

Dr. Benkő József Miklós

RR Lyrae változócsillagok vizsgálata fotometriai űrtávcsövekkel

MTA DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

MTA CSFK Konkoly Thege Miklós
Csillagászati Intézet
Budapest, 2017

A kutatások előzményei

Az RR Lyrae változócsillagok felfedezése

A legtöbb tudományos diszciplinánál elmondott kötelező „már a régi görögök is...” kezdés az RR Lyrae csillagok kutatásával kapcsolatban nem megfelelő. Már csak azért sem, mert a legfényesebb – a csoportnak nevet adó – RR Lyrae sem látható szabad szemmel. Bár már a 17. századtól ismeretesek voltak egyes fényességüket periodikusan változtató csillagok, ezek inkább csak különlegességeknek számítottak. A 19. század legvégétől, a csillagászati fotográfia általános elterjedésével kezdték tömegével felfedezni a változócsillagokat. Kezdetben a látszó fényesség-idő diagramjaik (azaz fénygörbéik) alakja, azok fenomenologikus leírása alapján sorolták őket különböző csoportokba. A fényességváltozások fizikai okai akkoriban még nem voltak ismertek. A gömbhalmazok fotografikus idősorait vizsgálva tűnt fel a változócsillagok egy jellegzetes csoportja, amelyet ennek megfelelően halmazváltozóknak neveztek el. 1890-ben aztán Kapteyn felfedezte a később U Lep-nak nevezett RR Lyrae változót (Kapteyn, 1890), amely az első halmazon kívül azonosított „halmazváltozó” volt.

Az RR Lyrae csillagok fényességváltozásának amplitúdója az optikai tartományban igen nagy (0,1-0,7 magnitúdó), a kékebb hullámhosszon az amplitúdó nagyobb, a vörös sávokban kisebb. A szélső értékek az RR Lyrae csillagok két alcsoportjához tartoznak. A hosszabb periódusú (0,35-0,8 nap) és nagyobb amplitúdójú (0,4-0,7 mag) ún. RRab, illetve a rövidebb periódusú (0,25-0,45 nap) és kisebb amplitúdójú (<0,3 mag) RRC típust még Bailey különítette el 1902-ben fénygörbéik alapján (Bailey, 1902). Az RRab altípus fényességváltozása nagyon nemlineáris, a fűrészfog-rezgéshez hasonlít, míg az RRC típus sokkal szinuszosabb, bár általában itt is meredekebb a fényesedési (felszálló ág) mint a halványodási (leszálló ág) szakasz. Eredetileg az RRa és RRb csoportok is különböztek, de miután felismerték fényességváltozásuk fizikai azonosságát, összevonták őket.

Az RR Lyrae csillagok pulzációja

A 20. század elején komoly vita folyt a cefeidák (és egy speciális csoportjuknak tekintett RR Lyrae csillagok) fényváltozásának okáról (részletes történeti áttekintést l. Gautschy 2003). Először a kettősség merült fel mint lehetséges magyarázat, majd pedig az egy csillagon lezajló radiális pulzáció. A pulzációs magyarázat győzelme nem volt azonnali, de a megfigyelési és elméleti munkák egyre inkább ebbe az irányba mutattak. Az 1920-as, 30-as évekre vált általánosan elfogadottá hogy az RR Lyrae csillagok fényességváltozásának fizikai oka a radiális pulzáció. Ezt megfigyelési oldalról leginkább spektroszkópiai idősorokkal lehet igazolni. A légkörükben található abszorpciós vonalak a Doppler-effektusnak megfelelően periodikus vörös-, ill. kékeltozódást mutatnak, továbbá a folytonos színekük is változik, ahogyan a légkörük felmelegszik, vagy lehűl. 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 alpmódusban, míg a másodikban első felhangban pulzál (Schwarzschild, 1941). Az 1960-es évek óta ismeretesek olyan RR Lyrae csillagok is, amelyek egyszerre pulzálnak az alpmódusban és az első felhangban (RRd csillagok).

A pulzáció modellezése a kezdeti próbálkozásoktól napjainkig hosszú utat járt be. Az elmélet részletes kifejtése Cox (1980), illetve a nemradiális esetre Unno és társai (1989) klasszikus könyveiben található meg. A csillagok pulzációját a statikus csillagokat leíró szokásos hidrodinamikai egyenletek – kontinuitási egyenlet, mozgásegyenlet(ek), valamint az energia-egyensúly egyenlete és a gravitációs potenciálra vonatkozó Poisson-egyenlet –

kis perturbációival írjuk le (l. pl. Böhm-Vitense 1992; Christensen-Dalsgaard 2014). Adiabatus pulzáció esetén (amikor a pulzációs periódus sokkal kisebb, mint a termális időskála) a differenciálegyenlet-rendszer matematikailag egy hermitikus operátor sajátérték-problémájára egyszerűsödik, amelynek megoldásai (a kvantummechanikából jól ismert módon) kereshetők sajátfüggvény-kifejtések formájában. A pulzációelméletben egy adott sajátfrekvenciával és kvantumszámokkal jellemzett sajátfüggvény a csillag egy pulzációs módusát írja le.

A pulzáló csillagokat leíró egyenleteket csak numerikusan lehet megoldani, és általános, tetszőleges pulzációt modellező kód sem létezik. Kérdéses, hogy lesz-e valaha is. A viszonylag egyszerűbb radiális pulzációnál kihasználják a szferikus szimmetriát és a problémát egy dimenzióban (csak a sugár mentén történhet mozgás) oldják meg. A jelenleg leginkább használt két egydimenziós nemlineáris hidrodinamikai modellezőprogram, az azonos alapokon álló Florida–Budapest-kód (Kolláth és Buchler, 2001; Kolláth és társai, 2002) és a Varsó-kód (Smolec és Moskalik, 2008). A hidrodinamikai kódokban a csillagokat homogén gömbhéjakra bontják (esetenként több tízezerre) és minden egyes héjra megoldják az egyenleteket a megfelelően illesztett határfeltételekkel. A megoldásokat több száz, több ezer pulzációs cikluson keresztül követik a stabil határciklusig.

Ezek a számítások megmutatták, hogy a radiális pulzáció sem olyan egyszerűen zajlik le, mint ahogyan azt elsőre gondolnánk. A pulzáció bizonyos fázisaiban előfordul olyan helyzet, hogy a csillag egyes külső rétegei már összehúzódnak, míg más (belső részek) még tágulnak. Ilyenkor az összeütköző anyagban lökéshullám keletkezik (Fokin és Gillet, 1997; Fokin és társai, 1999). Ezek a lökéshullámok a fénygörbékben felfényléseket, a színképekben pedig jellegzetes vonalkettőződést, -kiszélesedést, sőt emissziót okoznak (Chadid és Gillet, 1996; Chadid és társai, 2008; Preston, 2009; Preston és társai, 1965). A hidrokódok ezen észlelési tények magyarázatán túl pl. helyesen adják meg a radiálisan pulzáló változók Hertzsprung–Russell-diagramon (HRD) elfoglalt helyét (az ún. instabilitási sávot) és az észleltekhöz hasonló fénygörbéket is képesek előállítani (pl. Feuchtinger 1999; Marconi és társai 2015). Egyedi fénygörbék előállítására viszont nem alkalmasak, mert a csillag külső rétegét, a fotoszférát (amiből a csillag észlelt fénye származik) nem modellezzik. Ha egyedi észlelt fénygörbét szeretnénk elméleti fénygörbével illeszteni, akkor a pulzációs modellünket kombinálnunk kell légkörmodellel is, ráadásul dinamikus légkörmodellre lenne szükségünk, amilyen az RR Lyrae csillagokra jelenleg nincsen. Még egy nagy hiányossága van az RR Lyrae változókra ma működő hidrokódok mindegyikének: egydimenziósak. Ez persze egyszerűsíti a számolást, de tudjuk, hogy a csillagok a valóságban háromdimenziós objektumok. A numerikus nehézségeket jól jelzi, hogy csak egészen a közelmúltban jelentek meg azok a többdimenziós kódok (Geroux és Deupree, 2015; Mundprecht és társai, 2013) amelyek már stabilan pulzálnak, és a korábbi egydimenziós kódokhoz hasonló eredményeket adnak.

