Válaszok Szatmáry Károly kérdéseire

Szabó Róbert: Pulzáló változócsillagok és exobolygók kutatásai a precíziós űrfotometria korában

című akadémiai doktori értekezésével kapcsolatban

1.1 A kappa-mechanizmus szerinti pulzációt mi indíthatja be és mi állíthatja le?

Válasz: Mai tudásunk szerint a kappa-mechanizmus szerinti pulzáció ki- és bekapcsolása elsősorban a **csillagfejlődéssel** van kapcsolatban. A nukleáris folyamatok vezérelte csillagfejlődés révén a klasszikus instabilitási sávba történő be- és az onnét való kifejlődés okozza a pulzáció beindulását, illetve leállását. Az **1.1a ábra** illusztrálja, amint a különböző tömegű cefeidák ún. blue loop-jaik során keresztezik az instabilitási sávot. Az instabilitási sáv forró szélén a gerjesztésért felelős ionizációs zóna a csillag felszínéhez túl közel kerül, míg a vörös szélen az egyre hatékonyabbá váló konvekció akadályozza meg a pulzációt.



1.1a ábra Cefeida állapothoz vezető fejlődési görbék a Hertzsprung-Russell diagramon. A fekete görbék a különböző tömegű csillagok fejlődését mutatják (naptömeg-egységben), az alaphanghoz (folytonos), illetve az első felhanghoz (szaggatott) tartozó instabilitási sávokat a kék és vörös vonalak határolják (Valle és mtsai, A&A, 507, 1541, 2009).

A be- és kikapcsolás azonban nem pillanatszerű, hanem egy bizonyos **késleltetés** után következik be, amint azt Robert Buchler és Kolláth Zoltán analitikusan és hidrodinamikai szimulációkkal megmutatták (**1.1b ábra**).



1.1b ábra. A pulzációs amplitúdó fejlődése az instabilitási sávba történő belépéskor különböző paraméterek esetén (folytonos vonalak). A szaggatott görbe az elméleti, azonnali reakciót jelentő amplitúdófejlődést mutatja (Buchler és Kolláth ApJ, 573, 324, 2002) ldőnként napvilágot látnak olyan állítások, amik szerint egyes, az instabilitási sávban tartózkodó csillagok nem pulzálnak. Murphy és munkatársai (2015) a Kepler-adatok segítségével vizsgálták a kérdést. Arra jutottak, hogy néhány kémiai összetételét tekintve pekuliáris csillagot leszámítva, és figyelembe véve a csillagok paramétereinek meghatározásában fennálló bizonytalanságokat, a delta Scuti instabilitási sáv "tiszta", és az odakerülő csillagok mind pulzálnak. Más kutatók a fehér törpecsillagokkal kapcsolatban hasonló eredményeket kaptak (Gianninas A., Bergeron P., Fontaine G., ApJ, 631,1100, 2005, Gianninas A., Bergeron P., Fontaine G., AJ, 132, 831, 2006). Az eredmények arra mutatnak, hogy a diffúzió és egy kísérőcsillaggal történő kölcsönhatás esetleg megakadályozhatják a kappa-mechanizmus beindulását.

Bizonyos elméleti számítások (pl. Saio, MNRAS, 360, 1022, 2005) azt mutatják, hogy **erős** (~1kG) **mágneses tér** jelenléte meggátolhatja egyes kappa-mechanizmus által - mágneses tér hiányában egyébként - gerjesztett, alacsony felhangokhoz tartozó akusztikus p-módusok kialakulását gyorsan oszcilláló pekuliáris (roAp) csillagokban, míg ugyanabban a csillagmodellben gerjesztődő más pulzációs módusokra a mágneses tér nincs ilyen hatással.

1.2 A KIC-katalógusban lévő Teff és log g értékeknek mekkora lehet a hibája és az miből eredhet?

Válasz: A Kepler Input Catalog (KIC) *griz* Sloan szűrőkkel és egy speciális, ún D51-es (510 nm-re centrált, 15 nm szélességű) szűrővel készült fotometriai katalógus, melynek elsődleges célja a törpe- és óriáscsillagok elkülönítése volt a Kepler látómezejében (Brown és mtsai, AJ, 142, 112, 2011) szín-szín diagramok segítségével, és nem az effektív hőmérséklet és a log g pontos meghatározása. Az eredeti munka szerzői a Naphoz hasonló csillagok (4500-6500 K effektív hőmérséklet) tartományában ± 200 K, míg log g-ben 0,4 dex (random) hibát közöltek. A nagyon forró (nagy tömegű, vagy fehér törpe) és a hűvös (pl. M törpék) csillagok esetében ennél jóval nagyobb szisztematikus eltérésekkel is számolni kell.



