

A KEPLER-ÚRTÁVCSŐ EGY SZÁZÉVES REJTÉLY NYOMÁBAN

Benkő József
MTA CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet

A címben szereplő rejtély az RR Lyrae csillagok Blazskó-effektusa. A Kepler-úrtávcsőről már hallottam, az RR Lyrae-k is rémlenek mint a csillagászatban távolságmérésre használt „standard gyertyák”, de mi az a Blazskó-effektus? – mondhatja most sok olvasó. Ahhoz, hogy a kérdésre választ adjunk, és legfőképpen, hogy az RR Lyrae típusú változócsillagokkal kapcsolatos új felfedezések jelentőségét lássuk, szükségünk van némi háttérismeretre. Melyek ezek a csillagok, mi a jelentőségük, mit tudunk róluk néhány évvel ezelőttig?

Amit a földi észlelésekből megtudtunk

Az RR Lyrae típusú változócsillagok nagyon különböznek Napunktól: kisebb tömegük ellenére (átlagos tömegük 0,6 naptömeg), jóval fényesebbek a Napnál (körülbelül 40-50 napluminozitás). Ez úgy lehetséges, hogy magjukban már a hélium fúziója zajlik. A csillagfejlődési modellek szerint a magban a hélium fúziója csak akkor kezdődik meg, ha az addigi „üzemanyag”, a hidrogén már kifogyott. Más szavakkal, igen öreg csillagokról van szó. Ezt több megfigyelési tény is alátámasztja: például eloszlásuk a Tejútrendszeren belül közel gömbszimmetrikus, nem tömörülnek galaxisunk fő-síkja mentén, mint a fiatalabb csillagok. Ezzel függ össze, hogy nagyon sok RR Lyrae található gömbhalmazokban, amelyek a Tejútrendszer nagyon régi képződményei. Az RR Lyrae csillagok felszínén a héliumnál nehezebb elemek gyakorisága 1-2 nagyságrenddel kisebb, mint a Nap felszínén. Ennek oka az, hogy amikor keletkeztek (mintegy 10 milliárd évvel ezelőtt), akkor a nehezebb elemekből még jóval kevesebb volt. Ezek ugyanis a csillagok belsejében jönnek létre, és szupernóva-robbanások szórják szét környezetükben.

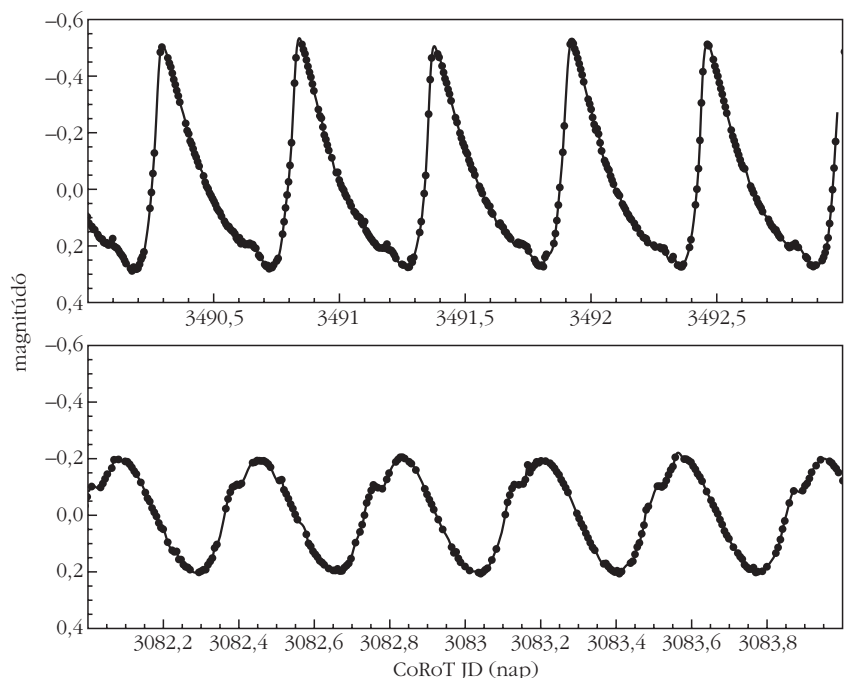
Az RR Lyrae csillagok fényességváltozási amplitúdója igen nagy (0,1–0,7 magnitúdó). A szélső értékek két alcsoporthoz tartoznak. A hosszabb periódusú (0,3–0,8 nap) és nagyobb amplitúdójú (0,4–0,7 magnitúdó) úgynevezett RRab, illetve a rövidebb periódusú (0,25–0,45 nap) és kisebb amplitúdójú (< 0,3 magnitúdó) RRC típusú még a 20. század legelején különítették el, amikor a fotográfia csil-

lagászati elterjedése után tömegével fedezték fel a változócsillagokat. Akkortájt a fotometriai idősorok, az úgynevezett *fénygörbék* segítségével – ezek fenomenológikus leírása alapján – próbáltak rendet tenni a sokféle változócsillag között. A RR Lyrae csillagok fénygörbéje igen jellegzetes (1. ábra). Az RRab altípus fénygörbéje aszimmetrikus, inkább a fűrészfogrezgéshez hasonlít, míg az RRC típusú sokkal szinuszosabb, bár általában itt is meredekebb a fényesedési (felszálló ág), mint a halványodási (leszálló ág) szakasz.

Az RR Lyrae csillagok fényességváltozásának fizikai oka a radiális pulzáció. Ezt megfigyelési oldalról spektroszkópiai idősorokkal lehetett igazolni. A légkörükben található abszorpciós vonalak periodikus vörös-, illetve kékeltolódást mutatnak a Doppler-effektusnak megfelelően. A fénygörbe felszálló ágában a légkör tőlünk távolodik (összehúzódik), míg a leszálló ágban közeledik (felfúvódik). Az RRab és RRC csillagok különbségét pedig az okozza, hogy első esetben a csillag radiális alaplómódusban, míg a másodikban első felhangban pulzál. Bár néhány cikk megjelent az irodalomban második felhangban pulzáló RR Lyrae-kről (RRe csillagok), ezek egyikéről sem sikerült ezt minden kétséget kizárólag bebizonyítani. Tény viszont, hogy egyes RR Lyrae-k egyszerre pulzálnak az alaplómódusban és az első felhangban (RRd csillagok).

