

# A HIDEG VILÁGEGYETEM VARÁZSLATOS VILÁGA CSILLAGÁSZAT A RÁDIÓN INNEN, A VÖRÖSÖN TÚL

Ábrahám Péter

az MTA doktora, tudományos tanácsadó,  
MTA KTM Csillagászati Kutatóintézete  
abraham@konkoly.hu

Kiss Csaba

PhD, tudományos főmunkatárs,  
MTA KTM Csillagászati Kutatóintézete  
pkisscs@konkoly.hu

## Bevezetés az infravörös csillagászatba

A kozmoszról szerzett tudásunk, információink legfőbb forrása az elektromágneses sugárzás. Hogy ez nem csak a szemünkkel érzékelhető látható fényt jelentheti, arra *William Herschel* mutatott rá 1800-ban. A Nap fényét prizmával színeire bontva Herschel észrevette, hogy az ismert szivárványszínek mellett a vörösön túl – ahol az emberi szem már nem lát fényt – az odahelyezett hőmérők melege-  
dést, elnyelt sugárzást jeleztek. Ennek az eseménynek, az infravörös („vörös alatti”, magyarul gyakran egyszerűen hő-) sugárzás felfedezésének emlékére nevezte el az Európai Űrügynökség a 2009 tavaszán felbocsátott infravörös-űrtávcsővét Herschel-űrobszervatóriumnak.

Az *infravörös sugárzás* csak hullámhosszában különbözik a látható fénytől. Míg az utóbbi a 0,3–0,8 mikrométeres színek tartományt fedi le (a kisebb érték az ibolya, a nagyobb a vörösnek felel meg), addig az infravörös az 1–300 mikrométer közötti spektrális sávot jelenti. Ezen belül megkülönböztetünk közeli- (1–2,5  $\mu\text{m}$ ), közép- (3–25  $\mu\text{m}$ ) és távo-

li-infravörös (60–300  $\mu\text{m}$ ) tartományokat.

Az infravörös fénynek már a felfedezése is egy csillagászati objektum, a Nap megfigyelésével volt kapcsolatos. Várható ezek után, hogy minden más csillag is sugároz ebben a színek tartományban, hiszen a több ezer-tízezer fokos hőmérsékletnek megfelelő feketetest-sugárzásuknak jelentős járuléka van az optikainál hosszabb hullámhosszakon is. A hidegebb csillagok viszonylagosan még ennél is több hősugárzást bocsátanak ki, sőt a Napnál kisebb tömegű vörös törpecsillagok emissziója már nagyrészt a közeli-infravörösbe esik. A közelmúltban felfedezett *barna törpék* (a csillag és a bolygó közötti átmeneti objektumok) is már inkább csak itt figyelhető meg, alacsonyabb hőmérsékletük (<2000 K) okán. A még hidegebb exobolygók termikus sugárzásának csúcsa a közép-infravörös tartományba esik, míg a bolygórendszer külső területein található üstökösmagok és csillagközi porkorongok, valamint a csillagközi porfelhők, amelyek összesűrűsödése által a csillagok kialakultak, már a távoli-infravörösben sugároznak. (Ezen objektumok egy rész-

a látható fényben is vizsgálható, ám csak közvetett hatások révén: kitakarják a háttércsillagokat, vagy szórják a rájuk eső csillagfényt.) Még nagyobb, kozmológiai távolságokra tekintve az ún. *vöröseltolódás* jelensége miatt a távoli, és így az Univerzum ifjúkoráról hírt adó galaxisok és csillagok fénye szintén infravörös hullámhosszakon figyelhető meg.

Elektromágneses sugárzásról lévén szó, az infravörösben érzékeny műszereknek is a fotonok irányát, frekvenciáját (színét) és polarizációs állapotát kell megmérniük. A detektortechnológia azonban különbözik az optikaitól, hiszen az ott elterjedt CCD-kamerák helyett itt más, például germániumalapú félvezetőket használnak, de hosszabb hullámhosszakon megjelennek a bolométerek is (ezekben az elnyelt foton okozta melege-  
dést mérik egy hőre érzékeny ellenállás segítségével). A nagy különbség azonban az optikai csillagászatához képest az, hogy a földi légkör áteresztése nagyon korlátozott, ezért legjobb a műszereket a légkörön kívülre vinni. A 20  $\mu\text{m}$ -nél rövidebb hullámhosszakon a légkör még bizonyos sávokban átengedi a sugárzást, azonban már e sávokban is csak a Föld legszárazabb pontjairól lehet mérni, mivel a fő elnyelő a vízgőz. A földi infravörös-távcsövek tehát magas hegyeken (Hawaii), sivatagban (Atacama, Chile) illetve a tervek szerint később az Antarktiszon épülnek.

A földfelszíni infravörös-csillagászat (nem számítva Herschel 1800-as kísérletét) az 1960–70-es években kezdődött. Megjegyzendő, hogy ezekben a mérésekben nagy gondot okoz a környezet – a távcső, az épület, az észlelő csillagász – okozta háttérsugárzás. Az igazi infravörös-űrcsillagászat 1983-ban, az IRAS mesterséges holddal vette kezdetét, amelyet a környező hőhatások minimalizálására folyékony héliummal az abszolút 0 fok

