

Aktív csillagok Doppler-leképezése a Piszkéstetői Obszervatóriumból

Tudományos Diákköri Dolgozat

Készítette:

Sági Petra

ELTE TTK Csillagász MSc I. év

Témavezető:

Kriskovics Levente

Tudományos munkatárs, CSFK Konkoly Thege Miklós CSI

2023



ELTE
EÖTVÖS LORÁND
TUDOMÁNYEGYETEM



Kivonat

A Doppler képalkotás egy megbízható és jól kipróbált eszköz a csillagok aktivitásának, és ezen keresztül az ezt vezérlő mágneses dinamó működésének megismeréséhez. A csillagaktivitás forrása a mágneses dinamó, melynek legkönnyebben megfigyelhető manifesztációi a csillagfoltok, melyeket a mágneses fluxuscsövek és a konvektív zóna kölcsönhatása okoz. A Doppler-leképezés jóval több célponton használható, mint a közvetlen képalkotás, és egy indirekt, tomográfiás megoldást nyújt a megjelenő foltok helyzetének és kinézetének meghatározására. Míg fotometriai mérések esetén egydimenziós intenzitásgörbék (fénygörbék) meg tudjuk adni a foltok rotációs fázis szerinti elhelyezkedését (csillagrajzi "hosszúságát"), Doppler-leképezésnél a foltok által okozott torzulások geometriájából és a fázis szerinti "vándorlásukból" a foltok szélessége is rekonstruálható, ezáltal jóval pontosabban kinyerhetjük a felszíni hőmérsékleteloszlást. Jelen dolgozatban bemutatott kutatásban különböző típusú csillagok adatsoraira végeztem Doppler-leképezést, és ezek alapján megvizsgáltam, hogy a különböző típusú és fejlődési állapotú csillagokon hogyan alakul a csillagok mágneses aktivitása. Munkám során a Pizskéstetői Obszervatóriumban felvett spektroszkópai adatokat használtam fel.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	4
1.1. Csillagaktivitás	4
1.1.1. Történelmi áttekintés	4
1.1.2. Mágneses dinamó	6
1.1.3. Napfoltok	6
1.1.4. Foltos változócsillagok	8
1.2. Doppler képkalkotás	9
1.2.1. A módszer elve	9
1.2.2. Általános felírás	10
1.2.3. Inverz feladat megoldása	11
1.2.4. Alkalmazhatóság korlátai	11
2. Adatfeldolgozás	12
2.1. Adatok	12
2.1.1. Célpont csillagok	12
2.1.2. Redukció	12
2.2. Spektrálszintézis	13
2.3. Doppler leképezés elvégzése	14
2.3.1. Spektrumok centralizálása	14
2.3.2. iMap	15
3. Eredmények	17
3.1. EK Draconis	17
3.2. V889 Herculis	19
3.3. DI Piscium	20
3.4. II Pegasi	22
4. Összefoglalás	23
5. Jövőbeli tervek	23
6. Köszönetnyilvánítás	24

1. Bevezetés

1.1. Csillagaktivitás

A napaktivitási jelenségek a Nap dinamómechanizmusa által gerjesztett mágneses térhez köthetők, mely mezők behatolnak a csillag külső rétegeibe is (fotoszféra, kromoszféra), ezzel formálva foltokat, plázsokat, stb. Sok esetben tovább is terjedhetnek a külső atmoszférába (a koronába) ahol protuberanciákat, és átkötődésük során flereket és koronaanyag-kidobásokat okozhatnak. Ezen aktivitási jelenségek részletes tanulmányozásával fontos következtetések vonhatóak le a napdinamóval kapcsolatosan. Tekintve, hogy a külső konvekciós zónával rendelkező, hűvösebb csillagokon is ugyanilyen jelenségeket észleltek, a Napon kívül más csillagok aktivitásának vizsgálata egy alapos teszt lehet a használatban lévő dinamó modelleknek (Berdyugina, 2005).

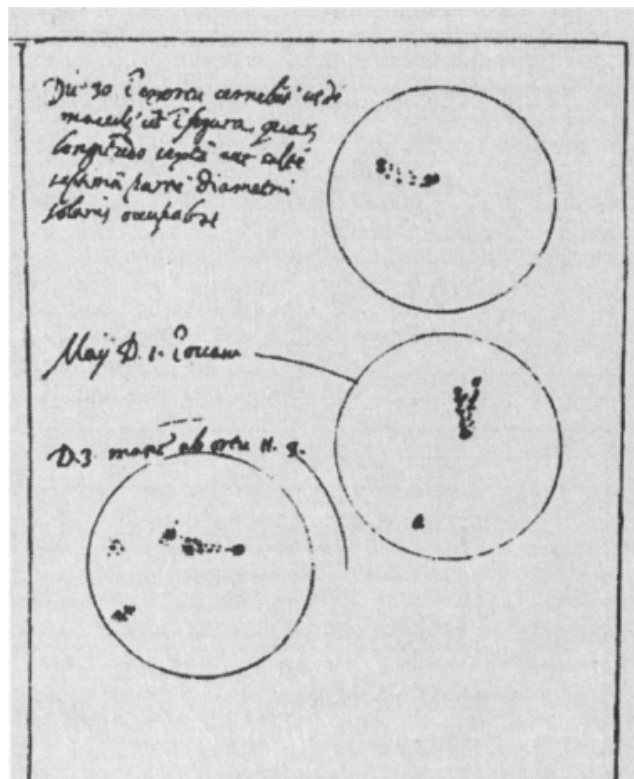
A dedikált, Napot figyelő földi és űrobszervatóriumok, például a Swedish Solar Tower (Scharmer & Lofdahl, 1991), a Solar and Heliospheric Observatory (Noci, 1984), vagy a Yohkoh (Švestka & Uchida, 1991) segítségével a csillag közelségének köszönhetően a Nap felszíne, és így a rajta megjelenő aktív folyamatok nagy felbontásban megfigyelhetők. A Nap aktivitási jelenségei rövid- (például flerjelenségek, foltfejlődés) és hosszútávú változásokat is mutatnak (aktivitási ciklus). Habár a napaktivitási jelenségeket a fentebb említett műszerekkel jól lehet vizsgálni, más, távolabbi csillagok esetén már nem ez a helyzet. Tekintve, hogy egy-két kivételt leszámítva (pl. Roettenbacher et al. 2016, 2017) jelenlegi műszereinkkel nem lehetséges a távoli csillagok felszínét megfelelő felbontásban megfigyelni, a felületi fényességeloszlásukat csak indirekt módszerekkel tanulmányozhatjuk, és ezáltal következtethetünk a rajtuk előforduló aktivitási jelenségekre.