Az RR Lyrae-k tudományos vizsgálata során már igen korán felfigyeltek egy érdekes jelenségre. *Szergej Blazskó* orosz csillagász 1907-ben egy rövid közle-

1. ábra. Egy alaplómódusban (RRab, fent), illetve egy első felhangban (RRC, lent) pulzáló RR Lyrae csillag jellegzetes fénygörbéjének részlete (a CoRoT-úrtávcső mérései).



A kutatások finanszírozásához jelenleg az OTKA K83790 és az ESA PECS No 4000103541/11/NL/KML számú pályázatai járulnak hozzá, amit ezúton is köszönök.

ményben publikálta azt a megfigyelését, hogy a később RW Draconis nevet kapott RR Lyrae típusú változócsillag maximális fényességének fázisa nem állandó az időben. Egy állandó periódusú jelhez képest hol siet, hol pedig késik. *Harlow Shapley* 1916-ban pedig kimutatta, hogy magának a névadó RR Lyrae-nek a mintegy félnapos pulzációs perióduson túl van egy második, 40 nap körüli periódusa is, amellyel a fénygörbe amplitúdója (és ezzel az alakja is) változik. Mivel sok esetben a két effektus egy csillagnál egyszerre van jelen, nyilvánvalónak tűnt kapcsolatuk, így a későbbiekben mindkét jelenséget Blazskó-effektusnak nevezték. A Blazskó-effektus tipikus periódusa néhány hét, de akár néhány napos, vagy több éves is lehet.

Az 1980-as évekig az RR Lyrae-k vizsgálatában a legjellemzőbb módszer a fotografikus, majd pedig a fotoelektromos fotometria volt. Az optikai csillagászat másik fő vizsgálati módszere, a spektroszkópia kissé háttérbe szorult. Ennek elsősorban gyakorlati okai voltak. A viszonylag rövid periódusú és a csillag légkörében rövid idő alatt lezajló heves folyamatok (lökéshullámok) miatt a spektrumok rögzítésére rövid idő (jellemzően néhány perc) áll rendelkezésre. Ilyen rövid idő alatt megfelelő minőségű színeképeket – még a legfényesebb RR Lyrae-k esetében is – csak meglehetősen nagy távcsövekkel lehet rögzíteni. A nagy távcsövekhez való hozzáférés pedig mindig erősen korlátozott. A Blazskó-effektus spektroszkópiai vizsgálatát a jelenség hosszú, hetes-hónapos időskálája is tovább nehezíti. Nem véletlen hát, hogy egy teljes Blazskó-ciklus spektroszkópiai végigkövetésére egy-két példa akadt csak az elmúlt száz évben.

A fotometriai idősorok készítésének elsődleges célja hosszú időn keresztül a periódusváltozások kimutatása volt. A csillagfejlődési modellek ugyanis meglehetősen gyors fejlődést jósolnak ezekre a csillagokra, és ez periódusuk változásával jár, amely akár néhány évtized alatt is kimutathatóvá válik. Az ilyen mérések tehát alkalmasak lennének a csillagfejlődési (és részben a pulzációs) modellek közvetlen ellenőrzésére. Ehhez mindössze arra van szükség, hogy a fénygörbe valamely jól meghatározott fázisának (például fényességmaximum, felszálló ág közepe) időpontját időről időre mérjük meg, és a mért időpontot vessük össze az állandó periódussal kiszámolt időponttal. A zseniálisan egyszerű módszer a mért és számított különbsége (angolul *observed minus calculated*), azaz O-C módszer néven ismeretes. A módszer kumulatív jellege miatt még az egyedi időmérés pontossága sem számít túl sokat, hiszen mondjuk tucatnyi egy éven belül eloszló 1 másodperces pontosságú mérésből kimutatható egy évenként 1 ezred másodperces periódusváltozás. (Megjegyzendő, hogy ugyanezt a módszert használta *Joseph Taylor* és *Russell Hulse* Nobel-díjas felfedezésükben – a PSR B1913+16 kettős pulzár keringési periódusa változásának kimutatására.) Mindezek után már érthető, hogy az RR Lyrae-k észlelése nem folyamatos mérésekkel, még csak nem is teljes (az összes fázist lefedő) fénygörbék felvételével történt, hanem

jobbára fényességmaximumok észlelésével. A több évtizedes kitartó munka azonban meglehetősen felmás eredményt hozott. Az RR Lyrae csillagoknak csak egy része mutatott csillagfejlődéssel magyarázható periódusváltozásokat. Sokuk periódusa nagyságrendekkel gyorsabban, ráadásul sokszor szabálytalanul változik. A Blazskó-effektust mutató RR Lyrae-k is általában ebbe a gyors és szabálytalan periódusváltozású csoportba tartoznak.