közelébe hűtötték. Bár a várakozás az volt, hogy az infravörös ég nagyon hasonló az optikaihoz, hiszen ugyanazok a csillagok sugároznak, ez nem így történt. Mindjárt kezdetben kiderült, hogy az infravörös égbolt a közép-infravörös hullámhosszakon szinte nappali fényességű, mivel a belső-Naprendszer kitöltő, az állatövi fény jelenségét is okozó porszemcsék minden irányból nagy intenzitással sugároznak. Váratlan volt a kiterjedt, a földi cirruszokhoz hasonló csillagközi porfelhők megjelenése, és fontos felfedezés volt, hogy sok csillag nem a hőmérséklete alapján várt Planck-görbének megfelelően sugároz, hanem annál fényesebb az infravörösben. Ez a többletsugárzás általában csillagközi porkorong vagy burok jelenlétére utal. Az IRAS-t két újabb űrtávcső követte, az Infrared Space Observatory (ISO, 1995–98) és a Spitzer Space Telescope (2003-tól). 2009. május 14-én pedig felbocsátották a világ eddigi legnagyobb infravörös űrtávcsővét, a Herschel Space Observatoryt, amelynek 3,5 m átmérőjű távcsőtükre jelenleg a legnagyobb csillagászati fénygyűjtő felület a légkörön túl (tükörátmérője mintegy másfélszerese a Hubble-űrtávcső 2,4 m-es főtükrének).

Mi is valójában az infravörös sugárzás forrása? Bár van némi hozzájárulás a gázatomokból és molekulákból is, legnagyobb részt a porszemcsék termikus sugárzását látjuk. Ezek a szilikát- vagy grafit alapú porszemcsék megtalálhatók mind a csillagközi, mind a csillagközi térben, a gáztömeg kb. 1%-ának megfelelő mennyiségben, legalábbis ott, ahol a hőmérséklet 1600 K, a szilikátok párolgási hőmérséklete alatt van. Hidegebb helyeken a szemcsékre jégréteg is rakódhat.

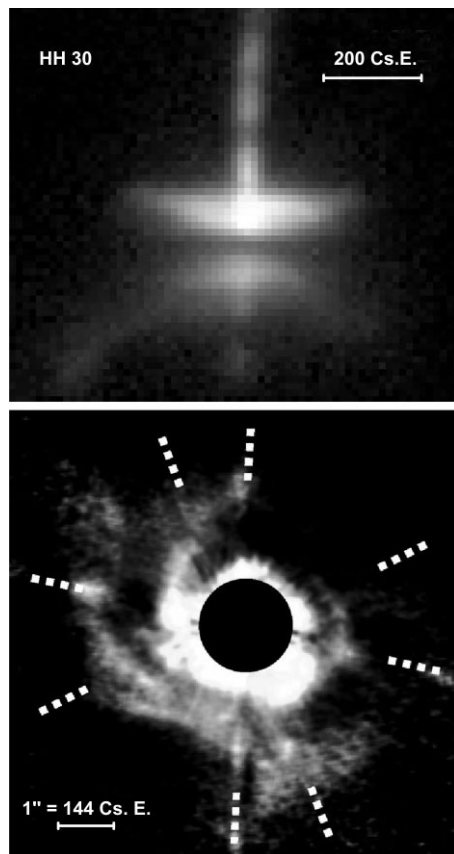
A termikus sugárzáson kívül (amely nem tökéletesen követi a feketetest-sugárzás Planck-görbéjét, mivel a kis porszemcsék

opacitása és így emisszivitása is hosszabb hullámhosszak felé csökken) megfigyelhető még színképi alakzatok, rezonanciák is. Ezek a nagyszámú atom jelenléte és kölcsönhatása miatt nem éles színképvonalak, hanem szélesebb sávok. Mivel a színképi sávok pontos profilja sok információt szolgáltat, az infravörös spektroszkópia is fejlődésnek indult. Például a szilikátszemcsék színképében 10  $\mu\text{m}$ -en megfigyelhető Si–O-kötés rezonanciájának alakjából megállapítható a porszemcsék jellemző mérete: az 1  $\mu\text{m}$ -nél kisebb részecskék jellegzetes magas színképi csúcsot mutatnak, mely nagyobb szemcsék esetén laposabbá válik. Mivel a csillagközi por inkább kisebb szemcsékből áll, a nagyobb porrészecskék jelenléte a csillagok körül a por összetapadásának a jele, amely az első lépés a bolygókeletkezés felé. A csillagközi korongokban gyakran látunk kristályos szerkezetű szilikátokat is (szemben a tipikus amorf szemcsékkel). Ezek a rendezettebb kristályszerkezetnek köszönhetően élesebb rezonanciákat, keskenyebb emissziós alakzatokat mutatnak az infravörös színképben. Ugyanezeket a kristályos jellegzetességeket mutatják a naprendszerbeli üstökösök is.

Azon túl, hogy a Világegyetem sok égitestje sugárzásának legnagyobb részét az infravörös tartományban bocsátja ki, ezeken a hullámhosszakon a kozmosz sokkal átlátszóbb is, mint az optikaiban. A csillagközi porfelhők részecskéi elnyelik és szórják a csillagfényt, ezáltal a távolabbi égitestek fénye gyengül és vörösödik, mire megérkezik hozzánk. Ez a hatás azonban lényegesen lecsökken az infravörös hullámhosszakon, mivel a mikrométernél kisebb porszemcsék elnyelési és szórási tulajdonságai erősen függenek a frekvenciától. Keresztülláthatunk tehát szinte az egész Tejútrendszeren, közvetlenül megfigyelhetjük

a Galaxis egyébként láthatatlan magját, és beeláthatunk a legfiatalabb csillagokat körülvevő sűrű porburkokba is (1. ábra).

A következőkben sorra veszünk néhány olyan területet, ahol az infravörös megfigyelések alapvetően megváltoztatták a korábbi elképzeléseinket, és ahol az MTA KTM Csillagászati Kutatóintézet munkatársai is aktívan hozzájárulnak a terület fejlődéséhez.



