak 170 μm -en sikerült egyértelműen megfigyelni, kihasználva, hogy itt a műszerzaj mellett az egyetlen jelentős járulék a cirrusz emisszió. Amennyiben feltételezzük, hogy a cirrusz teljesítményspektruma $\alpha = -3$ -mal írható le, akkor, mivel a kozmikus infravörös háttér teljesítményspektrumára $\alpha \approx 0$, megfelelően alacsony cirrusz hozzájárulás mellett magas térfrekvenciákon a kozmikus infravörös háttér „kibukkan” a cirrusz alól (3. ábra). A kozmikus infravörös háttér ábrán látható teljesítményspektrumában magas térfrekvenciáknál a vízszintestől való eltérést már a háttér alkotó források halmazokba rendeződése okozza.

A korrelációs és konfúziós zaj mérése

A korrelációs mérésekben az égi háttérfényesség kétdimenziós autokorrelációs függvényét számítják ki, adott θ szeparációra: $C(\theta) = \delta F(x+\theta) \delta F(x)$ ⁵. Míthogy a teljesítményspektrum és az autokorrelációs függvény között egyértelmű kapcsolat van, ezért ugyanazok a hatások befolyásolják a korrelációs méréseket, mint a teljesítményspektrumot.

A közeli infravörös tartományban tehát a Tejútrendszer csillagai és az állatövi fény a legfontosabb előterek. A COBE műhold DIRBE műszerének mérései alapján magas galaktikus és ekliptikai szélességeken a diszkrét források (csillagok) valamint az állatövi fény járulékának levonásával lehetővé vált a kozmikus infravörös háttér fluktuációinak megfigyelése előbb 1,25, 2,2 és 3,5 μm -en, majd a 12–100 μm -es tartományban. E hullámhosszakon a fluktuációk arányát a teljes háttérfényességhez viszonyítva 5–10%-ban állapították meg, így ebből becslést kaptak a kozmikus infravörös háttér értékére is.

⁵ $\delta F(x) = F(x) - \bar{F}$, ahol $F(x)$ az ég felületi fényessége az „ x ” helyen, \bar{F} az átlagos felületi fényesség, az átlagolás a teljes égtérületre történik

A távoli infravörösben a konfúziós zaj két domináns összetevője a galaktikus cirrusz emisszió és az extragalaktikus háttér fluktuációi. Az extragalaktikus komponensnek az égen minden irányban ugyanakkorának kell lennie (izotrópia feltétel), a cirrusz komponens viszont annál erősebb, minél fényesebb a vizsgált terület, azaz minél több csillagközi anyag van a látóirányban. Így a konfúziós zaj több, különböző fényességű mezőkben mért értékéből meghatározható, mekkora lenne a fluktuációk értéke, ha egyáltalán nem lenne csillagközi anyag a látóirányban, azaz csak a kozmikus infravörös háttérrel látnánk. Ilyen mérésekkel az ISO műhold ISOPHOT műszerével sikerült 90 és 170 μm -en a kozmikus infravörös háttér fluktuációit detektálni [5]. A fluktuációk értékéből modellszámítások segítségével a háttér abszolút értékét is sikerült meghatározni. Mivel a mérés sok, az ég különböző részein található mezőkben detektálta bizonyos bizonytalanságon belül ugyanazt a fluktuációs értéket, ezért itt az izotrópiát is sikerült bizonyítani.

Forrásszámlálások

A kozmikus infravörös háttér abszolút értéke és fluktuációi önmagukban nem adnak felvilágosítást a háttér felépítő egyedi források tulajdonságairól és időbeli fejlődéséről. A forrásszámlálások az ilyen kérdésekre is válaszolhatnak. A forrásszámlálás során megpróbáljuk a kozmikus infravörös háttérrel a lehető legnagyobb részben forrásaira bontani. Ez a legtöbb esetben pusztán a forrás detektálását jelenti az előírt jel/zaj viszony felett, lehetőség szerint több hullámhosszon. Rövidebb infravörös hullámhosszakon a Tejútrendszer csillagaitól kell elválasztanunk az extragalaktikus objektumokat, ami általában az objektumok „színe” (több hullámhosszon megmért fényességének összehasonlítása) alapján történik. 60 μm -nél hosszabb hullámhosszakon nem a csillagok „eltávolítása” a nehéz feladat, hanem az extragalaktikus források elkülönítése az úgynevezett cirrusz-csomóktól. A cirrusz emisszióban ugyanis – térbeli szerkezeténél fogva – „álforrások” jelennek meg, amelyek valójában kisméretű sűrűsödések a csillagközi anyagban. Ráadásul ezeket a forrásokat színük alapján sem könnyű elkülöníteni az extragalaktikus objektumoktól.

