

MIT ADOTT NEKÜNK A HERSCHEL-ÚRTÁVCSÓ?

WHAT HAS THE HERSCHEL SPACE OBSERVATORY EVER DONE FOR US?

Kiss Csaba

az MTA doktora

Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet, Budapest

kiss.csaba@csfk.mta.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

A Herschel-űrtávcső a 2010-es évek elejének legfontosabb űrcsillagászati programja volt. Legfontosabb eredményei közé tartozott, hogy a korábbi infravörös-űrtávcsövekhez képest sokkal jobb térbeli felbontásának köszönhetően sikerült forrásaira bontani az infravörös és szubmilliméteres extragalaktikus háttérrel, felfedezni a Tejútrendszer csillagközi anyagának szálas szerkezetét, valamint a távoli-infravörös spektroszkópiai műszerekkel szerves molekulákat azonosítani a csillagközi és csillagkörüli térben és a Naprendszerben.

ABSTRACT

Herschel Space Observatory was the most important space astronomy mission in the early 2010s. Due to its unprecedented spatial resolution at the far-infrared and submillimetre wavelengths it could resolve the infrared extragalactic background into individual sources, discover the filamentary structure of the interstellar medium in our Galaxy, and identify organic molecules in the interstellar and circumstellar medium and in our Solar system using its far-infrared spectroscopic instruments.

Kulcsszavak: Herschel-űrtávcső, távoli-infravörös és szubmilliméteres csillagászat, extragalaktikus háttér, csillagközi anyag, Naprendszer

Keywords: Herschel Space Observatory, far-infrared and submillimetre astronomy, extragalactic background, interstellar medium, Solar System

Annak az egyszerű ténynek, hogy az éjszakai égboltot sötétnek látjuk, komoly kozmológiai következménye van. Az ebből levezetett ún. Olbers-paradoxon szerint egy térben és időben végtelen Világegyetemben egy megfigyelő bármilyen irányba is nézzen, tekintete előbb-utóbb egy csillag felszínével kell hogy találkozzon, azaz az éjszakai égnek a Nap fényességével kellene ragyognia min-

den irányban. Ez nyilvánvalóan nincs így, a paradoxon feloldása pedig az a ma elfogadott ősrobbanás-elmélet szerint, hogy az Univerzum csak véges ideje létezik, így a nagyon távoli csillagok fénye még nem érhetett el hozzánk, amihez számottevően hozzájárul a Világegyetem tágulása is. Bár az Olbers-paradoxon egy rendkívül fontos kozmológiai megfigyelést tükröz, valójában az éjszakai ég nem teljesen sötét. Szabad szemmel a csillagok közötti égi háttér már a látható tartományban is könnyedén megfigyelhető fényszennyezés nélküli helyről, bár ezeken a hullámhosszakon a háttér fényének nagy része inkább a légköri fényszórásból és a légkört alkotó molekulák sugárzásából származik, mintsem a háttér halvány, egyenként nem megfigyelhető csillagainak összeadódó fényéből. Az infravörös tartományban (1–300 μm) az égi háttér nagyon jelentős a megfigyelhető égitestek fényességéhez képest, még akkor is, ha távcsövünket a légkör fölé emeljük. Ebben a tartományban a legjelentősebb háttérkomponensek a bolygóközi por (állatövi fény) és a Tejútrendszer kis sűrűségű hidrogénfelhőiben található por hőmérsékleti sugárzása (az ún. galaktikus cirrusz emisszió), valamint a távoli galaxisok összeadódó fénye, a kozmikus infravörös háttér. A közeli-infravörösben (1–10 μm) ehhez hozzájárulnak még a Tejút halvány csillagai, a legtávolabbi infravörös hullámhosszakon (kb. 300 μm) pedig az ősrobbanás maradványa, a mikrohullámú háttérsugárzás. A háttérektől egy adott égitest mérésénél könnyen meg tudnánk szabadulni, ha az a forrásunk környezetében minden irányban ugyanolyan lenne, ez azonban nincs így: nem ugyanannyi és ugyanolyan fényességű galaxist látunk minden irányban, és például a csillagközi anyag felhőinek bonyolult szerkezete miatt a galaktikus cirrusz fényessége sem azonos különböző irányokba nézve. Minthogy emiatt nem tudjuk meghatározni a háttér pontos értékét egy adott helyen, a kiválasztott forrásunk fényességét sem tudjuk tetszőleges pontossággal megmérni, bármilyen hosszan is figyeljük meg azt. Emellett, ha a források túl közel vannak egymáshoz, előfordulhat, hogy nem tudjuk szétválasztani őket – a fenti két hatásból származó, a forrás fényességének meghatározásában fellépő bizonytalanságot *konfúziós zajnak* nevezzük.