A számítástechnika csillagászati megjelenése és ezzel a különböző idősor-analizáló programok (például diszkrét Fourier-analízis, fázisdiagram-, fűzérhosszmódszer) elterjedése új lendületet adtak a változócsillagok kutatásának. Nyilvánvalóvá vált az is, hogy a korábbi észlelési stratégia helyett a minél jobb időbeli lefedettségre kell törekedni. A részletes idősor-analízisekhez azonban kevés és nem megfelelő minőségű volt az addig felhalmozott észlelési anyag. Jellemző, hogy Blazskó-effektusos RR Lyrae-ről az első részletes Fourier-analízist csak 1995-ben publikálták. Az 1990-es évek végén a szilárdtest-detektorok (CCD-kamerák) elterjedésével több, nagy égtérületet monitorozó program is indult. Bár ezek a nagy látószögű kamerákkal felszerelt, kis automata távcsöveket használó tudományos kísérletek, mint például a ROTSE, a MACHO vagy az OGLE eredetileg nem változócsillagászati célúak voltak, de idősor-adatbázisai a változócsillagokra, köztük az RR Lyrae-kre is óriási mennyiségű adattal szolgáltak. Ráadásul ezek a hosszú (több éves) homogén adatsorok frekvenciaanalízisre is kiválóan alkalmasak. Vannak azonban komoly hiányosságaik is. Az észlelésekhez használt kis távcsövek miatt a fotometriai pontosságuk korlátozott, jellemzően színszűrő nélkül, vagy legfeljebb egy széles sávú szűrővel készültek az észlelések, valamint az észlelési pontok időbeli eloszlása (1-2 pont éjszakánként) sem igazán kedvező. Mindezen hátrányok együttes kiküszöbölésére indult 2003-ban intézetünkben a Konkoly Blazhko Survey *Jurcsik Jobanna* vezetésével.

Az említett felmérések néhány fontosabb eredményére térjünk ki röviden! Az RR Lyrae csillagok Fourier-spektrumát a fő pulzációs frekvencia és ezek felharmonikusai (egész számú többszörösei) uralják. A felharmonikusok megjelenésének egyszerű matematikai oka az, hogy a fénygörbék nagyon nemszinuszosak. Az ezekkel a frekvenciákkal (és a hozzájuk tartozó amplitúdókkal és fázisokkal) jellemzett szinuszfüggvényeket levonva a fénygörbékéből és a különbséggörbék Fourier-transzformáltját megvizsgálva a Blazskó-effektust nem mutató RRab és RRc csillagokban nem találunk további szignifikáns frekvenciákat. A két módusban pulzáló (RRd) csillagokban a két pulzációs frekvencián és azok harmonikusain kívül a két frekvencia (ν_1 , ν_2) különböző lineáris kombinációi (például $\nu_1 + \nu_2$, $\nu_2 - \nu_1$, $2\nu_1 + \nu_2$ stb.) is megjelennek, ami a módusok nemlineáris csatolódását jelzi. A Blazskó-csillagok spektrumában a fő frekvencia és harmonikusai jellegzetes triplettet alkotnak. A jelenség jól ismert a rádiótechnikából: ilyen az amplitúdómodulált jelek Fourier-spektruma. A moduláció oka maga a

Blazskó-effektus. A megfelelően pontos adatsorokból a Blazskó-frekvencia is mindig kimutatható volt. Az amplitúdó- és frekvenciamoduláció egymáshoz való viszonya továbbra is ellentmondásosnak tűnt. Az egyedileg vizsgált csillagokban ugyan mindkét modulációt mindig meg lehetett találni, a nagy égboltfelmérések adataiból viszont úgy tűnt, mintha lennének csak amplitúdó-, illetve csak frekvenciamodulált csillagok is. Utóbbi adatokban azonosítottak olyan csillagokat is, amelyek Fourier-spektrumában a szokásos tripletszerkezet helyett dublettek, másoknál pedig nem egyenkénti triplettel jelentek meg. Az egyedi csillagokat vizsgáló Konkoly Blazhko Survey egyre kisebb amplitúdójú modulációkat mutatott ki, így komolyan felvetődött, hogy kellően nagy pontosságnál minden RR Lyrae csillagnál fellép a Blazskó-effektus.

Elméletek a Blazskó-effektus magyarázatára

Noha az elmúlt száz évben féltucatnyi különböző fizikai magyarázattal és ezek változataival próbálták a Blazskó-effektust értelmezni, ezek sorra-rendre „elvérezték” az észlelési tényekkel vívott csatákban. A három legtöbbet hivatkozottra röviden itt is térjünk ki! (i) A ferderotátor-modell azt feltételezi, hogy a csillagnak mágneses dipóltere van. Az egyszerűsített számítások azt adták, hogy globális mágneses tér hatására a radiális módusok $l = 2$ horizontális kvantumszámhoz tartozó nemradiális módusokká torzulnak. Ekkor a forgó csillagra való különböző rálátás okozná az amplitúdómodulációt. Az egyik komoly gond ezzel a magyarázattal, hogy a működéséhez szükséges 1 kG nagyságrendű mágneses teret nem sikerült kimutatni még egyetlen RR Lyrae színekében sem. Ráadásul – mivel a magyarázat tisztán geometriai – nem tud számot adni arról, ha a Blazskó-ciklusok nem tökéletesen egyformák, ilyen esetek pedig már a földi észlelésekből is sejtethők voltak. (ii) A radiális és nemradiális módusok rezonancia-modelljei azt feltételezik, hogy a radiális módussal együtt gerjesztődik egy nemradiális módus is. Ez akkor fordulhat elő, ha a nemradiális módusok sűrű spektrumában van olyan frekvenciájú módus, amely a radiális módus frekvenciájával rezonanciában van, például 1:1 rezonancia esetén a két frekvencia majdnem egybeesik. Itt a nemradiális módusok az $l = 1$ -hez tartoznak. A modell a modulációra a megfigyeltnél jóval kisebb (0,02 magnitúdó) amplitúdót ad, ráadásul a ciklusról ciklusra való változás magyarázata itt is hiányzik. (iii) Talán ezért is vált hamar népszerűvé az észlelőcsillagászok körében *Richard Stothers* 2006-ban felvetett ötlete, amelyben a moduláció okát a turbulens konvekció és a pulzáció kölcsönhatásában kereste. Napunk példájából ugyanis jól tudjuk, hogy a mágneses dinamo egyáltalán nem szigorúan periodikus. Amikor azonban elkezdtek a modellt mélyebben is kidolgozni, kiderült, hogy csak a nagyon hosszú periódusú és kis amplitúdójú modulációkat képes leírni. Nagyjából itt tartottunk egy évtizede, amikor először a CoRoT-, majd pedig a Kepler-űrtávcső elindult felfedezőútjára.