1.1.1. Történelmi áttekintés

A napfoltok dokumentációja egészen az ókori görög, kínai és egyiptomi csillagászati megfigyelésekig nyúlik vissza: az első ismert ilyen tanulmányt Arisztotelész egyik tanítványa írta i.e. 400 körül. A jelenség első távcsöves megfigyelését Galileo Galilei végezte, aki tapasztalatait az *Istoria e Dimostrazioni intorno alle Macchie Solari* című értekezésében publikálta 1613-ban (Galilei et al., 1613). Kézzel rajzolt észlelései az 1. ábrán láthatóak.

Elsőként az o Ceti-ről (Mira) dokumentálták azt az elképzelést, hogy az inhomogén csillagfelszín okozhatja a csillag felületi fényességváltozását: Boulliau (1667) azzal írta le a jelenséget, hogy az objektum rendelkezik egy fényesebb és egy sötétebb félgömbbel, amik a forgás közben váltakoznak. Habár ez a modell később tévesnek bizonyult, hisz a Mira egy pulzáló változó, azonban a magyarázat, miszerint a csillagfoltok okozzák a fényességváltozásokat, elterjedt volt az elkövetkezendő 200 évben.

A csillagpulzáció felfedezésével (Eddington, 1918; Ledoux, 1940; Ledoux & Pekeris, 1941) ren-



1. ábra. Galilei (1718) rajzai a napfoltokról.

geteg változócsillagról kiderült, hogy a fényességváltozásukat radiális pulzációnak köszönhetik, így a csillagfoltok általi magyarázat háttérbe szorult a következő évtizedekre. Habár volt jó pár fénygörbéken megfigyelt hatás, amelyre a csillagfoltok magyarázatot adhattak volna (pl. a W UMa fénygörbéjének aszimmetriája (Müller & Kempf, 1903; Baldwin, 1908)), a magyarázatok során kerültek a foltokat mint lehetőséget.

Kron az 1950-es évek elején fedési kettősök fénygörbéjének elváltozásait csillagfoltokkal magyarázta (Kron, 1952), majd Hoffmeister "nem egyenletes felszíni hőmérsékleteloszlásként" írta le a T Tauri típusú csillagok fényességváltozását (Hoffmeister, 1965). Chugainov (1966) részletesen foltokkal magyarázta a BY Dra fénygörbéjének torzulását, amely egészen odáig vezetett, hogy 1971-ben már foltos változónak kategorizálták az említett csillagot a General Catalog of Variable Stars (GCVS) csillagkatalógusban.

1974-ben Hall definiálta a szoláris analógiát, miszerint a csillagokon megfigyelt aktivitási jelenségek fizikai háttérben hasonló mechanizmusok állnak, mint a Nap esetében. Ezt olyan következtetésekre építette fel, mint hogy a fénygörbe elváltozása hátráló mozgást végez a differenciális rotáció miatt, valamint ezek hosszútávú amplitúdóváltozása aktivitási ciklusoknak köszönhetőek (Hall, 1974). A Ca II H és K hosszútávú vonalerősség-változásának felfedezése rámutatott arra, hogy a

csillagaktivitás változó időskálákon jelenhet meg (Wilson, 1978). Ennek eredményeként kimutatták, hogy számos csillag a Naphoz hasonlóan hosszú idejű ciklusokat mutat.

Az említett áttörések alátámasztották a foltok jelentőségét a csillagok felületi fényességváltozásában, majd az elkövetkezendő technikai fejlődés még több bizonyítékkal szolgált az elméletet illetően, amely mára már elterjedté vált.

1.1.2. Mágneses dinamó

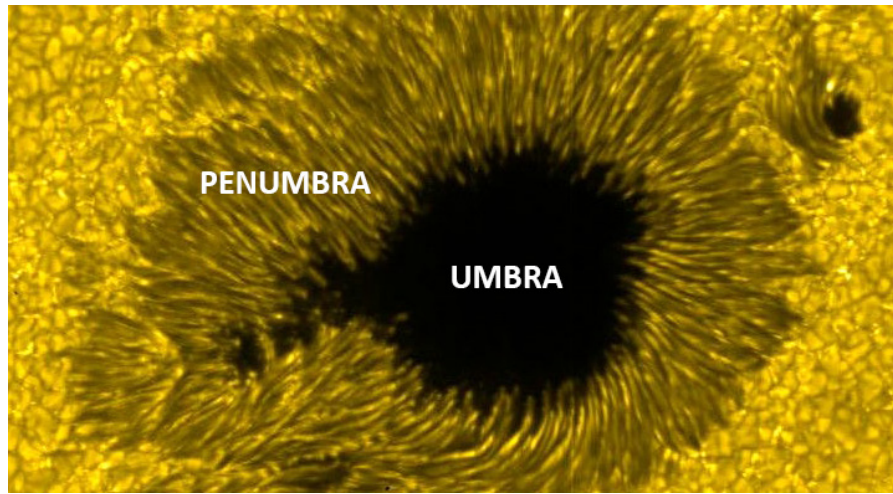
A Nap mágneses aktivitásáért a napdinamó felelős, amit az α és Ω mechanizmusok idéznek elő. Ez a két hatás egyidőben történik, csupán a könnyebb megértés miatt tárgyaljuk őket külön. Az Ω effektus alapja, hogy a Nap differenciális rotációja olyan mágneses teret indukál, amely a már meglévő dipólszerű poloidális mágneses fluxuskötegekből toroidális, "sávszerű" teret alakít ki (Cowling, 1953). Ennek párja az α mechanizmus, amely során a toroidális fluxuskötegek felsodródnak a polársapkák felé és ezzel poloidális erővonalak keletkeznek (Stix, 2004).