A 2000-es évek elejéig felbocsátott infravörös-úrtávcsövek (IRAS, ISO, Spitzer) teljesítményét a konfúziós zaj korlátozta, azaz, bár a detektorok megengedték volna halványabb források megfigyelését is, a konfúziós zaj miatt ez nem volt lehetséges. Általánosan igaz, hogy rövidebb hullámhossz és nagyobb távcsőtükör kisebb konfúziós zajt eredményez. Minthogy a megfigyelendő fizikai jelenségek megszabják az észlelés hullámhosszát, ezért valójában a konfúziós zajjal szemben az egyetlen fegyver a távcsőtükör méretének növelése volt. A korábbi 60 cm-es (IRAS, ISO), majd 85 cm-es (Spitzer) tükörmérettel szemben a Herschel-úrtávcső 3,5 m-es tükre óriási ugrást jelentett, és a korábbinál jóval halványabb objektumok megfigyelését/felbontását tette lehetővé (a mai napig ez a világűrbe tudományos céllal felküldött legnagyobb távcsőtükör).

A 2000-es években az égi háttér komponenseinek elkülönítése – a kozmikus infravörös háttér megszabadítása az előterektől – az egyik legfontosabb feladat volt az extragalaktikus csillagászatban. A Világegyetemben az „utolsó szórás” (a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás keletkezésének időpontja) óta kibocsátott energia mintegy fele a kozmikus infravörös háttérben lelhető fel, ez jelentős részben a távoli galaxisokban található por által elnyelt és az infravörösben újra kibocsátott csillagfény. A háttér fényét adó galaxisok nagy hányada meg sem figyelhető látható hullámhosszakon az ott lévő nagy mennyiségű por miatt. A korábbi infravörös-úrtávcsövek a konfúziós zaj miatt csak kis részben tudták a háttér forrásaira bontani, így nem tudtuk, hogy milyen galaxisok alkotják a kozmikus infravörös háttér, milyenek voltak a galaxisok 5–10 milliárd évvel ezelőtt, amikor a mai galaxisokban megfigyelhető csillagok nagy része keletkezett. Ezekre a fontos kozmológiai kérdésekre csak egy, a korábbiaknál jóval nagyobb átmérőjű főtükröt tartalmazó infravörös-úrtávcső adhatta meg a választ. Hasonlóan, a csillagközi anyag szerkezetének kutatásában is fontos kérdés volt, hogy a korábban látott önazonos (fraktálszerű) szerkezet milyen skálán törik meg, milyen felbontásnál veszi át a térbeli szerkezet kialakítását a csillagkeletkezés.

A csillagászatban az 1980-as évek közepétől egyre nagyobb hangsúlyt kaptak az infravörös tartományban (1–300 μm) működő távcsövek. Az infravörös tartományban megfigyelhető sugárzás a legrövidebb (1–5 μm) hullámhosszaktól eltekintve, ahol magasabb hőmérsékletű égitestek (csillagok) visszavert fényét is láthatjuk, alapvetően a csillagoknál hidegebb (~500 K-nél alacsonyabb hőmérsékletű) égitestek hőmérsékleti sugárzása. Ilyen sugárzást bocsát ki a Tejútrendszerben és más galaxisokban található csillagközi anyag (~10–100 K), a csillagok körüli por- és gázkorongok anyaga, a bolygók és exobolygók felszíne és a Naprendszer kis égitestjei (törpebolygók, kisbolygók). Ezek megfigyeléséhez és jellemzéséhez az infravörös tartományban végzett mérések jelentik a leghatékonyabb eszközt.

