

**Konkoly Observatory of the  
Hungarian Academy of Sciences**

**Monographs  
No. 6**

# **Űrcsillagászat Magyarországon**

Tudományos konferencia

2009. október 29.

Szerkesztette:

Kelemen János és Szabados László

**Budapest  
KONKOLY  
OBSERVATORY  
2010**

**A kiadást támogatta:**

Magyar Csillagászati Alapítvány

Magyar Asztronautikai Társaság

ISSN 1216-5824

ISBN 978-963-8361-51-6

**Felelős kiadó:**

Dr. Ábrahám Péter

**Műszaki szerkesztő:**

Uhlár Karola

Nyomtatta és kötötte: Prosperitás Nyomdaipari Kft.  
Felelős vezető: Krpanovné Ungcsertészi Éva, Dragan Krpanov

## TARTALOM

<b>Bevezetés</b> .....	5
Kelemen János	
<b>A csillag- és bolygókeletkezés korai fázisai – infravörös-csillagászat</b> .....	6
Ábrahám Péter	
<b>Asztroszeizmológia űreszközökkel</b> .....	14
Paparó Margit	
<b>A Kepler-űrmisszió</b> .....	22
Szabó Róbert	
<b>Hosszú idősorok vizsgálata – avagy mit tanultunk eddig a CoRoT-adatokról?</b> .....	29
Benkő József	
<b>Napfizika űreszközökkel</b> .....	36
Ludmány András	
<b>Gammakitörések</b> .....	40
Balázs Lajos – Horváth István	
<b>Gammaforrások statisztikus vizsgálata</b> .....	48
Horváth István	
<b>Gammakitörések földi megfigyelései</b> .....	56
Kelemen János	
<b>Nagy szögfelbontású rádió-interferometria – űreszközökkel</b> .....	62
Frey Sándor – Gabányi Krisztina Éva	
<b>WMAP pontforrások mint lehetséges űr-VLBI kalibrátorok</b> .....	69
Geréb Katinka	
<b>Gaia – a következő évtized nagy űrcsillagászati projektje</b> .....	74
Szabados László	
<b>A marsi poláris sötét dűnefoltok és lefolyásaik vizsgálata, a DDS-MSO hipotézis</b> .....	80
Horváth András	
<b>Az űrcsillagászat európai útiterve</b> .....	89
Balázs Lajos	





## Bevezetés

1996-ban ünnepeltük a magyar űrkutatás kezdetének – Bay Zoltán nevezetes Hold-radarkísérletének (1946. február 6.) 50. évfordulóját. Az első kísérletünk tehát egy csillagászati objektum aktív vizsgálata volt.

A hazai csillagászat képviselői már az 1950-es években részt vállaltak az aktív űrkutatás hazai elterjesztésében, és az elsők között kezdtek hozzá – 1957 nyarán – egy hazai műholdmegfigyelő hálózat kiépítéséhez. Az MTA Csillagvizsgáló Intézet kutatói ezután évtizedeken keresztül aktív részesei voltak a semleges felsőléggör és ionoszféra műholdmegfigyelésekből kifejlődött kutatásának.

Már az 1970-es években bekapcsolódtunk a Naprendszer égitestjeit vizsgáló űrszondák adatainak feldolgozásába, később pedig már közreműködtünk több jelentős űrvállalkozás (VEGA, Cassini, Rosetta, SOHO) programelőkészítő és adatfeldolgozó munkáiban is. Ezzel párhuzamosan egyre nagyobb mértékben fordult a hazai csillagászok érdeklődése a keringő infravörös-, ultraibolya-, röntgen-, gammasugár-, valamint speciális asztrometriai és fotometriai megfigyelő obszervatóriumok adatainak feldolgozása felé.

Kutatómunkánkat segíti a Magyar Űrkutatási Iroda által nyújtott rendszeres támogatás, melynek révén ma már nemcsak a mért adatok feldolgozására van lehetőségünk, hanem az eszközök és mérési adatok kalibrációjával, a futó és tervezett ESA és NASA programokban vállalt előkészítő és tervező munkával aktív űrtevékenységet is végzünk. Részt vállalunk olyan globális programokban, amelyek teljes földi lefedettségű, követő és kiegészítő észlelési munkát igényelnek.

A hazai űrcsillagászati kutatások eddigi eredményeit és jövőjét kívánta bemutatni a Magyar Csillagászati Alapítvány és a Magyar Asztronautikai Társaság a 2009. október 29-én az ELTE Ortva-teremben megtartott konferencián. Kiadványunk – bár nem tartalmazza az összes előadás és hozzászólás anyagát – alkalmas arra, hogy keresztmetszetét adja az űrcsillagászat legújabb eredményeinek.

Budapest, 2010. május 26.

Kelemen János  
Magyar Csillagászati Alapítvány

## A csillag- és bolygókeletkezés korai fázisai – infravörös-csillagászat

Ábrahám Péter

MTA KTM Csillagászati Kutatóintézete

### Történeti áttekintés

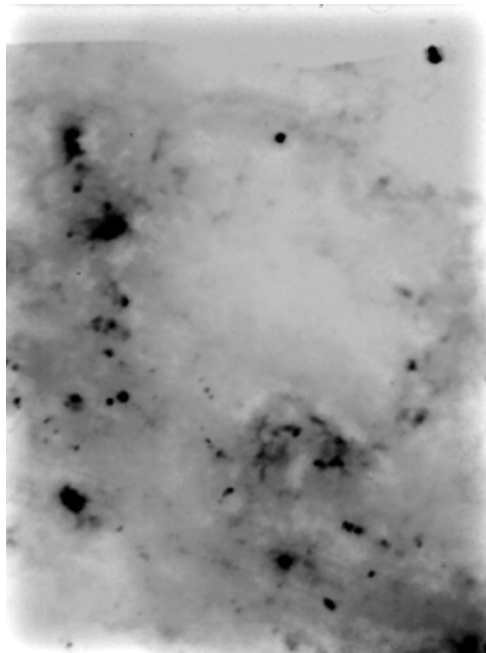
A fiatal csillagok – és keletkezésük színterei, a sűrű csillagközi felhők – vizsgálata a magyarországi csillagászat egyik hagyományos területe, mely az 1970-es évektől kezdve főleg a piszkéstetői Schmidt-távcső nagy látómezejének és objektívprizmás spektroszkópiái lehetőségeinek kihasználásán alapult. Ekkoriban a fő kutatási irányok közé tartozott a csillagközi felhők szerkezetének feltérképezése extinkciós mérésekkel; a felhők távolságának meghatározása Wolf-diagram segítségével; nyílthalmazok katalogizálása; fiatal nyílthalmazbeli kis tömegű csillagok flártevékenységének analízise; valamint erős H $\alpha$ -emissziót mutató T Tauri csillagok azonosítása különböző csillagkeletkezési területeken. A csillagközi anyag és a protocsillagok alacsony hőmérséklete miatt azonban az ilyen típusú vizsgálatokra nem az optikai a legmegfelelőbb hullámhossztartomány. Ezért az 1980-es évek második felében nyitás történt az infravörös tartomány felé, és az MTA KTM Csillagászati Kutatóintézetében elkezdődött az IRAS mesterséges hold infravörös- adatainak feldolgozása, valamint fiatal magyar kutatók részvétele európai szintű infravörös-csillagászati projekteken. Az első hazai infravörös-csillagászati eredmény a Cepheus csillagképben található, mintegy 10 fok átmérőjű, óriási porgyűrű (*1. ábra*) felfedezése volt az IRAS hold mérései alapján (Kun Mária, Balázs Lajos, Tóth Imre, 1987).

1993-tól hosszabb-rövidebb időszakokban több magyar kutató (Ábrahám Péter, Kiss Csaba, Tóth L. Viktor) dolgozott a heidelbergi Max-Planck-Institut für Astronomie-ban, ahol az Európai Űrügynökség *Infrared Space Observatory (ISO)* nevű infravörös-űrtávcsövén működő fotométer, az *ISOPHOT* kalibrálási, adatfeldolgozási és tudományos kérdéseivel foglalkoztak. Hazatérésük után, 2001-ben alakult meg az ESA és a Magyar Űrkutatási Iroda támogatásával a Konkoly Infravörös és Úrcsillagászati Csoport, amely az ISO/ISOPHOT kalibrációjának javítását, valamint a műhold különösen nagy pontosságot igénylő, különleges kihívást jelentő méréseinek kiértékelését és publikálását tűzte ki céljául. A műszerkalibrációban különösen fontos eredményeket sikerült elérni a hosszú hullámhosszú detektorok tranziens viselkedésének leírása, a pontforrások képének (az ún. *point spread function*) jellemzése és az ISOPHOT-S spektrométer fotometriai pontosítása területén. Az ESA-val kötött szerződés keretében a Csillagászati Kutatóintézetben egyedileg, interaktívan kiértékelte ISOPHOT mérések visszakerültek az ISO hivatalos archívumába, ahonnan ma is letölthetők tudományos analízis céljára.

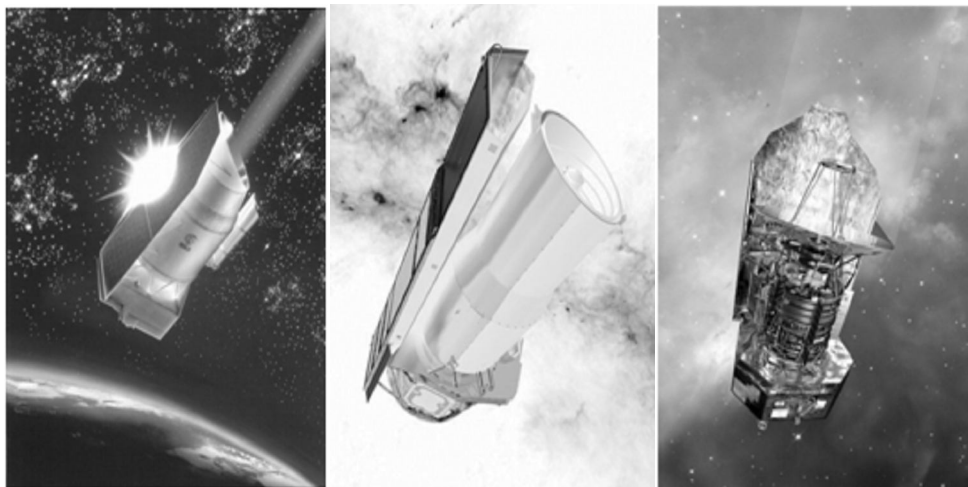
2005-től kezdve a Konkoly Infravörös és Úrcsillagászati Csoport folyamatosan részt vesz az ESA eddigi egyik legnagyobb vállalkozása, a Herschel Space Observatory előkészítő munkálataiban. A Herschel infravörös-űrtéleszkóp 3,5 m átmérőjű tükre az űrbe valaha küldött legnagyobb távcsőtükör. A távcső a távoli-infravörös és a szubmilliméteres hullámhosszakon az eddigiekkel össze nem hasonlítható, különlegesen jó szögfelbontású, érzékeny képeket és színeképeket vesz fel az Univerzum hideg anyagáról. A Konkoly csoport kezdetben a Herschel/PACS műszer földi kalibrációs méréseinek kiértékelésében vett részt, az űrtávcső 2009. májusi felbocsátása óta pedig ugyanezen műszer napi üzemeltetésében, a PACS jeleinek monitorozásában a kalibráció és az adatfeldolgozás finomításához járul hozzá, továbbra is az ESA és a Magyar Űrkutatási Iroda támogatásával.

A Herschel előkészítő fázisával párhuzamosan, 2004-től évente lehetőség nyílt tudományos pályázatok benyújtására a NASA infravörös-űrtávcsövére, a Spitzer Space Telescope-ra. A magyar kutatók, korábbi infravörös-csillagászati tapasztalataiknak köszönhetően, kiemelkedően sikeresen szerepeltek: nyolc elfogadott távcsőidő-igénylésük, közöttük kettő az ún. Rendkívüli Igazgatói

Időkeret terhére, nagyon szép eredménynek számít. A magyar infravörös-csillagászat történetében eddig kiemelkedő szerepet játszó három űrteleszkópot mutatja be a 2. ábra.



1. ábra. Az IRAS mesterséges hold mérései alapján a Cepheus csillagképben felfedezett óriás porgyűrű, a magyarországi infravörös-csillagászat első jelentős eredménye (Kun et al. 1987).



2. ábra. A magyarországi infravörös-csillagászat három fontos űreszköze. Balra: Infrared Space Observatory; középen: Spitzer Space Telescope; jobbra: Herschel Space Observatory.

### Az infravörös sugárzás és csillagászati jelentősége

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 melegedést, elnyelt sugárzást jeleztek. Az *infravörös* („vörös alatti”, magyarul gyakran egyszerűen hő-) sugárzás csak hullámhosszában különbözik a látható fénytől. Míg az utóbbi a 0,3–0,8 mikrométeres színeképtartományt 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- (1–3  $\mu\text{m}$ ), közép- (3–40  $\mu\text{m}$ ) és távoli-infravörös (40–300  $\mu\text{m}$ ) tartományokat. A nagy különbség azonban az optikai csillagászathoz képest az, hogy a földi légkör áteresztése nagyon korlátozott, ezért célszerű 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 (pl. Hawaii), sivatagban (Atacama, Chile), illetve a tervek szerint később az Antarktiszon épülnek.

Mi is a kozmikus infravörös sugárzás forrása? Tudjuk, hogy a csillagok sugároznak ebben a színképtartományban, hiszen a több ezer–tízezer fokos hőmérsékletüknek megfelelő feketetest-sugárzásnak 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 figyelhetők meg, alacsonyabb hőmérsékletük (<2000 K) okán. A még hidegebb exobolygók termikus sugárzásának csúcsa a közép-infravörös tartományba esik, míg a bolygórendszer külső területein található üstökösök és csillagközi porokorongok, valamint a csillagközi porfelhők, amelyek összesűrűsödése által a csillagok kialakultak, már a távoli-infravörösben sugároznak. (Ezen objektumok egy része 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. Fontos csillagászati tény az is, hogy infravörös hullámhosszakon a kozmosz sokkal átlátszóbb is, mint az optikai tartományban. A csillagközi porfelhők részecskéi ugyanis 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 mikrométeresnél kisebb porszemcsék elnyelési és szórási tulajdonságai erősen függenek a frekvenciától. Keresztül láthatunk tehát szinte az egész Tejútrendszeren, közvetlenül megfigyelhetjük a Galaxis egyébként láthatatlan magját, és beleláthatunk a legfiatalabb csillagokat körülvevő sűrű porburkokba is.

A legtöbb, infravörösben fényes égi objektum esetében, bár van némi hozzájárulás a gázatomokból és molekulákból is, főként a porszemcsék termikus sugárzása látható. 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. 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 (l. alább).

## A csillagok születése

Mai elképzeléseink szerint a csillagok molekulafelhőkben, a csillagközi anyag összesűrűsödésével, általában csoportosan keletkeznek, és ez a folyamat a Tejútrendszerben ma is tart. A molekulafelhő összehúzódása során a gravitációs instabilitás határát megadó Jeans-tömeg folyamatosan csökken. Amikor értéke megegyezik a molekulafelhők legsűrűbb felhőmagjainak jellemző tömegével (néhány naptömeg), elkezdődik a magok gravitációs összehúzódása. Amikor a felhőmag közepe olyan sűrűvé válik, hogy már átlátszatlan a hősugárzás számára, a nyomás és a hőmérséklet nőni kezd. Az összehúzódás megáll, és belül kialakul egy, a környezetével nyomásegyensúlyban lévő, ám attól elhatárolódó objektum, a protocsillag. A protocsillagra lényegében a szabadesés sebességével

folyamatosan hull az anyag, és ebben a felhőmag egyre nagyobb sugarú része vesz részt. A csillag ezzel belép az elsődleges anyagbefogási fázisba, melynek fő jellemzője (egyben a protocsillag definíciója), hogy a kisugárzott energia szinte teljes egészében az anyagbefogással, az akkrécióval kapcsolatos gravitációs energiefelszabadulásból származik. A sugárzás a porszemcséken történő többszöri elnyelődés és kisugárzás után az infravörös tartományba konvertálódik, ahol akadálytalanul el tudja hagyni a csillag környezetét. A további fejlődés során, amennyiben a protocsillag tömege elegendően nagy, középpontjában elkezdődik a deutérium-, majd a hidrogénfúzió, és megindul a csillagból kifelé történő gázáramlás, a csillagszél is. A csillag körül pedig már egészen korán kialakul egy lapos por- és gázkorong, amelyből egyrészt tovább spirálozik be az anyag a csillag felszínére, másrészt amely a születő bolygórendszer bölcsője lesz.

### **Protoplanetáris por- és gázkorongok születőfélben lévő csillagok körül**

A fiatal csillagok körüli por- és gázkorongok szerkezete megismerésének egyik legfontosabb eszköze a porszemcsék hősugárzásának analízise. A csillagtól távolodva a korong hőmérséklete csökken, és hősugárzását egyre hosszabb hullámhosszakon bocsátja ki. A korong legbelső része tehát a közeli-, míg a külső hideg területek a távoli-infravörösben adnak jelet. 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 hőmérséklet-lefutása. 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? Nagyon izgalmasak azok a rendszerek is, amelyeknél a távoli-infravörös emisszió 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 alakul ki körülötte.

### **Törmelékkorongok fősorozati csillagok körül**

Az infravörös-csillagászat egyik legváratlanabb felfedezése, hogy idősebb, a Naphoz hasonlóan csillagéletük hosszú, viszonylag eseménytelen „felnettkorát” 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 kifűjják a rendszerből, a nagyobbakat pedig a Poynting–Robertson-hatás révén lefékezik, így azok rövid idő alatt bespiráloznak a csillagba. A por folyamatos utánpótlását a bolygókeletkezés során keletkezett planetézimálok, bolygócsírák, üstökösök ütközései biztosítják. Ezeket az égitesteket kis sugárzó felületük miatt közvetlenül nem figyelhetjük meg, azonban az általuk generált por egységnyi tömegről hatalmas felületet és így mérhető infravörös sugárzást biztosít. A törmelékkorongok szerkezete tehát 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 planetézimálok tekinthetők a második generációnak). A Naprendszernek is ismerjük két porkorongját: a Mars-pályán belüli térrészt 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 méretű égitestek is keringhetnek. A Kuiper-öv égitestjeiről még nagyon keveset tudunk, ez a helyzet azonban lényegesen javulni fog a Herschel-űrtávcső ez irányú 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 törmelékcorong 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.

## **Infravörös-kutatások a Konkoly Infravörös és Úrcsillagászati Csoportban**

### ***Eruptív fiatal csillagok***

Csoportunk egyik legfontosabb kutatási témája olyan fiatal csillagokkal kapcsolatos, amelyek időnként váratlanul kifényesednek (eruptív csillagok). A kitörés oka mai tudásunk szerint az, hogy a csillagkörüli korongból időszakosan a szokásosnál jóval nagyobb mennyiségű anyag hullik a csillagra. A jelenség fizikai magyarázata összefüggésben van a korong szerkezetével, illetve annak rövid időskálájú átrendeződésével, ezért az infravörös hullámhosszakon végzett megfigyelések, amelyek a korong porszemcséinek termikus emisszióját mérik, alapvető fontosságúak. Csoportunk vizsgálta az FU Orionis típusú eruptív csillagok évtizedes fényváltozásait infravörös hullámhosszakon (Ábrahám et al. 2004); feldolgozta az OO Serpentis 1995-2006-os kitörését (Kóspál et al. 2007); különböző műszerekkel követte és értelmezte a V1647 Orionis 2004-2006-os felfényesedését (Ábrahám et al. 2004, 2006; Acosta-Pulido et al. 2008; Mosoni et al., előkészületben), és az ESO Very Large Telescope NaCo műszerével feltérképezte a Par 21 korongján szóródó csillagfény polarizációs eloszlását (Kóspál et al. 2008).

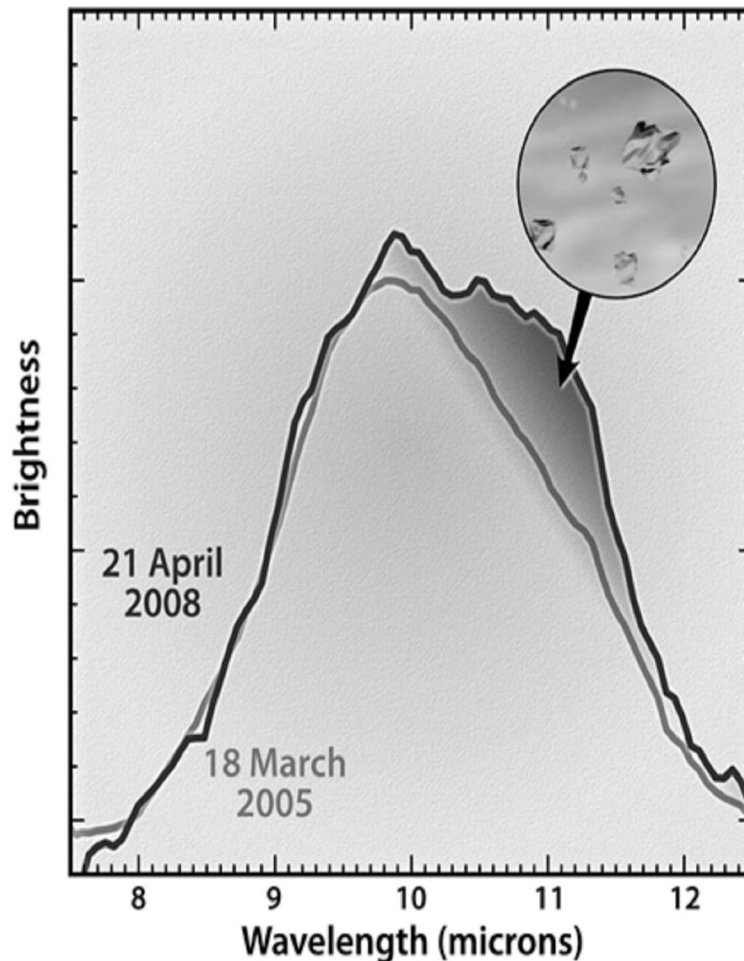
### ***Időbeli változékonyság az infravörösben***

Az, hogy a fiatal csillagok infravörös sugárzása időben változékonnyá válik, csak a legutóbbi években vált elfogadottá. A korongbeli porszemcsék hősugárzása két módon változhat: vagy a központi forrás fénye, tehát a szemcsék megvilágítása változik, vagy pedig a korong geometriája, amely bizonyos területek leárnyékolásához vezethet. Az MTA KTM Csillagászati Kutatóintézetében szisztematikusan megvizsgáltuk az infravörös fényváltozások lehetséges értelmezéseit, és módszerünket alkalmaztuk az SV Cephei fiatal csillagra. Megállapítottuk, hogy az ISO űrtávcső adatai szerint a korong belső peremét alkotó fal korongra merőleges kiterjedése néhány hónapos időskálán változik, valamilyen dinamikai folyamat következtében (Juhász et al. 2007). Hasonló fényváltozások megfigyelésére összeállítottunk egy olyan közép-infravörös színeképatlaszt, amelyben több mint 60 fiatal csillag ISO és Spitzer által észlelt színeképet hasonlítottuk össze, évtizedes fényváltozásokra vadászva. Az objektumok több mint felénél valóban találtunk változékonyságot, amelynek modellezése és értelmezése folyamatban van (Kóspál et al. 2010). Folyamatban van egy monitorozó programunk is a Spitzer űrtávcső műszereivel.

### ***Törmelékcorongok F-színeképtípusú csillagok körül***

Hosszú ideje nyitott kérdés, hogyan kerülhettek a Naprendszer hideg, külső peremvidékén kialakuló fagyos üstökösökbe azok az apró szilikátkristályok, amelyek csak rendkívül magas hőmérsékleten tudnak létrejönni. Az valószínűnek tűnt, hogy a kristályok amorf szilikátszemcsékként kezdték meg életüket ugyanabban a gáz- és porfelhőben, amelyből Naprendszerünk is kialakult, és később, a csillagkörüli korongban alakult át a belső szerkezetük. A folyamat részleteinek megfigyelésére a gyakran kifényesedő EX Lupi nevű fiatal csillag 2008. évi kitörése nyújtott egyedülálló lehetőséget. Az EX Lupi sok szempontból hasonlít arra, amilyen a Nap lehetett 4-5 milliárd évvel ezelőtt. A csillag

néhány évente rendszeresen kifényesedik, ami azzal magyarázható, hogy a csillag körüli korong belső peremén fokozatosan felhalmozódó anyag rövid idő alatt rázúdul a csillagra. A kifényesedések mértéke változhat, az egészen nagy kitörések azonban, mint a 2008-as, csak körülbelül 50 évenként követik egymást. Kutatócsoportunk 2008 áprilisában felvételt készített az EX Lupiról a Spitzer űrtávcső infravörös színeképelemző berendezésével. Bár a csillag már halványodott januári, a kitörés csúcán mért fényességéhez képest, még mindig harmincszor fényesebb volt, mint nyugalomban.



**Crystal Formation in the Disk of an Erupting Star**  
 Spitzer Space Telescope • IRS

NASA / JPL-Caltech / P. Ábrahám (Konkoly Obs., Hungarian Academy of Sciences) ssc2009-11a

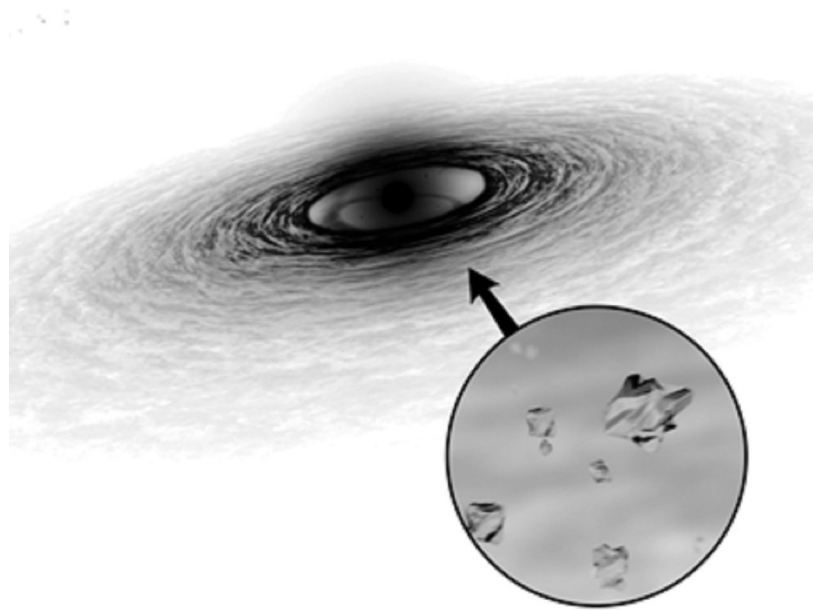
3. ábra. Kristálykeletkezés egy fiatal csillag körül. A két görbe a Spitzer színeképelemző berendezésével az EX Lupi fiatal csillag körüli por- és gázkorongról készített spektrumokat mutatja. A halványabb vonal egy 2005. március 18-i mérés, amikor a csillag még kitörés előtt, nyugalmi állapotban volt. A háromszögletű csúcs a csillagközi térben található amorf szilikátszemcsék jellegzetessége. A sötétebb vonal egy későbbi mérés 2008. április 21-éről, amikor a csillag már kitörésben volt. A vonal alatti szürke terület azt a színeképi változást mutatja, amely az újonnan keletkezett kristályos szilikátszemcséknek (l. kis kép) tulajdonítható. A két színeképet úgy skálázták össze, hogy kihangsúlyozza a forszteritkristályok színeképi jellegzetességeit. A második mérés idején az EX Lupi még mindig 30-szor fényesebb volt, mint nyugalomban (forrás: NASA/JPL-Caltech).

**Kitörések tüzeiben keletkeztek az üstökösök kristályai?**

Amikor az új felvételt összehasonlítottuk a csillagról 2005-ben készített nyugalmi Spitzer-méréssel, a változások szembeötlőek voltak. 2005-ben a csillag körüli korong felszínét amorf szerkezetű szilikát

por alkotta. 2008-ban azonban a színek az amorf porszemcséken kívül szilikátkristályok jelenlétét is mutatta (3. ábra). A kristály valószínűleg forszterit, mely gyakran megtalálható üstökösökben és fiatal csillagok körüli korongokban is. A színek alapján a kristályok forróak voltak, ami azt bizonyítja, hogy magas hőmérsékleten alakultak ki (4. ábra).

Tudomásunk szerint ez volt az első eset, hogy sikerült közvetlenül megfigyelni a kristályképződés folyamatát egy kozmikus objektumban. A kristályok minden bizonnyal apró amorf porszemcsék felhevítésével jöttek létre a csillagkörül korong belső részének felszínén, a kitörésből származó hő hatására. Ez a korábban ismertekhez képest egy teljesen új forogatókönyv arra, hogy hol és hogyan keletkezhetnek ezek az anyagok. Ezért eredményeink felvetik annak lehetőségét, hogy azok a kristályos szemcsék, amelyeket ma a naprendszerbeli üstökösök anyagában látunk, a fiatal Nap ismétlődő kitöréseinek tüzeiben keletkeztek. A kutatásról szóló tanulmányt a Nature folyóirat közölte 2009. május 14-i számában.



4. ábra. Fantáziarajz az EX Lupi fiatal csillagot körülvevő por- és gázkorongról. A kitörés során a korong belső pereméről a központi csillagra hulló anyag felszabaduló energiája felfűti a korongot. Ahol a hőmérséklet a korong felszínén 900 °C fölé emelkedik, az amorf szerkezetű szilikát porszemcsék átkristályosodnak (Ábrahám et al. 2009). (Forrás: NASA/JPL-Caltech)

#### Irodalom:

- Ábrahám, P., Kóspál, Á., Csizmadia, Sz., Kun, M., Moór, A., Prusti, T. 2004a, Long-term evolution of FU Orionis objects at infrared wavelengths, *Astron. Astrophys.*, 428, 89-97
- Ábrahám, P., Kóspál, Á., Csizmadia, Sz., Moór, A., Kun, M., Stringfellow, G. 2004b, The infrared properties of the new outburst star IRAS 05436-0007 in quiescent phase, *Astron. Astrophys.*, 419, L39-L42
- Ábrahám, P., Mosoni, L., Henning, Th., Kóspál, Á., Leinert, Ch., Quanz, S. P., Ratzka, Th. 2006, First AU-scale observations of V1647 Orionis with VLTI/MIDI, *Astron. Astrophys.*, 449, L13-L16
- Ábrahám, P., Juhász, A., Dullemond, C. P., Kóspál, Á., van Boekel, R., Bouwman, J., Henning, Th., Moór, A., Mosoni, L., Sicilia-Aguilar, A., Sipos, N. 2009, Episodic formation of cometary material in the outburst of a young Sun-like star, *Nature*, 459, 224-226
- Acosta-Pulido, J. A., Kun, M., Ábrahám, P., Kóspál, Á., Csizmadia, Sz., Kiss, L. L., Moór, A., Szabados, L., Benkő, J. M., Barrena Delgado, R., Charcos-Llorens, M., Eredics, M., Kiss, Z. T., Machado, A., Rácz, M., Ramos Almeida, C., Székely, P., Vidal-Núñez, M. J. 2007, The 2004-2006 Outburst and Environment of V1647 Ori, *Astron. J.*, 133, 2020-2036
- Juhász, A., Prusti, T., Ábrahám, P., Dullemond, C. P. 2007, Long-term infrared variability of the UX



- Ori-type star SV Cep, *Monthly Notices of the RAS*, 374, 1242-1252
- Kóspál, Á., Ábrahám, P., Prusti, T., Acosta-Pulido, J., Hony, S., Moór, A., Siebenmorgen, R. 2006, The outburst of the eruptive young star OO Serpentis between 1995 and 2006, *Astron. Astrophys.*, 470, 211-219
- Kóspál, Á., Ábrahám, P., Apai, D., Ardila, D. R., Grady, C. A., Henning, Th., Juhász, A., Miller, D. W., Moór, A. 2008, High-resolution polarimetry of Parsamian 21: revealing the structure of an edge-on FU Ori disc, *Monthly Notices of the RAS*, 383, 1015-1028
- Kóspál, Á., Ábrahám, P., Kun, M., Moór, A., Henning, Th., Leinert, Ch., Acosta-Pulido, J. A. 2010, Mid-infrared spectral variability atlas of young stellar objects, *Astrophys. J.*, előkészületben
- Kun, M., Balázs, L. G., Tóth, I. 1987, Giant infrared bubble in Cepheus, *Astrophys. Space Sci.*, 134, 211-217
- Mosoni, L., Sipos, N., Moór, A., Ábrahám, P., Henning, Th., Juhász, A., Kóspál, Á., Kun, M., Leinert, Ch., Ratzka, Th., Schegerer, A., Wolf, S. 2010, Dynamics during outburst - Interferometric observations of the young eruptive star V1647Ori, *Astron. Astrophys.*, előkészületben

## Asztroszeizmológia űreszközökkel

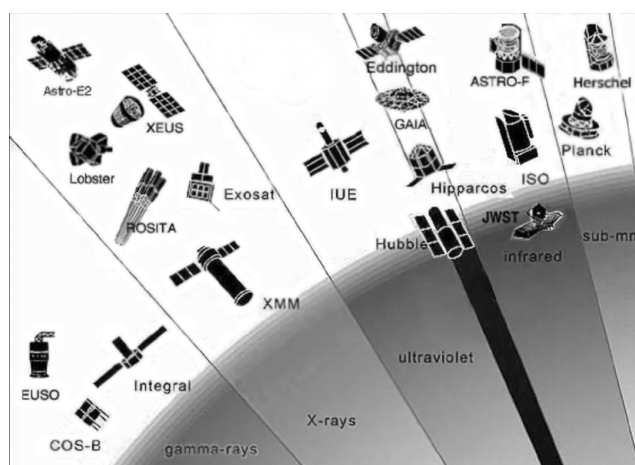
Paparó Margit

MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete

A csillagászat a legősibb tudományok egyike. Persze a tudomány kifejezésen mindig az adott kor ismereteinek megfelelő állapotát értjük. Az azonban vitathatatlan, hogy attól a pillanattól kezdve, hogy a homo sapiens öntudatra ébredt, a csillagok mindig társai voltak, hol mint félelmetes istenek, hol mint segítőkész iránytűk a háborgó tengeren, hol mint a Földön megismételhető energiaforrások, hol mint a jövő nemzedékek esetleges új Napjai.

A korai és közvetlen kapcsolat annak köszönhető, hogy a Föld légköre áteresztí a csillagok fényét abban a hullámhossztartományban, amit a szemünk érzékelni képes. Természetes folyamat volt, hogy az emberek közelebről akarták vizsgálni a távoli csillagokat, ezért erre alkalmas eszközöket, távcsöveket fejlesztettek ki. Az sem meglepő, hogy az első távcsövek, és még évszázadokon át az újabb változatok is, a szem érzékenységi tartományában, az optikai tartományban működtek. Így kellett lenniük, hiszen a távcsöveken keresztül is az emberi szem felfogóképességéé, érzékenységéé volt a fő szerep a korai szakaszban. Később a technika fejlődésével először fényképeket készítettek az éppen aktuális fejlettségű fototechnikával (filmek, fotolemezek). A fejlettség nem is olyan régi szintjét a fotoelektron-sokszorozókra alapozott fotoelektromos fotométerek jelentették. Napjaink technikája, a CCD (Charge Coupled Device) ötvözi a fotoelektron-sokszorozó pontosságát a fotografikus technika nagyobb látómezejével, ami lehetővé teszi sok csillag (illetve más, optikai tartományban sugárzó objektum) egyidejű, pontos megfigyelését immár tudományos célokkal.

A következő lépcsőt szintén a technika fejlődése hozta el. A Föld légkörének nyugtalansága, illetve korlátozott áteresztőképessége a teljes elektromágneses tartományhoz képest elvezetett a távcsövek légkör fölé helyezéséhez. Érdekes módon a technika ezen fejlődési szintjén az optikai csillagászat kissé háttérbe szorult. Az élet motorja, az emberi kíváncsiság arra ösztönzött, hogy az eddig nem látható hullámhossztartományokban fejlesszenek ki új érzékelő eszközöket, és először ezeket juttassák fel az űrbe. Ennek köszönhetően az ESA (European Space Agency – Európai Űrügynökség) évekkel korábbi, ma már nem elérhető honlapján tortaszeletekként elhelyezkedő, a különböző hullámhossztartományokban (milliméter alatti, infravörös, ultraibolya, röntgen, gamma-sugár) használható eszközök között csak nagyon szerény szeletet foglal el az optikai tartomány és az optikai űreszközök.

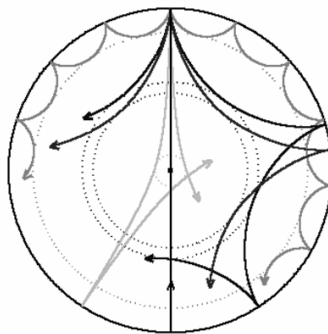


1. ábra. Az ESA asztrofizikai űreszközei a különböző hullámhossztartományokban. Az optikai tartomány csak elenyésző szelet a teljes elektromágneses tartományhoz képest. (<http://sci.esa.int>)

Az optikai tartományban az űreszközök megjelenése szinte az emberi fejlődéstörténetet (a megismerés különböző fokozatait) tükrözi vissza. A Hubble-űrtávcső elsődleges feladata a rácsodálkozás az Univerzum minél távolabbi objektumaira, vagy a közelebbiek minél részletesebb szerkezetének megismerése. A Hipparcos-űrtávcső az iránytű szerepének pontosított változatát, az Univerzumban elfoglalt helyünk pontos meghatározását vállalta fel. A következő lépcső, amíg az ember eljutott addig, hogy miért világítanak a csillagok, évszázadokig tartott. Nem azért, mert csökkent az érdeklődés, hanem azért, mert időbe telt, amíg az egymást követő generációk felhalmozták a tudást. Azt a tudást, amelyhez elengedhetetlenül szükséges volt több generáció élettartama, hogy a csillagok is változnak, fejlődnek és ezt alapvetően a belsejükben lejátszódó folyamatok határozzák meg. A csillagok belseje az a tartomány, amelynek megismeréséhez már nem új eszköz, hanem kitartó, folyamatos, megfigyelés és az emberi elvonatkoztató képesség kellett.

Évszázadok óta ismert, hogy bizonyos csillagok fénye nem állandó, sőt a megfigyelések pontosságának javulása miatt egyre több csillagról derült ki, hogy kismértékben, de változtatják a fényességüket. Ez a fényváltozás nem vezethető vissza geometriai okokra (fedések) vagy kataklizmikus folyamatokra (nóva, szupernóva-robbanások). Ezek a csillag fényének szelíd, békés, ismétlődő ingadozásai az átlagos érték körül. Az emberi elvonatkoztató képesség akkor jelentkezett, amikor ezt az ismétlődő, békés fényváltozást a csillag egyensúlyi állapota körüli rezgések eredményeként azonosította Arthur Stanley Eddington (1926). A csillag belsejében van egy réteg, az ionizációs zóna, amely a kifelé terjedő energiát periodikusan „elnyeli” (ionizáció), majd újból „kibocsátja” (rekombináció). Létrejön a csillagok pulzációja.

Az elmúlt 50 év során a Napunk kétdimenziós fényváltozásának elképesztően pontos megfigyelései vezettek arra a felismerésre, hogy a fényváltozást a rengések milliói hozzák létre, melyek jellemzői külön-külön meghatározhatók a parányi fényváltozásból. Mivel a különböző rengések a csillagok különböző mélységű rétegéig hatolnak, a rengések frekvenciái közötti különbségek a két réteg közötti tartományra adják meg a fizikai állapotra jellemző mennyiségeket (nyomás, sűrűség, hőmérséklet, He-tartalom, hangsebesség). A csillagok többségében a rengések még a Napnál megfigyelteknél is mélyebb rétegekig jutnak el. Ha kellően sok rengés gerjesztődik egy csillagban, és kellően sokat meg is tudunk figyelni (amplitúdójuk a megfigyelési pontosság fölött van), akkor a csillagokat sugárirányban nagy pontossággal letapogathatjuk.



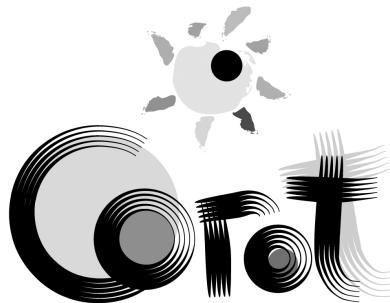
**2. ábra.** A különböző rengések a csillag különböző mélységéig terjednek. Két közeli frekvencia közel azonos mélységig terjed. A frekvenciák mért különbsége a két fordulópont közötti réteg fizikai paramétereit adja. A Nap rengései csak a külső rétegben terjednek. Más csillagokban a mélyebb rétegeket is vizsgálni lehet.

Így született meg a Nap belső szerkezetének vizsgálatára a *helioszeizmológia*. A Napunk azonban csak egyetlen, egy jól körülhatárolt fejlődési állapotban lévő csillag. Mivel az emberi lét sokkal rövidebb időskálájú, mint a csillagok fejlődése, nem tűnik jó megoldásnak, hogy megvárjuk, amíg a Napunk megöregszik, és közelről nézzük meg egy-egy állapotban milyen a belső szerkezete. Nem várhatunk, hiszen azzal a lehetőséggel is számolnunk kell, hogy a Napunk fejlődése során (a vörös óriás fázisban) drasztikusan befolyásolhatja a földi életet. Rendelkezésünkre áll azonban számtalan csillag, amelyek éppen most vannak olyan fejlettségi állapotban, mint a mi Napunk volt

korábban, vagy amilyenben később megismerhetnénk. A csillagok belső szerkezetének vizsgálatával foglalkozik az *asztroszeizmológia*.

Ez vezetett el ahhoz a lépéshez, hogy az optikai tartományban olyan űreszközben gondolkodjanak, amelyik hosszan, folyamatosan, a földi megfigyeléseknél sokkal pontosabban képes megmérni a megfelelően választott csillagok tucatjainak fényességét. Az ESA az Eddington-űrtávcsövet tervezte erre a feladatra, tisztelegve a névvel Eddingtonnak, aki kidolgozta a csillagok pulzációjának elméletét. Csakhogy a korlátozott gazdasági erőforrások és az emberek olthatatlan kíváncsisága az új dolgok iránt ismét háttérbe szorította az optikai űrtávcsövet az infravörös űrtávcsővel szemben. Az Eddington-űrtávcső megépítését évekkal ezelőtt törölték az ESA programjából. Az ESA újabb terveiben jelent meg az Eddington-űrtávcső helyett a PLATO (PLANetary Transits and Oscillations of stars), amely még nem szerepel a régi honlap ábráján. Az Univerzumban elfoglalt helyünk, illetve az Univerzum szerkezeti felépítése olyannyira foglalkoztatja a kíváncsiságunkat, hogy a Hipparcos-űrtávcsőnél is pontosabb mérésekre képes Gaia terve már a régi honlapon is szerepel.

Szerencsére, nem kell még éveket várnunk arra, amíg a PLATO-űrtávcső (remélhetőleg, mivel még nem véglegesített program) lehetőséget ad az asztroszeizmológiára. A Francia Űrügynökség (CNES) zömmel nemzeti programja keretében (noha Spanyolország, Németország, Belgium, Ausztria, Brazília és az ESA is hozzájárult) megalkotta a csillagok szeizmológiai és a Földön kívüli bolygórendszerek bolygóinak mérésére alkalmas eszközt, a CoRoT-űrtávcsövet. Azt az ambiciózus feladatot tűzték ki, hogy a Nap szeizmológiájához hasonló, az asztroszeizmológiához szükséges méréseket végezzenek, összekötve az emberi kíváncsiság azon új területével, hogy egyedül vagyunk-e az Univerzumban. Van-e olyan bolygórendszer, ahol a Földhöz hasonló hőmérséklet- és nyomásviszonyok uralkodnak? Lehetne-e a következő nemzedékeknek más bolygón élni (természetesen, ha a távolságokat le tudjuk győzni)? Az összekötés nem erőltetett, hiszen mindkét esetben hasonló típusú és pontosságú mérésekre van szükség.



3. ábra. A CoRoT-űrtávcső emblémája

### A CoRoT-űrtávcső

A CoRoT (Convection, Rotation and planetary Transit – konvekció, forgás és bolygóátvonulás) űrtávcsövet 2006. december 27-én bocsátották Föld körüli pályára. Elsődleges feladata, mint azt a neve is mutatja, a csillagok konvekciós rétegének és a forgás szerepének jobb megismerése a csillagokban, illetve a Naprendszeren kívüli bolygók felfedezése. Az űrtávcső poláris pályán, közel 896 km magasan kering a Föld körül. A pálya periódusa 6171 másodperc (1 óra 43 perc). Az űrtávcső úgy helyezkedik el, hogy a Nap fénye ne zavarja a megfigyelést, lehetőleg hátulról vagy a legrosszabb esetben oldalról világítsa meg. A technikai megoldást az jelenti, hogy félévenként 180°-kal átforgatják az űrtávcsövet. Így évente két különböző területen, a téli (rektaszcenzió =  $6^h 50^m$ ) és nyári ( $18^h 50^m$ ) területeken lehet megfigyelni a csillagok fényváltozását és a Naprendszeren kívüli bolygók után kutatni. A leghosszabb időtartam, amíg a távcsövet egy adott területre irányítják, 150 nap. Vannak rövidebb, 20-30 napos időtartamú megfigyelések is, a távcső átfordítása előtt és után. Az űrtávcső teljes működési idejét két és fél évre tervezik. A korábbi űreszközök hosszabb élettartama azt jósolja, hogy a CoRoT is tovább üzemel majd, mint a névleges időtartam.

Az űrtávcső teljes látómezeje  $3,05^\circ \times 2,70^\circ$ , amely két egyenlő részre oszlik a két tudományos feladat között, az adott feladatnak megfelelő speciális körülményekkel.

Az asztroszeizmológiai célok a csillagok fényének nagyon gyakori mérését igénylik. Itt 32 másodpercenként történik egy mérés. Ilyen rövid időtartam alatt a megfelelő pontosság eléréséhez szükséges számú fotont csak fényesebb csillagokra lehet összegyűjteni. A fényességtartomány a „szeizmo” területen  $5,5 < V < 9,5$  magnitúdó. A telemetriai kapacitás azonban határt szab az adatátvitelnek. A szeizmo típusú méréseket egy-egy területen csak 10 kiválasztott csillagra lehet a rendelkezésre álló rövid idő alatt lehozni a Földre.

Az „exo” területen az elsődleges cél, hogy minél több csillag fényét vizsgáljuk, hogy nem okoz-e fényességcsökkenést a csillag korongja előtt elhaladó bolygó. A célnak megfelelően minden csillag fényességét mérik, területenként  $\sim 12\,000$  csillagról van szó. Szintén a telemetriai kapacitás határozza meg, hogy a folyamatosan zajló méréseket csak 8 percenként összegezve hozzák le a Földre. Fényes csillagok 8 perces folyamatos mérésénél olyan sok foton gyűlne össze, hogy a CCD telítődne. Az exo területen a fényességtartomány  $11,0 < V < 16,5$  magnitúdó. Több száz csillag esetén gyakoribb mintavételezésre (32 másodperc) is lehetőség van, amit bizonyított bolygófedések követésére használnak. Az exo területeken mért rengeteg csillag kiváló lehetőséget ad nemcsak a bolygók felfedezésére, hanem asztroszeizmológiai vizsgálatokra is, különösen a hosszabb pulzációs periódusú pulzáló csillagokra. A CoRoT-űrtávcső asztroszeizmológiai eredményei reményeink szerint ugrásszerű előrelépést jelentenek a csillagok belső szerkezetének megismerésében.