Az RR Lyrae csillagok fejlődése és szerkezete

Az már az RR Lyrae csillagok HRD-n elfoglalt helyéből is látszik, hogy nagyon különböznek a fősorozaton elhelyezkedő Napunktól: kisebb tömegük ellenére (átlagos tömegük $0,6 M_{\odot}$), jóval fényesebbek a Napnál (kb. 40-50 $L_{\odot}$). Hogyan lehetséges ez? A választ a csillagfejlődési elméletek adják meg. (Ennek áttekintését a pulzáló változók szempontjából l. Catelan és Smith 2015 könyvében.) A kis tömegű csillagok magjában a H fúziója zajlik évmilliárdokon keresztül. Ez idő alatt a csillag a HRD-n közelítőleg egy pontban tartózkodik. Amikor azonban a magban a H koncentrációja olyan alacsony lesz, hogy az már nem elegendő a fúzió fenntartásához, a csillag szerkezetében drasztikus változások kezdődnek, ami a csillag HRD-n való elmozdulását okozza. A fősorozati állapot utáni következő, viszonylag hosszú

ideig stabil fejlődési állapot a vörös óriás fázis. Ekkor a csillag légköre felfúvódik és egyúttal lehül (a csökkenő felszíni hőmérséklet okozza a vörös színt). A magban ilyenkor nukleáris energiatermelés szinte nem zajlik, a mag körül viszont egy héjban folytatódik a H fúziója. A csillag a vörösóriás-ágon mozog a nagyobb luminozitású értékek irányában. A mag hőmérséklete és nyomása folyamatosan nő. Egy idő után eléri a He fúziójához szükséges értékeket. A beinduló He-fúzió új stabil állapotot jelent: a csillag megérkezik a horizontális ágra. Ekkor tehát a magban a He fúziója, míg a körülötte lévő gömbhéjban a H fúziója zajlik. A csillag nagyméretű és forró.

Az RR Lyrae csillagok is ilyen horizontális ági csillagok. Mivel a horizontális ágra fejlődéshez „ki kell fogynia” a hidrogénnek a magból, igen öreg csillagokról van szó. Ezt több megfigyelési tény is alátámasztja: pl. eloszlásuk a Tejútrendszeren belül közel gömbszimmetrikus (Dékány és társai, 2013; Pietrukowicz és társai, 2015), nem tömörülnek a fősík mentén, mint a fiatalabb (I. populációs) csillagok. Ezzel függ össze, hogy nagyon sok RR Lyrae található gömbhalmazokban, amelyek a Tejútrendszer nagyon régi, tipikus II. populációs képződményei. Az RR Lyrae csillagok felszínén a héliumnál nehezebb elemekből 1-2 nagyságrenddel kevesebb van, mint a Nap felszínén. Ennek is az az oka, hogy akkor keletkeztek (mintegy 10 milliárd évvel ezelőtt), amikor a nehezebb elemekből még jóval kevesebb volt.

Földi fotometriai vizsgálatok

Az 1980-as évekig az RR Lyrae csillagok vizsgálatában a legjellemzőbb módszer a fotografikus, majd pedig a fotoeletromos fotometria voltak. Az optikai csillagászat másik fő vizsgálati módszere, a spektroszkópia kissé háttérbe szorult. Ennek elsősorban gyakorlati okai voltak. Amennyiben nemcsak egy átlagszínkép rögzítése a célunk, a viszonylag rövid pulzációs periódus és a csillag légkörében rövid idő alatt lezajló heves folyamatok (lökéshullámok) miatt, a spektrumok rögzítésére jellemzően néhány perc áll rendelkezésre. Ilyen rövid idő alatt megfelelő minőségű színképeket csak meglehetősen nagy távcsövekkel lehet rögzíteni még a legfényesebb RR Lyrae csillagok esetében is. A nagy távcsövekhez való hozzáférés pedig mindig erősen korlátozott.

Az RR Lyrae csillagok mint a kozmikus távolságlétra elemei

A klasszikus cefeidákra vonatkozó periódus-fényesség reláció korszakalkotó felfedezése (Leavitt és Pickering, 1912) új utat nyitott a csillagászati távolságmérésben. A relációnak döntő szerepe volt abban, hogy a Tejútrendszeren kívüli galaxisok léte bebizonyosodott, és ma is a kozmikus távolságlétra egyik nagyon fontos eleme. Az RR Lyrae csillagok fényessége (ellentétben a cefeidákéval) az optikai tartományban közelítőleg független a periódusuktól. Bár távolságbecslésre már önmagában ez a tény is alkalmas, a pontosabb méréshez periódus-szín-fényesség összefüggésük kalibrálása vezetett. Ugyanakkor ha a közeli infravörösben (jellemzően K-sávban) mérjük a fénygörbéinket, hasonló periódus-fényesség összefüggést tapasztalunk, mint a klasszikus cefeidákra az optikai tartományban (l. Lub 2016 összefoglaló cikkét). Bár az RR Lyrae csillagok fényessége kisebb, mint a klasszikus cefeidáké, cserében sokkal több van belőlük, és olyan helyeken (gömbhalmazok, galaxisok halója) is előfordulnak, ahol a cefeidák nem, így a csillagászati távolságmérésben legalább akkora szerepük van, mint a cefeidáknak.

A távolságmérésben betöltött kitüntetett szerepük miatt váltak fontossá az RR Lyrae csillagok alapvető paraméterei, mint pl. abszolút fényességük, hiszen ez adja a rájuk alapozott távolságskála nullpontját. Az abszolút fényesség kiszámítására több módszer is létezik (pl. Baade-Wesselink-eljárás, fejlődési, vagy pulzációs modell). Ezek áttekintése megtalálható Smith (1995) klasszikus könyvében. Elvben a legjobb, mindenféle modelltől független

módszer a távolság megmérésére a trigonometrikus parallaxis meghatározása. Csakhogy még a legfényesebb RR Lyrae csillagok is meglehetősen messze vannak, ezért csak néhány közeli RR Lyrae parallaxisát határozták meg eddig a *Hubble*-űrtávcső egyedi méréseiből (Benedict és társai, 2011). A helyzetben lényegi áttörést a jelenleg folyó Gaia asztrometriai űrmisszió fog hozni.

