

Válaszok Balázs Lajos kérdéseire

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

című akadémiai doktori értekezésével kapcsolatban

1. A 16. old. 19. sor szerint: „Az asztroszeizmológiai célpontok kiválasztása, jelölése a KASC és a munkacsoportok vezetőinek feladata volt.” A δ Scuti csillagok vizsgálatában az MTA CSFK KTM CSI nemzetközileg is jelentős eredményeket ért el. Ilyen csillagok miért nem kerültek be a programba?

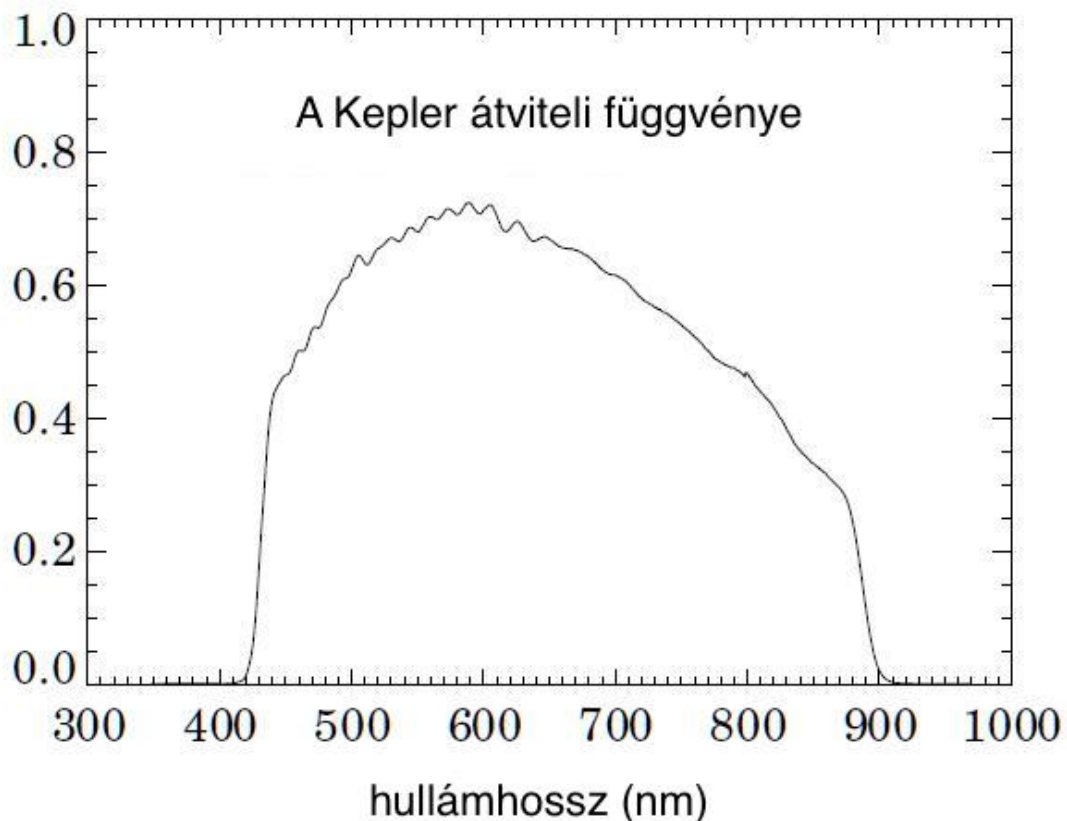
Válasz: A Kepler Asztroszeizmológiai Tudományos Konzorcium 13 munkacsoportja volt felelős a különböző típusú pulzáló változócsillagok célpontkiválasztásáért, majd adatainak elemzéséért. Engem a cefeida változócsillagok (WG7) munkacsoportjának vezetésére és az RR Lyrae munkacsoport (WG13) társ-vezetésére kértek fel. Ezért csak ezeket a változócsillagokat válogattuk magyar kollégáimmal. A delta Scuti (és gamma Doradus) változócsillagokat vizsgáló munkacsoportot kezdetben Don Kurtz professzor vezette, és az ő irányításával történt az ezen csillagokat célzó célpontjavaslatok összeállítása. Így tehát természetesen δ Scuti csillagok is bekerültek a Kepler célpontjai közé. Az első átfogó elemzés Uytterhoeven és mtsai (2011 A&A, 534, A125) munkájában található, amiben 473 δ Scuti / γ Doradus csillag vizsgálatát végeztük el.