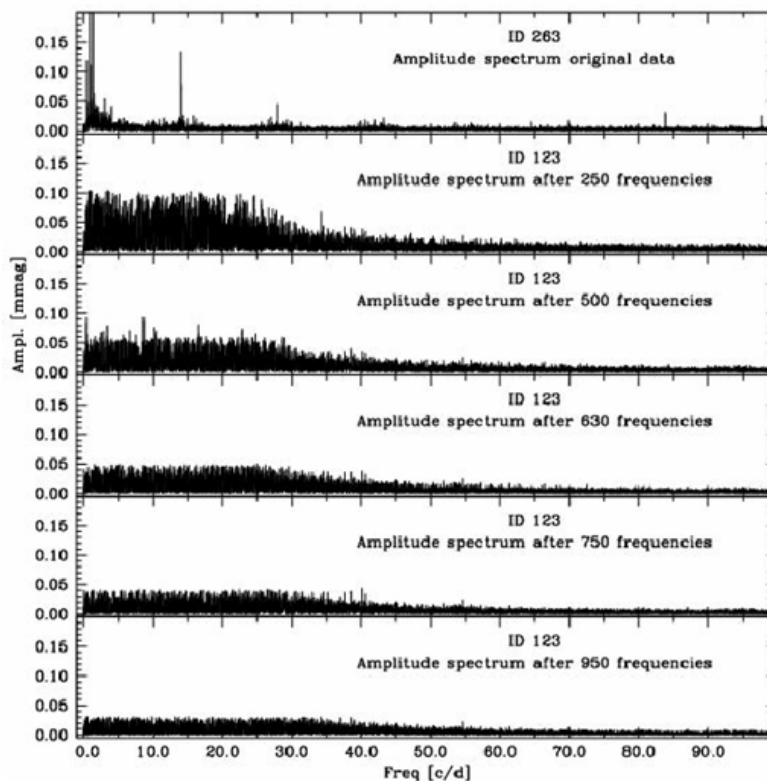
### A CoRoT-űrtávcső első asztroszeizmológiai eredményei

A CoRoT-űrtávcső eddigi mérései csillagok ezreinek fényváltozásáról adnak számot. A szeizmo terület egyenként válogatott, speciális asztroszeizmológiai célpontjai mellett az exo területen mért csillagok 40%-a mutat fényváltozást. Sok közülük olyan kis mértékű, amelynek méréséről földi körülmények között nem is álmodhattunk. Sok közülük geometriai eredetű (fedések), sok változást a napfoltokhoz hasonló csillagaktivitás magyaráz, de szép számmal maradnak olyan csillagok, amelyek a különböző fejlődési állapothoz tartozó belső szerkezetről adnak hírt. Az adatok részletekbe menő feldolgozása időbe telik, és addig sem az adatok, sem az eredmények nem publikusak. Az első publikált eredmények már az asztroszeizmológia területén is megszülettek, melyeket az első nemzetközi CoRoT-szimpoziumon mutattak be. Kiváló összefoglalást adtak az első eredményekről *Sódné Bognár Zsófia és Szabó Róbert Csillagrendések és távoli naprendszerek nyomában* című cikkükben, mely a Természet Világában jelent meg (140. évfolyam, 7. szám, 309. oldal).

A Nap típusú oszcillációk különös jelentősége, hogy a konvekció gerjeszti sztochasztikusan. Kiváló lehetőséget ad a csillagmodellekben a mai napig csak átlagértékkel jellemzett konvekciós zóna pontosabb megismerésére. A konvekció okozta oszcilláció olyan kis mértékű, hogy csak kevéssé emelkedik ki az energiaátvitelt gyorsító konvektív elemek, a granulák véletlenszerű mozgásából. Mivel a granuláció a csillag mágneses teréhez is köthető, több, külön-külön is nehezen vizsgálható fizikai folyamat kapcsolódik ezekben a csillagokban. A Napunk domináns oszcillációja 5 perces karakterisztikájú. A CoRoT-csillagokra talált oszcilláció értékei: HD 49933 – 9,5 perc, HD 181420 – 11,1 perc, HD 181906 – 8,8 perc. Kitöltik az intervallumot a Nap 5 perces oszcillációja és a Procyonra a földi megfigyelésekből kapott 18,5 perces oszcilláció között. Egyértelműen adódnak a csillagok forgási periódusai, esetenként kettős szerkezettel (HD 181906 – 2,9 és 2,6 nap), ami csillagfolt jelenlétére utal a csillag különböző szélességén, és a csillag egyenlítőjével párhuzamos rétegeinek differenciális rotációját jelzi. Minden csillagra meghatározták a gerjesztett módusok közötti reguláris frekvenciakülönbséget (a leghosszabb adatsorokra 75–87,5 mikroHz tartományban). A gerjesztett módusok amplitúdói 3,26–4,02 ppm értékűek, egy nagyságrenddel kisebb hibával.

A CoRoT-űrtávcső egyik fő asztroszeizmológiai feladata a különböző fejlettségi fokú, különböző forgási sebességű Delta Scuti csillagok vizsgálata. Miért is ilyen kiemelt jelentőségűek ezek? A Delta Scuti csillagok a HR diagramon a Naphoz közel helyezkednek el. Azt várhatnánk, hogy felépítésük nagyfokú hasonlóságot mutat a Nappal, így a Napra jól működő modelleknek a Delta

Scuti csillagokra is alkalmasaknak kell lenniük. A napmodell azonban nem működik a Delta Scuti csillagokra. A fő különbséget az okozza, hogy a Delta Scuti csillagoknak a magjuk is konvektív, míg a Napban csak külső konvektív zóna van. Az oszcilláció gerjesztő mechanizmusa is más. A Delta Scuti csillagoknál az ionozációs zóna kappa (opacitási) mechanizmusa játszik szerepet, ellentétben a Nap típusú oszcilláció konvekcióra alapozott sztochasztikus gerjesztésével. A CoRoT-úrtávcső adatai a Delta Scuti csillagok esetén adják a legzavarbaejtőbb eredményeket.



4. ábra. A Delta Scuti csillagok mutatják az eddigi legzavarbaejtőbb eredményt. A Földön megfigyelt néhány gerjesztett rengéshez képest rengés rengés hátán jelentkezik ezekben a csillagokban. Ha függetlenek, akkor a csillagok finomabb felületi képét tudjuk megfigyelni, mint amit vártunk.

A Delta Scuti csillagok földi megfigyeléséhez képest (10–90 frekvencia), most frekvenciák százait köthetjük a CoRoT által vizsgált Delta Scuti csillagokhoz (HD 174936 – 422, HD 50844 – ~1000). A HD 50844 csillag eredeti fényváltozásai  $\pm 30$  mmag tartományba esnek. 250 frekvencia levonása után a fényváltozás még mindig  $\pm 4$  mmag. Ezer frekvencia eltávolítása után is még  $\pm 1$  mmag reguláris változást mutat a maradék fénygörbe.

Noha a Delta Scuti modellek jóslták számos kis amplitúdójú gerjesztett módus jelenlétét, de nem reméltük a megfigyelhetőségüket. Nem a kis amplitúdó miatt, hanem a csillagfelszín túl sok, túl kicsi darabjának ellentétes mozgása következtében létrejövő kioltási effektus miatt.

A CoRoT első Delta Scuti eredményei azt sugallják, hogy a csillag sokkal kisebb felszíni effektusait is meg tudjuk figyelni, mint azt korábban gondoltuk. A végleges következtetést több Delta Scuti csillag CoRoT-adatainak analízise alapján lehet meghozni. Az egyes csillagokra kapott eredményeknek azt kell megerősíteni és egyértelművé tenni, hogy a nagyszámú megfigyelt frekvencia önálló, független rengésekhez kapcsolódik, vagy a független rengések kölcsönhatásaként létrejövő kapcsolódási frekvenciák emelik meg a megfigyelt frekvenciák számát. Csak a független rengések frekvenciái alkalmasak a csillagok belső szerkezetének meghatározására.

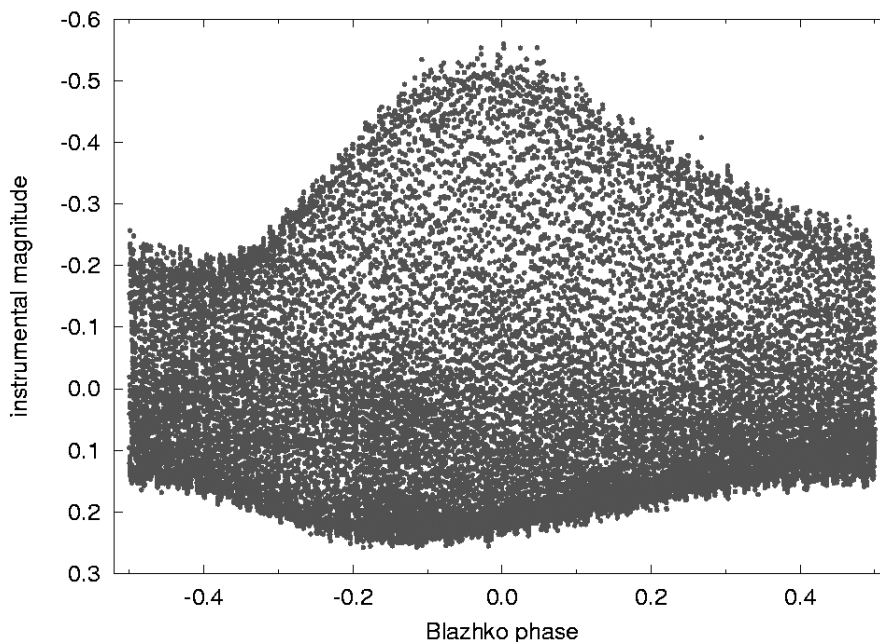
Hasonlóan nagyszámú rengés gerjesztését lehet azonosítani a Gamma Doradus csillagokban is. Az ugrás itt még nagyobb, a Földről meghatározható néhány frekvenciához képest közel ezer

frekvencia található a CoRoT-adatokban. Figyelembe véve, hogy nagyon sok Gamma Doradus csillagot mért a CoRoT-űrtávcső, csak idő kérdése, hogy az első eredmények letisztuljanak.

Noha a CoRoT-űrtávcső megfigyelt egy Delta Scuti csillagot, amelyet a magyar CoRoT csoport (HAG – Hungarian Asteroseismology Group, Magyar Asztroszeizmológiai Csoport, 5. ábra) fedezett fel az előkészítő munka során, a magyar csoport mégis az egyszerűbb pulzációt mutató RR Lyrae csillagok CoRoT-adatainak a feldolgozásával kezdte a tevékenységét (6. ábra). A döntés oka a földi és a CoRoT-adatok minőségének különbsége. Az űradatok specialitásait (I. Benkő József cikkét e kötetben) meg kell tanulni ahhoz, hogy érdemi következtetéseket lehessen levonni az adatok analízise során.

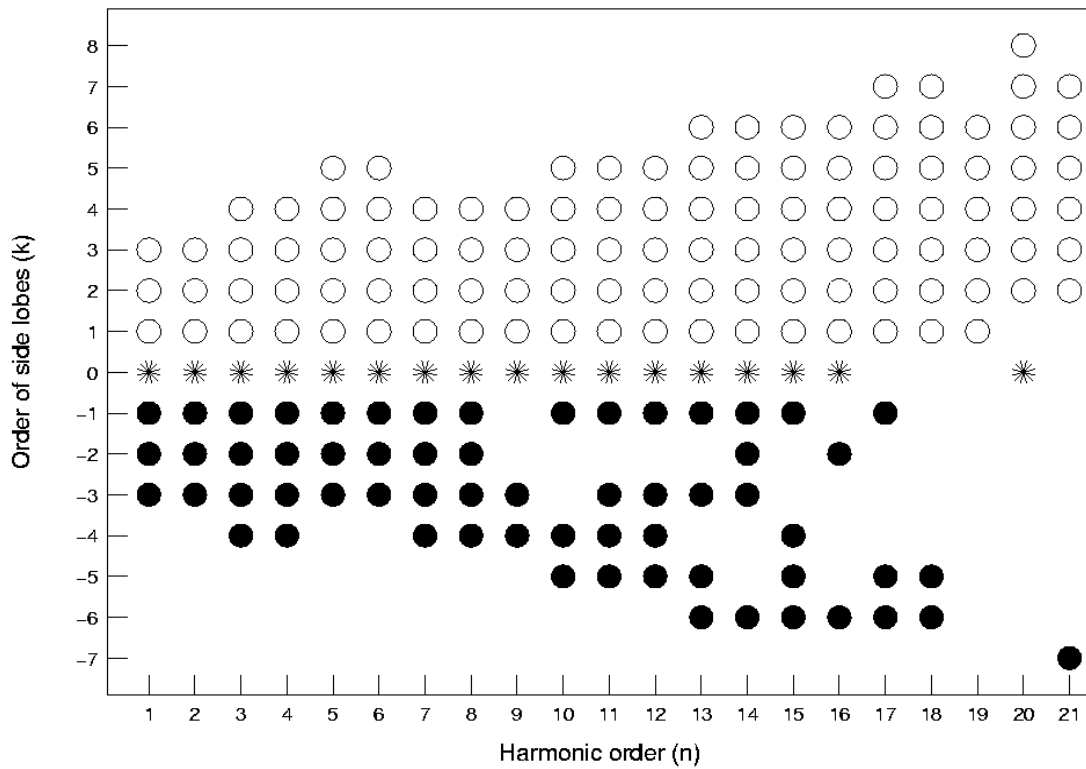


5. ábra. A magyar CoRoT csoport emblémája a pulzáló csillag körül röpködő boszorkány. A csoport angol nevének rövidítése (HAG) magyarul boszorkányt jelent.

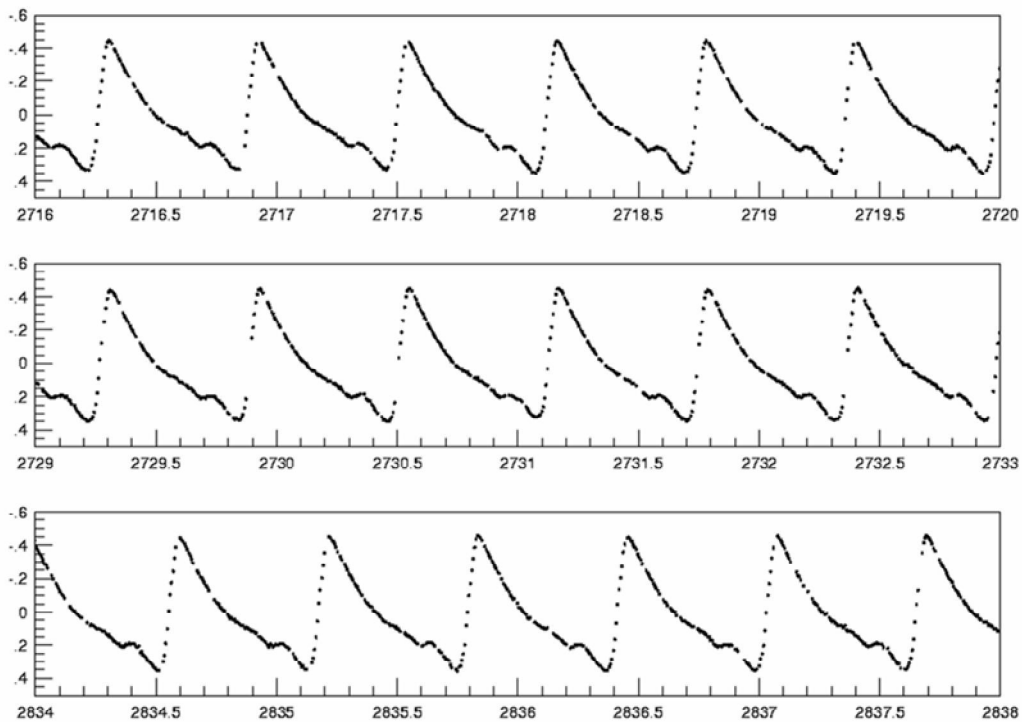


6. ábra. Domináns amplitúdó- és fázismodulációt mutató Blazhko-effektusos csillag Blazhko-periódus szerint összetekert fénygörbéje.

A CoRoT-adatok alapján az RR Lyrae csillagok többsége (egy nem nagy minta kb. 80 %-a) mutat Blazhko-effektust, azaz amplitúdó és/vagy fázismodulációt. Minden csillagra meghatároztuk a pillanatnyi periódust a Blazhko-ciklus alatt. Teljesen új koncepcióként, a telekommunikációban alkalmazott formalizmust használtuk a Blazhko-jelenség leírására, ami egy nagyságrenddel csökkenti az adatokból meghatározandó szabad paraméterek számát. Domináns amplitúdó- és fázismodulációt mutató RR Lyrae csillag viselkedését 5 Blazhko cikluson át vizsgáltuk.



7. ábra. Az amplitúdó- és fázismoduláció miatt jelentkező oldalcsúcsok eddig nem ismert komplex szerkezetét sikerült kimutatnunk a fő periódus és a felharmonikusok körül.



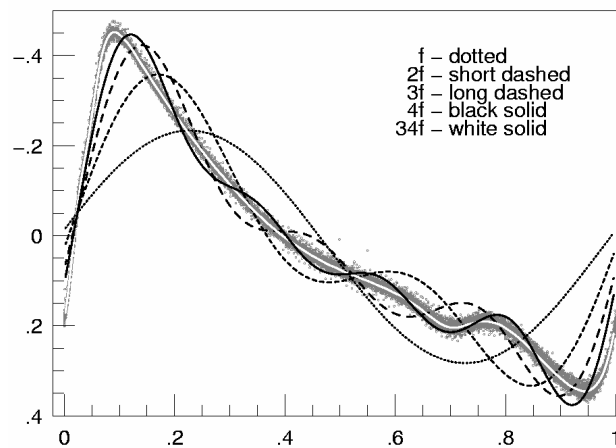
8. ábra. Egy monopériodikus RR Lyrae csillagot hasonló minőségben 150 napig folyamatosan mérte a CoRoT-űrtávcső. A fényváltozás legfeltűnőbb jellegzetessége a fényesség minimuma előtt jelentkező kifényesedés (bump).



A modulációk következtében megjelenő oldalcsúcsok nagyon komplex szerkezetét (triplet, kvintuplet, szeptupleten túl) határoztuk meg nemcsak a fő modulációs periódusra, hanem a felharmonikusokra is (7. ábra).

Monoperiodikus RR Lyrae csillag 150 napos folyamatos megfigyelésének egy szeletét mutatja a 8. ábra. A leszálló ágon megjelenő kifényesedés (bump) kapcsolatát vizsgáltuk a pulzáció felharmonikusaival.

A feltehetően a csillag légkörében, a pulzáció nemlineáris természete miatt létrejövő lökéshullámhoz kapcsolódó kifényesedés időtartamát a pulzációs periódus hetedrészéhez (a hetedik felharmonikushoz) lehet kapcsolni. A pulzáció nagyfokú nemlinearitását mutatja, hogy a pulzációs periódus és még az első néhány felharmonikus illesztése sem adja vissza a megfigyelt fényváltozást. A fő periódus és 33 felharmonikusának az együttes hatása szükséges a fényváltozás tökéletes leírásához (9. ábra).



**9. ábra.** Monoperiodikus RR Lyrae csillag fénygörbéjének tökéletes illesztéséhez a pulzációs periódus mellett 33 felharmonikusát is figyelembe kell venni (fehér vonal). A fekete pontozott vonal a fő periódust, míg a különböző hosszúságú szaggatott vonalak az első három felharmonikus hatását mutatják. A negyedik harmonikus majdnem, míg a hetedik harmonikus pontosan leírja a kifényesedés időtartamát.

A CoRoT-űrtávcső megfigyelési pontossága a hagyományos vizsgálati módokon túl új lehetőségeket nyit. Új módszerekkel új területekre vezeti a kíváncsiságunkat. Az előzetes eredményeken túl számos új, időnként meglepetésekkel teli, nem várt eredményekre számíthatunk a következő években a CoRoT adataiból.

**Irodalom:**

Benkő, J. M., Paparó, M., Szabó, R., et al., 2009, AIP Conf. Ser., 1170, 273  
 García, R. A., Régulo, C., Samadi, R., et al., 2009, A&A, 506, 41  
 García Hernandez, A., Moya, A., Michel, E., et al., 2009, A&A, 506, 79  
 Gaulme, P., Appourchaux, T., & Boumier, P., 2009, A&A, 506, 7  
 Paparó, M., Szabó, R., Benkő, J. M., et al., 2009, AIP Conf. Ser., 1170, 240  
 Poretti, E., Michel, E., Garrido, R., et al., 2009, A&A, 506, 85  
 Szabó, R., Paparó, M., Benkő, J. M., et al., 2009, AIP Conf. Ser., 1170, 291

## A Kepler-űrmisszió

Szabó Róbert

MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete

2009. március 7-én indult útjára a NASA Kepler-űrtávcsöve, melynek elsődleges célja a lakhatósági zónában keringő, Földhöz hasonló exobolygók kimutatása fotometriai (tranzit) módszerrel. A program lényeges eleme a csillagok szeizmológiai vizsgálata, melybe Intézetünk is bekapcsolódott. A tudományos célkitűzések és az első eredmények mellett a misszió előkészítésében és földi támogatásában végzett magyar hozzájárulást is bemutatjuk.

### Bevezetés

Napjainkban az asztrofizika egyik legaktívabb területe és motorja a Naprendszeren kívüli bolygók és bolygórendszerek felfedezése, kialakulásuk és fejlődésük vizsgálata. A földről végezhető, periodikus radiális sebesség-változásra épülő exobolygó-keresési módszer mellett a fotometriai, azaz a tranzitok kimutatásán alapuló metódus is egyre nagyobb szerephez jut. Ez utóbbi súlypontja a kisméretű földfelszíni távcsöveket tartalmazó rendszerekről az űreszközökre tevődik át. Ennek a folyamatnak jeles képviselője a francia–európai CoRoT-műhold, eddig 7 exobolygó-felfedezéssel. A NASA hasonló, még ambiciózusabb Discovery-programja, a Kepler, 600 millió dolláros költségvetéssel indult (<http://kepler.nasa.gov/>). A Kepler elsődleges célpontjai a Naphoz hasonló csillagok körül, a lakhatósági zónában keringő – akár éves keringési periódusú – fedési (kőzet)bolygók. Mindkét említett űrprogram jellemzője, hogy a fotometriai exobolygó-keresés követelménye, az ultrapontos fényességmérés asztro-szeizmológiai célokra is kitűnően használható.

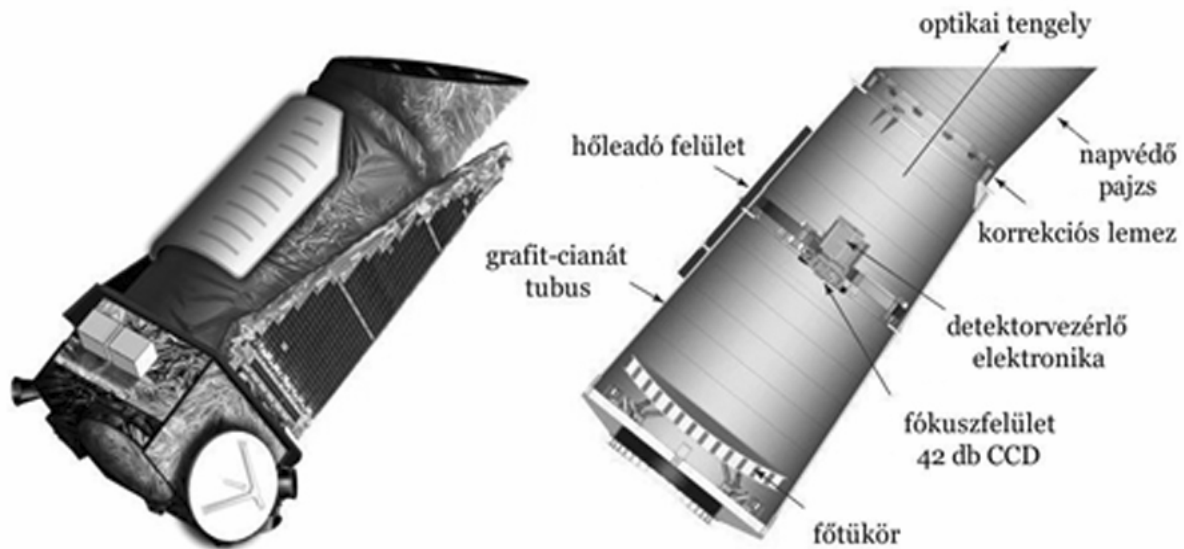
A Kepler tudományos céljának megvalósításához egyrészt nagyszámú ( $\sim 10^5$ ) csillag folyamatos megfigyelését kell biztosítani, másrészt extrém pontos és éveken keresztül stabil fényességmérésre van szükség. A követelmény 20 ppm (part per million, milliommód rész) fotometriai pontosság egy Föld-méretű planéta 12 magnitúdós, Naphoz hasonló (G2V) csillag előtti, 6,5 óráig tartó átvonulása alatt. A műszernek (és az adatredukciós lépéseknek) képesnek kell lenniük az évenkénti egyetlen,  $10^{-4}$  relatív fényességcsökkenést jelentő tranzit kimutatására is.

### A Kepler-űrtávcső

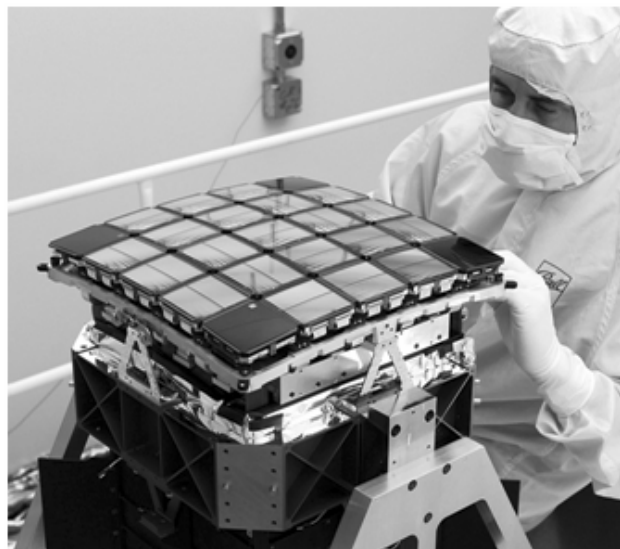
A fenti kritériumokat teljesítő rendszer felépítése a következő (1. ábra): A műszer a pontos fotometria kivitelezésére épített egyetlen nagy fotométernek fogható fel. Optikáját tekintve egy 1,4 méter átmérőjű F/1-es nyílászórányú, 95 cm szabad apertúrájú Schmidt-teleszkóp, mely a valaha épített kilencedik legnagyobb Schmidt-távcső. Főtükre 85%-kal könnyített, extrém alacsony hőtágulási együtthatójú üvegből készült. A fókuszában elhelyezett 42 db 2200x1024 pixeles CCD-chip (2. ábra) 105 négyzetfokos terület egyidejű leképezését teszi lehetővé. Az észlelések fehér fényben, a 430-840 nm (FWHM) közötti hullámhossztartományban történnek. Sem színszűrő, sem a detektorokat védő zár (shutter) nincs az optikai útban. A Kepler egyetlen területet észlel folyamatosan (3. ábra), melynek középpontja a RA:  $19^{\text{h}}22^{\text{m}}40^{\text{s}}$ , DEC:  $44^{\circ}30'00''$  ( $l=76,32^{\circ}$   $b=+13,5^{\circ}$ ) koordinátákkal jellemezhető, és a Cygnus–Lyra csillagképek irányába esik. A fotometriai stabilitást és a terület állandó láthatóságát 372,5 nap keringési idejű, Nap körüli, ún. Earth-trailing pálya (4. ábra) garantálja, stabil termikus és sugárzási környezetet biztosítva az űreszköznek.

A tudományos program tervezett tartama 3,5 év, ami kedvező eredmények és pénzügyi háttér esetén akár 2,5 évvel is meghosszabbítható. Ez esetben a Kepler a nominális élettartama után is a fent említett területet fogja tovább észlelni. A folytonos energiaellátás érdekében évente négyszer  $90^{\circ}$ -os rotáció történik, ezáltal a napelemek mindig a Nap irányába néznek. A Kepler

bolygókereséshez és csillagszeizmológiához használt célpontjai 9–16 magnitúdó<sup>1</sup> közé esnek, kivételes esetben azonban 7 magnitúdós csillag fotometriájára is van mód, a Guest Observer programban pedig akár 20 magnitúdós objektumok mérése is megoldható. A csillagok képei kb. 4"-re vannak defokuszálva, a jobb jel/zaj arány eléréséhez. A szaturáció elkerülése miatt 6 másodpercenként történik a kiolvasás, a fénygörbék közül néhány 1 perces (short cadence, SC), a többség pedig 30 perces integrációs időnek megfelelő összegezéssel (long cadence LC) tárolódik.



1. ábra. A Kepler-űrtávcső felépítése



2. ábra. A Kepler detektorrendszere földi tesztelés közben

Az adatok letöltése, valamint a vezérléshez szükséges parancsok és az új targetek feltöltése havonta egyszer történik. Mivel 30 napig az összes adatot nem tudják tárolni, sem letölteni, ezért csak előre kiválasztott objektumok pixeljei (az összes pixel kb. 5%-a) tárolódnak, ezt tömörítik, majd töltik le periodikusan. Időnként, tesztelési céllal a teljes látómező minden pixelét eltárolják.

Az 1. táblázat a hasonló programot folytató CoRoT és a Kepler legfontosabb jellemzőit hasonlítja össze.

<sup>1</sup> A fényességek a Kepler által megfigyelt hullámhossztartományban mért magnitúdók.

## A Kepler-misszió

A 2. táblázatban a legfontosabb eseményeket tüntettük fel időrendi sorrendben. A Kepler alapvetően három különböző kategóriába eső célpontot észlel. Ezek: a) bolygókeresésre használt, b) asztroszeizmológiai és c) Guest Observer célpontok. A Kepler által észlelt adatok nagy része átlagosan 1 év védett időtartam után válik nyilvánossá.

Jellemző	CoRoT	Kepler
Főtükör szabad átmérője	27 cm	95 cm
Teljes tömeg	630 kg	1039 kg
Optikai elrendezés	afokális teleszkóp	Schmidt-rendszer
Detektor-rendszer	4 db e2v CCD-chip, 13,5 μm	42 db e2v CCD-chip, 27 μm
Összes pixelek száma	16 megapixel	95 megapixel
Színek	prizma	nincs
Látómező	2,7 x 3,5 fok, változtatható	105 négyzetfok, fix
Terület	Monoceros / Aquila, Serpens Cauda	Cygnus–Lyra
Folyamatos észlelés hossza	150 nap / 50 nap	3,5 év (+ 2,5 év)
Felbocsátás időpontja	2006. december 27.	2009. március 7.
Felbocsátás helye	Bajkonur, Kazahsztán	Cape Canaveral, FL, USA
Pálya jellege	Föld körüli, poláris	Nap körüli, Earth-trailing
Űreszköz keringési periódusa	103 perc	372,5 nap

1. táblázat. A CoRoT és a Kepler jellemzőinek összehasonlítása

esemény	időpont
A NASA kiválasztja a Keplert	2001. december 21.
Felbocsátás (Delta II hordozórakéta)	2009. március 7. 03:49:57 UT
Tubusfedő leválása	2009. április 7.
Első fény rögzítése	2009. április 8.
Pontos fókuszbeállítás	2009. április 24.
Tudományos megfigyelések kezdete	2009. május 12.

2. táblázat. Kepler-kronológia

- a) A főprogram 150000, főként késői (F-K) fősorozati csillag folyamatos megfigyelését jelenti. Az elsődleges cél a Földhöz hasonló, lakhatósági zónában keringő exoplanéták tranzitjainak detektálása, ezért ezek a célpontok a misszió teljes élettartama alatt folyamatos monitorozást igényelnek. A célpontlista kisebb arányban korai fősorozati csillagokkal bővült, ezek összehasonlításra használhatók. A komplex fényváltozást mutató, és/vagy óriáscsillagnak bizonyuló targetek fokozatosan kikerülnek a programból. Mintegy 1000, jó jel/zaj viszonyú vörös óriáscsillag asztrometriai referenciaként fog szolgálni. A programnak ezt a részét a PI (William Borucki) és a Kepler Science Team kutatói irányítják.
- b) Az asztroszeizmológiai célpontok kettős célt szolgálnak. Egyrészt a – Kepler által felfedezett – bolygóval rendelkező csillagok fizikai tulajdonságainak pontosítását teszik lehetővé, másrészt a Hertzsprung–Russell-diagram minden szegletében jelenlévő pulzáló változócsillagok jobb megértését fogják elősegíteni. Mintegy 4000 ilyen csillag lesz a misszió folyamán. Ebből több mint

500 csillagot 1 perces mintavételezéssel észlel a Kepler a misszió elején, később ezek helyét fokozatosan a bolygóval rendelkező csillagok fogják átvenni. Az ultrapontos Kepler-űradatok asztroszeizmológiai kiaknázására jött létre a nemzetközi Kepler Asztroszeizmológiai Tudományos Konzorcium (KASC) (l. <http://astro.phys.au.dk/KASC>), amely több mint 350 kutatót tömörít. Az egyes munkacsoportokat (melyek több alcsoportra tagolódnak, jellemzően: földi támogatás, adatfeldolgozás, modellezés) a 3. táblázatban soroltuk fel a hozzájuk tartozó, kezdeti időszakot jellemző célpontszámmal együtt. A táblázatban vastagon szedtük azokat a munkacsoportokat, ahol

- a csoportot (Mirák: Kiss László, Cefeidák: Szabó Róbert) vagy

- annak valamelyik alcsoportját (RR Lyrae – elméleti modellezés alcsoport, Szabó Róbert) magyar kutató vezeti.

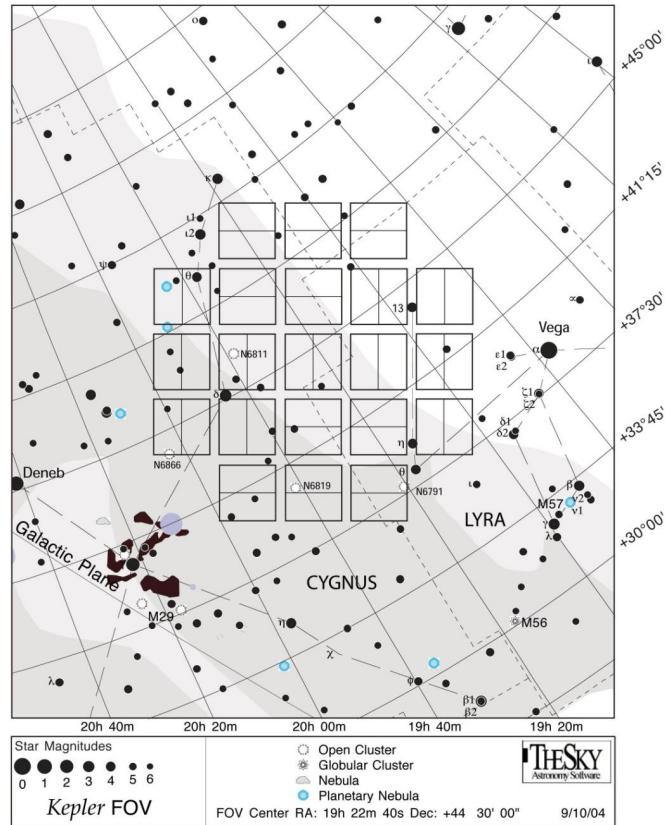
Az asztroszeizmológiai célpontok kiválasztása, jelölése is a KASC feladata. Az első időszakban survey jelleggel mértük fel a legérdekesebb változócsillagokat, 2010-től pedig a kiválasztott célpontok specifikus vizsgálatai kezdődnek meg. Ebben a szakaszban rendkívül eredményesen vettünk részt. A cefeida, Mira és RR Lyrae csillagtípus célpontjavaslatait is csoportunk vezetésével nyújtottuk be, s ezek túlnyomó többségét elfogadták. A célpontok kiválasztásáért, javaslatáért és tudományos indoklásáért csoportvezetőként Intézetünk munkatársai lesznek felelősek. Ehhez az eddigi mérések feldolgozásán kívül elengedhetetlenek a kiegészítő, földi megfigyelési adatok is.

A Kepler asztroszeizmológiai programja nem pályázható megfigyelési időszleteket biztosít a kutatóknak, hanem a célpontok kiválasztása egyedül az űradatokra és a földi támogatás révén elérhető egyéb információkra alapozva kialakított tudományos indoklás alapján történik. A célpontok dinamikusan változtathatóak, így közvetlenül, aktívan alakítjuk a Kepler megfigyelési programját. Az MTA KTM CsKI kutatócsoportja azonban nemcsak az előkészítő munkába és a célpontkiválasztásba kapcsolódott be, hanem az adatfeldolgozásban, a földi támogatásban és az adatok értelmezésében és modellezésében is aktív szerepet játszik.

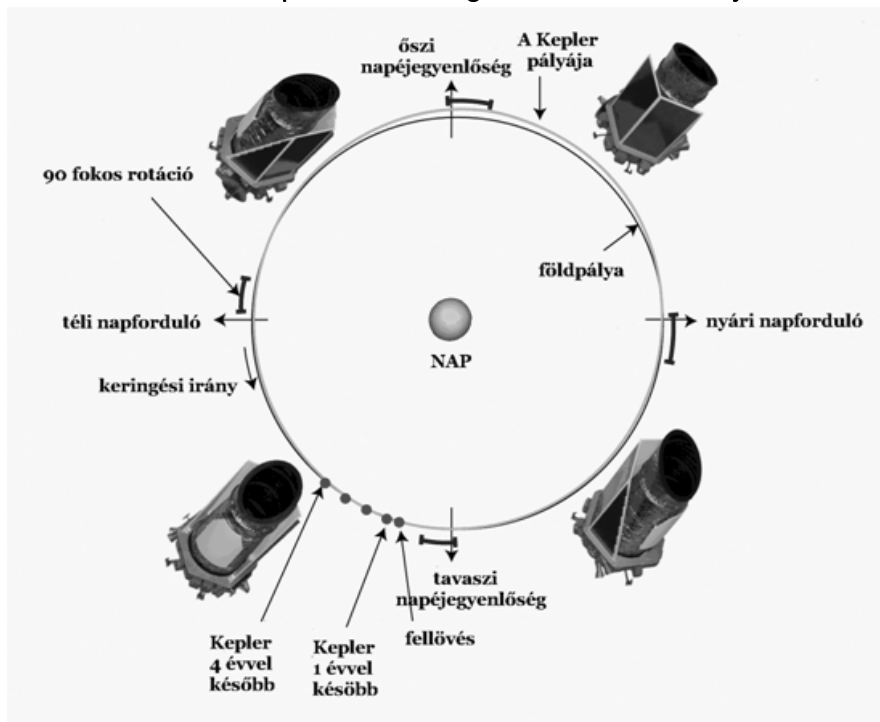
- c) Az időről időre meghirdetett Guest Observer (GO) program a Kepler látómezejébe eső egyéb pontszerű és kiterjedt asztrofizikai objektumok (pl. aktív galaxismagok, nóvák, törpenóvák stb.) nagy pontosságú fotometriai vizsgálatát célozza, melyre bárki adhat be pályázatot (l. <http://keplergo.arc.nasa.gov/>). A GO-programban 3000 LC és 25 SC célpont észlelését biztosítják a misszió vezetői. Megjegyezzük, hogy mintegy 15 millió ismert forrás esik a Kepler-mező irányába.

KASC munkacsoport	Csillagok száma
1. Nap típusú oszcillációk	1358
2. Oszcillációk csillaghalmazokban	216
3. Béta Cephei csillagok	28
4. Delta Scuti csillagok	353
5. roAp csillagok	12
6. Lassan pulzáló B-csillagok (SPB)	25
<b>7. Cefeidák</b>	40
8. Vörös óriások	1523
9. Pulzáció fedési kettősökben	105
10. Gamma Doradus csillagok	107
11. Kompakt pulzátorok (fehér törpék, szubtörpék)	50
<b>12. Mirák (és félszabályos csillagok)</b>	315
<b>13. RR Lyrae csillagok</b>	60
14. RV Tauri csillagok	2

3. táblázat. A Kepler Asztroszeizmológiai Tudományos Konzorcium munkacsoportjai (kiemelve az MTA KTM CsKI kutatói által vezetett csoportok és alcsoportok), valamint a célpontok kezdeti száma.



3. ábra. A Kepler által észlelt égbolttrészlet sematikus rajza



4. ábra. A Kepler pályája és a 90 fokos elfordulások helyzete az ekliptika északi pólusa felől

#### A kezdeti és a várható eredmények

A Kepler legelső tudományos eredménye a már ismert, HAT-P-7b jelű fedési exobolygóhoz köthető (Borucki és mtsai, 2009). A Kepler az elsődleges tranziton kívül a másodlagos fedéseket is könnyedén

detektálta nem sokkal a fellövés után rögzített 10 napos adatsor alapján, ezen túlmenően pedig a fedések között folytonos fényességváltozást mutatott ki, ami a bolygó fázisváltozásaival magyarázható. A másodlagos fedés által okozott fényességcsökkenés mindössze  $130 \pm 11$  ppm. Ennek alapján a Kepler teljesítőképessége közel van a specifikációhoz, annak ellenére, hogy az adatredukciós pipeline még nem végleges, annak finomítása a szisztematikus és instrumentális eredetű hibákat tovább fogja csökkenteni. Minden esély megvan tehát az eddigi legkisebb exobolygók felfedezésére.

A Föld típusú bolygók felfedezése mellett a következő célok megvalósítását is kitűzték az exobolygó-programban:

- a Föld típusú bolygók gyakoriságának megállapítása a lakhatósági zónákban;
- ezen bolygók sugár- és pályaméret-eloszlásának meghatározása;
- bolygók vizsgálata több csillagot tartalmazó rendszerekben;
- több bolygót tartalmazó rendszerek feltérképezése;
- a várhatóan sok forró Jupiter fizikai tulajdonságainak vizsgálata (pályaméret, albedó, méret, tömeg, sűrűség);
- a bolygók gazdacsillagai tulajdonságainak meghatározása.

Ha a Földhöz hasonló bolygók gyakoriak, akkor a Kepler akár több százat is felfedezhet belőlük, forró Jupiterből pedig még ennél is többet.

Az asztroszeizmológia is korábban elképzelhetetlen eredményeket szolgáltathat a Kepler-adatok felhasználásával. A szimulációk szerint a szoláris oszcillációkkal foglalkozó munkacsoport képes lesz a csillagok sűrűségét 1%, sugarát 2-3%, tömegét 5%, korát 5-10% pontossággal meghatározni (Creevey, 2009; Kjeldsen és mtársai, 2009), ami a körülöttük keringő bolygók paramétereiről (sugár, sűrűség) és kialakulásáról fog létfontosságú adatokat szolgáltatni. A csillagszeizmológia azonban nem áll meg itt, a csillagok forgását és mágneses ciklusait is tanulmányozhatja a sztochasztikusan gerjesztett p-módusok segítségével (Christensen-Dalsgaard és mtársai, 2009).

A pulzáló változócsillagok szinte minden típusánál új eredmények várhatóak, melyek közül csak néhányat villantunk fel:

- A cefeidák esetében a periódusváltozások és a fénygörbe stabilitásának vizsgálatát, valamint kísérők detektálását teszi lehetővé az újfajta űradatsor. A régóta sejtett nemradiális (Moskalik és Kolaczowski, 2009) és strange módusok (Buchler és Kolláth, 2001) kimutatása is szóba jöhet, a Nap típusú oszcillációk esetleges felfedezése pedig tovább lökést adhat az asztrofizikai távolságindikátorok fontos csoportjának szeizmológiai vizsgálatához.
- Az RR Lyrae csillagoknál a fentiekén kívül remek lehetőséget jelent a pontos és folyamatos adatsor a Blazhko-effektus tanulmányozására: az előfordulási statisztika (Jurcsik és mtársai, 2009), a modulációs jellemzők és hosszú távú változásaik (Sódor és mtársai, 2007) vizsgálatát is tervezzük.
- A klasszikusan nemradiális módusokban pulzáló csillagoknál az egyik legizgalmasabb kérdés a hibrid csillagok tanulmányozása. Ezekben a csillagokban a delta Scuti csillagokra jellemző rövid periódusú p- és g-módusok és a gamma Doradus típus sajátjaiként ismert hosszú periódusú g-módusok is gerjesztettek, segítségükkel a csillag más-más rétegeiről kapunk információt.
- A mirák és félszabályos változók szeizmológiája is lehetővé válik a Kepler segítségével. Az M típusú óriáscsillagokban az oszcillációk szoros kapcsolatban vannak a konvekcióval és a tömegvesztéssel. A sztochasztikusan gerjesztett szoláris oszcilláció frekvenciáinak, amplitúdóinak és élettartamának mérése révén a konvekció és a kappa-mechanizmus kölcsönhatását és a gerjesztésben betöltött szerepét vizsgálhatjuk. A rejtélyes hosszú másodperiódusok (Nicholls és mtársai, 2009) okára is fény derülhet, s a kaotikus viselkedés megfigyelése is elképzelhető ezeknél a nagy luminozitású objektumoknál.
- Fedési kettőscsillagoknál a fedésből nyerhető asztrofizikai információkat kiegészíthetjük az akár mindkét komponensnél külön elvégezhető asztroszeizmológiai analízissel, ami új távlatokat nyit a kettőscsillagok fizikájában.

- Fontos kiaknázni a csillaghalmazokra alkalmazott asztroszeizmológia nyújtotta lehetőségeket. Az elméleti (pl. csillagfejlődési) modellek számára nemcsak a halmaztagok közös kora, távolsága és kémiai összetétele jelent megszorítást, hanem a megfigyelt Nap típusú oszcillációk is.

### **Összefoglalás**

A Kepler rendkívüli pontosságú, folyamatos, több évre kiterjedő fotometriája egyedülálló lehetőséget teremt az asztrfizikában. A bolygórendszerek kialakulásáról és fejlődéséről alkotott képünket forradalmasítani fogja, csakúgy, mint a csillagokról szerzett ismereteinket. Emellett minden bizonnyal új jelenségek felfedezéséhez is el fog vezetni.

A Kepler utódjának az európai PLATO (PLANetary Transits and Oscillations of stars, I. [http://www.lesia.obspm.fr/perso/claude-catala/plato\\_web.html](http://www.lesia.obspm.fr/perso/claude-catala/plato_web.html)) űreszköz tekinthető; az amerikai TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) felbocsátását 2009-ben nem támogatta a NASA. Ez utóbbi hat kis méretű, nagy látószögű távcsövet tartalmazna, és 2 millió fényes csillag megfigyelésével mintegy 1000 exobolygót fedezhetett volna fel. A PLATO a Kepler koncepciójának továbbfejlesztése, azzal a különbséggel, hogy nagyobb területet (több mint 900 négyzetfokot) tervez megfigyelni, 28 kisebb távcsővel a fedélzetén. A Keplerhez hasonlóan, a tranzitmérések mellé asztroszeizmológiai vizsgálatok is csatlakoznak a tervek szerint 2018-ban startoló ESA-programban.

### **Köszönetnyilvánítás**

Az MTA KTM CsKI kutatóinak a Kepler előkészítési fázisába történő bekapcsolódását a KvVM – MŰI K-36-08-00031K pályázata támogatta.

### **Irodalom:**

- Borucki, W. és mtsai, 2009, *Science*, 325, 709  
Buchler, J. R. & Kolláth, Z., 2001, *ApJ*, 555, 961  
Christensen-Dalsgaard, J. és mtsai, 2009, *Comm. in Asteroseismology*, 158, 328  
Creevey, O. L., 2009, GONG 2008/SOHO 24 XXI. conf. proc. arXiv:0810.2440, megjelenőben  
Jurcsik, J. és mtsai, 2009, *MNRAS*, 400, 1006  
Kjeldsen, H. és mtsai, 2009, *Proc. IAU Symp. Vol. 253*, 309  
Moskalik, P. & Kolaczowski, Z., 2009, *MNRAS*, 394, 1649  
Nicholls, C. P. és mtsai, 2009, *MNRAS*, 399, 2063  
Sódor, Á. és mtsai, 2007, *A&A*, 469, 1033



## Hosszú idősorok vizsgálata – avagy mit tanultunk eddig a CoRoT-adatokról?

Benkő József

MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete

A hagyományos földi idősoros fotometriához képest az űradatoknak óriási előnyei vannak. Hosszú, folytonos, egyenletesen mintavételezett és alacsony zajú idősorokat kaphatunk, ha a légkör fölé emeljük távcsövünket. Nem várunk a földi adatokban elkerülhetetlenül jelentkező és gyakran igen bosszantó, ún. aliás effektusokat sem. Így vizsgálhatóvá válnak millimagnitúdós amplitúdójú és/vagy hosszabb (akár száz napos) periódusú jelenségek is. Sajnos, mint mindennek, az űrbéli idősoros fotometriának is ára van. Az adatsorokban megjelennek olyan zavaró tényezők, amelyek a földi adatokban egyáltalán nincsenek, vagy eddig elhanyagoltuk őket, mivel beleolvadtak a zajba. Itt néhány zavaró effektust ismertetek, amelyek a CoRoT- adatokat terhelik. Ilyenek például a csillagról csillagra különböző hosszú távú trendek, hirtelen ugrások, vagy a dél-atlanti anomália összetett hatásai. Megmutatom ezek lehetséges kezelési módjait, egyúttal példát mutatok arra, hogy az így feldolgozott adatokból jóval több is kinyerhető, mint a hasonló céllal készült földi mérésekből.