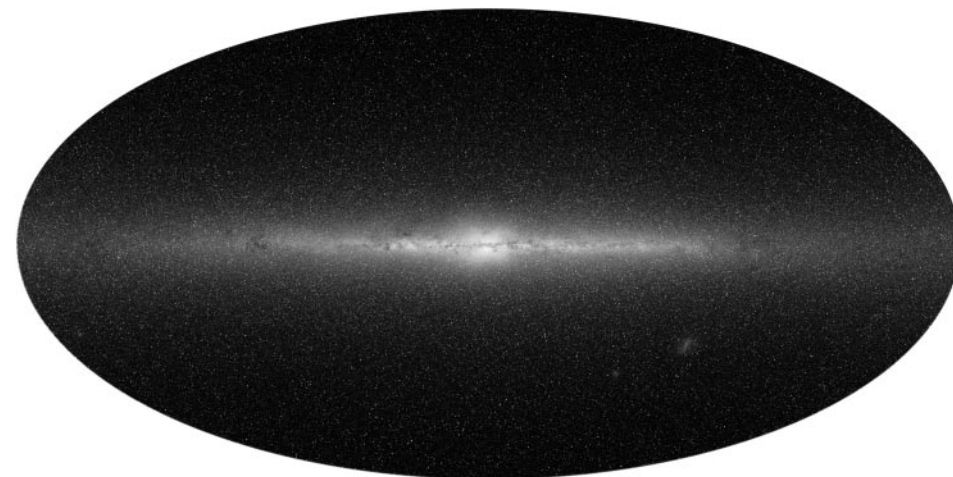
1. ábra • Korongok fiatal csillagok körül. Fent: a Taurus molekulafelhőben található, HH30 nevű fiatal csillag a Hubble-űrtávcső felvételén (Burrows et al., 1996 437); lent: Az AB Aur közepes tömegű csillag korongjáról közeli-infravörös hullámhosszakon készített felvétel (Fukagawa et al., 2004 L53.)

### Korongok fiatal csillagok körül

A születőfélben lévő csillagokat körülvevő por- és gázkorongok szerkezetének megismeréséhez az egyik legfontosabb eszköz a porszemcsék hőszugárzásának analízise. A csillagtól távolodva a korong hőmérséklete csökken, és egyre hosszabb hullámhosszakhoz kerül a hőszugárzás maximuma (lásd a Wien-féle eltolódási törvényt). A korong legbelső része a közeli-, míg a külső hideg területek a távoli-infravörösben adnak jelet (2. ábra). A mai infravörös-távcsövek viszonylag kis tükörméretük és az optikainál hosszabb hullámhosszak miatt általában nem bontják fel a korongokat, így azok integrált fényét mérjük. Azonban a közeli-, közép- és távoli-infravörös fluxusok erősségét összehasonlítva meghatározható a korong sugárirányú hőmérsékletfutása. Ez meghatározza, hogy hol kezdenek a gázmolekulák jég formájában kifagyni (az ún. jégvonal), és így megszabja, hol alakulhatnak ki gázbolygók. A fluxusok aránya utal

arra is, hogy milyen távolságra mennyi anyag található a korongban. Manapság külön figyelmet kapnak azok a rendszerek, ahol a korongsugárzás közeli-infravörös komponense hiányzik: talán a korong belülről kifelé haladó „feltisztulását” látjuk? Szintén izgalmasak azok a rendszerek, amelyeknél a távoli-infravörös hiányzik: valamiféle külső hatás, például kettős rendszerekben a kísérő gravitációs ereje leborotválhatta a korong külsejét? Mindezek a hatások megszabják, hogy mekkora lesz a csillag végső tömege, és milyen bolygórendszer alakulhat ki körülötte.

Az utóbbi évek egyik nagy előrelépése volt az infravörös interferometria megszületése. Az Európai Déli Observatórium (ESO) chilei négy óriástávcsövet összekötő optikai hálózat egyetlen 200 méter átmérőjű távcsövé formálja a rendszert, amely 10 mikrométeres hullámhosszon, a légkör egyik áteresztési sávjában üzemel. Bár a jelenleg működő MIDI csak két-két távcső képét interferáltatja, a második generációs Matisse-műszer már



2. ábra • A Tejútrendszer csillagainak eloszlása a 2MASS égboltfelmérés alapján. A térkép félmilliárd csillag alapján készült az 1,2, 1,6 és 2,2 mikrométeres fényességmérések figyelembe vételével (2MASS/J. Carpenter, T. H. Jarrett és R. Hunt)

képeket fog készíteni, amelyeken reményeink szerint a bolygók pályája mentén a korongban kialakuló üres sávokat és csomósodásokat, de akár magukat a bolygókat is látni fogjuk.