2. A 31. old. 13. sor szerint: „Az egyedi adatpontok pontossága mintegy három nagyságrenddel jobb a Kepler esetén (μ mag), mint a földi megfigyeléseknél (mmag).” Ez csak a belső pontosságra igaz. A fénygörbe alakja azonban szín függő, ezért a Fourier spektrum is. Kérdés, hogy a Kepler rendszeréből hogyan lehet a fénygörbét más színrendszerben végrehajtott mérésekkel összehasonlítani? A transzformáció mekkora szisztematikus hibát eredményez?

Válasz: A Kepler fotometriai rendszerében mért fényesség (K_p) leginkább a Johnson V és R hullámhosszszávok egyesítésével közelíthető (1. ábra). Pulzáló változócsillagok esetében a különböző szűrőkkel mért fénygörbe alakja valóban változik, a frekvenciák azonban nem. Tehát a Fourier-spektrumban fellép az amplitúdók megváltozása, a fénygörbe alakjában pedig kis mértékű deformáció megjelenését várjuk, ha megpróbáljuk áttanszformálni a K_p fényességeket a gyakran használt fotometriai rendszerek valamelyikébe.

Léteznek összefüggések K_p és például az SDSS g, r, i magnitúdók között (Brown és mtsai, 2011, AJ, 142, 112):

$$\begin{aligned} K_p &= 0,25g + 0,75r \quad \text{ha} \quad (g - r) \leq 0,3, \\ K_p &= 0,30g + 0,70i \quad \text{ha} \quad (g - r) > 0,3. \end{aligned}$$



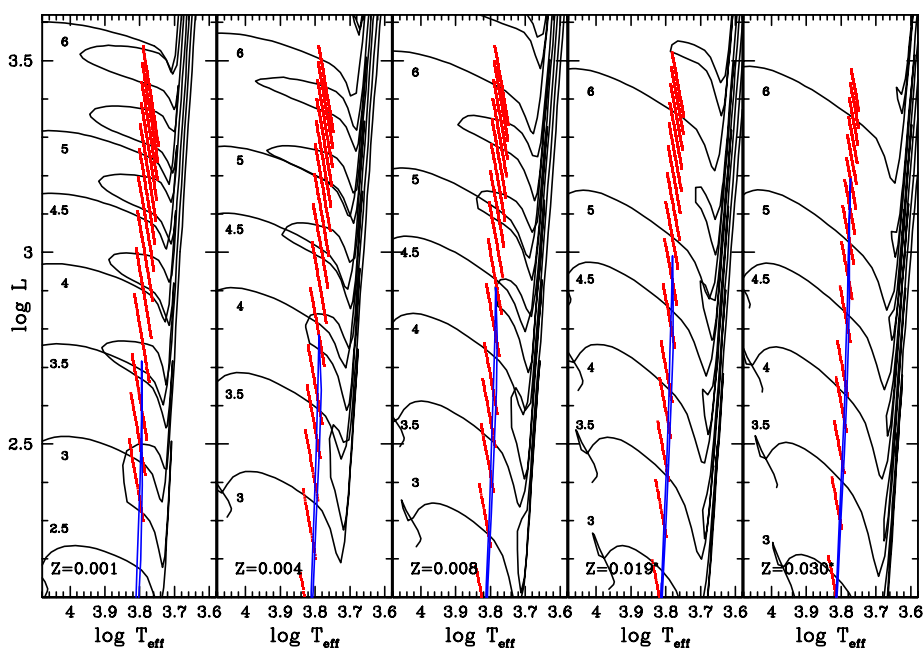
1. ábra A Kepler-űrtávcső optikai elemeinek és detektorainak eredő spektrális érzékenysége (forrás: nasa.gov).