### 1.

Ha meg akarunk érteni egy kezünkbe kapott észlelési adatsort, mindenképpen szükséges, hogy tudjunk valamit az eszköztől, amelytől származik. Álljon itt hát néhány fontos technikai adat! A CoRoT-űrtávcső főtükre egy kb. 27 cm átmérőjű tükör fénygyűjtő képességének felel meg. A körülményes megfogalmazás azért van, mert a tükröző felület alakja leginkább trapézra hasonlít és nem a szokásos kerek. Az optikai elrendezés sajátossága az is, hogy a segédtükör a bejövő nyaláb irányára merőlegesen el van tolva (ún. off-set elrendezés). Ezzel a megoldással a segédtükör nem takar ki semennyit, és így optimális a távcső fénygyűjtő képessége. A távcső hosszú tubusában egy fekete fényelnyelő festékkel bevont gyűrűrendszer helyezkedik el, ami a szórt fényt (itt elsősorban a Föld fényére kell gondolni) hivatott elnyelni.

A távcső fókuszában négy, egyenként 2048x2048 pixelt tartalmazó CCD chip foglal helyet. A pixelek 13,5 mikrométeresek és az 1,2 m-es fókusz távolság mellett 2,32 ívmásodperc/pixeles felbontást eredményeznek. Ezek a paraméterek amúgy teljesen átlagosak lennének egy földi optikai távcső CCD kamerája esetében is. Innen kezdődnek a különlegességek: a négy chipből kettő-kettő szolgálja az exobolygó-átvonulások megfigyelését („exobolygós terület”), ill. az asztroszeizmológiát („szeizmológiai terület”). A szeizmológiai területhez tartozó CCD-k szándékosan nem a fókusz síkban vannak. Az ezeken rögzített defokuszált felvételekkel elérhető, hogy a fényes célpontcsillagokról is a beégés veszélye nélkül kapjunk nagy jel/zaj viszonyú méréseket. CCD-nként öt-öt csillagot mér a távcső 32 s expozíciós idővel, ill. kérésre lehetőség van 1 másodperces mintavételezésre is. Az exobolygós terület CCD chipje fölött pedig egy prizma helyezkedik el, ami minden egyes csillagról egy kifelbontású színeképet készít. A csillagokra előzetesen meghatározták a színekép (fényességtől függő) alakját és egy ennek megfelelő maszkot illesztenek az egyes csillagokra, majd ezen belül a fényesebb csillagok esetén három színt képeznek, míg a halványabb ( $m_v > 15$  mag) csillagokra a teljes fluxust összegzik, és „fehér fényben” mért fluxust számolnak ki. Ezek azok az adatok, amelyekkel azután a kutatók találkozhatnak.

Az exponálási idő az exobolygós területen 32 s. A mért értékekből a legtöbb csillag esetén 16-ot még az űreszközön összeadnak, és így 512 s (mintegy 8 perc) a tényleges mintavételi idő. Az exobolygós területen a mért fényességtartományban (11,5 és 16 magnitúdó között) kb. 12 000 csillag van. A korlátozott telemetriai kapacitás miatt 500 kiválasztott csillag esetében lehetőség van az eredeti 32 másodperccel mintavételezett (ún. oversampled) adatsor vizsgálatára is. A továbbiakban az exobolygós területről származó adatokról lesz szó, mivel csoportunk ezekkel foglalkozott.

## 2.

A nyers adatpontokat a feldolgozás során ellátták egy számmal, amely szám a pont „jóságát” jelzi. Mi okozhatja, hogy egy adott észlelési pont hibásnak, vagy nem megbízhatónak minősül? Egy sor zajforrás okozhat ilyesmit. Tekintsük át ezeket röviden!

A kevésbé jelentősektől az egyre erősebb effektusok felé haladva említsük meg az állatövi fény hatását. Az általa okozott, időben változó háttérfényesség maximális hatása 12 elektron/pixel/s körül van. A kiolvasó elektronika dobozának hőmérséklete sem állandó, mivel a Nap különbözőképpen melegíti fel azt, amint a Föld (és vele az űrtávcső) megteszi éves utazását a Nap körül, továbbá a műhold minden keringése is periodikus hőmérséklet-változást okoz – hasonló okból. A változás amplitúdója azonban igen kicsi: 0,2 fokos a legerősebb esetben is. Legkedvezőtlenebb esetben a Föld szórt fénye mintegy 100 elektron/pixel/s értéket is elérhet. Ennek a beszűrődésnek is van éves és az űrtávcső pályaciklusának megfelelő (1 óra 43 perces) periódusa. Az eddig említett hatások azonban folytonosan változnak, és így megfelelő flatfield és bias korrekcióval könnyen kezelhetők.

A legkomolyabb gondot a dél-atlanti mágneses anomálián való áthaladás okozza. Mint ismeretes, a Föld sugárzási övei nem teljesen szimmetrikusak: az Atlanti-óceán déli része és Brazília fölött a sugárzási övek közelebb (mintegy 200 km-re) vannak a Föld felszínéhez, mint egyéb helyeken. A 900 km magas pályán mozgó űrtávcső napjában nyolcszor halad itt át, és ilyenkor másodpercenként mintegy 3000 töltött részecske (elsősorban proton) találja el négyzetcentiméterenként. Az átmenetek idején a csillagászati mérés lehetetlenné válik. Az ezekben az időpontokban keletkezett adatokat ki kell hagyni az idősorokból, s ezzel a teljesen egyenletes mintavételezés is megszűnik. Mivel az áthaladás nagyjából 8 percet vesz igénybe, ez 1-2 pont elhagyását jelenti a normál módon mintavételezett adatsorokra.

Nagy energiájú töltött részecskék nemcsak a dél-atlanti anomálián való áthaladás során ütközhetnek a detektorba. A csillagászati szlengben csak „cosmics”-nak nevezett töltött részecske által okozott felfénylések a világűrben sokkal gyakoribbak, mint a földi észlelésekben. Azok a pixelek, amelyeket eltalált egy-egy ilyen részecske, percekig „emlékezhetnek” az eseményre jellegzetes, exponenciálisan lecsengő fénygörbét produkálva. Az adatsorok a teljesen egyenletes mintavételtől eltérnek, és nemcsak a dél-atlanti anomália periodikus és a kozmikus beütések véletlen hatásai miatt, hanem ezen túl még egy sor egyéb technikai okból is. A napelemtáblákat pl. 14 naponta utána kell állítani. Ez mintegy 250 másodpercet vesz igénybe, és ilyenkor egyúttal flatfield képeket is készítenek, ami további 5 percig tart. A távcső irányát is korrigálják minden keringés alatt egyszer, 20 s kiesést okozva a mérésben stb.

Az eddig említett zavaró tényezőkre, zajokra számítottak a mérnökök és a kutatók, és amennyire lehetett, kidolgozták a kezelésükre vonatkozó eljárásokat. Miután az összes, számba vett effektusra korrigáltak, átengedték az adatokat a kutatóközösségnek. És ekkor jöttek a meglepetések! Az exobolygós területen mért változócsillagok fénygörbéjén hosszú távú trendek, nagy, hirtelen ugrások látszanak. A trendek erőssége, iránya, az ugrások száma, nagysága csillagról csillagra véletlenszerűen változik. A jelenségek pontos oka – tudomásom szerint – nem ismert. A trendeket valószínűleg az okozza, hogy a távcső irányzása nem tökéletes, és a korábban említett maszkba időnként a célpont mellett egy (vagy több) szomszédos csillag képe is bekerül, vagy éppen a célpontcsillag egy része csúszik ki belőle.

## 3.

Végül is nem feltétlenül szükséges ismernünk egy zavaró jelenség okát, ha sikerül enélkül is megszüntetni a hatását... Ennek megfelelően készítettem egy számítógépes programot, amely eltünteti a trendeket és az ugrásokat is.

A programban két trendszűrő és egy ugrásmentesítő algoritmus van. Az egyik választható trendszűrés úgy történik, hogy az adatsort felosztjuk megadott hosszúságú időintervallumokra. A kapott intervallumokon belül a fluxust összeátlagoljuk, majd az így kapott idő-átlagfluxus függvényét

az eredeti észlelési pontokra lineárisan interpoláljuk, majd levonjuk az eredeti fluxusokból. A másik trendmentesítés esetén egy adott szélességű lépcsősfüggvényt tolunk végig az adatsoron megadott (kis) lépésközzel, és az így előálló csúszóátlagot interpoláljuk (szükség esetén) az eredeti észlelési pontokra, és vonjuk le a mért fluxusokból. A program mindkét esetben gondoskodik az azonos hosszúságú intervallumokról, illetve lépésközökről, a bemenő paraméterek megfelelő illesztésével. Az ugrásokat a program úgy keresi, hogy kiszámítja a fénygörbe egymás utáni pontjainak különbségeit, és ha egy érték meghaladja az adatsorban a különbségek szórásának  $i$ -szeresét (ahol az  $i$  szabadon megadható paraméter), akkor annál a pontnál ugrást jelez. Az ugrásoknak megfelelően az adatsort szegmensekre osztja, és az egyes szegmenseken külön-külön hajtja végre a fenti egyik trendszűrést.

Az 1. ábrán bemutatom a program futási eredményét egy mintafénygörbén. A legfelső panelen a „fehér fényben” mért fluxusok láthatók az idő függvényében. (A fénygörbe menetéből nyilvánvalóan kilógó hibás pontokat itt már eltávolítottuk.) A görbén több ugrás és trend is jól látszik. A középső panel mutatja a trendmentesítés, míg a legalsó a trend- és ugrásmentesítés együttes hatását. A 2. ábrán látható fénygörbét a fluxusok nulla átlagú magnitúdóskálára transzformálásával kaptam. A függőleges tengelyen látszik, hogy a csillag teljes fényességváltozása nem több, mint 0,03 magnitúdó! Az egész fénygörbe minden finomszerkezetével egyetemben ezen a kis fényességintervallumon belül rajzolódik ki (l. inzert), holott a fluxusok alapján tudjuk, hogy a csillag 15 magnitúdónál halványabb. Ilyen fényességű csillagok földi idősoros méréseinél a zaj szokott néhány század magnitúdó lenni.

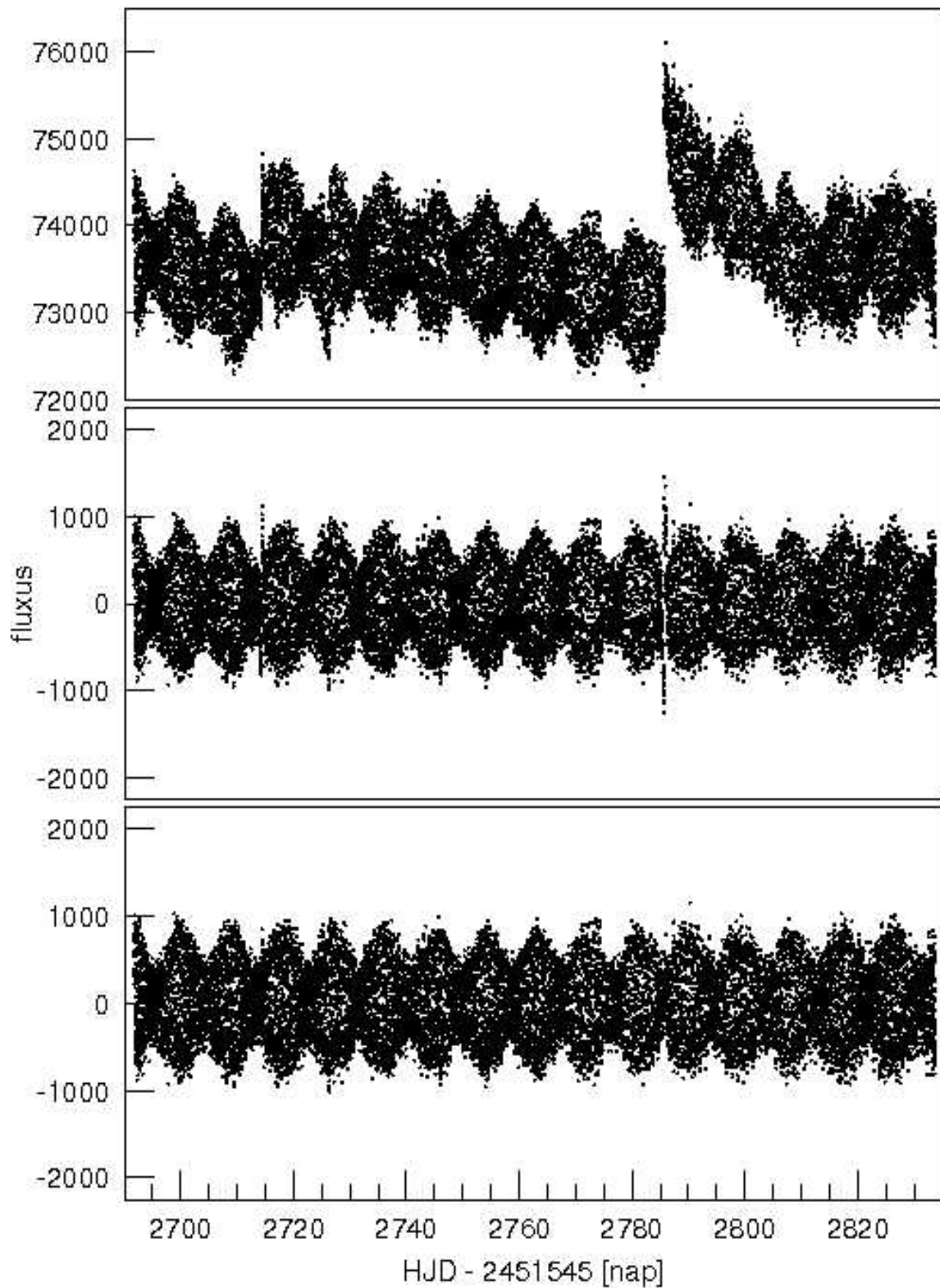
Mindebből azt a következtetést vonhatjuk le, hogy a CoRoT-úrtávcső adatainak pontossága tényleg eléri az előzetesen számítottat, és némi adatkezeléssel a legtöbb változócsillag-típus esetében ki is tudjuk használni ezt a pontosságot az adatok értelmezésénél is.

#### 4.

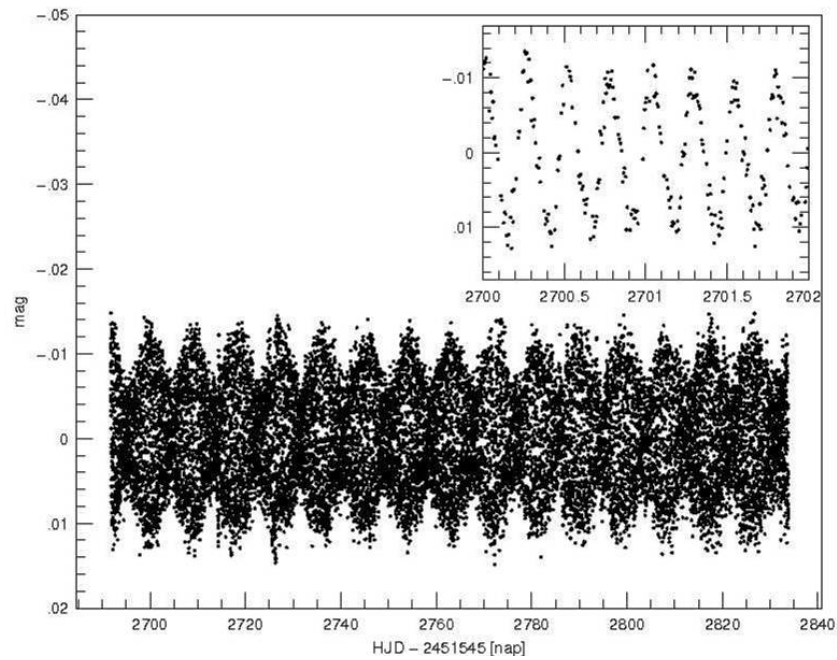
Az idősorok elemzésének egyik, ha nem a legfontosabb eszköze a Fourier-analízis. Nézzük meg, hogyan jelentkeznek a fentiekben tárgyaltak a Fourier-spektrumokban! A hosszú időskálájú trendeknek a spektrum kismagyas részében látszó csúcsok felelnek meg (l. a 3. ábrán fent), hiszen a Fourier-felbontás minden jelet harmonikus (szinusz-, ill. koszinusz-) függvények összegeként fejez ki, és formálisan a trendeket hosszú periódusú függvényekkel írja le. Az ilyen kismagyas csúcsok a földi észleléseknél általában azt jelzi, hogy a nullpontokat nem megfelelően kezeltük: pl. különböző távcsövekről/éjszakákról származó adatsorok rossz összeillesztése, vagy fotométerünk nullpontjának nem megfelelő stabilitása (az ún. drift) okozhat ilyen effektust. Amint az a 3. ábra további panelein látható, a CoRoT-adatokban lévő trendeket a korábban ismertetett trendszűrő algoritmusok bármelyikével ki tudjuk szűrni. A legfelső (trendes) és a trendmentesített adatsorok spektrumait összevetve megállapíthatjuk, hogy a trendek hatását sikerült kiszűrni, a pályaperiódusból származó technikai csúcsok (13,97 ciklus/nap-nál) erősségét jelentősen csökkentettük, más szerkezeti változást azonban nem okoztunk, vagyis a csillagról származó jelet nem torzítottuk.

A korábbiakban említettem néhány okot, amelyek miatt a mintavételezés csak kvázi egyenletes. Mit okoznak a hiányzó adatpontok a Fourier-spektrumban? A legtisztábban ezt az adatsor ablakfüggvényének megszerkesztésével vizsgálhatjuk (l. 4. ábra). Az ablakfüggvényben egyértelmű csúcsok láthatók a pályaperiódusnál (13,97 ciklus/nap), a sziderikus nap kétszeresénél (kb. 2 ciklus/nap) és ezek lineáris kombinációjánál. Ellenpróbaképpen szerkeszthetünk olyan adatsort, amelyben a hiányzó pontokat interpoláció segítségével pótoljuk, és az így a már teljesen egyenletesen mintavételezett adatsort analizáljuk. Az egyenletesen mintavételezett adatsor ablakfüggvénye analitikusan is kiszámítható: 0-nál egy nagy csúcsot kapunk, míg az attól eltérő értékeken egy exponenciálisan lecsengő amplitúdójú periodikus függvényt, amelynek periódusa az adatsor hosszától függ (l. a 4. ábrán alul). Az ekvidisztáns adatsor Fourier-spektruma is sokkal

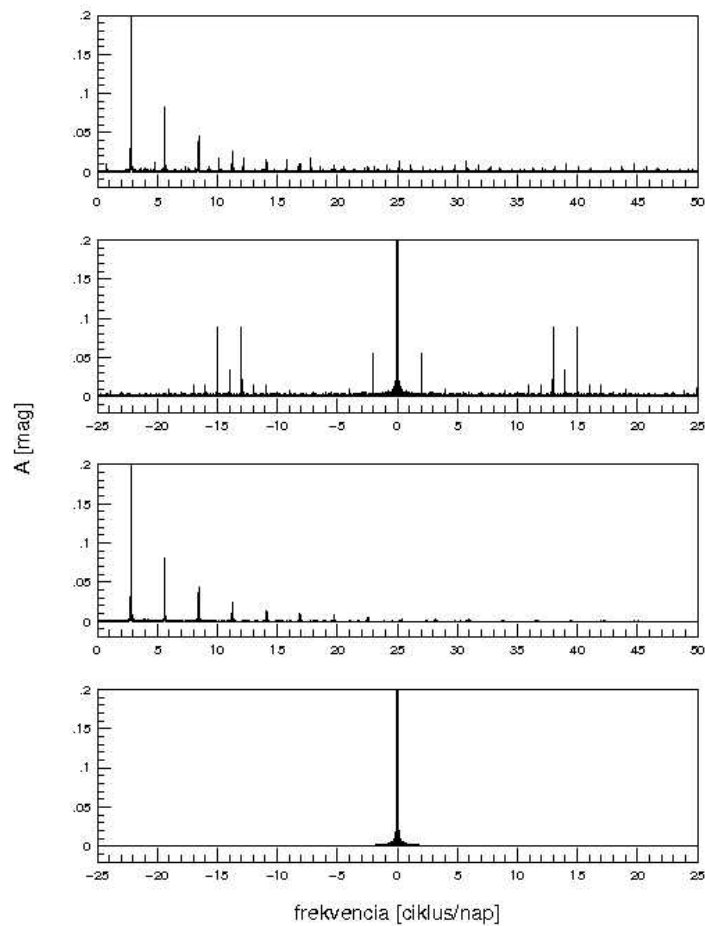
tisztább, mint az eredeti volt. Eltűnnek belőle az aliánsok, amelyeket a nem egyenletes mintavételezés okozott.



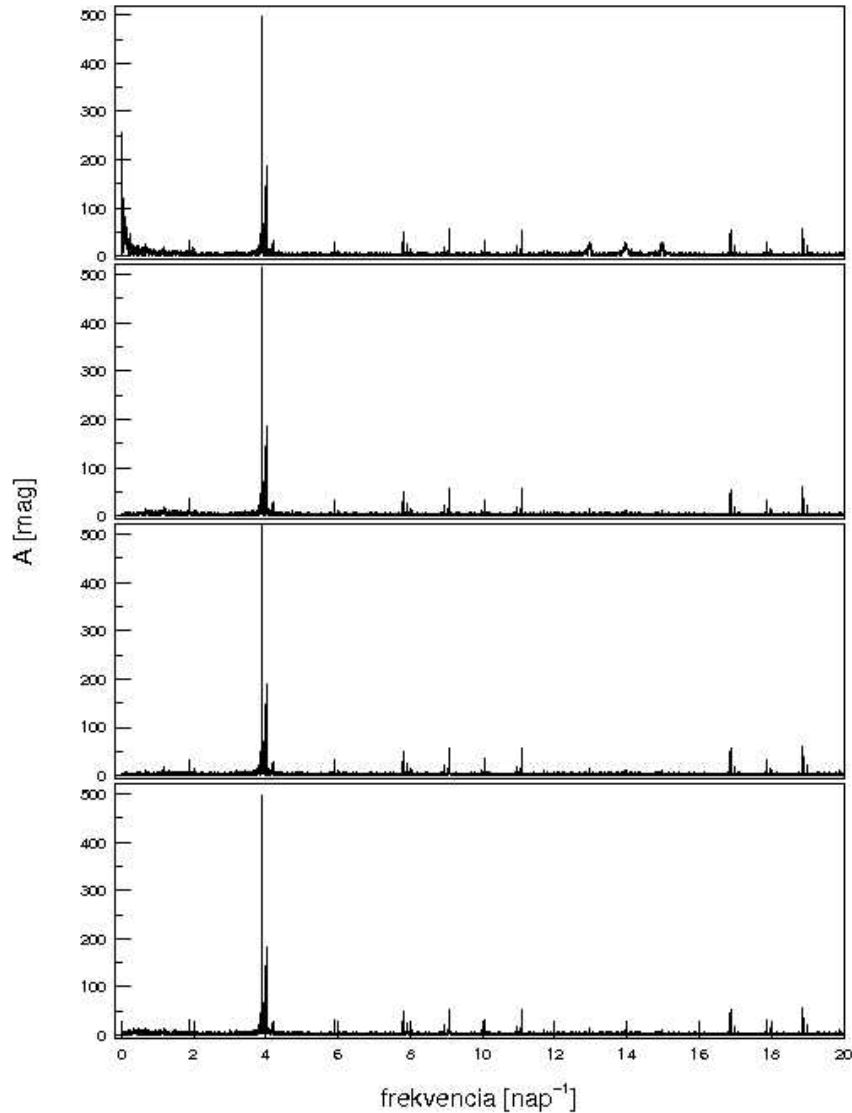
1. ábra. Példa CoRoT fénygörbe trend- és ugrásmentesítésére. Eredeti mért fluxusok (egyértelműen hibás pontok kihagyva) – fent, trendmentesített adatsor – középen, trend- és ugrásmentesített idősor – lent.



2. ábra. Az 1. ábra fluxusai 0 átlagú magnitúdóskálára transzformálva. A fénygörbe egy részlete az inzerben.



3. ábra. Az 1. ábra fénygörbéinek Fourier-spektruma. Nyers adatok – fent, csúszóátlagolással trendmentesített adatok – második panel, trend- és ugrásmentesített adatok – harmadik panel, binneléssel trendmentesített és ugrásmentesített adatok – lent.



**4. ábra.** Egy CoRoT RR Lyrae csillag spektruma – fent, az adatsor ablakfüggvénye – második panel. Az interpolációval egyenközűvé tett idősor Fourier-spektruma – harmadik panel és az ahhoz tartozó ablakfüggvény – lent.

Ha azonban megvizsgáljuk kisebb skálákon is az így készült adatsorok spektrumait, azt tapasztaljuk, hogy csillagról csillagra különböző mértékben ugyan, de a korábban erős aliáns csúcsok továbbra is megvannak, csak sokkal kisebb amplitúdókkal, mint eredetileg. Ez azt jelenti, hogy nemcsak az adathiányokban, de valahogyan magukban az adatokban is megmutatkoznak az egyes technikai effektusok (pl. a műhold keringése, dél-atlanti anomálián való átrepülések). A jelenség még annál is bonyolultabb, mint elsőre látszik. Azt gondolnánk, hogy az egyenletesen mintavételezett adatokból már egy egyszerű „fehérítéssel” ezek a zavaró csúcsok eltüntethetők. Ez a csillagok egy részénél sajnos nem így van. Többszöri, ismételt fehérítés után is találunk ilyen technikai csúcsokat a Fourier-spektrumban. Ennek okát akkor értjük meg, ha egy idő-frekvencia reprezentációt (pl. wavelet-transzformáltat) készítünk adatainkból. Ezekből azt látjuk, hogy a pályaperiódus amplitúdója nem állandó a mérés során, ráadásul az egyes csillagokra más és más az amplitúdóváltozás jellege és erőssége is. Ezek után persze természetes, hogy a statikus (állandó frekvenciákat, amplitúdókat és fázisokat feltételező) Fourier-analízis nem képes megfelelően kezelni az effektust. Szerencsére, a változócsillagok túlnyomó többségénél ezek a technikai csúcsok jól elkülöníthetők a ténylegesen csillaghoz tartozóktól.

## 5.

Minden korábban tárgyalt nehézséggel együtt az úrcsillagászati idősorok óriási előrelépést jelentenek a földi mérésekhez képest több szempontból is. Egy adott csillagról, egy adott terület csillagairól ilyen hosszúságú mérési sorozatot (kb. 150 nap az ún. „long run”-ok esetén) a Földről eddig lehetetlen volt kivitelezni. Reményünk hasonlóra majd csak az antarktisi méréseknél lehet. Amúgy még a leggondosabban tervezett nemzetközi kampányok mérései sem folytonosak. Befolyásolja őket az időjárás, nem is beszélve a korlátozott erőforrásokról, amelyek nem tesznek lehetővé akármilyen hosszú mérési sorozatot. A mintavételezés tehát sokkal rosszabb lehet csak – még a nem teljesen egyenletes űrbeli méréseknél is.

A másik kritikus pont a mintavételezés mellett a fotometriai pontosság. Jól ismert, hogy a földi adatokat milyen hibák terhelik, amelyek nincsenek az űradatok esetén. Nincs légkör mint a csillagászati fotometriát leginkább zavaró tényező, így nincs seeing, nincs változó átlátszóság, nincsenek a relatív fotometriát is megnehezítő színi effektusok. A stabil környezeti paraméterek (hőmérséklet, páratartalom) szintén a pontosságot növelik.

Ezek után egy kívülálló megkérdendő: mi szükség van a továbbiakban egyáltalán a földi mérésekre? Nos, egyelőre nem kell még a földi fotometriát temetni. A magyar CoRoT csoport eddigi munkája, amit az űrtávcső földi támogatása során végzett (részleteket l. <http://www.konkoly.hu/HAG>), hitem szerint jól példázza a földi észlelések szerepét, fontosságát.

Az űrtávcső felbocsátása előtt méréseket végeztünk a Pizskétetőn felállított 1 m-es távcsővel olyan változócsillagokat keresve az exobolygós területen, amelyek bekerülhetnek azon 500 közé, amelyekről a rövidebb mintavételezésű adatsorokat is lehozzák. Az elsődleges asztroszeizmológiai célpontokra pedig összehangolt nemzetközi kampányokban vettünk részt, amelyekben a közreműködő kutatók mind fotometriai, mind spektroszkópiai idősorokat gyűjtöttek. A fő cél ezeknél a méréseknél az volt, hogy színi, ill. spektrális információk minél nagyobb mennyisége álljon rendelkezésre, ami majd az űrtávcsőről származó frekvenciákkal együtt elvezethet az egyes csillagok modellezéséhez, a tényleges asztroszeizmológiához. Itt kell kiemelni, hogy bár a CoRoT-űrtávcső az exobolygós területén lévő csillagokról szolgáltat egyfajta korlátozott színi információt (l. fent), de ezek a színek nem egyeznek meg egyetlen standard, korábban használatos színrendszer színeivel sem. Így pl. nincsenek hozzájuk légkörmodellek kiszámolva, kalibrálva, de valójában nem is az a céljuk, hogy a csillagok fizikáját vizsgáljuk általuk, hanem pusztán az exobolygó-átvonulások és az azokhoz hasonló csillagfedések egyszerű elkülönítésére szolgálnak. Az asztroszeizmológiai célpontcsillagok területén pedig egyáltalán nincs semmilyen színszűrő. Maga a CCD detektor érzékenységi függvénye vág ki csupán egy széles sávot (400 és 1000 nanométer között) az optikai és közeli-infravörös hullámsávból. Ennek megfelelőek nemcsak az előkészítő fázisban volt, hanem az űrtávcső mérései alatt, sőt utána is van létjogosultsága a földi megfigyeléseknek, hiszen ezek a mérések jól kalibrált standard színekben készülnek.

Egy másik lehetséges érv a földi mérések mellett, hogy a CoRoT-űrtávcsővel felfedezett, mért érdekes csillagokat hosszabb távon is követjük, és ezzel vizsgálhatjuk periódusuk stabilitását. A folytonos, vagy éppen véletlenszerű periódusváltozások pedig a csillagfejlődést leíró elméletek számára szállíthatnak muníciót. Így aztán csoportunk továbbra is folytatja meghatározott célú földi mérések végzését, olyan célpontokra és olyan módon, hogy azzal érdemben hozzájáruljunk egy adott csillag, vagy jelenség megismeréséhez, mintegy kiegészítve az űrbéli fotometriát.

**Irodalom:**

Auvergne, M., Bodin, P., Boisnard, L., et al. (2009) *Astron. & Astrophys.*, 506, 411  
*The CoRoT Instrument Handbook*,  
<http://corotsol.obspm.fr/webinstrum/payload.param/index.html>

## Napfizika űreszközökkel

Ludmány András

MTA KTM CsKI Napfizikai Obszervatóriuma

Az elmúlt évtizedekben a többi csillagászati kutatási területhez hasonlóan a Nap kutatása, észlelése is túlnyomórészt űreszközökre helyeződött át, de emellett a földfelszíni észlelések sem tűnnek, tűnhetnek el. A hazai napfizika természetesen nem vállalkozhat űrbe telepítendő műszerek fejlesztésére, de ezek méréseinek kiértékeléséből mi is ki tudjuk venni a részünket. Ez a beszámoló arról szól, hogy a Napfizikai Obszervatórium hogyan kapcsolódott be az űrben szerzett adatok kiértékelésébe.

Az űrbéli napfizika története az *OSO* (Orbiting Solar Observatory) sorozat 1962-es indításával kezdődik. A 60-as évek űreszközeinek rendszerint volt napfizikai vonatkozása, egy sor műszer között fluxgate magnetométert és a napszél vizsgálatára alkalmas eszközöket vittek magukkal. 1970-ben bocsátották fel a *HELIOS* szondát, majd 1973-ban kezdődtek a *Skylab*-küldetések. Ez az űrlaboratórium már a nagy energiájú (extrém ultraibolya) tartományban érzékeny képalkotó műszert is vitt magával. Ezzel kezdetét vette a Nap észlelésének kiterjesztése minden olyan hullámhossztartományra és fizikai mennyiségre, mely lényeges a naptevékenység megértése szempontjából.

### Vizsgálatok űreszközök adatain

A Napfizikai Obszervatórium űradatokra épülő első munkái az OMNI adatbázis felhasználásával készültek. Ez a hatalmas anyag a kezdetektől tartalmazza az egymás utáni – véges élettartamú – űreszközök mérési adatait, enélkül hosszú távú folyamatok vizsgálata elképzelhetetlen lenne. Ez a vizsgálatosorozat a geomágneses aktivitás féléves változásához hasonló ingadozást mutatott ki a geomágneses aktivitás és a földfelszíni hőmérsékletek korrelációjában, ami annak a jele, hogy az időjárásra nemcsak az irradianciaváltozás hathat, ahogyan ezt a többség tartja, hanem plazmaáramok is. Ennek további vizsgálata alapján készült az *1. ábra*, mely az interplanetáris mágneses tér komponenseinek éves változásait mutatja.

### Napfoltadatok az űrkorszakban

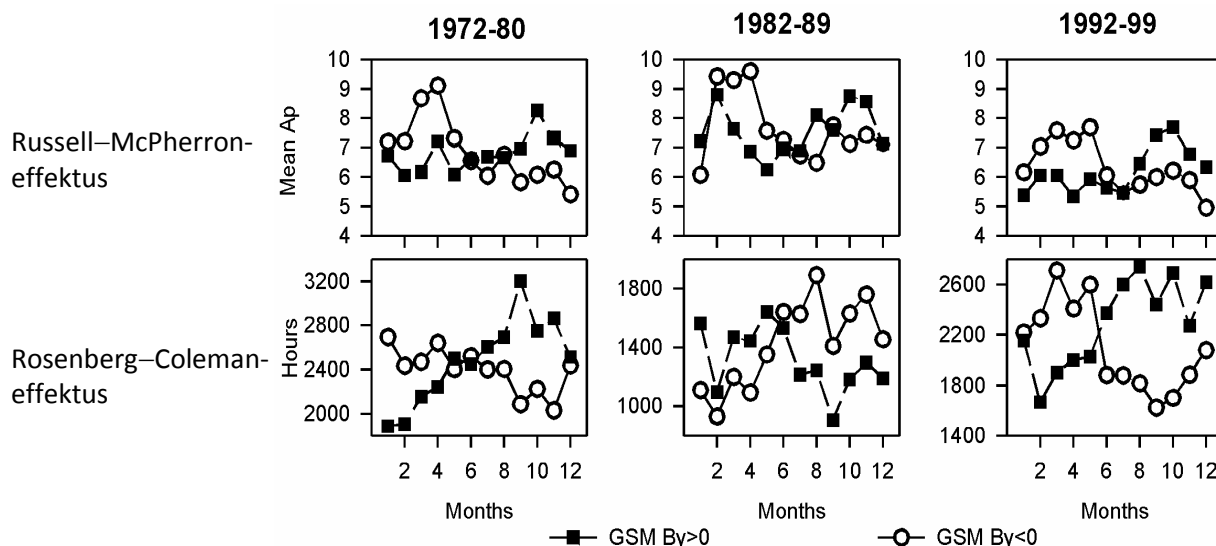
A Napfizikai Obszervatóriumnak kezdettől legfontosabb célkitűzése a teljes napkorong rendszeres, fehér fényű észleléseinek gyűjtése, majd a *Greenwich Photoheliographic Results* (GPR) c. napfoltkatalógus befejezése (1986) után annak folytatása. Az évtizedek alatt kialakított módszertan és felgyűlt tapasztalat révén az obszervatórium legfontosabb produktuma, a *Debrecen Photoheliographic Data* (DPD) a legmegbízhatóbb napfoltadatbázissá vált. Világszerte több mint hetven obszervatórium foglalkozik napfoltadatok meghatározásával, de egyedül a DPD tartalmazza az összes folt és összes foltcsoport pozícióját és területét, ráadásul ezen adatok pontossága is a legnagyobb. Az anyag teljességre törekszik, ezért 16 obszervatóriummal állunk kapcsolatban, hogy ha Debrecenben vagy Gyulán nincs észlelés, akkor a hiányt pótoljuk.

A DPD – a GPR-hez hasonlóan – naponta egy időpontban rögzíti az említett adatokat, ezért értelemszerűen hosszú távú folyamatok követésére alkalmas. Ez természetesen generációkon keresztül folytatott tevékenység, miközben az észlelési technika és kiértékelési módszerek állandóan fejlődnek. A GPR évszázada alatt ez a fejlődés lassúbb volt, mi viszont mostanában lépünk abba a korszakba, amikor a munkához szükséges észlelések a földi távcsövek helyett egyre inkább az űreszközök műszereitől erednek.

Az első olyan anyag, mely teljesen űrbéli észleléseken, a *SOHO/MDI* műszer napkorongképein alapul, a *SOHO-Debrecen Sunspot Data* (SDD). Ez a munka az ESA támogatásával készült (ESA-



PECS C98017 projekt). A katalógus készültségi foka egyelőre nem éri el a DPD-ét, mert az automatikus kiértékelő szoftver csak az egyes foltokat tudja megtalálni, a foltcsoportok elkülönítéséhez jelentős emberi munka ráfordítása szükséges, ami ezen ismertető idején zajlik. Az SDD azonban így is tartalmaz egy fontos újdonságot: minden foltra megadja a mágneses terét is. Erre az ad lehetőséget, hogy a kontinuumképekkel szinte egy időben magnetogramokat is készít az MDI műszer. Ilyenformán az anyag már minden releváns adatot tartalmaz, és a foltcsoportok elkülönítése után a SOHO időszakra (1996-?) fog elkészülni az első teljes napfoltkatalógus. A 2. ábra egy aktív vidék SOHO/MDI kontinuumképét és magnetogramját mutatja megjelölve a katalógusba bekerült foltokat.



1. ábra. Az Ap index és az eltöltött órák száma a különböző előjelű By tartományokban. A két szélső oszlop éveiben a Nap és Föld mágneses dipóltere ellentétes, a középsőben párhuzamos. A szoláris plazmaáramok földi hatása bonyolult összefüggésben áll az általuk szállított mágneses tér topológiájával.

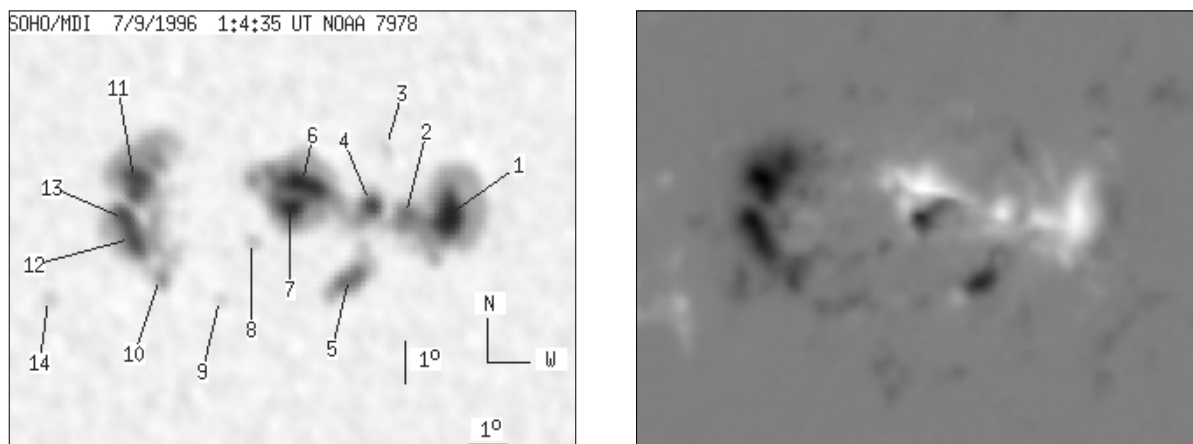
Ez a fejlemény időszerűvé teszi, hogy néhány észlelési stratégiai kérdést újragondoljunk. A leggyakrabban feltett kérdés az szokott lenni, hogy mi szükség van földi észlelésekre, ha vannak űreszközök is. Az űrbéli műszerek előnyei nyilvánvalóak: nem zavarnak a légköri hatások, nem szakítják meg az észlelést az éjszakák. Gyengéi között azonban meg kell említeni, hogy ha üzemzavar támad az űrlaboratóriumon, akkor hosszabb időre megszűnhet az adatgyűjtés, ez volt a helyzet a SOHO-val is hónapokig, továbbá a hosszú repülés során a műszerek degradálódása is problémát okoz. Ezért azt gondoljuk felelős hozzáállásnak, hogy amit lehet, azt kell is a földfelszínről észlelni, akkor is, ha van hasonló feladatú űrbéli műszer. Hosszabb távon az a munkamegosztás látszik kirajzolódni, hogy az űreszközök mellett a nagyméretű földi távcsövek végzik a nagy felbontású észleléseket, a kisebb távcsövek pedig a hosszú távú, szinoptikus észleléseket.

Az is fel szokott merülni, hogy a földi észlelések minősége rosszabb az űrbéliéknél. Ez azonos műszaki feltételek között mindenképpen így van, de érdemes összehasonlítani egy aktív vidék képét SOHO/MDI észlelésen és egy gyulai felvételen. A minőségbeli különbségnek az az oka, hogy a SOHO/MDI CCD detektorának mérete 1024x1024 pixel, tehát csak kb. 3-4 ívmásodperces alakzatokat képes felbontani, miközben a digitalizált debreceni/gyulai észlelések 8000x8000 képpontból állnak. Ezért a földi észlelések egyelőre versenyképesek az űrbeliakkal. Jelenleg semmilyen forrásból nem elérhető 4000x4000 képpontos teljes napkorongészlelések, csak a debreceni DPD-honlapról.

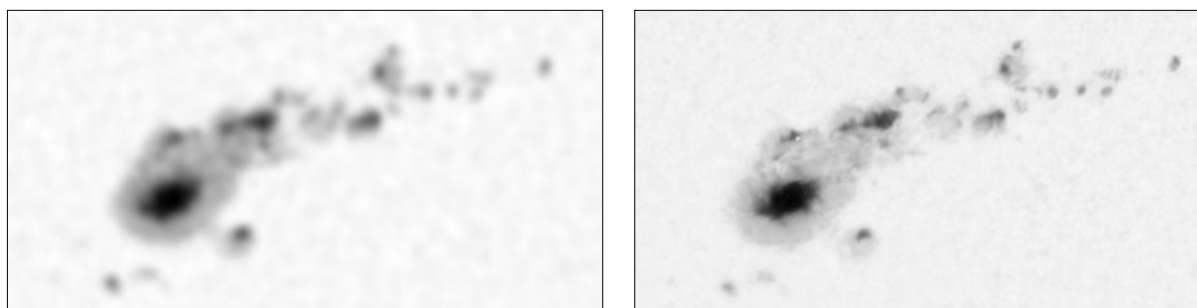
A Napfizikai Observatórium következő ESA-támogatású projektje (ESA-PECS 98081) már a következő generációs napészlelő műszeregyüttes, a Solar Dynamics Observatory (SDO) észleléseire fog épülni, a HMI műszer napkorong-képe 4000x4000 pixel méretű lesz.

Az mindenképpen megállapítható, hogy mostanában zajlik az a folyamat, melynek révén a napfoltadatok forrásai már a közeli jövőben is elsősorban, bár nem kizárólag, űrbéli észlelések

lesznek. A távlati cél az, hogy a naptevékenység legfontosabb jelenségéről, a napfoltokról a lehető legrészletesebb és leghosszabb adatsor szülessen, mely felöleli a történelmi észleléseket is Galilei óta. Ez természetesen megkívánja a különböző időszakokban született adatok homogenitásának vizsgálatát is.



2. ábra. Egy 1996. szeptember 7-i aktív vidék kontinuumképe és magnetogramja (SOHO/MDI).



3. ábra. Egy aktív vidék képe 1997. november 3-án, bal oldali kép: SOHO/MDI (13:27:34 UT), jobb oldali kép: MTA KTM CsKI Napfizikai Observatórium Gyulai Megfigyelő Állomása (13:31:53 UT).

Ebbe a folyamatba illeszkedik részvételünk abban az európai projektben is, mely a mi kezdeményezésünkre jött létre. A SOTERIA nevű FP7-es projekt a 2009–2011. évek legnagyobb európai Nap–Föld fizikai összefogását jelenti: 16 európai kutatóintézet alkotja a konzorciumot. A résztvevők kutatási profiljai lefedik a Nap fotoszférájától a kromoszférán, koronán, interplanetáris téren, magnetoszférán, ionoszférán keresztül a földi atmoszféráig terjedő tartományokat, és így nagy kutatási együttműködések formálódhatnak egyes eseménysorok komplex elemzésére. Ennek a közösségnek a Nap–Föld–fizika összes területére rálátása van, és a projekt az összes fontos, vonatkozó űrprogramban érintett. Két űreszközt (*CORONAS/SPHINX*, illetve *Proba2/Swap+Lyra*) konzorciumi intézetek készítették, melyeket a projekt indulása óta sikeresen pályára állítottak.

Ebben a projektben fontos feladataink vannak. Egyrészt teljessé tesszük az SDD adatbázist, másrészt szintén SOHO/MDI észlelések alapján készítünk egy teljesen újdonságnak számító katalógust, a fotoszferikus fáklyákról. Ez utóbbiak a szoláris irradianciaváltozások modellezésének régóta várt, fontos bemenő adatai, mivel e fáklyák a felelősek az irradiancia növekedéséért, míg a foltok a csökkenésért.

A napfoltkatalógus hagyományos (napi mintavételezésű) formája értelemszerűen hosszú távú jelenségek vizsgálatára alkalmas, gyors események elemzésére nem. A SOHO-ra épülő SDD katalógus azonban már óránként fog napfoltadatokat tartalmazni, ezért erre építve egy olyan

kockázatbecslő eszköz készíthető, mely regisztrálja azokat a gyors elmozdulásokat, melyek explozív eseményekhez vezethetnek. Ez remélhetőleg új lehetőséget fog nyújtani az előrejelzésekhez.

**A fenti munkákhoz az alábbi űrfizikai projektek nyújtottak támogatást:**

ESA PECS C98017 "SOHO/VIRGO,MDI - DPD catalogue studies";

ESA PECS C98081 "Production and cross-calibration of space-borne sunspot data";

FP7 grant No. 218816 "SOTERIA".

## Gammakitörések

Balázs Lajos, MTA KTM Csillagászati Kutatóintézete,  
Horváth István, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem

### A gammakitörések felfedezése

1963. augusztus 5-én a Szovjetunió, az Amerikai Egyesült Államok és Nagy-Britannia képviselői Moszkvában aláírták a nemzetközi atomcsend-egyezményt (Nuclear Test Ban Treaty), amely megtiltja az atombomba-kísérleteket a légkörben, a világűrben és a víz alatt.<sup>1</sup> Az egyezmény betartásának ellenőrzésére hozta létre az Egyesült Államok a VELA projektet, és indították Föld körüli pályára a VELA műholdakat.

A programot 1969-ben indították el, viszonylag csekély költségvetéssel. Összesen tizenkét műholdat indítottak, hatot a Vela Hotel, hatot az Advanced Vela felépítéssel. A hat Vela Hotel műhold úrbéli nukleáris robbanások után kutatott, míg az Advanced Vela hagyományos robbanások megfigyelését is végezte. A légköri atom- vagy hidrogénbomba-robbanás a másodperc ezred részéig tartó gammavillanást hoz létre, amit a kialakuló tűzgolyó fénysugárzása követ. A műholdak milliszekundumos skálán figyelték a jelenségeket, így több műhold együttes megfigyelése esetén a forrás térbeli helyzete, egyszerű háromszögletes módszerrel meghatározható volt. Nukleáris bomba robbanását a röntgensugárzás jelezte volna, melyet a gamma- és neutrondetektorok megfigyelése erősített volna meg. A Hold túloldalán való robbanást nem észlelték volna a Vela műholdak, de a felvert nukleáris por a robbanás erejétől gyorsan tágult volna, amit a műholdak a robbanás során aktivált atommagok gammasugárzását megfigyelve tudtak volna azonosítani.