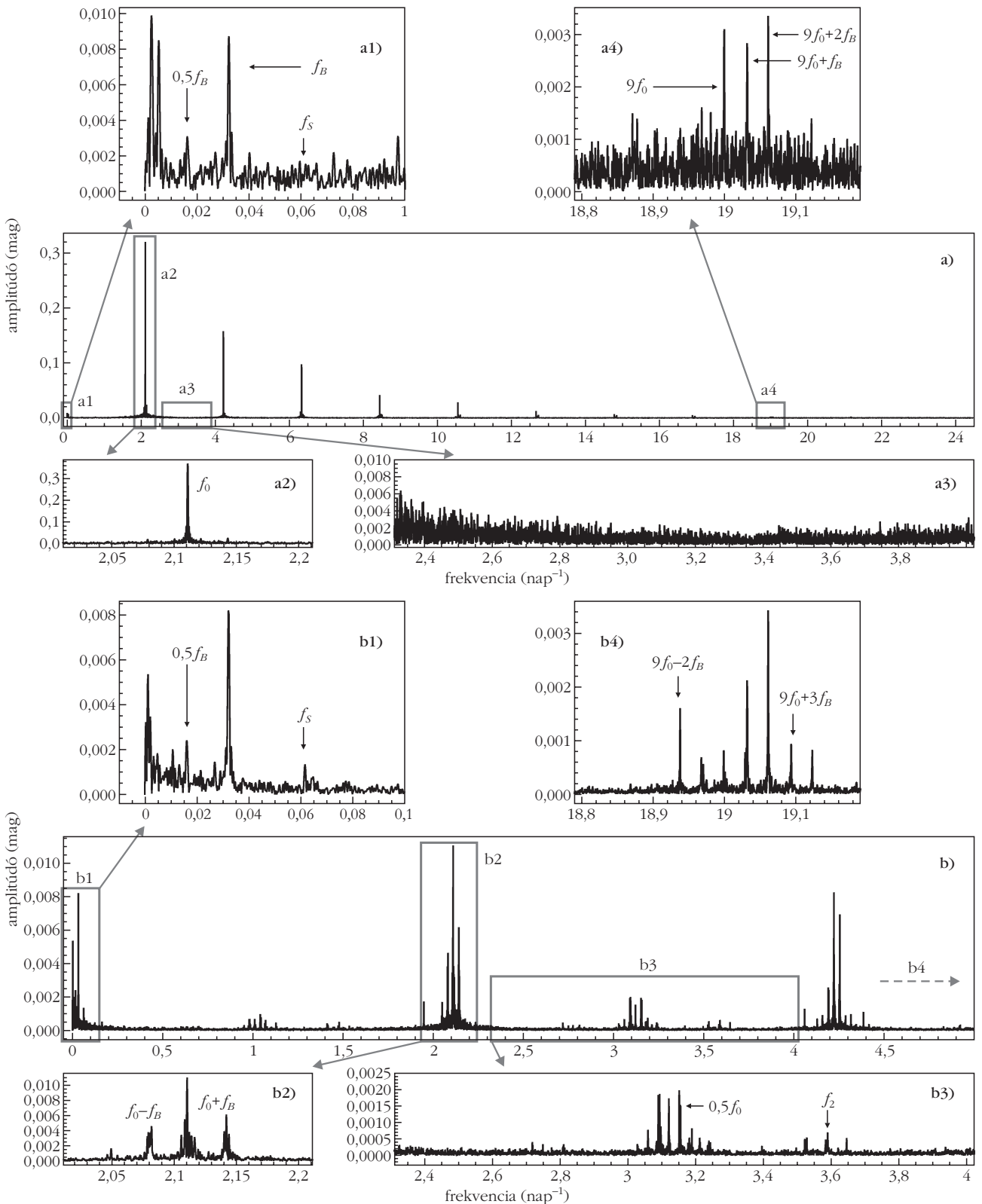
A Kepler-űrtávcső

A NASA Kepler-űrtávcsővéről felbocsátásakor, 2009-ben már megjelent egy ismertető [1], ezért csak röviden megemlítem, hogy az űrtávcső egy 1,5 m-es főtükörű Schmidt-teleszkóp, amelynek fókuszában egy 42 elem-ből álló (összesen 95 megapixel) mozaik-CCD helyezkedik el. A teljes leképezett terület mintegy 105 négyzetfok. Az űrtávcső a Nap körül kering, és négy éven keresztül egy kiválasztott területen mintegy 150 000 csillagot figyelt meg folyamatosan, alapesetben 30 percenként egy észlelési pontot készítve. A távcső elsődleges célja a Naphoz hasonló csillagok bolygóinak felfedezése volt. Kedvező látóirányú elhelyezkedés esetén ugyanis a csillaguk körül keringő bolygók időnként átvonulnak csillagjuk korongja előtt, ezzel egy kicsi, de jól mérhető periodikus fényességcsökkenést okoznak. A Kepler-űrtávcsövet ilyen periodikus jelek vadászatára optimalizálták. Bolygóátvonulásokat úgy találhatunk nagy eséllyel, ha egyszerre sok csillagot figyelünk meg (ezt szolgálja a nagy látómező), kellően sokáig (4 év) és nagy pontossággal (a látómezőben a medián relatív pontosság 29 ppm volt). Az elsődleges misszió 2013. augusztus 15-én lezárult, miután a pontos iránytartásért felelős négy lendkerékből a második is felmondta a szolgálatot. Új koncepcióval és új célpontokkal 2014-ben folytatódott a küldetés, most már K2 néven [2].