Meg kell azonban jegyezni, hogy ezek az összefüggések adott színképtípusú csillagokra működnek. Az ezen összefüggésekben szereplő paraméterek bizonytalansága eligazítást adhat a szisztematikus hiba nagyságrendjére nézve, ami 0,03 magnitúdó, extrém effektív hőmérsékletek esetén elérheti a 0,2 magnitúdót is. Ennek nagysága tehát akár több nagyságrenddel is meghaladhatja a Kepler-adatok belső pontosságát. Azt is érdemes megemlíteni, hogy már akár a Kepler átviteli függvényének nem kellően pontos ismerete, illetve az egyes CCD-kamerák spektrális érzékenységi görbéiben tapasztalható, néhány ezrelék nagyságrendjébe eső eltérések is ahhoz vezetnek, hogy nem várhatjuk, hogy a Kepler belső pontosságának nagyságrendjébe eső pontossággal transzformáljuk át a fénygörbéket a fotometriai rendszerek között.

Bizonyos asztrofizikai alkalmazásoknál (pl. kisméretű bolygók által okozott tranzitok keresése, dinamikai jelenségek pulzáló változócsillagokban) azonban éppen a belső pontosság számít, és rendszerint nem transzformáljuk át a Kepler-fénygörbéket más színrendszerekbe. A transzformáció helyett földi többszínfotometriai mérések gyűjtése a bevett és célszerű gyakorlat, amennyiben színinformáció is szükséges az adott vizsgálathoz.

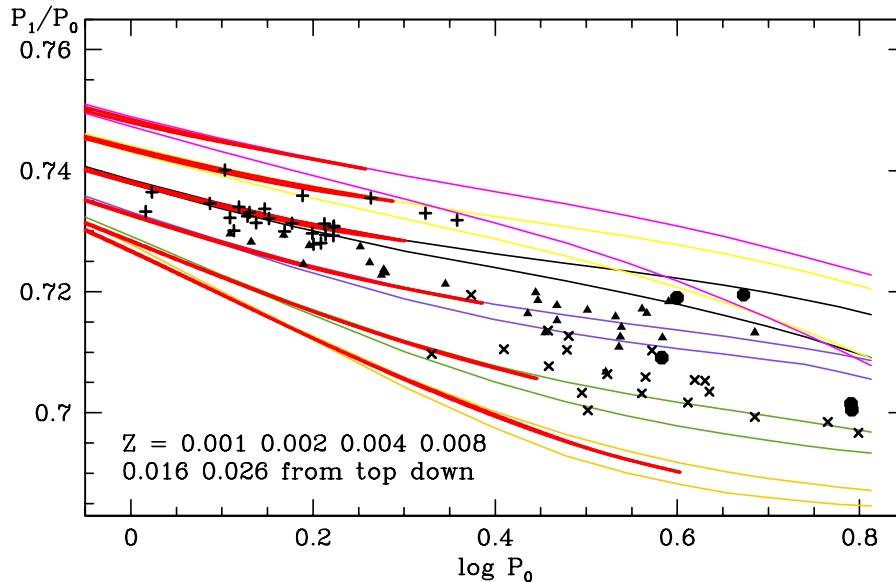
3. A 79. old. 32. sor szerint: „...a kémiai összetételt galaktikusnak ($Z=0,020$) választottam. ...” A valóságban a Z tartomány ettől szélesebb. Mi történik, ha ezt figyelembe vesszük?

Válasz: A kérdés a nemlineáris modellek módusszelekciójára vonatkozik, melynek vizsgálata rendkívül számításigényes. Több ezer modell számítását kellett elvégezni a választott fémtartalomra, ezért részletes modellvizsgálat nem áll rendelkezésemre más Z értékekre. Azonban bizonyos aspektusokat részletesebben megvizsgáltam, így például a kétmódusú tartomány viselkedését, ezt mutatom be az alábbi ábrákon.



2. ábra. A lineáris (piros vonalak) és nemlineáris (kék vonalak) kétmódusú cefeida tartományok a fémtartalom függvényében az elméleti Hertzsprung-Russell diagramon. A fekete vonalak csillagfejlődési útvonalakat jelölnek, a bal oldali számok a modellcsillagok tömegét mutatják naptömeg egységben.