Ray Klebesadel a Los Alamos Scientific Laboratory (ma LANL, Los Alamos National Laboratory) munkatársa (aki a Vela műholdak tervezésében és építésében is részt vett) elemezte a megfigyelt adatokat. Azokat a megfigyelési eredményeket, melyek biztosan nem nukleáris robbanást jeleztek, gondosan eltették. 1972-ben Ian Strongot kérték meg, hogy Klebesadellel és Roy Olsennel közösen értékeljék ezeket az adatokat, akik 16 olyan eseményt találtak, melyek bizonyosan nem földi, szoláris vagy lunáris eredetűek voltak (1969. július és 1972. július közötti jelenségekről volt szó). Gammatarományban olyan jelentős volt az emisszió, hogy ki lehetett zárni, hogy egy röntgenforrás nagyenergiás részéről lenne szó. Ez az eredmény jelentette az első gammakitörések észlelését.

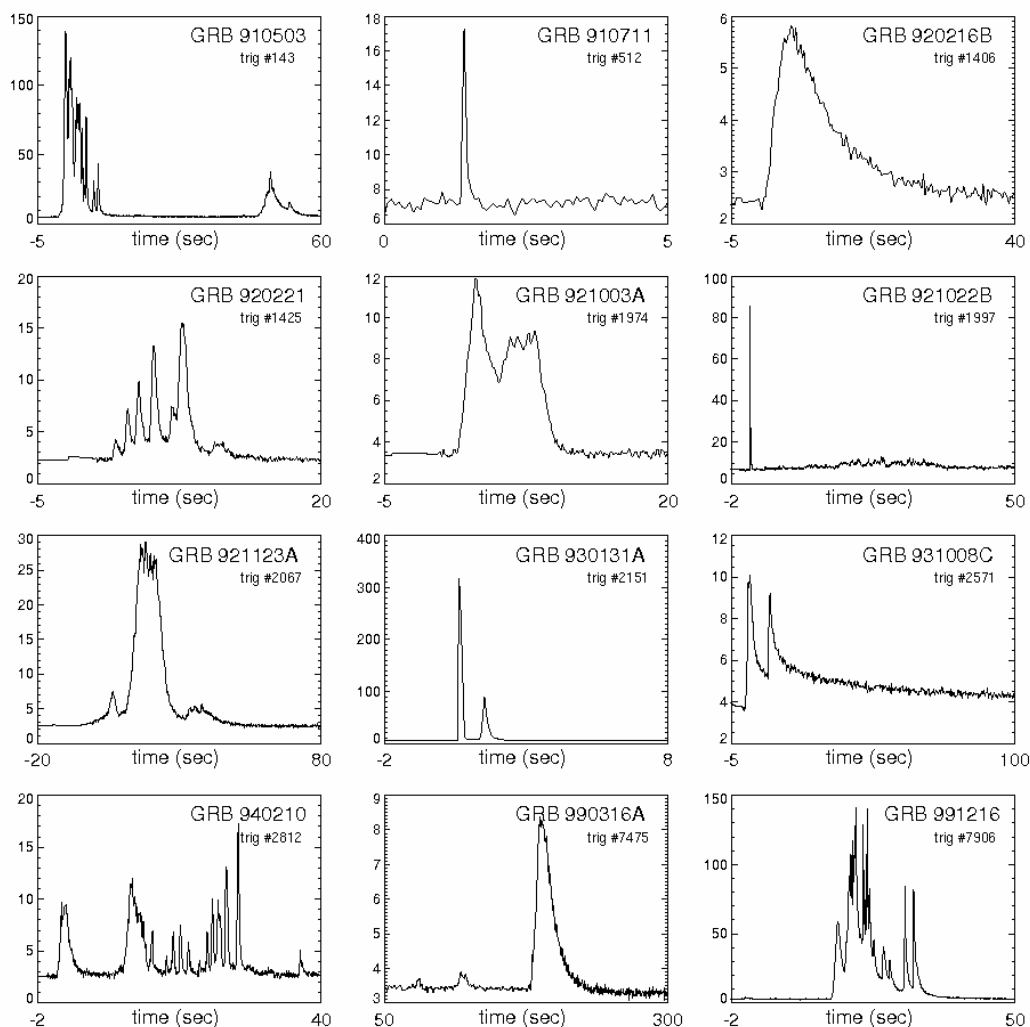
### A kitörések „fénygörbéi”

Amíg a csillagászatban előforduló legtöbb, időszakosan felvillanó forrásnak jellegzetes a fénygörbéje (a tipikusan gyors fényességnövekedést fokozatos halványulás követi, mint például a nóváknál és szupernóváknál), a gammakitöréseknél ez igen különböző. Nincs két olyan kitörés, amelyeknek a fénygörbéje hasonlítana egymásra. Ellenkezőleg, csaknem összes megfigyelhető tulajdonságukban különböznek: a megfigyelhető emisszió időtartama milliszekundumtól néhány percig is eltarthat, lehet egyetlen csúcspontú, vagy akár több is, a csúcsok lehetnek szimmetrikusak, vagy gyors fényességnövekedést lassú csökkenés követhet. Néhány kitörést előfutár esemény előz meg, amely egy gyenge kitörés, amelyet (néhány másodperc esetleg perc múlva) az „igazi” követ. Néhány kitörés fénygörbéje rendkívül kaotikus, minden felismerhető szerkezetet nélkülöz.

Jóllehet néhány fénygörbét megfelelően választott egyszerű modellel reprodukálni lehet, eddig nem tudták megmagyarázni, hogy a megfigyelt tulajdonságokban miért van ekkora különbség

<sup>1</sup> Az egyezményről l. [http://en.wikipedia.org/wiki/Comprehensive\\_Nuclear-Test-Ban\\_Treaty](http://en.wikipedia.org/wiki/Comprehensive_Nuclear-Test-Ban_Treaty), az egyezmény szövegét pedig: <http://www.ctbto.org/fileadmin/content/treaty/treatytext.tt.html>.

az egyes görbék között (1. ábra). Eddig már sok osztályozási rendszert javasoltak, de ezek gyakran pusztán a fénygörbék megfigyelhető tulajdonságain alapultak, és nem mindig vették tekintetbe a kitöréseket létrehozó objektumok közötti fizikai különbségeket. Mindenesetre, a kitörések megfigyelhető időtartamának az eloszlása jellegzetesen „kétpúpú”, ami azt sugallja, hogy alapvetően két csoport létezik: a „rövid”, amelyknél az átlagos időtartam 0,3 s, illetve a „hosszú”, amelynek átlagos időtartama 30 s. Mindkét csoport időtartamának az eloszlása igen tág, és jelentős átfedés van közöttük, emiatt pedig igen nehéz megmondani pusztán az időtartam alapján, hogy a kitörés melyik csoportba tartozik. Mind elméleti, mind megfigyelési alapon ezen a kétfokozatú rendszeren túlmenően további osztályok bevezetését is javasolták.



1. ábra. Néhány kitörés „gammafénygörbéje”

### A kitörések általános jellemzői

A 80-as évek végéig közel 500 gammafelvillanást észleltek a műholdak. A felvillanások eredete azonban tisztázásra várt. Nem volt azonosítva egyetlen forrás sem (kivéve a lágygammaismételőket – soft gamma repeater, SGR), de még azt sem tudtuk, hogy milyen messze lehetnek a források. Tehát az sem volt ismeretes, hogy a forrás milyen erős, ugyanis a mért gammasugárzást okozhatta egy közeli forrás, abszolút értelemben gyenge, illetve egy távoli, vagyis sokkal erősebb forrás is.

A NASA négy nagy megfigyelő műholdja közül a Compton Gammasugár Obszervatóriumot bocsátották fel (CGRO) a gammatartomány megfigyelésére. A műhold 1991 áprilisa és 2000 júniusa

között működött. 2000. június 4-én a NASA döntése után visszairányították a Földre. Részben elégett a légkörben, a maradványai pedig a Csendes-óceánba hullottak.

A műhold fedélzetén négy műszer működött:

- Burst And Transient Source Experiment (BATSE)
- Oriented Scintillation Spectrometer Experiment (OSSE)
- Imaging Compton Telescope (COMPTEL)
- Energetic Gamma Ray Experiment Telescope (EGRET).

Ezek közül a legtöbb forrást (2704 kitörést) a BATSE észlelte. A gammakitörések kutatásában a CGRO áttörést hozott, de a forrásokat nem tudta ismert asztrofizikai objektumokkal azonosítani, mivel a bejövő sugárzás irányát csak nagyon pontatlanul tudta meghatározni.

1997-ben a holland–olasz Beppo-SAX műholdnak sikerült elsőként a gammakitörések röntgensugárzásának a forrását néhány ívperc pontossággal meghatározni, az első esetben 8 órával a kitörés után. Az első három azonosított forrás nagyon messze volt Földünkötől (a z vöröseltolódásuk 0,5 és 1 közé esett). A negyedik azonosított forrás már túl volt az ismert Világegyetem felén ( $z=3,42$ ).

A távoli eredet miatt le kellett vonni a következtetést, miszerint a gammakitöréseket kiváltó folyamatban sokkal rövidebb idő alatt, sokkal nagyobb energia szabadul fel, mint amekkorát bármely eddig ismert folyamat megenged. Ha az energiakibocsátást izotropnak feltételezzük, a felszabadult energia nagyjából azzal egyenértékű, mintha a Nap tömegének jelentős része néhány másodperc alatt szétsugárzódna (kb.  $10^{51}$ – $10^{54}$  erg). Az energia ilyen mértékű felszabadulására két általánosan elfogadott elmélet létezik.

### A „hosszú” gammakitörések

A hosszabb ideig tartó, de lágyabb, azaz az energia nagy részét inkább kisebb energiájú fotonokban kisugárzó kitöréseket az ún. hipernóva jelenségével magyarázzák. Amennyiben egy legalább 40 naptömegű csillag elégeti nukleáris fűtőanyagát, végül fekete lyukká roskad össze. Ha a csillag tengely körüli forgása gyors, a bezuhanó anyag egy akkréciós korongba sűrűsödik össze. Ekkor a csillaganyag jelentős része az egyenlítő síkjában, spirális pályán száguld a középpont felé, ami a hatalmas gravitációs erő következtében egyfajta generátorként működik. Vagyis energiává alakítja az akkréciós korong anyagának egy részét, két igen vékony, forgástengely irányú nyalámban (jet) kisugározza azt.

Ezt az elképzelést támasztja alá, hogy a részletesebb megfigyelések szerint az ilyen kitörések a galaxisoknak azon aktív vidékeiről származnak, ahol éppen csillagkeletkezés folyik. Ugyanis itt jönnek létre azok a nagy tömegű, éppen ezért igen rövid életű csillagok, amelyek halálakor megfigyelhető a jelenség. Egy másik bizonyíték, hogy több ilyen kitörés helyén egyúttal szupernóva-robbanást is megfigyeltek, ennek közepén marad végül a fekete lyuk. Az pedig, hogy a gammasugárzás csupán két szűk nyalámban indul útjára, jelentősen, akár három nagyságrenddel is lecsökkenti a kitöréshez szükséges energia mennyiségét. Ez persze azt is jelenti, hogy csak akkor vesszük észre a jelenséget, ha a jet éppen felénk mutat.

### A gammakitörések eredete

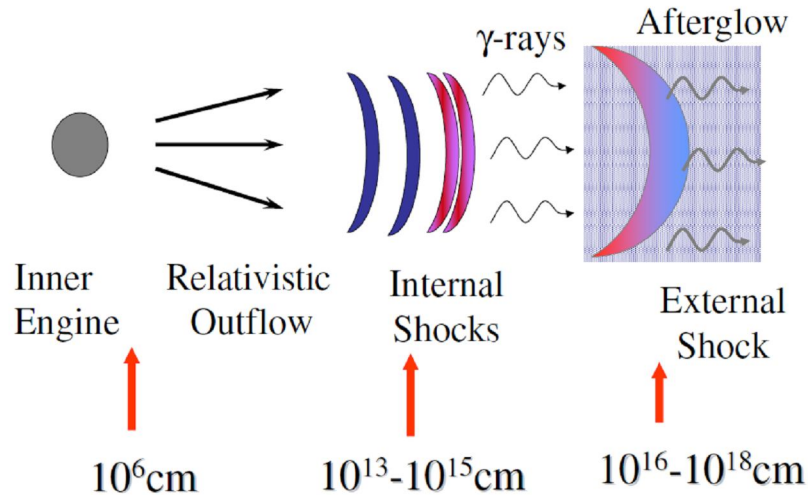
A gammakitörések létrejöttére több elméletet dolgoztak ki. Ezek közül a legelfogadottabb a „tűzgolyó” modell. A modell jellegzetessége, hogy egy központi, kis méretű objektum létrejöttét tételezi fel, amelyből a kilövellő anyag hozza létre a megfigyelt gammasugárzást. A 2. ábra a modell sematikus vázát mutatja. Összehasonlításul egy másik, az „ágyúgolyó” modell is látható (3. ábra).

### A gammakitörések és a szupernóvák kapcsolata

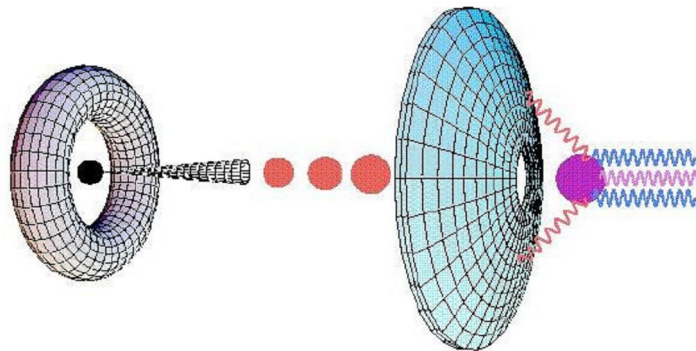
A szupernóvák nagy tömegű csillagok explozív halálát jelzik. A kitörés tartamának néhány hete alatt a szupernóva fényessége meghaladhatja a befogadó galaxis csillagainak összfényességét. Amennyiben

az így felszabaduló energia nem lenne elég, létezik egy ritkán előforduló szupererős változat, a hipernóva.

A meglepően energikus, „tipikus” szupernóvánál százszor nagyobb energiát felszabadító hipernóvát szintén kapcsolatba hozták a gammakitörésekkel, a gammasugárzást alkotó fotonokkal, amely az elektromágneses sugárzás legnagyobb energiájú formája.



2. ábra. A gammakitörések „tűzgolyó” modellje



3. ábra. A gammakitörések „ágyúgolyó” modellje

Úgy gondolják, hogy gammakitörés akkor jön létre, amikor a csillag belsejében az összeroskadó anyag hatására lökéshullám keletkezik, amely hipernóva-robbanást hoz létre. Mind a gammasugárzás, mind a csillag anyagából a lökéshullám – a gammasugárzásnál a fény sebességével, a csillaganyag ettől valamivel kisebbel – egy meghatározott irányban lövődik ki.

A csillag anyaga egy táguló kúpban utazva ütközik a csillagközi anyagban levő gázzal és porral, és új fotonok sugárzását gerjeszti, de fokozatosan csökkenő energiával, amit *utófénynek* neveznek. Ez röntgensugárzást, ultraibolya fényt, látható fényt, mikrohullámokat, illetve rádiósugárzást foglal magában. A kitörés és az utófény akkor észlelhető a Földről, ha a Föld a kitörés tengelyében van, vagy annak a közelében.

Galaxisonként átlagosan egy szupernóva kitörésével számolhatunk évszázadonként, és nagyságrendileg 100 milliárd galaxissal számolhatunk a számunkra megfigyelhető Világegyetemben (ez a Világegyetemnek azt a részét jelöli, ahonnan a fénynek elegendő ideje volt, hogy elérjen bennünket). Föltételezve, hogy a Világegyetem 10 milliárd éves (valójában a kor 13,7 milliárd év, de csillagok még nem alakultak ki az első néhány százmillió évben, és egyébként is ez csak egy becslés),

Richard Mushotzky, a NASA Goddard Space Flight Center kutatója 1 milliárd szupernóvát becsül évente. Ez másodpercenként 30 szupernóva kialakulását jelenti az egész Világegyetemben!

A gammakitörést az összeroskadó csillagmagokból létrejövő hipernóvával magyarázó (hipernóva/kollapszár) modell helyes voltára meggyőző bizonyítékot kaptunk 2003 elején. Ezt jórészt egy szerencsés, „közeli” kitörésnek köszönhetjük, amelynek az égi koordinátáiról a csillagászokat a „Gamma-ray Burst Coordinates Network” (GCN) tudósította. 2003. március 29-én egy kitörés (GRB 030329 a szokásos jelöléssel, a gamma ray burst kezdőbetűi után az év, hónap és nap 2-2 számjegye azonosítja az észlelt gammakitörést) hozzánk eléggé közel villant fel ahhoz, hogy az eseményt követő megfigyelések a gammakitörések titkának a megoldásához meggyőzőek legyenek. A kitörést követő utófény színképe csaknem azonos volt az SN1998bw szupernóvéval. Ezen túlmenően a röntgenben észlelt mesterséges holdak a lökéshullám által összenyomott és felhevített oxigén ugyanolyan jellemzőit találták, mint amilyen a szupernóvákban figyelhető meg. Ilyen módon a csillagászoknak sikerült egy viszonylag közeli („mindössze” 2 milliárd fényév távolságú) gammakitörés utófényét megfigyelni, amelyik igen hasonló volt egy szupernóvéhoz.

Nem tudjuk, hogy minden hipernóva gammakitöréshez kapcsolódik-e. Mindenesetre, a csillagászok úgy gondolják, hogy minden 100000 szupernóvára jut egy hipernóva. Ez napi egy kitörést jelent, ami valójában annyi, amennyit megfigyelnek.

Csaknem bizonyos, hogy a csillagnak a magja, amely egy hipernóva közepén van, elegendően nagy tömegű ahhoz, hogy fekete lyukká roskadjon össze (sokkal inkább, mint neutroncsillaggá). Így minden megfigyelt gammakitörés egy újszülött fekete lyuk első „sírása”.

### A „rövid” gammakitörések

Jóllehet, a csillagászok úgy érzik, hogy tisztában vannak azzal, mi indítja el a gammakitöréseket a kollapszár/hipernóva modellben, de tisztában vannak azzal is, hogy vannak még megoldatlan problémák. Kezdjük például ott, hogy fentebb már foglalkoztunk azzal, hogy ez a modell csak hosszú időtartamú gammakitörésekre működik – olyanokra, amelyek hosszabbak 2 másodpercnél, és átlagosan 30 másodpercig tartanak – és jól meghatározott kitörést jól meghatározott kisebb energiájú utófény követ. 2003-ban a High Energy Transient Explorer 2 (HETE-2) mesterséges hold az első bizonyítékokat szolgáltatva a rövid gammakitörések utófényének a létezésére. Az utófény azonban, amelyik ezeket a kezdeti eredményeket adta, túlságosan rövid volt ahhoz, hogy meg lehessen határozni e kitörések távolságát. Ezen túlmenően, ezeknek a rövid kitöréseknek a tulajdonságai arra utaltak, hogy létrejöttek alapvetően más fizikai folyamatok eredménye, esetleg neutroncsillagok összeolvadásából jönnek létre. Ezt senki nem tudja. Továbbá egyes gammakitörések energiája kicsi, és a röntgenkitörések – X-ray flashes, XRF – csoportját alkotják. A BATSE műszer nem „látta” ezeket a kitöréseket. A rövid időtartamú gammakitörések definíció szerint azok, amelyek 2 másodpercnél rövidebb ideig tartanak. Ezeknek a kitöréseknek az időtartama néhány ezred másodperctől 2 másodpercig tart, és átlagos hosszuk 0,3 másodperc. A rövid kitörések lényegesen halványabbak a hosszúaknál, nagyjából egy 10-es faktorial. Ezen túlmenően, a rövid kitörések több nagyobb energiájú gammasugarat bocsátanak ki, mint a hosszúak. Végül, arra is utalnak jelek, hogy a hosszú kitörések esetén az energia átalakítása gammasugárzásra állandó ütemben történik, míg a rövidek esetén ez a hatékonyság a kitörés folyamán csökken.

A HETE-2 volt az első, amely a rövid kitöréseknél utófényt észlelt, és ezzel kiemelte ezt a gammakitörés-fajtát a „sötét” kategóriából – vagyis azok közül, amelyeknek nincs optikailag is megfigyelhető utófényük.

A csillagászok többnyire úgy gondolják, hogy a rövid kitörések nem kapcsolódnak szupernóvákhoz, vagyis rájuk nem illik a kollapszár/hipernóva modell. A csillagászok valamilyen más jelenségre gondolnak, kis méretű, nagy tömegű objektumok, például neutroncsillagok összeolvadására, de más lehetőségek is szóba jöhetnek. Ezek közé tartozik egy életpályáját befejező csillag magjának az összeroskadása, amely azt jelentené, hogy a rövid kitörésekre is tulajdonképpen a kollapszár/hipernóva modell vonatkozik. Esetleg az is lehet, hogy a gammakitöréseknek ez a fajtája



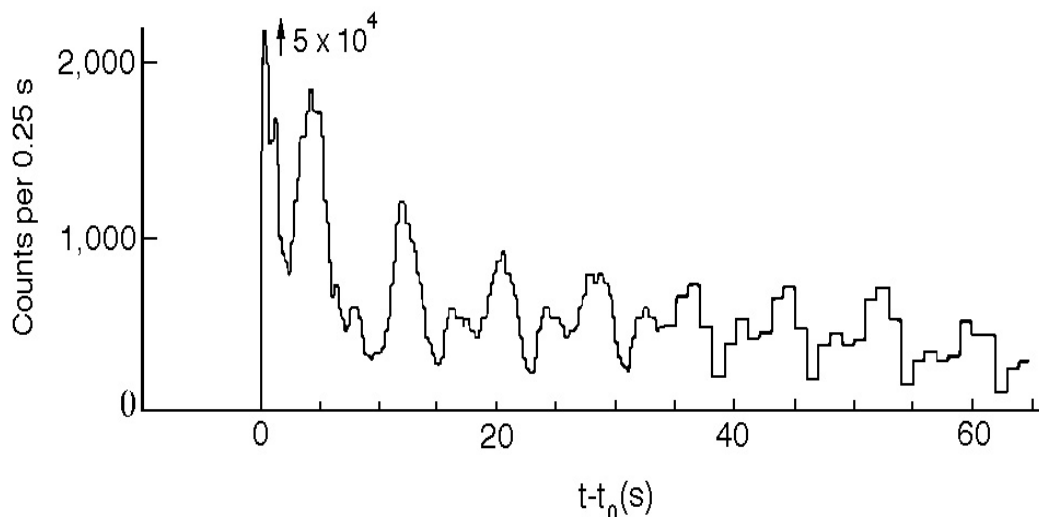
csupán egy geometriai effektus során jön létre. Minthogy a gammakitörés egy tengely mentén jön létre, szemben egy távoluló burokkal, a kisebb megfigyelhető energia és az utófény hiánya megfigyelési „kiválasztási effektus” lehet, ahol a Föld a gammakitörés kúpjának szélén van, és így az észlelő csak gyenge kitörést detektál. Ilyen módon a rövid gammakitörések és a kisebb energiájú röntgenmegfelelőjük, a röntgenkitörések (XRF) – mindketten valójában „rendes”, hosszú kitörések, amelyeket súroló beesési szögben látunk. (A határ a gamma- és a röntgenkitörések között attól függ, hol húzzuk meg a választóvonalat a röntgen- és a gammasugárzás között, ami bizonyos mértékig önkényes, mivel a kemény röntgensugarakat gyakran lágy gammasugaraknak is nevezik).

További megfigyelési munka, különösen az utófények részletes vizsgálata teszi lehetővé a csillagászoknak, hogy meghatározzák, milyen messze vannak a rövid gammakitörések. Csak akkor tudnak a csillagászok tiszta képet alkotni ezekről a robbanásokról, amelyek a legnagyobbak a 13,7 milliárd évvel ezelőtt történt ősrobbanás óta.

### Lágygammaismétlők

A lágygammaismétlők felfedezése 1979-ben történt (4. ábra). 1979 első három hónapjában fedeztek fel a máig ismert hat SGR-ből hármat. Január 7-én a Sagittarius csillagképben találták meg az első ismétlő gammaforrást, majd 1979. március 5-én egy nem mindennapi esemény történt. A Helios 2 és a Pioneer Venus Orbiter detektorai a maximálisan megfigyelhető beütésszámot mérték (szaturálódtak), tehát a forrás erősségére csak alsó határt tudtak megállapítani. Ez a forrás százszorosan meghaladta az addig megfigyelt legerősebb, Naprendszeren kívüli gammaforrás erősségét. A forrás a Nagy Magellán-felhő egyik szupernóva-maradványa volt.

Kilenc nap múlva egy újabb forrást fedeztek fel<sup>2</sup>, amely három nap alatt három kitörést is produkált. Ezek után nem volt kétséges, hogy egy új típusú csillagászati objektum felfedezéséről van szó, hiszen az addig megfigyelt több száz gammakitörés között egyszer sem sikerült ismételt aktivitást mutató forrást találni. A felfedezett három forrás legintenzívebben a lágygammaiban és a röntgentartományban sugárzott, tehát a sugárzási energia tartományban is megkülönböztethető módon jelentkezett.



4. ábra. Az egyik 1979-es esemény „fénygörbéje”

1998-ban bebizonyították, hogy az ún. magnetárok és a lágy ismétlők között kapcsolat áll fenn. A források a „lecsengő” fázisban pulzációt mutathatnak. A lágygammaismétlőket tipikusan nagyon rövid (egy másodpercnél rövidebb) kitörések jellemzik.

<sup>2</sup> <http://solomon.as.utexas.edu/~duncan/magnetar.html#Discovery>

## A gammakitörések eloszlása az égbolton

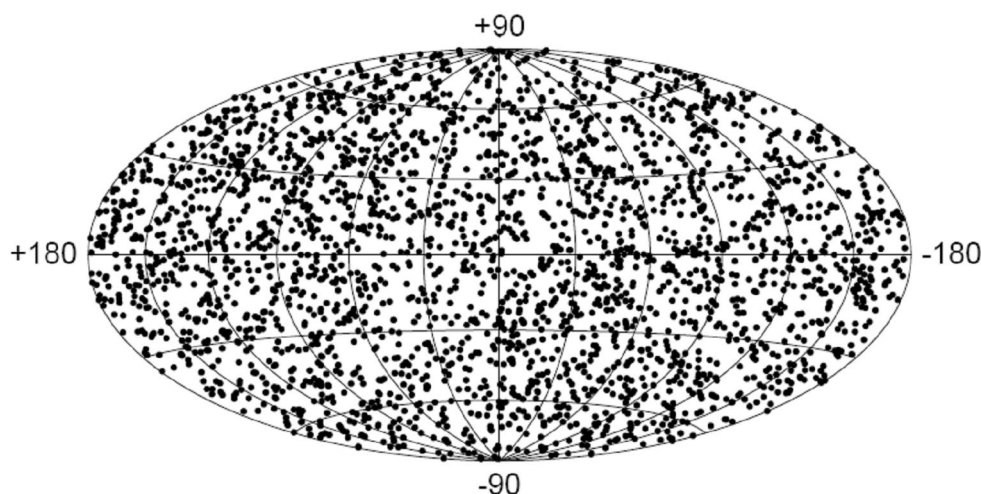
A megfigyelések szerint a kitörések többé-kevésbé egyenletesen népesítik be az eget. Amennyiben a források közeli csillagokkal lennének kapcsolatban, akkor a helyük az égre vetítve véletlenszerű lenne.

Az optikai utófények segítségével kapott vöröseltolódások megmutatták, hogy a hosszú kitörések a Kozmosz legtávolabbi ismert objektumaihoz tartoznak. A rövidekre kapott vöröseltolódás-értékek szerint távolságuk a hosszúakénál ugyan kisebb, de még így is kozmológiai léptékű. A gammakitörések így a Világegyetem anyagának nagyskálájú vizsgálatára is alkalmasak.

Magyar kutatók eredményei<sup>3</sup> is igazolják, hogy a hosszú kitörések véletlenszerűen népesítik be az eget. Ezzel szemben a rövidek eloszlása nem teljesen véletlenszerű. A kutatások arra irányultak, hogy a gammakitörések eloszlása teljesen véletlenszerű-e az égbolton. Ez matematikailag azt jelenti, hogy annak a valószínűsége, hogy valamilyen irányban kitörést lássunk, teljesen független magától az iránytól. A második feltétel, aminek teljesülnie kell az, hogy ha valamilyen irányban már észleltünk egy kitörést, akkor annak a valószínűsége, hogy az égbolt valamelyik területén egy újabbat figyeljünk meg, teljesen független az előző helyzetétől.

A vizsgálatok elvégzéséhez a *CGRO BATSE* műszerével megfigyelt, mindeddig a legtöbb kitörést tartalmazó adatbázist vették alapul. A teljes minta 2704 kitörést tartalmaz. A korábbi eredmények már arra utaltak, hogy a rövid és a hosszú gammakitörések eltérő módon népesítik be az eget<sup>4</sup>, ezért a statisztikus vizsgálatokhoz a kitöréseket több csoportra osztották. A rövidekből (időtartam < 2 s) két mintát vizsgáltak. Egyrészt a teljes rövid populációt, illetve külön a halványakat. A hosszúakból (időtartam > 2 s) is képeztek két mintát: egyrészt a teljes hosszú populációt vették alapul, illetve külön a 10 másodpercnél hosszabbakat. Ezekben a csoportokban túlmenően a közepes időtartamú kitörésekből (ld. Horváth István cikkét) is képeztek egy statisztikai mintát.

Az így kapott öt pontmintázat mindegyikénél három eljárással – Voronoi-háló, minimális kifizető fa, illetve multifraktál analízis – ellenőrizték, hogy van-e eltérés a teljesen véletlen eloszlástól. Azt találták, hogy a rövid kitöréseket tartalmazó két minta 99,90%, illetve 99,98% valószínűséggel nem teljesen véletlenül oszlik el az égbolton. Ugyanez állítható a közepesekre is, csak valamivel kisebb, 98,51% valószínűséggel. Ezzel szemben a hosszú kitörések teljesen véletlenül helyezkednek el.



5. ábra. A CGRO BATSE műszere által detektált 2704 kitörés eloszlása az égbolton

<sup>3</sup> L.: Vavrek, R., Balázs, L. G., Mészáros, A., Horváth, I., Bagoly, Z., 2008, „Testing the randomness in the sky-distribution of gamma-ray bursts”, *MNRAS*, 391, 1741

<sup>4</sup> L. Balazs, L. G., Meszaros, A., Horvath, I., 1998, „Anisotropy of the sky distribution of gamma-ray bursts”, 1998, *A&A*, 339, 1

A gammakitörések vöröseltolódásából kapott távolságadatokból tudjuk, hogy a röviddek átlagosan hozzánk sokkal közelebb vannak, mint a hosszúak ( $z_{\text{átlag}}=0,7$  a rövideknél, míg ugyanez 2,5 a hosszúaknál). A röviddek eloszlásának a véletlentől való eltéréséből arra következtethetünk, hogy abban a kozmikus térfogatban, amelyet a megfigyelt kitörések benépesítenek, 300 Mpc-et meghaladó méretű struktúrák is vannak. A Sloan Digital Sky Survey méréseiből eddig talált legnagyobb struktúra, a Sloan Nagy Fal mérete 400 Mpc-re tehető. Ez összhangban van a rövid gammakitörések eloszlásából kapott eredménnyel.

### **A gammakitörések gyakorisága és hatása a földi életre**

Jelenleg a Föld körül keringő mesterséges holdak naponta átlagosan egy gammakitörést észlelnek. Minthogy a gammakitörések akkora távolságról látszanak, amely felőleli csaknem az egész megfigyelhető Világegyetemet, egy akkora térfogatot, amely több milliárd galaxist tartalmaz, arra kell következtetnünk, hogy az ilyen kitörések rendkívül ritkák egy-egy galaxisban. A tényleges gyakoriság meghatározása nehéz, de egy Tejútrendszerhez hasonló csillagrendszerben ilyen kitörés (hosszú gammakitörésekre gondolva) 100000–1000000 évente egyszer fordul elő. Ezeknek csak néhány százaléka lövell ki nyalábot a Föld felé. A rövid kitörések gyakoriságának a becslése még ettől is sokkal bizonytalanabb, minthogy a gammasugarakat kibocsátó nyaláb nyílásszöge nem ismert, de valószínűleg a gyakoriság a hosszúakéhoz hasonló.

Egy gammakitörés a Tejútrendszerben, amennyiben elegendően közeli a Földhöz, és a nyaláb felénk irányul, igen komoly hatást gyakorol a bioszférára. A sugárzás elnyelése a légkörben a nitrogén fotodisszociációját okozza, nitrogénoxidot hozva létre, amely katalizátorként szolgál az ózon lebontásához. Egy 2004-ben készült tanulmány szerint egy kiloparszek távolságban bekövetkezett gammakitörés a Föld ózonpajzsának a felét szétrombolná, a kitörésből származó közvetlen UV sugárzás a Napéval együtt áthatolna az elvékonyodott ózonrétegen, és minden bizonnyal komolyan befolyásolná a táplálékláncot, és tömeges kihalást indítana el. Egyes szerzők becslése szerint ilyen kitörés milliárd évenként egyszer fordul elő, és úgy gondolják, hogy az ordovicium és szilur földtörténeti időszakok határán, 445 millió évvel ezelőtt bekövetkezett kihalás ilyen kitörés eredménye lehetett.

Vannak arra utaló jelek, hogy a hosszú kitörések többnyire, esetleg kizárólagosan, alacsony fémtartalmú régiókban történnek. Minthogy a Tejútrendszer fémekben gazdag a Föld kialakulása óta, ez a tény csökkenti, vagy teljesen kizárja annak a lehetőségét, hogy az elmúlt milliárd éven belül gammakitörés jött volna létre a Tejútrendszerben. A rövid kitöréseknél nincs tudomásunk ilyen elemgyakorisági korlátról. Ennélfogva, a lokális keletkezési gyakoriság, illetve a kitörés nyalábjának kúpszögétől függően nem lehet kizárni annak a lehetőségét, hogy egy közeli kitörés jelentős hatást gyakorolt a Földre.

A cikk elkészítését az OTKA K077795 téma és az MTA Bolyai Ösztöndíj támogatta.

## Gammaforrások statisztikus vizsgálata

Horváth István

Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem,  
Bolyai János Katonai Műszaki Kar (horvath.istvan@zmne.hu)

### Történeti bevezető

A gammakitörések hatvanas évekbeli felfedezése óta több csillagászati műholdon helyeztek el gammadetektorokat ezen kitörések megfigyelése céljából. Az egyik első, kizárólag e célra készített eszköz az 1991-től 2000-ig üzemelő *Compton* űrtávcső (*CGRO*, Compton Gamma-Ray Observatory) volt, amely több kitörést figyelt meg negyedév alatt, mint amennyit működése előtt összesen felfedeztek. Fedélzetén négy műszer kapott helyet, amelyek közül a legfontosabb a nyolc nagy felületű detektorból álló Burst And Transient Source Experiment (*BATSE*) volt. A detektorokat a téglatest alakú *CGRO* sarkain helyezték el, így egy adott kitörést több detektor is észlelt. Ezek együttes adataiból viszonylag pontosan meghatározhatták a kitörések irányát. Kiderült, hogy eloszlásuk az égbolton izotrop, amely rácsfolt a galaktikus forrás elméletekre (Fishman et al. 1994).

Időtartamuk szerint az egyes felvillanások két csoportba sorolhatók (*1. ábra*) (Kouveliotou et al. 1993). Az első típus a rövid kitörések. A második típus a két másodpercnél is tovább tartó kitörések, ezekenél viszont a kibocsátott fotonok energiája alacsonyabb az első típusúakénál.

További adatokból arra lehetett következtetni, hogy a megfigyelt gammakitörések két egymástól különböző fizikai folyamatban jöhettek létre. Több kutató – köztük a cikk szerzője – ezen is túlmennek, és a rendelkezésre álló adatok alapján háromféle kitöréstípus mellett érvelnek (Horváth 1998, 2002).

1997-ben, a holland–olasz együttműködésben épült *BeppoSAX* műhold röntgensugárzást tapasztalt egy nem sokkal azelőtt felfénylött gammakitörés helyén (Costa et al. 1997). Később optikai hullámhosszakon is megfigyelték a jelenséget, és megállapították, hogy a kitörés távoli galaxisból származik. Vöröseltolódás-mérések alapján kiderült, hogy a sugárforrások átlagos távolsága nyolcmilliárd fényév, de találtak olyan kitörést is, amelynek fénye több mint tizenkétfélmilliárd évet utazott idáig. A kitörések kozmikus eredete ezzel bizonyosságot nyert.

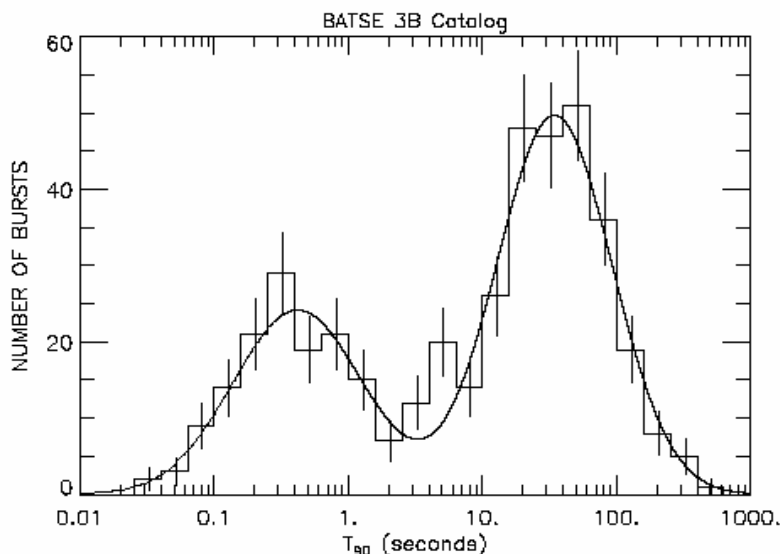
Napjainkban a *Swift* és a *Fermi* műholdak már statisztikai szempontból is sok kitörésnél figyeltek meg utófényt és mértek meg vöröseltolódást. Az amerikai *Swift* műhold mérte meg a jelenleg ismert kitörés-távolságoknak több mint kétharmadát, azonban az alacsony költségvetés miatt a gammatartományban komoly mérések végzésére nem alkalmas, érzékenységének felső határa mindössze 150 keV ([http://swift.gsfc.nasa.gov/docs/swift/about\\_swift/](http://swift.gsfc.nasa.gov/docs/swift/about_swift/)).

Érdeemes megemlíteni, hogy a *Swift* által mért vöröseltolódások átlaga ( $z=2,6$ ) jelentősen eltér a más műholdak által mértektől ( $z=1,2$ ) (Bagoly et al. 2006).

A távoli eredet miatt le kellett vonni a következtetést, miszerint a gammakitöréseket kiváltó folyamatban sokkal rövidebb idő alatt, sokkal nagyobb energia szabadul fel, mint amekkorát bármely eddig ismert folyamat megenged. Ha az energiakibocsátást izotropnak feltételezzük, nagyjából azzal egyenértékű, mintha a Nap teljes tömege néhány tized másodperc alatt szétsugározna (kb.  $10^{51}$ – $10^{54}$  erg). Az energia ilyen mértékű felszabadulására két általánosan elfogadott elmélet létezik (Balázs et al. 2003).

A hosszabb ideig tartó, de lágyabb, azaz az energia nagy részét inkább kisebb energiájú fotonokban kisugárzó kitöréstípust az ún. hipernóva jelenséggel magyarázzák. Ha egy legalább negyven naptömegű csillag elégeti nukleáris fűtőanyagát, végül fekete lyukká esik össze. Amennyiben a csillag tengely körüli forgása gyors, a bezuhanó anyag egy ún. akkréciós korongba sűrűsödik össze. Ekkor a csillaganyag jelentős része az egyenlítő síkjában, spirális pályán száguld a középpont felé, ami a hatalmas gravitációs erő következtében egyfajta generátorként működik.

Vagyis energiává alakítja az akkréciós korong anyagának egy részét, két igen vékony, forgástengely irányú nyalábban (jet) kisugározva azt.



1. ábra. A gammakitörések időtartam-eloszlása

Ezt az elképzelést támasztja alá, hogy a pontosabb megfigyelések szerint az ilyen kitörések a galaxisoknak azon aktív vidékeiről származnak, ahol éppen csillagok keletkeznek. Ugyanis itt jönnek létre azok a nagy tömegű, éppen ezért igen rövid életű csillagok, amelyek halálakor megfigyelhető a jelenség. Egy másik bizonyíték, hogy több ilyen kitörés helyén egyúttal szupernóva-robbanást is megfigyeltek, ennek közepén marad végül a fekete lyuk. Az pedig, hogy a gammasugárzás csupán két szűk nyalábban indul útjára, jelentősen, akár három nagyságrenddel is lecsökkenti a kitöréshez szükséges energia mennyiségét. Ez persze azt is jelenti, hogy csak akkor vesszük észre a jelenséget, ha a jet éppen felénk mutat.

A rövid, de keményebb kitörések keletkezését neutroncsillag-kettősök összeolvadásával próbálják magyarázni. A neutroncsillag nagy – de az előbb említetteknél jóval kisebb – tömegű csillagok halálakor keletkezik, anyaga sűrűbb, mint bármi másé az univerzumban. Az egymás körül keringő két neutroncsillag az általános relativitáselmélet szerint gravitációs hullámokat sugároz ki, ennek következtében energiát veszít, és spirális pályán egyre közelebb kerül egymáshoz. Az ütközéskor fekete lyuk keletkezik, körülötte egy hatalmas, relativisztikus sebességgel táguló tűzgolyóval, amely a környező gázcsomóknak ütközve gamma- és röntgensugárzást bocsát ki. A mérések alapján az ilyen típusú gammakitörések általában nem jönnek olyan messziről, mint a hosszúak, és keletkezési helyük is változatosabb. Az egyik probléma ezen elgondolással nem az, hogy hogyan tud néhány tized másodperc alatt ennyi energiát kibocsátani a rendszer, hanem az, hogy miért nem rövidebb idő (ezred másodpercek) alatt történik az emisszió.

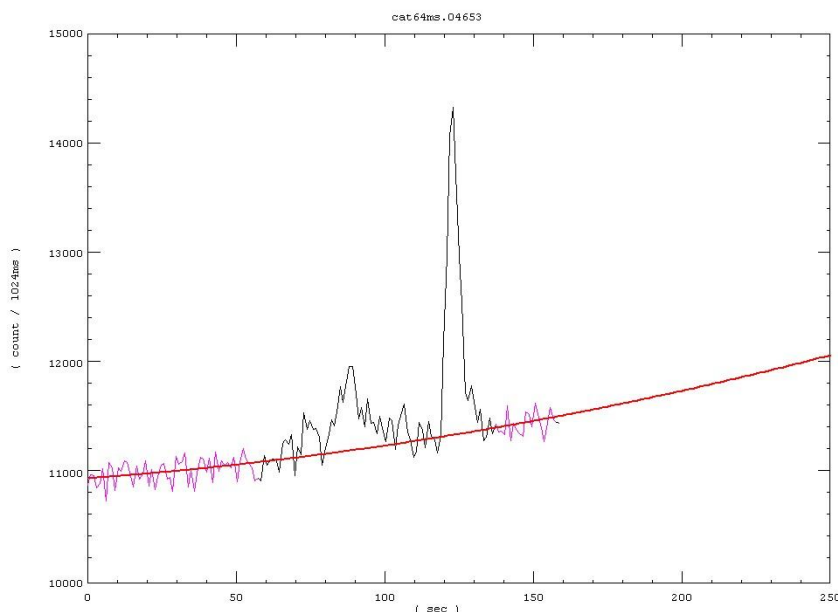
A legújabb (2008-ban pályára állított) műhold, a *Fermi* két műszere, a LAT és a GBM jól kiegészíti egymást, előbbi a nagyobb, utóbbi a kisebb energiákon figyeli meg a gammakitöréseket. Mivel a GBM látótere a teljes égboltot lefedi, kitörés észlelése esetén időben jelezni tudja irányát a LAT-nak – és a többi, a földön vagy a világűrben elhelyezett teleszkópnak. A GBM méréseiből katalógust kívánnak létrehozni, amely többek között tartalmazza a kitörések fluenciáját, csúcspénységét és időbeli lezajlását. Az állandó adatrögzítésnek köszönhetően utólag olyan gammakitörések nyomait is lehet majd keresni, amelyeket valós időben nem észleltek a detektorok. Ez háromszorosára növeli a GBM érzékenységét (0,35 foton/cm<sup>2</sup>/s). A két műszer együttes megfigyelései magyarázattal szolgálhatnak a gammakitörések alacsony (keV/MeV) és nagy energiájú (GeV) gammafoton-kibocsátása közötti kapcsolatra, amely megfelelő detektorok híján a mai napig nem tisztázott. Emellett az eddigieknél sokkal részletesebb energiaspektrumot adhatnak, ugyanis a

jelenleg rendelkezésre álló adatok nem mutatják meg egyértelműen, milyen módon történik az energia kibocsátása.

### Időtartam-vizsgálatok

A gammakitörések hosszának a definiálása önmagában sem könnyű feladat, ugyanis az egyes fotonokról nem tudhatjuk, hogy milyen irányból érkeztek (a SWIFT műhold megfigyeléseit kivéve), ezért a háttér és a forrás fotonjai megkülönböztethetetlenek. Tehát, hogy mikor kezdődött és ért véget a kitörés, gyakorlatilag meghatározhatatlan. A 2. ábrán látható egy „gammafénygörbe”. Természetesen a kitöréshez tartozó időtartam alatt is érkeznek fotonok a háttérből. Ezért fontos feladat a háttér szintjének és időbeli viselkedésének meghatározása. Ehhez ismernünk kell, hogy mikor volt a kitörés. Ebből a circulus viciosus-ból a kivezetőt a háttér biztos kijelölése jelenti.

A kitörések hosszának ( $T_{90}$ ) vizsgálata mindig is fontos kutatási terület volt. Már a nyolcvanas években felvetették Mazets és társai (1981), hogy az időtartamok eloszlásában egyenetlenségek lehetnek, ezáltal a kitörések esetleg csoportosíthatóak. E felvetés igazolásához nagyméretű, homogén mintára volt szükség. A CGRO sok feladata közül éppen ez volt az egyik. Ez a minta az első BATSE katalógus (Fishman et al. 1994) megjelenésével rendelkezésre állt. A katalógus 260 megfigyelt kitörésére 222 esetben volt lehetséges az időtartam meghatározása. Ezen időtartamok eloszlását vizsgálták meg Kuveliotou és társai (1993). Az eloszlást az említett cikk alapján az 1. ábra mutatja. Később kiderült, hogy az így azonosított rövid és hosszú kitörések más lényeges tulajdonságokban is különböznek egymástól. Kuveliotou-ék a két eloszlásbeli maximum közötti részt parabolikusan illesztették, és a minimum helyét nagyjából 2 másodpercnél találták meg (1. ábra).



2. ábra. A 04653 jelű kitörés „fénygörbéje”

Az említett BATSE katalógus több részből áll. Három fő táblázat található meg a <http://www.batse.msfc.nasa.gov/batse/grb/catalog/> internetcím alatt. A basic táblázatban olyan alapadatok vannak felsorolva, mint a katalógusszám (trigger number), a megfigyelés napja, ideje, a kitörés égi koordinátái stb. A Flux and Fluence táblázat tartalmazza az azonosító számon kívül a fluencia adatot, ami az adott frekvencia tartományban a kitörés teljes ideje alatt a kitörésből beérkező összes energiát jelenti. Ez lényegében a fénygörbe integrálja a háttér levonása után. A flux vagy csúcshényesség (peak flux) adat lényegében a fénygörbe maximális értéke. Háromféle

csúcspontosságát tüntetnek fel, mely a három időskála használatából következik (1024, 256 és 64 ezred másodperc). A 2. *ábra* mutatja a 4653 jelű kitörés megfigyelt intenzitásgörbéjét.

