

Válaszok Dr. Kecskeméty Károly opponensi kérdéseire

Elsőként hadd köszönjem meg a bíráló gondos munkáját, méltató szavait, nem különben kritikai észrevételeit. Válaszaim (dőlt betűvel szedve) a kérdések (vastagon szedve) sorrendjében, pontról pontra:

A 28. oldalon 1.18 ábra aláírásában fel van cserélve a bal és jobb oldal.

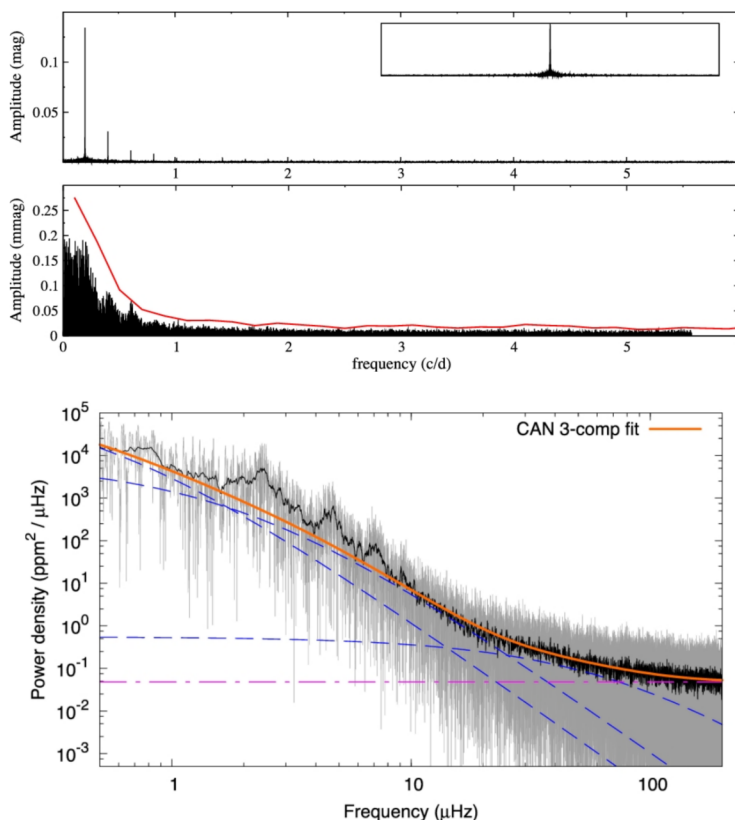
Valóban, a „jobbra” és a „balra” szavakat felcseréltem, köszönöm az észrevételt.

A 35. oldalon a 2.3 ábra jobb oldala a bal oldali ábra adatai alapján készült Fourier-spektrumot mutatja, amit inkább power- (teljesítmény-) spektrumnak lehetne nevezni és célszerűbb lenne kétszer logaritmikus skálán ábrázolni. A 2.4 ábrán a 28 éves adatsoron (1982-2010, ezt érdemes lett volna az ábraaláírásban feltüntetni) a 3,7 éves periódus (4. felharmonikus?) mellett egy határozott 2,5 éves periódus látszik (felharmonikus?), amelyet a 2.3 ábra 21 éves adatain (1982-2003) nem lehet kivenni. Kérdésem, az eltérés a két különböző módszernek köszönhető-e, ill. hogy hasonló eredményre vezet-e egy wavelet analízis (ahogy pl. az a Kolláth és Oláh, 2014 cikkben történt)?

Egyetértek a bíráló megjegyzésével, a helyes kifejezés valóban a teljesítmény- (vagy esetleg amplitúdó-) spektrum, bár a „Fourier-spektrum” szóhasználat is elterjedt, nyilván a Fourier-analízis módszerére utal. A Fourier-analízis eredményének ábrázolásánál a logaritmikus, a lineáris, vagy a kombinált (log-log, lin-lin vagy lin-log) skálázás egyaránt használatos, azonban az olyan esetekben, amikor a rotációs periódus jeleinek, vagy aktivitási ciklusoknak megfelelő diszkrét jeleket várunk, a lineáris skála alkalmazása megfelelő. Ezzel szemben pl. a granulációból eredő fluktuációk modellezése során a spektrum nagyfrekvenciás része is érdekes, indokolt a logaritmikus skála.