Az infravörös tartománybeli méréseket jelentősen megnehezíti, hogy ebben a tartományban, elsősorban a vízgőz elnyelése miatt, a földi légkör az 1–20 μm -es hullámhosszakon csak részlegesen áteresztő és gyakorlatilag teljesen átlátszatlan 20 μm felett. Az ilyen távoli-infravörös hullámhosszakon történő megfigyelésekhez a távcsövet a légkör fölé kell emelni. Ez a kezdeti időkben, az 1970-es években, ballonokról és rakétákról történő megfigyeléseket jelentett, a 1980-as évek közepén kezdődött az infravörös-úrtávcsövek korszaka az IRAS-műhellyel, és folytatódott az 1990–2000-es években a ISO- és Spitzer-úrtávcsövekkel.

A Herschel-úrtávcsövet 2009 májusában bocsátották fel, fedélzetén három műszerrel (PACS, SPIRE, HIFI), amelyek együttesen az 55–670 μm -es, távoli infravörös és szubmilliméteres, tartományt fedték le. A távcső 2013 áprilisáig működött, ekkor fogyott el belőle a berendezések hűtéséhez szükséges folyékony hélium. A távcső a Nap–Föld-rendszer 2. Lagrange-pontja körüli pályán keringett, mintegy

1,5 millió kilométerre a Földtől. A lefedett hullámhossztartománynak megfelelően elsősorban „hideg” objektumokat tudott vizsgálni: korai ($z = 1 - 6$ vöröseltolódású) galaxisokat; csillagkeletkezési területeket, fiatal csillagokat és csillagkörüli anyagot a Tejútrendszerben; hideg, a Naptól távoli égitesteket a Naprendszerben.

A Herschel-űrtávcső programjának egyik legfontosabb célja és legnagyobb sikere az extragalaktikus háttér forrásaira való felbontása volt. A Herschel-űrtávcső teljes mérési idejének 15%-át fordították olyan mély felmérésekre, amelyek célja az volt, hogy minél halványabb és minél nagyobb vöröseltolódású galaxisokat találjanak adott hullámhosszakon egy bizonyos égterületen. Ezekkel a felmérésekkel a legalább $z = 2$ vöröseltolódású távoli galaxisokat sikerült megfigyelni, és ezek alapján a kozmikus infravörös háttérhez a legnagyobb járulékot adó vöröseltolódásokon a háttér kb. háromnegyedében sikerült forrásaira bontani. Ezekben a galaxisokban a csillagkeletkezés nagy része a fősorozat környékén található csillagokhoz kapcsolódik. A korábbi várakozásokkal ellentétben az aktív galaxismagokat tartalmazó galaxisok $z = 2$ -ig a Tejútrendszer közelében találhatóéhoz hasonló, nagy tömegű csillagontó galaxisok, és a galaxisok összeolvadásának hatása a kozmikus infravörös háttérre sokkal kisebb a vártnál. Az a ténylegesen diffúz extragalaktikus háttérkomponens, amelyet a COBE-űrszonda DIRBE műszerének korábbi mérései mutattak, nem látszik a Herschel méréseiben.

A Tejútrendszer csillagközi anyagának és csillagkeletkezési területeinek megfigyelésével végre sikerült elérni azt a térbeli skálát, amelynél a korábbi, nagyobb skálákon jellemző fraktálszerkezet megtörik, és az anyag szerkezetének meghatározói a keskeny, szabálytalan alakú „rostok”, ún. filamentumok lesznek – lényegében ezekben a filamentumokban zajlik a csillagkeletkezés, ezekben jelennek meg a felhőmagok, a csillagkeletkezés első lépcsői, a gravitációs összehúzódás hatására. Ezt a szerkezetet mind a nagyobb sűrűségű, molekuláris csillagközi anyagban, mind a kisebb sűrűségű, galaktikus cirrusfelhőkben sikerült megfigyelni.