A 3B BATSE katalógus 1122 kitörést tartalmazott. Az időtartam-táblázatban 834 kitörés adatai voltak megtalálhatók. A fluxustáblázatban és az időtartam-táblázatban is megtalálható kitörések száma 797 volt. Ez kevesebb, mint a 834 kitörésszám, viszont a további tanulmányozáshoz szükség lehet a fluxus és fluencia értékére, ezért célszerű azon kitöréseket tanulmányozni, amelyekre a teljes adatsor rendelkezésre áll. A 3B katalógus időtartamadatai ( $T_{90}$ ) a 3. *ábrán* vannak ábrázolva. Mivel a kitörések időtartamai 4-5 nagyságrendet fognak át, a század másodperces skálától a több száz másodperces skáláig, célszerű az adatokat logaritmikus skálán ábrázolni, ahogyan azt a már eddig idézett cikkek *ábráin* is láthattuk (3. *ábra*).

Az *ábrán* az eloszlás több csúcspontot is mutat. Jól elkülöníthető a hosszú és a rövid kitörések csoportja. De közöttük is látható egy „újabb” csoport. E csoport létét vagy nem létét (esetleg csak véletlen fluktuációról van szó) 1998-ban vizsgáltam meg (Horváth, 1998).

A vizsgálatok során a  $\chi^2$  próbát alkalmaztam. A  $\chi^2$  próba akkor alkalmazható, ha a minta mérési pontjaihoz ismerjük azok hibáit. Jelen esetben beütésszámokról van szó, tehát Poisson-eloszlást feltételezve a hiba a beütésszám négyzetgyöke. Ha az  $x_i$  pontokban egy  $f(x)$  függvény illesztése történik, akkor

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(f_i - f(x_i))^2}{\sigma_i^2} \quad (1)$$

ahol  $\sigma_i$  a már említett hiba, illetve a beütésszám négyzetgyöke. A  $\chi^2$  várható értéke bizonyos feltételek mellett  $N-\nu$ , ahol  $\nu$  az illesztett paraméterek száma ( $N$  a mérési pontok száma). Ha a hiba eloszlása korrelálatlan Gauss-eloszlás, akkor a  $\chi^2$  eloszlása ismert, és így a várható értéktől való eltérés valószínűsége megadható.

Mivel a kitörések hosszának eloszlása lognormálisnak látszik, ezért a logaritmikus eloszlást célszerű Gauss-görbékkel illeszteni. Bár az előzőekből már kitűnt, hogy létezik az irodalomban elfogadott hosszú és rövid kitörések csoportja, a fittélést a korrekt matematika kedvéért egy Gauss-illesztéssel kell kezdeni. Ezen kétparaméteres fit valószínűsége 0,1%.

A *nullhipotézis* jelen esetben: Az eloszlás egyetlen Gauss-görbével leírható adathalmaz megfigyelt adataiból kapható. Ezért 0,001 annak a valószínűsége, hogy a nullhipotézis igaz. Vagyis nagy szignifikanciával mondhatjuk, hogy a mérési adatok nem írhatók le egy lognormális eloszlással.

A *második nullhipotézis*: Az eloszlás egy 2 Gauss-görbével leírható adathalmaz megfigyelt adataiból kapható.

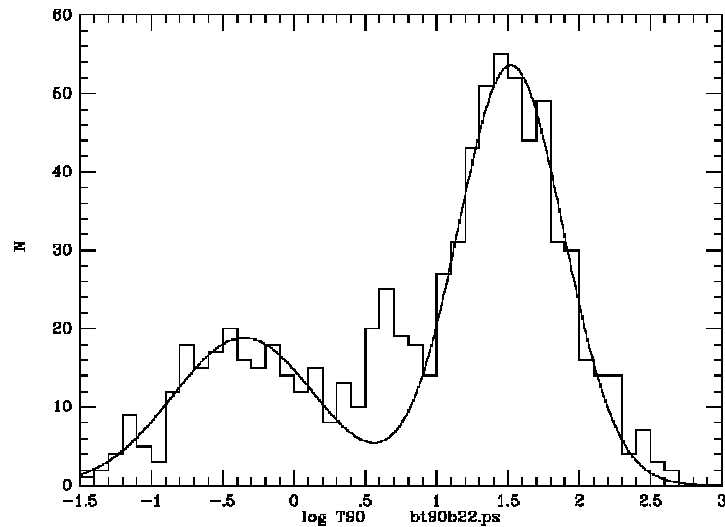
Az illesztést  $\chi^2$  módszerrel végeztem, a legjobb  $\chi^2$  46,8 volt, ami 40% valószínűségnek felel meg. Tehát ezt a nullhipotézist nem vethetjük el. Lehetséges, hogy az alaphalmaz, amiből az adataink származnak, két Gauss-görbével leírható.

Ez az illesztés látható a 3. *ábrán*. A két normális eloszlás összege feltűnően jól egyezik mind a két „szárnyon”, de jól látható, hogy ahol az „elméleti” görbe minimális, a megfigyelt görbe nem minimális, sőt jelentős eltérés tapasztalható.

A csillagászati spektroszkópiában ez jól ismert jelenség. A spektrum jól illeszthető egy elméleti spektrummal, viszont lehetnek lokális eltérések az elméleti és a megfigyelt görbék között. Ott ezek tipikusan spektrumvonalakat jeleznek. Az ott használt módszer, az F-teszt jelen esetben is alkalmazható.

Ehhez egy három Gauss-görbe összegeként előálló elméleti görbét kell illeszteni. Ez esetben a kapott  $\chi^2$  érték 24. Ez önmagában még semmit nem mond, viszont levonva a két Gauss-összegénél kapott legjobb  $\chi^2$ -ből, a kapott  $46,8-24,0=22,8$  érték megmondja az F-teszt valószínűségét. Mivel a második elméleti görbe 3 új paramétert is használ, a valószínűség egy három szabadsági fokú  $\chi^2$ -eloszlását követi. A 22,8-nak nagyon alacsony,  $10^{-4}$  valószínűség felel meg. Tehát ilyen kicsiny annak

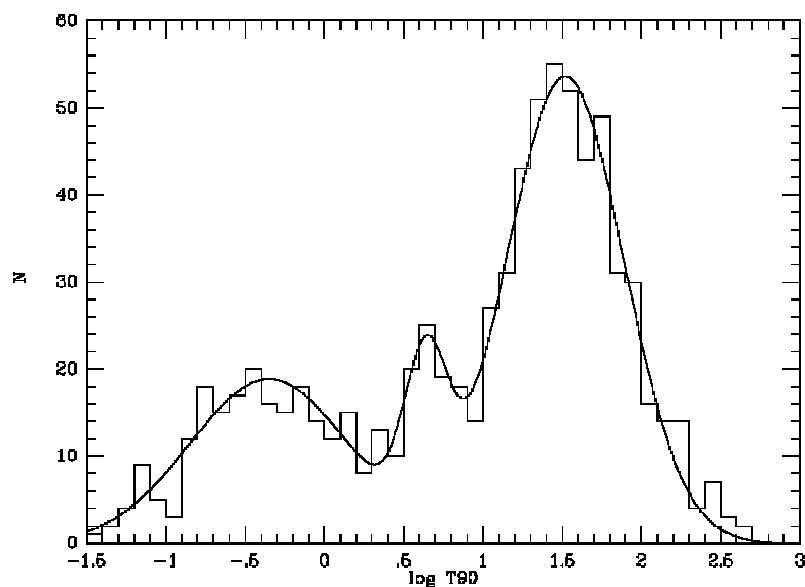
a valószínűsége, hogy véletlenül előálljon egy, a mérésnél kapott eloszlás. A legjobb 3-Gauss-illesztést a 4. ábra mutatja.



3. ábra. Az időtartamok eloszlása a 3B katalógus alapján

Az egyezés jónak mondható, ami nem meglepő 8 illesztett paraméter esetén. A fenti eredményeket közlő *Astrophysical Journal* kötetben jelent meg egy másik cikk (Mukherjee et al., 1998), amely ugyancsak a gammakitörések csoportjaival foglalkozott. Többváltozós analízist alkalmazva 6 dimenziós térben (tehát 6 mért paramétert használva) vizsgálták meg a kitörések csoportosíthatóságát, és hasonlóan három csoport létét látták statisztikusan igazolva.

Sajnos a Compton műhold 2000. május 26-án befejezte működését. A CGRO 1991. április 19. és 2000. május 26. között több ezer eseményt rögzített (triggerelt). Ezek közül 2702 került rögzítésre mint gammakitörés. A megfigyelt adatokat a BATSE Végleges Katalógusban (Final BATSE Catalog) lehet elérni ([http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/batse/BATSE\\_Ctlg/index.html](http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/batse/BATSE_Ctlg/index.html)). Az időtartam-táblázatban 2041 kitörésre található  $T_{90}$  adat. A további elemzések érdekében ezek közül azon 1929 kitörés adatait használtuk, amelyekről fluxusadatok is rendelkezésre álltak.



4. ábra. A 3B katalógus adataira illesztett 3 Gauss-eloszlás



A  $T_{90}$  kitöréshosszak eloszlásának sűrűségfüggvényét az 5. ábra mutatja. A középső csoport ezen az ábrán nem annyira szembetűnő, mint az a korábbi adatokban volt. Az előző fejezetben használt  $\chi^2$  elemzésnél erőteljesebb a maximum likelihood (ML) módszer. ML esetén nem kell rekeszekbe osztani a mért adatokat. Minden adat önmagában szerepel az elemzés során.

Egy Gauss-görbe illesztése – hasonlóan az előzőekhez – most sem ad jó eredményt. Két Gauss-görbét illesztve 5 illesztendő paraméterünk van. Egy Gauss-görbét 3 paraméterrel írhatunk le; az eloszlás közepe, szórása és amplitúdója (l. a 3. egyenletet). Következésképpen két Gauss-görbe esetén 6 illesztendő paraméterünk van, de van egy feltétel is az amplitúdók összegére. Az amplitúdók összege vagy adja meg az észlelt objektumok  $N$  számát, vagy ha a megtalálási valószínűség az illesztett függvény, akkor a teljes integrál legyen 1. A 3. egyenlettel leírt Gauss-eloszlás integrálja 1, tehát az előbb említett feltétel, akkor elégíthető ki, ha az illesztés során használt  $w$  együtthatók összege 1.

Az illesztésnél használt likelihood függvény az alábbi alakú:

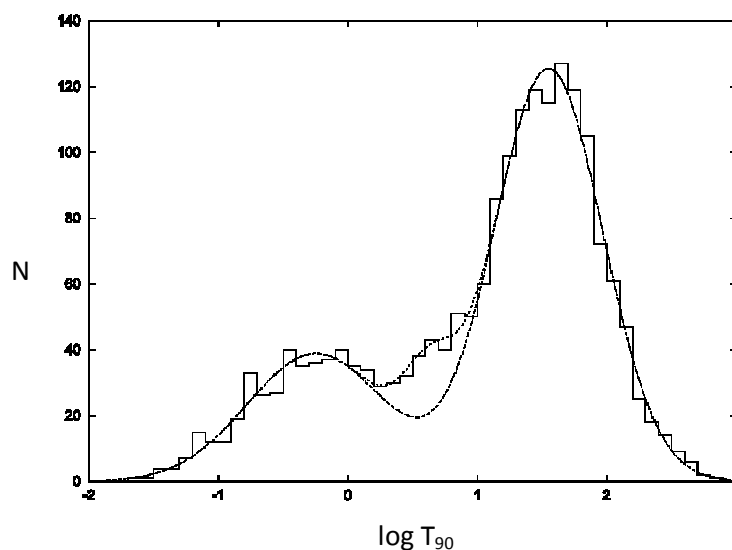
$$L = \sum_{i=1}^N \ln(w_1 f_1(x_i, T_1, \sigma_1) + w_2 f_2(x_2, T_2, \sigma_2)) \quad (2)$$

ahol  $f_k$  a már említett

$$f_k = \frac{1}{\sigma_k \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - T_k)^2}{2\sigma_k^2}\right) \quad (3)$$

alakú Gauss-függvény. Két Gauss-görbe illesztése esetén  $L$  maximális értéke 12320,11 (l. Horváth, 2002). Három Gauss-görbe illesztése esetén  $L$  maximális értéke 12326,25. A likelihood maximális értékének javulása várható, hiszen több paraméterrel írjuk le az illesztett elméleti görbét. Jelen esetben 3-mal nőtt a paraméterek száma. Ez esetben a ML értékek különbségének a kétszerese egy 3 szabadsági fokú  $\chi^2$  eloszlást követ (Kendall és Stuart, 1976).

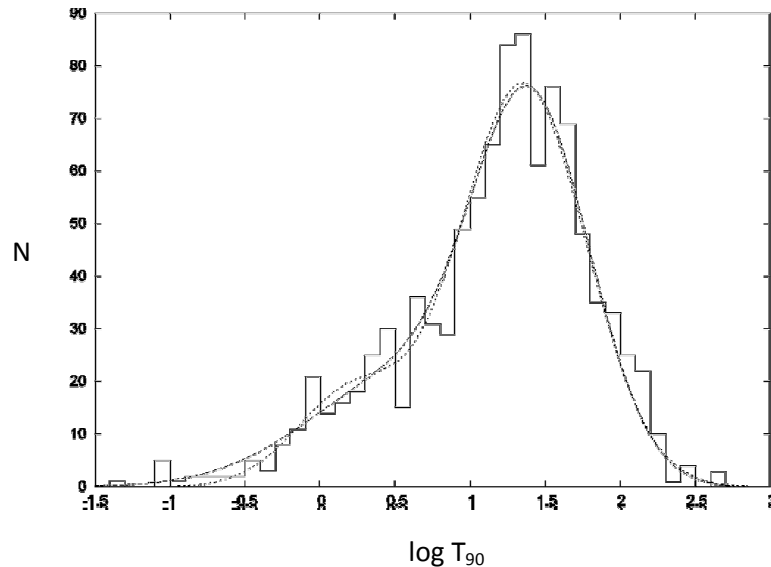
A  $2(L_3 - L_2) = \chi_3^2$  képlet alapján számított valószínűség 0,5%. Az illesztéssel kapott „legjobb” görbéket 2, illetve 3 Gauss-görbe esetén az 5. ábra mutatja.



5. ábra. A végső BATSE katalógus adatainak eloszlása

A Beppo-SAX műhold, mint már arról korábban írtunk, legnagyobb felfedezése a kitörések azonosítása volt. A műhold 1996 (az áprilisi fellövést követő beüzemelés után 1996 júliusában történt az első megfigyelés) és 2002 (utolsó megfigyelés áprilisban, megsemmisülés egy évvel később) közötti időszakban több mint ezer gammakitörést figyelt meg. A 2009-ben publikált teljes katalógus (Frontera et al. 2009) szerint 1082 gammakitörést figyeltek meg. A katalógus ezek közül 1003 esetben ad meg időtartamot.

A katalógusban két időtartam van feltüntetve. A szokásos  $T_{90}$  és az ún.  $T_{det}$ , ami lényegében azon másodpercek száma, amikor a megfigyelt fotonszám a kétszeres szórásnál jobban meghaladta a háttérteret. Jelen fejezet vizsgálataiban a  $T_{90}$ -et használtam fel, melynek megfigyelt eloszlását a 6. ábra mutatja.



6. ábra. A Beppo-SAX műhold gammakitörés-adatainak eloszlása

Érdeemes az előzőekhez hasonlóan megvizsgálni, hogy az eloszlás hány komponenssel írható le. Maximum likelihood módszert alkalmazva a már ismert módon  $k=1, 2$  stb. Gauss-görbét kell illeszteni az eloszlásra. Egy Gauss-görbét illesztve a maximális likelihood  $L_{1max}=5951,895$  volt. Két Gauss-görbét illesztve a likelihood maximuma 6011,355 volt. Tehát a növekedés több mint 59, ez sokkal kisebb, mint  $10^{-10}$ -es valószínűségnek felel meg, vagyis a javulás reális. Két Gauss-függvény összegével sokkal jobban leírhatjuk az eloszlást, mint eggyel (Horváth, 2009).

Három Gauss-görbét illesztve a legjobb likelihood 6015,585 volt, így a javulás 4,23. Ennek a duplája 8,46, ami 2%-os valószínűségnek felel meg, vagyis a javulás itt is reális.

Tehát a Beppo-SAX műhold adataiban is kimutatható a harmadik csoport, a közepes gammakitöréseké.

*A cikk az OTKA K077795 téma és az MTA Bolyai Ösztöndíj támogatásával készült.*

**Irodalom:**

Bagoly, Z., et al. 2006, A&A, 453, 797  
 Balázs, L. G., et al. 2003, A&A, 401, 129  
 Costa, E., et al. 1997, Nature, 387, 783  
 Fishman, G. J., et al. 1994, ApJS, 92, 229  
 Frontera, F., et al. 2009, ApJS, 180, 192  
 Horváth, I., 1998, ApJ, 508, 757  
 Horváth, I., 2002, A&A, 392, 791  
 Horváth, I., 2009, Ap&SS, 323, 83

- Horváth, I., Balázs, L. G., et al. 2006, A&A, 447, 23  
Kendall, M. & Stuart, A., 1976, The Advanced Theory of Statistics, Griffin, London  
Kouveliotou, C., et al. 1993, ApJ, 413, L101  
Mukherjee, S., et al. 1998, ApJ, 508, 314  
Mazets, E. P., & Golentskii, S. V. 1981, Astrophysical Space Physics Rev., 1, 205

## Gammakitörések földi megfigyelései

Kelemen János  
MTA KTM CSKI

1967-ben a nukleáris kísérletekre vonatkozó tilalom betartását ellenőrző VELA mesterséges holdak olyan röntgen- és gammasugár-felvillanásokat találtak, amelyek emlékeztettek a földi atombomba-robbantások által keltett elektromágneses sugárzás jellegzetességeire. Vagyis igen rövid ideig tartó erős sugárzásnövekedést figyeltek meg. A holdakon elhelyezett érzékelők kb. 5000 kilométeres körben tudták az esetleges tiltott nukleáris robbantásokat lokalizálni, azonban az észlelt felvillanások idején bizonyíthatóan nem történtek földi atomkísérletek. A gammasugárzás pillanatnyi, jelentős megerősödésének ezért Földön kívüli okot kellett keresni. A megfigyelésekre vonatkozó titkosítást feloldva 16 megfigyelés alapján Klebesadel és munkatársai (1973) *Observations of Gamma-Ray Bursts of Cosmic Origin* címmel összefoglalták az addigi vizsgálatok eredményeit:

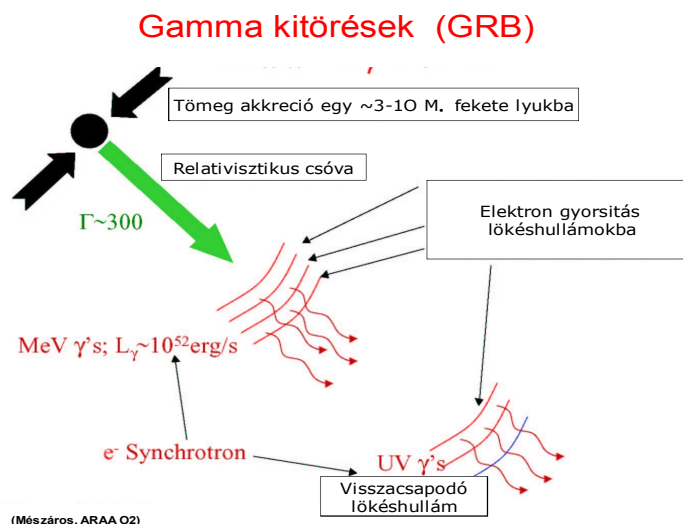
- a felvillanások időtartama 30 ms és 1000 s közé esik,
- a több VELA szondán mért beérkezési időpontok különbsége alapján a források az éggömbön helyezkednek el,
- nem a Naptól érkezik a sugárzás,
- a felvillanások nem azonosíthatók sem térben, sem időben szupernóva-robbanásokkal.

A rejtélyes objektumok vizsgálatában komoly előrelépést jelentett a Compton Gamma Ray Observatory 1991-ben történt felbocsátása. Ennek BATSE (*Burst and Transient Source Experiment*) nevű igen érzékeny gammasugár-detektora több ezer gammasugár-felvillanást (Gamma ray burst, GRB) észlelt, melyek égi eloszlása teljesen egyenletes (izotrop), vagyis nem mutatnak semmiféle csoportosulást a galaktikus fősík vagy a galaktikus centrum irányában. Ez elég szilárd bizonyíték amellet, hogy a GRB-k extragalaktikus eredetűek. Az ismert fehér törpékkel, pulzárokkal, szupernóvával, gömbhalmazokkal, kvazárokkal, Seyfert-galaxisokkal és egyéb aktív galaxismagokkal történt egybevetés sem járt eredménnyel. Az igen kemény gammasugárzás természetét magyarázó elméletek felvetették, hogy a kitörésnek a környezetére való hatása miatt hosszabb hullámhosszakon, vagyis röntgen-, ultraibolya, optikai stb. utáncfénylésnek (afterglow) kell megjelennie.

Mai ismereteink szerint GRB jelenség akkor lép fel, amikor egy nagy tömegű csillag magjában az energiatermelés leállása miatt hirtelen összeomlás következik be, vagy egy kettős rendszerben a kísérő és a főcsillag összeolvad. Egy másik lehetőség két neutroncsillag vagy egy neutroncsillag és egy fekete lyuk ütközése. Mindegyik esetben igen rövid idő alatt bekövetkezik a gravitációs összeomlás, és a Nap tömegének többszörösét kitevő tömegű fekete lyuk jön létre, amely körül a környező anyagból egy tórusz marad. Ezt a fekete lyuk bekebelezi, és a közben felszabaduló gravitációs energia szétsugárzódása a környező anyagot egy forgástengely irányú kúp mentén relativisztikus sebességgel kilöveli. Az energia felszabadulása igen hatékony, az anyag nyugalmi tömegének 30-40 %-a szétsugárzódik. Az összeomlásban részt vevő kompakt objektumok (fekete lyuk, neutroncsillag, fehér törpe) típusától és környezetük jellegétől függően a fellépő magneto-hidrodinamikai effektusok keskenyebb vagy szélesebb jeketet hoznak létre, amelyek a belső forrás energiáját különböző hatékonysággal – leegyszerűsítve: “gyorsasággal” – juttatják ki. A kompakt objektumok ütközése gyors (< 5 s), az összeomló csillagmagok hosszabb (10–1000 s) robbanáshoz vezetnek. A nagy energiájú gammasugárzás az energiafelszabadulás során bekövetkező részecskefizikai folyamatok eredménye. A kirobbanó relativisztikus jetnek a környező anyaggal történő kölcsönhatása során – amikor a jet energiája egy vagy több lökéshullámfrontban transzformálódik – jön létre a robbanást követő kisebb energiájú röntgen-, UV és optikai sugárzás, a GRB utófénylése (1. ábra).

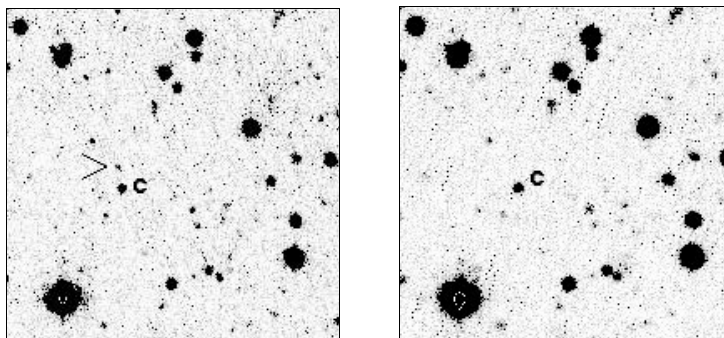
A gammakitörések kutatásában fontos áttörés akkor született, amikor 1997 februárjában a BeppoSAX mesterséges hold röntgenkamerájával sikerült megfigyelni a gammasugár-kitörést követő,

halványuló röntgenutófénylést. A későbbi megfigyelések arra is fényt derítettek, hogy az intenzitáscsökkenés megfigyelt módja nem egyeztethető össze egy szferikusan robbanó tűzgömb elképzeléssel, hanem igazolták a keskeny, relativisztikus sebességű sugárnyaláb-jet létezését (1. ábra).



1. ábra. Mészáros Péter (PSU) magyarázó ábrája a GRB jelenség legfontosabb jellemzőire.

A korábbi BATSE adatok tanulmányozása már az 1990-es években elkezdődött a Csillagászati Kutatóintézetben, és az elsők között kapcsolódtunk be a GRB utáncfénylések keresésébe is (2. ábra).



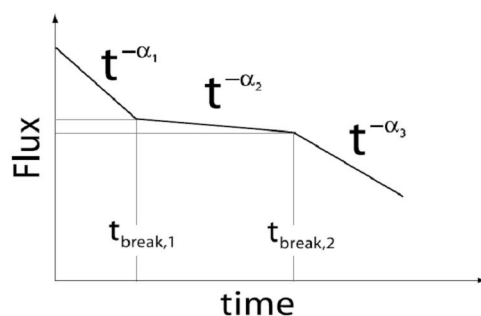
2. ábra. Az első hazai GRB OT (optikai transziens) megfigyelésünk (Kelemen, 1997). A bal oldali kép 1997. május 15,994 UT időpontban készült, a jobb oldali 1997. június 01,001 UT időpontban. A későbbi képen nyoma sincs a bal oldalon nyíllal jelzett OT forrásnak. (A C jelű objektum az összehasonlító csillag.)

A GRB070508 gamma-, röntgen és optikai megfigyelései lehetővé tették, hogy távolságát meghatározzuk. A folyamatos fénycsökkenés után talált, tovább nem halványuló objektum egy távoli ( $z = 0,835$ ) galaxisnak bizonyult, vagyis a GRB fizikai kapcsolatban volt ezzel a kozmológiai távolságban levő extragalaxissal.

Az optikai utáncfénylések vizsgálatának másik fontos hozadéka a fénycsökkenés ütemének pontos megismerése. A GRB felvillanását előidéző objektumot elhagyó relativisztikus jet és a környező közeg kölcsönhatásától, továbbá a kiáramló jet impulzív vagy folyamatos jellegétől függően az energiavesztés időfüggése változik. A  $\sim t^x$  összefüggésének  $x$  kitevője a mérésekből meghatározható, így ismeretében eldönthető, hogy a jetmodellek melyike írja le a valóságot a legjobban (Mészáros, Rees, 1997).

A GRB utófénylések megfigyelt száma akkor növekedett meg ugrásszerűen, amikor felbocsátották a NASA Swift mesterséges holdját. A Swift 2004. november 20-i indítása új lehetőségekkel bővítette a GRB-k kutatását. A gammasugárzás kitörésének irányát kódolt maszkkal ellátott gammadetektor állapítja meg, és a vele párhuzamosan szerelt röntgen- és ultraibolya-optikai teleszkóp a szondával együtt gyorsan a kitörés irányába fordul. Így legfeljebb percek alatt észlelés kezdődhet az utófénylés röntgen- és optikai jellemzőinek meghatározására. Csak azokban a speciális esetekben nincs erre lehetőség, amikor az átfordulás irányába a Föld, a Nap vagy más zavaró égitest kerülne.

A Swift gammasugár-detektora (BAT, burst alert telescope) által érzékelt GRB adatai a NASA TDRSS (*Tracking and Data Relay Satellite System*) geoszinkron műholdakból álló hálózata segítségével azonnal a vezérlő központba jutnak, ahonnan a forrás irányára vonatkozó információ email és sms üzenőrendszeren azonnal eljut a világ összes a Swift Follow Up Team hálózatba tartozó földi obszervatóriumába. Ezekben az égbolt adott területét megfigyelni képes automata távcsövek percek alatt elkezdik a GRB utófénylésének fotometriai és spektroszkópiai vizsgálatát. Ezzel lehetőség nyílik a fényváltozás nagy időfelbontású vizsgálatára, valamint a vöröseltolódás mértékének spektroszkópiai úton történő megállapítására. Ideális esetben vizsgálható a GRB-t tartalmazó extragalaxis, megállapítható annak típusa és jellege.



3. ábra. GRB röntgenutófénylések vizsgálata alapján konstruált kanonikus fénygörbe.

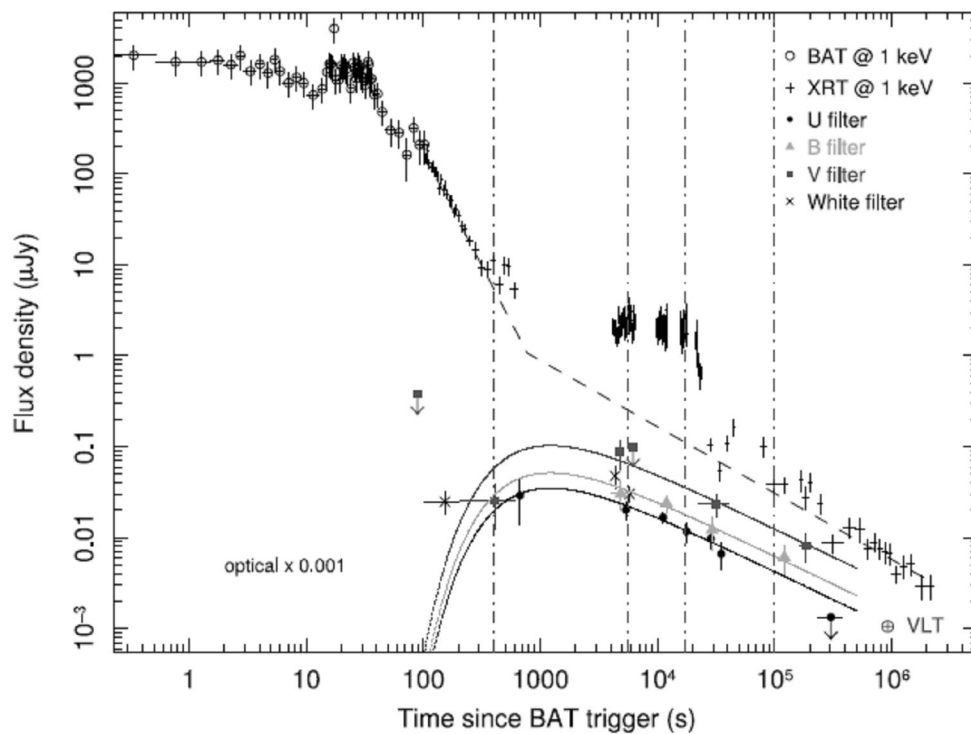
A Swift XRT adatainak vizsgálata alapján sikerült egy minden esetre érvényesnek tekinthető intenzitáslefutási sémát konstruálni. A GRB röntgenutófényléseinek kanonikus sémája 3. ábrán látható.

A kanonikus fénygörbe legkorábbi, meredek csökkenést mutató szakaszát – amely legfeljebb néhány száz másodpercig tart – feltehetően a prompt GRB sugárzása okozza, később a csökkenés üteme megtörik, és néhány ezertől néhány tízezer másodpercig tartó, enyhén csökkenő szakasz következik. Ezt a GRB jetnek a környező anyagba ütközésekor keletkező erős lökéshullámfront sugárzása kelti, a lassú csökkenés oka a belső energiautánpótlás viszonylag hosszú fennmaradása. Amikor a GRB „belső motorja” kifulladás és megszűnik a belülről jövő energiautánpótlás, újabb töréspont következik. Ezután a lökéshullám sugárzás és tágulás miatt veszi el az energiáját.

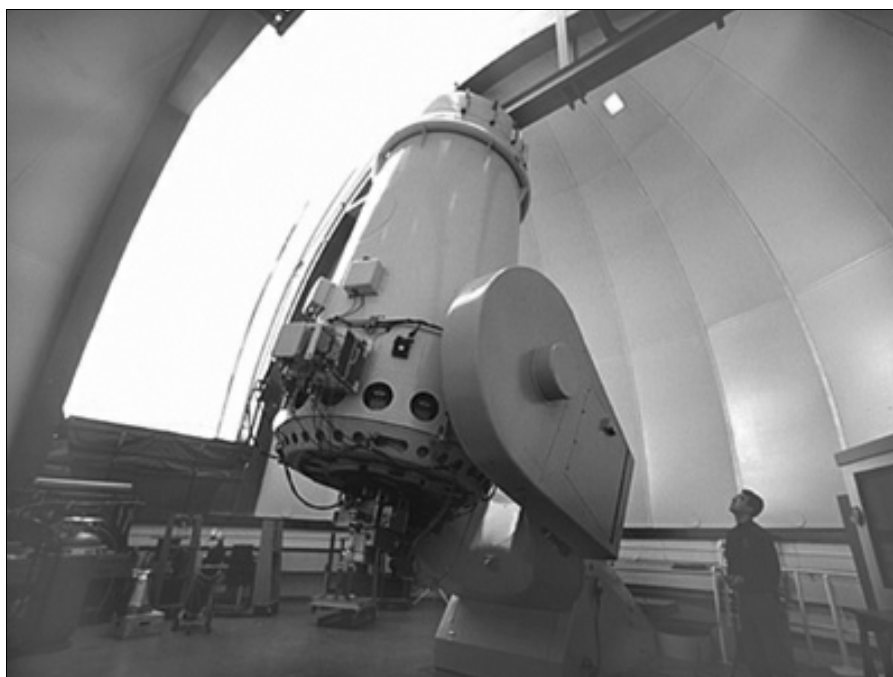
Az optikai utófénylések megfigyelésére csak a GRB BAT trigger után van lehetőség. Átlagosan 100 másodperc telik el addig, amíg az optikai teleszkóp a gammakitörés irányába fordul, és megkezd az észlelést. Ha az optikai utófénylés halvány és csak földi teleszkópokkal vizsgálható, újabb percek telnek el a riasztás kibocsátásával és a teleszkópok célra fordulásával (Troja et al., 2007).

Az időkésés nem tűntethető el, viszont csökkenthető, ha automatizált földi megfigyelő rendszerek állnak rendelkezésre. A szinte azonnali optikai észlelés akkor lehetséges, ha a földi rendszer telemetriai kapcsolat révén folyamatosan követi a keringő űrszonda orientációját. Így a gammakitörés megfigyelésekor – ha az egyéb körülmények is megfelelőek – azonnal elkezdhető az optikai követés. Az ismertetett feladatra gyorsan mozgatható, több kamerából álló, együttesen legalább a BAT látómezejét lefedő optikai rendszerek a legalkalmasabbak, ha ezeket a Földön

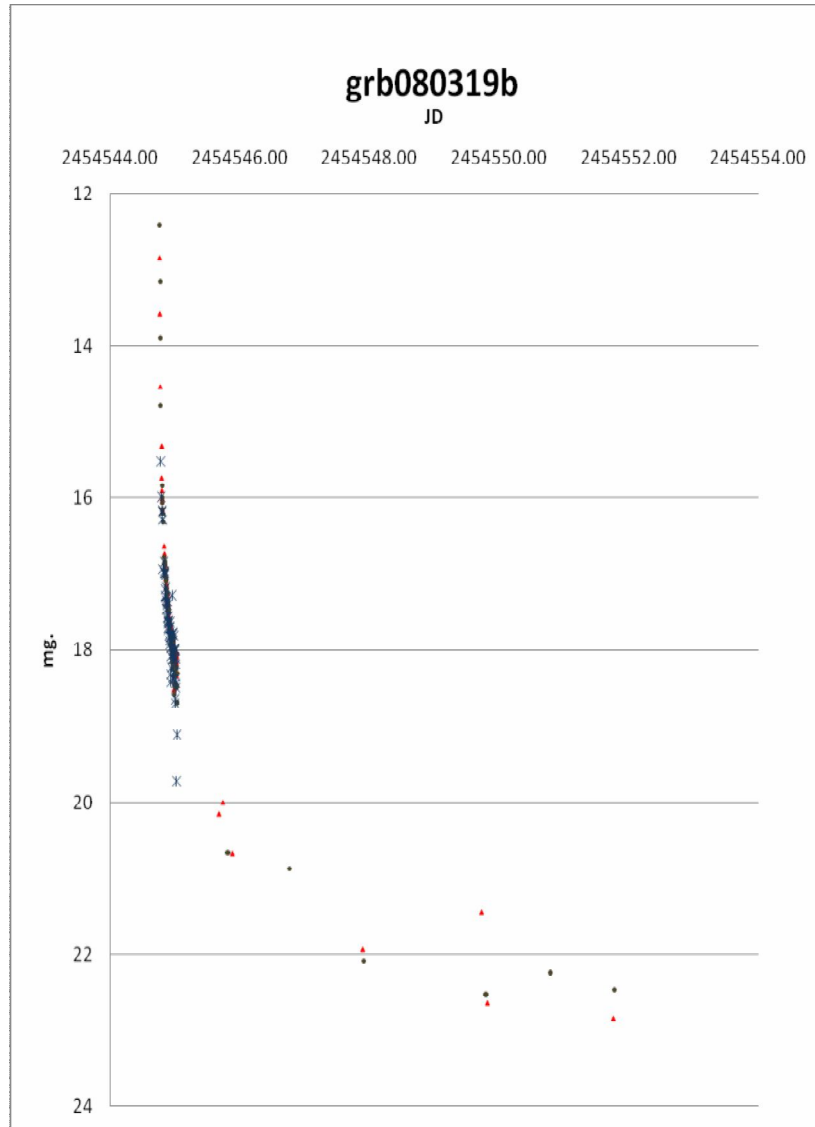
egyenletesen elosztva, jó asztróklimájú helyeken szerelik fel. Mivel a GRB-k optikai tranziensei a BAT trigger idején a legfényesebbek (6–15 magnitúdósak), a fenti célra speciálisan átalakított kis távcsövek vagy digitális fényképezőgépek a legalkalmasabbak. A GRB OT észlelésében rendszeresen részt vevő néhány program: Tarot (F), BOOTES (E), BART (CZ), ROTSE-III (USA), RAPTOR (USA), SuperLOTIS (USA), KAIT (USA), NEAT (USA).



4. ábra. A GRB070110 megfigyelt utófénylése a röntgen- és az optikai (legalsó görbék) tartományban (Troja et al., 2007).



5. ábra. A Palomar P60 automata teleszkóp.



6. ábra. A „szabad szemes” GRB fénygörbéje a szokásos ábrázolás szerint.

Az automata kisteleszkóp-hálózat alkalmas a kezdeti, gyors változások rögzítésére és a GRB koordinátáinak pontosítására. A gyors halványodás miatt ezek a hálózatok legfeljebb percekig vagy legfeljebb egy-két óráig képesek a GRB OT követésére. A pontosabb többszín-fotometriai mérésekre nagyobb teleszkópok bevonása szükséges. Egy-egy GRB OT megfigyelése érdekében viszont sokszor meg kell szakítani a nagy teleszkópokon folyó munkát, így célszerű olyan automatizált nagy teleszkópokat is munkába állítani, amelyek automatikusan végzik előre programozott tevékenységüket, de a riasztáskor perc nagyságrendű idő alatt a gammasugárforrás irányába fordulhatnak.

Az ilyen teleszkópokra az egyik példa a Mount Palomar Observatóriumban automatizált 1,5 méter tükörátmérőjű teleszkóp, mely a GRB láthatósága esetén R és I sávban akár 22-23 magnitúdós határfényességig képes követni a halványodó optikai utánpéldét (5. ábra). A halvány objektumok és a GRB-re jellemző nagy vöröseltolódás esetén a többszín-fotometria is felhasználható a z közelítő meghatározására vagy korlát megadására.

Nemzetközi együttműködés keretében az MTA Csillagászati Kutatóintézete részt vesz a P60 teleszkóppal készített GRB OT megfigyelések fotometriai feldolgozásában. A műszer teljesítőképességére és a GRB OT megfigyelésekre jó példa az eddigi legfényesebb optikai



utófénylést produkáló GRB080319b többszín-fotometriája, amelyet a Konkoly Obszervatóriumban a P60-as észlelések fotometriájával készítettünk (*6. ábra*).

**Irodalom:**

- Kelemen, J. 1997, Observation of the optical counterpart of the GRB970508 source. Information Bulletin on Variable Stars, 4496
- Klebesadel, R. W., Strong, I. B., Olson R. A. 1973, Observations of Gamma-Ray Bursts of Cosmic Origin, Astrophysical Journal, 182, L85
- Meszáros, P., Rees, M. J. 1997, Optical and long-wavelength afterglow from gamma-ray bursts, Astrophysical Journal, 476, 232
- Nousek, J. A., Kouvelitou, C., Grupe, D., et al. 2006, Evidence for a canonical GRB afterglow light curve in the Swift/XRT data. Astrophysical Journal, 642, 389
- Troja, E., Cusumano, G., O'Brien, P. T., et al. 2007, Swift observations of GRB070110: an extraordinary x-ray afterglow powered by the central engine, Astrophysical Journal, 665, 599

## Nagy szögfelbontású rádió-interferometria – űreszközökkel

Frey Sándor és Gabányi Krisztina Éva

Földmérési és Távérzékelési Intézet, Koszmos Geodéziai Observatórium, Penc  
MTA-BME Fizikai Geodézia és Geodinamikai Kutatócsoport, Budapest

### Kivonat

A világűrben érkező rádiósugárzás legnagyobb része – csakúgy, mint a látható fény – akadálytalanul áthatol a Föld légkörén. Így rádiócsillagászati megfigyeléseket földi rádióteleszkópokkal is kitűnően lehet végezni. Miért célszerű akkor mégis a Föld körül keringő űreszközökre telepíteni rádiótávcsövet? Ennek megértéséhez felidézzük, hogy a rádiócsillagászatban használatos műszerek szögfelbontása – a látható fényéhez viszonyítva sok nagyságrenddel hosszabb elektromágneses hullámhosszak miatt – igencsak korlátozott. Hatalmas rádióteleszkópok építése lehetetlen vállalkozás volna, ezért fejlődött ki az interferometrius megfigyelési módszer. Az egymástól távol elhelyezett antennák adatainak kombinálásával egy akkora képzeletbeli rádióteleszkópot lehet létrehozni, amelynek a szögfelbontását nem az egyedi antennák átmérője, hanem a köztük levő távolság határozza meg. Az 1960-as évek végén kifejlesztett nagyon hosszú bázisvonalú interferometria (VLBI) alkalmas arra, hogy a Föld különböző pontjain elhelyezett rádióteleszkópokból alkosson egyetlen hálózatot. Így centiméteres hullámhosszakon az ívmásodperc ezred részének megfelelő, rendkívül finom szögfelbontással lehet vizsgálni a kompakt rádiósugárzó égitestek szerkezetét. Vannak azonban olyan csillagászati objektumok, amelyek még így is felbontatlanok maradnak! Ezeknek a megfigyelésére szolgál az *űr-VLBI* technika. A földi rádiótávcső-hálózatot egy műholdon elhelyezett antennával kiegészítve, akár bolygónk átmérőjénél is jóval hosszabb bázisvonalak s így még finomabb felbontás érhető el. Bemutatjuk az *űr-VLBI* technika alapelvét, és szólnunk az első *űr-VLBI* mesterséges holdról, a Japánból 1997-ben felbocsátott *HALCA*-ról. Összefoglaljuk az új űrcsillagászati megfigyelési technikával az elmúlt években elért tudományos eredményeket, kiemelve közülük egyes hazai vonatkozásúakat is. Végül szót ejtünk az *űr-VLBI* jövőjéről, a technika előtt álló műszaki és tudományos kihívásokról, a közeli években felbocsátandó új *űr-VLBI* műholdak – az orosz *RadioAstron* és a második generációs japán *ASTRO-G* – programjáról is.

### Bevezető

A nagyon hosszú bázisvonalú interferometria (VLBI, *Very Long Baseline Interferometry*) rádiócsillagászati mérési eljárást először 1967-ben alkalmazták. A módszer alkalmas a rádiótartományban sugárzó kompakt, nagy energiájú objektumok (pl. kvazárok, rádiógalaxisok magjai, mézerek, egyes csillagok) nagy szögfelbontású leképezésére. A VLBI kifejlesztéséhez a „hajtóerőt” az adta, hogy a rádiócsillagászatban a megépíthető antennákkal elérhető felbontás viszonylag szerény az optikai hullámhossztartományhoz képest. A diffrakciós határ, az elérhető szögfelbontás a hullámhosszal egyenesen, a műszer nyílásának átmérőjével fordítottan arányos. Mivel a rádióhullámhosszak sok nagyságrenddel meghaladják a látható fény hullámhosszát, a hagyományos optikai távcsövek felbontóképességének eléréséhez ugyanennyivel nagyobb eszközöket kellene építeni. Ez azonban műszakilag megoldhatatlan feladat volna.

A VLBI alapelve, hogy egy időben, egymástól távol levő rádióteleszkópokkal ugyanazt a rádióforrást figyelik meg, az adatokat mágnesszalagon, újabban mágneslemezen rögzítik, megfelelően pontos atomi oszcillátorok által szolgáltatott órajelekkel együtt. Az interferenciát később, az állomásoktól összegyűjtött szalagok (diszkek) visszajátszásával és a jelek korrelálásával állítják elő. Így utólag valójában egy akkora méretű rádiótávcsövet „hoznak létre”, amekkora a két antenna közötti távolság, a bázisvonal hossza. Az utóbbi években, a széles sávú adatátviteli hálózatok kapacitásának ugrásszerű bővülésével megnyílt a lehetőség a távoli antennák és a korrelátor

közvetlen összekapcsolására, a valós idejű ún. e-VLBI technika alkalmazására (pl. Szomoru 2008). Az interferométer méretének gyakorlatilag csak a Föld kiterjedése szab határt, s az így elérhető szögfelbontás (néhány cm-es hullámhosszakon akár az ívmásodperc ezred része) jelenleg felülmúlja bármely más csillagászati megfigyeléssel megvalósítható felbontást.

Hamar felismerték a VLBI technika fontosságát a geodéziai és geodinamikai alkalmazásokkal kapcsolatban is. Ez azon a tényen alapul, hogy a tőlünk nagyon távol elhelyezkedő, tehát látszó sajátmozgást elvileg nem mutató, nagyon kompakt extragalaktikus rádióforrások (pl. kvazárok) ideális vonatkoztatási rendszert jelölnek ki. Ebben a kvázi-inerciális rendszerben a Föld mozgása – a felszínén elhelyezkedő VLBI antennák segítségével – nagy pontossággal leírható. A legfőbb, VLBI technikával mérhető geofizikai jelenségek között említhetjük a pólusmozgást, a Föld forgási szögsebességének változását (*UT1–UTC*), a nutációt és precessziót, az árapályjelenségeket. A VLBI volt az első eljárás, amellyel a jelenkori tektonikus táblamozgások mértéke először nagy pontossággal mérhetővé vált. Napjainkban a geodéziai VLBI méréseket az egész Földet átfogó hálózat segítségével, szolgálatszerűen végzik (l. még Frey 2007).

Miért lehet célszerű egy rádiótávcsövet a Föld körüli pályára állítani? Az űrcsillagászati eszközök esetében megszoktuk, hogy segítségükkel általában a légkör elnyelő vagy zavaró hatását szeretnék kiküszöbölni. A földi légkör ugyanis számos elektromágneses hullámhossztartományban (pl. a gamma- és röntgentartományban, valamint az ultrabolya és az infravörös tartomány jelentős részében) átlátszatlan. A látható fényben is lehet szó arról, hogy a nappalok és éjszakák földi változásából következő kényszerű mérési szüneteket szeretnék áthidalni egy hosszú idejű, folyamatos észlelést biztosító műholddal. Ugyanakkor tudjuk, hogy a rádióhullámok széles tartományában a légkör átlátszó, a világűrből érkező sugárzást tehát földfelszíni teleszkópokkal is lehet észlelni. Ráadásul földi rádiócsillagászati megfigyeléseket nappal is végezhetünk. Azt is hozzátehetjük, hogy egy mesterséges hold fedélzetén elhelyezhető, legfeljebb kb. 10 m átmérőjű rádióantenna gyűjtőfelülete lényegesen kisebb egy hagyományos földi rádióteleszkópénál. Így nyilvánvaló, hogy önmagában, egyedül nem sok hasznát vehetnénk egy űr-rádióteleszkópnak. Ha azonban a földi interferométeres hálózatba kapcsoljuk, akkor tovább, immár bolygónk átmérőjénél is nagyobbra növelhető a legnagyobb bázisvonalak hossza, tovább javítva az elérhető szögfelbontást. Ez a technika az űr-VLBI, a hagyományos földi VLBI kiterjesztése.

