

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 illesztettek 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 mintafénygömben. 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 fénygömbét 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.

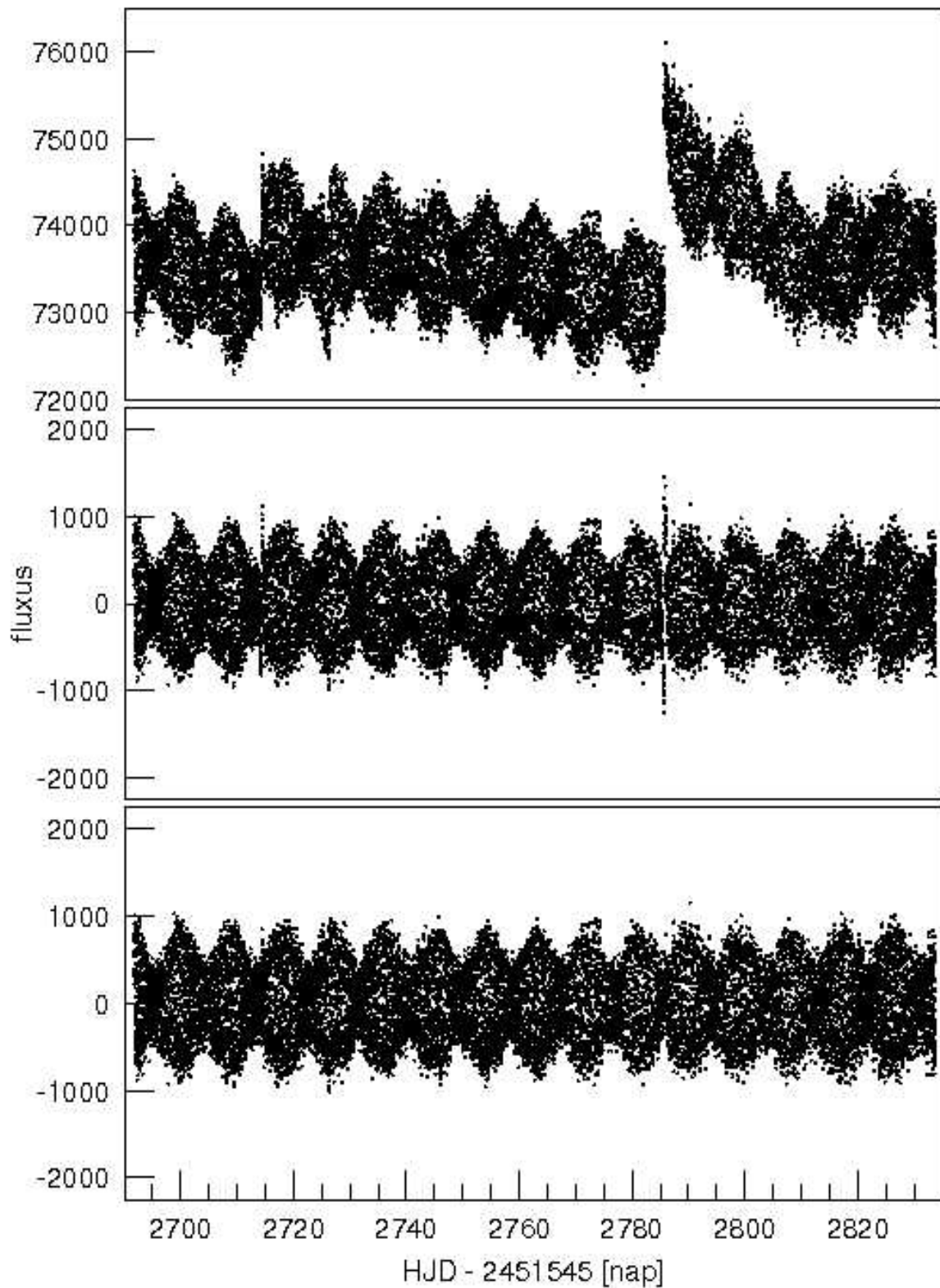
Mindebből azt a következtetést vonhatjuk le, hogy a CoRoT-úrtávcső adatainak pontossága tényleg eléri az előzetesen számítottat, és némi adatkezeléssel a legtöbb változócsillag-típus esetében ki is tudjuk használni ezt a pontosságot az adatok értelmezésénél is.