Ez a fent említett dinamó hatás a konvektív áramlásokból és differenciális rotációból származó mozgási energiát elektromágneses energiává alakítja. A csillag anyagában mozgó elektromosan vezető anyag nyíródik és akár turbulenciákat is kialakíthat, amelyek Lenz-törvénye alapján módosítják a mágneses mezőt: a már meglévő mezőben történő vezető mozgása áramokat indukál, amelyek eltorzítják a kezdeti mágneses teret. Bizonyos esetekben a mágneses tér önfenntartóvá válik, ahogy a Nap esetében is feltételezhető.

A jelenlegi hipotézisek szerint a csillag tachoklínája fontos szerepet játszik a gyenge poloidális terek erős toroidális mezőkké alakításában. Azonban a jelenlegi rádió megfigyelések alapján léteznek olyan hűvösebb, Naphoz hasonló mágneses terekkel rendelkező vörös és barna törpecsillagok, melyek teljesen konvektívek, így tachoklínájuk sincsen. Ezek alapján felmerülhet az a feltételezés, miszerint csak a konvektív zóna is lehet egyedül felelős a napdinamó kialakulásáért, így az ilyen csillagok tere $\alpha - \Omega$ helyett más modellel írható le (Route, 2016).

1.1.3. Napfoltok

A napfoltok a Nap fotoszférájának egyenlítői sávjában megjelenő sötét alakzatok, amelyek a csillag egyenlítőjétől legfeljebb $30 - 35^\circ$ távolságban helyezkednek el északi és déli irányban. Átlagos élettartamuk egy hónap körül van, átmérőjük 1000 és 100000 km között változik. Kinézetük jellegzetes gyűrűs mintázatot mutat: általában egy sötétebb belső rész, *umbra*, valamint egy valamivel világosabb külső rész, *penumbra* jellemző rájuk (2. ábra). Megjelenhetnek egyesével vagy kisebb csoportokban is, az utóbbi során megkülönböztethetünk ún. "vezető" illetve "követő" foltokat a felszínen vándorlásuk során. Elnevezésük a Nap forgásiránya alapján történik és ellentétes polaritással rendelkeznek. Adott ciklusban az egyik féltekén a "vezető" mindig egy adott polaritású, míg a másik



2. ábra. Átlagos napfolt felépítése. Forrás: spaceweatherlive.com

féltekén az ellenkezője igaz. Ezek a polaritásvizonyok azonban a következő ciklusban megfordulnak. Számuk többéves időskálán drasztikusan változik, ez egy hozzávetőleg 11 éves periodikus ciklust követ. Ezalatt az idő alatt nem csak a mennyiségük, hanem felszíni elhelyezkedésük is változik: a ciklus elején magasabb szélességi fokoknál jelennek meg, majd az idő elteltével egyre közelebb kerülnek az egyenlítőhöz. Ezt a jelenséget a Spörer-szabály írja le (Carrington, 1863). A ciklus ábrázolása ún. pillangó-diagrammokon történik, ami a 3. ábrán látható.

Adott ciklusban az egyik féltekén a "vezető" mindig egy adott polaritású, míg a másik féltekén az ellenkezője igaz. Ezek a polaritásvizonyok azonban a következő ciklusban megfordulnak.

A foltok a csillag azon részein helyezkednek el, ahol a toroidális fluxuscsövek átszúrják a fotoszférát és a kialakuló mágneses befagyás hatására a konvekciós energiatranszport aránya csökken. Az *umbra* részben ezek a csövek merőlegesek a felületre, míg a *penumbrában* nem teljesen, így a konvektív energiatranszport is kevésbé gyengül, mint a sötétebb részeken. A csövek felszínnel bezárt szögét az alábbiak alapján határozzuk meg a folt közepétől vett r távolság függvényében:

