

RR Lyrae vizsgálatok

Folytattuk a Kepler-úrtávcsővel korábban általunk felfedezett és megmagyarázott periódus-kettőződés vizsgálatát. Munkánk új magyarázathoz vezetett az évszázados Blazskó-rejtély eredetét illetően, ahogy ezt előző beszámolónkban is jeleztük. A beszámolási időszakban a Kepler short cadence adatait elemezve felfedeztük, hogy az egyik legjobban vizsgált csillag, a névadó RR Lyrae nemcsak alaphangban rezeg, de nagyon kis amplitúdóval az első felhang is jelen van. Azon kívül, hogy ez az első ilyen jellegű megfigyelés, a Budapest-Florida kóddal sikerült reprodukálnunk a jelenséget, és ezáltal egy új vizsgálati módszer, a nemlineáris asztroszeizmológia alapjait teremtettük meg. A több radiális módus egyidejű jelenléte lehetővé teszi ugyanis, hogy a nemlineáris frekvencia-eltolódások mellett az amplitúdókat is összehasonlítsuk a nemlineáris hidrodinamikai modelljeinkkel. Megállapítottuk, hogy az RR Lyrae a periódus-kettőződés mellett időnként 6 pulzációs ciklusonkénti ismétlődést mutat, amit szintén sikerült három radiális módus (alaphang, első felhang és a periódus-kettőződést létrehozó kilencedik felhang) kölcsönhatásaként modelljeinkben szimulálni (27).

A Kepler-mintában található egyik legérdekesebb és legkomplexebb Blazskó-változásokat mutató RR Lyrae, a V445 Lyrae fényváltozásait elemeztük, ami nem csak ciklusról ciklusra bekövetkező változásokat mutat a modulációt tekintve, hanem további – valószínűleg nemradiális módusoktól származó frekvenciacsúcsokat, és a második radiális felhang jelenlétére utaló jeleket is. Általános esetben megmutattuk, hogy a periódus-kettőződés káoszhoz is vezethet, ennek kimutatására vizsgálatokat kezdtünk a Kepler-fénygörbékben. Találtunk olyan három radiális módust tartalmazó modellt, ami nagyban hasonlít a megfigyelt változásokhoz. Módszert dolgoztunk ki a káosz detektálására alkalmas „global flow reconstruction” eljárás hatékonyságának növelésére instrumentális trendeket tartalmazó megfigyelések esetében (23, 28, 44).

Cefeidák

Alapos vizsgálatnak vetettük alá a Kepler-látómezőben található egyetlen cefeida, a V1154 Cygni fénygörbe- és periódusváltozásait. Kimutattuk, hogy a lefedett 120 pulzációs ciklus alatt a korábban konstansnak gondolt pulzációs periódus 0,015-0,020 napos szórással szabálytalan változást mutat, de értéke hosszú távon állandó. A fénygörbe alakjának változására utaló gyenge korrelációt találtunk a fénygörbe alakját leíró Fourier-paraméterek és az O-C értékek között. A változások pontos magyarázata nem ismert. Az új jelenség további vizsgálatára távcsőidőt pályáztunk és nyertünk el a kanadai MOST-úrtávcsőre, két cefeida vizsgálatára. Ezek adatainak feldolgozását megkezdtük. Fotometriai és spektroszkópai adatok elemzésével nyolc cefeida esetében mutattuk ki, hogy spektroszkópai kettős tagjai, aminek elsősorban a kozmológiai távolságmérésben kulcsszerepet játszó periódus-luminozitás összefüggés pontosabb kalibrálásában van jelentősége (22, 29, 46).