Ha bármilyen közvetett módszert használunk a fizikai alapparaméterek meghatározására, nagyon fontossá válik az egyedi csillagok vizsgálata, hiszen ezek alapján tudjuk pl. a távolságmérésre használt mintánkat homogénné tenni és ezáltal csökkenteni a kalibrációnk lehetséges hibáját. Jól mutatja ennek fontosságát az a meglepő eredmény is, amely szerint az elsőként felfedezett fedési RR Lyrae-ről kiderült, hogy valójában nem is RR Lyrae, hanem egy $0,26 M_{\odot}$ tömegű pulzáló csillag, amilyenek kettőscsillagok fejlődése során néha kialakulhatnak (Pietrzyński és társai, 2012). A fénygörbe viszont megtévesztésig hasonló az RR Lyrae csillagoké. Vajon hány ilyen „RR Lyrae impostor” lehet még az adatbázisainkban?

Szintén gondot okozhatnak a Blazskó-effektust mutató RR Lyrae csillagok is. Az RR Lyrae csillagok tudományos vizsgálata során már igen korán felfigyeltek egy érdekes jelenségre. Szergej Blazhko orosz csillagász 1907-ben egy rövid közleményben publikálta azt a megfigyelését (Blazhko, 1907), hogy a később RW Dra nevet kapott RR Lyrae változó maximális fényességének időpontja egy állandó periódusú jelhez képest hol siet, hol pedig késik. Harlow Shapley 1916-ban pedig kimutatta (Shapley, 1916), hogy magának a névadó RR Lyrae-nek a mintegy fél napos pulzációs perióduson túl van egy második 40 nap körüli periódusa is, amellyel a fénygörbe amplitúdója (és ezzel az alakja) változik. Mivel sok esetben a két effektus egy csillagnál egyszerre van jelen, nyilvánvalónak tűnt kapcsolatuk, így a későbbiekben mindkét jelenséget Blazskó-effektusnak nevezték. Az RR Lyrae csillagok mintegy fele mutatja az effektust, és egyelőre nem tudni, hogy van-e különbség ezek és a monopériodikus csillagok fizikai paraméterei között.

A Blazskó-effektus tipikus ciklushossza néhány hét, de akár néhány napos, vagy több éves is lehet. A jelenség hosszú időskálája igen megnehezíti a spektroszkópiai vizsgálatokat. Teljes Blazskó-ciklus spektroszkópiai végigkövetésére néhány példa akadt csak az elmúlt száz évben (Chadid és Chapellier, 2006; Kolenberg és társai, 2010b; Preston és társai, 1965; Struve és Blaauw, 1949), így az effektus vizsgálata elsődlegesen a fotometria terepe volt, és maradt mindmáig.

Az RR Lyrae csillagok mint a csillagfejlődés nyomjelzői

A fotometriai idősorok készítésének elsődleges célja hosszú időn keresztül a periódusváltozások kimutatása volt. A csillagfejlődési modellek ugyanis meglehetősen gyors fejlődést jósolnak az instabilitási sávon belül (Demarque és társai, 2000; Dorman, 1992; Girardi és társai, 2000). Ha hiszünk a modelleknek, akkor a HRD-n elmozduló pulzáló változócsillag periódusa is változik, mégpedig olyan mértékben, hogy ez 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 (pl. maximum, felszálló ág közepe) időpontját mérjük meg időről időre, és a mért időpontot vessük össze az állandó periódussal kiszámolt időponttal. A zseniálisan egyszerű módszer a mért és számolt különbsége (angolul *observed minus calculated*), azaz O-C-módszer néven ismeretes (l. pl. Sterken 2005). A módszer kumulatív jellege miatt még az egyedi időmérés pontossága sem számít túl sokat, hiszen például tucatnyi, egy éven belül eloszló 1 másodperces pontosságú mérésekből kimutatható egy 1 ms/éves periódusváltozás.

Mindezek után már érthető, hogy az RR Lyrae csillagok észlelése nem folyamatos mérés-

sekkal, még csak nem is teljes (az összes fázist lefedő) fénygörbék felvételével történt, hanem jobbra fényességmaximumok észlelésével. A több évtizedes kitartó munka azonban meglehetősen felemás eredményt hozott. Az RR Lyrae csillagoknak csak egy része mutatott csillagfejlődéssel magyarázható periódusváltozásokat (Oláh és Szeidl, 1978; Szeidl, 1965; Szeidl és társai, 1986). Sokuknak nagyságrendekkel gyorsabb, ráadásul sokszor szabálytalan periódusváltozása van. A Blazskó RR Lyrae csillagok is általában ebbe a gyors, szabálytalan periódusváltozású csoportba tartoztak.

Az 1980-as évektől a fotometriai űrtávcsövekig

A számítástechnika csillagászati megjelenése és ezzel a különböző idősor-analizáló programok (pl. diszkrét Fourier-analízis, fázisdiagram-módszer, fűzérhossz-módszer) elterjedése új lendületet adtak a változócsillagászatnak. Előtérbe került egyes kiválasztott, egyedi csillagok minél részletesebb vizsgálata. Ekkor vált nyilvánvalóvá, hogy a korábbi észlelési stratégia helyett az egyes csillagok pulzációs fázisait időben minél jobban lefedő mérésekre kell törekedni. A részletes idősor-analízishez az addig felhalmozott észlelési anyag kevés és nem megfelelő minőségű. Jellemző például, hogy az első Blazskó RR Lyrae-ről készült részletes Fourier-analízist csak 1995-ben publikálták (Kovács, 1995). Az 1990-es évek végén a szilárdtest-detektorok (CCD-kamerák) elterjedésével több nagy égterületet monitorozó program is indult. Bár ezek a nagy látószögű kamerákkal felszerelt kis automata távcsöveket használó tudományos kísérletek, mint pl. a ROTSE (Kehoe és társai, 2001), a MACHO (Alcock és társai, 1997), vagy az OGLE (Udalski és társai, 1992, 1997; Udalski, 2003) eredetileg nem változócsillagászati célúak voltak, de idősor-adatbázisaik a változócsillagokra, köztük az RR Lyrae csillagokra is óriási mennyiségű adattal szolgáltak. Ráadásul ezek az adatsorok hosszú (több éves) homogén adatsorok, így pl. Fourier-analízisre kiválóan alkalmasak. Vannak azonban komoly hiányosságaik is. A 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 a legszerencsésebb. Mindezen hátrányok együttes kiküszöbölésére indult 2003-ban intézetünkben Jurcsik Johanna vezetésével a Konkoly Blazhko Survey (Jurcsik, 2005; Jurcsik és társai, 2009), illetve hasonló megfontolások vezették Katrien Kolenberget (KU Leuven) nemzetközi koordinált észlelési kampányok megszervezésére (Kolenberg és társai, 2006).