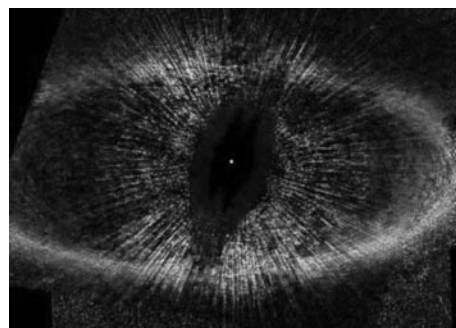
### Törmelékkorongok

Az infravörös csillagászat egyik legnagyobb felfedezése, hogy idősebb, a Naphoz hasonlóan csillagéletük hosszú, viszonylag eseménytelen „felőttkorát” töltő csillagok körül is gyakran megfigyelhetők porkorongok. Ezekből az öreg korongokból a gázkomponens már eltűnt, a porszemcséket közvetlenül bombázzák a csillagfény fotonjai, amelyek a kisebb részecskéket kifújják a rendszerből, a nagyobbakat pedig a Poynting–Robertson-hatás révén lefékezik, így azok rövid idő alatt bespiráloznak a csillagba. A por utánpótlását a bolygókeletkezés során keletkezett planetezimálok, bolygócsírák, üstökösök ütközésesei biztosítják. Ezeket az égitesteket kis sugárzó felületük miatt közvetlenül nem figyelhetjük meg, ám az általuk generált por egységnyi tömegre hatalmas felületet és így mérhető infravörös sugárzást biztosít (3. ábra). A törmelékkorongok szerkezete így információt nyújt arról, hol alakultak ki és maradtak fenn bolygócsíra-övezetek a rendszerben, és segít képet alkotni a bolygókeletkezés történetéről.

A törmelékkorongok nem a korai anyagbefogási korong maradványai, sokkal inkább egy harmadik generációs csillagkörüli struktúrának tekinthetők (a korai korongból összeálló planetezimálok tekinthetők a második generációnak). A Naprendszernek is ismerjük két porkorongját: a Mars-pályán belüli térséget kitöltő bolygóközi porfelhőt, amely a kisbolygóöv ütközéseiből és a Napot megközelítő üstökösök felbomlásából táplálkozik, és a Neptunusz-pályán túl elhelyezkedő Kuiper-övet, ahol akár a Plútóhoz hasonló mé-

retű égitestek is keringhetnek. A Kuiper-öv égitestjeiről még nagyon keveset tudunk, ez a helyzet azonban lényegesen javulhat a Herschel-űrtávcső tervezett megfigyelési programjai által, amelyekben az MTA Csillagászati Kutatóintézet is tevékenyen részt vesz.

A más csillagok körül eddig megfigyelt korongok többsége hideg, 100 K alatti hőmérsékletű, tehát a Kuiper-öv megfelelőinek tekinthetők. Van azonban néhány melegebb porgyűrű is, amelyek inkább a kisbolygóöv analógiái. Ilyen melegebb struktúrák megfigyelése fiatalabb csillagok körül nem meglepő, hiszen a bolygókeletkezés, a bolygócsírák kialakulása (és így az ütközéseik során fellépő portermelés) a rendszerben belülről kifelé halad. Vannak azonban olyan, egészen idős csillagok is, amelyek esetében a portermelés valamiféle időszakos eseményre, például két nagyobb test katasztrofális ütközésére vezethető vissza. Az így keletkezett pornak azonban hamarosan el kell tűnnie a rendszerből, így a törmelékkorong csak időszakos jelenség, amelynek időfejlődése nagyon érdekes információkat adhat a porpopuláció utánpótlásáról. Egy efféle, sok ütközéssel járó időszak lehetett a Naprendszer életében a késői nagy bombázás korszaka mintegy 400 millió évvel a Nap kialakulását követően.



3. ábra • A Fomalhaut körüli törmelékkorong a Hubble-űrtávcső felvételén

### A Naprendszer kis égitestjei

Az infravörös ég drámaian különbözik attól, amit az éjszakai égre felnézve megszoktunk. Ha „infravörös szemmel” néznénk az égre, a megszokott csillagokat alig látnánk, a Tejút amúgy halvány, derengő sávja pedig az infravörösben szemképrázatosán fényes lenne. A fényes állócsillagok helyett a viszonylag gyorsan mozgó kisbolygók jelentenek a legszembetűnőbb pontszerű égitesteket. A lapult bolygóközi porfelhő (amelynek belsejében kering a Föld is) részecskéinek hősugárzása, az „infravörös állatövi fény” beragyogja az egész eget, különösen az ekliptika környékét. Az állatövi fény rendkívül homogén fényességeloszlásában megfigyelhetőek fényesebb sávok, amelyek a közelmúlt porkeletkezési eseményeivel: kisbolygók ütközéseivel vagy üstökösök felbomlásával hozhatók kapcsolatba.

A közeli-infravörös hullámhosszakon a kisbolygók még a Nap fényét tükrözik vissza, de a kb. 5  $\mu\text{m}$ -nél hosszabb hullámhosszakon már a kisbolygók felszíni hőmérsékletének megfelelő hősugárzást látjuk. Az alacsony hőmérséklet miatt a közép- és távoli-infravörös hullámhosszakon a kisbolygók fényesebbek a csillagoknál.

A Mars és a Jupiter pályája között húzódo kisbolygóöv égitestjei, ahol az ismert kisbolygók túlnyomó része található, nagyjából 200 K hőmérsékletűek, így hősugárzásuk nagy része a közép-infravörös tartományba esik. A kisbolygók infravörös színeke alapján azonosíthatók a felszínüket borító bizonyos anyagok vagy éppen azok szemcsemérete.

A kisbolygók az infravörös üreszközök legfontosabb kalibrátorai, mivel elég fényesek, a közép- és távoli-infravörösben jóval fényesebbek, mint a legtöbb csillag, és fényességük általában könnyebben megjósolható, mint a

csillagok légkörének viselkedése ebben a hullámhossztartományban.

A kisbolygók azonban nem csak közvetlen célpontjai a csillagászati méréseknek: nagy számuk miatt zavaró forrásokként, jelentősen befolyásolni tudják az infravörösben végzett méréseket. A Spitzer-űrtávcső eddigi méréseiben mintegy 35 ezer, jórészt eddig ismeretlen kisbolygót találtak, elsősorban az ekliptika néhány fokos környezetében. Ehhez jön még számtalan annyira halvány és apró kisbolygó, amelyek közvetlenül nem figyelhetők meg, de jelenlétük hozzájárul az égi háttér egyenetlenségéhez.