4.

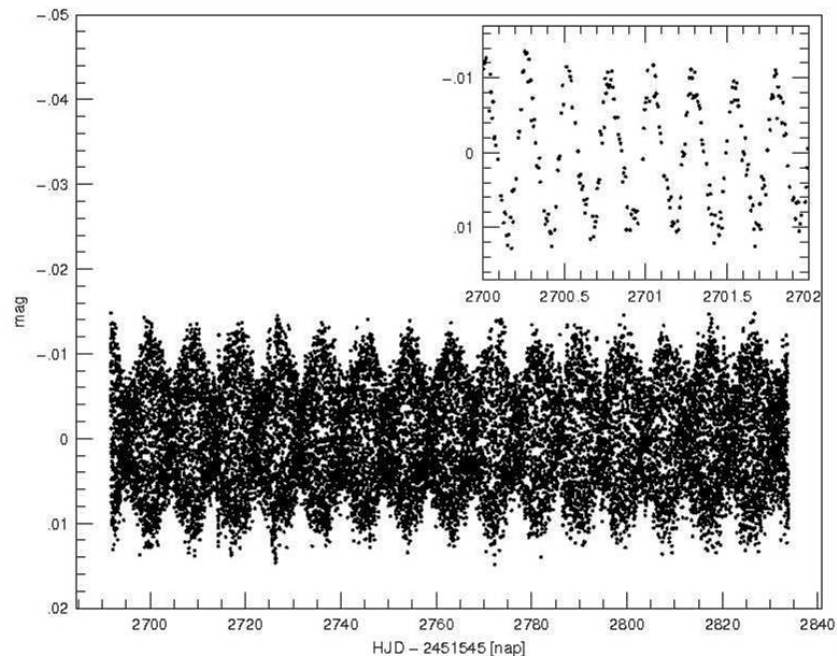
Az idősorok elemzésének egyik, ha nem a legfontosabb eszköze a Fourier-analízis. Nézzük meg, hogyan jelentkeznek a fentiekben tárgyaltak a Fourier-spektrumokban! A hosszú időskálájú trendeknek a spektrum kismagyas részében látszó csúcsok felelnek meg (l. a 3. ábrán fent), hiszen a Fourier-felbontás minden 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

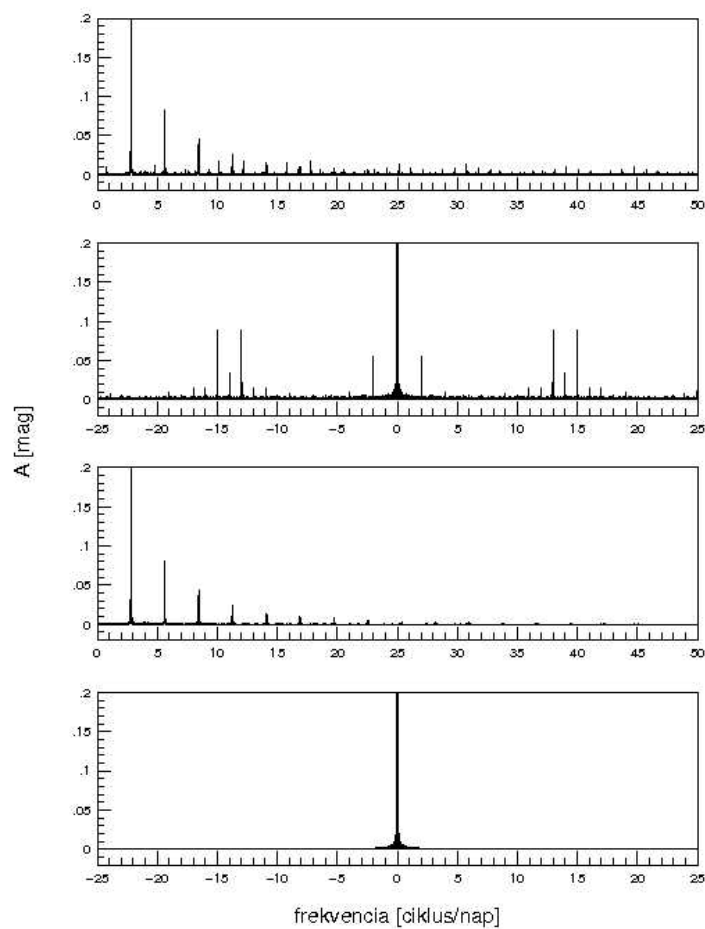
tisztább, mint az eredeti volt. Eltűnnek belőle az aliánsok, amelyeket a nem egyenletes mintavételezés okozott.