1.2 ábra A KIC és SDSS hőmérsékletek eltérése fősorozati (balra) és elfejlődött csillagok (jobbra) esetén. Jól látható a kb. 200 Kelvines szisztematikus eltérés (Pinsonneault és mtsai, 2012).

Pinsonneault és mtsai (ApJS, 199, 30, 2012) többféle módszerrel újradefiniálták a KIC-ben szereplő csillagok hőmérsékletskáláját (**1.2 ábra**), és átlagosan 215 Kelvines eltérést találtak a KIC és más módszerekkel kapott hőmérsékletek között a naptípusú csillagokra. Később ez a skála bizonyult időtállónak. Ennek bizonytalansága kb. 100 K a Nap-szerű csillagok tartományában, aminek az elsődleges oka a vörösödés meghatározásának bizonytalansága.

1.3 Miért olyan érzékeny a cefeidáknál az opacitásra illetve a fémtartalomra a P1/P0 periódusarány?

Válasz: A két tényező (az opacitás, illetve a fémtartalom) hatása nagyban összefügg: mindkét esetben arról van szó, hogy az adott fizikai mennyiség változása eltérő mértékben hat a két pulzációs módusra, s ez okozza az érzékenységet. (1) Az alacsonyabb fémtartalom megváltoztatja a csillag szerkezetét: rögzített tömegnél a luminozitás nő, így a periódusarány csökkenne. (2) Viszont az alacsonyabb fémtartalomnál az opacitás-bump kisebb lesz, így a periódusarány növekszik a rögzített tömeg és luminozitás esetén. Végeredményben a megfigyelt periódusarány e két ellentétes hatás eredőjeként áll elő, amit kis mértékben módosítanak a nemlineáris hatások.



1.3 ábra Balra: az opacitásrevízió hatása a kétmódusú cefeidák periódusarányára (Moskalik, Buchler és Marom ApJ 385, 685 1992 alapján). A szaggatott vonalak a régi, a folytonos vonalak az új opacitásokat jelölik. **Jobbra**: a kétmódusú cefeidák periódus-arányának függése a fémtartalomtól (Buchler és Szabó ApJ, 660, 723, 2007 alapján).



A pulzációt eredményező gerjesztés a Cefeidák esetén a hélium ionizációs zónájában lokalizálható (kb. 40 000 K hőmérsékletnél), míg a fémek opacitás-maximuma 100 000 K közelében van. Magasabb fémtartalom felfogható az opacitás növekedéseként az opacitás-bump környékén. Ez a hatás erősebben érezteti hatását az alapmódus esetében, mint a magasabb felhangoknál, hiszen az alapmódushoz tartozó sajátfüggvény a csillag mélyebb rétegeibe hatol, mint az első felhangé. Ezért a periódusarány-változás főként az opacitás alapmódusra gyakorolt hatásának köszönhető. Éppen ezért a cefeidák esetében hosszú ideig fennálló opacitás-probléma megoldása is jelentősen befolyásolta a pulzációs modellek eredményeit (**1.3 ábra**).

1.4 Blazskó-modulált RR Lyrae csillagoknál a periódus-kettőződéssel járó váltakozó magasságú maximumok mellett esetenként (pl. 4.6 ábra) a minimumok mélysége is változik. Egyes modellek, ha gyengén is, de mutatják a jelenséget (4.14 ábra). Van-e korreláció a maximumok és minimumok változásában?

Válasz: Igen, bizonyos csillagok esetében erős korreláció van a maximumok és minimumok változásában: amikor a maximumok alternálnak, akkor a minimumok is, amint az RR Lyrae Kepler short cadence adatai is mutatják (**1.4 ábra**). Az ábrán az is látszik, hogy nemcsak a maximum és a minimum magassága változik, hanem a fénygörbe alakja is. Ezt legprominensebben a leszálló ágon megjelenő, lökéshullám okozta "bump" alakja és elhelyezkedése mutatja. Ez a korreláció azonban nem látszik egyértelműen minden csillagnál, aminek valószínű oka a perióduskettőződés kisebb amplitúdója. Az elérhető modelljeink kevéssé igazítanak el a kérdésben, mert az alacsony sűrűségű légkörben lejátszódó jelenségeket nem adják vissza teljes pontossággal.



1.4 ábra A névadó RR Lyrae Kepler short cadence fénygörbéjének egy erős perióduskettőződést mutató szakasza.

1.5 Hogyan magyarázható a 4.9-es (és a 4.8-as) ábrán a fél-egész frekvenciákon kívül $3/4 f_0 + k f_0$ frekvenciák közelében látható csúcssorozat?