A **2. és 3. ábrák** azt mutatják, hogy a nemlineáris modellek kezdeti sikereik ellenére nem képesek teljes mértékben visszaadni a megfigyelt kétmódusú cefeidák elhelyezkedését a Hertzsprung-Russell és a Petersen-diagramokon. Mindkét ábrán az látszik, hogy amíg a lineáris modellek lefedik a megfigyelt kétmódusú cefeidákat, addig a nemlineáris kétmódusú tartomány túl alacsony tömegnél ér véget. A probléma valószínűleg nem oldható meg egydimenziós hidrokódokkal, a valóságot jobban közelítő háromdimenziós szimulációk szükségesek a továbblépéshez.

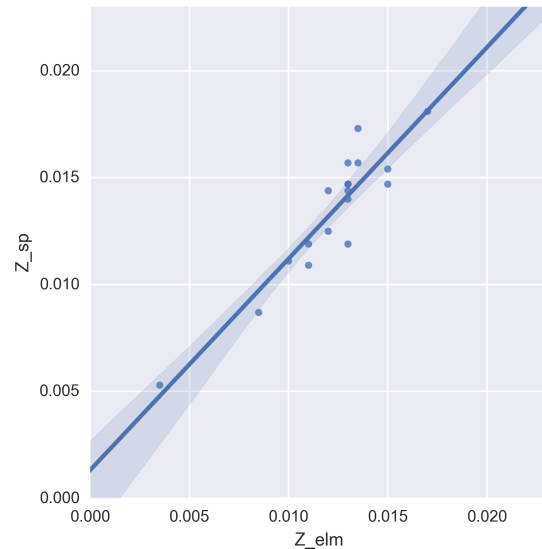
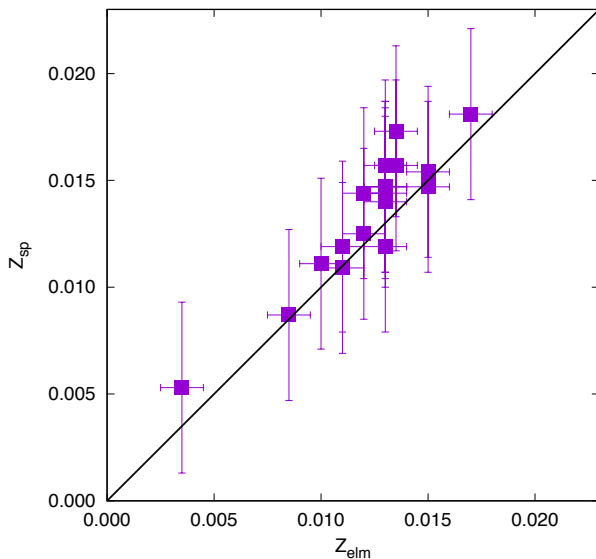


3. ábra Lineáris (vékony vonalak) és nemlineáris (vastag piros vonalak) kétmódusú cefeida tartományok a Petersen (periódus-periódusarány)-diagramon a fémtartalom függvényében.

4. A 93. old. 1. sor szerint: „...egyik lehetőség, hogy általános fémtartalom helyett az egyedi elemek eloszlását, feldúsulását vizsgáljuk nagyfelbontású spektroszkópiával (Pompéia és mtsai, 2008), a másik lehetőség, hogy kihasználjuk a beat cefeidák nyújtotta független fémtartalom-meghatározási lehetőséget. Itt ez utóbbi utat mutatom be eredményeink alapján.” A modellből becsült Z érték mennyire reális, összehasonlítva a spektroszkópiai mérésekkel?

Válasz: Részletes spektroszkópiai megfigyelések elsősorban a galaktikus kétmódusú cefeidákra állnak rendelkezésre. A kérdés vizsgálatához Sziládi és mtsai (A&A, 473, 579 2007) és Kovtyukh és mtsai (MNRAS, 460, 2077, 2016) munkáit vettem alapul, melyekben összesen 17 galaktikus kétmódusú cefeida kémiai elem gyakoriságát vizsgálták. Az összehasonlításhoz két feltevessel kellett élnem: **(1)** A Nap fémtartalmát $Z_{\odot} = 0,0134$ -nek vettem Asplund és mtsai (ARAA, 47, 481, 2009) munkája nyomán. **(2)** A nehéz elemek gyakoriságát azonosnak vettem a Napéval. Ez utóbbi feltevés nem minden esetben teljesül, hiszen a cefeidák fejlődésük folyamán olyan folyamatokon mennek keresztül, amik felkeverik a csillag anyagát (dredge-up), és a kezdeti felszíni elemeloszlás megváltozhat, pl. a szén relatív gyakorisága csökken, a nitrogéné nő.