A csillagok körüli korongok rendkívül fontos szerepet játszanak a csillag- és bolygókeletkezésben. Korai életszakaszukban anyagot juttatnak a csillagra, növelve annak tömegét, később pedig ebben a korongban jönnek létre a bolygók a csillag körül. A bolygókeletkezés folyamatának végén a csillag körül egy olyan korong marad, amely port és bolygókezdeményeket tartalmaz, és amelyekből újabb bolygó már nem tud összeállni – a korongok életének ezt a fázisát nevezzük törmelékkorongnak. Bár újabb bolygók már nem jönnek létre, a törmelékkorong-állapot rendkívül sok információt szolgáltat a rendszer fejlődéséről és a mögötte rejlő bolygórendszeréről. Ezeket a rendszereket korábban például a Spitzer-űrtávcső méréseivel annak alapján lehetett azonosítani, hogy a csillag a közép-, illetve távoli-infravörös tartományban fényesebb volt a látható tartománybeli mérések alapján ezeken a hullámhosszakon vártnál (annak idején az IRAS is így fedezte fel az első törmelékkorongot a Vega körül). A koronggal körülvevett rendszerek távolsága

és a korongok mérete (<100 CSE [csillagászati egység]) miatt ezeket a rendszereket a Spitzerrel nem lehetett felbontani, vagyis olyan felvételt készíteni, amelyen a csillag a korongtól elkülönülten látszik (a látható tartományban a korong a visszavert csillagfényben látható, ami a csillagtól még nehezebben különíthető el, mint az infravörös tartományban, ahol a korong hőszugárzását észleljük). A Herschel jobb térbeli felbontása lehetővé tette, hogy számos ilyen törmelék-koronggal övezett rendszert felbontsunk, azaz a korong alapvető tulajdonságait (például: méretét, irányultságát, szerkezetét) ne csak az infravörös többletsugárzásból, hanem közvetlenebb módon tudjuk meghatározni.

A távoli infravörösben óriási előrelépést jelentett részben a PACS-kamerarendszer színeképelemző berendezése, és elsősorban a HIFI-spektrométer, amely eddig nem látott spektrális felbontásával lehetővé tette a vízmolekula vonalainak és egyéb szerves molekulák (például: szén-monoxid, hidroxilgyök) részletes vizsgálatát, amelyek gyakoriak a csillagközi anyagban, óriáscsillagok fotoszférájában és a naprendszerbeli üstökösökben és a bolygók légkörében. Ezek a műszerek hozzájárultak egy új kutatási irány, a távoli infravörös spektroszkópia megszületéséhez, amelyhez a 2010-es évek előtt nem volt meg a technikai háttér. Az egyik legjelentősebb ilyen eredmény az VY Canis Majorishoz kapcsolódott. Ez az egyik legnagyobb ismert csillag a galaxisban, tömege 30–40-szer, átmérője kb. 2000-szer akkora, mint a Napé. A csillag nagy sebességgel veszít anyagot, és jelentős méretű burok veszi körül. Ebben több szerves molekulát sikerült kimutatni (H_2O , SiO , OH), amelyek a csillag szupernóvaként történő majdani felrobbanása után a csillagközi anyagba kerülnek, és beépülhetnek egy következő bolygórendszer égitestjeibe. A HIFI távoli infravörös spektroszkópiai méréseivel a kis méretű 103P/Hartley 2 periodikus üstökösön sikerült kimutatni, hogy a deutérium/hidrogén arány ugyanaz az üstökösben, mint a Föld óceánjaiban, azaz az ilyen üstökösök lehetnek felelősek a földi víz jelentős részéért. Ugyancsak a Herschel műszereivel sikerült kimutatni, hogy a Shoemaker–Levy 9 üstökös 1994-es becsapódása során a Jupiter légkörébe került víz még mindig kimutatható az óriásbolygón.