A korlátozott telemetriai kapacitás miatt a teljes 95 megapixel képet nem töltik le folyamatosan (csak körülbelül havonta egyszer), hanem csak az előre kiválasztott csillagok egyenként néhány tucat pixeles képecskéit. Ezért volt nagy jelentősége a misszió előkészítésekor annak, hogy *Szabó Róbert* kollégámmal a katalógusokat bújtuk a Kepler-mezőben ismert klasszikus pulzáló változókat (cefeidákat, RR Lyraeket) keresve, majd a talált jelöltek észlelését hivatalos formában javasoltuk. Ha ezt nem tesszük (vagy az észlelési pályázatainkat nem fogadják el), akkor most nem számolhatnánk be arról, hogy a klasszikus pulzáló változócsillagok – és kiemelten az RR Lyrae-k – vizsgálatában milyen átütő eredményeket hozott az űrfotometriai forradalom. Az, hogy egyáltalán érdemes ilyen csillagokat űrfotometriával vizsgálni, egyáltalán nem volt magától értetődő. Voltak, akik egyenesen megkérdőjelezték az ilyen vizsgálatok létjogosultságát, mondván ezektől semmi új eredmény nem várható. Nos, nem a szkeptikusoknak lett igazuk.

Észlelési újdonságok

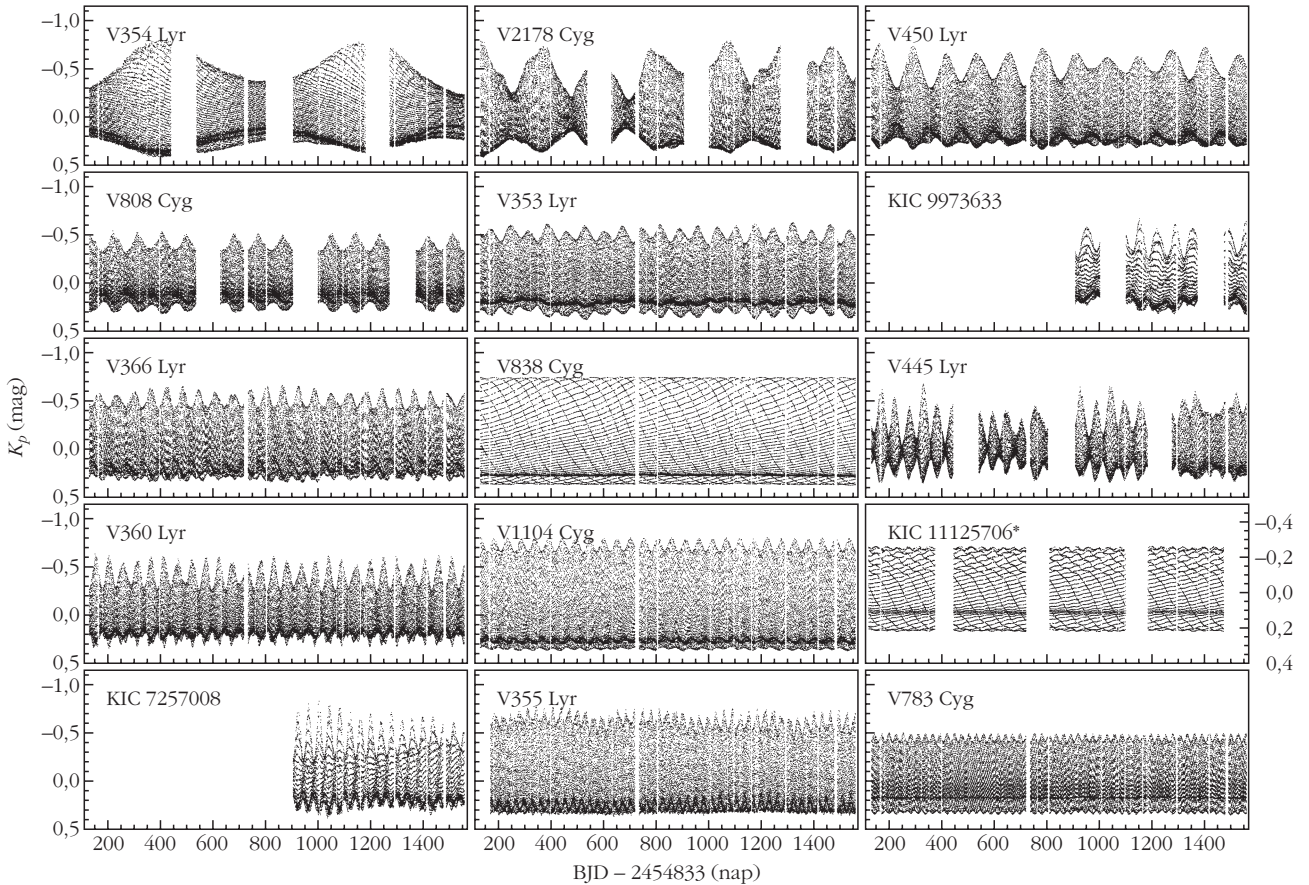
Amikor 2008-ban a CoRoT-űrtávcső RR Lyrae csillagokról készült űrfotometriai idősorait kollégáimmal elkezdtek elemezni, kiderült, hogy ezek meglepően sokfélék. A rendelkezésre álló kis minta – 1-3 csillag észlelési területenként – megnehezítette, hogy szétválasszuk az egyedi különlegességeket az általános jellemzőktől. Az mindenesetre kitűnt, hogy a Blazskó-effektust mutató csillagok Fourier-spektruma meglehetősen gazdag. Több száz szignifikáns frekvenciát



2. ábra. A Kepler-minta egy tipikus Blazskó-effektusos RR Lyrae-csillag Fourier-analízisének sematikus lépései. A középső felső panel maga az eredeti spektrum, a kisebb panelek annak részeit mutatják nagyítva. Az alsó panelek szerkezete a fentiekhez hasonló, de itt a legnagyobb amplitúdójú frekvenciák (a fő pulzációé és harmonikusaié) már le vannak vonva [3].

sikerült azonosítani bennük (2. ábra). A földi mérések Fourier-spektrumát uraló triplettek helyett ekvidisztáns multiplettek tűntek fel, sokszor egészen magas rendig. Ezt még tisztán matematikai úton sikerült megmagya-

rázunk, hiszen a frekvenciamodulált jelek Fourier-spektruma ilyen (elvben végtelen rendű) multipletteket tartalmaz. Nem mellékesen az egyszerre amplitúdó- és frekvenciamodulált jelek matematikai vizsgálá-