A Naprendszer külső vidékén, nagyrészt a Neptunusz pályáján túl található a *Kuiper-öv* nevű tartomány. Az itt található objektumok annak a korongnak a maradványai, amelyből mintegy ötmilliárd évvel ezelőtt a Naprendszer bolygói keletkeztek. Az elmúlt években több mint ezer ilyen égitestet azonosítottak, s ennek köszönhetően a Kuiper-öv dinamikai felépítése (az égitestek pályájának összessége) jól ismert. Ugyanakkor a látható hullámhosszakon végzett mérések csak nagyon kevés adatot szolgáltatnak a Kuiper-övbéli objektumok fizikai tulajdonságairól: méretükről, tömegükről, sűrűségükről, felszíni hőmérsékletükről. Hőmérsékletük, minthogy nagyon távol vannak a Naptól, nagyon alacsony, jellemzően 100 K alatti, ezért hősugárzásuk nagy része a távoli-infravörösbe esik. Az infravörös és látható fényben végzett mérések együtt már sokkal többet tudnak mondani a fentebb felsorolt fizikai paramétereikről.

Bár a Spitzer-űrtávcsővel sikeresen mértek mintegy tucatnyi Kuiper-objektumot 24 és 70  $\mu\text{m}$ -en, ezekhez a detektorokhoz (elsősorban a 24  $\mu\text{m}$ -eshez) a Kuiper-objektumok „túl hidegek”. Várhatóan a Herschel-űrtávcső

hozza majd meg az áttörést a távoli-infravörös észlelésekben: a tervek szerint több mint száz Kuiper-objektumot fog megfigyelni, és a legfényesebbekről akár fénygörbét is kaphatunk, amiből következtetni lehet az égitest alakjára, vagy a felszíni albedó-, illetve hőmérséklet-eloszlás egyenetlenségeire.

Az egyedi objektumok megfigyelésén túl a Kuiper-öv szerepe azért is jelentős, mert ez az egyetlen olyan törmelékcorong, ahol a korongot felépítő égitesteket közvetlenül, egyenként is meg tudjuk figyelni. A Kuiper-objektumok megfigyelései jelentik az alapot minden korongfejlődési modell számára, és szolgálnak referenciaként minden más csillag körül megfigyelt törmelékcorong esetében.

#### *Felhőmagoktól a galaktikus habfürdőig*

A csillagközi anyag a Tejútrendszerben általában hideg; hogy mennyire, az attól függ, hogy éppen milyen fázisban találkozunk vele. A legsűrűbb, molekuláris hidrogéngázt tartalmazó felhők (molekulafelhők) nagyjából 10–20 K hőmérsékletűek; alapvetően igaz az, hogy a csillagközi anyag annál hidegebb, minél sűrűbb. Bármilyen legyen is, a felhők a gáz mellett mindig tartalmazznak port is, amelynek mennyisége ugyan nagyjából csak a felhő teljes tömegének 1 %-át teszi ki, de alapvető szerepe van a felhők termodinamikájában. Ennek a pornak a hőmérsékleti sugárzását látjuk az infravörös hullámhosszakon, és használhatjuk diagnosztikai eszközként a csillagközi felhők vizsgálatára. A legsűrűbb felhőmagok esetében néhány mm-es hullámhosszú rádióvonal mellett az infravörös mérések azok, amelyekkel a felhők belsejébe láthatunk. E mérésekkel a felhők szerkezete mellett azt is kideríthetjük, hogy például elkezdődött-e már a porszemcsék növekedése, ami megváltoztatná a felhő infravörös sugár-

zási tulajdonságait. Ezek a sűrű felhőmagok lesznek a csillag- és bolygókeletkezés első lépcsői.

A csillagközi anyag legnagyobb része a Galaktika síkjában összpontosul, ez a szerkezet azonban nagyobb skálákon sem teljesen véletlenszerű. A galaktikus sík közelében gyakoriak a szupernóva-robbanások és a fiatal, nagy tömegű csillagok halmazából eredő intenzív csillagszél, amely folyamatosan átformálja, hatalmas, akár háromszáz fényév átmérőjű buborékokkal fújja tele a Tejútrendszer síkjának környékét (4. ábra). A sok, egymásba kapcsolódó buborék miatt szokták ezt a szerkezetet *galaktikus habfürdőnek* is nevezni. E szerkezeteket teljes egészében csak a távoli-infravörösben lehet megfigyelni, mert az infravörös sugárzás még a galaktikus sík környékén is, ahol rengeteg a csillagközi anyag, optikailag vékony marad, így több egymás mögötti anyagréteg is látható, míg más hullámhosszakon, vagy például sötét felhők esetében az elnyelt csillagfényben mindig csak a hozzánk legközelebbi réteget láthatjuk.



4. ábra • A Cepheus csillagképben infravörösben kirajzolódó buborékot, egy egykori szupernóva maradványát magyar csillagászok (Kun Mária és munkatársai) fedezték fel az IRAS adataiból.