### **Az első űr-VLBI mesterséges hold, a HALCA**

1997. február 12-én a japán ISAS (*Institute of Space and Astronautical Science*; ma az egységes JAXA űrügynökség része) állította pályára a HALCA (*Highly Advanced Laboratory for Communications and Astronomy*) műholdat. Az űrbeli rádiótávcső „hozzáadásával” elérhető szögfelbontás kb. háromszor jobb lett a csak a Földön, ugyanazon frekvencián elérhető felbontásnál (Hirabayashi et al. 1998). A HALCA (az építése során használt korábbi nevén MUSES-B) 6,3 órás keringési idejű pályán mozogva, két frekvencián (1,6 GHz és 5 GHz) észlelt együtt a földi VLBI hálózatokkal. A harmadik, 22 GHz-es vevőberendezése sajnos meghibásodott, ezért az tudományos értékű adatokat nem szolgáltatott. A HALCA mérési adatait 128 Mbit/s sebességgel a kijelölt földi követőállomásokra sugározta, ahol mágnesszalagokra rögzítették azokat. Mivel a hatalmas adatmennyiség tárolására a fedélzetén nem volt mód, a mérések csak akkor voltak használhatók, ha a műhold épp a földi követőállomások egyikének látóterében tartózkodott. A program mögött egy szinte hihetetlenül nagy, világméretű összefogás állt: Európa, Amerika, Japán, Ausztrália, Kína 40-nél több rádióteleszkópja, 4 országban 5 követőállomás, 3 VLBI korrelátor dolgozott benne. A HALCA műholdra irányítói az utolsó parancsot 2005 novemberében küldték fel.

A Földmérési és Távérzékelési Intézet (FÖMI) penci Kozmikus Geodéziai Observatóriumában (KGO), Fejes István vezetésével egy kis csoport bekapcsolódott az űr-VLBI program előkészítésébe, majd a kutatásokba is, mind a csillagászati, mind a lehetséges geodéziai alkalmazások területén. Ennek eredményeképpen a 90-es években egy sor elméleti tanulmány (l. pl. Fejes 1996) és egy számítógépes szimulációs program (Frey et al. 1998) is született. Ez utóbbit világszerte használták más kutatók is, amikor űr-VLBI méréseiket tervezték. Lehetővé vált, hogy aktívan részt vegyünk a

világ egyik legkorszerűbb és legdrágább űrcsillagászati kísérletében – anélkül, hogy akár a műhold megépítéséhez, akár a földi rádiótávcső-hálózat üzemeltetéséhez hozzájárultunk volna.

A program csillagászati célpontjai leginkább a távoli, rádiótartományban erős sugárzást kibocsátó, rendkívül kompakt aktív galaxismagok, kvazárok voltak. Ezeknek a kutatása a modern asztrofizika egyik kiemelt témája. Az aktív galaxismagok közepén hatalmas (akár több milliárdnyi naptömeeggel egyenértékű) fekete lyukak találhatók. A közvetlen közelükben levő anyag az erős tömegvonzás hatására forgó akkréciós korongba gyűlik, ahonnan spirális pályán fokozatosan a központi fekete lyukba hullik. A tömeg egy része az erős mágneses tér hatására a forgástengelyek mentén relativisztikus sebességgel kilökődik: ezek az összetartó nyalábok az ún. jetek. A rádiókvazároknál szinkrotronsugárzást figyelhetünk meg. A VLBI technika segítségével hatolhatunk a legközelebb a jetek kiindulási helyéhez, bár még az űr-VLBI kivételesen jó szögfelbontása is kevés ahhoz, hogy a központi fekete lyuk közvetlen környezetét tanulmányozhassuk. A legkedvezőbb helyzetben természetesen a hozzánk legközelebbi aktív galaxismagok esetében vagyunk, ahol a finom szögfelbontás egyúttal kitűnő lineáris felbontással párosul. (Nem véletlen, hogy ezek az objektumok a legfontosabb űr-VLBI célpontok közé tartoznak.)

Rádiójetek galaktikus forrásokban is megfigyelhetők. Ezek az ún. mikrokvizárok kettős csillagrendszerekben találhatóak. A rendszerben levő kompakt objektum (neutroncsillag vagy néhányszor 10 naptömegnyi fekete lyuk) akkréció révén a kísérőjétől szerez anyagot, ami a kvazárokéhoz hasonló (csak kb. hat nagyságrenddel kisebb) aktivitáshoz vezet. Kompakt VLBI célpontként szóba jöhetnek még a mézerek. A csillagközi gázban, általában a keletkező vagy éppen az életük vége felé járó csillagok környezetében a mézerek természetes módon alakulnak ki, amikor egyes molekulák pl. ütközések révén gerjesztődnek, s az elektronok magasabb energiaszinteket foglalnak el. A túlpopulált elektronszintekről alacsonyabb szintekre jutó elektronok jól meghatározott frekvenciájú, igen keskeny sávú mikrohullámú (rádió-) sugárzást bocsátanak ki, ami kis térrészből (foltokból) származik. Erős mézerjelenséget produkáló molekulák például a víz, a hidroxil gyök, a szilícium-oxid, a metanol. A színképvonalak Doppler-eltolódásának és kiszélesedésének révén a mézerek a gázra jellemző mozgások felmérésére is használhatók. Extragalaxisokban előfordul a megamézer-jelenség. A centrum körül keringő megamézerek mozgásának megfigyelésével pl. egyes galaxisok központjában az ott levő fekete lyuk tömege közvetlenül is megmérhető.

A japán vezetésű VSOP (*VLBI Space Observatory Programme*) keretében, a HALCA műholdnak a globális interferométeres hálózatba kapcsolásával elért eredmények közül – a teljesség igénye nélkül – megemlítünk itt néhányat. További fontos eredmények és szakirodalmi hivatkozások például Kameno (2009) és Frey (2004) cikkeiben találhatóak. A programban összesen több mint 700 aktív galaxismagot (*active galactic nucleus*, AGN) figyeltek meg, elsősorban nyílt pályázatokon elbírált javaslatok alapján. Ezen felül a VSOP idejének jelentős részét az 5 GHz frekvencián végzett égboltfelmérés tette ki (l. később). A hozzánk legközelebbi AGN-ek (3C 84, M 87) jetjeinek komponenseinél parszekesnél is kisebb lineáris skálán gyorsuló mozgást ismertek fel. A legközelebbi kvazár, a 3C 273 esetében sikerült felbontani a jet keresztirányú szerkezetét, amiből a kifelé áramló plazma viselkedését meghatározó fizikai folyamatokra lehet következtetni. A 1928+738 jelű kvazár négy év alatt végzett többszöri megfigyelése alapján precesszióból származó ballisztikus mozgással lehetett modellezni a jetben észlelhető gyors változásokat. A már említett égboltfelmérés (*VSOP Survey Program*; Hirabayashi et al. 2000) célja a legfényesebb aktív galaxismagok ezred ívmásodpercesnél (mas) is finomabb felbontással történő vizsgálata, a minta megfigyelt tulajdonságainak statisztikai elemzése volt. A legfontosabb eredmény szerint a források mintegy felének fényességi hőmérséklete meghaladta a  $10^{12}$  K értéket, ami egyértelműen a jetek sugárzását felerősítő relativisztikus nyalábolásra utal. Az is kiderült, hogy az AGN-ek magjában jellemzően megtalálható egy igen kompakt, legfeljebb 0,2 mas méretű rádiósugárzó komponens.

Magyar részről számos kutatásba kapcsolódtunk be, illetve önálló megfigyelési javaslatokat is tettünk. A VSOP égboltfelmérés előkészítése során, még a HALCA indulása előtt több száz kiválasztott aktív galaxismagot vizsgáltunk földi megfigyelésekkel (Fomalont et al. 2000). Utána részt vállaltunk az űr-VLBI adatok feldolgozásában és értelmezésében is. Kutattuk a legtávolabbi (a legnagyobb z vöröseltolódású) rádiókvazárok nagyfelbontású szerkezetét (l. Frey et al. 2009, és az ottani

hivatkozások). A 2215+020 jelű kvazár ( $z=3,57$ ) esetén a földi és űr-VLBI képek összehasonlításával következtettünk a jet keresztirányú méretére, amiből megbecsülhető volt a központi fekete lyuk tömege (kb. négy milliárd naptömeg; Lobanov et al. 2001). A 1351-018 kvazár ( $z=3,71$ ) esetében két időpontban végzett méréseink alapján 0,5 mas skálán sikerült kimutatnunk a jet komponensének látszólag „szuperfénysebességű” mozgását (Frey et al. 2002a). Meghatároztuk a közvetlen VLBI képalkotással kapott eddigi legnagyobb alsó korlátot a fényességi hőmérsékletre ( $6 \times 10^{13}$  K) egy aktív galaxismag, a 0235+164 jelű, erősen változó BL Lac objektum esetében (Frey et al. 2000, 2006).

Az 1980-as és 90-es években hazai vezetéssel készített megvalósíthatósági tanulmányok (I. Fejes et al. 1996 és az ottani hivatkozások) szerint az űr-VLBI technika elvben alkalmas geodéziai jellegű tudományos feladatokra is: a geocentrikus földi vonatkoztatási rendszer és az égi vonatkoztatási rendszer közvetlen összekapcsolására; a földi VLBI antennák geocentrikus helyvektorának meghatározására anélkül, hogy más műholdas geodéziai technikákkal való együttes mérésre (a földi állomások kollokációjára) szükség volna; az űr-VLBI műholdak pályameghatározási pontosságának javítására, a bázisvonalakon mért időkésés és időkésés-változás adatoknak mint új típusú követési adatoknak a pályameghatározó eljárásba való bevonásával. A viszonylag pontatlan pályameghatározás és más gyakorlati problémák miatt azonban az első űr-VLBI mesterséges hold, a japán HALCA csak arra volt alkalmas, hogy a referencia-rendszerek összekapcsolásának, ill. a pályameghatározás javításának koncepcióját demonstrálja (Frey et al. 2002b).

## Készülő új űr-VLBI programok

### *RadioAstron*

Az orosz RadioAstron űr-VLBI mesterséges hold előkészületei még a szovjet időkben, az 1980-as években indultak (pl. Andreyanov et al. 1986). A fejlesztést a technikai problémákon túl hosszú ideig elsősorban pénzügyi korlátok akadályozták. A program az ezredforduló tájékán éledt újjá, s bár számos elemében megújult, a RadioAstron a lényegét tekintve inkább első, mint második generációs űr-VLBI műholdnak tekintendő. Felbocsátását jelenleg 2010 elejére tervezik. A négy frekvenciatartomány: 0,327 GHz, 1,7 GHz, 4,8 GHz és 18–25 GHz. A RadioAstron igen elnyúlt pályán fog keringeni, földtávolban megközelíti a Hold pályájának megfelelő távolságot. A pályaelemeket főleg a Holdtól származó gravitációs perturbációk a műhold működési élettartama alatt jelentősen megváltoztatják, így elérhető, hogy a pályasík térbeli elhelyezkedése széles tartományt felöleljen. A hozzávetőleges pályaparaméterek a következők: keringési idő 9,5 nap (7 és 10 nap között változó); fél nagytengely 183 000 km; inklináció  $51,6^\circ$ . A perigeum távolsága 10 ezer és 70 ezer km közt, az apogeumé 310 ezer és 390 ezer km közt változik majd (Kardashev 2008). A RadioAstron egy 10 m átmérőjű, 4,3 m fókusz-távolságú, 27 szénszálalásos kompozit szegmensből álló, kinyitható paraboloid antennát visz magával.

A RadioAstron és a földi antennák között elérhető igen hosszú (kb. 350 ezer km-es) bázisvonalakon egyrészt viszonylag kevés égi rádióforrás detektálása remélhető – mivel azoknak nagyon kompaktnak kell lenniük –, másrészt a jó minőségű interferométeres képalkotás az így kialakított űr-VLBI hálózattal a gyakorlatban igen nehéz. A magas pálya egyéb gyakorlati problémákat (pl. pontatlan pályarekonstrukció) is felvet. A nemzetközi (európai, amerikai, ausztrál) földi VLBI hálózatokkal jelenleg nincsenek érvényes keretmegállapodások a közös mérési programok végrehajtására. Ezért a RadioAstron – a kezdetekben mindenképpen – főleg orosz területen levő földi VLBI antennákra támaszkodik majd. Ugyanez igaz a műholdkövető állomásokra. Az interferencia előállítását is saját korrelátorral oldják meg. A RadioAstron fedélzetén nagy stabilitású hidrogénméter frekvenciaetalont (atomórát) helyeznek el.

A műhold felbocsátása után legalább 3 hónapig tesztelnék a pályán a berendezéseket. Ezt követően kb. 4 hónapig olyan méréseket végeznének, amelyek a legfontosabbak a projekt számára. A műhold használata ezután nyílt lesz, az első időszakot követően 50-50%-os arányban végeznének egyedi javaslatokon alapuló megfigyeléseket, illetve ún. tudományos kulcsprogramokhoz (*Key Science Programs*) kapcsolódó megfigyeléseket. Valójában ez utóbbi kategória is nyitott lesz a nemzetközi együttműködésre.

**ASTRO-G**

A japán ISAS/JAXA jelenleg a következő űr-VLBI mesterséges hold építésén dolgozik. Az ASTRO-G jelzésű műholdat (Tsuboi 2009) a VSOP-2 program keretében, mintegy a VSOP/HALCA folytatásaként tervezik felbocsátani, valószínűleg 2013 első felében. A második generációs űr-VLBI műhold számára kitűzött cél egyrészt a szögfelbontás, másrészt az érzékenység jelentős (nagyságrendnyi) javítása. Az első cél érdekében a HALCA-val összehasonlítva megnövelik az észlelési frekvenciákat (8, 22 és 43 GHz). Az ASTRO-G műhold pályamagassága, amely végső soron meghatározza a maximálisan elérhető földi-űr bázisvonalak hosszát, számottevően nem változik: a magasság perigeumban 1000 km, apogeumban 25 000 km. Az ezekhez tartozó keringési idő 7,5 óra. A pálya tervezett inklinációja  $31^\circ$ . A földi követőállomások listája még nem végleges: Usuda (Japán), Yebes (Spanyolország), Canberra (Ausztrália), Green Bank (USA). Egyéb lehetséges antennák: Tidbinbilla (Ausztrália), Hartebeesthoek (Dél-Afrika), Santiago (Chile).

Az érzékenység növelése érdekében a Föld körüli pályára állítandó antenna átmérője megnő. Ezt a gyakorlatban hét darab, hatszög alakú elemből összeállított, 9,2 m átmérőjű, 7 m fókusztávolságú paraboloid felülettel oldják meg. Az 1,9 m fókusztávolságú hiperbolikus segétkör 5 m-rel az antenna fölött helyezkedik el a Cassegrain-fókuszban. Az adattovábbítási sebességet a HALCA-éhoz képest megnyolcszorozzák, 1 Gbit/s-ra növelik. A különböző frekvencián működő vevőberendezések elhelyezkedése lehetővé teszi, hogy kb. 10 másodperc alatt megváltoztassák az észlelési frekvenciát. Az X sávú (8,0–8,8 GHz) vevő nem, de a K (20,6–22,6 GHz) és Q (41,0–45,0 GHz) sávú rádiócsillagászati vevők hűtött egységben lesznek elhelyezve. A magasabb frekvenciás vevőberendezések pontosabb antennafelületet követelnek – ez a műhold elkészítésével kapcsolatos egyik fő technológiai kihívás. Az érzékenység növelését szolgálja a földi VLBI technikában meghonosodott fázisviszonyításos (*phase-referencing*) módszerrel történő megfigyelések lehetővé tétele. Ehhez két alapvető, korábban a HALCA-nál még nem megoldott dolog szükséges.

Az egyik feltétel az egymáshoz közeli égi rádióforrások (a referenciaforrás, ill. a tudományos célpont) közti gyors váltogatás lehetősége. Erre azért van szükség, mert a földi antennáknak a légköri koherenciaidőn belül meg kell tudniuk oldani egy referencia-célpont ciklust. Hogy ez a magasabb frekvenciákon is kivitelezhető legyen, ahhoz az ASTRO-G például  $1^\circ$ -on belüli szögtávolságot kb. 2 perc alatt tud áthidalni.

A fázisviszonyításos mérések másik alapfeltétele a műhold pillanatnyi helyzetének (pályájának) precíz meghatározása. Az erre vonatkozó követelmények meglehetősen szigorúak: az általános cél 10 cm-es pályarekonstrukciós pontosság elérése. A pontosságnak ( $1\sigma$ ) perigeumban lehetőség szerint néhány cm-nek, apogeumban 30–100 cm-nek kell lennie. Ennek eléréséhez a hagyományos doppleres méréseken alapuló pályameghatározás nem elégséges. A fedélzetre tervezett műholdas navigációs vevőberendezéssel a 20 000 km magasan keringő GPS navigációs műholdak jeleit lesznek képesek használni. Mivel az ASTRO-G pályájának magassága időnként nagyobb, tervezik az addigra várhatóan kiépülő európai Galileo rendszer (23 000 km) műholdjainak használatát is. A modellszámítások szerint a Galileo belépésével a GPS alapú pályameghatározás pontossága megkétszerezhető. Az ASTRO-G-n lézertükröt is elhelyeznek, ami – ha nem is állandóan, de alkalmanként – lehetőséget ad műholdas lézertáv mérési eljárás alkalmazására is a pályameghatározásban.

Mint a fentiekből látható, a megkívánt érzékenység eléréséhez szükséges, a halványabb rádióforrások megfigyelését is lehetővé tevő fázisviszonyításos méréseknek számos, műszakilag nehezen megoldható feltétele van. Ezekhez adódik még, hogy a szóba jöhető kompakt, fényes kalibrátorok nem nagy sűrűségben találhatók meg az égen. Különösen igaz ez a legnagyobb megfigyelési frekvenciák esetén (Asaki et al. 2007). Ha bármilyen okból nem volna lehetséges a gyors referencia-célpont ciklus megvalósítása, egyes – igaz, korlátozott – esetekben alternatív megoldást jelenthet az ún. antennanyalábon belüli fázisviszonyítás (*in-beam phase-referencing*) alkalmazása (Frey et al. 2009). Ez akkor alkalmazható, ha két rádióforrás – a halvány célpont és a referenciaforrás – olyan kis szögtávolságban látható, hogy mindketten beleesnek a viszonylag kis átmérőjű (alig 10 m-es) antenna elsődleges nyalábjába. Ez 8,4 GHz frekvencián  $12'$ . Ebben az esetben elegendő a földi VLBI antennáknál alkalmazni a gyors irányváltoztatást, a Föld körüli pályán keringő antenna ezalatt

végig azonos irányba állítva dolgozhat. Vizsgálataink szerint legalább húsz halvány rádiókvazárra teljesül az, hogy megfelelően közeli irányban látszik valamelyik alkalmas referenciaforráshoz, így sikeresen tanulmányozható lesz az ASTRO-G-t is magában foglaló űr-VLBI hálózat segítségével.

A potenciális kalibrátorok számának növeléséhez az ASTRO-G felbocsátásáig bővíteni kell a Földről megfigyelt AGN-ek számát, hogy közöttük minél több fényes és kompakt rádióforrást találjunk. Ennek egy módja, hogy ismert katalógusokból előzetesen ígéretesnek tűnő jelölteket válogatunk ki, amelyek azután hatékonyan ellenőrizhetők a korlátozott földi VLBI erőforrások használatával (l. Geréb K. cikkét e tanulmány után).

## Összefoglalás

Az űr-VLBI technika a lehető legszélesebb nemzetközi összefogással válhat csak sikeressé. Ebből szinte természetesen adódik, hogy a más űrcsillagászati programoknál megszokottnál lényegesen nyitottabb. Így magyar részről továbbra is kitűnő alkalom kínálkozik a tudományos programba való bekapcsolódásra. Erre alkalmassá tesznek bennünket a FÖMI KGO-ban korábban elért eredmények és a megszerzett tapasztalatok. A majdani sikeres pályázatok reményében az űrprogramok jelenlegi előkészítési fázisában feladatunk a naprakész tájékozódás, valamint a földi előkészítő mérésekben és a mérési módszerek kidolgozásában való aktív részvétel.

## Köszönetnyilvánítás

A második generációs űr-VLBI programokba való bekapcsolódásunk előkészületeit a Magyar Űrkutatási Iroda (MŰI, TP-314), a tudományos vizsgálatokat részben az Országos Tudományos Kutatási Alapprogramok (OTKA, K72515) támogatják.

## Irodalom:

- Andreyanov, V. V. et al. 1986, Project Radioastron: an Earth–Space Interferometer, *Soviet Astron.*, 30, 504
- Asaki, Y. et al. 2007, Verification of the Effectiveness of VSOP-2 Phase Referencing with a Newly Developed Simulation Tool, *ARIS, Publ. Astron. Soc. Japan*, 59, 397
- Fejes, I., Kawaguchi, N., Mihály, Sz. 1996, Space VLBI: background of an experiment proposal, *Astrophysics and Space Science*, 239, 275
- Fomalont, E. B. et al. 2000, The VSOP 5 GHz Continuum Survey: The Prelaunch VLBA Observations, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 131, 95
- Frey, S. 2004, Space VLBI, in: *The Role of VLBI in Astrophysics, Astrometry and Geodesy*, eds. Mantovani, F., Kus, A. (Kluwer, Dordrecht), 349
- Frey, S. 2007, Alappontok az égen, *Geodézia és Kartográfia*, 59. évf. 8-9. sz., 29
- Frey, S., Fejes, I., Heitler, G., Noszticzius, I., Paragi, Zs. 1998, Space VLBI Assistance Software - A New Version, in: *Radio Emission from Galactic and Extragalactic Compact Sources*, Proc. IAU Coll. 164, eds. Zensus, J. A., Wrobel, J.M., Taylor, G. B. (ASP, San Francisco), 399
- Frey, S. et al. 2000, Dual-frequency VSOP observations of AO 0235+164, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 52, 975
- Frey, S. et al. 2002a, Space VLBI observations of the quasar 1351-018: tentative detection of apparent superluminal motion at  $z=3.707$ , in: *Proc. 6th European VLBI Network Symposium*, eds. Ros, E., Porcas, R. W., Lobanov, A. P., Zensus, J. A. (MPIfR, Bonn), 89
- Frey, S. et al. 2002b, Geodetic space VLBI: the first test observations, *Adv. Space Res.*, 30, 357
- Frey, S. et al. 2006, VSOP monitoring of the compact BL Lac object AO 0235+164, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 58, 217
- Frey, S., Gabányi, K. É., Asaki, Y. 2009, Identification of Potential Weak Target Radio Quasars for ASTRO-G In-Beam Phase-Referencing, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 61, 123
- Frey, S., Gurvits, L. I., Lobanov, A. P., Schilizzi, R. T., Paragi, Zs. 2009, High-Redshift Quasars at the Highest Resolution: VSOP Results, in: *Approaching Micro-Arcsecond Resolution with VSOP-2: Astrophysics and Technology*, ASP Conf. Ser. 402, eds. Hagiwara, Y., Fomalont, E., Tsuboi,

- M., Murata, Y. (ASP, San Francisco), 152
- Hirabayashi, H. et al. 1998, Overview and Initial Results of the Very Long Baseline Interferometry Space Observatory Programme, *Science*, 281, 1825
- Hirabayashi, H. et al. 2000, The VSOP 5 GHz AGN Survey I.: Compilation and Observations, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 52, 997
- Kameno, S. 2009, AGN Science with VSOP and Prospects for VSOP-2, in: *Approaching Micro-Arcsecond Resolution with VSOP-2: Astrophysics and Technology*, ASP Conf. Ser. 402, eds. Hagiwara, Y., Fomalont, E., Tsuboi, M., Murata, Y. (ASP, San Francisco), 96
- Kardashev, N. S. 2008, Some critical experiments with RadioAstron. *Radio Universe at Ultimate Angular Resolution*, Moscow, 20-24 Oct 2008 ([ftp://www.asc.rssi.ru/symp2008/Kardashev\\_Some%20critical%20experiments.pdf](ftp://www.asc.rssi.ru/symp2008/Kardashev_Some%20critical%20experiments.pdf))
- Lobanov, A. P. et al. 2001, VLBI Space Observatory Programme Observation of the Quasar PKS 2215+020: A New Laboratory for Core-Jet Physics at  $z=3.572$ , *Astrophys. J.*, 547, 714
- Szomoru, A. 2008, EXPreS and the e-EVN, *Proceedings of Science*, PoS(IX EVN Symposium)040 (<http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=72>)
- Tsuboi, M. 2009, VSOP-2/ASTRO-G Project Overview for the Astronomy Community, in: *Approaching Micro-Arcsecond Resolution with VSOP-2: Astrophysics and Technology*, ASP Conf. Ser. 402, eds. Hagiwara, Y., Fomalont, E., Tsuboi, M., Murata, Y. (ASP, San Francisco), 30



## WMAP pontforrások mint lehetséges űr-VLBI kalibrátorok

Geréb Katinka

Eötvös Loránd Tudományegyetem Csillagászati Tanszék, Budapest

### Kivonat

A WMAP 5 év alatt gyűjtött adatait használtam egy olyan új – fényes és kompakt kvazárokat tartalmazó – katalógus összeállításához, mely a jövőben mm-VLBI megfigyelésekre lesz használható. A WMAP pontforrások közül összegyűjtöttem az ismert VLBI célpontokat, összevettem őket az eddigi VLBI katalógusokkal, majd almintákat hoztam létre aszerint, hogy az illető források szerepelnek-e vagy sem a WMAP pontforrásai között. A 41, 61 és 94 GHz frekvencián mért fluxussűrűségek alapján kiszámolt színképindexekből elkészítettem a teljes katalógus, valamint egyes alminták fluxussűrűség- és színképindex-hisztogramjait, majd a többi katalógussal való átfedés térképét.

A munka egyik célja olyan új források megjelölése, amelyeket VLBI technikával 86 GHz frekvencián meg lehetne figyelni. A WMAP listából kiválogattam azokat a forrásokat, amelyeket még nem vizsgáltak 86 GHz-en, és a fluxussűrűségük 1 Jy felett van, valamint a földi hálózatok lefedettsége miatt azokat, amelyek deklinációja  $-40^\circ$ -nál magasabb (hasonló módszert használtak az eddigi legteljesebb 86 GHz-es VLBI felmérésben). Az új katalógus létrehozásához nyilvános adatbázisok segítségével elvégeztem az objektumok optikai azonosítását, majd a forrásokhoz szélesebb sávban készült rádióspektrumokat, valamint korábbi alacsonyabb frekvencián készített VLBI képeket kerestem. A jövőben a jobb felbontást és nagyobb érzékenységet lehetővé tevő űr-VLBI műholdak – mint pl. az ASTRO-G – az általam összegyűjtött fényes kvazárokat a halványabb objektumok megfigyeléséhez kalibrátorokként is használhatják majd.

### Bevezetés

A *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP) a NASA űrszondája, melynek feladata a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás (CMB) hőmérsékleti anizotrópiáinak mérése. A mért CMB adatokban zavaró tényezőként jelenik meg többek között az előtér emissziója – vagyis a diffúz galaktikus emisszió, valamint a galaktikus és extragalaktikus pontforrások. Ezek ugyanis „beszennyezik” a CMB térképeket. Kiszűrésük érdekében az űrszonda a teljes égboltot felméri 5 különböző mikrohullámú frekvenciasávban 23 és 94 GHz között. A CMB és az előtér komponensek szétválasztásakor így melléktermékként született pontforrás-katalógus (Chen & Wright 2009) lehetőséget nyújt a fényes rádióforrások milliméteres hullámhossztartományban való tanulmányozására, ugyanis a WMAP végezte az eddigi egyetlen, ebben a magas frekvenciatartományban készült, a teljes égboltot lefedő, egységes felmérést.

### *Korábbi mm-VLBI katalógusok*

Rantakyrö et al. (1998) – a GMVA (*Global Millimeter VLBI Array*) 1990-ben készült 100 GHz-es, valamint az 1993-ban készült 86 GHz-es felméréseit használva – összeállított egy 16 forrást tartalmazó listát az aktív galaxismagok (AGN) és a rádiójetek kiindulópontjának tanulmányozása céljából. A katalógus alapján összesen 15 képet sikerült készíteniük 50 mikroívmásodperces ( $\mu$ s) felbontással, a nagyon hosszú bázisvonalú interferometria (*Very Long Baseline Interferometry*, VLBI) technikájával. Két évvel később Lobanov et al. (2000) a CMVA (*Coordinated Millimeter VLBI Array*) adatait használva 28 rádióforrás 86 GHz-es VLBI megfigyelésének eredményeit mutatta be. Ezekből 26 forrás AGN, a másik kettő pedig a Galaxisunk középpontja (Sgr A\*), valamint a Cygnus X-3 röntgenkettőscsillag.

A korábbi vizsgálatokhoz képest lényeges előrelépést jelentett, hogy Lee et al. (2008) megalkottak egy 127 kompakt rádióforrásból álló katalógust, mely 88 kvazárt, 25 BL Lac objektumot, 11 rádiógalaxist, 1 csillagot és 2 azonosítatlan forrást tartalmaz. A források kiválasztásának egyik kritériuma a 0,3 Jy fölötti teljes mért fluxussűrűség érték volt 86 GHz-en. Néhány, már 86 GHz-en

korábban is vizsgált nagyon fényes rádióforrást nem vettek bele a listába, azokra az objektumokra fókuszálva inkább, melyeket korábbi felmérések során még nem detektáltak. Gyakorlati okokból – a megfigyelésre alkalmas VLBI hálózat híján – a déli égbolton található alacsony deklinációjú ( $\delta \leq -40^\circ$ ) forrásokat szintén kizárták.

Az USNO (*United States Naval Observatory*) is rendelkezik egy katalógussal<sup>1</sup>, mely az égi vonatkoztatási rendszert kijelölő kvazárok egy részét tartalmazza. Ezekből a 24 és 43 GHz-es adatokat használtam fel.

Mindezek alapján látható, hogy viszonylag kis számban találhatunk milliméteres hullámhosszakon VLBI technikával feltérképezett rádióforrásokat tartalmazó katalógusokat, ezért nagyon fontos lenne az ilyen jellegű adatbázisok bővítése a jövőbeli felmérések számára.

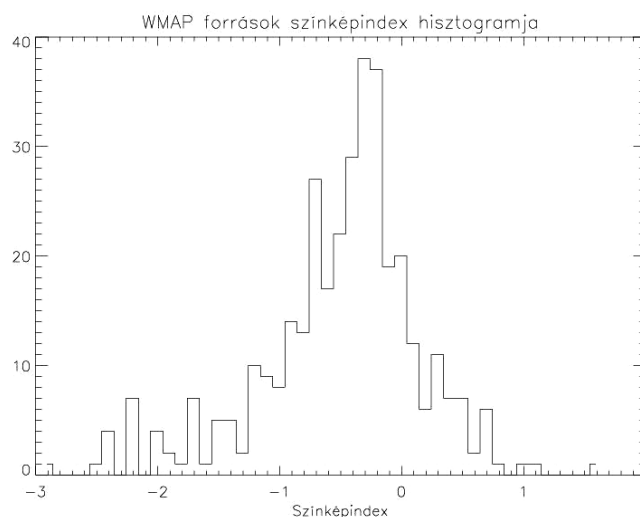
### A WMAP pontforrás-katalógus használata új mm-VLBI célpontok kiválasztására

A WMAP katalógusában szereplő pontforrások elnevezését a 2000-es epochára vonatkozó egyenlítői koordinátákból származtatták, míg a régebbi VLBI katalógusok rádióforrásait az 1950-es koordinátáik alapján jelölték. Ezért a jelölésekben kisebb eltérést tapasztaltam. A legtöbb VLBI forráshoz azonban létezik egy koordinátalista<sup>2</sup>, ahol mindkét szabványnak megfelelő nevek szerepelnek. A források azonosítását ezen koordináták segítségével sikerült elvégezni, így minden korábbi katalógusból összeállt egy minta azokról a forrásokról, amik szerepelnek a WMAP adatai között is.

A rádiócsillagászatban hatványfüggvény-spektrumról beszélünk, ha  $S \sim \nu^\alpha$ , ahol  $S$  a fluxussűrűség,  $\nu$  a frekvencia és  $\alpha$  a spektrálindeks. A hatványfüggvény a GHz-es tartományban általában jó közelítése a megfigyelt széles sávú spektrumnak. A rádióspektrumok meghatározásához ezt a képletet használtam. A WMAP katalógusban megtalálhatjuk a pontforrásokhoz tartozó, 41, 61 és 94 GHz frekvencián mért fluxussűrűség értékeket. A spektrum meghatározásához azonban szükség van a spektrálindeks ismeretére is.

A fluxussűrűségek és a frekvenciák ismeretében a lineáris regresszió módszerével határoztam meg az egyes forrásokhoz tartozó spektrálindeks értékeit.

A színeképindexek és a fluxussűrűségek ismeretében elkészítettem a teljes WMAP katalógus fluxussűrűség- és színeképindex-hisztogramjait (1. ábra), valamint a korábbi legnagyobb VLBI felmérés (Lee et al. 2008) forrásaira vonatkozó hisztogramokat aszerint, hogy ezek a források szerepelnek-e vagy sem a WMAP katalógusban. Ezekről a forrásokról a WMAP mintájával való egyezést mutató átfedési térkép is készült.



1. ábra. A WMAP katalógusban található pontforrások színeképindex-hisztogramja

<sup>1</sup> [http://rorf.usno.navy.mil/RRFID\\_KQ](http://rorf.usno.navy.mil/RRFID_KQ)

<sup>2</sup> [http://lacerta.gsfc.nasa.gov/vlbi/solutions/2008b\\_astro](http://lacerta.gsfc.nasa.gov/vlbi/solutions/2008b_astro)

### A 86 GHz-es fluxussűrűség becslése

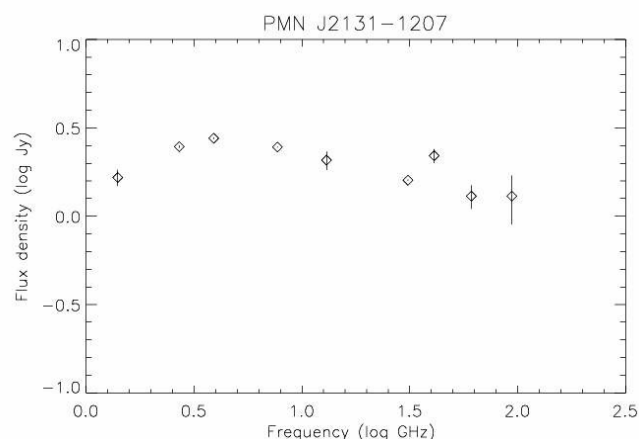
A munka egyik célja olyan új források megjelölése, amelyeket VLBI technikával 86 GHz frekvencián meg lehetne figyelni. A WMAP adataiban csak a 41, 61 és 94 GHz-en mért fluxussűrűségek szerepelnek, így meg kellett becsülnöm a 86 GHz-es frekvencián várható fluxussűrűség-értékeket. Ehhez kihasználtam, hogy a 94 GHz elég közel van a 86 GHz-hez. Ezért a 94 GHz-es adat és a már ismert színekindex alapján számoltam ki a 86 GHz-es fluxussűrűséget:  $S_{86} = S_{94} * (86/94)^\alpha$ .

A fényes kvazárokat tartalmazó új lista létrehozásának céljából a Lee et al. (2008) által használt kiválasztási módszerből indultam ki. A korábbi katalógusok alapján, a WMAP-ből kiválogattam azokat a célpontokat, melyeket eddig még nem vizsgáltak 86 GHz-en, s melyek fényessége nagyobb, mint 1 Jy, deklinációjuk pedig  $-40^\circ$  felett van. Így összeállt egy 40 rádióforrást tartalmazó minta. Az új mintát statisztikai elemzés céljából összevettem a Lee et al. (2008) katalógusának kompakt forrásaival, átlagot, mediánt és szórást számoltam a fluxussűrűségekre és színekindexekre.

### Az új mm-VLBI célpontok katalógusának összeállítása

Az új katalógus létrehozásához nyilvános adatbázisok segítségével elvégeztem az objektumok optikai azonosítását, majd korábbi, alacsonyabb frekvenciákon készített VLBI képeket, valamint a forrásokhoz szélesebb sávban készült rádióspektrumokat kerestem. Az objektumok optikai azonosításának kereséséhez a NED (*NASA/IPAC Extragalactic Database*)<sup>3</sup> szolgáltatását alkalmaztam.

Az amerikai nemzeti rádiócsillagászati obszervatórium (NRAO) által működtetett VLBA (*Very Long Baseline Array*) kalibrátor forrásainak listája<sup>4</sup> egy olyan alkalmazás, ahol pozíció alapján a fényes rádióforrásokról két különböző (2,3 GHz és 8,4 GHz) frekvencián készült VLBI térképek tölthetők le. A 40 forrásból 37-hez sikerült itt régebbi, 8,4 GHz-es térképeket találnom, három forrás azonban kilóg a sorból. Ezeket az eseteket külön is megvizsgálva, a PKS J1332+0200 nevű forrásról korábban készült egy 5 GHz-es VLBA térkép (Fomalont et al. 2000). Egy másik forrás, a PMN J1248-4559 azonban túlságosan délen van, ezért nem szerepel a VLBA adatbázisban. A déli féltekéről viszont detektálták VLBI-vel, mind 2,3, mind pedig 8,4 GHz frekvencián (Fey et al. 2006). Végül a PMN J0527-1241 forrásnak a NED adatbázisban nem ismert egyetlen VLBI detektálása sem. A japán VERA (*VLBI Exploration of Radio Astrometry*) rádiótávcső-hálózat a pozíciója miatt detektálhatta volna a forrást, de mivel ez nem sikerült, valószínűleg 22 GHz-en 0,11 Jy-nél halványabb a forrás a VERA bázisvonalain (Petrov et al. 2007). Ez azt jelentené, hogy a PMN J0527-1241 nem kompakt, hanem kiterjedt forrás lehet, de ennek bizonyítására vagy megcáfolására további vizsgálatok szükségesek.



2. ábra. A PMN J2131-1207 rádióspektruma, két nagyságrendet átfogó frekvenciatartományban. Az ábráról látható, hogy a példaként bemutatott forrás lapos spektrumú (vagyis  $\alpha$  színekindexe 0 körüli). Ebből arra lehet következtetni, hogy rádiószerkezete kompakt, s emiatt ideális célpont VLBI megfigyelésekhez.

<sup>3</sup> <http://nedwww.ipac.caltech.edu>

<sup>4</sup> <http://www.vlba.nrao.edu/astro/calib/index.shtml>

A szélesebb sávban készült rádióspektrumok ábrázolásához egy olyan katalógus adatait használtam, melyben 1–22 GHz között 6 különböző frekvencián van egyidejű mérés, viszont csak  $-30^\circ$  és  $+43^\circ$  deklináció között (Kovalev et al. 1999). Összesen 20 olyan forrás volt, amelyhez mind a 6 frekvencián találtam adatot. Volt még 6 olyan forrás, amely szerepelt ebben a katalógusban, de csak néhány frekvencián volt hozzá mért adat. A maradék 14 forrás nem szerepelt ebben a mérésben. Ezekhez így a NED-ből gyűjtöttem 1,4 és 4,8 GHz-es fluxussűrűségeket.

Az adatbázisokból összegyűjtött információhoz hozzávettem a WMAP-ből a 41, 61 és 94 GHz-es frekvenciákhoz tartozó fluxussűrűség-értékeket is. Így már minden forráshoz rendelkezésemre álltak az adatok egy szélesebb frekvenciatartományt lefedő rádióspektrum készítéséhez. (Egy példa a 2. ábrán látható.)

### Célpontok az ASTRO-G űr-VLBI műhold számára

Az ASTRO-G japán rádiócsillagászati műholdat (Tsuboi 2008) várhatóan 2013-ban bocsátják fel. A 8, 22 és 43 GHz-es tartományokban méréseket végezve, része lesz egy földi rádióteleszkópokkal alkotott VLBI rendszernek, és akár 38 mikroívmásodperces felbontással is dolgozik majd. Segítségével így nagy érzékenységgű és felbontású megfigyelésekre nyílik lehetőség. Emiatt fontos azoknak a kompakt rádióforrásoknak az összegyűjtése, amelyek vizsgálata lehetővé válik az ASTRO-G segítségével. Ezeknek további jelentőséget ad, hogy a közelükben látszó halványabb célpontok megfigyeléséhez, kalibrációs célra is használják majd. A jelenleg ismert kalibrációs források listája – főleg a legmagasabb, 43 GHz-es űr-VLBI frekvencián – igen hiányos. További kalibrátorok kijelölése és előzetes földi vizsgálata tehát nagyon fontos az ASTRO-G program sikere érdekében. A megvalósítható hosszabb bázisvonalak miatt az űr-VLBI rendszer szögfelbontása 43 GHz frekvencián összemérhető a földi 86 GHz-es hálózatokkal elérhető felbontással. Ez alkalmat ad arra is, hogy a földi és űr-VLBI megfigyelések egymást kiegészítve információt adjanak a kvazárok fényességeloszlásának spektrális tulajdonságairól, soha nem látott részletességgel, néhányszor 10 mikroívmásodperces skálán.

### Összefoglalás

A mikrohullámú háttérsugárzást kutató WMAP űrszonda első 5 működési évében végzett mérései alapján elkészült pontforrás-katalógusból olyan extragalaktikus rádióforrásokat válogattam ki, amelyek alkalmasak lehetnek 86 GHz-es földi VLBI és 43 GHz-es űr-VLBI megfigyelésekre. A kiválasztáshoz az égi pozíciójukat, várható fluxussűrűségüket, valamint a publikált adatokból meghatározott rádió spektrálindeket használtam. Közel 40 olyan ígéretes, fényes és feltehetően kompakt rádióforrást találtam, amelyek szerkezetét eddig még nem térképezték fel mm-VLBI mérésekkel. Ezek vizsgálata kb. 25%-kal bővítené a jelenleg ismert mm-VLBI források számát.

### Köszönetnyilvánítás

A második generációs űr-VLBI programokba való magyar bekapcsolódás előkészületeit a Magyar Űrkutatási Iroda (MŰI, TP-314) támogatja.

### Irodalom:

- Chen, X., Wright, E. L. 2009, Extragalactic Point Source Search in Five-Year WMAP 41, 61, and 94 GHz Maps, *Astrophys. J.*, 694, 222
- Fey, A. L. et al. 2006, Milliarccsecond-Accurate Astrometry of 34 Southern Hemisphere Radio Sources, *Astron. J.*, 132, 1944
- Fomalont, E. B. et al. 2000, The VSOP 5 GHz Continuum Survey: The Prelaunch VLBA Observations, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 131, 95
- Kovalev, Y. Y. et al. 1999, Survey of instantaneous 1–22 GHz spectra of 550 compact extragalactic objects with declinations from  $-30^\circ$  to  $+43^\circ$ , *Astron. Astrophys. Suppl.*, 139, 545
- Lee, S.-S. et al. 2008, A Global 86 GHz VLBI Survey of Compact Radio Sources, *Astron. J.*, 136, 159

- Lobanov, A. P. et al. 2000, 86 GHz VLBI Survey of Compact Radio Sources, *Astron. Astrophys.*, 364, 391
- Petrov, L. et al. 2007, VERA 22 GHz Fringe Search Survey, *Astron. J.*, 133, 2487
- Rantakyrö, F. T. et al. 1998, 50  $\mu$ s resolution VLBI images of AGN's at  $\lambda$ 3mm, *Astron. Astrophys. Suppl.*, 131, 451
- Tsuboi, M. 2009, VSOP-2/ASTRO-G Project Overview for the Astronomy Community, in: *Approaching Micro-Arcsecond Resolution with VSOP-2: Astrophysics and Technology*, ASP Conf. Ser. 402, eds. Hagiwara, Y., Fomalont, E., Tsuboi, M., Murata, Y. (ASP, San Francisco), 30

## Gaia – a következő évtized nagy úrcsillagászati projektje

Szabados László

MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete

### Bevezetés

Az ESA 1989–1993 között működött Hipparcos asztrometriai űrmissziójának sikerén felbuzdulva, valamint a Hipparcos eredményei alapján megválaszolhatatlan kérdések hatására az Európai Űrügynökség újabb űr-asztrometriai küldetést készít elő. A 2012-ben felbocsátandó Gaia szonda nagyságrendekkel múlja felül elődjét a mérendő objektumok számát és a mérési pontosságot illetően, továbbá a térbeli mozgás leírásához szükséges, eddig jellemzően hiányzó adat, a vizsgált égitestek radiális sebessége is megállapítható a Gaia méréseiből.

Az asztrometriát – pozíciós csillagászatot – még a csillagászok egy része is idejét múlt vizsgálati területnek, a klasszikus csillagászat részének tekinti. Rajtuk kívül a nagyközönségben sem tudatosul, hogy a modern csillagászat látványos eredményeit nem lehetett volna elérni pontos asztrometria nélkül. Valamely égitest luminozitásának ismeretéhez tudnunk kell, hogy milyen távról érkezik a sugárzása, legyen szó akár gammakitörésről, akár röntgensugárzó fekete lyukról, akár pulzáló fehér törpéről, vagy porburokba ágyazott vörös óriáscsillagról. A kozmikus távolságmeghatározás alapja pedig a parallaxismérés, amihez az égitestek pontos koordinátáinak és koordinátaváltozásainak ismerete kell.

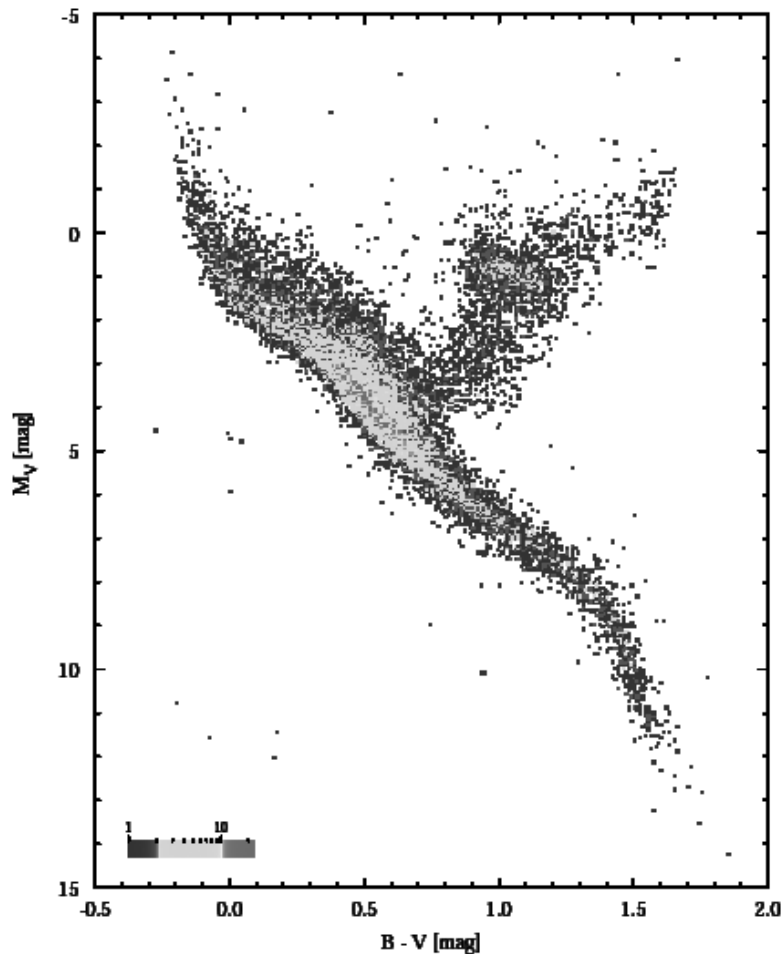
Az asztrometria azonban nemcsak ezért maradt a csillagászat alapvető része még napjainkban is. Az egyre nagyobb csillagászati távcsövekkel és érzékenyebb detektorokkal egészen halvány csillagok és extragalaxisok is vizsgálhatókká váltak. A jelenlegi legteljesebb csillagászati katalógus, az USNO B1.0, több mint egymilliárd objektum koordinátáit tartalmazza. A halvány égitestek pedig csakis a pontos pozíció és sajátmozgás ismeretében azonosíthatók.

Az asztrometria fontosságát jelzi továbbá az a tény is, hogy az asztrofizikai, kozmológiai, napkutató és bolygókutató űrszondák mellett asztrometriai célú űreszköz is működött már: az Európai Űrügynökség (ESA) *Hipparcos* szondája (Perryman 2009).