Ennek illusztrálásaként mellékelem Derekas és mtsai. (2017, MNRAS 464, 1553) cikkének két ábráját, az egyiken a V1154 Cygni cefeida változó pulzációs frekvenciái láthatók lin-lin skálán, alatta a granulációs spektrum modellillesztése látható log-log skálán).

Visszatérve az LQ Hya ciklusaihoz, a 28 éves adatsoron megjelenő 2,5 éves periódus a 21 éves adatokban is megjelenik (a 2.3 ábra jobb alsó paneljén a kb. 0,001 c/d értéknél található csúcs), azonban ebben a vizsgálatban előzetes feltevés volt a 3σ zajszint, és mivel a jel ennél kisebb volt, nem lett figyelembe véve. Megjegyzem, hogy egy korábbi publikációban (Kóvári és mtsai.: „Long-term photometric cycles and short-term starspot evolution on LQ Hya”, 2002, in: Proc. 1st Potsdam Thinkshop on Sunspots and Starspots, May 6-10, 2002, Potsdam, Germany, szerk: KG Strassmeier & A Washuettl, pp. 69-71) a 3σ alatti detektálás (2,6 év) is szerepelt. Tehát a szóban forgó eltérés végső soron nem a módszer, hanem az előfeltételként szabott detektálási küszöb következménye.



A 49. oldalon az LQ Hydrae keresztkorrelációs térképén (2.12 ábra) az egyes szélességi csíkokon a Gauss-függvények félértékszélességeit figyelembe vette-e a $\sin^2 \theta$ függvény illesztésénél (azaz volt-e súlyozás)? Ez a kérdés vonatkozik a többi, $\sin^2 \theta$ függvénnyel végzett illesztésre is.

Igen, az illesztések során minden esetben volt súlyozás, a félérték szélességek figyelembe lettek véve.

Az 52-59. oldalakon az ábrákat meglehetősen nehéz összehasonlítani az egyes képek közötti alig észrevehető apró különbségek és az elkerülhetetlen oda vissza lapozás miatt. Talán össze lehetett volna vonni a 2.13-2.14 ábrákat (a tesztképek alig különböznek) és ugyanígy a 2.17 és 2.20 ábrákat. Az ábraalírásoknál is elkerülhető lett volna a felesleges ismétlődés (pl. 2.6, 2.7 és 2.8 ábra). Az áttekinthetőség szempontjából talán az is szerencsésebb lett volna, ha a 2.13/2.14 ábra után rögtön a 2.17/2.20 következik, ill. a 2.15 és 2.16 után jön a 2.18 és 2.19 ábra.

Valóban lehetett volna még illusztratívabb módon kiválasztani, csoportosítani és ábrázolni a teszteredményeket. Azonban a tesztek bemutatásakor a jobb érthetőség érdekében a 2.1.4.2. pontban inkább a csökkenő jel/zaj lépései szerinti logikai felépítést választottam, még a – talán feleslegesnek tűnő – ismétlődések árán is.