Ezekkel a feltevésekkel átkonvertáltam a két említett cikkben található $[Fe/H]$ abundanciákat Z fémségértékekre, és a **4. ábrán** látható eredményeket kaptam. Korrelációs együtthatóra $r = 0,9417$ adódik, ami a kétféle fémtartalom-meghatározási módszer meglepően jó egyezését mutatja, annak ellenére, hogy az említett feltevések és az eltérő kémiai elemösszetétel is jelentős szisztematikus hibákat okozhat (pl. Buchler ApJ 680, 1412, 2008). Fontos megjegyezni, hogy a két minta praktikusán független egymástól. Így a kapott r érték alapján a megfigyelt variancia 88%-át magyarázná az elméleti módszer, ha a spektroszkópiai adatok hibája elhanyagolható lenne, valójában ez az arány még nagyobb lehet, mivel a spektroszkópiai mérések is hibával terheltek.

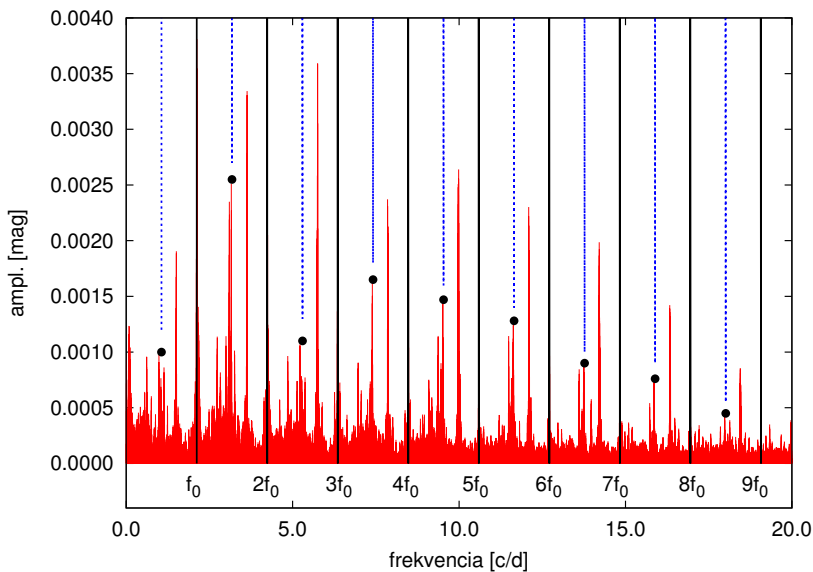


4. ábra A Z_{elm} a kétmódusú modelljeimből, Z_{sp} pedig spektroszkópiai úton származtatott fémességértékeket jelöl. **Balra:** az $y=x$ egyenest és a jellegzetes hibákat jelöltem. **Jobbra:** egyenes illesztése lineáris regresszióval és annak bizonytalansága ugyanazokra a pontokra.

A következő lépésben $ax + b$ alakban egyenest illesztettem az adatokra. A paraméterekre $a = 0,991 \pm 0,116$ és $b = 0,00131 \pm 0,00141$ adódik, ami szintén azt mutatja, hogy a hibahatárokat is figyelembe véve a kétféle módszer nem tér el egymástól jelentősen.

5. A 111. old. 4.8. ábra szerint: A baloldali frekvencia spektrumban a pontozott és a folytonos vonalak között is vannak csúcsok. Ezeknek a fehérítésnél nem kellett volna eltűnniük? Egyáltalán mi a fizikai jelentésük?

Válasz: Itt a Blazskós csillagoknál gyakran előforduló, a második radiális felhang frekvenciájához közeli frekvenciák, és annak az alaplómódussal vett lineáris kombinációi: $f_2 + k \cdot f_0$, tehát független frekvenciák jelennek meg, így fehérítéskor nem tűnnek el (**3. ábra**). Ezek 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 periódusarány $P_2/P_0 \sim 0,58$, vagyis a frekvenciák arányára $f_2/f_0 \sim 1,72$ adódik.