Az IRAS-műhold (1983) egyik legnagyobb felfedezése volt, hogy az addig ismert sűrű molekulafelhők és a hatalmas semleges hidrogénfelhők mellett létezik egy, a semleges hidrogénfelhőknél sűrűbb, a molekulafelhőknél ritkább fázisa a csillagközi anyagnak, amit a földi légkör fátolyfelhőivel való hasonlósága miatt *galaktikus cirrusznak* neveztek el. A cirrusz legfontosabb tulajdonsága, hogy mindenfelé megtalálható az égen, ott is, ahol egyébként semmilyen csillagközi anyag jelenlétét nem várjuk, így például a galaktikus pólusok irányában is. Az infravörösben természetesen a cirruszfelhőkben lévő por hőmérsékleti sugárzását látjuk, 70  $\mu\text{m}$ -nél hosszabb hullámhosszakon ez az infravörös ég legszembetűnőbb jellegzetessége magasabb galaktikus szélességeken. A galaktikus cirrusz jelenléte nagyon meglepő azokat a méréseket, ahol halvány, például a kozmikus infravörös hátteret felépítő nagyon távoli galaxisokat kellene megfigyelnünk. Bár látszólag kusza szövetet alkotnak az égen, hosszú, jellegzetes filamentumokkal, a cirruszfelhők mégsem teljesen véletlenszerűek és rendezetlenek: akár kis, akár nagy skálákon nézünk rájuk, mindig ugyanazt az önazonos, fraktálszerű szerkezetet mutatják. A cirrusz szerkezetét eddig legjobban az ISO-űrtávcső távoli-infravörös méréseivel sikerült meghatározni.

Magas galaktikus szélességeken azonban nem a szupernóvák és a csillagszél határozza meg a csillagközi anyag nagy léptékű szerkezetét. Ugyancsak az IRAS-műhold 100  $\mu\text{m}$ -es térképein, magasan a galaktikus sík felett a cirruszmisszióban olyan hatalmas hurkokat és üregeket látunk, amelyek méreteloszlása nagyon hasonlít arra, amit egy ilyen ritka közegben a gyors, turbulens mozgások, az úgynevezett szuperszonikus turbulencia hozna létre.

#### *A porszemcsék szerkezete*

A csillagközi felhők porszemcséi nagyrészt mikrométernél kisebb, amorf szerkezetű szilikátszemcsék. Egyre nyilvánvalóbb azonban, hogy a por nem mindenhol ugyanolyan szerkezetű, hanem a helyi fizikai körülmények hatására szerkezete megváltozhat. Ezen változások megértése többek között azért is alapvető fontosságú, mivel a por infravörös sugárzását diagnosztikai eszköznél használjuk, és a belőle leszármaztatott hőmérséklet- és sűrűségértékekben jelentős hibát okozhat, ha például a porszemcsék emisszivitása változik. Márpedig éppen erre utaló jeleket lehet látni a csillagközi felhők leghidegebb pontjain. Összehasonlítva ezekben az irányokban a porszemcsék fényelnyelését az általuk kibocsátott távoli-infravörös sugárzás erősségével, a fajlagos emisszióról kiderült, hogy az a hőmérséklet függvénye. Ennek oka minden bizonnyal a porszemcsék szerkezeti változása, konkrétan az átlagos szemcseméret növekedése, valószínűleg jégköpeny képződése által.

Pornövekedési folyamatok, például a kisebb szemcséknek a bolygócsírák kialakulásához vezető összetapadása, minden bizonnyal végbemennek a fiatal csillagok körüli korongok sűrű középsíkjában, ahová leülepedik a por. Sok olyan infravörös megfigyelés van, amelyeket a legkönnyebben pornövekedéssel lehet megmagyarázni. Ilyen a csillagkeletkezési időszak végén a korongok addig kifelé vastagodó geometriájának összelapulása, amelynek oka lehet, hogy a legnagyobb opacitású szubmikrométeres porszemcsék leülepedésével a korong átlátszóbbá válik a csillagfény számára.

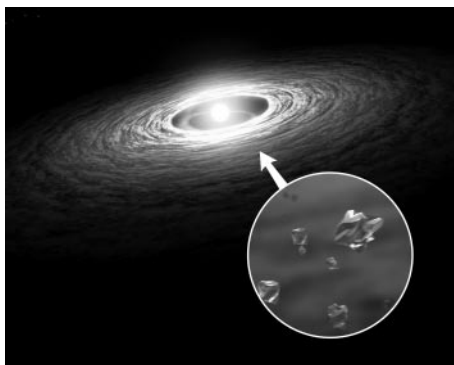
Válaszra váró érdekes kérdés az is, hogy a csillagközi felhők amorf, üveges szerkezetű szilikátszemcséiből hol és mikor alakulnak ki

azok a kristályos olivin- és piroxénszemcsék, amelyek a fiatal csillagok körüli korongokban, illetve a Naprendszer legősbibb égitestjeiben, az üstökösökben is megfigyelhetünk. Az 5. ábra mutatja, hogy az EX Lupi nevű fiatal csillagban és az üstökösökben a porszemcsék 10 mikrométeres rezonanciája más alakú, és ez a szemcsék kristályos szerkezetével magyarázható. Az, hogy a kristályokat az EX Lupi felfényesedése során figyelték meg, míg előtte amorf szerkezetűek voltak (5. ábra), mutatja, hogy a kristályosodás és általában a korong tulajdonságai rövid távon is változhatnak, teret adva a korongok változékonysági vizsgálatának.

#### A kozmikus infravörös háttér

A modern kozmológia számára az egyik legnagyobb kihívás annak magyarázata, hogy hogyan alakult ki a Világegyetem ma látható szerkezete. A kozmikus mikrohullámú háttér vizsgálata a Világegyetem nagyon korai időszakáról ad „pillanatfelvételt” mintegy 380 ezer évvel az Ősrobbanás után.