A forrásszámlálások az egyedi források azonosításán kívül fontos megkötéseket jelentenek az infravörös háttérre. Kumulatív fényességük a kozmikus infravörös háttér fényességének alsó határát jelenti: azok a források, amelyeket nem sikerült a háttérben megfigyelni, csak növelhetik a háttér fényességét. Ugyanakkor a kozmikus infravörös háttér teljes fényességét ismernünk kell ahhoz, hogy megmondhassuk, hogy mennyire teljes a forrásszámlálásunk, a két információ együtt pedig korlátot szab egy valóban diffúz kozmikus infravörös háttérkomponens létezésére. A forrásszámlálások legfontosabb statisztikus eredménye a szám–fényesség-összefüggés: adott S fényességig hány S -nél fényesebb forrást látunk az adott égtérületen. Az összefüggést általában $N(S) = (S/S_0)^{-k}$ alakban szokták megadni. Eukli-

deszi tér és egyforma fényességű, egyenletesen elszórt források mellett k értéke 1,5 volna, a forrásszámlálások eredményei azonban ennél körülbelül kétszer nagyobb értéket mutatnak.

A közeli infravörös tartományban (J, H és K sávok) a jelenlegi „legmélyebb” forrásszámlálásokat a Hubble-űrtávcsővel végezték az úgynevezett Hubble-mélyvizsgálatok (Hubble Deep Field North/South) keretében. Hosszabb (12, 25, 60 és 100 μm) hullámhosszakon az IRAS műhold szolgáltatott forrásszámlálás-adatokat, de a távcső alacsony érzékenysége miatt a háttérnek csak igen kis részét sikerült forrásokra bontani. Az ISO műhold ISOPHOT és ISOCAM műszerei voltak az elsők, amelyek a 7 μm -nél nagyobb hullámhosszakon (egészen 180 μm -ig) képesek voltak a kozmikus infravörös háttérben jelentős számú forrást önállóan megfigyelni, a háttér teljes fényességének mintegy 3–10%-át forrásokra bontva. A Spitzer-űrtávcső legutóbbi mérései 24, 70 és 160 μm -en már a háttér mintegy 10–30%-át voltak képesek forrásokra bontani [6]. A forrásszámlálások – a fluktuációs és direkt mérésekkel egyetértésben – egyértelműen a „gyors evolúciós” modelleket támogatják, amelyekben a mai galaxisok nem hasonlítanak $z = 1-2$ körüli társaikra, amelyek azokban az időkben heves csillagkeletkezési fázison mentek át.

Kitekintés

A kozmikus infravörös háttér vizsgálata – elsősorban az erre a célra tervezett űreszközök sikere miatt – az elmúlt körülbelül egy évtizedben a csillagászat egyik legnépszerűbb és legfontosabb kutatási témájává vált. Az infravörös háttér forrásokra bontásának vágya fontos hajtóerő volt az újabb infravörös űrtávcsövek tervezésénél, így ezek programjában előkelő helyen szerepel a kozmikus infravörös háttér megfigyelése. A következő generációs Herschel és James Webb űrtávcsövek már a háttér 90%-át képesek lesznek forrásokra bontani. Ezek az eszközök azonban – felépítésüknél fogva – nem alkalmasak az égi háttér teljes fényességének közvetlen mérésére, így a COBE/DIRBE és ISO/ISOPHOT műszerekkel végzett abszolút fotometriai mérések még évtizedekig egyedülállóak maradnak.

Irodalom

1. CH. LEINERT, P. ÁBRAHÁM, J. ACOSTA-PULIDO, D. LEMKE, R. SIEBENMORGEN – Astron. & Astroph. 393 (2002) 1073
2. F.J. LOW, D.A. BEINTEMA, T.N. GAUTIER és mások – Astroph. J. 278 (1984) L19
3. CS. KISS, P. ÁBRAHÁM, U. KLAAS és mások – Astron. & Astrophys. 399 (2003) 177
4. P. ÁBRAHÁM, C. LEINERT, D. LEMKE – Astron. & Astroph. 328 (1997) 702
5. CS. KISS, P. ÁBRAHÁM, U. KLAAS, D. LEMKE, M. JUVELA – Astron. & Astrophys. 379 (2001) 1161
6. H. DOLE, E. LE FLOCH, P.G. PÉREZ-GONZÁLEZ és mások – Astroph. J. Supp. 154 (2004) 87

Ajánlott internet-címek:

Hazai infravörös-csillagászati kutatások: <http://www.konkoly.hu/KISAG>

Herschel-űrtávcső: <http://www.rssd.esa.int/Herschel>

Infrared Space Observatory (ISO): <http://iso.esac.esa.int>

Spitzer-űrobszervatórium: <http://www.spitzer.caltech.edu>