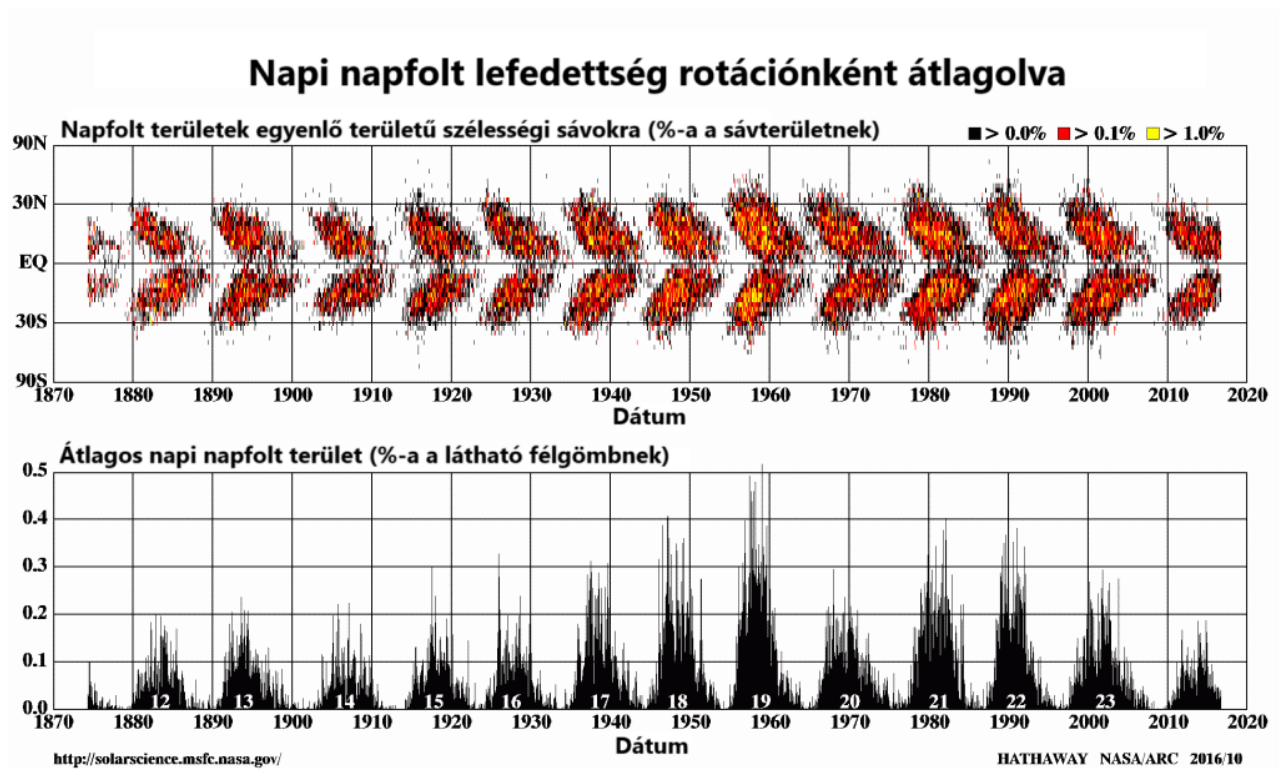
$$\Phi = \frac{\pi r}{2R} , \quad (1)$$

ahol R a folt sugara.

A folton belüli mágneses mezőt a következő összefüggéssel írhatjuk le, ahol B_0 a napfolt átlagos télerőssége:

$$B(r) = \frac{B_0}{1 + r^2/R^2} . \quad (2)$$

$B(r)$ értéke tipikusan 2000-3000 G között mozog, intenzitása kb a negyede a fotoszféráénak. Ez alapján kimutatható a Stefan-Boltzman törvény alapján, hogy a hőmérséklet különbség a két régió között $\Delta T \approx 1600$ K (Stix, 2004).



3. ábra. Pillangódiagram (fent) és napi átlagos napfolt terület változásának diagramja (lent). Forrás: solarscience.msfc.nasa.gov

1.1.4. Foltos változócsillagok

Hall szoláris analógiájának értelmében (Hall, 1974) más csillagokra is feltételezzük a fentebb említett dinamó működés előfordulását. Az ebből adódó aktivitási jelenségek jelentős fényváltozást okozhatnak vagy akár a színkép tulajdonságait is megváltoztathatják. A foltok okozta fényességváltozás alapján foltos változócsillagok több típusát tudjuk megkülönböztetni. Ezek közül a legismertebbek a következők (megjegyezzük, hogy az egyes csoportok között megszokott az "átjárás"):

- **BY Draconis:** G-K-M típusú törpék, tömegük $0.08 - 1.0 M_{\odot}$, sugaruk $0.2 - 1.0 R_{\odot}$ között mozog tipikusan. Hőmérsékletük $T_{eff} = 2500 - 6000$ K. Forgási periódusuk 2-100 nap közé tehető, luminozitásuk $0.01 - 1.0 L_{\odot}$. Lehetnek kettős rendszer tagjai és egyedülálló csillagok is. A dolgozatban vizsgált EK Draconis és V889 Herculis is ide sorolható.
- **FK Comae:** Nagy forgási sebességgel rendelkező G-K óriások $T_{eff} = 4000 - 6000$ K hőmérséklettel, forgási periódusuk jellemzően néhány nap. Erős kromoszférikus aktivitással rendelkeznek, ami kimutatható a színképében lévő Ca II H, K, és H α vonalakból. Nagy kiterjedésű, aszimmetrikus eloszlású foltok jellemzőek rájuk, amelyek $0.1^m - 0.3^m$ amplitúdójú fénygörbét

okoznak. Feltehetően fejlődésük során valamikor elnyelhettek egy kísérőjüket, ezzel magyarázható a gyors forgás is.

- **RS CVn:** Szoros fedési kettős rendszerek egy F-G III-IV-V típusú főkomponenssel és egy G-K IV-V típusú másodkomponenssel. Nagy kiterjedésű foltok jellemzőek rájuk, amelyek a fedési fénygörbék modulációit magyarázzák. Lehetnek egyes (SB1) és kettős (SB2) típusú spektroszkópiai kettősök is (leggyakrabban az óriás főkomponenssel rendelkezők egyes típusúak).
- **W UMa:** Legtöbb esetben két Naphoz hasonló komponenssel rendelkező kompakt kettősrendszer. Gyakori típus, forgási periódusa jellemzően 1 napnál kisebb és folyamatos fényváltozást mutat. Mivel a nagyobb tömegű komponens anyagot ad át a kisebbnek, így felszíni hőmérsékletük közel azonos. Rájuk is jellemző a foltok okozta moduláció a fénygörbén.