Delta Scuti csillagok

A fősorozaton található delta Scuti változócsillagok kutatása új lendületet kapott a Kepler révén, hiszen a korábban megfigyelhetetlen kis amplitúdójú pulzációs módusok is elérhetőkké váltak. Továbbra is fontos probléma azonban az egyes módusok azonosítása és a módusszelekció kérdése. Több, a Kepler által megfigyelt delta Scuti csillag vizsgálatában is részt vett csoportunk. Így a KIC 11754974 jelű, fémszegény, elfejlődött, A színképtípusú csillagban, ami sok kombinációs frekvenciát mutat Fourier-spektrumában. A modellszámítások 1,50-1,56 naptömeget adnak erre az objektumra, ami mellel egy 343 nap keringési idejű kettős rendszer tagja, ily módon a pulzáló körül keresendő kísérők programunkba is illeszkedik (41). Megmutattuk, hogy a Kepler által megfigyelt KIC 4840675 három csillagból áll: egy gyorsan forgó A színképtípusú csillagból és két halványabb, naptípusú kísérőből. Az A csillag delta Scuti változó egy domináns és sok kis amplitúdójú módussal, valamint több, kisfrekvenciás változással. A legnagyobb amplitúdójú kisfrekvenciás jel a csillag forgásával azonosítható. Azonban a rendszer legérdekesebb aspektusa három független frekvencia az 1,4-1,5 mHz

tartományban, ami messze a kívül esik a delta Scuti csillagok tipikus frekvenciaintervallumán, eredete csak további megfigyelések révén dönthető el (21). A KIC 5988140 jelű csillag is érdekes, megmagyarázatlan különlegességeket tartogatott a szokásos delta Scuti jellegű változásokon kívül. A fény- és radiális sebesség görbék hasonló, stabil kettős hullám alakú változást mutatnak, melyek vizsgálataink szerint nem magyarázhatók sem kettősséggel, sem delta Scuti és gamma Doradus típusú pulzációk együttes jelenlétével, sem pedig a csillag forgásának és egy esetleges aszimmetrikus felszíni fényesség-eloszlásnak a kombinációjával. A magyarázathoz itt is további vizsgálatok szükségesek (38).

Egyedülálló hármas rendszer

Folytattuk a csoportunk által a Kepler-mezőben felfedezett hierarchikus fedési hármas rendszer, a HD181068 vizsgálatát. A Kepler 1 perces időfelbontású adataira alapozva olyan új eljárást fejlesztettünk ki, mely a rendszer abszolút fizikai paramétereit (tömeg, sugár) és pályaparamétereit is minden korábbi mérésnél pontosabban szolgáltatja. A módszer a fedések időpontjaiban bekövetkező változásokat ötvözi a radiális sebesség mérésekkel. Megállapítottuk, hogy a rendszert alkotó három csillag pontosan egy síkban és azonos irányban kering. Elméleti úton tanulmányoztuk a Trinityhez hasonló hierarchikus hármas rendszerekben megfigyelhető árapály keltette oszcillációt. Jó egyezést találtunk a modellek előrejelzései és a Kepler szolgáltatta megfigyelések között. Megvizsgáltuk az árapály okozta oszcillációk és rezonanciák hatását a pályaelem-változásokra. Azt találtuk, hogy főként a két kisebb csillagból álló rendszer pályamérete változik jelentősen az elfejlődött központi vörös óriás körül, a változás mértéke pedig szoros kapcsolatban van a főkomponens csillagfejlődésével, illetve az ezen keresztül megvalósuló árapály-rezonanciákkal (34, 36).

Exobolygók

A KOI-13 általunk felfedezett különlegessége abban áll, hogy első példája a gravitációs sötétedés miatt torzult tranzitot mutató exobolygóknak. A Kepler short cadence adatok alapján megállapítottuk, hogy a csillag forgása 5:3 rezonanciában áll a bolygó keringésével, amire szintén nem volt ismert példa korábban. A csillag forgás miatti lapultsága elméletileg hosszú távon változást okoz a pályaelemekben, amit a tranzithossz növekedése formájában sikerült kimutatnunk. 75-100 éven belül a bolygó fedései meg is szűnhetnek. Részt vettünk a WASP-12b irodalomban említett lehetséges tranzitidőpont-változásának tisztázására szervezett nemzetközi megfigyelési kampányban. A kapott adatok azt mutatják, hogy az eddig közölt megfigyelésekkel összhangban a periodikus változásokat egy 0,1 Jupiter-tömegű, 3,6 napos excentrikus pályán keringő extra kísérő magyarázza legjobban (32, 39).