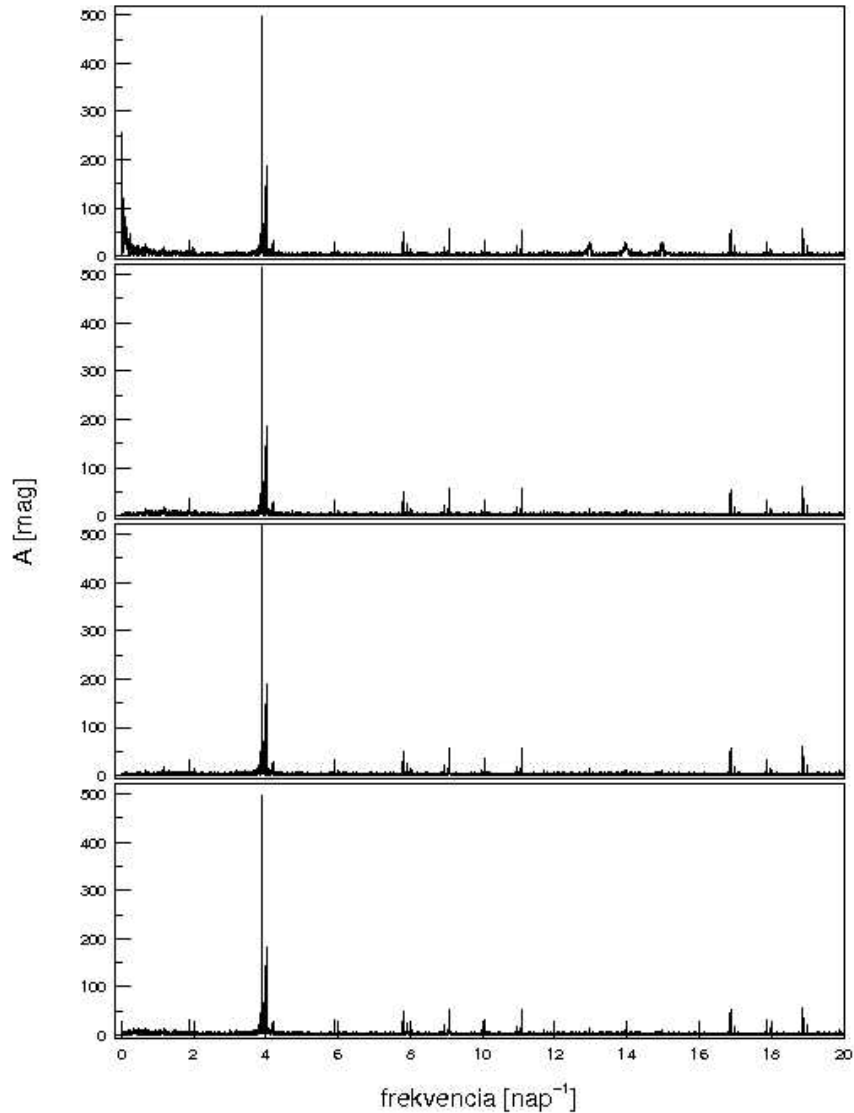
1. ábra. Példa CoRoT fénygörbe trend- és ugrásmentesítésére. Eredeti mért fluxusok (egyértelműen hibás pontok kihagyva) – fent, trendmentesített adatsor – középen, trend- és ugrásmentesített idősor – lent.



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, bineléssel 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 Pizskéstetőn 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>