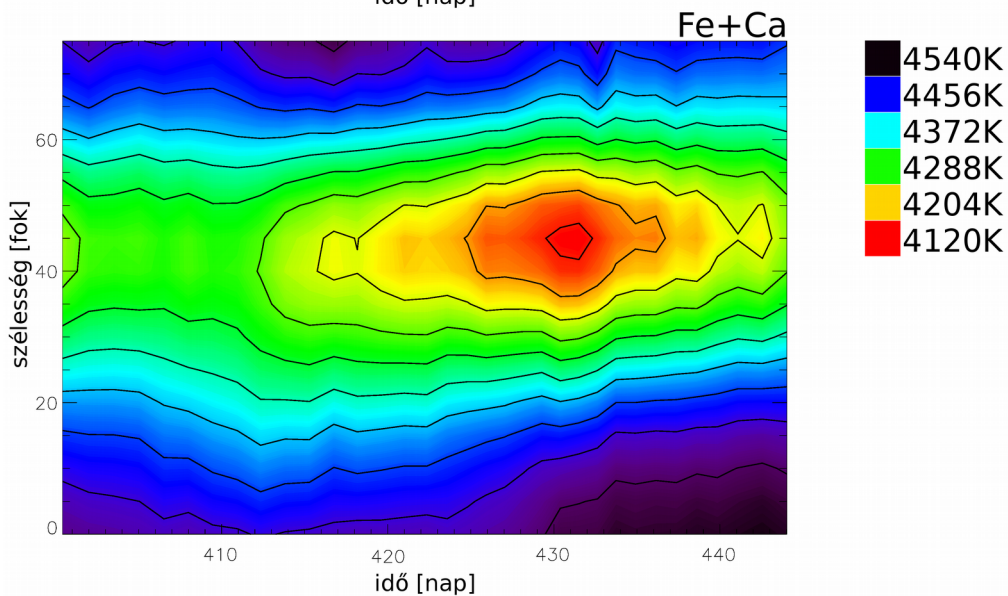
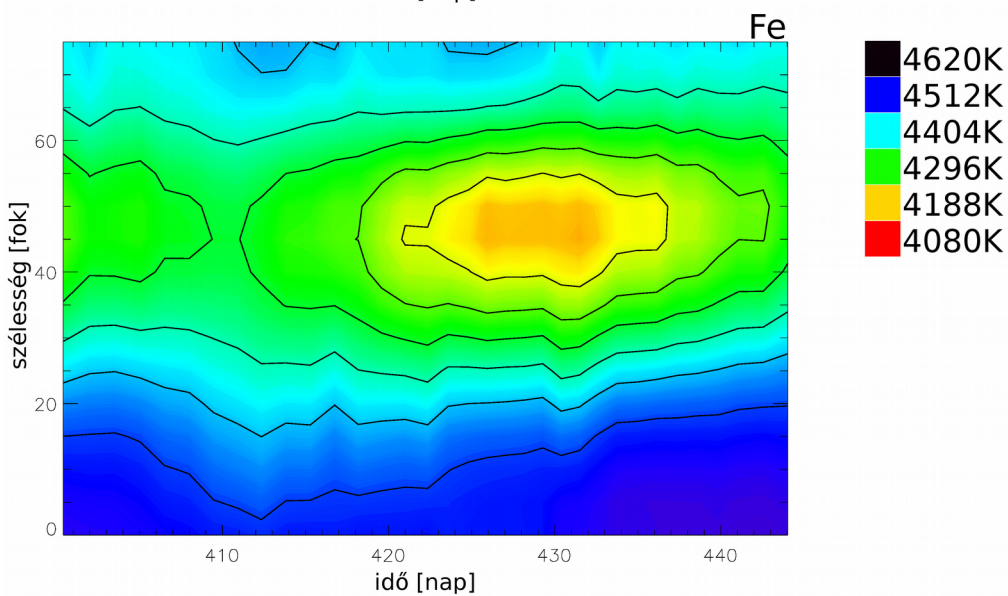
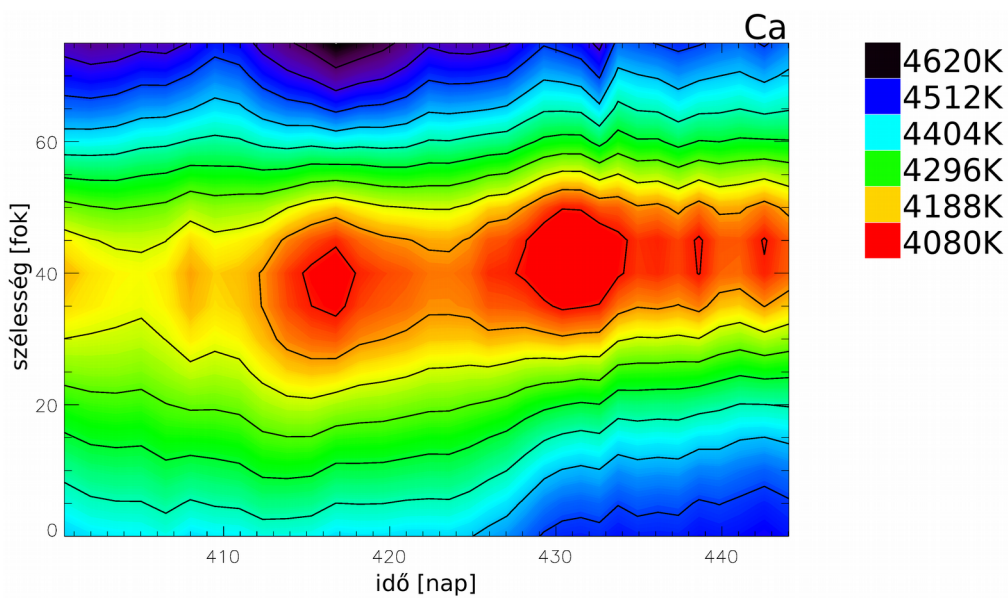
A 64. oldalon: Mi a feltétele a nyírt kép módszer alkalmazhatóságának a poláris folt alakjára nézve? Történt-e próbálkozás az átlagolt keresztkorreláció módszer alkalmazására a V889 Herculisnál? Az erre a csillagra kapott eredmények alapján lehet-e arra következtetni, hogy a fiatal Napon gyengébb lehetett a differenciális rotáció?