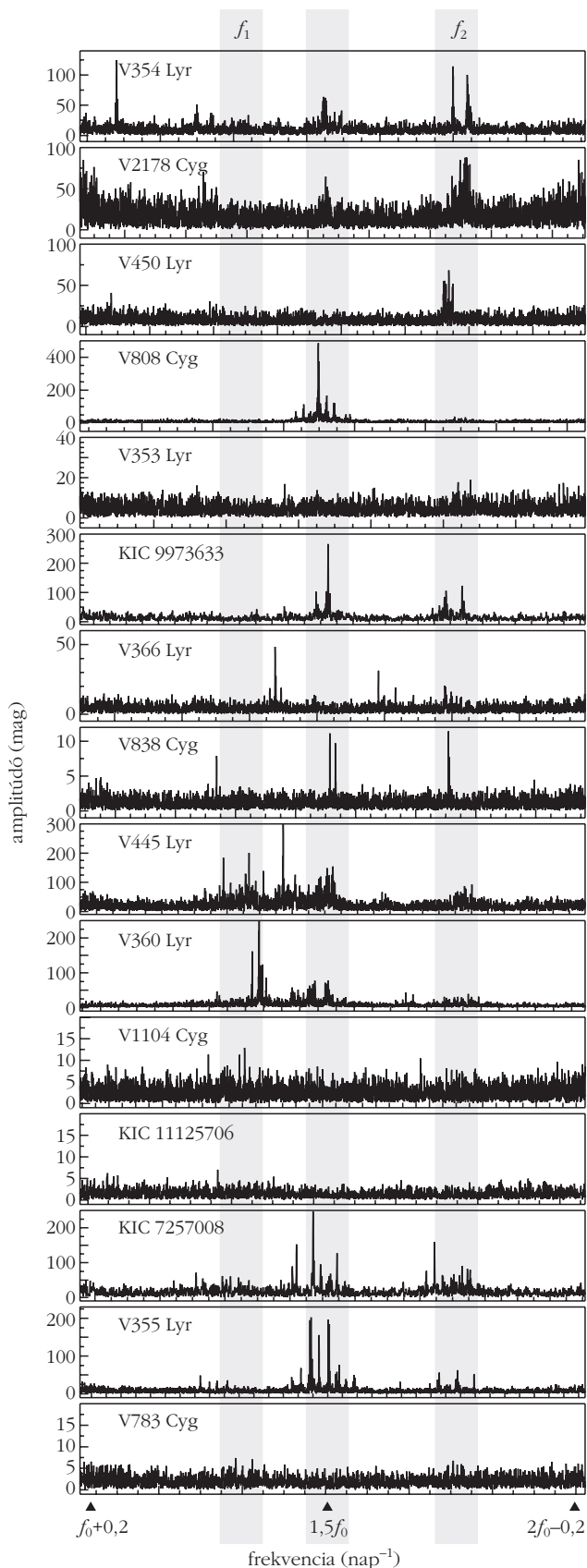


3. ábra. A Kepler-űrtávcső négyéves mérési sorozatai Blazskó-effektust mutató RR Lyrae csillagokról. A pulzáció maga itt nem látszik, csak az amplitúdómoduláció [3].

tával természetes magyarázatot kaptunk arra a korábban sokat vitatott jelenségre is, hogy az oldalcsúcsok amplitúdói miért nem azonosak, és ezen keresztül sikerült megmagyaráznunk például a dubletteket (mint nagyon aszimmetrikus tripleteket, ahol az egyik oldalcsúcs a zajszint alatt van), vagy a nem egyenközű tripleteket (két moduláció aszimmetrikus triplet szerkezete). Csak hogy a multipleteken túl, a harmonikusok között is rengeteg szignifikáns frekvenciát találtunk. Bár ezek formálisan néhány független frekvencia lineáris kombinációból „kikeverhetők”, a fizikai magyarázatuk meglehetősen bizonytalan volt. A CoRoT 101128793 jelű csillagnál például a legerősebb ilyen extra frekvencia a második radiális felhang frekvenciájának tűnt. Mint fentebb írtam, korábban egyetlen olyan csillag sem volt ismert, amelyik bizonyosan második felhangjában pulzál, itt pedig egyből egy kétmódusú (alaplómódusban és második felhangban egyszerre pulzáló) esetben botlottunk. Egy másik csillag – a CoRoT 105288363 – pedig egészen elképesztő erősen modulált volt, ráadásul oly módon, hogy minden egyes Blazskó-ciklusa egymástól teljesen különbözött. A földi észlelésekből már sejtett irregularitás mindenestre itt feketén-fehéren be is bizonyosodott.

A Kepler-űrtávcső mintegy 40 RR Lyrae csillaga már eléggé nagy mintának bizonyult általános következtetések levonására (3. ábra). Ezek fényében a CoRoT-csillagok viselkedése is sok szempontból értelmet

nyert. Először is, a Kepler-mérések pontosságával a Blazskó-csillagok aránya 50% körülnek adódott, ami megegyezik a legmagasabb gyakorisággal, amelyet földi mérések alapján becsültek. Ugyanakkor az RR Lyrae-k másik 50%-a semmilyen modulációt nem mutat, vagyis nem igazolódott az a várakozás, hogy egyre nagyobb pontossággal egyre nagyobb lesz a Blazskó-csillagok aránya. Bebizonyosodott az is, hogy az amplitúdó- és frekvenciamoduláció mindig együtt jár. Nem találtunk egyetlen olyan csillagot sem, ahol csak az egyik látszik. A kétfajta moduláció frekvenciája minden esetben azonos volt, tehát jogosnak bizonyult az a korábbi feltevés, hogy az amplitúdó- és a frekvenciamoduláció ugyanazon jelenség két különböző, észlelhető megnyilvánulása. A négy évet átfogó teljes anyagot elemezve kitűnt, hogy a többszörös moduláció nagyon gyakori (körülbelül 80%), holott a földi mérések alapján a többszörösen modulált csillagokat különlegességnek gondolhattuk [3]. Még a legnagyobb publikált arányuk (12%) is sokkal kisebb, mint a Kepler-mintáé. Meglepő eredmény, hogy a megfigyelt többszörös modulációk frekvenciaarányai nagyon sokszor közel vannak két kis egész szám hányadosához, azaz rezonanciában vannak. Az ok egyelőre teljesen ismeretlen. Szintén a teljes anyag áttekintése mutatta meg azt is, hogy a Blazskó-moduláció ciklusról ciklusra történő változása egyáltalán nem ritka, sőt több-kevesebb irregularitás szinte mindig kimutatható.