Válasz: Itt nem egy újabb perióduskettőző bifurkációhoz tartozó csúcssorozatról van szó, hanem a Blazskós csillagoknál gyakran előforduló, a második radiális felhang frekvenciájához közeli frekvenciáról, és annak az alapmódussal vett lineáris kombinációiról: $f_2 + k \cdot f_0$ (**1.5 ábra**). Ennek eredete lehet magának a második radiális felhangnak a gerjesztődése (Benkő és mtsai, MNRAS, 409, 1585, 2010), vagy annak

frekvenciája körül megjelenő esetleges nemradiális módus(ok) is (Dziembowski AcA 27, 95, 1977, Van Hoolst és mtsai, MNRAS, 297, 536, 1998). Az így létrejövő, alapmódussal vett periódusarány $P_2/P_0 \sim 0.58$, vagyis a frekvenciák arányára $f_2/f_0 \sim 1.72$ adódik.



1.5 ábra A CoRoT 0101128793 jelű modulált RRab frekvenciaspektruma. A domináns pulzációs frekvenciával (f₀), annak harmonikusaival és a moduláció okozta tripletekkel már fehérítettem. Fekete függőleges vonalak mutatják az alaphang (f₀) és harmonikusainak frekvenciáját, míg a kék pontozott vonalak a perióduskettőződésből adódó félegész frekvenciákat (Szabó és mtsai, A&A 570, A100, 2014). A bíráló kérdése a további, nagy amplitúdóval jelentkező, külön nem jelölt frekvenciasorozatra vonatkozik.

1.6 A frekvenciák időbeli változását az adatsor feldarabolásával vizsgálta. Miért nem használt idő-frekvencia (pl. wavelet) analízist is?

Válasz: Az idő-frekvencia vizsgálatnál arra törekedtem, hogy az adatsorokban található információt maximálisan kiaknázzam. A népszerűbb módszereknél, így a waveletanalízisnél is figyelembe kell venni az elérhető maximális idő- és frekvenciafelbontást (mindkettőt maga az adatsor határozza meg), és valamilyen kompromisszumot kell kötni. Ennyire szűk frekvenciatartományban kevéssé indokolt az időfelbontás túlzott javítása. Ebből a szempontból az én megoldásom is tartalmazza mindazt az információt, amit a valamivel bonyolultabb matematikai módszerek. Ennek illusztrálására a TiFrAn nevű programmal kiszámoltam két CoRoT-csillag extra frekvenciáinak időfüggését a Morlet Wavelet módszert alkalmazva. A két módszer összevetéséből látható, hogy míg a jel frekvenciája nagyjából állandó maradt, az amplitúdók változása nagyon szépen megfeleltethető egymásnak a kétféle módszernél akár logaritmikus (bal oldal) akár lineáris (jobb oldal) skálázást használunk (**1.6 ábra**).

Ezért valóban alkalmazható (és elegáns) lett volna egy wavelet-analízis alkalmazása is. Megjegyzendő, hogy a szóban forgó csillagok esetében a zsúfolt frekvenciaspektrum mindegyik módszer megszokott működését zavarhatja, ezért többféle módszer körültekintő alkalmazása is indokolt. Nem utolsósorban módszeremmel az amplitúdókra hibahatárokat is meg tudtam határozni, ami a többi módszernél jóval nehezebb lett volna.



1.6 ábra A CoRoT 0101368812-es kétmódusú és a CoRoT 0105036241 jelzésű RRc csillag extra frekvenciáinak időfüggése feldarabolással (felül, Szabó és mtsai, A&A 570, A100, 2014) és Morlet wavelet-módszerrel (alul). Az alsó paneleken balra logaritmikus, jobbra lineáris skálázással ábrázoltam a wavelet-térképet. Jól látszik, hogy az állandó frekvencia mellett a két módszerrel kapott amplitúdók szépen megfeleltethetők egymásnak.

1.7 A KOI-977 kísérője (157. o.) 63 Föld-sugarú. Milyen égitest lehet ez?

Válasz: Ahogy az 1.7 ábra mutatja, ilyen égitestet nem ismerünk a bolygók tartományában. Sokkal inkább egy Napnál valamivel kisebb csillag jöhetne szóba. Azonban ahogyan a dolgozatban is jeleztem, a KOI-977 csillag és kísérőjének paraméterei nagyon bizonytalanok. A kezdetben vörös törpének gondolt szülőcsillagról kiderült, hogy valójában vörös óriás (Muirhead és mtsai, ApJ, 750, 37, 2012).

Hirano és mtsai (2015) alapos munkájából kiderül, hogy minden valószínűség szerint egy false positive esetről van szó, amikor is a fedés jele nem a vörös óriásból, hanem egy háttér- (vagy előtér-)csillagtól származik. Ebben az esetben a megfigyelt jelet egy Naphoz hasonló, fősorozati F csillag körül keringő M törpecsillag okozza.



1.7 ábra Bolygók, barna törpék, és csillagok átlagsűrűsége (balra) és sugara (jobbra) a bolygótömeg függvényében Forrás: Hatzes és Rauer ApJ, 810, 25, 2015.

Budapest, 2017. április 11.

Szabó Róbert