

Válaszok Dr. Petrovay Kristóf opponensi kérdéseire

Köszönöm az opponensnek a gondos bírálat elkészítését. Az elismerő szavakat és a kritikai észrevételeket egyaránt nagyra értékelem. Válaszaim (dőlt betűvel szedve) a kérdések (vastagon szedve) sorrendjében, pontról pontra:

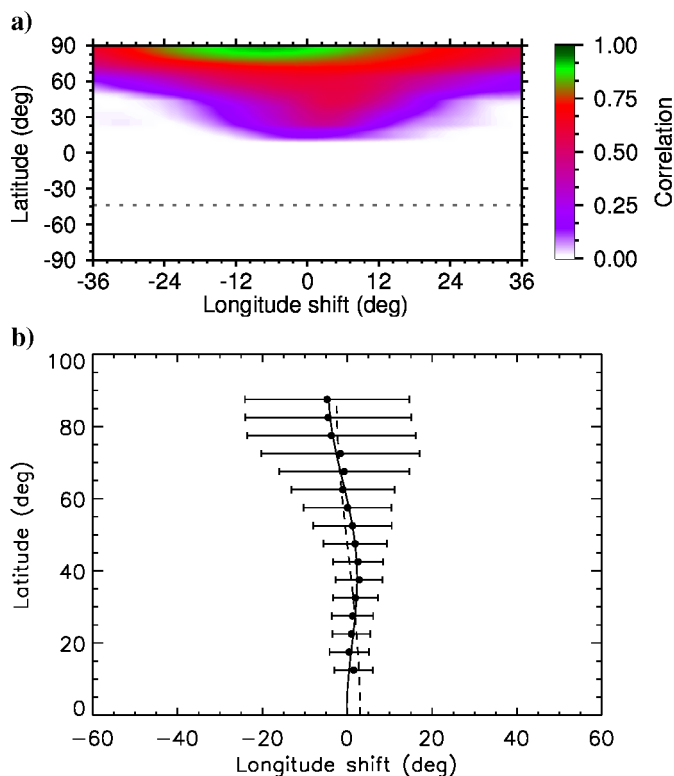
1. A rendelkezésre álló (akár a dolgozatban tárgyalt, akár más csillagokra vonatkozó, akár a szerző, akár mások által készített) foltterképek alapján van-e lehetőség a felszíni áramlásokon túl ténylegesen a dinamó megfigyelhető jegyeinek nevezhető jelenségek vizsgálatára? Ilyenek lehetnek pl. a foltok méret, élettartam, csillagrajzi szélesség vagy idő szerinti gyakoriságeloszlása.

Ilyen vizsgálatokra egyelőre csak nagyon korlátozott mértékben van lehetőség. Fotometriai foltmodellek alapján kapott foltterképekből csupán az átlagos foltfedettséget tudjuk meghatározni, azon túl pedig a csillagrajzi hosszúság szerinti folteloszlást. Egyes foltok méretére, vagy szélesség szerinti elhelyezkedésére vonatkozó vizsgálatra az egydimenziós fotometriai adatsorok nem alkalmasak. A felszín spektroszkópiai (Doppler-) rekonstrukciója alapján ugyan volna lehetőség a kérdésben megfogalmazott vizsgálatokra, azonban még nincs olyan hosszú távú adatsor, amely kellő részletességgel követné végig egy csillag aktivitási ciklusát. A foltok méretére és a csillagrajzi szélességi elhelyezkedésre vonatkozó adatok egyelőre csak nagyon „hézagosan” állnak rendelkezésre, ami érthető, hiszen a szükséges adatmennyiség összegyűjtéséhez hosszú távra tervezett észlelési stratégia és hozzá alkalmas műszerek kellenének, no meg persze rengeteg műszeridő. S bár hasonló céllal működik néhány spektroszkópiai robottávcső a világon, azonban – földfelszíni megfigyelésekről lévén szó – az eszközök folyamatos használatának eleve gátat szabnak a napi, a szezonális, valamint az időjárás okozta megfigyelhetőségi korlátok. A jelenleg rendelkezésre álló észlelési adatsorokból – rövidebb időtávon – a foltok méretének, élettartamának változásait már nagyobb sikerrel követhetjük nyomon. Egy példa erre a közelmúltból Künstler és mtsai. (2015, A&A 578, A101) munkája: az XX Tri vörös óriáscsillag felszínének idősoros Doppler-leképezéses vizsgálata. A kb. 24 napos forgási periódusú K0 óriáscsillagról a STELLA robottávcső 6 éven át gyűjtött spektroszkópiai megfigyeléseket, így minden évből 5-7, időben egymást követő Doppler-képet sikerült rekonstruálni. A képekből a szerzők nyomon tudták követni egyes foltok felbomlását, amely alapján bomlási törvényt állítottak fel és megbecsülték a turbulens diffuzivitást. A foltok szélesség szerinti gyakoriságeloszlására vonatkozó Doppler-leképezéses vizsgálatokhoz azonban egyelőre nincs kellő mennyiségű adat.