Az említett felmérések néhány fontosabb eredménye 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 nemlineárisak. Az ezekkel a frekvenciákkal (és a hozzájuk tartozó amplitúdókkal és fázisokkal) jellemzett szinuszfüggvényeket levonva a fénygörbéből és a különbséggörbék Fourier-transzformáltját megvizsgálva a Blazskó-effektust nem mutató RRab és RRc csillagokban nem találtak további szignifikáns frekvenciákat. A két módusban pulzáló (RRd) csillagokban a két pulzációs frekvencián és azok harmonikusain kívül a két frekvencia különböző lineáris kombinációi is megjelennek, ami a módusok nemlineáris csatolódását jelzi.

A Blazskó-csillagok spektrumában a fő frekvencia és harmonikusai tripletekre hasadnak fel. 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- ill. csak frekvenciamodulált csillagok is (Kurtz és társai, 2000). Az égboltfelmérések azonosítottak olyan csillagokat is, amelyek

Fourier-spektrumában a szokásos tripllett-szerkezet helyett dublettek, másoknál pedig nem ekvidisztáns tripllettek jelentek meg (Alcock és társai, 2000, 2003; Moskalik és Poretti, 2003). Az egyedi csillagokat vizsgáló Konkoly Blazhko Survey egyre kisebb amplitúdójú modulációkat mutatott ki, így komolyan felvetődött, hogy kellően nagy pontosságnál minden RR Lyrae csillag Blazskó-effektust mutat.

A Blazskó-effektus magyarázatai

Már az egyedi RR Lyrae csillagok vizsgálatainál is elsősorban a pulzációelmélet egyik utolsó(?) nagy talányával a Blazskó-effektussal foglalkoztak a legtöbbit és ez az én dolgozatomban is központi helyet kapott. Így külön is kitérek erre. Noha az elmúlt száz évben fél tucatnyi különböző fizikai magyarázattal és ezek változataival próbálták a Blazskó-effektust értelmezni, ezek sorra-rendre „elvérezték” az észlelési tényekkel vívott csatákban. A három legtöbbet hivatkozottra térjünk itt is ki néhány szóban.

(i) A ferde rotátor modell (Cousens, 1983; Shibahashi, 2000) azt feltételezi, hogy a csillagnak mágneses dipóltere van. Az egyszerűsített számítások azt adták, hogy globális mágneses tér hatására a radiális módusok $l = 2$ -höz tartozó nemradiális módusokká torzulnak. Ekkor a forgó csillagra való különböző rálátás magyarázná 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 csillag színképében sem. Ráadásul – mivel a magyarázat tisztán geometriai – nem tud számot adni arról, ha a Blazskó-ciklusok nem tökéletesen egyformák, már pedig ilyen esetek már a földi észlelésekből is sejthetők voltak.

(ii) A radiális és nemradiális módusok rezonanciamodellei (Dziembowski és Mizerski, 2004; Nowakowski és Dziembowski, 2001; Van Hoolst és társai, 1998) azt feltételezik, hogy a radiális módussal együtt gerjesztődik egy nemradiális módus is. Ez úgy fordulhat elő, ha a nemradiális módusok sűrű spektrumában van olyan frekvenciájú módus, amely a radiális módus frekvenciájával rezonanciában van, pl. 1:1 rezonancia esetén a két frekvencia majdnem egybe esik. Itt a nemradiális módusok az $l = 1$ -hez tartoznak. A modell a modulációra a megfigyeltnél jóval kisebb (0,02 mag) amplitúdót ad, ráadásul a ciklusról ciklusra való változás magyarázata itt is hiányzik.

(iii) Talán ezért is vált hamar népszerűvé az észlelő csillagászok körében Stothers ötlete (Stothers, 2006), amelyben a moduláció okát a turbulens konvekció és 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 (Molnár és társai, 2012b; Smolec és társai, 2011). Nagyjából itt tartottunk a 2000-es évek közepe táján, amikor először a *CoRoT*, majd pedig a *Kepler*-űrtávcső elindult felfedező útjára.

Hazai előzmények

Egyszer egy kollégám azt mondta, az RR Lyrae csillagok kutatása olyan, mint az olimpián a 400 m-es vegyesúszás: „magyar szám”. Annak, hogy a magyar kutatók az RR Lyrae csillagok vizsgálatában a világ élvonalában vannak, a több évtized alatt az MTA CSFK KTM Csillagászati Intézetében (és jogelődeiben) felhalmozott óriási tudás és tapasztalat a legfőbb oka.

Az RR Lyrae csillagok hazai kutatását az 1929-ben, Berlinben doktori tanulmányait befejező Detre László indította el mindjárt hazatérése után (Szeidl, 2006). Eleinte ő és Las-

sovszky Károly végeztek vizuális észleléseket a galaktikus mezőben kiválasztott RR Lyrae csillagokról. Detre László 1934-ben indította meg nagyszabású fotografikus RR Lyrae projektjét, amely egészen 1958-ig tartott. A fény-elektron-sokszorozók csillagászati alkalmazása időközben forradalmasította az egyedi csillagok mérését. Ezekkel a fotolemezekkel elértnél sokkal pontosabb mérések váltak lehetővé. Az intézetben nemzetközileg is az elsők között (1949-ben) kezdődtek el a fotoelektromos mérések. A mezőbeli RR Lyrae csillagok mérése jellemzően fotoelektromos fotométerekkel történt, de párhuzamosan futott egy 1937-ben indított fotografikus program is, amelyben a közeli gömbhalmazok (M3, M5, M15 stb.) RR Lyrae csillagait követték elsősorban azok csillagfejlődés miatti periódusváltozásait keresve. A program utolsó felvételei az 1990-es években készültek. A CCD-kamerák megjelenése tette a fotografikus fotometriát idejét múlttá. Detre László 1942-es igazgatói kinevezése után a változócsillagászat – és ezen belül az RR Lyrae csillagok kutatása – az intézet egyik fő profiljává vált. Mint ilyen, a legtöbb intézetben dolgozó kutató kapcsolatba került a témával. A nemzetközileg legismertebbek közülük Detre László mellett Balázs Júlia, majd pedig Szeidl Béla voltak.

Az 1980-es évek végén Kovács Géza évekig az Egyesült Államokban a Floridai Egyetemen Robert Buchlerrel, a radiális pulzációelmélet egyik legismertebb nemzetközi szaktekinélyével dolgozott együtt, és ezzel az észlelés mellett megjelent az intézetben a legkorszerűbb elméleti modellezés is. A megerősödött szakmai kapcsolatnak köszönhetően előbb Kolláth Zoltán, majd legutóbb Szabó Róbert töltött több évet és dolgozott a radiális pulzáció modellezésén Floridában. A CCD-technika intézeti megjelenését követően 1998-ban újraindult a korábbi gömbhalmazészlelési program is Jurcsik Johanna vezetésével, Szeidl Béla szakmai támogatása mellett. Ehhez a programhoz csatlakozva tanultam meg én is az RR Lyrae csillagok vizsgálatának fortélyait, a CCD-adatok feldolgozásának módszereit. Részben ennek a programnak az eredményeiből, részben a 2003-ban korszerűsített svábhegyi 60 cm-es távcsövön indított és egyedi Blazskó RR Lyrae csillagokat vizsgáló Konkoly Blazhko Survey eredményeiből készült Jurcsik Johanna MTA doktori dolgozata 2005-ben (Jurcsik, 2005).