3. ábra A CoRoT 0101128793 jelű modulált R Rab frekvencia-spektruma. A domináns pulzációs frekvenciával (f_0), annak harmonikusaival és a moduláció okozta triplettekkkel már fehérítettem. Fekete függőleges vonalak mutatják az alaphang (f_0) és harmonikusainak frekvenciáját, míg a kék pontozott vonalak a perióduskettőződésből adódó fél-egész frekvenciákat (Szabó és mtsai, A&A 570, A100, 2014). A bíráló kérdése a további, nagy amplitúdóval jelentkező, külön nem jelölt frekvenciasorozatra vonatkozik.

6. A 120. old. 30. sor szerint: „...Stothers (2006) szerint a modulációs ciklus alatt a csillag turbulens/konvektív szerkezete változik. Minthogy a modelljeink alapvetően érzékenyek a turbulens jellemzőkre, ...” A turbulencia beépítése a modellbe egy alapvetően sztochasztikusan viselkedő komponenst hoz be, aminek a hatásával számolni kellene. Ennek hatása lehet a pulzációra, illetve a fénygörbére. Erre miért nincs utalás?

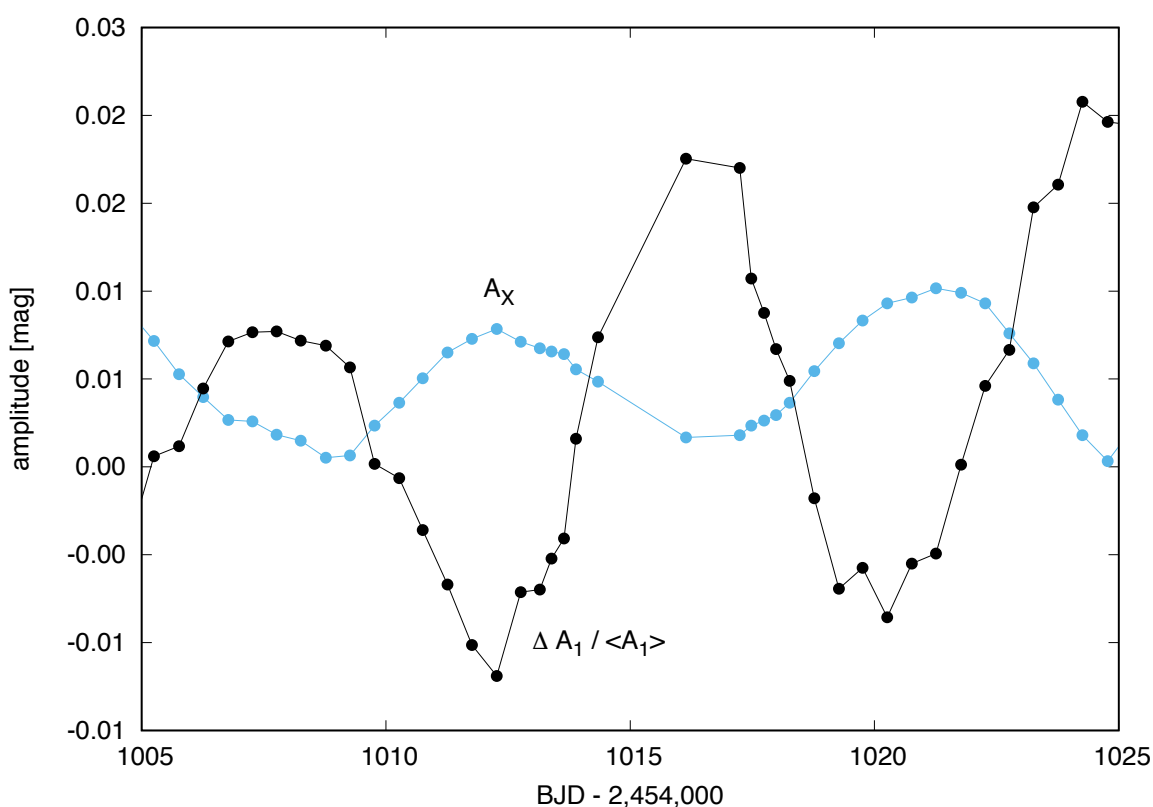
Válasz: Az egydimenziós, azaz radiálisan szimmetrikus geometriai elrendezésű hidrodinamikai pulzációs kódokban, így az általam használt Budapest-Florida kódban is a turbulencia hatását közelítő módon, térben (a gömbhéjakra) és időben (a rövidebb időskálákra) kiátlagolt módon vesszük figyelembe (pl. Kolláth és mtsai, A&A 385, 932, 2002). Ezáltal időfüggő hozzájárulást kapunk mind az energia, mind pedig a mozgásegyenlethez, de nem lesz sztochasztikus komponens a modellben. A turbulens konvekció valóságosabb leírását többdimenziós hidrodinamikai kódok (pl. Geroux & Deupree, ApJ, 731, 18, 2011; Mundprecht és mtsai, MNRAS, 435, 3191, 2013) fogják tudni figyelembe venni, melyekben természetes módon lépnek fel sztochasztikus mozgások és folyamatok.