2. Poláris vagy pólusközei foltok esetében, mint már egy fenti megjegyzésben rámutattam, a differenciális rotáció illesztésénél nem jogos a $\sin^2$ -es tagnál megállni. Szükség van legalább a $\sin^4$ -es tagra is, aminek együttthatója egy további paramétert hoz be az illesztésbe. Ráadásul az egyes paraméterek hibái között crosstalk lép fel, ezért illesztőfüggvényként célszerűbb Gegenbauer-polinomok használata, ld. Snodgrass (1984, SPh 94, 13). Mi több, egyes modellek szerint (pl. a dolgozatban idézett Kitchatinov & Olemskoy 2011) a differenciális rotáció profilja egészen anomális is lehet, így a sima profil-illesztések a foltok helyzetétől függő eredményeket (és így látszólag az idő függvényében erősen változó differenciális rotációt) eredményezhetnek. Mennyiben befolyásolhatta mindez a V889 Her és a ζ And esetében az (elsősorban a szerző által kapott) eredményeket?

A Nap esetében és a csillagokra alkalmazott elméleti számításokban (pl. Kitchatinov & Olemskoy 2011) valóban van jelentősége a magasabb kitevőjű tagoknak. Azonban a dolgozatban a differenciális rotáció keresztkorrelációk alapján történő illesztése során a pólusközei tartományt egyetlen alkalommal sem vettem figyelembe (a tesztekben sem), aminek oka, hogy a pólushoz közeledve a keresztkorreláció egy határon túl értelmetlenné válik. A korrelációs függvényektől ugyanis addig várhatunk értelmezhető eredményt, amíg a foltok karakterisztikus mérete kisebb, mint

a szélességi öv hossza, amelyen a folt van. A pólushoz közeledve ez a feltétel egyre kevésbé teljesül, ezért egy pólust fedő folt törvényszerűen erős autokorrelációt fog mutatni tetszőleges eltolódásra (hacsak nem nagyon kicsi a folt mérete, ill. excentrikus az alakja és elhelyezkedése). A parametrikus módszer esetén (amikor a foltok helyett a vonalakon megjelenő dudorok elmozdulásai alapján rekonstruáljuk a felszíni nyírást), a helyzet a póluson levő foltok tekintetében hasonló, ugyanis azok a spektrumvonalak centrumában keltenek dudort, ami a rotáció fázisában nem (vagy csak alig) változtatja pozícióját és alakját, így lényegében nincs is lehetőség a pólus közeli tartomány (differenciális) rotációjának a meghatározására. Ugyan a vonalprofil szélesedés módosulása (65. old. 2.24 ábra) alapján becsülhető a differenciális rotáció, de a jellemző mérési pontosság és a spektrális felbontás ezúttal sem teszi lehetővé a magasabb hatványú rotációs törvények közti különbségtételt. A csillagok differenciális rotációjával kapcsolatban óhatatlanul felmerül a kérdés: meddig érdemes elmenni az észlelési adatok interpretációja során. Csillagokon a felszíni nyírási paraméter meghatározásának becsült relatív hibája $\gtrsim 30\%$ (pl. Kővári és Weber 2004, PADEU Vol. 14, pp. 221–231, Kővári és mtsai. 2014, Proc. IAU Symp. 302, pp. 198–199.), így a $\sin^2$ -es illesztésnél több paraméterrel való illesztés az adatok túlértékelésének veszélyét hordozza. Ugyanakkor van rá példa, hogy a $\sin^4$ -es tag behozatala indokolt, amikor a maximális eltolódás nem az egyenlítőnél jelentkezik, hanem adott esetben kb. 40° -on, amint azt a mellékelt ábra mutatja (Özdarcan és mtsai. 2016, A&A 593, A123).