Azt már az 1950–1960-as években felismerték, hogy emellett léteznie kell egy olyan infravörös háttérsugárzásnak, amely tartalmazza az összes, különböző kozmikus távol-



5. ábra • Szilikátkristályok keletkezése az EX Lupi korongjában a kitorrés során.

ságoknál megfigyelhető, és így különböző fejlődési állapotban látható galaxisok összeadódó fényét. A korai modellekben még azt feltételezték, hogy a galaxisok régen is nagyjából olyanok voltak, mint ma, fényük csupán vöröseltolódást mutat távolságuknak megfelelően. Így összeadódó fényük színe is hasonló a környékbeli galaxisok csillagfényéhez, bár a vöröseltolódás miatt nem a látható tartományban, hanem a közeli infravörösben lesz a csúcsa. Ezekbe a korai modellekbe még nem számolták bele a csillagközi por hatását: ott, ahol nagy tömegben keletkeznek csillagok, nagy mennyiségű csillagközi anyagnak is lennie kell, az pedig elnyeli az éppen megszületett csillagok fényét. Márpedig a ma látható csillagok olyan sokan vannak, hogy azokat nem lehetne előállítani egy mai, átlagos galaxisban zajló csillagkeletkezési sebességgel az Univerzum életkora alatt. A múltban tehát lennie kellett egy olyan korszaknak, amikor a csillagkeletkezés a mainál sokkal intenzívebb volt. A por említett hatása és kisebb részben a vöröseltolódás miatt az aktív csillagképző galaxisok fényét az infravörösben fogjuk látni, és múltbeli szerepükről a kozmikus infravörös háttér fog információt szolgáltatni.

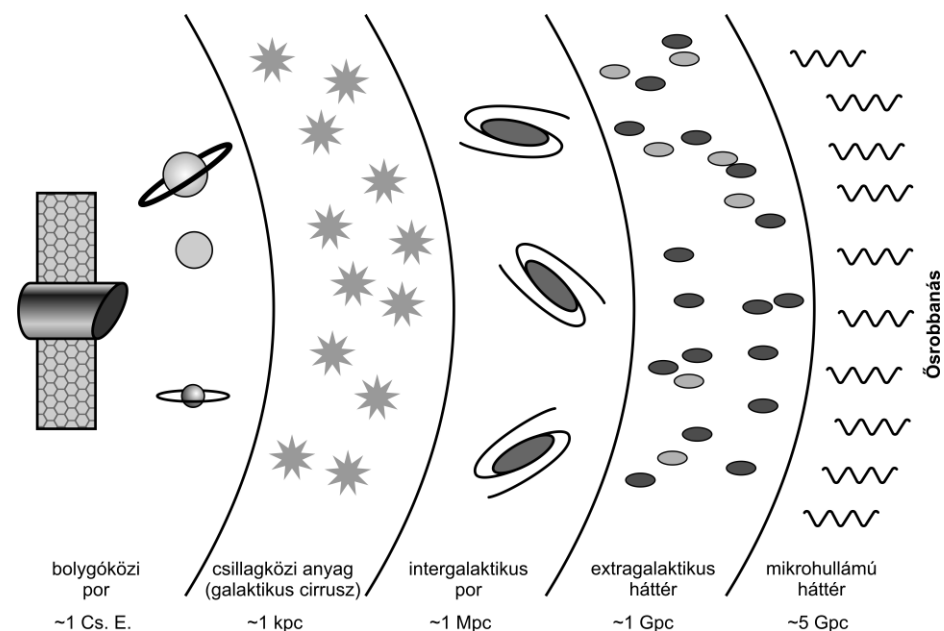
A kozmikus infravörös háttér mérésénél kezdetben az abszolút háttér fényességének megmérését tűzték ki célul. Ez mind tudományos, mind mérés technikai szempontból nagy kihívás: a kozmikus infravörös háttérrel el kell különíteni a fényes előtérkomponensektől: az állatövi emissziótól a Naprendszerben és a galaktikus cirrusz emissziótól (6. ábra); valamint a távcsövet az abszolút nulla fok közelébe kell hűteni, hogy saját hőszugárzása ne zavarja a mérést, továbbá ki kell küszöbölni a fényes égitestekből származó legkisebb szórt fényt is. Ez idáig a COBE-műhold DIRBE-műszerének mérései számítá-

nak az abszolút háttérfényesség legjobb méréseinek a távoli-infravörös hullámhosszakon. Már ezekből a mérésekből is kiderült, hogy a háttér domináns galaxisai jelentősen különböznek a Tejútrendszer környezetében ma megfigyelhető galaxisoktól. Az ISO- és a Spitzer-űrtávcsövek méréseiből pedig már tudjuk, hogyan történt a galaxisok fejlődése a Világegyetem első egymilliárd éve után.

A megfigyelések azt mutatják, hogy a kozmikus infravörös háttér teljes energiájának legnagyobb részét a  $z \approx 1$ -nél található galaxisok adják. Ebben az időben, az Univerzum mai életkorának felénél volt a legintenzívebb a csillagkeletkezés a Világegyetem akkori galaxisaiban. A csillagközi anyagfelhőkből keletkező csillagok beágyazódva maradtak még egy ideig a szülő felhőben, a fiatal csillagok fényének jelentős részét a felhőben található por elnyelte, és azt infravörös

hullámhosszakon sugározta vissza. Így ezek a galaxisok, amelyekben igen intenzív a csillagkeletkezés, nem a látható hullámhosszakon fényesek, hiszen ott a por miatt nem látjuk a csillagok fényének jelentős részét, hanem az infravörösben, ahol a por visszاسugározza az elnyelt csillagfény energiáját. Ezek neve *fényes infravörös galaxis* (Luminous Infrared Galaxy – LIRG), vagy *rendkívül fényes infravörös galaxis* (Ultra-Luminous Infrared Galaxy – ULIRG). Ezek létezése először az IRAS infravörös műhold méréseiből derült ki, az azt követő infravörös-űrtávcsövek (ISO, Spitzer) tömegesen azonosítottak ilyen galaxisokat, és ma már tudjuk, hogy egyáltalán nem különlegesek, volt olyan korszaka a Világegyetem történetének, amikor meghatározó szereplői voltak a kozmikus színjátéknak.