Az MTA CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézetben hagyományosan elismert elméleti pulzációs iskola megerősítése és a többdimenziós pulzációs modellek meghonosítása érdekében kutatócsoportommal egy sor erőfeszítést tettünk: Floridában két évig többdimenziós hidrodinamikai kód kifejlesztésén dolgoztam, a 2015-ben Visegrádon általam szervezett RR Lyrae konferenciára meghívtam mindkét, a szakterületen aktív kutatócsoport képviselőit, numerikus demonstrátori pályázatot, fiatal kutatói és doktori témajavaslatot írtam ki, rendszeresen tartok Pulzációelmélet c. előadást a Szegedi Egyetemen, illetve az ELTE-n. Ezen kívül legújabbban az e területen dolgozó mindkettő (kanadai és osztrák) kutatócsoporttal felvettük a kapcsolatot, valamint osztrák-magyar együttműködésre támogatást is nyertünk a témában.

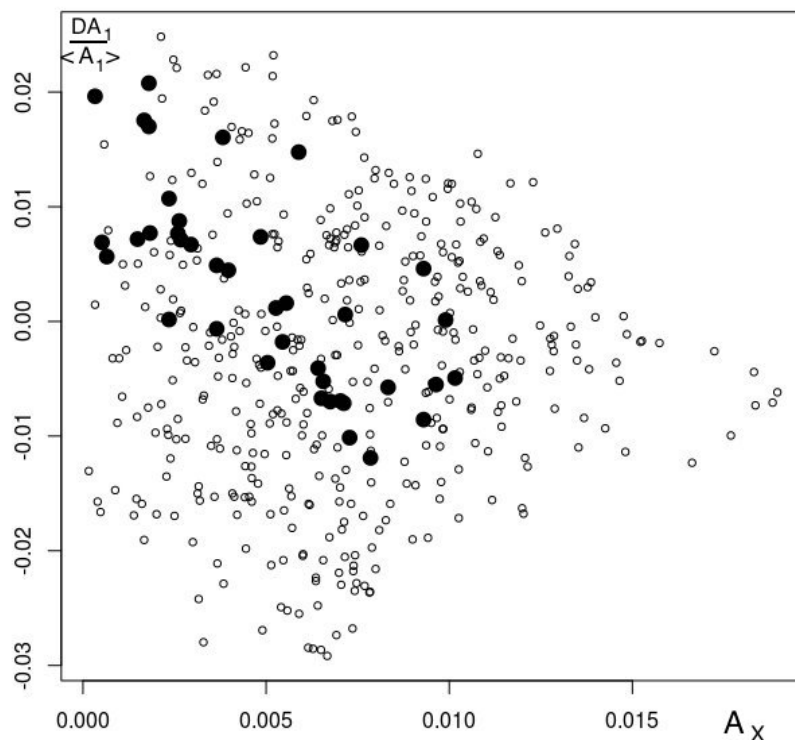
7. A 137. old. 4.28. ábrán hogyan történt a korreláció kiszámítása és az mennyire szignifikáns?