Az azóta eltelt időben ugyan több sikeres PhD-védés is történt részben vagy egészben az RR Lyrae csillagok témájában (Sóder Ádám, Molnár László, Plachy Emese), de MTA doktori értekezés a legutóbbi időig nem készült. 2016-ban nyújtotta be Szabó Róbert MTA doktori dolgozatát (Szabó, 2016), amelynek öt fejezetéből kettő foglalkozik RR Lyrae csillagokkal kapcsolatos eredményekkel. Bár Szabó Róberttel mind a *CoRoT* mind a *Kepler*-űrtávcsővel kapcsolatos munkákban szorosán együttműködtünk, eredményeink jól szétválaszthatók. Dolgozatának egyik RR Lyrae csillagokra vonatkozó fejezete egy új jelenség, a perióduskettőződés (PD) felfedezését, annak a Blazskó-effektussal való kapcsolatát és a jelenség erősségének időbeli változásait tárgyalja. A másik fejezet az Extra frekvenciák RR Lyrae csillagokban címet viseli. Ebben egyrészt a felhangban (is) pulzáló RRc és RRd csillagokban megjelenő 0,61 periódusarányú kis amplitúdójú frekvenciák megjelenésével, azok jellemzőivel és magyarázatával foglalkozik, másrészt a *CoRoT* RR Lyrae minta RRab és RRc csillagainak extra frekvenciáit vizsgálja elsősorban azok időbeli viselkedését kutatva. A jelenségekről dolgozatomban hivatkozásszinten van csak szó, a tézisekben megfogalmazott eredményekben nincs.

Célkitűzések

Már a *CoRoT* űrtávcső felbocsátása előtt nyilvánvaló volt számomra, hogy sikere esetén olyan adatsorokat fog szolgáltatni, amilyenekkel még nem volt dolgunk. A földi légkör zavaró hatásaitól mentes, pontos, egyenletesen mintavételezett és mintegy fél év hosszúságú adatsor addig egyetlen változócsillagról sem állt rendelkezésre. Ezért is csatlakoztam örömmel

mel 2005-ben a Paparó Margit vezette intézeti *CoRoT* projekthez. A személyes célom az RR Lyrae csillagok úradatsorainak vizsgálata és azon keresztül ezen csillagok jobb megismerése volt. Kiemelt figyelemmel a rejtélyes Blazskó-effektusra, amely látszólagos egyszerűsége ellenére száz év alatt sem adta meg magát az öt vizsgáló kutatóknak. Az RR Lyrae csillagok önmagukon túlmutató jelentőségét (mint a kozmikus távolságlétra kulcselemei, illetve a csillagfejlődési és a pulzációelméletek tesztobjektumai) fentebb már részleteztem. És persze titkon azt is reméltem, hogy talán találok valami teljesen új, még senki által nem látott váratlan jelenséget is. A *CoRoT* majd pedig az azt követő *Kepler* még túl is teljesítette ezeket a várakozásokat.

Vizsgálati módszerek

A dolgozatom túlnyomó részében űrtávcsövek észlelési idősoraival foglalkoztam. Az adatok, bár mire eljutottak hozzám, jellemzően már keresztülmentek az űrtávcsövek adatfeldolgozási rendszerén, mégsem voltak mindig alkalmasak az azonnali tudományos feldolgozásra. Ezért saját programot fejlesztettem ki pl. az észlelési adatsorok trend- és ugrásmentesítésére, vagy a *Kepler* pixeladatokat egyedi apertúrákon újrafotometráltam. Utóbbihoz a *Kepler* GO által kifejlesztett PYRAF csomagot és saját programokat használtam.

A tudományos feldolgozásra kész idősorokat általában a MUFRAN (Kolláth, 1990), a PERIOD04 (Lenz és Breger, 2005), vagy a SIGSPEC (Reegen, 2007) programcsomagokkal vagy ezek kombinációival analizáltam. Bár az idősorok frekvenciatartamának meghatározására mindhárom csomag a Fourier-transzformáltat használja, de az egyéb feladatok elvégzésére (pl. szignifikanciaszint kiszámítása, nemlineáris görbeillesztés, Fourier-paraméterek időfüggésének vizsgálta stb.) általában az egyik, vagy másik alkalmasabb. Ennek megfelelően választottam meg egy-egy adott feladat megoldásához a számomra optimális programot.

A fénygörbék és azok Fourier-spektrumai mellett fontos vizsgálatokat végeztem az O–C diagramokon (pl. Sterken 2005) és azok Fourier-spektrumain is. Megjegyzendő, hogy bár a változócsillagok – köztük az RR Lyrae csillagok – hosszú időskálájú periódusváltozásait évtizedek óta vizsgálták ezzel a módszerrel, az első Blazskó-ciklusokat végigkövető O–C diagram is az én egyik munkámban jelent meg. Végül de nem utolsósorban modulált jelek viselkedését vizsgáltam analitikusan, ill. szintetikus fénygörbéken is.

Új tudományos eredmények – a tézispontok

1. Új jelenségek Blazskó R Rab csillagok nagy pontosságú idősoraiban

A *CoRoT* fotometriai űrtávcső által mért egyes RR Lyrae csillagok részletes vizsgálatával több olyan felfedezést is tettem, amelyek a későbbiekben más csillagok esetén is fontosnak, vagy éppen általános jelenségnek bizonyultak.

- a) Első ízben mutattam ki egy Blazskó RR Lyrae csillag – a V1127 Aql – fénygörbéjének Fourier-spektrumában 4. rendnél magasabb rendű (egészen a 8. rendig követhető) oldalcsúcsokat. Ez a tény önmagában erősen csökkenti az effektusra korábban felvetett mágneses ferde rotátor modell valószínűségét, hiszen az kvintuplett-szerkezetet jósol. A detektált oldalcsúcsok száma a harmonikus renddel nőtt, amit később a frekvenciamoduláció (FM) jeleként azonosítottam (v.ö. 6.c. pont).
- b) Az V1127 Aql O–C diagramjának segítségével első ízben mutattam meg a Blazskó-effektus frekvenciamodulációjának nemlinearitását. Szintén elsőként sikerült detektál-

nom az f_B Blazskó-frekvencia második harmonikusát ($3f_B$) is a fénygörbe Fourier-spektrumában. Ez a Blazskó-effektus amplitúdómodulációjának (AM) erős nemlinearitását jelzi.

A tézisponthoz tartozó publikáció: 1

2. Monoperiodikus RRab csillagokra vonatkozó eredmények

- a) Tanulmányoztam Blazskó-effektust nem mutató RRab csillagok *CoRoT* mintáján a Fourier-amplitúdók és fázisok harmonikus rend szerinti függvényének lefutását. Azt találtam, hogy az amplitúdólefutások fenomenologikusan hasonlóak egymáshoz, ugyanakkor egyfajta periódustól függő sorozatot alkotnak. Az egyes csillagok fázisainak lefutása egymástól szét tartó. Az észlelt függvényeket összevetettem a rendelkezésre álló elméleti munkákkal. Fő következtetésem az, hogy a jelenlegi modellek csak a fénygörbék globális leírására alkalmasak, a finomszerkezetek megragadására nem. A használt amplitúdó- és fázislefutási diagramok, mivel igen érzékenyek a fénygörbék egyedi finomszerkezetére, alkalmas eszközök lehetnek a jövőben arra, hogy a modelleket az észlelésekkel összhangba hozzuk.
- b) A *CoRoT* űrtávcső sűrű mintavételezésű (1 adatpont/32 s) adatsorából elsőként sikerült kimutatnom egy RR Lyrae csillag (a CM Ori) pulzációs ciklusának szignifikáns eltérését a szigorúan vett periodikusságtól. A csillag pulzációs periódusának hossza ciklusonként 1-2 másodpercet változik véletlenszerűen, vagyis az RR Lyrae csillagok pulzációja sem óraműszerűen pontos.
- c) Empirikus képletek segítségével meghatároztam a *CoRoT* RRab minta alapvető fizikai paramétereit (tömeg, luminozitás, effektív hőmérséklet, felszíni gravitációs gyorsulás, fémtartalom).