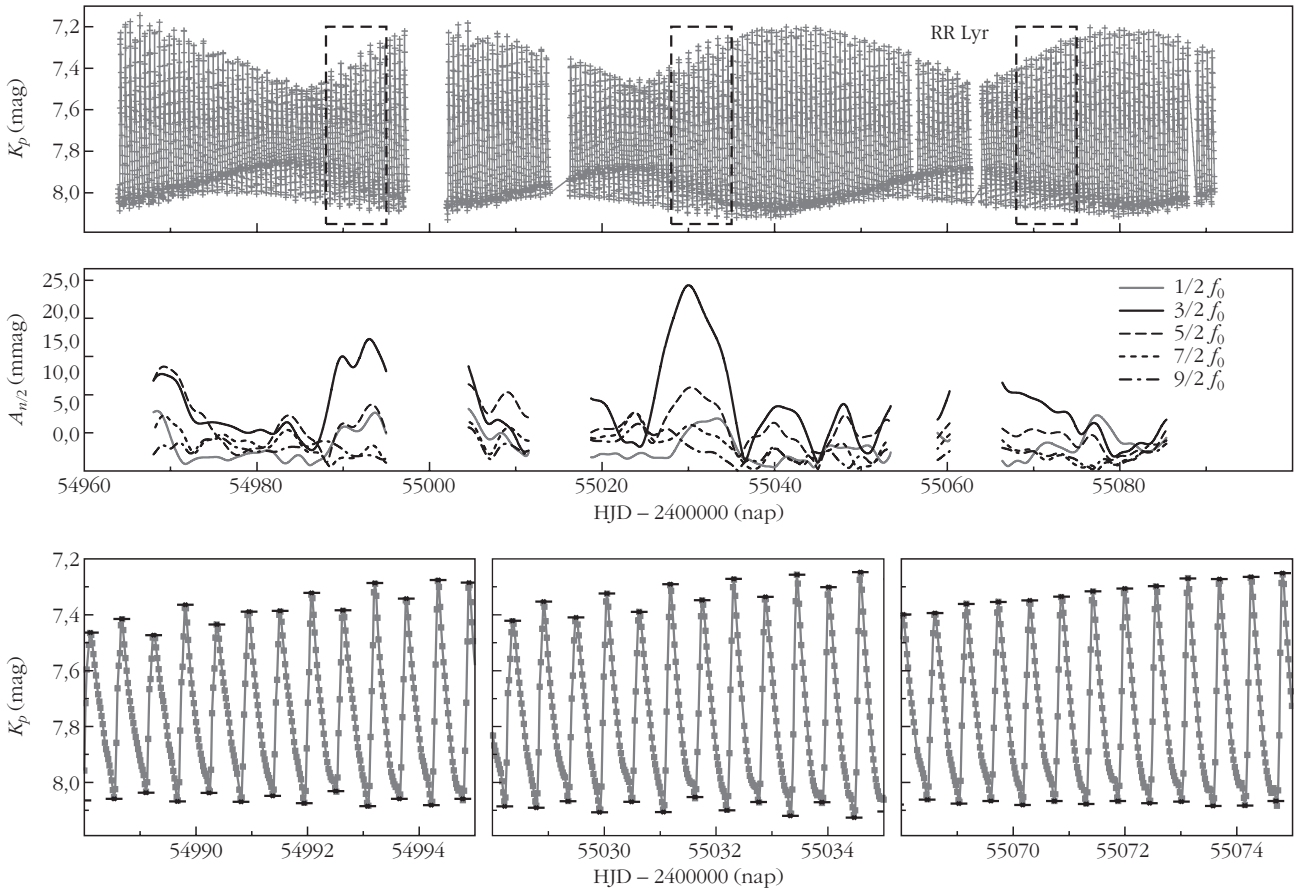
4. ábra. Részletek a Kepler-minta Blazhko-effektusos csillagainak Fourier-spektrumából. A spektrumokon a fő pulzációs frekvencia és az első felharmonikus közötti rész látható. A különböző csillagok spektrumai egymáshoz vannak skálázva [3].

A Fourier-harmonikusok között mutatkozó extra frekvenciák között (4. ábra) is sikerült rendet tenni. A Kepler-úrtávcsővel észlelt RR Lyrae típusú csillagoknál talán a legmeglepőbb felfedezés egyes Blazhko-csillagok perióduskettőződése (period doubling, PD) (5. ábra). Ez abban nyilvánul meg, hogy az egymást követő pulzációs ciklusok maximális és minimális fényességei felváltva kisebbek, illetve nagyobbak. Egy nagy amplitúdójú ciklust követ egy kisebb, majd újra egy nagyobb és így tovább. Ez a jelenség okozza a harmonikusok között „félúton” ($1/2v_1$, $3/2v_1$, ...) levő csúcsokat. Bár a perióduskettőződés jól ismert a kaotikussá fejlődő dinamikai rendszerekben, a gyengén nemadiabatikus RR Lyrae csillagok esetében senki nem várt kaotikus viselkedést. A PD-jelenség erőssége (a PD-re utaló frekvenciák amplitúdója) egyébként erősen és meglehetősen szabálytalanul változik az időben. Ezzel magyarázható az, hogy nem különböző frekvenciákat látunk a Fourier-spektrumokban, hanem egy-egy feles frekvencia körül egész csúcscsökkentés. A harmonikusok közötti két másik csúcscsökkentés az első és a második radiális felhanghoz tartozó frekvenciákkal azonosítható. Ezek a csillagok ugyanakkor nem tekinthetők a hagyományos értelemben vett kétmódusú pulzálóknak, mivel a felhangokhoz tartozó frekvenciák amplitúdói nagyságrendekkel kisebbek az alpmódusénál, és a PD-frekvenciákhoz hasonlóan időben erősen változnak. Sőt még az sem teljesen bizonyos, hogy ezek a frekvenciák ténylegesen radiális módusokhoz tartoznak, mivel *Wojtech Dziembowski* már 1977-ben elméleti úton kimutatta, hogy az RR Lyrae-kben gerjesztődhetnek nemradiális módusok a radiális módusokkal 1:1 rezonanciában, vagyis azonos frekvencián. Fotometriai mérések alapján a kérdést nem lehet eldönteni. Itt csak a nagy felbontású spektroszkópia segíthet.