Egy poláris folt jelenléte a nyírt kép módszer alkalmazhatósága szempontjából annál inkább zavaró, minél inkább szimmetrikus a pólusra. Egy teljesen forgásszimmetrikus poláris folt hatása nem változtatja a vonalprofil alakját a rotáció különböző fázisaiban, ugyanakkor megnehezíti az elméleti vonalalak kiválasztását. Ebben az értelemben tehát minél inkább aszimmetrikus (excentrikus) egy poláris folt a pólusra nézve, annál kevésbé nehezíti a nyírt kép módszer alkalmazhatóságát. A V889 Herculis esetében sajnos nem volt lehetőség a keresztkorrelációs módszer alkalmazására, mivel nem állt rendelkezésre elegendő észlelési adat. A V889 Herculis fizikai paraméterei (2.3. táblázat) alapján a fiatal Nap modelljének tekinthető. A nyírt kép módszerből kapott eredmények (2.2.2. pont) mellett az elméleti számítások (pl. 2.30. ábra) is arra mutatnak, hogy ezeken a gyorsan forgó, nullkorú fősorozati csillagokon a differenciális rotáció egy nagyságrenddel kisebb, mint amit jelenleg a Napon mérünk. Ebből tehát levonhatjuk a következtetést, hogy a fiatal Napon lényegesen gyengébb lehetett a differenciális rotáció.

A 81. oldal 2.35 ábráján és ugyanígy a 2.37 ábrán feltűnően nem jó az illesztés az $1-\alpha \sin^2 \theta$ alakú rotációs függvénnyel, ahogy az a szövegben is olvasható. Nem próbálkozott egy szélességben eltolt a függvénnyel, amely jobb illeszkedést adna az egyenlítőnél? Ez feltehetőleg jóval nagyobb α értéket is szolgáltatna, összhangban az említett újabb eredményekkel.

Valóban igaz, hogy az $1-\alpha \sin^2 \theta$ illesztések nem teljesen követik a korrelációs mintázatokat (bár a 2.35. ábra Ca vonalára kapott eredmény esetén az illesztés jónak mondható). Az is feltűnő, hogy a korrelációs mintázat szélességi eltolódásai (a 2.35. ábra „Ca” paneljét leszámítva) jelentős hemiszférikus aszimmetriát mutatnak, így egy aszimmetrikus függvény illesztés minden bizonnyal nagyobb nyírást eredményezett volna. Azonban az illesztés kritériuma volt az általánosan feltételezett hemiszférikus szimmetria, így szélességben eltolt függvénnyel nem próbálkoztam.

A 87. oldal 2.38 ábráján a színskála milyen hőmérsékleteknek felel meg?
A skála alább mellékelve.



A 97. oldal 2.44 ábráján a $a > b$ esetén a (2.10) képlet ε -ra imaginárius értéket ad, fel kellene cserélni a-t és b-t. Az eredményekhez felhasznált TempMap_e inverziós kód továbbfejlesztése mennyiben volt a jelölt munkája?

Köszönöm a korrekciót, a és b valóban felcserélődött a képletben. A TempMap inverziós kód továbbfejlesztése (TempMap_e) Bartus János kollégám munkája volt, aki ennek megfelelően a vonatkozó cikkekben társszerzőként szerepelt.

Permanens aktív hosszúságot jelenlétére utaló jeleket találtak már a Napon és RS CVn típusú kettőscsillagokon is, mi a helyzet a ζ Andromedaeval?