A bemutatott példán a HD 208472 vörös óriáscsillag felszíni foltterképeiből készített keresztkorrelációs ábra (fent) és a rá illesztett rotációs függvények (alul) láthatók. A szaggatott vonallal húzott illesztés $\Omega(\beta) = A + B\sin^2\beta$ alakú, míg a folytonos vonal $\Omega(\beta) = A + B\sin^2\beta + C\sin^4\beta$ alakú függvényt jelöl. Ugyanakkor mindkét illesztés hibán belül kielégítően követi a korrelációs mintázatot. (Kritikaként megjegyzem, hogy meggyőződésem szerint az ábrán a pólushoz közeli növekvő korreláció hamis, bizonyára téves interpretáció következménye, amint azt fentebb kifejtettem.) Mindezek fényében, véleményem szerint a $\sin^4$ -es tag bevonása a ζ And esetében az eredményt csupán a megadott hibahatáron belül befolyásolta volna, hiszen a korrelációs minta szerint a relatív eltolódás az egyenlítőnél volt a maximális (ld. 107. old. 2.52 és 2.53 ábrákat), vagyis nem lett volna indokolt a HD 208472 példáján bemutatott $\sin^4$ -es tag alkalmazása. A V889 Her

esetében pedig az észlelési adatok korlátozott mennyisége (10 spektrum, $R=42000$, $S/N=120$, csupán két alkalmas térképező vonallal) és a parametrikus Doppler-leképezés belső bizonytalansága miatt – tapasztalataim szerint – egy újabb ismeretlen paraméter behozatala az adatok túlértékelése felé tett lépés lett volna.

3. Ismeretes, hogy a Nap esetében a nyomkövetők (tracerek) ill. a Doppler-mérések alapján kapott differenciális rotáció szignifikánsan eltér. (A plazma Doppler-mérésekkel meghatározott rotációja lassabb a nyomkövetőkénél, ugyanakkor gyengébb szélességfüggést is mutat.) Vajon ehhez hasonló jelenség nem járulhat-e hozzá a keresztkorrelációs módszer illetve a nyírt kép (avagy parametrikus Zeeman-Doppler) módszer eredményeinek eltéréséhez?

El tudom képzelni, hogy ez is hozzájárulhat a különbséghez, bár – ha a Napon tapasztalt különbségből indulunk ki – annak mértéke valószínűleg kisebb a csillagokon alkalmazható módszerekre jellemző hibáknál. A Nap Doppler-méréseiből kapott rotációs profilt összevetve a mágneses tracerekből nyert rotációs profillal azt kapjuk, hogy az előbbi alapján az egyenlítői rotációs periódus $P_{EQ_DOPP}=25,453$ nap, míg a póluson $P_{POL_DOPP}=35,771$ nap, ugyanakkor a tracerek alapján $P_{EQ_TR}=25,044$ nap és $P_{POL_TR}=34,465$ nap (Stenflo 1989, A&A 210, 403). Eszerint a relatív nyírási paraméter az első esetben $\alpha_{DOPP}=0,288$ míg a második esetben $\alpha_{TR}=0,273$, vagyis az eltérés a Napon kevesebb mint 6%. Ezzel szemben a csillagokon a tesztek szerint a foltterképek keresztkorrelációján alapuló módszer által szolgáltatott α értékek becsült relatív hibája 35%, míg a nyírt kép módszerből kapott α értékeké 40% (Kővári és Weber 2004, PADEU Vol. 14, pp. 221–231), tehát ha van is különbség a csillagokon a plazma áramlásból ill. a foltmozgásokból kapható differenciális rotáció között, az a jelenleg elérhető pontosság mellett minden bizonnyal a hibahatár alatt van.

Kővári Zsolt

Budapest, 2017.03.10.