Az RRC és RRd csillagokkal kapcsolatos legérdekesebb új megfigyelés, hogy minden ilyen felhangban (is) pulzáló változó Fourier-spektruma tartalmaz egy frekvenciát, amely a domináns pulzációs frekvenciájával 0,61-os arányban áll. A frekvencia semmilyen radiális módussal nem magyarázható, így nemradiális módust tételeznek fel a magyarázatára. Nem világos, hogy ez a nemradiális módus miért nem gerjesztődik egyetlen alpmódusban pulzáló változóban sem, csak felhangban pulzálóknak. Érdekes adalék, hogy ilyen frekvenciákat korábbi földi mérésekből is kimutattak, mégpedig felhangban pulzáló(!) cefeidáknál. A nemradiális módus elmélet igazolása vagy cáfolata ma még nem lehetséges, mert ahhoz nemlineáris, nemradiális pulzációs kód kellene, ilyen viszont jelenleg nem létezik.

Elméleti újdonságok

Az új felfedezések közül elsőnek a perióduskettőződést sikerült elméletileg is modellezni az egyik legjobb ma létező radiális 1D hidrokód – a Florida–Budapest hidrokód (*Robert Buchler, Kolláth Zoltán* és



5. ábra. A perióduskettőződés jelensége magánál az RR Lyrae-nél. A felső ábrán az RR Lyr két negyedéves Kepler-fénygörbéje, középen a PD-frekvencia amplitúdójának időfüggése. Az alsó ábrán az alternáló ciklusok kinagyítva a fénygörbe felső ábrán bejelölt részein [4].

munkatársaik) – segítségével. A számítások kimutatták, hogy az RR Lyrae-k külső rétegeiben magas rendű radiális felhangok, úgynevezett strange módusok is képesek gerjesztődni, ha az adott felhang az alpmódussal rezonanciában van. A PD-t létrehozó kilencedik felhang 9:2-es periódusarányban áll az alpmódussal. Az ilyen magas rendű rezonanciákról korábban azt gondolták, hogy túlságosan gyengék ahhoz, hogy bármilyen mérhető effektust létrehozzanak, és ezért nem is vizsgálták őket. Most a vizsgálatok azt sejtetik, hogy további, még magasabb rendű rezonanciák (14:19, 20:27) is szerephez juthatnak. Sikeresült olyan hidrodinamikai modelleket is találni, amelyekben egyszerre van jelen az alpmódus, a PD-ért felelős strange módus és az első felhang is. Ilyen hármas rezonanciák lehetnek a felelősek azon megfigyelésekre, ahol a PD és az első felhang volt kimutatható (például magánál az RR Lyrae-nél). Az észlelésekben gyakrabban megjelenő második felhangot tartalmazó elméleti megoldásokat egyelőre még nem sikerült megtalálni.

Az észlelések alapján úgy tűnik, hogy a Blazskó-effektus és a perióduskettőződés között szoros kapcsolat van. Csak Blazskó-csillagokban van PD (illetve más extra módusok), és a Blazskó-csillagok majdnem mindegyikében vannak is ilyenek. Ezek után különösen elgondolkodtató az a 2011-ben publikált elméleti vizsgálat, amelyben a szerzők megmutatták, hogy a

9:2-es radiális rezonancia a fizikai paraméterek elég tág körében természetes módon modulációt okoz [5]. A moduláció lehet egyszeresen vagy többszörösen periodikus, vagy kaotikus is. Ez a felvetés a Blazskó-effektus korábban tárgyalt észlelt tulajdonságait (többszörös modulációk, ciklusról ciklusra történő változások) is megmagyarázza, nemcsak magát a modulációt. Az egyetlen ok, ami miatt még nem mondjuk azt, hogy megtaláltuk a Blazskó-rejtély megoldását, az az, hogy a hivatkozott munka egy egyszerűsített számoláson alapul, és a hidrokódokkal még nem sikerült igazolni. Biztató ugyanakkor, hogy a közeli „rokon” BL Herculis típusú csillagok esetén ez már sikerült.

Remélem, sikerült érzékeltetnem, hogy az „űrfotometriai forradalom”, ahogyan sokszor a CoRoT- és Kepler-űrtávcső eredményeire hivatkoznak, nemcsak exobolygók felfedezését, vagy a csillagszeizmológia észlelési megalapozását jelenti, hanem számos más kérdésre is választ adott, vagy legalábbis komoly előrelépést hozott. Ugyanakkor bőven maradtak nyitott kérdések, sőt újabbak is keletkeztek.

Irodalom

1. Szabó R., *Fiz. Szemle* 59/4 (2009) 121.
2. Molnár L., *Fiz. Szemle* 64/6 (2014) 182.
3. J. M. Benkő et al., *ApJS* 213 (2014) 31.
4. R. Szabó et al., *MNRAS* 409 (2010) 1244.
5. J. R. Buchler, Z. Kolláth, *Apl* 731 (2011) 24.