A csillagról az 1997/98-as KPNO-adatok alapján készített Doppler-képek, valamint a 2008-as VLT észlelések alapján született Doppler-rekonstrukciók is arról árulkodtak, hogy a csillagon az alacsonyabb szélességeken megjelenő foltok sokszor a kettőscsillag keringéséhez rögzített kvadrátúra pozíciókban (90° , 270°) vagy ahhoz közel találhatók, amit egyébként a 2013-as interferometrikus képalkotás eredménye is megerősít. Úgy tűnik tehát, hogy a ζ And esetében az aktív hosszúságok megjelenésében a kettősségnek alapvető szerepe van.

A 109. oldalon a 2.55 ábra fontos eredményeket, következtetéseket foglal össze, amelyeket érdemes lett volna egy külön konklúzió, vagy összefoglalás fejezetben részletezni, megemlítve, hogy melyik esetben melyik mechanizmus érvényesül, illetve melyik modell magyarázza a legjobban a megfigyeléseket. Az ábrával kapcsolatban a kérdésem az, hogy az a nyírási paraméter és a forgási periódus közötti, lineárisnak tűnő összefüggés mennyiben lehet kiválasztási effektus eredménye, esetleg más-más arányosság érvényes-e a törpe- és az óriáscsillagokra?

Az ábrával kapcsolatban le kell szögezni, hogy azon olyan „klasszikus” foltos változócsillagok vannak, amelyek rotációs vonalszélesedése lehetővé tette, hogy felszínükről Doppler-rekonstrukció készüljön. Ennek megfelelően törpecsillagok esetében csak a gyorsan forgó (max. néhány napos periódusú) csillagok jöhetnek szóba, ahogy óriások esetében is valamilyen mechanizmus szükséges, hogy a csillag kora ellenére fennmaradjon a viszonylag gyors forgás (pl. kettősség, közeli kísérő bolygó bekebelezése, belső perdületátadás felkeveredés következtében). Ilyen értelemben a minta szelektált. Ezzel együtt a törpék és óriások esetén megmért felszíni differenciális rotáció jól követi azt az elméleti+empirikus alapokon nyugvó szabályszerűséget, hogy a rotáció lassulásával a relatív felszíni nyírás nő (függetlenül attól, hogy a differenciális rotáció iránya szoláris, vagy azzal ellentétes). Gyorsan forgó törpék esetén Kitchatinov és Rüdiger 1999 (Differential rotation models for late-type dwarfs and giants, Astron. Astrophys. 344, 911–917) cikke szerint a lineáris kapcsolat nem meglepő, ugyanis elméleti alapon levezethető, hogy $\Delta\Omega/\Omega \sim \Omega^{-n}$, ahol $\Omega = 2\pi/P_{\text{rot}}$, valamint $n \approx 1$. Főszorozatról elfejlődött óriások esetén azonban jóval bonyolultabb a kép, a különböző modellek alapján a linearitás nem feltétlenül igaz, ám empirikusan igazolt, hogy P_{rot} növekedésével itt is nő a $\Delta\Omega/\Omega$ relatív differenciális rotáció (vö. Barnes et al. 2005, Mon. Not. R. Astron. Soc. 357, L1–L5). A dolgozatban megállapított lineáris kapcsolat jó összhangban van a Barnes et al. (2005) cikk 3. ábráján látható relációval, amelyhez a mintában a törpecsillagok mellett óriáscsillagok is szerepeltek (az idézett ábrán a H95 jelű fotometriai minta $\log \Omega < -0,5$ esetén praktikusán óriásokat tartalmaz). A Barnes-féle reláció 20–60 napos rotációnál ($\log \Omega = -0,5 \dots -1$ [rad/nap]) törpékre átlagosan – a Napra is jellemző – $\Delta\Omega/\Omega \approx 0,2$ értéket ad ($\log \Delta\Omega \approx -1,4$ [rad/nap]), míg óriásokra szisztematikusan kisebbet, átlagosan kb. 0,1-et ($\log \Delta\Omega \approx -2,0$ [rad/nap]), bár meg kell jegyezni, hogy az alapul szolgáló fotometriai módszer pontossága elmarad más módszerekhez képest. Összefoglalva: törpékre a linearitás elméletileg várható és megfigyelések is alátámasztják, óriások esetében pedig első közelítésben feltételezhető, ám valószínűleg sokkal bonyolultabb a kép, sok tényező játszik szerepet, a módszerek egy része pontatlan, emiatt a kapott értékek szórása nagy, végül pedig a megfigyeléseink sem képeznek még elegendően nagy mintát.