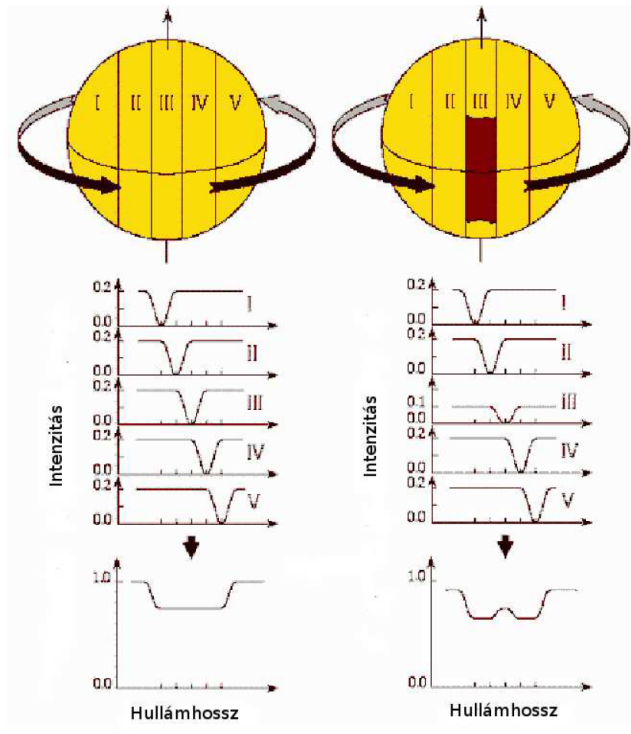
1.2. Doppler képalkotás

A foltleképezési módszerek közül a fotometriai leképezés lényegesen egyszerűbben hozzáférhető, de csak a foltok hosszúságát tudja visszaadni megbízhatóan. A Doppler-leképezés ezzel szemben jelentősen megbízhatóbb képet ad a csillagfelszínről. Hátránya azonban, hogy nagyfelbontású spektroszkópiai idősorokat igényel, melyek nehezebben hozzáférhetők, mint a fotometriai idősorok.

1.2.1. A módszer elve

A módszer története 1980-ra vezethető vissza, amikor Fekel a HR 1099 csillag színeképvonaláiban torzulásokat fedezett fel (Fekel, 1980), majd később Vogt és Penrod rájöttek, hogy ezek a torzulások a felszíni fényességeloszlás egydimenziós lenyomatai. Ez alapján kidolgozták a Doppler-képalkotás eljárását, miszerint ha elegendő spektrumot vesznek fel az adott csillagról megfelelő fázislefedettséggel, akkor rekonstruálni tudják a csillag fényességeloszlását (Vogt & Penrod, 1983). A módszer alapelve, hogy egy egyértelmű megfeleltetés van a spektrumvonal torzulásának hullámhossz-pozíciója és a csillag látszó korongjának egy-egy, a rotáció irányára merőleges vetületével párhuzamos, keskeny sávja között. Tekintsük a 4. ábrán ábrázolt felszínfelosztást, ahol az egyes szektorok nagyjából azonos területtel rendelkeznek. Ahogy a csillag forog, az adott szektorokhoz tartozó lokális vonalprofilok a korong közepétől vett távolságuknak megfelelő Doppler-eltolódást szenvednek. Mi ezen lokális profilok összességét, a rotációsán kiszélesedett vonalprofilt észleljük.

Ha a csillagon egy folt jelenik meg, akkor a "foltos" szektorból érkező kontinuumfluxus lecsökken. Ennek következtében a rotációsán kiszélesedett profilon egy púp fog megjelenni a foltos szektornak megfelelő pozícióban. Ahogy a folt a csillag felszínén elmozdul a forgás hatására, úgy fog a púp is "vándorolni" a vonalprofilon, (lásd 5. ábra). Mivel a torzulás a fényességeloszlás egydimenziós



4. ábra. Torzulásmentes vonalprofil (bal) és a forgó felszínen vándorló folt miatt torzult vonalprofil (jobb). Forrás: Rice (1996)

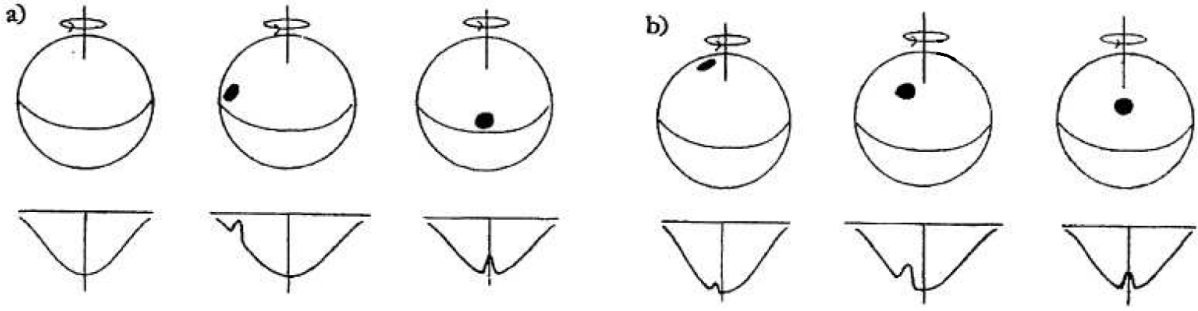
lenyomata, így ha kétdimenziós vetületet szeretnénk, a forgási periódust megfelelően lefedő spektrumokra van szükségünk, tehát megfelelő időelosztású és elegendő számú színekpre van szükség a módszer alkalmazásához.