Kis tömegű kísérők felfedezése

Folytattuk a Kepler-minta csillagai körül keringő kis tömegű kísérők kimutatását célzó kutatásokat. A Kepler-által felfedezett mintegy 160 forró Jupiter tranzitidőpontjainak változásait (TTV) vizsgáltuk, és meglepő módon periodikus vagy többszörösen periodikus jelölteket találtunk. Ez azért különös, mert a jelenlegi paradigma szerint a forró Jupiterek magányosak, míg a Kepler által talált sok többszörös bolygórendszer között (ezek mind viszonylag rövid keringési periódusú bolygókat tartalmaznak) a legnagyobb planéták Neptunusz-méretűek. Viszont amennyiben a TTV-jelek valódiak, azok háttérben dinamikai hatásokat kell feltételeznünk. A periodikus jeleket klasszikus Fourier-, a megbízhatósági szinteket bootstrap-analízis segítségével kerestük. Elsőként mutattunk rá, hogy az egyenletes mintavételezés kölcsönhat a tranzitmeghatározási módszerrel, így stroboszkópikus – látszólagos – TTV-jelet kelthet. Hasonlóképpen a csillagaktivitás és a csillag forgása is okozhat hamis jeleket. Végül a mintából minden lehetséges nem-dinamikai eredetűt kizárva három jó, periodikus tranzitidőpont-változást mutató jelölt maradt. Következtetésünk, hogy ezek mozgását exoholdak vagy további bolygókísérők perturbálhatják. Folytattuk pulzáló változócsillagok körül keringő kis tömegű kísérők kimutatását célzó kutatásainkat is, az első eredményeket a balatonalmádi KASC5 konferencián mutatta

be a témavezető (48).

Összesen **18** cikkünk jelent meg impakt faktoral rendelkező folyóiratokban az OTKA-szám feltüntetésével (össz. IF: **80,932**). Csoportunk szervezte Balatonalmádiban a Kepler Asztroszeizmológiai Tudományos Konzorcium 5. éves konferenciáját. A főszervező Szabó Róbert volt, a helyi szervezőbizottságot pedig jelen OTKA-pályázat résztvevői alkották. A konferencián több mint 120 kutató vett részt a világ minden részéről, köztük összesen 20 magyar, számos fiatal kutató, diák és hallgató.

Az alábbi nemzetközi konferenciákon vettünk részt:

- *ECHO workshop*, Firenze (I) 2012. január
- *The Modern Era of Helio- and Asteroseismology*, Obergurgl (A) 2012. május
- *5. KASC konf.* Balatonalmádi (HU), Benkő J., Derekas A., Kiss L. és Kolláth Z. meghívott előadóként, 2012. június
- *Asteroseismology of large time-resolved astronomical surveys*, Leuven (B) 2012. szeptember
- *SPACEINN Kick-off meeting*, Brüsszel (B) 2013. február.

Látogatást tettünk és a projekt témájába vágó együttműködést ápoltunk több külföldi kutatóintézetben és egyetemen:

- Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics
- University of Sydney
- New Mexico State University.

A Kepler meghosszabbított missziójában megújult Kepler Asztroszeizmológiai Tudományos Konzorcium két munkacsoportját (Mira és félszabályos változók; Cefeida és RR Lyrae) továbbra is pályázatunk résztvevői, Kiss L. László és Szabó Róbert vezetik.

A beszámolási időszakban Derekas Aliz Akadémiai Ifjúsági díjat és Bolyai-ösztöndíjat, Szabó Róbert a Univ. of Sydney International Research Collaboration Awardját nyerte el. Csatlakozott a pályázathoz Plachy Emese, aki a PhD-disszertációján dolgozik a pályázat témájában.