A tézisponthoz tartozó publikáció: 4.

3. A Blazskó csillagok általános jellemzői

A *Kepler* által észlelt 37 RRab csillag közül 17-ről mutattam ki egyértelműen a Blazskó-effektust. A *Kepler*-mezőben korábban ez egyedül az RR Lyr esetében volt ismeretes, így tulajdonképpen „felfedeztem” a *Kepler* Blazskó-mintát.

- a) A *Kepler* RRab csillagok 49%-a (18 csillag) bizonyult moduláltnak, míg 19 csillag esetében (a minta 51%-a) ilyesminek semmilyen jelét sem sikerült kimutatnom. A csillagok számát a Blazskó-amplitúdó függvényében állandónak találtam. Ezzel cáfoltam egy korábbi sejtést, ami a növekvő pontossággal növekvő számú Blazskó-effektust mutató RR Lyrae csillagot várt (Jurcsik és társai, 2009).
- b) Mintám minden Blazskó-csillagja estében kimutattam az amplitúdó- és fázismoduláció együttes jelenlétét. A kétféle moduláció relatív erőssége csillagról csillagra változik, de a periódusa mindig azonos. Vagyis a Blazskó-effektust magyarázó bármely elmélet csak akkor lehet sikeres, ha mindkét modulációt egyszerre képes magyarázni. Együttal pontosítottam a Blazskó-effektus definícióját is: csak az egyszerre amplitúdó- és frekvenciamodulált csillagot lehet Blazskó-effektust mutatónak nevezni.

- c) Összefüggést találtam a Blazskó-effektus periódusa és az amplitúdómoduláció amplitúdója között. A hosszabb Blazskó-periódusoknak van, illetve lehet nagyobb modulációs amplitúdója, míg a rövid periódusú Blazskó-effektusok amplitúdója nem lehet tetszőlegesen nagy.

A tézispontokhoz tartozó publikációk: 5, 6

4. A Blazskó-effektus mint multiperiodikus jelenség

- a) A *Kepler*-űrtávcső 17 elemű Blazskó RRab mintájának 13 csillagára egyértelmű többszörös modulációt mutattam ki. A multiperiodikus Blazskó-effektus aránya minden korábbi becslésnél jóval magasabb: 78%. Arra jutottam tehát, hogy a Blazskó-effektus alapvetően többszörös modulációként jelenik meg, és nem egy szabályos monoperiodikus jelenség.
- b) Mindaddig a kisebb amplitúdójú (másodlagos) modulációs periódus szinte mindig hosszabb volt, mint az elsődleges. Az egyetlen ismert kivétel az RZ Lyr (Jurcsik és társai, 2012) volt. A kis *Kepler*-mintában mindjárt öt további esetet is találtam rövidebb másodlagos modulációs periódusra. Nagyon valószínű tehát, hogy a korábbi eredményt kiválasztási effektus okozta.
- c) Bebizonyosodott, hogy az elsődleges és másodlagos moduláció definíciója relatív. Három esetben is az f_B elsődleges amplitúdómodulációs frekvencia amplitúdója kisebb a frekvenciamodulációban, mint az f_S másodlagos modulációé.
- d) A modulációs frekvenciák lineáris kombinációinak megjelenése a spektrumokban, a modulációk nemlineáris fizikai csatolását jelzik. Számos csillagnál szubharmonikus frekvenciákat ($f_B/2$ és-vagy $f_S/2$) is kimutattam. Az esetek többségében a két modulációs periódus aránya kis egész számokkal írható le. Ez a két moduláció rezonáns csatolódására utal, de ennek a fizikai oka egyelőre teljesen ismeretlen.

A tézispontokhoz tartozó publikációk: 7, 8

5. Többszörös rezonanciák Blazskó-effektust mutató RRab csillagokban

Az alaplómódusban pulzáló Blazskó-effektust mutató RR Lyrae (a továbbiakban Blazskó RRab) csillagok Fourier-spektrumában az űrfotometria három jellegzetes, korábban ismeretlen, frekvenciaszerkezetet azonosított.

- a) Olyan kis amplitúdójú frekvenciákat azonosítottam Blazskó RRab csillagok Fourier-spektrumában, amelyek nem tartoznak a perióduskettőződés (PD) jelenségéhez (Kolenberg és társai, 2010a; Szabó és társai, 2010), hanem a radiális első vagy második radiális felhang (illetve ezen frekvenciák lineáris kombinációi az alaplómódus frekvenciáival) pozíciójában jelentek meg. Ezzel beazonosítottam a később hármas rezonanciákkal magyarázott jelenséget (Molnár és társai, 2012a).
- b) Első ízben mutattam ki egy Blazskó RRab csillag – a V1127 Aql – Fourier-spektrumában olyan kis amplitúdójú módus frekvenciáját, amely sem a PD-jelenséggel, sem pedig a hármas rezonanciákkal (5.a. pont) nem magyarázható. Ilyen frekvenciákat azután több más Blazskó RRab csillag űrfotometriai méréseiben is kimutattam.

- c) A előző pontban említett frekvenciákat rendszerint független nemradiális módusok gerjesztésével magyarázzák. Megmutattam, hogy szinte az összes ilyen frekvencia felírható az alaplómódus és a második felhang lineáris kombinációjaként is. Ezzel a meglévő radiális pulzációs kódok számára vizsgálhatókká váltak.

A tézispontozhoz tartozó publikációk: 1, 2, 3, 5, 7, 9

6. A moduláció matematikájának következményei a Blazskó-effektusra

Fénygörbéket állítottam elő modulált jelekként úgy, hogy a vivőjelnek monoperiodikus RR Lyrae fénygörbéket leíró véges Fourier-összegeket vettem. Modulációs függvénynek pedig különböző periodikus függvényeket tettem fel az egyszerű szinuszfüggvénytől az általános multiperiodikus függvényekig.