1.2.2. Általános felírás

A Doppler-leképezést általánosan az alábbi integrálegyenlettel írhatjuk fel:

$$R_{calc}(\lambda, \Phi) = \frac{\int \int I_{cont}(M, \theta) R[M, \theta, \lambda + \Delta\lambda(M, \Phi)] \cos M dM}{\int \int I_{cont}(M, \theta) \cos M dM}, \quad (3)$$

ahol R_{calc} a Φ fázisban, λ hullámhossznál számított vonalmélység, R a lokális vonalak M pontban, I_{cont} a kontinuum intenzitása, M a csillag felszínén elfoglalt pozíció (ez l hosszúsággal és b szélességgel adható meg), θ a látóirány és a felület normálisa által bezárt szög M -ben, $\Delta\lambda$ pedig a rotáció miatt fellépő Doppler-eltolódás Φ fázisban és M pontban.



5. ábra. A púp vándorlása a folt szélességétől függően. Forrás: (Rice, 1996)

1.2.3. Inverz feladat megoldása

A felszíni hőmérsékleteloszlást úgy kaphatjuk meg, hogy megoldunk egy inverz problémát, ahol a bemeneti adatsor egy $R_{obs}(\lambda, \Phi)$ spektrumsorozat. A megoldást iteratív módon kapjuk meg az alábbi hibafüggvény minimalizálásával:

$$E = \chi^2(f) + \alpha S_r(f) , \quad (4)$$

ahol

$$\chi^2(f) = \sum_{\Phi} \sum_{\lambda} \left(\frac{R_{calc}(\Phi, \lambda) - R_{obs}(\Phi, \lambda)}{\sigma_{\lambda, \Phi}} \right)^2 . \quad (5)$$

Itt χ^2 az illesztés jóságát jellemző statisztikai érték, míg $S_r(f)$ egy regularizációs függvény, amire azért van szükség, mert a jel-zaj arány véges, így χ^2 egyszerű minimalizálása nem ad egyértelmű megfeleltetést az adatsor és a Doppler-kép között (a zaj által meghatározott hibán belül végtelen lehetséges megoldás van).

1.2.4. Alkalmazhatóság korlátai

A Doppler-leképezés leginkább olyan csillagokra alkalmazható amelyek spektrumában a forgás által okozott rotációs vonalkiszélesedés eléri, vagy meghaladja a Voigt-profilt. Azonban a túl magas forgási sebességértékeknél a vonalprofil túl sekély lesz ahhoz, hogy a profiltorzulások megkülönböztethetők legyenek a zajtól, így tehát lehetőleg a következő feltételnek teljesülnie kell a célpont csillagra: $v \cdot \sin i \approx 20 - 110 \frac{\text{km}}{\text{s}}$, ahol v az egyenlítői forgási sebesség, i pedig az inklináció. Ha $i = 0^\circ$, akkor a csillagot a pólus irányából látjuk így nem lesz Doppler-kiszélesedés a vonalprofilban. Ha viszont $i = 90^\circ$, akkor az északi és déli féltéke invarianciája bizonytalanná teszi az eredményeket, így elmondható, hogy az ideális inklináció érték $i = 30 - 60^\circ$. Ezen kívül lényeges kritérium még, hogy a jel-zaj arány értéke legalább 100, optimálisan 200 feletti legyen, legalább 8-12 spektrumot

használjunk, amelyek rövid intervallumon belül lettek kimérve (kiküszöbölve ezáltal a foltfejlődésből eredő bizonytalanságokat) és egyenletes fázislefedettséggel rendelkeznek, valamint megfelelő, lehetőleg vonalak átfedésétől, ún. blendektől mentes térképező vonalakat válasszunk. Fontos szempont még, hogy erős, ne nagyon hőmérsékletérzékeny vonalakat válasszunk, mert a nagy érzékenységű vonalaknak változhat az ekvivalens szélessége a forgás során (Vogt & Penrod, 1983). Tekintve, hogy az eljárás nagy felbontású spektrumokat igényel, így a számomra elérhető célpont csillagok száma limitálva van az általam használt spektrográf paraméterei által. Habár ennek következtében több olyan csillagot is vizsgállok, amelyek folteloszlásáról már létezik szakirodalom, azt fontos figyelembe venni, hogy a foltok evolúciója (akárcsak a Nap esetében) idővel változik. Így ugyanazon nagy aktivitású célpontok többszöri vizsgálata nemcsak, hogy új információkkal szolgál, hanem egyenesen szükséges az aktivitási ciklusuk részletes megismeréséhez.

2. Adatfeldolgozás

2.1. Adatok

Munkám során a Piskéstető obszervatórium 102 cm-es Ritchey–Chrétien–Coudé távcsövének spektrográfiájával, témavezetőm, Kriskovics Levente által korábban kimért mérési adatokat használtam. A műszer egy autokollimált echelle spektrográf, amely fő diszperziós eleme egy echelle rács. Ez végzi a fény felbontását, míg egy másik keresztdiszperziós elem a különböző rendeket hozza létre. A műszer felbontása $R = \lambda/\Delta\lambda = 21000$.

2.1.1. Célpont csillagok

A kutatásom jövőbeli terveihez a vizsgált csillagok megválasztása aszerint történt, hogy lehetőleg minél jobban lefedje a fősorozati és óriásági aktív csillagok ágát. Jelen dolgozat írásakor 3 célpont már elkészült Doppler-képpel rendelkezik, 2 pedig folyamatban van, lásd 1. táblázat.

2.1.2. Redukció

A nyers spektrumok adatredukciója az általános CCD redukció lépései szerint lett elvégezve. Ezen lépéseket a Bódi Attila által írt Python kód, a `piskespipeline`¹ hajtotta végre a csillagokon, az EK Dragonis kivételével, amelynek redukcióját én is elvégeztem ellenőrzésképpen. Itt a bias-, dark- és flat-korrekcióhoz valamint a hullámhosszkalibrációhoz és a kontinuumnormáláshoz az IRAF adatredukciós programcsomag `noao/imred/ccdproc` és `noao/imred/echelle` rutinjait használtam (Tody, 1986). A spektrumok hullámhossz kalibrációjához a referenciaspektrum egy tórium-argon kalibrációs lámpa

¹A kód elérhető Githubon.