Milyen következtetéseket lehet levonni a működő dinamómechanizmusokra nézve a vizsgált 4 csillag esetében, mennyire lehet például különbséget tenni a Babcock-Leighton és az átlagtér közelítés dinamó között? Hol működhetnek jobban az $\alpha\Omega$ vagy $\alpha^2 / \alpha^2\Omega$ dinamók?

Elméleti megfontolások alapján a vizsgált óriásokon a Rossby-szám (a rotáció és a konvektív átfordulási idő hányadosa, ahol az utóbbi keveredési hossz modellek alapján becsülhető) alapján $\alpha\Omega$ dinamó feltételezhető (a klasszikus turbulens-konvektív α -effektus mellett a tér felerősítésében a differenciális rotáció játszik döntő szerepet), míg a gyorsan forgó, közel $1M_{\text{Nap}}$ tömegű törpék esetében a rotáció miatt az α -effektus szerepe nagyobb, a differenciális rotáció szerepe pedig csökken, noha a mágneses aktivitás (kvázi)oszcillációit (ciklusok) is tapasztaljuk ($\alpha^2\Omega$ -dinamó). Az α^2 -dinamót a teljesen konvektív, kis tömegű ($<0.3M_{\text{Nap}}$) törpecsillagok belsejében várjuk, itt a differenciális rotáció eltűnik, a dinamó nem oszcillál.

A 112. oldalon a 3.1 ábra nem jelöli meg a Betelgeuzet a bal felső sarokban az aláírás ellenére. A jelölés ott van a képen, bár könnyű összekeverni a szaturált csillagok körül megjelenő diffrakciós tüskékkel.

A 117. oldal 3.5 ábráján az interferometriával és Doppler-leképezéssel készült két kép olyan mértékben különbözik, hogy az északi poláris foltot leszámítva igen nehezen lehet pozitív korrelációt felfedezni, negatívát annál inkább. A Doppler-kép valóban megbízhatóbb?

Részben vitatkozom az állítással, ugyanis a két képalkotás nem tér el oly nagy mértékben, ha figyelembe vesszük a Doppler-leképezés ismert hibáját, a tükröződési effektust, amely elégtelen fázislefedettség vagy más kedvezőtlen körülmények miatt jelentkezik, és hatására a foltok súlypontja a látható pólus féltekéjére helyeződik. Ennek eredménye látható a 3.5 ábrán: az interferometrikus képen a déli félteke domináns foltjai a Doppler-képen az északi féltekére képződnek. A Doppler-kép ideális körülmények esetén, általában megbízható eredményt ad. Jelen esetben azonban az interferometrikus kép pontosabban adja vissza a hemiszférikus különbségeket.

A 119. oldalon a 3.3 pont részletesen kifejti új generációs eszközök alkalmazásait, kérdésem, van-e lehetőség az ezekbe a kutatásokba való bekapcsolódásra?

Örömmel jelenthetem, hogy van lehetőség, sőt, már jelentős lépéseket is tettünk ez ügyben, ugyanis már használjuk a Potsdami Leibniz-Asztrofizikai Intézetben (AIP) Thorsten Carroll által kifejlesztett „iMap” Zeeman-Doppler-rekonstrukciós kódot, amely újabb verziójának a tesztelését 2016 végén kezdtük el a kód fejlesztőjével együttműködve. Azóta egy új, közös publikáció is elkészült, lényegében beküldésre vár. Konkrét ígéretet kaptunk arra is, hogy az egyenként 8,4m tükrátmérőjű távcsövekből álló távcsőpár, a Large Binocular Telescope egyik műszere, a Potsdam Echelle Polarimetric and Spectroscopic Instrument (PEPSI) adataihoz a potsdami együttműködés keretében hozzájutunk. Ennek köszönhetően lehetővé válik a teljes Stokes-vektor felhasználásával végzett komplett csillagfelszíni mágneses tér-rekonstrukció, amelyre az iMap kód képes.

Üdvözlettel: Kóvári Zsolt

2017.03.10.