A Herschel egyik legnagyobb kulcsprogramja a „TNOs are Cool!” program volt, amely mintegy 140 távoli, a Kuiper-övben keringő kis égitestről, kisbolygókról és törpebolygókról készített méréseket, és az egyetlen, amely szisztematikusan, nagyobb mintán naprendszerbeli objektumokat vizsgált. (TNO a Neptunuszon túli, vagyis „transzneptun” objektumok rövid jelölése.) E távoli égitestek alacsony, 30–60 K felszíni hőmérsékletük miatt ideálisak voltak a PACS- és a SPIRE-detektorok számára. Ezen távoli kis égitestek esetében a pályájukon kívül nagyon kevés fizikai jellemzőt ismerünk, még az égitestek méretét és a felszínük fényvisszaverő képességét (albedóját) sem tudjuk pusztán látható tartománybeli mérésekből meghatározni, ahhoz szükségünk van a hőmérsékleti sugárzásuk mérésére is az infravörösben. A mérésekből több, nagy méretű hold létezését is

sikerült előre jelezni törpebolygók (Eris, Makemake) körül, illetve bizonyítékot találni arra, hogy a Naptól ilyen nagy távolságra is valószínűleg laza regolit borítja a kisebb égitestek felszínét, szemben például az óriásbolygók holdjainak felszínén megfigyelhető tömör jegekkel. Az egyedi égitestek jellemzésén kívül ezekből a mérésekből születtek meg az első, valódi, nemcsak becsléseken alapuló méreteloszlások a Neptunuszon túli vidék égitesteire. A méreteloszlás a törmelekkorongok egyik legfontosabb jellemzője, mert arra következtethetünk belőle, hogy az égitestek közötti ütközések hogyan befolyásolták a korong fejlődését – bár ez minden esetben fontos lenne, a Naprendszer az egyetlen bolygórendszer, ahol ez jelenleg közvetlenül megfigyelhető. A „TNOs are Cool!” program méréseiből az is kiderült, hogy a külső Naprendszerben alapvetően kétféle felszín létezik: vannak égitestek, amelyek szürkék és sötétek, és vannak, amelyek vörösek és viszonylag világos felszínűek. Érdekes, hogy azokban az égitestcsoportokban (populációkban), amelyek csak olyan égitesteket tartalmaznak, amelyek a Naptól legalább 40 CSE-re keletkeztek, csak vörös és világos felszínű égitestek találhatóak. Azokban a populációkban pedig, amelyek vegyesen tartalmaznak a Naphoz közelebb és távolabb keletkezett égitesteket, szürke-sötét és vörös-világos felszínűek egyaránt előfordulnak. Ebből arra következtethetünk, hogy a korai Naprendszerben létezett különbség a Naphoz ~20 CSE-nél közelebb (szürke-sötét) és távolabb (vörös-világos) kialakult felszínűek között. Annak megválaszolása, hogy milyen kémiai folyamat hozhatta létre ezt a különbséget, a Neptunuszon túli vidék kutatásának egyik legfontosabb kérdése napjainkban.

A Herschel-űrtávcső zárta le a távoli-infravörös csillagászat aranykorát. Az 1980-as évek második felétől 2013-ig, a Herschel-misszió végéig folyamatosan voltak olyan ESA- vagy NASA-missziók, amelyek ebben a hullámhossztartományban működtek. Jelenleg nincsen olyan előkészítés alatt álló infravörös-űrtávcső, amelyet az elkövetkező évtizedben bocsátának fel – emiatt is óriási a jelentősége a Herschel méréseinek, hiszen azok a közeljövőben megismételhetetlenek lesznek. Az ESA 2018 májusában választotta be a SPICA-missziót a megvalósítandó űrprojektek jelöltjei közé másik két programmal együtt. A SPICA közös japán-európai infravörös-űrtávcső lenne, és kiválasztása esetén is csak legkorábban a 2030-as évek elején lehetne újabb, a távoli-infravörös hullámhosszak megfigyelésére alkalmas eszköz a világűrben.