### Röviden a Hipparcosról

Az 1989 augusztusában pályára állított Hipparcos szonda 1993 márciusáig végezte méréseit, amelyekből 118000 csillag öt alapvető asztrometriai jellemzőjét határozták meg: a programcsillagok égi pozícióját leíró rektaszcenziót és deklinációt, a két koordinátairány menti elmozdulásra jellemző sajátmozgásadatokat, valamint a trigonometriai parallaxisukat. Ez utóbbiból közvetlenül számítható a csillag távolsága. A Hipparcos méréseiből viszonylag pontosan meghatározott luminozitású csillagok szín-fényesség diagramját mutatja az *1. ábra*. És mivel az asztrometriai űrszonda három és fél éven át végzett pozíciómérései során minden alkalommal rögzítette a programcsillagok fényességét is, a változócsillagokkal foglalkozók számára is hasznos a Hipparcos-katalógus (ESA 1997) (*2. ábra*).

A földi asztrometriai távcsövekkel végzett méréseknél a látómezőben levő többi csillaghoz viszonyított elmozdulás alapján határozzák meg a kiszemelt objektum parallaxisát. E módszer pontossága nagyon korlátozott, mert a „háttércsillagok” nincsenek a végtelenben, ezért azok trigonometriai parallaxisa sem nulla, bár az egyszerűség kedvéért annak veszik. Továbbá a légköri differenciális refrakció meghamisítja a mért szögmértékeket, a légkör nyugtalansága (szcintilláció) pedig lerontja a szögmérés pontosságát. Az asztrometriai űrszondával két eltérő égi irány környezetében levő csillagok helyzetét mérték, mégpedig minden csillag koordinátáit az összes többiéhez (azaz 118000 másikhöz) viszonyítva, és ebből a monumentális adathalmazból kellett megfelelő matematikai módszerekkel megállapítani a programcsillagok koordinátáin kívül a sajátmozgás és a parallaxis értékét is minden mért objektumra (van Leeuwen 2007).



1. ábra. A Hipparcos által mért legpontosabb távolságú csillagok szín-fényesség diagramja (az ESA nyomán)

### A Gaia tervezésének szempontjai

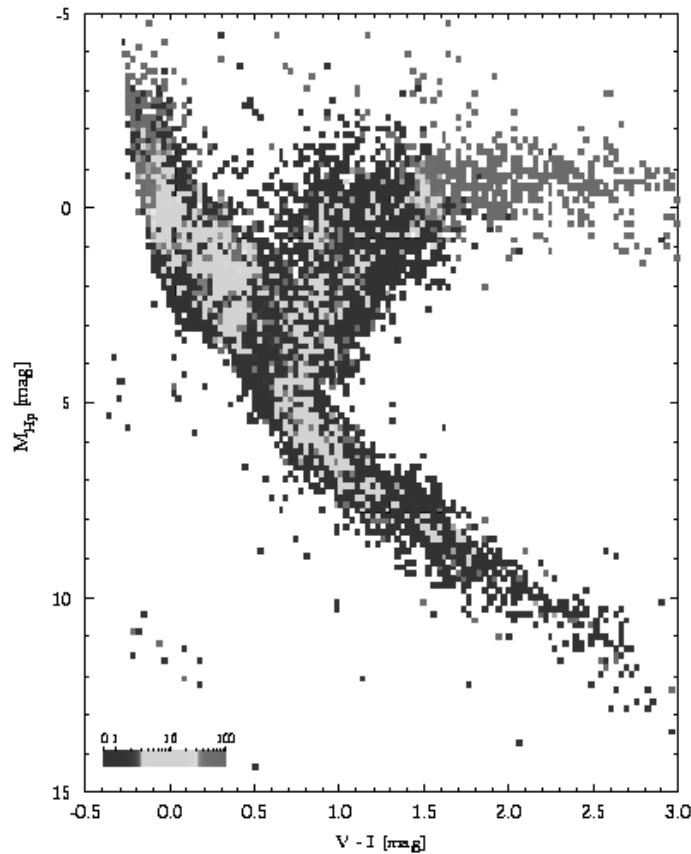
Amint a Hipparcos megmutatta az abszolút parallaxis meghatározásának lehetőségét, már az 1990-es években megkezdődött utódja, a Gaia asztrometriai űrszonda előkészítése. Az újabb generációs Gaia szondával elérendő célok első olvasásra talán meghökkentőek: 20 magnitúdóig az összes égitest detektálása a teljes égbolton (kb. egymilliárd csillag), a pozíciómérés pontossága pedig 10–25 milliomod ívmásodperc 15 magnitúdónál (a Hipparcos esetében a pontosság 1 ezred ívmásodperc volt 9 magnitúdónál). Hogy a Hipparcoséval összehasonlítva mennyivel teljesebb, pontosabb és mélyebb vizsgálatokat tesz lehetővé a Gaia, azt az 1. táblázat mutatja be részletesebben. A pontosság tehát 2 nagyságrendet javul, az érzékenység 4 nagyságrenddel lesz jobb, a vizsgált csillagok száma pedig 4 nagyságrenddel több.

A mérések alapelve azonos a Hipparcos esetében alkalmazott eljárással: két látóirány egyesítésével abszolút parallaxis meghatározása. Az égbolt 5 éven át tartó szkennelése lehetővé teszi a parallaxis és a sajátmozgás megbízható szétválasztását.

A Hipparcoshoz képest lényeges új elem, hogy a vizsgált égitestek térbeli mozgásának leírásához szükséges, eddig hiányzó látóirányú sebesség is megállapítható lesz a mérésekből, legalábbis a V sávban 16–17 magnitúdónál fényesebb objektumokra. Maguk a mérések rés nélküli spektroszkópiával történnek a Ca triplet körül a 847–874 nm hullámhossztartományban.

Az alacsony diszperziós színképből meghatározható a vizsgált objektumok fényessége, továbbá néhány diagnosztikus értékű asztrofizikai mennyiség, pl. a szín, az effektív hőmérséklet, a felszíni gravitációs gyorsulás, a légköri nehézelem-gyakoriság, de még a látóirányú csillagközi extinkció mértéke is. A radiálissebesség-mérések alapján a térbeli mozgás harmadik komponense

mellett megállapítható lesz a vizsgált objektum perspektivikus gyorsulása is, de számos más alkalmazási terület is előre látható: dinamikai és populációs vizsgálatok, kettőscsillagok kimutatása és egyedi vizsgálata. A színekéből kinyerhető adatok lehetővé teszik továbbá a csillagok kémiai összetételének és rotációjának vizsgálatát is.



2. ábra. A változócsillagok gyakorisága a Hipparcos fotometriai mérései alapján. A leghidegebb csillagok mindegyikének változik a fényessége (az ESA nyomán).

1. táblázat.

	Hipparcos	Gaia
magnitúdóhatár	12	20 magnitúdó
teljesség	7,3–9,0	20 magnitúdó
fényes határ	0	6 magnitúdó
objektumok száma	120 000	26 millió $V = 15^m$ -ig, 250 millió $V = 18^m$ -ig, 1000 millió $V = 20^m$ -ig
effektív távolsághatár	1 kpc	50 kpc
kvazárok	1 (3C 273)	500000
galaxisok	Nincs	1000000
pontosság	0,001 ívmásodperc	7 mikroívmásodperc ( $V = 10^m$ ), 10–25 mikroívmásodperc ( $V = 15^m$ ), 300 mikroívmásodperc ( $V = 20^m$ )
fotometria	Kétszín-fotometria (B és V)	alacsony diszperziós spektrum $V = 20^m$ -ig
radiális sebesség	Nincs	1–10 km/s $V = 16$ – $17^m$ -ig
megfigyelési program	előre kiválasztva	Teljes és torzítatlan



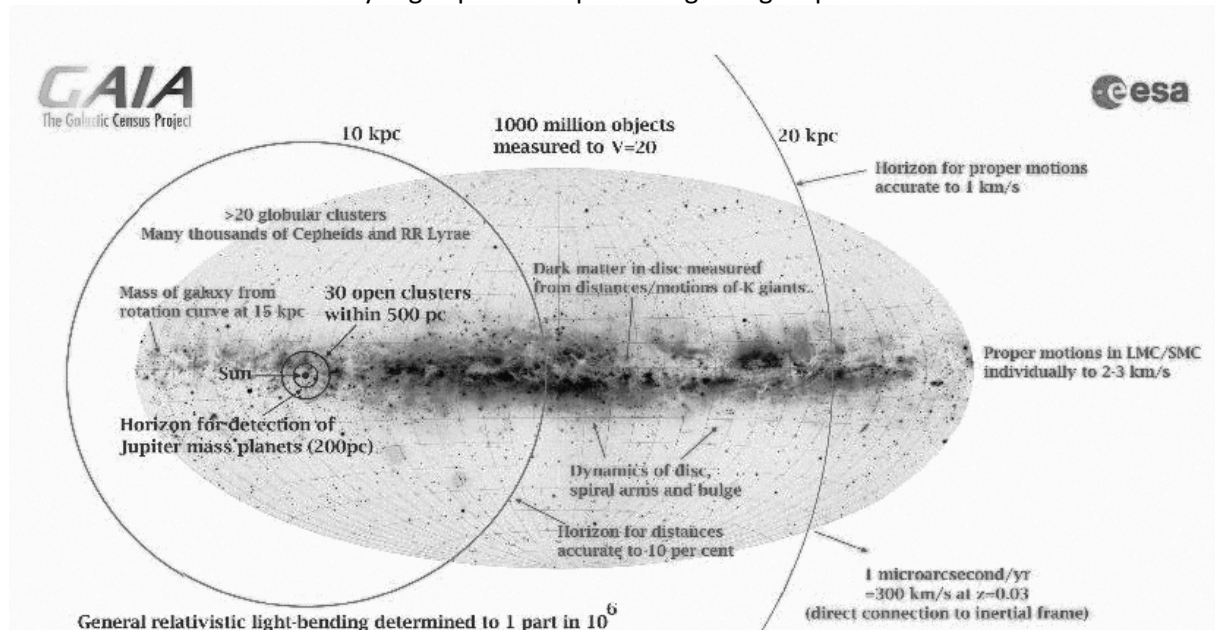
### Mit ad a Gaia az asztrofizika számára?

A Gaia mérései lehetővé teszik a csillagok luminozitásának átfogó kalibrálását, egyebek között 1% pontos távolságok várhatók kb. 10 millió csillagra 2,5 kpc-en belül és 10% pontos távolságok 100 millió csillagra 25 kpc-en belül. Számos ritka típusú, ill. gyors fejlődési fázisban levő csillag luminozitása is végre ismertté válik. A kozmikus távolságskála megalkotásában alapvető szerepet betöltő távolságindikátorok (pl. cefeidák, RR Lyrae típusú csillagok) parallaxisát még a Magellán-felhőkben található ilyen csillagokra is meg lehet mérni.

A pontos távolságok alapján megállapítható lesz a Naphoz közeli csillagok tömegfüggvénye és luminozitási függvénye (több tízezer fehér törpe és barna törpe figyelembevételével), a csillagkeletkezési régiók tömeg- és luminozitási függvénye, a fősorozat előtti csillagok luminozitási függvénye. Továbbá a fotometriai idősorokból minden színképtípusú csillag változását detektálni és jellemezni lehet. Lényeges eredmény lesz, hogy pontos Hertzsprung–Russell-diagram készíthető az egész Tejútrendszerre vonatkozóan.

A csillagok fizikai jellemzőinek megállapításán túlmenően elkészíthető a Tejútrendszer háromdimenziós térképe nagyjából egymilliárd csillag alapján. Ez a következő információkat is magában foglalja: minden csillagpopuláció távolsága és sebességeloszlása, a korong és a haló térbeli és dinamikai szerkezete, keletkezésének története, a galaktikus sötét anyag eloszlásának részletes feltérképezése, a csillagszerkezetre és -fejlődésre vonatkozó elméletek szelektálása megfigyelési alapon, több ezer extraszoláris bolygó kimutatása teljes égfelmérés alapján. (3. ábra)

A Tejútrendszeren túli világra vonatkozóan is lényeges eredményekre lehet számítani: megbízható távolságstandardok a két Magellán-felhőben is, gyors riasztás tranziens források (szupernóvák, egyéb kitörések) esetén, kvazárok detektálása, vöröseltolódása és a kozmológia számára fundamentális mennyiségek példátlan pontosságú megállapítása.



3. ábra. A Gaia tudományos céljainak összefoglalása (az ESA nyomán)

### A Naprendszer vizsgálata a Gaia űrszondával

A naprendszerbeli égitestekkel kapcsolatban várható eredményeket csak felsorolásszerűen említjük:

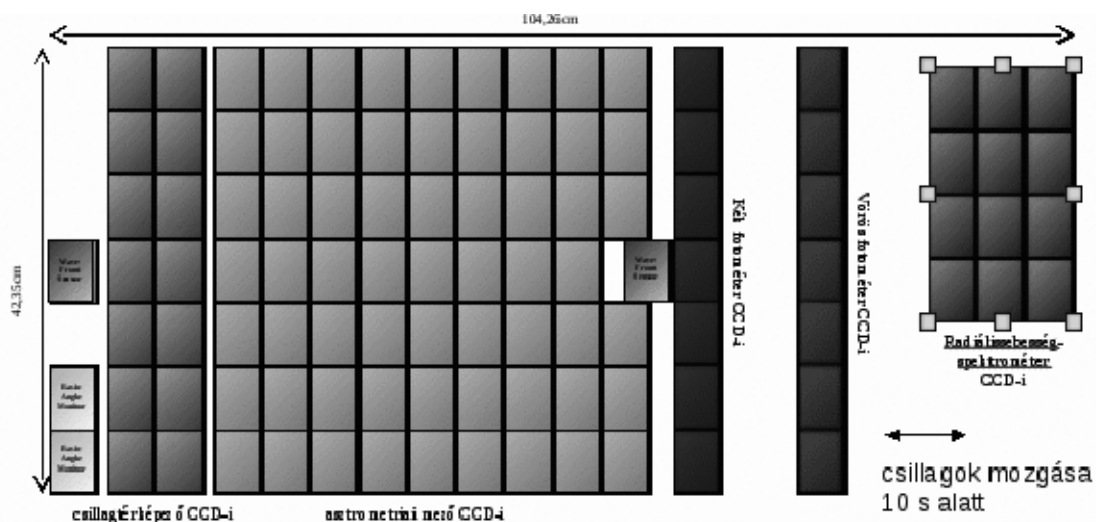
- a Naprendszer kb. negyedmillió kis égitestjének (főként fővbeli kisbolygók) felfedezése teljes égfelméréssel;
- minden mozgó objektum detektálása (20 magnitúdóig) homogén módon;

- a kis égitestek pályájának a jelenleginél 30-szor pontosabb meghatározása, még az egy évszázada ismert objektumok esetében is;
- a forgástengely irányának és a forgási periódus, ill. az alak meghatározása a többségre;
- a Mars, Föld és Vénusz esetleges trójai kísérőinek kimutatása;
- kb. 50 Kuiper-objektum felfedezése 20 magnitúdóig (kettősségük megállapítása, a plutónók kiválasztása közülük);
- kb. 50 kentaur felfedezése;
- kb. 500 további Föld-közeli objektum detektálása (jelenleg 2600 Amor, 3100 Apollo és 500 Aten típusú kisbolygó ismert), detektálási határ: 260–590 m, az albedótól függően.

### A Gaia jellemzői

A szonda teljes egészében ESA-misszió, indítása 2012 tavaszán várható Szozuz–Fregat típusú hordozórakétával. A 2120 kg indítási tömegű szondát a Nap–Föld rendszer L2 Lagrange-pontja körüli Lissajous-pályára juttatják. Az 5 évre tervezett működés esetleg 1 évvel meghosszabbítható. Az adattovábbítás sebessége 4–8 Mbps.

A fókusz síkban elhelyezendő CCD-mátrix geometriáját a 4. ábra mutatja. Az egyszerre detektálható terület: 0,75 négyzetfok. A mérés során szkennelt sáv szélessége: 0,7°.



4. ábra. A Gaia fókusz síkjában levő CCD-elemek elrendezése (Alex Short diagramja alapján)

Az adatok kiértékelése a Hipparcosnál bevált módon történik, globális asztrometriai redukálással:

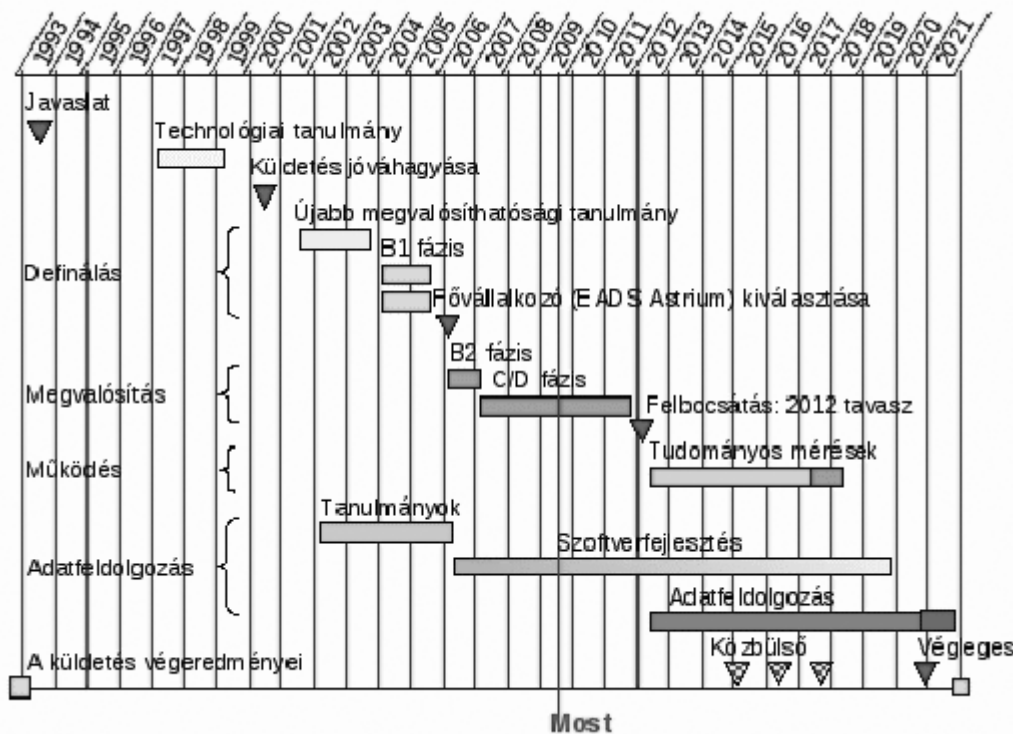
- objektumok megfeleltetése a különböző főkörök mentén;
- helyzet és kalibrálás frissítése;
- objektumok pozíciójára stb. megoldás;
- magasabb rendű tagok;
- újabb főkörök adatai;
- a rendszer iterálása.

Az adatfeldolgozást a mérések kezdetétől fogva folyamatosan végzik, az egyre újabb adatokkal fokozva az addig elért pontosságot. A végső katalógus nagyjából 2020-ra készül el, de közbülső katalógusokat is közzétesznek a lehetőség szerint. A Gaia-misszió tervezett időrendjét az 5. ábra foglalja össze.

### A Gaia szondához kapcsolódó tudományos szervezetek felépítése

A projekt tudományos vezetője a hét tagú Gaia Science Team (GST), melyhez csatlakozik az ESA Project Scientist és a Data Processing and Analysis Consortium (DPAC) vezetője (Executive Chair).

A DPAC keretében jelenleg 20 ország mintegy 400 kutatója vesz részt a Gaia-hoz kapcsolódó tudományos előkészítő munkában, pl. szimulációk, algoritmusok készítésében. Magyarországról az MTA KTM Csillagászati Kutatóintézetében működő Konkoly Observatory Gaia Team (KOGT – Szabados László témavezető, Kiss Zoltán Tamás és Klagyivik Péter, ESA PECS No. 98090 támogatással) vesz részt a munkában, elsősorban cefeidák viselkedésének tanulmányozásával és előrejelzésével. A szonda működése idején a földi kiegészítő mérésekben is részt vesz a KOGT cefeidák, illetve gyors fejlődési fázisban levő csillagok vagy más tranzienst források fotometriai megfigyelésével.



5. ábra. A Gaia misszió időrendi áttekintése (Michael Perryman és François Mignard diagramja alapján)

A DPAC tevékenysége ún. koordinációs egységekben (Coordination Unit, CU) folyik. Jelenleg 8 ilyen egység működik (CU1: System Architecture; CU2: Data Simulation; CU3: Core Processing; CU4: Object Processing; CU5: Photometric Processing; CU6: Spectroscopic Processing; CU7: Variability Processing; CU8: Astrophysical Parameters). A CU9-et (Catalogue Access) később hívják életre. A KOGT a CU7 keretében folytatja tevékenységét.

### Köszönetnyilvánítás

A KOGT munkájához az ESA PECS No.98090 projekt nyújt anyagi támogatást.

### Irodalom:

ESA 1997, Hipparcos Catalogue, ESA SP-1200

Perryman, M. 2009, Astronomical Applications of Astrometry, Cambridge Univ. Press

van Leeuwen, F. 2007, Hipparcos, the New Reduction of the Raw Data, Astrophysics and Space Science Library 350, Springer

## A marsi poláris sötét dűnefoltok és lefolyásaik vizsgálata, a DDS-MSO hipotézis

Horváth András

MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete,  
Collegium Budapest

### Gánti Tibor (1933–2009) emlékére

A marsorbiterek (Mars Global Surveyor – MGS, Mars Express – ME, Mars Reconnaissance Orbiter – MRO) kameráinak (MOC, HRSC, HiRISE) marsfelszíni fotói közül egy tekintélyes rész a sarki hósapkákat mutatja. A sarki hósapkáknak sem az összetételét, sem a fizikai állapotát nem ismerjük pontosan, több területen feltételezésekre vagyunk utalva. A szóba jöhető komponensek a vízjég, a CO<sub>2</sub>-klatrát, valamint a szilárd szén-dioxid (szárazjég) – illetve kevés por mint szennyezőanyag (Kereszturi, 2006). Az évszakos hósapka fizikai állapota sem ismeretes, képződése nem folyadékfázis megfagyásával, hanem gázfázisból közvetlenül szilárd fázisba való átmenettel, esetleg részben havazással képződik. Ennek megfelelően a fizikai szerkezete valószínűleg laza hószerű, de a hosszú marsi tél alatt, esetleg tömör jéggé alakulhat. Az évszakos sarki hósapka nyári eltűnése sem olvadáson keresztül történik, hanem közvetlen szublimációval, azaz a jég olvadás nélküli gáz halmazállapotúvá alakulásával. Az alábbiakban a Collegium Budapest Institute for Advanced Study intézetben az Európai Űrügynökség (ESA) és a Magyar Űrkutatási Iroda (MŰI) támogatásával működő Mars Asztrobiológiai Kutatócsoport eredményeiből olvasható áttekintés.

A sarki hósapkáról készült nagyfelbontású felvételeken sokféle különböző képződmény, folt található, amelyek eredete és tulajdonságai jelenleg nincsenek megmagyarázva. Ezek közül egy elég jól elkülönített csoportot alkotnak a sarki sötét dűneken (dark dunes, *DD-k*) kialakuló ún. sötét dűnefoltok (*dark dunes spots, DDS-ek*). A dűnefoltok tél végén – tavasszal tűnnek fel, számuk sok ezerre tehető. E foltok legfontosabb tulajdonságai: 1. sík részeken, döntő számban kör alakúak (*1. ábra*); 2. dőlő területeken megnyúlásos-lefolyásos formájúak (*2. ábra*); 3. szezonális változásuk jól megfigyelhető (*3., 7. ábra*); 4. azonos helyű éves visszatérés is kimutatható (*4. ábra*).

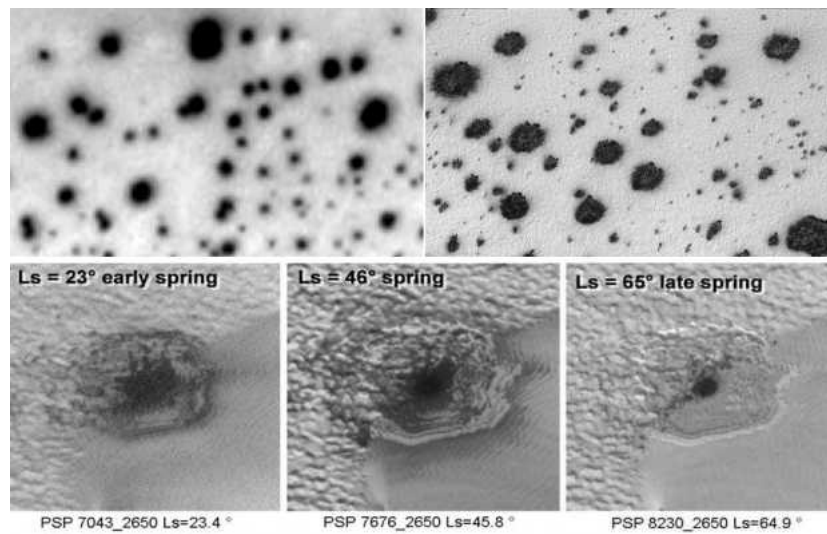
A sötét dűnefoltok képződését a NASA szakemberei kizárólag szublimációs folyamatokra vezetik vissza, azonban a foltok tulajdonságai, megjelenésük, fejlődésük és más tényezők kizárják, hogy egyedül a szublimáció lenne felelős ezek kialakulásáért. Természetesen mivel az évszakos sarki hósapka eltűnése szublimációs folyamattal történik, ennek a jelen esetben is szerepe van, de nem magára a DDS-ek kialakulására és fejlődésére vonatkozóan. Véleményünk szerint e foltok kialakulásában a folyékony víz megjelenése játszik fontos szerepet. Ezt az álláspontot a következő, a marsorbiterek által készített felvételeken látható tapasztalati tények alapján vontuk le (Horváth et al. 2006; Gánti et al., 2003; Szathmáry et al. 2007), amelyet elméleti modellszámítások is kiegészítenek (Möhlmann, 2009, 2009; Kereszturi et al., 2009, 2010a,b):

1. A foltok kialakulása a jég alján, azaz a talajfelszín és a jégréteg között kezdődik és mindaddig tart, amíg fölüle a jégréteg el nem szublimál.

2. Az adott foltok csak a sarki területeken található DD-ken, azaz sötét dűneken fejlődnek ki, nemegyszer egészen pontosan körülrajzolva a dűnék határvonalait. Ez azt jelenti, hogy a dűnék anyaga valamilyen módon befolyásolja e foltok kialakulását, képződését, fennmaradását. A dérképződés, vagyis a sarki hósapkák kialakulása függhet a talajfelszín minőségétől, mert a talajfelszín kristályosodási göcként hat a jégkristályok keletkezésére. A jégtakaró eltűnése azonban – miután a jég felszínéről történő szublimáción keresztül megy végbe – független az adott talaj minőségétől. Egyedül a szublimációval, azaz a fagyott réteg eltávozásával e foltok kialakulása már csak ezért sem magyarázható.

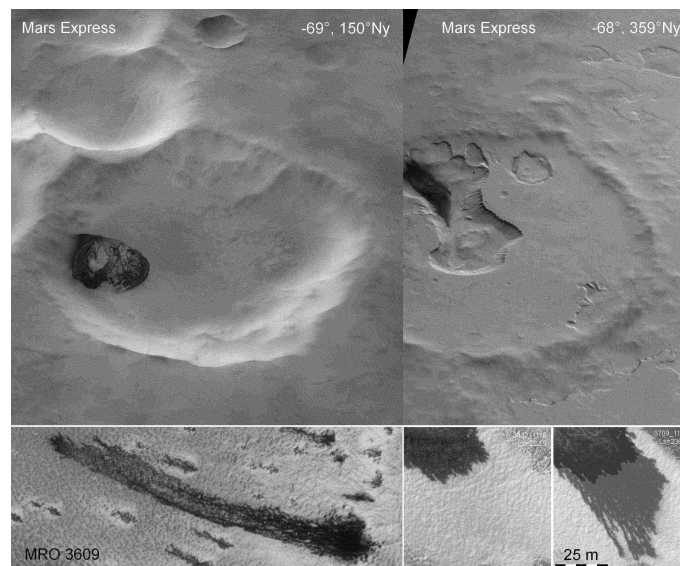
3. A foltok a sík felszínen lényegében kör alakúak (*1. ábra*), ami azt jelenti, hogy kialakulásuk izotrop (iránytól független) fejlődés eredménye. A szublimációs folyamatok függnak a talaj

felszínének a helyzetétől, a napsugarak beérkezési szögétől, a légmozgás irányától stb. Ha e foltok kialakulása kizárólag szublimációs folyamat eredménye lenne, akkor valamilyen módon a talajfelszín egyenetlenségei kellene, hogy tükröződjenek a foltok alakjában. Ilyet azonban nem tapasztaltunk. Vízszintes területen a talaj egyenetlenségétől függetlenül a foltok kör alakúak, vagy közel kör alakúak. Ez annyit jelent, hogy létesülésüket csak olyan folyamat indukálhatta, amely a talajfelszín egyenetlenségeitől független. Miután a sötét dűnék anyaga feltételezhetően bazalthomok, ez izotrop közegnek tekinthető, és ebben egy folyadékfázis – jelen esetben a folyékony víz, illetve sóoldat – terjedése vízszintes területen iránytól függetlenül történik. Következésképpen, ha valamilyen oknál fogva a jég alatt folyékony víz képződik és terjed, akkor ez a jég alatt egy közel kör alakú folt megjelenéséhez vezet. Ez is a folyékony víz szerepét támasztja alá a DDS-ek, azaz a sötét dűnéken lévő hótakaró alatt megjelenő sötét foltok kialakulásában.



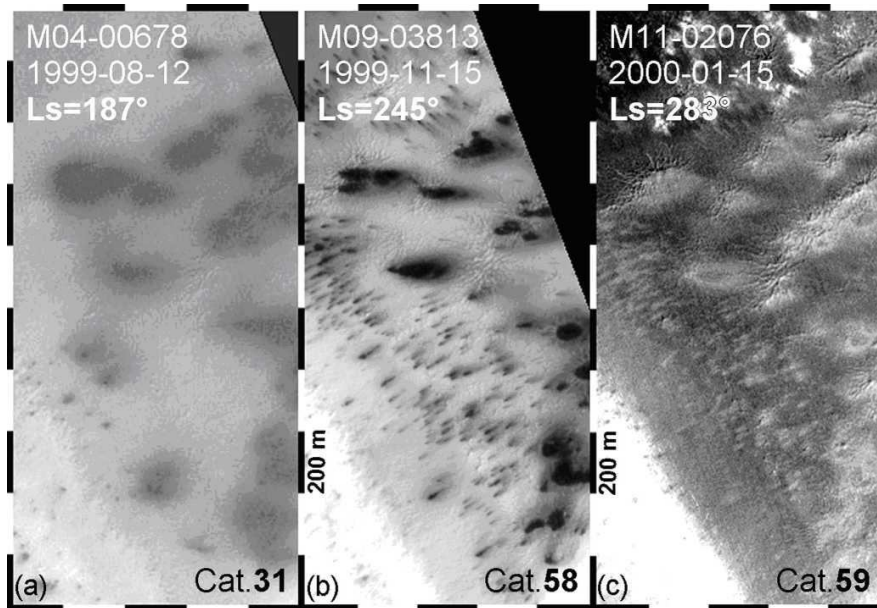
**1. ábra. Sötét dűnefoltok (DDS-ek) a Mars déli és északi poláris vidékein.**

A felső képek délen készültek: a bal oldali az MGS M03-07564-kép 500x300 m-es kivágata (felbontás ~1,5-2 m, koord. -64°, 42°K, 1999-08-09, Ls=185° tavasz kezdetén); a jobb oldali az MRO HiRISE PSP\_003432\_1115-kép 500x300 m részlete (felbont. 0,25 m, koordináták -68°, 2°K, 2007-04-20, Ls=223° tavasz közepe. Az alsó képsor az északi poláris körzetben készült, és egy fehér-gyűrűs DDS évszakos változását mutatja tavasz kezdetétől végéig (MRO 100x80 m-es képrészlet, felbontás 0,25 m, koord. 85°É, 1°K, 2008-01-27, -03-16, -04-28).



**2. ábra. A marsi sarki sötét dűnefoltok dőlő területen (rézsűkőn) lefolyásos jelenséget mutatnak.**

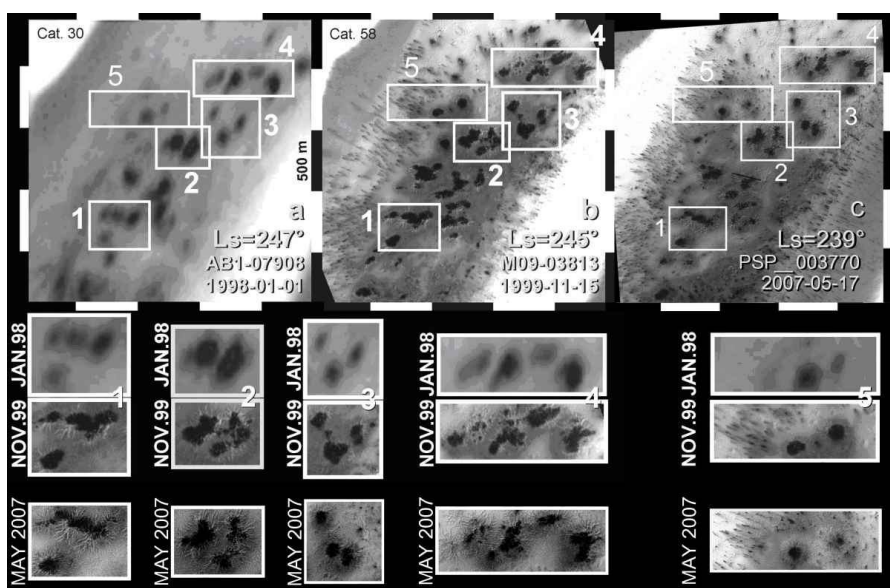
A Mars Express felső képei két 50–58 km átmérőjű déli krátert (koordináták:  $-69^\circ, 210^\circ\text{K}$ ;  $-68^\circ, 1^\circ\text{K}$ ) mutatnak sötét dűnedombbal (DD). Alattuk a kráterekből kinagyított MRO HiRISE részleteken a dűnelefolysók (DDS-seepages) vonalasan szétbomló szerkezete, jobbra pedig a lefolyás két fázisa látható 22 nap különbséggel.



3. ábra. A marsi poláris sötét dűnefoltok szezonális változása.

Az ún. Inca City terület (koord.  $-82^\circ, 296^\circ\text{K}$ ) MGS-képeinek  $1 \times 2$  km-es kivágatain jól megfigyelhetők a DDS-fejlődés fázisai tavasztól nyárig (Horváth et al., 2006; Gánti et al., 2003).

4. Enyhe lejtős terepen a foltok lejtirányban megnyúlnak, ellipszishez hasonló alakúvá válnak (3. ábra), ahol az ellipszis nagytengelye a lejtirányba mutat. Ez azt jelenti, hogy valamilyen lejtirányú erő hat a foltok kialakulására. Ez feltehetőleg nem a szél, mert az eltérő tájoltságú lejtőkön is mindig lejtirányú a megnyúlás. Ilyen hatást porózus közegben szivárgó folyadékokra a gravitációs erő gyakorolhat. Ezért feltételezhető, hogy a foltok kialakulásában folyékony fázis megjelenése játszik szerepet. A folyadékfázis pedig az adott körülmények között más, mint folyékony víz, illetve sűrű sóoldat, nem lehet.



4. ábra. A marsi sarki sötét dűnefoltok azonos helyű éves visszatérése.

Tavaszi második felében az Inca City területéről (koordináták:  $-82^\circ$ ,  $296^\circ K$ ) készült MGS MOC (felső első és második kép felbontása 10 m, illetve 2 m), valamint az MRO HiRISE (jobb oldali kép felbontása 0,25 m) felvételek 2,5x2,5 km-es részleteiből (felül) kinagyított alsó képeken jól látható a foltok éves visszatérése.

5. Meredekebb lejtőkön a foltokból határozott megfolyások indulnak ki lejtirányban. Ezeken a felvételeken már a látvány is azt sugallja, hogy ott folyadékfázis lejtirányú áramlása történik (2. ábra).

6. A talajt télen fehér hótakaró fedi. Ez a hótakaró a nyár elejére elszublimál, és előtűnik a sötét dűnék anyaga. A nyári felvételeken azonban néhol a sötét dűne anyagot világosabb szürke foltok tarkítják (3c. ábra). A foltok eloszlása és helye megegyezik a DDS-ek eloszlásával és helyével, vagyis, ahol tél végén és tavasszal a sötét foltok megjelentek, ott nyáron a talajt valami eltérő tulajdonságú anyag fedi. Mi lehet e szürke foltok anyaga?

7. Végül az a tény, hogy a DDS-ek tél végén kezdenek megjelenni és tavasszal teljesebben ki, azt mutatja, hogy keletkezésükhöz valami köze van a napsugárzásnak (7. ábra). Úgy is mondhatnánk, hogy a felvételek tanúsága szerint a sötét foltok a napsugárzás hatására keletkeznek, a hó/jégréteg alatt.

A fentebb felsorolt érvek világosan mutatják, hogy a szublimációs folyamat nem adhat magyarázatot ezeknek a foltoknak a megjelenésére és fejlődésére. Ugyancsak nem ad magyarázatot a foltok tulajdonságaiból következő folyékony fázis, azaz a víz megjelenésére. De ha nem a fagyott réteg eltávozása, akkor mi okozza a foltokat? Mi teszi lehetővé, hogy a jég alatt víz keletkezzen és maradjon meg hónapokon keresztül folyékony állapotban?

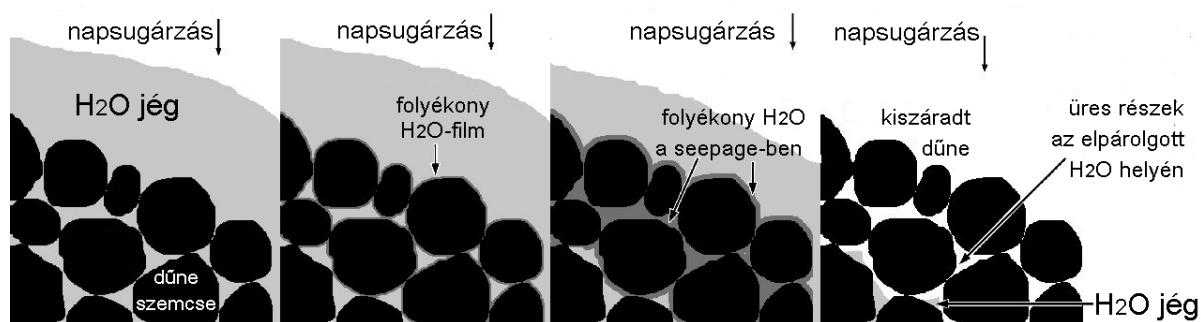
A kérdés megoldására dolgozta ki a Collegium Budapest intézetben működő kutatócsoport (*Mars Astrobiology Group, MAG*) a DDS-MSO hipotézist (*Mars Surface Organism, MSO*) (Gánti et al. 2003; Horváth et al. 2006; Szathmáry et al. 2007). A Collegium Budapest MAG-jában Bérczi Szaniszló fizikus, Gánti Tibor vegyész, Horváth András csillagász-űrkutató, Kereszturi Ákos geológus, Pócs Tamás növénybiológus, Sik András geográfus és Diedrich Möhlmann meghívott fizikus Szathmáry Eörs evolúcióbiológus vezetésével végezte, illetve végzi a DDS-MSO hipotézissel, a sötét dűnefoltokkal és lefolyásaikkal kapcsolatos kutatómunkát.

A DDS-ek űrszondás felvételeinek feldolgozásából kapott eredmények első nemzetközi bemutatása 2001 márciusában, a Houstonban rendezett hold- és bolygóutatási konferencián (*Lunar and Planetary Science Conf., LPSC*), illetve 2001 áprilisában, Moszkvában az Orosz Tudományos Akadémia Interkozmosz-30 elnevezésű nemzetközi konferenciáján történt (Horváth et al. 2001, 2003). Azóta minden évben vittünk anyagokat újabb kutatásainkról Houstonba, Tokióba, Nizzába és az európai bolygóutatási konferenciákra. Kilenc év alatt több mint 60 előadás, poszter és cikk jelezte tevékenységünket a DDS-kutatásban. A legfontosabb, terjedelmes cikkeink az *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, az *Astrobiology*, az *Icarus* ismert nemzetközi folyóiratokban, valamint két asztrobiológiai témájú könyv egy-egy fejezetében jelentek, illetve jelennek meg. E munkák bibliográfiai adatai a cikk végén találhatóak.

A DDS-MSO hipotézis ismertetésénél abból indulhatunk ki, hogy ha volt valaha a Marson élővilág, a marsfelszíni körülmények drasztikus változása folyamán az élő rendszerek maximálisan próbáltak alkalmazkodni a bekövetkező változásokhoz. Ez természetesen az élővilág döntő többségének nem sikerülhetett a változások roppant erős mértéke miatt. De visszamaradhattak olyan, a fejlődés alacsonyabb fokán lévő rendszerek, amelyek egyes helyeken megtalálhatták az évenként rendszeresen visszatérő életfeltételeiket, miközben a számukra kedvezőtlen időszakot beszáradt, fagyott állapotban igyekeztek túlélni. Ha ez bekövetkezett, akkor ezeknek az élőlényeknek a fotoszintézisükhöz nagy abszorpcióképességű festékanyagokat kellett kifejlesztelniük, hogy a beérkező fényt megfelelő határfokkal hasznosíthassák. Ha ilyenek maradtak fenn azokon a területeken, amelyeket  $H_2O$ -jég/hó fed, akkor ezek tél végén, amikor a Nap felkel, a hó- és jégrétegen keresztül jutó napsugarakat intenzíven elnyelik, miközben maguk felmelegednek. Így kellő napsugárzás esetén maguk körül, a talaj és a hó/jégréteg között megolvashatják a vízjeget. Ily módon a jég alatt folyékony víz illetve sóoldat keletkezhet, amelyben ezen marsfelszíni organizmusok (az MSO-k) megtalálhatják az életfeltételeiket.

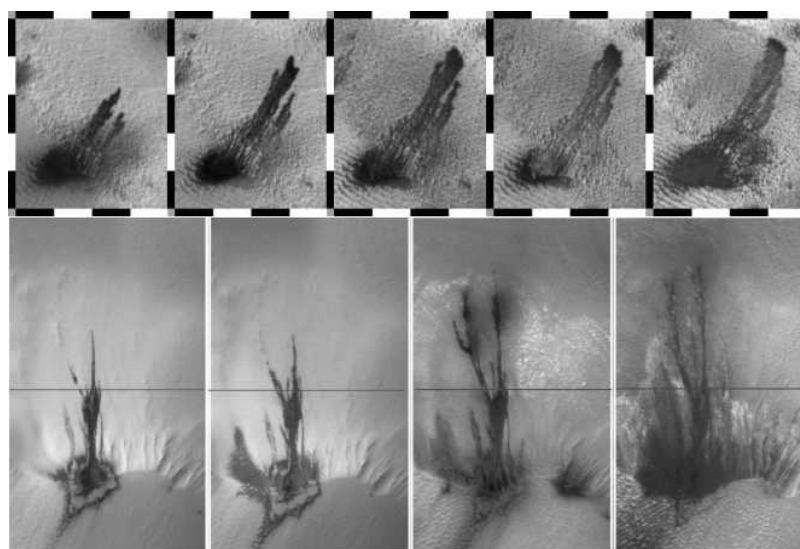


Kérdés persze, hogy amikor a külső hőmérséklet  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot is elérhet (Kereszturi et al., 2009, 2010a,b), e jég alatti víz miért nem fagy meg. A válasz a jég/hóréteg rendkívül jó hőszigetelő képességében rejlik. A földi flóra egyszerűbb tagjai tudnak a hó/jég alatt élni és anyagcsere-tevékenységet folytatni. Hasonló, bár kisebb hőmérséklet-különbség tehát, mint amit a Marson feltételezünk a külső hőmérséklet és a hó alatti víz hőmérséklete között, a Földön is előfordul. A feltételezést, hogy a szilárd üvegházhatás lehetséges a Marson, D. Möhlmann fizikai modellszámításai támasztják alá, melyek szerint a dűnefelszín szemcséi között (5. ábra) lehet folyékony  $\text{H}_2\text{O}$  (Kereszturi et al. 2009, 2010a,b; Möhlmann 2008, 2009), így a lefolyásokban ténylegesen víz szivároghat.



5. ábra. A sötét dűnefoltokból kiinduló vízlefolys-modell mikrostruktúrája (Horváth et al., 2009).

Tél vége felé és tavasz elején a napsugárzás erősödésével, a besugárzás hosszának és a beesési szög növekedésével a foltok egyre intenzívebbé válnak, jelül annak, hogy a jég alatti vízfilm egyre vastagabbá és kiterjedtebbé válik. Ahol a víz megjelenik, ott a jég/hóréteg szublimálása is intenzívebbé válik, hiszen nemcsak fölülről, de alulról is melegedik. Ezért itt a jég eltűnési folyamata gyorsabban megy végbe, mint az egyéb helyeken. Ennek következtében a folt közepén szublimál el először a fölötte lévő hó/jégréteg, és ekkor az egyébként szürke folt közepén egy sötétszürke-fekete mag jelenik meg. Lejtős terepen természetesen a jég alatti vízre is hat a gravitáció, amelynek következtében a folt növekedése lejtőirányban meggyorsul. Erősebb lejtők esetén a vízfilm olyan vastagá válhat, hogy kisebb lejtőirányú mélyedésekben intenzív szivárgás indulhat meg a lejtő felé, és így okozhatja azokat a lefolyásokat, amelyeket számos felvételen tapasztalhatunk (2., 6. ábra).



6. ábra. A DDS-ekből kiinduló lefolyások fázisai a déli, illetve az északi pólus körzetében.

Fent a Richardson-kráterben (koord.:  $-72^{\circ}$ ,  $180^{\circ}\text{K}$ ) készült öt MRO HiRISE felvétel (PSP\_3175, 2007-03-31, Ls=211; \_3385, -04-17, 221; \_3597, -05-03, 231; \_3742, -05-15, 238; \_3953, -05-31, 249)  $80 \times 100\text{ m}$ -es kivágata.



A lefolyás átlagsebessége  $\sim 0,5$  m/nap (Kereszturi et al., 2009). Alul az északi pólus közelében (koord.  $84^\circ$ ,  $233^\circ\text{K}$ ) készült négy MRO felvétel (PSP\_007193\_2640, 2008-02-07,  $L_s=29^\circ$ ; PSP\_007404\_2640, -02-24,  $37^\circ$ ; PSP\_007905\_2640, -04-03,  $54^\circ$ ; PSP\_008248\_2640, -04-30,  $66^\circ$ ) 100x200 m-es részének nagyítása. A lefolyás átlagsebessége  $\sim 0,4$  m/nap (Kereszturi et al. 2010a).

Nyár elejére az évszakos hóréteg teljes eltűnése után az MSO-k is beszáradnak és a talajfelszín borító vékony réteggé maradnak vissza. Ezek jelentkezhetnek szürke foltként azokon a felvételeken, amelyeket az orbitek nyári időszakban készítettek a sötét dűnék felszínéről (3c. ábra).