A fényes infravörös galaxisok mellett jelentős szerepet játszanak az *aktív galaxisok* is,



6. ábra • Az infravörösben sugárzó, egymás mögötti források a többi forrás szempontjából „háttérként” viselkednek.

amelyek a kozmikus infravörös háttér teljes energiájához mintegy 10 %-ban járulnak hozzá, de bizonyos hullámhosszakon ez az arány az 50 %-ot is elérheti. Ezekben a galaxisokban a központi, nagy tömegű fekete lyukba anyag áramlik be a környezetéből egy anyagbefogási korongon keresztül. A fekete lyuk környezetében az anyag magas hőmérséklete miatt röntgensugárzást bocsát ki, amit a környező anyaggyűrűben lévő por elnyel a csillagfényhez hasonlóan, és energiáját infravörösben sugározza vissza.

A kozmikus infravörös háttér, bár a mai napig így beszélünk róla, egyre kevésbé valódi háttér, elmosódott halvány fénylés az égen. Az egyre érzékenyebb és egyre jobb térbeli felbontású űrtávcsövekkel a háttér fényt adó objektumok egyre nagyobb részét tudjuk önálló galaxisként is azonosítani. Például a Spitzer-űrtávcső a közép-infravörösben (24  $\mu\text{m}$ ) a távoli galaxisok 90 %-át tudta már egyedileg is megfigyelni, a Herschel-űrtávcső pedig várhatóan a hosszabb, 100 és 160  $\mu\text{m}$ -es hullámhosszakon is legalább a háttér fényének 50%-át fel tudja majd bontani egyedi galaxisokra.

A kozmikus infravörös háttér egyenetlenségeinek vizsgálatával a Spitzer-űrtávcső közeli-infravörös hullámhosszain (3 és 8  $\mu\text{m}$  között) sikerült megfigyelni az ún. III. populációs csillagok jeleit a legtávolabbi,  $z \approx 20$  galaxisok fényében. A III. populációs csillagok az első, nagy tömegű csillagok, amelyek a korai galaxisokban megjelentek, s rövid életüket valószínűleg mindannyian szupernóvaként fejezték be. Hogy létezniük kellett, azt a csillagászok már évtizedek óta feltételezték, mert ezen csillagokból kialakult szupernóvak szolgáltathatták a magasabb rendszámú elemeket (fémeket) a később keletkezett csillagok számára.

### *Az infravörös csillagászat jövője*

A 21. századi asztrofizika két alapvető kérdése a „két születés” problematikája: hogyan keletkezett a Világegyetem, és hogyan a Föld? Ahogy korábban láttuk, a válasz mindkét területen nem kis részben jövőbeni infravörös észlelésekből várható. Hozzátevé ehhez, hogy a kozmosz mennyivel átláthatóbb az infravörös, mint az optikai hullámhosszakon, nem meglepő, hogy az infravörös-csillagászat jelentősége napjainkban egyre nő. Jól példázza ezt, hogy a Hubble-űrtávcső utóda, a NASA James Webb-űrteleszkópjának mindhárom főműszere a hősugárzást fogja megfigyelni.

A 2009-es esztendő fontos dátum ezen a területen: megkezdte működését a Herschel Space Observatory, amely az eddigi legnagyobb űrcsillagászati tükröt hordozza.

Az MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézetében már egy évtizede működik egy alapvetően infravörös profilú kutatócsoport. A csoport több tagja tevékenyen részt vett az ISO földi munkálataiban; rendszeresen sikeresen használták a NASA Spitzer-űrtávcsövet fiatal csillagok körüli, valamint törmelékkorongok vizsgálatára; és évek óta közreműködnek a Herschel PACS nevű műszerének fejlesztésében. Ezzel párhuzamosan rendszeresen megfigyeléseket végeznek földi bázisú infravörös távcsövekkel, és dolgoznak az Európai Déli Observatórium Matisse nevű új generációs interferométerén. Néhány fő tudományos cél: korongok dinamikája, eruptív csillagok kitörései, törmelékkorongok szerkezete, Kuiper-övbeli objektumok vizsgálata. Így bátran állíthatjuk, hogy bár hazánkban nincsenek megfelelően száraz, infravörösbeli észlelésekre alkalmas klímájú helyek, Magyarország rajta van Európa infravörös-csillagászati térképén.

Kulcsszavak: *infravörös-csillagászat, bolygókeletkezés, csillagkeletkezés, kozmológia, kozmikus háttér*

### IRODALOM

Burrows, Christopher J. – Stapelfeldt, Karl R. et al. (1996): Hubble Space Telescope Observations of the Disk and Jet of HH 30. *The Astrophysical Journal*. 473, 437. <http://www.iop.org/EJ/article/0004-637X/473/1/437/34479.pdf?request-id=7cd87a6e-1da3-4acd-b619-cf30326f1f04>

Fukagawa, Misato et al. (2004): Spiral Structure in the Circumstellar Disk around AB Aurigae. *The Astrophysical Journal*. 605, L53–L56. <http://www.iop.org/EJ/article/1538-4357/605/1/L53/18160.web.pdf?request-id=7f47187a-09a6-4705-8ad6-48d7e26cc1a2>