- a) Az amplitúdómoduláció modulációs függvényének megfelelő megválasztásával a szintetikus fénygörbéim jól reprodukálják a Blazskó-csillagok észlelt fénygörbéinek burkolóit. Többek között megmutattam, hogy nagyon nagy modulációs mélységű amplitúdómoduláció magyarázhatja a V445 Lyr *Kepler*-fénygörbéjének különös alakját, vagy pl. a több különböző frekvenciájú moduláció együttes jelenléte esetén a szintetikus fénygörbékén megjelennek az észlelések lebegési jelenségeket, alternáló maximumokat, hosszú periódusú trendeket és periodikus amplitúdóváltozást mutató burkolói.
- b) Kimutattam, hogy az frekvenciamodulált jelek spektrumaiban a pulzációs frekvencia és annak harmonikusai körül megjelenő multiplettekben (a fázismodulációval szemben) a kimutatható oldalcsúcsok száma a harmonikus renddel nő. Ezzel beláttam, hogy az észlelt Blazskó-csillagokban (v.ö. 1.a. pont) a fázisváltozást frekvenciamoduláció okozza és nem fázismoduláció.
- c) A modulációs oldalcsúcsok Fourier-amplitúdóinak arányát a harmonikus rend függvényében az elsőfajú Bessel-függvények, ill. azok szorzatai határozzák meg. Következésképpen ezek az arányok általában nem monoton csökkennek a növekvő harmonikus renddel. Ez egybevág az észlelésekből kapott és akkor magyarázat nélkül maradt eredményekkel (pl. Jurcsik és társai 2005; Smith és társai 1999).
- d) A szimultán amplitúdó- és frekvenciamoduláció esetén az oldalcsúcsok szerkezete általában már a szinuszos esetben is aszimmetrikus. Ez az aszimmetria képes az egyik oldal csúcsait akár teljes egészében eltüntetni. Ezzel a dubletteket vagy nem egyenközű tripleteket tartalmazó RR Lyrae spektrumok (Alcock és társai, 2000, 2003; Moskalik és Poretti, 2003) magyarázhatókká váltak mint kombináltan modulált csillagok egy, illetve két modulációs frekvenciával.
- e) Megmutattam, hogy szimultán amplitúdó- és frekvenciamoduláció esetében, nincs egyetlen olyan fázis sem, amikor a modulált jel függvénye egybeesik egy nemmodulált jelet leíró függvénnyel. Mivel a Blazskó-csillagok mindig mindkét modulációt mutatják (v.ö. 3.b. pont), ezzel eldőlt egy régen fennálló kérdés is arról, hogy a Blazskó-csillagok melyik fázisban felelnek meg egy monoperiodikus csillagnak (Jurcsik és társai 2002, és irodalom benne): egyikben sem.

A tézispontozhoz tartozó publikációk: 10, 11, 12, 13, 14, 15.

A tézispontokhoz kapcsolódó saját publikációk

- 1 Chadid, M., **Benkő, J. M.**, Szabó, R. Paparó, M., Chapellier, E., Kolenberg, K., Poretti, E., Bono, G., Le Borgne, J.-F., Trinquet, H., Artemenko, S., Auvergne, M., Baglin, A., Debosscher, J., Grankin, K. N., Guggenberger, E., Weiss, W. W. (2010) *A&A*, 510, A39
- 2 Guggenberger, E., Kolenberg, K., Chapellier, E., Poretti, E., Szabó, R., **Benkő, J. M.**, Paparó, M. (2011) *MNRAS*, 415, 1577
- 3 Poretti, E. Paparó, M., Deleuil, M. Chadid, M., Kolenberg, K., Szabó, R., **Benkő, J. M.**, Chapellier, E., Guggenberger, E., Le Borgne, J. F., Rostagni, F., Trinquet, H., Auvergne, M., Baglin, A., Sarro, L. M., Weiss, W. W. (2010) *A&A*, 520, A108
- 4 **Benkő, J. M.**, Szabó, R., Derekas, A., & Sódor, Á. (2016) *MNRAS*, 464, 1553
- 5 **Benkő, J. M.**, Kolenberg, K., Szabó, R. Kurtz, D. W., Bryson, S., Bregman, J., Still, M., Smolec, R., Nuspl, J., Nemec, J. M., Moskalik, P., Kopacki, G., Kolláth, Z., Guggenberger, E., di Criscienzo, M., Christensen-Dalsgaard, J., Kjeldsen, H., Borucki, W. J., Koch, D., Jenkins, J. M., van Cleve, J. E. (2010) *MNRAS*, 409, 1585
- 6 **Benkő, J. M.** & Szabó, R. (2015) in *The Space Photometry Revolution – CoRoT Symposium 3, Kepler KASC-7 Joint Meeting*, eds. García, R. A. & Ballot, J., EPJ Web of Conf. 101, 06008
- 7 **Benkő, J. M.**, Plachy, E., Szabó, R., Molnár, L., & Kolláth, Z. (2014) *ApJS*, 213, 31
- 8 **Benkő, J. M.** & Szabó, R. (2015) *ApJL*, 809, L19
- 9 **Benkő, J. M.** & Szabó, R. (2014) in *Precision Asteroseismology*, eds. Guzik, J. A., Chaplin, W. J., Handler, G. & Pigulski, A., IAU Symp. 301, p. 383
- 10 **Benkő, J. M.**, Paparó, M., Szabó, R., Chadid, M., Kolenberg, K., Poretti, E. (2009) in *Stellar Pulsation: Challenges for Theory and Observation*, eds. Guzik J. A. & Bradley P., AIP Conf.Proc. 1170, p. 273
- 11 **Benkő, J. M.**, Szabó, R., & Paparó, M. (2011) *MNRAS*, 417, 974
- 12 Guggenberger, E., Kolenberg, K., Nemec, J. M., Smolec, R., **Benkő, J. M.**, Ngeow, C.-C., Cohen, J. G., Sesar, B., Szabó, R., Catelan, M., Moskalik, P., Kinemuchi, K., Seader, S. E., Smith, J. C., Tenenbaum, P., Kjeldsen, H. (2012) *MNRAS*, 424, 649
- 13 **Benkő, J. M.**, Szabó, R. & Paparó, M. (2012) in *New Horizons in Time-Domain Astronomy*, eds. Griffin, E., Hanisch, R., & Seaman, R., IAU Symp. 285, 286
- 14 **Benkő, J. M.** & Paparó, M. (2013) in *Progress in Physics of the Sun and Stars: A New Era in Helio- and Asteroseismology*, eds. Shibahashi, H. & Lynas-Gray, A. E., ASP Conf. Ser. 479, 531
- 15 **Benkő, J. M.** & Szabó, R. (2016) in *RRL2015: High-Precision Studies of RR Lyrae Stars*, eds. Szabados, L., Szabó, R. & Kinemuchi, K., Comm. Konkoly. Obs. No. 105, p. 197