Név	Koordináták (J2000)	Színképosztály	Változó típusa	Forgási periódus [nap]	Inklináció [°]	Munkafolyamat
EK Dra	14:39:00.21 +64:17:29.98	G1.5V	BY Dra	2.6	65	Kész
V889 Herculis	18:34:20.10 +18:41:24.23	G2V	BY Dra	1.3	70	Kész
DI Piscium	22:59:59.39 +05:09:34.48	K0III	Li-gazdag FK Com-szerű	18.02	50	Kész
ζ Andromedae	00:47:20.33 +24:16:01.84	K1III+KV	RS CVn	17.92	60	Folyamatban
II Pegasi	23:55:04.05 +28:38:01.25	K2IV+M0-M3V	RS CVn	6.7	60	Kész

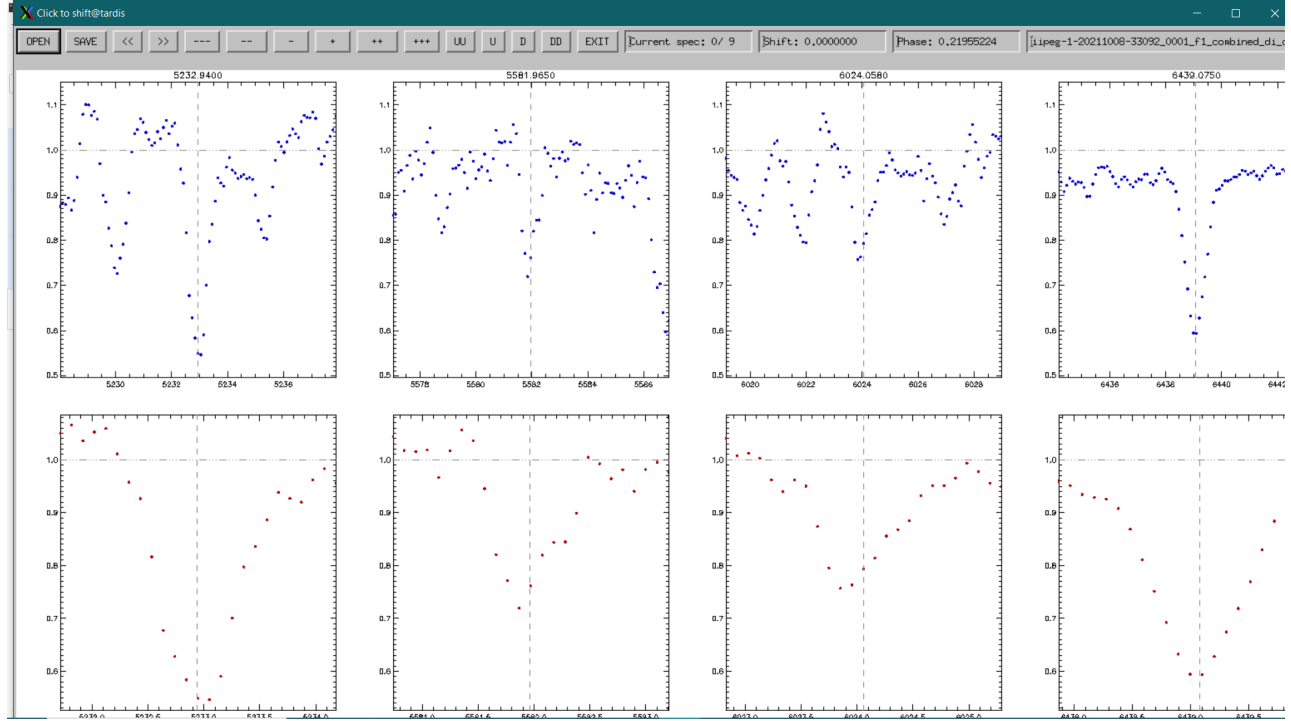
1. táblázat. A már elkezdett csillagok adatai. Forrás: SIMBAD

színképe volt, melyet témavezetőm időben közel vett fel a spektrumhoz, mivel bár a spektrográfszoba temperált, a nyomásváltozás szintén okozhat eltolódást az echellogramban. A redukált spektrumokat a továbbiakban txt formátumban kaptam kézhez.

2.2. Spektrálszintézis

Mivel a Doppler-leképezés során spektrumvonalak szintetizálása történik, szükségünk van a célpontjaink pontos asztrofizikai paramétereire. A csillagok fizikai paramétereinek meghatározásához a *Spectroscopy Made Easy* (SME) szoftvercsomagot használtam fel (Piskunov & Valenti, 2017). Ez két részből áll: egy IDL-ben írt grafikus felhasználói felületből (GUI) és egy szintén IDL-ben írt megoldóprogramból. Az első GUI komponens segíti a bemeneti adatstruktúra felépítését, a kezdeti feltételek meghatározását és az eredmények tanulmányozását. A második komponens megoldóködja illesztést hajt végre a megfigyelt spektrumon egy külső, Fortran-ban írt könyvtár (a "solver" maga) meghívásával. A Fortran-megoldóköd megoldja az áramlási egyenletet a megadott kezdeti paraméterekkel, majd az IDL-ben írt iteráló- és minimalizálóprogram a kezdeti paraméterek változtatásával újra kiszámoltatja a mesterséges spektrumot a megoldóköddel. Teszi ezt addig, amíg már az illesztés jósága nem változik a jel-zaj viszony által meghatározott tartományon belül.