Válasz: A idézett dolgozatbeli 4.28. ábra a Kepler által mért KIC 9453114 jelű RRc csillag esetében a radiális első felhang (f_1) és a valószínűleg nemradiális (f_x) frekvenciacsúcsok amplitúdóit mutatja ($\Delta A_1 / \langle A_1 \rangle$ és A_x alakban). A két görbe egyes szakaszai antikorrelációt mutatnak, pl. a 7. ábrán látható szakasz, ahol a korrelációs együttható $r = -0,716$, ami erős korrelációt jelent: annak az esélye, hogy a két görbe között nincs függés, mindössze 2,3%. A Pearson-féle korrelációs koefficiens 95%-os konfidenciaintervalluma ezen a szakaszon $[-0.83, -0.50]$, p értéke $4 \cdot 10^{-7}$. Nemlineáris monoton függést tesztelve Spearman-féle rangkorrelációs teszttel p értéke még kisebb: $4 \cdot 10^{-8}$. A monoton függés tehát ezen a szakaszon evidens.

A teljes görbe gyenge antikorrelációt mutat, $r = -0,028$. A teljes adatsorra elvégezve p értéke 0,55 (Pearson) és 0,88 (Spearman), tehát a lineáris vagy monoton függés inszignifikáns.



7. ábra. A KIC 9453114 jelű RRc csillag első felhangjának és az f_x frekvenciacsúcs amplitúdójának egy erős antikorrelációt mutató szakasza.



8. ábra A radiális első felhang ($\Delta A_1 / \langle A_1 \rangle$) és az f_x frekvenciacsúcs (A_x) amplitúdóinak egymástól való függése. Üres körök: összes adat, fekete pontok: A BJD 2,455,005 - 2,455,025 időintervallumba eső pontok halmaza.

A teljes adatsorra is igaz viszont, hogy $\Delta A_1 / \langle A_1 \rangle$ abszolút értéke függ A_x értékétől, A_x nagy értékéhez $\Delta A_1 / \langle A_1 \rangle$ nullához közeli értékeit figyeljük meg, A_x kis értékeinél pedig $\Delta A_1 / \langle A_1 \rangle$ nagy intervallumban szórhat. A regresszióanalízis eredménye szerint (**8. ábra**) a Pearson-féle korrelációs koefficiens ekkor -0,22, 95%-os konfidenciaintervalluma [-0,31, -0,13], p értéke $2 \cdot 10^{-6}$. Tehát a teljes adatsor alapján is feltételezhető, hogy $\Delta A_1 / \langle A_1 \rangle$ értéke függő kapcsolatban áll A_x értékével.

8. A 149. old. 19. sor szerint: „Először is kiválogattam az egyetlen bolygót tartalmazó rendszereket a Kepler bolygójelölt katalógusából” Honnan lehetett tudni, hogy a rendszer csak egy bolygót tartalmaz?

Válasz: Amikor a Kepler (vagy bármely más exobolygó-kereső felmérés) egy- vagy többszörös bolygórendszeréről beszélünk, akkor természetesen csak az ismert bolygókat vesszük számításba. Ez nem zárja ki, hogy az adott fedési exobolygórendszerben további bolygók keringjenek, hosszú keringési idővel, esetleg olyan pályákon, hogy fedéseket nem is láthatunk. Ha vannak ilyenek, akkor mivel ezeknek jellemzően az ismert bolygóktól távol, hosszú keringési idővel kell mozogniuk, ezért dinamikai hatásuk elhanyagolható a dolgozatomban ismertetett vizsgálat szempontjából.

A Kepler által felfedezett összes bolygójelöltre tudomásom szerint nem készült szisztematikus vizsgálat további bolygók keresésére, de bizonyos alcsoportokra igen, például többszörös bolygórendszerekben tranzitidőpont-változás (TTV) révén. Ballard és mtsai (2011 ApJ, 743, 200) így fedezték fel a Kepler-19c bolygót. A forró jupiterek tekintetében Alexandre Santerne és munkatársai végeztek radiális sebesség méréseket a SOPHIE spektrográffal (pl. Santerne és mtsai, 2012, A&A, 545, A76), részben a jelöltek megerősítése, részben további kísérők keresése céljából (Barros és mtsai 2014 A&A 561, L1). Az ebből a tanulmánysorozatból származó többszörös bolygórendszereket nem vettem figyelembe a vizsgálatom során.

Budapest, 2017. április 13.

Szabó Róbert