Külső hivatkozások

- Alcock, C., Allsman, R., Alves, D. et al. 1997, ApJ, 486, 697
- Alcock, C., Allsman, R., Alves, D. et al. 2000, ApJ, 542, 257
- Alcock, C., Alves, D. R., Becker, A. et al. 2003, ApJ, 598, 597
- Bailey, S. I. 1902, Ann. Astron. Obs. Harvard. College, No. 38.
- Benedict, G. F., McArthur, B. E., Feast, M. W. et al. 2011, AJ, 142, id.187
- Blazhko, S. N. 1907, Astron. Nachr., 175, 325
- Böhm-Vitense, E. 1989-1992, Introduction to Stellar Astrophysics Vol. 1-3, Cambridge Univ. Press
- Catelan, M. & Smith, H. A. 2015, Pulsating Stars, Wiley-VCH, Weinheim
- Chadid, M. & Gillet, D., 1996, A&A, 308, 481
- Chadid, M. & Chapellier, E., 2006, A&A, 456, 305
- Chadid, M., Vernin, J. & Gillet, D. 2008, A&A, 491, 537
- Christensen-Dalsgaard, J. 2014, Lecture Notes on Stellar Structure and Evolution, 5th Edition, CreateSpace Independent Publishing Platform
- Cousens, A. 1983, MNRAS, 203, 1171
- Cox, J. P. 1980, Theory of Stellar Pulsation, Princeton Univ. Press
- Dékány, I., Minniti, D., Catelan, M., et al. 2013, ApJ, 776, L19
- Demarque, P., Zinn, R., Lee, Y.-W. & Yi, S. 2000, AJ, 119, 1398
- Dorman, B. 1992, ApJS, 81, 221
- Dziembowski, W. A. & Mizerski, T., 2004, Acta Astron., 54, 363
- Feuchtinger, M. U. 1999, A&A, 351, 103
- Fokin, A. B. & Gillet, D. 1997, A&A, 325, 1013
- Fokin, A. B., Gillet, D. & Chadid, M. 1999, 344, 930
- Gautschi, A. 2003, The History of Radial Stellar Pulsation Theory, <http://e-collection.library.ethz.ch/eth-28283-01.pdf>
- Geroux, C. M., & Deupree, R. G. 2015, ApJ, 800, id.35
- Girardi, L., Bressan, A., Bertelli, G. & Chiosi, C. 2000, A&AS, 141, 371
- Jurcsik, J., Benkő, J. M. & Szeidl, B. 2002, A&A, 390, 133
- Jurcsik, J. 2005, Többmódusú csillagoscillációk és fejlődési effektusok az 1–4 ciklus/nap frekvenciájú pulzáló változók körében, MTA doktori értekezés, Bp.
- Jurcsik, J., Sódor, Á., Váradi, M., et al. 2005, A&A, 430, 1049
- Jurcsik, J., Sódor, Á., Szeidl, B. et al. 2009, MNRAS, 400, 1006
- Jurcsik, J., Hajdu, G., Szeidl, B. et al. 2012, MNRAS, 419, 2173
- Kapteyn, J. C. 1890, AN, 125, 165
- Kehoe, R., Akerlof, C., Balsano, R. et al. 2001, ApJ, 554, L159
- Kolenberg K., Smith, H. A., Gazeas, K. D. et al. 2006, A&A, 459, 577
- Kolenberg, K., Szabó, R., Kurtz, D. W. et al. 2010a, ApJ, 713, L198
- Kolenberg K., Fossati, L., Shulyak, D. et al. 2010b, A&A, 519, A64
- Kolláth, Z. 1990, Konkoly Observatory Occasional Technical Notes, No. 1, 1
- Kolláth, Z., & Buchler, J. R. 2001, in Stellar Pulsation – Non-linear Studies, eds. Takeuti, M. & Sasselov, D. D., ASS Library Series vol. 257, (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht), 29
- Kolláth, Z., Buchler, J. R., Szabó, R., & Csubry, Z. 2002, A&A, 385, 932
- Kovács, G., 1995, A&A, 295, 693
- Kurtz, D. W. et al., 2000, in Szabados L., Kurtz D. W., eds, The Impact of Large-Scale Surveys on Pulsating Star Research, ASP Conf. Ser. 203, p. 291
- Leavitt, H. S. & Pickering, E. C. 1912, Harvard College Obs. Circ. 173, 1
- Lenz, P. & Breger, M., 2005, Co.Ast., 146, 53
- Lub, J. 2016, in RRL2015 – High-precision Studies of RR Lyrae Stars, eds. Szabados L., Szabó, R. & Kinemuchi, K., Comm. Konkoly Obs., 105, 39
- Marconi, M., Coppola, G., Bono, G., et al. 2015, ApJ, 808, 50
- Molnár, L., Kolláth, Z., Szabó, R., et al. 2012a, ApJ, 757, L13
- Molnár, L., Kolláth, Z. & Szabó, R. 2012b, MNRAS, 424, 31
- Moskalik, P. & Poretti, E. 2003, A&A, 398, 213
- Mundprecht, E., Muthsam, H. J., & Kupka, F. 2013, MNRAS, 435, 3191
- Nowakowski, R. M. & Dziembowski, W. A., 2001, Acta Astron. 51, 5
- Oláh, K. & Szeidl, B. 1978, Comm. Konkoly Obs. No.71
- Pietrukowicz, P., Kozłowski, S., Skowron, J., et al. 2015, ApJ, 811, 113
- Pietrzyński, G., Thompson, I. B., Gieren, W. et al. 2012, Nature, 484, 75
- Preston, G. W. 2009, A&A, 507, 1621
- Preston, G. W., Smak, J. & Paczyński, B. 1965, ApJS, 12, 99
- Reegen, P., 2007, A&A, 467, 1353

- Schwarzschild, M. 1941, ApJ, 94, 245
Shapley, H. 1916, ApJ, 43, 217
Shibahashi, H., 2000, in Szabados L., Kurtz D.W., eds., ASP Conf. Ser. Vol. 203, The Impact of Large-Scale Surveys on Pulsating Star Research, p. 299
Smith, H. A. 1995, RR Lyrae Stars, Cambridge Univ. Press
Smith, H. A., Barnett, M., Silbermann, N. A., & Gay, P. 1999, AJ, 118, 572
Smolec, R. & Moskalik, P. 2008, Acta Astron., 58, 193
Smolec, R., Moskalik, P., Kolenberg, K., et al. 2011, MNRAS, 414, 2950
Sterken, C. 2005, in The Light-Time Effect in Astrophysics, ed. C. Sterken, ASP Conf. Ser. 335, (ASP, San Francisco), 3
Stothers, R. B. 2006, ApJ, 653, 73
Struve, O. & Blaauw, A. 1949, ApJ, 108, 60
Szabó, R. 2016, Pulzáló változócsillagok és exobolygók kutatásai a precíziós űrfotometria korában, MTA doktori értekezés, Bp.
Szabó, R., Kolláth, Z., Molnár, L. et al. 2010, MNRAS, 409, 1244
Szeidl, B. 1965, Comm. Konkoly Obs. No.58
Szeidl, B., Oláh, K. & Mizser, A. 1986, Comm. Konkoly Obs. No.89
Szeidl, B. 2006, in Detre Centennial Conference, eds. Balázs, L. G., Szabados, L. & Holl, A., Comm. Konkoly. Obs. No. 104, p. 23
Udalski, A., Szymański, M., Kaluzny, J., Kubiak, M. & Mateo, M. 1992, Acta Astron., 42, 253
Udalski, A., Kubiak, M. & Szymański, M. 1997, Acta Astron., 47, 319
Udalski, A. 2003, Acta Astron., 53, 291
Unno, W., Osaki, Y., Ando, H., & Shibahashi, H. 1989, Nonradial Oscillation of Stars, Tokyo Univ. Press
Van Hoolst, T., Dziembowski, W. A. & Kawaler, S. D. 1998, MNRAS, 297, 536