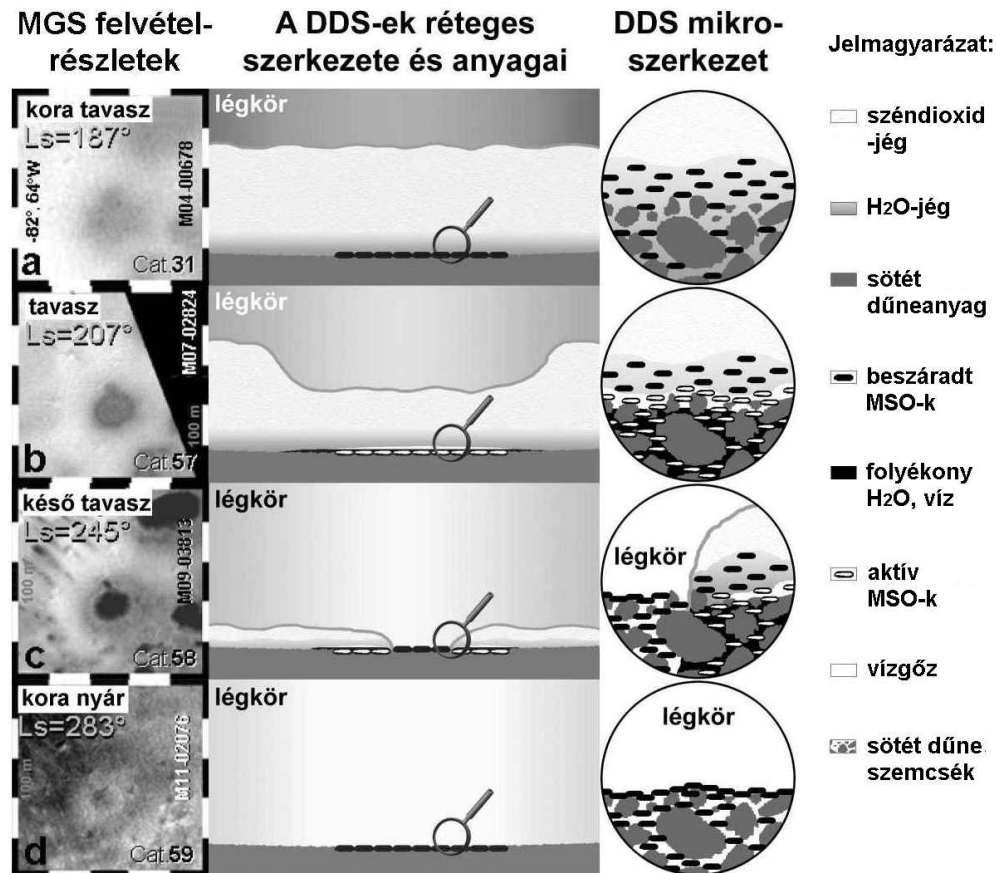
Az elmondottak képezik a DDS-MSO hipotézis magját. Lényege tehát, hogy a téli időszak végén a Mars sarki területein található dűnéken megjelenő foltok folyékony víz megjelenésére vezethetők vissza, amely folyékony víz a jég és a talaj határán a napsugárzás hatására az ott lévő marsfelszíni organizmusok közreműködésével jön létre, ezáltal életteret biztosítva e marsbéli organizmusok számára. Hogy mik ezek az organizmusok, arra ma nem lehet választ adni. Tapasztalataink kizárólag a földi élővilággal kapcsolatban vannak, és egyáltalán nem biztos, hogy ha egy másik bolygón földi típusú élővilág alakult ki, annak az evolúció során ugyanilyen vagy hasonló rendszertani szerkezetű élővilága van. Nem lehet tehát megmondani, hogy mik azok az organizmusok, amelyek ott élnek, csak arra lehet következtetni, hogy alapvetően fotoszintetizáló rendszerek, és hogy az élővilág szerveztségének valamely alsó szintjéhez tartoznak. Ha mégis a földi élővilághoz akarjuk hasonlítani, akkor azt mondhatjuk, hogy ezek baktérium-, kékalga- vagy zuzmószerű élőlények lehetnek. A Földön a száraz és hideg sivatagokban az ún. kriptobiotikus kérget is ilyen organizmusok alkotják. A kriptobiotikus kéreg egyedei szintén a feltételezett marsfelszíni organizmusok lehetséges földi analógiái közé sorolhatók (Horváth et al., 2006; Szathmáry et al., 2007).

A DDS-MSO hipotézis ma már kezdi kinőni az egyszerű hipotézis kereteit, és egyre inkább elméletté fejlődik. Az előzőekben láttuk, hogy azokat a jelenségeket, amelyeket mint tényeket a marsi felvételekből ki lehetett olvasni a DDS-ek tulajdonságaira vonatkozóan és amelyeket az egyszerű szublimációs jelenség nem tud értelmezni, a DDS-MSO hipotézis meg tudja magyarázni (7. ábra). De a fentiekén túlmenően egyéb jelenségekre is magyarázatot tud adni.

Egy ilyen jelenség a poláris sötét dűnefoltok finomszerkezetének az értelmezése. Az egyes foltok tulajdonságainak részletes vizsgálata során a következőket lehetett megállapítani: Tél végén először egységesen szürke foltok jelennek meg a fehér hótakarón. Az idő előrehaladtával a foltok közepe táján egy sötét (a felvételeken fekete) központi mag jelenik meg, amelyet, mint említettünk, a felette lévő hó eltűnésével értelmeztünk (7. ábra bal oldali oszlopa). A finomabb vizsgálatok azonban azt mutatják, hogy az esetek egy részében az eredetileg szürke és fekete zóna határán egy világosabb színű gyűrű alakul ki. Ennek a keletkezését a DDS-MSO hipotézis segítségével a következőképpen magyarázhatjuk. A szürke zónából – miután ott folyékony víz van a hó alatt – a talaj mentén folyamatosan víz szivárog a leszáradt fekete zóna határára. Itt, mivel a hóréteg védő hatása megszűnik, a víz az alacsony légnyomás miatt a hideg ellenére igen gyorsan elpárolog. Ugyanakkor a külső térben uralkodó nagy hideg e párát mindjárt dérképződésre készíti, vagyis e két réteg határán folyamatosan új dérképződés indul meg. E frissen keletkező dér okozhatja a fekete mag és a szürke zóna közötti világosszürke gyűrű kialakulását. Felmerül az a kérdés is, hogy miért csak a sötét poláris dűnéken található ilyen foltok, és miért nincsenek a környező egyéb területeken. A DDS-MSO hipotézissel ez is értelmezhető. A NASA megfigyelései szerint a deresedés a pólusokon a sötét dűnéken kezdődik, és tavasszal legutoljára onnan tűnik el a hótakaró. Ez annyira markáns jelenség, hogy a dűnék anyagának körvonalai ezekben a periódusokban élesen kirajzolódnak a környező egyéb felszínektől, mert a dűnék már fehérek, a környezet sötét. Feltehető, hogy a marsi hósapka képződése a vízdér képződésével kezdődik, a lehűlés során először vízdér kristályosodik ki, és csak később követi a szén-dioxidhó kicsapódása.

Ezért a dűnék felszínét vízdér borítja, és bár lehetséges, hogy később a vízdér máshol is megjelenik, egyes dűnéken vastagabb, illetve tartósabb réteget képezhet, mint a környező területeken (Kuti – Kereszturi, 2009). Emiatt elsősorban itt van lehetőség tavasszal folyékony víz megjelenésére, és itt teremődnek meg a feltételek élő szervezetek működésére hosszú hónapokra –

földi hónapokban számolva mintegy hat hónapra. Ez az időtartam bőségesen elegendő arra, hogy ott élettevékenység folyjék a nap legmelegebb óráiban.



7. ábra. A DDS-MSO hipotézis megfigyelési, modell és mikrostrukturális illusztrációja (Horváth et al., 2006; Szathmáry et al., 2007).

De van még egy másik tényező is, amely beleszólhat abba, hogy csak a sötét dűnéken találhatóak ezek a tipikus foltok. A Mars talaja általában vörös a benne található vasvegyületektől, elsősorban a hematittól (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). A Viking vizsgálatának nagy meglepetése az volt, hogy a semlegesnek várt marsi atmoszféra a talaj mentén igen erősen oxidáló tulajdonságokat mutatott. Ezt arra vezetik vissza, hogy a Mars felszínén lévő igen intenzív ultraibolya sugárzás a vasoxidokkal kölcsönhatásba lépve peroxidokat és szuperoxidokat, azaz igen erősen oxidáló anyagokat hoz létre. Ezek az anyagok megtámadják és oxidálják a szerves vegyületeket, így módon szétroncsolják az élő szervezetek anyagait is. A sötét dűnék anyagának a színe nem vörös, hanem sötétkék-sötétlila. Ez annyit jelent, hogy a dűnék anyagában kevesebb vasoxid lehet. Ezért a hipotézisünkben feltételezett marsfelszíni organizmusok, az MSO-k a beszáradás után a nyári időszakban nincsenek olyan mértékben kitéve a peroxidok oxidáló hatásának, mint az egyéb területeken. Itt tehát a beszáradt organizmusok túlélési valószínűsége nagyobb a következő téli időszakig, mint az a sötét dűnéken kívüli területeken várható.

Ez átvezet bennünket a következő kérdéskörhöz. A Mars légköre nem nyújt védelmet az UV sugárzás ellen, ezért a felszínén sokkal nagyobb az ultraibolya sugárzás intenzitása, mint a Földön. Az intenzív UV sugárzás pedig a mikroorganizmusokat elpusztítja. Hogyan élnek túl az MSO-k ezt az egyébként halálos UV sugárzást? A választ két részre kell osztani: mi történik funkcionáló, működő állapotban és mi beszáradt állapotban. Funkcionáló állapotban az MSO-k jég alatt működnek. A vízjég és a víz igen erősen abszorbeálja az UV sugarakat, és egy vékony közetréteggel már teljes védelmet nyújthat a mikroorganizmusoknak az UV sugárzással szemben.

Más a helyzet nyáron, amikor az MSO-k beszáradt állapotban közvetlenül vannak kitéve az UV sugárzásnak. Egyrészt beszáradt állapotban e szervezetek sokkal ellenállóbbak a sugárzásokkal szemben, mint működő állapotban. Másrészt elvi lehetőség van arra, hogy amikor a beszáradás folyamata elindul, e mikroorganizmusok egy része vagy azok spórái, a talajszemcsék közé, a felszín alá vonuljanak, ahol teljes mértékben védve lehetnek az UV sugárzás ellen. Végül meg kell jegyezni, hogy evolúciójuk során annál hatékonyabb védelmet is fejleszthettek ki e sugarak ellen, mint amilyen példákat erre a Földön is láthatunk, elsősorban a kékalgák körében.

A DDS-MSO hipotézis felállítása idején e két jégréteg közötti, azaz a fagyott talaj és az azt borító jég/hórég közötti élet lehetősége hipotézis volt, amely az ismert fizikai és biológiai tapasztalatokból logikusan következhetett. Közben kiderült, hogy ilyen ökoszisztémák a Földön is léteznek, és ezzel ez az indulásnál csak hipotetikus mechanizmus a hipotézisből realitássá vált. Az Anktarktiszon ugyanis vannak ún. száraz völgyek, amelyekben tavak találhatóak. E tavakat vastag és állandó jégréteg fedi. Az egyik ilyen tóban a jégréteget átfúrva azt tapasztalták, hogy a 6 m-es vastagságú jég közepe táján, úgy 3 m mélységben a jégben egy porréteg húzódik, amelyet valamikor az idők folyamán a szél hordott a jég akkori felszínére. A két jégréteg között e porréteg a napsugárzás hatására felmelegszik, ott zárt vízlencsék keletkeznek, és ezekben a vízlencsékben mikroorganizmusok, algák élnek teljesen zárt ökoszisztémában, azaz a külvilággal nem érintkezve. Az ott élő mikroorganizmusok biztosítják saját életközösségeik számára a tápanyagok körforgását (Gánti et al., 2003; Horváth et al., 2006; Szathmáry et al., 2007). Ez részben hasonló életfeltételeket jelent, mint amilyeneket a Marson a DDS-MSO hipotézis feltételezett.

Mint láttuk, sok konkrét tény támasztja alá a fenti feltételezések helyességét. Mindez azonban még nem jelenti azt, hogy a DDS-MSO hipotézis bizonyított lenne. Hogyan lehet e hipotézist bizonyítani? A végleges bizonyítékot természetesen csak e poláris sötét dűnefoltok közvetlen helyszíni űreszközös vizsgálata adhatja meg, illetve a kérdésre akkor remélhetünk végső választ, amikor e foltokból mintákat hozunk földi laboratóriumokba, vagy amikor emberi marsexpedíciók a helyszínen végeznek erre vonatkozó célzott vizsgálatokat. Utóbbiakra azonban még több évtizedet kell várni.

### Irodalom:

A marsi poláris sötét dűnével, lefolyásaikkal és a DDS-MSO hipotézissel kapcsolatos legfontosabb (magyar és nemzetközi) MAG-os irodalom.

Gánti, T., Horváth, A., Bérczi, Sz., Gesztesi, A., Szathmáry, E. (2003): Dark dune spots: possible biomarkers on Mars? *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 33, 515–557

Horvath, A., Ganti, T., Gesztesi, A., Bérczi, Sz., Szathmary, E. (2001): Probable evidences of recent biological activity on Mars: appearance and growing of dark dune spots in the south polar region [absztrakt 1543]. 32<sup>nd</sup> Lunar Planetary Science Conference, Lunar and Planetary Institute, Houston, USA.

Horváth, A., Gánti, T., Gesztesi, A., Bérczi, Sz., Szathmáry, E. (2003): Vozmozsnoe dokozatelsztvo nineshnej zsziznyi na Marsze (Egy lehetséges bizonyíték a mai marsi életről). Az „Intercosmos-30”, nemzetközi tudományos konferencia anyaga, 2001. ápr. 9-10, Moszkva, előadás; (Az Orosz Tudományos Akadémia IK-30 konferenciájának kiadványa), 106–112. o., Moszkva (orosz és angol nyelven)

Horváth, A., Gánti, T., Bérczi, Sz., Pócs, T., Kereszturi, Á., Sik, A. (2006): Marsi sötét dűnefoltok: az élet lehetősége a Marson? *Magyar Tudomány*, 2006/11, 1357–1375

Horváth, A., Kereszturi, A., Bérczi, Sz., Sik, A., Pócs, T., Gánti, T., Szathmáry, E. (2009): Analysis of Dark Albedo Features on a Southern Polar Dune Field of Mars, *Astrobiology* 9(1), 90–103

Kereszturi, Á. (2006): Fejezetek a Mars fejlődéstörténetéből, *Magyar Tudomány*, 2006/8, 946–954

Kereszturi, A., Möhlmann, D., Berczi, Sz., Ganti, T., Kuti, A., Sik, A., and Horvath, A. (2009): Recent rheologic processes on dark polar dunes of Mars: Driven by interfacial water? *Icarus*, 201, 492–503

- Kereszturi, A., Möhlmann, D., Berczi, Sz., Ganti, T., Horvath, A., Kuti, A., Sik, A., Szathmáry, E. (2010a): Indication of brine related local seepage phenomena on the northern hemisphere of Mars, *Icarus*, 207, 149–164, doi:10.1016/j.icarus.2002.10.012.
- Kereszturi, A., Möhlmann, D., Berczi, Sz., Ganti, T., Horvath, A., Kuti, A., Pócs, T., Sik, A., Szathmáry, E. (2010b): Seepages and the astrobiology potential of polar dunes on, in: *Mars, Astrobiology: Physical Origin, Biological Evolution and Spatial Distribution*, Nova Science Publisher, accepted
- Kuti, A., Kereszturi, Á. (2009): Stabil fagyfoltok a Mars sarkvidékén, *Földtani Közlöny*, 2009/4, 139, 395–402
- Möhlmann, D. (2008): The influence of van der Waals forces on the state of water in the shallow subsurface of Mars. *Icarus*, 195, 131–139
- Möhlmann, D. (2009): Are nanometric films of liquid undercooled interfacial water bio-relevant? *Cryobiology*, 58, 256–261
- Szathmáry, E., Bérczi, Sz., Horváth, A. (2001): Possible biological aspect of DDSs on Mars, Exclusive Symposium “Potential biomarkers on Mars”, 4. Oct. 2001, ESTEC, Noordwijk, Hollandia, előadás.
- Szathmáry, E., Gánti, T., Pócs, T., Horváth, A., Kereszturi, A., Bérczi, Sz., Sik, A. (2007): Life in the dark dune spots of Mars: a testable hypothesis, in: *Planetary Systems and the Origin of Life*, eds. Ralph Pudritz, Paul Higgs, Jonathan Stone, Cambridge Astrobiology, Cambridge University Press, Cambridge: 241–262. o.

## Az űrcsillagászat európai útiterve

Balázs Lajos

MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete

### Mi az ASTRONET ?

Az ASTRONET-et európai kutatási ügynökségek hozták létre abból a célból, hogy az európai csillagászat fejlesztésére jól megalapozott, hosszú távú útitervet készítsenek. Az volt a cél, hogy megőrizték és továbbfejlesszék az európai csillagászatnak azt a vezető szerepét, amelyet a 21. század elejére elért.

2006. szeptember 1-jével kezdve az Európai Bizottság 2,5 M€ összeggel indította útjára az ASTRONET-et, míg a teljes összeg a 4 év futamidőre 3,6 M€-t tett ki. Az ASTRONET egy ún. ERA-Net, amelyet az Európai Bizottság 6. keretprogramja (FP6) támogatott Az Európai Kutatási Térség (ERA) integrálása és erősítése témában.

Az ASTRONET négy szakértői bizottságot kért fel, és ezeknek a munkája során jött létre a *Science Vision* dokumentum. A munkának az volt a célja, hogy

- áttekintse az európai csillagászat erőforrásait, valamint a már meglévő tudományos stratégiákat;
- az európai csillagászat számára tudományos jövőképet (*Science Vision*) hozzon létre, beleágazva azt a világ egészének a kontextusába.

*Az A) szakértői bizottság (Panel A) által vizsgált kérdéskör: Értjük-e az Univerzumban található szélsőséges állapotokat?*

Napjainkban az asztrofizika azoknak a területeknek az egyike, ahol a fizika frontvonalai húzódnak. Ezt a területet nem lehet egyszerűen „alap” és „alkalmazott” területre bontani, minthogy bármely alapvető kutatási cél elérése teljesen gyakorlati problémák megoldását is igényli. Az asztrofizika nagyléptékű és egészen általános kérdésekkel is foglalkozik, mint például az Univerzum és a benne található struktúrák létrejöttével. Ezen a területen érte el az asztrofizika egyik legnagyobb eredményét, nevezetesen a nem zéró vákuumenergia létének a felfedezését.

A munkacsoport által vizsgált legfontosabb kérdések:

- Mi volt az Univerzum kezdeti állapota?
- Mi a sötét energia és sötét anyag?
- Megfigyelhető-e az erős gravitáció „működés” közben?
- Hogyan működnek a szupernóvák és gammakitörések?
- Hogyan halmozódik fel az anyag a fekete lyukak körül, és utána hogyan lökődik ki nyaláb formájában a környező térbe?
- Mit tanulhatunk a nagyenergiájú sugárzás és részecskék megfigyeléséből?

*A B) szakértői bizottság (Panel B) által vizsgált kérdéskör: Hogyan alakulnak ki és fejlődnek a galaxisok?*

Nagyon keveset tudunk a sötét anyag és energia természetéről, és persze sokkal otthonosabban mozgunk a „hagyományos” anyag területén, amely protonokból, neutronokból, elektronokból stb. áll. Mégis, igen sok tennivaló van még, hogy teljesen feltérképezzük ennek a barionos komponensnek a fejlődését. Azt a térfogatot, amelyet a csillagászati megfigyelések elérnek, a  $z=1000$  vöröseltolódásnak megfelelő felület határolja. Ezen túl a Világegyetem nem átlátszó.

Úgy tűnik, hogy  $z=7$  vöröseltolódásnál a Világegyetem újra teljesen ionizált, miközben csillagok, galaxisok és kvazárok kezdenek kialakulni, amelyek színekében már az előző generációk csillagai által létrehozott fémek vonalai is látszanak. Igen nagy kihívás megérteni, hogyan alakultak ki ilyen gyorsan a csillagok, épültek fel a bórnál nehezebb elemek, galaxisok és szupernagy tömegű

fekete lyukak, valamint azt, hogy mi történt ezután a galaxisok jelenleg is megfigyelhető Hubble-osztályainak a létrejöttéig.

A munkacsoport által vizsgált legfontosabb kérdések:

- Hogyan tudunk visszapillantani a „sötét korszakba” és feltérképezni az anyag egészen kismértékű sűrűsödéseit  $z=1000$  körül, amelyekből az első csillagok, illetve galaxisok kifejlődtek?
- Melyek a Világegyetem újbóli ionizációjának legfontosabb forrásai: csillagok fénye, fekete lyukak által működtetett aktív galaxismagok, vagy éppenséggel a szuperszimmetria tulajdonságát mutató, elbomlott részecskék? Milyen hosszú ideig tartott ez a folyamat?
- Hogyan fejlődött ki a galaxisok kozmikus hálójá, valamint az intergalaktikus gáz?
- Hogyan történt a Világegyetem galaxisaiban, illetve a közöttük levő térben a fémek kialakulása és szétszóródása?
- Hogyan jöttek létre a galaxisok jelenleg megfigyelhető Hubble-osztályai, ahogyan azt ma látjuk tömegük, gáz-, csillag-, valamint fémtartalmuk eloszlásában?
- Hogyan alakult ki és fejlődött a mi Galaxisunk, és milyen általános tanulságokat vonhatunk le abból a galaxisok kialakulására és fejlődésére vonatkozóan?

*A C) szakértői bizottság (Panel C) által vizsgált kérdéskör: Hogyan keletkeztek és fejlődnek a csillagok és bolygók?*

A csillagok életútjának a vizsgálata az asztrofizika alapvető, a következő évtizedekben is egyik legaktívabban kutatott területe. Az anyag körforgása a csillagközi anyagból a csillagokba, majd vissza az az alapvető gépezet, amely a Világegyetem élete során a barionok fejlődését hozza létre. A bolygórendszerek, köztük a miénk is, a csillagok fejlődésének korai szakaszában jönnek létre, és az újonnan keletkezett csillagok körül levő sűrű intersztelláris anyag bonyolult kémiai fejlődése szükséges ahhoz, hogy létrejöhessenek azok az óriásmolekulák, amelyek az élet építőköveiként szolgálnak. Ennélfogva a csillagok életútjának a megértése alapvetően fontos ahhoz, hogy választ találjunk a mi Naprendszerünk és a földi élet, illetve más lakható bolygók és a Világegyetem más helyein levő élet keletkezésére.

A munkacsoport által vizsgált legfontosabb kérdések:

- Hogyan születtek a csillagok?
- Értjük-e a csillagok szerkezetét és fejlődését?
- Mi a csillagközi anyag és a csillagok „életútja”?
- Hogyan keletkeznek és fejlődnek a bolygórendszerek?
- Mennyire sokfélék Galaxisunkban a bolygórendszerek?
- Vannak-e az életre utaló jelek idegen bolygókon?

*A D) szakértői bizottság (Panel D) által vizsgált kérdéskör: Hogyan kapcsolódunk mindehhez?*

A Naprendszer igen előnyös hely a Világegyetem vizsgálatára. A Nap, a helioszféra és a Naprendszerben levő égitestek, bolygók, holdak, kisbolygók és üstökösök igen fontos szerepet játszanak a csillagok fizikájának, a bolygórendszerek kialakulásának, valamint az alapvető asztrofizikai folyamatoknak a megértésében. Központi csillagunkat és bolygórendszerét példátlan részletességgel tudjuk tanulmányozni, de sajnos csak egy pillanatfelvétel áll rendelkezésünkre, minthogy a Nap élete milliárd éveket ölel fel. Abból a célból, hogy megértsük Naprendszerünk múltját és jövőjét, össze kell hasonlítanunk azt más csillagokkal és bolygórendszerekkel.

A munkacsoport által vizsgált legfontosabb kérdések:

- Mire tanít bennünket a Nap az asztrofizikai folyamatokról?
- Mi hajtja a Nap legkülönbözőbb skálákon megnyilvánuló változásait?
- Milyen hatással van a naptevékenység a földi életre?
- Mi a Naprendszer dinamikus története?
- Mit tanulhatunk a Naprendszer vizsgálatából?
- Hol keressük az életet a Naprendszerben?

### Az infrastrukturális útiterv

Az útitervnek az volt az alapvető célja, hogy az európai csillagászatnak 20 év távlatában átfogó és megbízható tervet adjon a hatékony infrastruktúra kialakítására. A terv a *Science Vision* dokumentumban megfogalmazott tudományos célokat vette alapul. A terv, a *the Roadmap* elkészítésekor a *Scientific Vision*-ből indult ki azzal a céllal, hogy kielégítse az európai csillagászat infrastrukturális igényeit az elkövetkezendő 10-20 évben. Az útiterv kimunkálása komolyan 2006 szeptemberében kezdődött, nagyjából akkor, amikor a *Science Vision* már félig készen volt.

Az útiterv megalkotására öt szakértői bizottságot kértek fel, amelyeknek egyenként 7–12 tagja volt. A bizottságok tagjait úgy válogatták össze, hogy rendelkezzenek a szükséges szaktudással, ugyanakkor megfelelő egyensúly legyen az egyes országok, illetve a nemek között.

Az öt bizottság az alábbi tudományos témák infrastrukturális igényét vizsgálta:

- Nagyenergiájú asztrofizika; asztro-részecskefizika, valamint gravitációs hullámok;
- Ultraibolya, optikai, infravörös és rádiócsillagászat;
- Napteleszkópok, a Naprendszerbe küldendő űrszondák, illetve laboratóriumi vizsgálatok;
- Elméleti munkák, számítástechnikai létesítmények és hálózatok, virtuális obszervatórium;
- Képzés, új szakemberek toborzása és betanítása, valamint kapcsolat a környező társadalommal.

A továbbiakban az útitervnek csak az űreszközökön alapuló infrastruktúra fejlesztésével kapcsolatos részével foglalkozunk.

### Nagyenergiájú asztrofizika

A nagyenergiájú asztrofizika igen nagy ütemben fedez fel új dolgokat, köszönhetően az igen sikeres űrkísérleteknek, illetve földi bázisú eszközöknek, amelyek lehetővé tették, hogy a kutatók tanulmányozhassák a Világegyetemben végbemenő legnagyobb energiájú folyamatokat is. A nagyenergiájú űrasztrofizikában Európa részvétele a közeljövőben is folytatódni fog.

#### *Jelenleg is működő űreszközök*

*XMM-Newton:* Az XMM-Newton obszervatórium az Európai Űrügynökség (ESA) *Horizon 2000* programjának egyik sarokköve, különös tekintettel a nagy érzékenyséű asztrofizikai röntgenspektroszkópiára, illetve képalkotásra. 1999 decemberében történt felbocsátása óta az XMM-Newton, a NASA *Chandra* obszervatóriumával együtt alapvető, nemzetközi eszköze a jelenleg ismert legkülönösebb asztrofizikai források vizsgálatának. Ezek közé tartoznak a nagy tömegű fekete lyukak a galaxisok központjában, forró gáz, amely kitölti a halmazokban levő galaxisok közötti teret, forró koronával burkolt aktív csillagok, bolygók körüli forró plazma, kettős rendszerekben levő neutroncsillagok, illetve fekete lyukak, valamint a szupernóva-robbanások után visszamaradt, lökéshullám fűtötte gázfelhő.

*INTEGRAL:* Hat év üzemidő után az INTEGRAL jelenleg a nemzetközi nagyenergiájú asztrofizikával foglalkozó kutatóközösség igen hatékony eszköze, amelynek segítségével több száz forrás nagyenergiájú sugárzását figyelték meg mind a Galaxisban, mind a távoli Világegyetemben. Jóllehet a pályára kerülés utáni első néhány évben többnyire galaktikus forrásokat figyeltek meg, az extragalaktikus források aránya egyre nő, és ennek eredményeképpen több távoli, aktív magú galaxist (AGN) fedeztek fel, egészen  $z=3,7$  vöröseltolódásig. Az INTEGRAL rendkívül eredményes űrteleszkóp a nagy kihívást jelentő keményröntgen- és gammatartományban.

#### *Űrbázisú, rövid távú kísérletek (–2015)*

*Simbol-X:* a Simbol-X a keményröntgen-tartományban dolgozó képalkotó mesterséges hold, Franciaország és Olaszország vezetésével, illetve Németország részvételével, és 2014-ben tervezik a felbocsátását. A működés tervezett időtartama rövid, és a közepes méretű űreszköz az első lesz a kötelékrepülés megvalósításában. A nagy (20 m-es) fókusztávolság, amelyet a tükör és az észlelő berendezés külön űrszondára telepítése valósít meg, egyedülálló lehetőséget ad a nagyenergiájú asztrofizikának arra, hogy képalkotó távcsöve legyen a keményröntgen-tartományban (10–80 keV).

*Űrbázisú, középtávú kísérletek (2016–2020)*

*X-ray Evolving Universe Spectroscopy (XEUS) / International X-ray Observatory (IXO)*: a XEUS a három nagy űrkísérelt egyike, amelyet az ESA választott ki a Cosmic Vision program keretében, további részletesebb tanulmányozásra. Az űrtávcső az ESA új generációs röntgenobszervatóriuma, és a nagyenergiájú asztrofizika számára teljesen egyenértékű az elektromágneses színek más tartományait vizsgáló tervezett obszervatóriumokkal (SKA, ALMA, JWST, E-ELT, CTA). 2008 májusában az ESA, a NASA, valamint a japán JAXA egyeztető bizottságot hozott létre azzal a céllal, hogy vizsgálja meg egy együttes űrkísérelt lehetőségét, amely egyesíti a jelenleg fejlesztés alatt álló XEUS-t és Constellation-X-et, kifejlesztve belőlük az International X-ray Observatory-t. A jelenlegi kutatási élvonalnak megfelelő tudományos célokból egy listát állítottak össze, és megfogalmazták a hozzá tartozó mérési igényeket. A kezdeti elképzelések szerint az IXO olyan űrtávcső lesz, amely egy röntgentartományban működő nagy tükörből, 20–25 m fókuszu, bővíthető optikai padból áll majd, aminek változtatni lehet a fókuszsíkját.

*Laser Interferometer Space Antenna (LISA)*: A LISA űrbe telepítendő, gravitációs hullámokat észlelni képes csillagászati obszervatórium, és a 0,1 mHz–0,1 Hz alacsony frekvenciájú tartomány mérését teszi lehetővé, amely nem érhető el földi bázisú eszközökkel. Ebben a tartományban egy sor asztrofizikai forrás található a Tejútrendszerben, mégpedig a kompakt csillagokból (fehér törpék, neutroncsillagok, fekete lyukak) álló objektumok. Ezek közül a legismertebbek „garantáltan” megfigyelhetők, és nagy jel/zaj arányú kalibrációs forrásként szolgálnak. A LISA segítségével elkészíthető a Galaxisban levő kompakt kettős rendszerek legteljesebb leltára, megfigyelve több ezer ilyen objektumot, beleértve olyanokat is, amelyek optikailag nem láthatók. A LISA néhány tíz, esetleg száz feketelyuk-kettőst is felfedezhet, amelynek a tömege  $10^4$ , vagy akár  $10^7$  naptömeg is lehet, és nagy jel/zaj aránnyal egészen  $z=30$  vöröseltolódásig is észlelhető.

**Ultraibolya, optikai és infravörös csillagászat**

A fenti hullámhossztartomány igen nagy jelentőségű a *Science Vision* dokumentumban megfogalmazott számos kérdés megválaszolására, a kozmológiától kezdve a Naprendszerig bezárólag. Az optikai/közeli-infravörös, illetve a rádiótartomány a földi megfigyelő állomásokról is észlelhető. Az optikai/közeli-infravörös tartományban Európa vezető szerephez jutott a világban a négy igen nagy távcsővel (VLT), illetve a belőlük létrehozható optikai interferométerrel. A (szub)milliméteres tartományban Európa világszínvonalú földi bázisú távcsöveket hozott létre és működtet nagy tengersizint feletti magasságban telepített obszervatóriumokban.

Az ESA *Horizon 2000* és a *2000 Plus* programjának köszönhetően Európának vezető szerepe van az űrtudományokban, de nem minden hullámhossztartományban. Az ultraibolyában csak igen kis hozzáféréssel rendelkezik a Hubble-űrtávcsőben történő ESA-részvételnek köszönhetően, de nincs olyan európai részvétellel futó űrkísérelt, amely lehetővé tenné a távoli-UV, illetve az extrém-UV tartomány vizsgálatát.

Az asztrometriában a *Hipparcos* űrtávcsőnek köszönhetően Európa vezető szerepre tett szert, amelyet 2012-ben a sokkal nagyobb teljesítményű *Gaia* követ majd.

*Jelenleg is működő űreszközök*

Az európai csillagászok 2009-ben helyezték üzembe az ESA távoli-infravörösben működő *Planck* és *Herschel* távcsöveit, amelyek az ESA igen sikeres Infravörös Űrobszervatóriumát (ISO) követték.

*Űrbázisú, rövid távú kísérletek (–2015)*

*Gaia*-adatok elemzése és feldolgozása. A *Gaia* nemcsak abból a szempontból egyedülálló, hogy nagyságrendekkel javítja a jelenleg elért asztrometriai pontosságot, hanem az űrkísérelt szerkezetét tekintve is. A kutatóközösség sokkal inkább a *Gaia* űrkísérlethez szükséges szoftver fejlesztésében, illetve adatelemzésben vesz részt, nem a hardverfejlesztésben, mint a korábbi ESA projektekben.

A *Gaia* a mérési folyamat során 6-dimenziós térképet készít majd Galaxisunkról, a Tejútrendszerrel, feltárva annak szerkezetét, összetételét és fejlődéstörténetét. Az űrkísérelt eddig



nem látott pontosságú pozíciós és radiálissebesség-méréseket végez, amelyek szükségesek ahhoz, hogy sztereoszkopikus és kinematikai leltárt készítsünk Galaxisunk, illetve a Lokális csoport mintegy 1 milliárd csillagáról.

#### *Űrbázisú, középtávú kísérletek (2016-20)*

*EUCLID (korábban DUNE, illetve SPACE):* A sötét energiával kapcsolatos kutatások kétségkívül a korszerű asztrofizika legnagyobb kihívását jelentik. A sötét energia természetének és időbeli fejlődésének a megértése több megfigyelési mód együttes alkalmazását igényli, az elméleti és numerikus szimulációs munkákba fektetett jelentős erőfeszítésekkel együtt. A szakértői bizottság az ESA *Cosmic Vision Announcement of Opportunity* felhívására beérkezett középtávú javaslatok közül a *Dark UNiverse Explorer-t (DUNE)*, illetve *SPectroscopic All-sky Cosmic Explorer-t (SPACE)* igen nagyra értékelte. A két űrkísérlet a sötét energia és sötét anyag természetére vonatkozóan két egyedülálló pontosságú, de különböző úton történő megközelítést jelent, és az ESA úgy döntött, hogy EUCLID néven egy kísérletbe egyesíti őket.

*Planetary Transits and Oscillations of Stars (PLATO):* A PLATO a *CoRoT* és *Kepler* űrtávcsöveket követi majd, és a tervek szerint >100000 viszonylag fényes csillagon ( $V \leq 12$  magnitúdó) nagy pontosságú fotometriát végez majd a vizuális tartományban, valamint további 400000 objektumot mér meg  $V=14$  magnitúdóig. Igen szigorú feltételeknek kell eleget tennie: a látómező nagyobb, mint 300 négyzetfok, a működési idő legalább három, de inkább öt év legyen, a fotometriai zaj  $8 \times 10^{-5}$  (a cél  $2,5 \times 10^{-5}$ ) legyen egy órai mérés alatt egy  $V = 11-12$  magnitúdós csillagon. A kapott adatok lehetővé teszik Föld méretű, vagy ennél kisebb bolygók detektálását is jelentős számú fényes csillagon észlelt fedés segítségével, ugyanakkor az anyacsillagról is részletes információ gyűlik össze az asztroszeizmológiai méréseknek köszönhetően.

*Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics (SPICA):* A SPICA alapvetően japán űrkísérlet, amelyhez Európa jelentősen hozzájárulhat. Ez egy űrbe telepített közepes, illetve távoli-infravörös obszervatórium, amelynek 3,5 m-es tükrét 5 K hőmérsékletre hűtik. Ez jelentősen növeli az érzékenységet a 30–210  $\mu\text{m}$  tartományban (ahol a hideg por és gáz energiájának a java részét kisugározza), a jelenleg üzemelő holdakkal (*Herschel*, *Spitzer*) összehasonlítva. A SPICA alapvető működési hullámhossza az 5–210  $\mu\text{m}$  tartomány, ahol nagy látómezőben folyamatos képalkotás és spektroszkópia lehetséges. Egy koronográf lehetővé teszi többek között Jupiter-szerű exobolygók és protoplanetáris korongok észlelését is.

#### *Űrbázisú hosszú távú kísérletek (2020+)*

*Darwin és a Távoli Infravörös Interferométer (FIRI):* A Darwin célja elsősorban Földünkhöz hasonló exobolygók tanulmányozása, illetve a rajtuk levő esetleges élet vizsgálata. A FIRI a csillagkeletkezést és a fekete lyukakba történő akkréció vizsgálatát, illetve a Tejútrendszerhez hasonló galaxisok kialakulását és fejlődését. Valószínűleg a FIRI leginkább a bolygórendszerek kialakulásának állomásait vizsgálja majd, és Földhöz hasonló bolygókat fedez fel, amelyek életnek adnak otthont, annak a képességének köszönhetően, hogy a bolygórendszerekben levő por-struktúrák megfigyelésére alkalmas képalkotó rendszerrel szerelik fel.

#### **Űrkísérletek a Naprendszerben**

Európa igen jelentős eszközökkel rendelkezik a Nap megfigyelésére. A világszínvonalú napteleszkópok közül négy európai tulajdonban van: a svéd 1 m-es napteleszkóp, a francia–olasz Themis, a német vákuum-toronyteleszkóp (VTT), valamint a holland Open Telescope (DOT), amelyek mindegyike a Kanári-szigeteken található. Ami az űrbázisú napészlelő műszereket illeti, az ESA Horizon 2000 programjának első sarokköve magában foglalta az 1995-ben felbocsátott *Solar and Helispheric Observatory-t (SOHO)*. A nagy sikerű SOHO mind a mai napig kiváló tudományos eredményekkel szolgál. Az *Ulysses* a napszelet tanulmányozta minden irányból, és nemrég fejezte be

a működését. A NASA vezetésével futó *STEREO* és a japán vezetésű *Hinode* 2006-ban indult jelentős európai részvétellel.

#### *Jelenleg is működő űreszközök*

*Cluster*: A Cluster űrkísérlet a magnetoszféra nagyfelbontású, háromdimenziós vizsgálatát tűzte ki célul. Ennek elérésére a Cluster négy azonos mesterséges holdból áll, amelyek tetraéder alakban elhelyezkedve repülnek. Az alapvető tudományos céloknak megfelelően a mesterséges holdak közötti távolság 20–10000 km között változik.

*STEREO*: A STEREO a NASA vezetésével futó űrkísérlet, amely két holdból áll, amelyek a Földéhez hasonló pályán keringenek a Nap körül, az egyik bolygónk előtt, a másik mögötte, és a távolság közöttük az idővel lassan nő. Az a cél, hogy sztereoszkopikus képeket kapjanak a Nap külső atmoszférájáról, illetve koronakitörésekről (CME), továbbá, hogy nyomon kövessék azokat a koronakitöréseket, amelyek a Földet is eléri. A műszerek 50%-át Európa szállította.

*Hinode*: A Hinode japán vezetéssel készült Nap-űrobszervatórium, 50 cm-es optikai teleszkóppal, extrém UV-tartományban működő képalkotó spektrométerrel, valamint röntgenteleszkóppal a fedélzetén. A Hinode-t 2006 szeptemberében indították útjára. Európa a kísérletet 2011-ig támogatja anyagilag. Igen magas prioritású az űrkísérlet futamidejének a meghosszabbítása újabb öt évvel azért, hogy egy teljes napciklust le lehessen fedni.

#### *Űrbázisú, rövid távú kísérletek (–2015)*

*Solar Orbiter*: A Solar Orbiter mesterséges bolygó megközelíti a Napot, és 30° heliografikus szélességet elérve lehetővé teszi a Nap poláris területeinek a vizsgálatát. A fő tudományos cél a Naphoz közeli helioszférában levő plazmák, mezők és részecskék tulajdonságainak a meghatározása, a napfelszín, a korona és a belső helioszféra kapcsolatának tanulmányozása, a Nap mágneses atmoszférájában az energetika, dinamika, valamint finomszerkezet vizsgálata, továbbá a Nap magas szélességű területeinek, áramlásainak és szeizmikus hullámainak megfigyelésével a mágneses tér keletkezésének a megértése.

*ExoMars*: Az ExoMars az ESA első űrkísérlete az *Aurora* program keretében. A végső cél az, hogy megállapítsák, volt-e, illetve létezik-e jelenleg élet a Marson. A Marsot robotok segítségével kívánják vizsgálni, beleértve egy exobiológiai kutatásokat végző járművet (Pateur egység) és geofizikai, illetve környezetkutatásra szolgáló műszeregyüttest (GEP), amely a leszálló egységen foglal helyet, és meteorológiai, illetve talajszerkezeti *in situ* méréseket végez majd. A marsjáró több kilométert tesz majd meg, és keresi az egykori, illetve jelenlegi élet nyomait olyan módon, hogy mintát vesz az útközben található sziklákból, illetve a felszín alól, egészen 2 m mélységig.

#### *Űrbázisú, középtávú kísérletek (2016–2020)*

*Cross-Scale*: A Cross-Scale az asztrofizikai plazmák fizikájának alapvető jellegzetességeit vizsgálja, jelesül, a különféle skálákon együttesen ható plazmafolyamatok közötti kölcsönhatást. A Cross-Scale tovább növeli Európa vezető szerepét az űrplazmák vizsgálatában, amelyet a Cluster holdak alapoztak meg. A 12 mesterséges holdból álló alakzat lehetővé teszi olyan alapvető plazmafolyamatok vizsgálatát, amelyekre nem volt lehetőség az eddigi, illetve tervezett űrkísérletekben. Ennek köszönhetően a Cross-Scale jelentős érdeklődést keltett Japánban és az Egyesült Államokban is. Nem fér hozzá kétség, hogy Európának a Cross-Scale létrehozásában megnyilvánuló vezető szerepe jelentős technikai és anyagi forrásokat mozgósít majd Európán kívül is.

*Marco Polo*: a Marco Polo egy közös európai–japán űrkísérlet, amely a tervek szerint anyagmintát hoz vissza egy földközeli kisbolygóról (NEO). A célpont egy primitív NEO, amelynek összetétele nem hasonlít az ismert meteoritikus mintákhoz. A Marco Polo ennél fogva hozzájárul, hogy jobban megértsük a Naprendszer létrejöttét és fejlődését. A jelenlegi exobiológiai elképzelések lehetségesnek tartják, hogy a szerves anyag kívülről érkezett a Földre, esetleg egy primitív NEO

segítségével. Sőt, a NEO-k Földdel történő ütközése ténylegesen kockázatot jelent az élet számára. Mindezen okok miatt ilyen égitestek vizsgálata rendkívül érdekes és sürgős.

*Titan and Enceladus Mission (TandEM):* A TandEM ambiciózus projekt, amely a Szaturnusz Titan és Enceladus holdjának *in situ* vizsgálatát tűzte ki célul. A TandEM-et a Cassini–Huygens űrkísérelt folytatásának szánják. A Cassini–Huygens jelenleg is működik a Szaturnusz térségében, és új felfedezések köszönhetőek neki, de új kérdések is vetődtek fel. Az eredeti elképzelés szerint a TandEM két közepes méretű mesterséges holdból áll, amelyeket egy vagy esetleg két rakéta állít a pályára, és magukkal visznek egy keringő egységet, *in situ* méréseket végző műszereket és egy egységet az Enceladuson történő leszállásra. A hasznos teher egy sor megfigyelőeszközt tartalmaz majd, beleértve kamerákat, spektrométereket, magnetométereket, radart, rádióeszközöket, szeizmométereket és néhány új elven működő műszert, amelyek alkalmasak az összes színtéptartomány tanulmányozására. A Huygens űrkísérlethez hasonlóan most is tervezik az űrhajó nyomon követését a VLBI segítségével.

*LAPLACE:* A LAPLACE ambiciózus, több platformot tartalmazó űrkísérelt, amely a Jupiterből és négy Galilei-holdjából álló rendszert vizsgálja majd. A LAPLACE űrkísérelt három keringő egységet helyez pályára a Jupiter-rendszerben abból a célból, hogy koordinált méréseket végezzen a Jupiter holdjain és légkörén, valamint magnetoszféráján. Az egyik űrszondát az Europa körül olyan poláris pályára állítják, ahol a keringési idő legalább néhány hónap lesz; vizsgálják még annak a lehetőségét is, hogy a hasznos teher tartalmazzon-e egy, az Europa holdra ejtendő kisebb tárgyat is. A második űrhajót olyan pályára állítják, hogy a keringési idő megegyezzen az Europa-éval, és átjátszó állomásként szolgáljon majd az adatok tárolásához és továbbításához. A harmadik, tengelye körül forgó szonda a Jupiter magnetoszféráját vizsgálja majd. A hasznos teher nagyszámú távérzékelő műszert (kamerákat, spektrométereket a gamma- és röntgenhullámhossztól egészen a rádiótartományig, illetve magasságmérő radart és lézert, magnetométert, mikro-gradiométert, poranalizátort, tömegspektrométert, valamint rádió- és plazmahullámok mérésére alkalmas műszereket) is tartalmaz. Tervezik az űrszonda VLBI-vel történő nyomon követését.

#### *Űrbázisú hosszú távú kísérletek (2020+)*

*Probing Heliospheric Origins with an Inner Boundary Observing Spacecraft (PHOIBOS):* A PHOIBOS olyan kutatásra és új felfedezésekre készülő űrkísérelt, amely a tervek szerint a helioszféra eddig még nem tanulmányozott, 0,3 csillagászati egységen belüli, a Nap felszínétől három napsugárig terjedő területén végez majd részletes vizsgálatokat. A PHOIBOS fő tudományos célja annak a vizsgálata lesz, hogy a Nap mágneses tere, illetve a plazma dinamikai sajátosságai hogyan hozzák létre a napkoronát, a napszelet, valamint a helioszférát. Ennek a célnak az elérése az egész asztrofizika számára a Rozetta-kőhöz hasonló felfedezés lenne, amely lehetővé tenné, hogy megértsük nemcsak a Nap által létrehozott plazmakörnyezetet, hanem a Világegyetemben bárhol található űrplazmakörnyezetet, ahol forró, híg mágneses plazma továbbít energiát, és gyorsít részecskéket a legkülönbözőbb skálákon. Továbbá, minthogy az egyedüli közvetlen *in situ* mérés abban a tartományban, ahol a Nap legpusztítóbb, nagyenergiájú részecskéinek egy része felgyorsul, a PHOIBOS egyedülállóan és alapvetően hozzájárul ahhoz, hogy jellemezni, illetve előre jelezni tudjuk azt a sugárzási környezetet, amelyben a jövőbeli űrkísérletek dolgoznak, illetve léteznek majd.

#### **Záró megjegyzések**

Az ASTRONET Infrastrukturális Útiterv megalkotása úttörő, nagy kihívást jelentő és összetett feladat, amely Európa legfelkészültebb tudósainak, oktatóinak és tudományos ügyintézőinek elkötelezettségét és szakmai felkészültségét igényelte.

A tervek ambiciózusak, megvalósításukhoz időnként a pénzügyi támogatást adó szervezetek részéről határozott döntések kellene az egyébként létező berendezések további üzemeltetéséről is. Továbbá, nincs kétség afelől, hogy az elkövetkező két évtizedben céljaink elérésére, elképzeléseink

megvalósítására és ezen keresztül vezető szerepünk megőrzésére, illetve növelésére, további jelentős anyagi források bevonása szükséges, és a munka a társadalom egészére is hatással van.

Ennélfogva talán az egyik legfontosabb az, hogy az ASTRONET újult erővel folytassa munkáját, együttműködve az anyagi támogatást adó ügynökségekkel, illetve más szervezetekkel, hogy biztosítva legyen az *Útiterv* javaslatainak a megvalósulása, és segítséget nyújtson a jövőben a szükséges döntések meghozatalához és az Európán belüli együttműködéshez, valamint koordinációhoz.

Ezen túlmenően, az ASTRONET felhasználhatja az *Útitervet*, hogy kormányzati szinten is hangsúlyozza a csillagászat jelentőségét és társadalmi hatását, illetve nem utolsósorban példát mutat az együttműködésre Európán belül és azon túl. Ténylegesen, a legtöbb nagy projekt nemzetközi együttműködést igényel Európán túl is, és az ASTRONET ebben a globális együttműködésben is segítséget nyújthat.

(A *The ASTRONET Infrastructure Roadmap* a <http://www.astronet-eu.org/IMG/pdf/Astronet-Book.pdf> címen tölthető le.)