Az SME használatához először meg kell adnunk egy már összeállított mesterséges vonallistát, mely tartalmazza az átmenetek nyugalmi hullámhosszát, gerjesztési energiáját, $\log(gf)$ értékeit (itt f az átmenethez tartozó oszcillátorerősség, míg g statisztikus súly), és még pár egyéb paramétert, a csillag kezdő paramétereit, egy előre kiszámított atmoszféra modellt és a mérési műszer felbontását. Ezután beállítjuk a rögzített és szabad paramétereket, majd a mérési adatot asc kiterjesztésben



6. ábra. A click2shift program grafikus felülete az II Peg egyik középre igazított spektrumával.

beolvasva elindítjuk az illesztést (Piskunov & Valenti, 2017).

Esetemben a vizsgált csillagok effektív hőmérsékletét (T_{eff}), a felszíni gravitációs gyorsulás logaritmusát ($\log g$), a csillag forgási sebességét ($v \sin i$), a mikrotrubulencia értékét (v_{mic}) és fémességét ($[\text{Fe}/\text{H}]$) illesztettem a szoftver felhasználásával. A makroturbulenciát (v_{mac}) az alábbi egyenlet alapján számoltam ki (Valenti & Fischer, 2005):

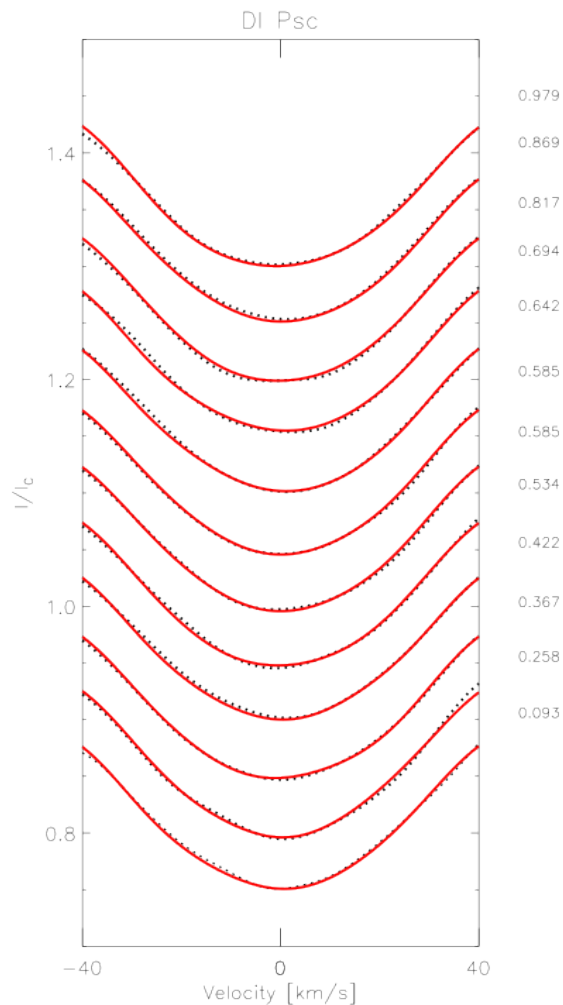
$$v_{\text{mac}} = 3.98 - \frac{T_{\text{eff}} - 5770\text{K}}{650\text{K}} . \quad (6)$$

A kezdőparamétereket szakirodalomból vettem át, atmoszféra modellnek MARCS modelleket használtam fel.

2.3. Doppler leképezés elvégzése

2.3.1. Spektrumok centralizálása

Ahhoz, hogy a képalkotás sikeres legyen a spektrumokat be kell igazítani a kontinuumhoz. Ehhez az IDL-ben írt *click2shift* programot használtam, ami a 6. ábrán látható grafikai felületet létrehozva teszi lehetővé, hogy a megfigyelt spektrumokat horizontálisan és vertikálisan eltoljuk. Ez részben automatizálható lehetne, de mivel a diszperziós megoldás nem lineáris, és az esetleges hibái sem



7. ábra. A DI Piscium iMap által illesztett vonalprofiljai.

ugyanakkorák különböző hullámhosszokon, illetve az egyéni vonalalakok eltérhetnek, így az átlagolt vonalprofil közepe nem feltétlen fog egybeesni minden vonal nyugalmi hullámhosszával, továbbá a kontinuum-normálás hibái is jobban korrigálhatók így.

2.3.2. iMap

A felszíni hőmérsékleteloszlás rekonstrukciójához az *iMAP* Doppler-képkalkotó kódot használtam, ami többvonalas Doppler-leképezést hajt végre az adott fotoszferikus vonalakon (Carroll et al., 2012). 40, egymással nem átfedő és megfelelő vonalmélységgel, hőmérsékletérzékenységgel és jól meghatározott kontinuummal rendelkező elnyelési vonalat választottam ki a 5000-6750 Å régióból. A csillag felületét egy $6^\circ \times 6^\circ$ -os szférikus rácson modelleztem. A lokális vonalprofilokat a Carroll et al.

(2008) által leírt módon számolta a kód. Az abszorpciós vonalak adatait a Vienna Atomic Line Database (VALD, Kupka et al., 1999) adatbázisából vettem át. A szintézishez az új generációs Kurucz modelleket (Castelli & Kurucz, 2003) használtam. A modellrács a szükséges hőmérséklet, gravitációs gyorsulás és fémesség értékekre lett interpolálva. Az áramlási egyenlet megoldásához feltételeztam a lokális termodinamikai egyensúly. További kezdeti paraméterek a mikro- és makroturbulencia, valamint a vetített egyenlítői sebesség.

A kód az ún. Landweber iterációs módszert használja, ami egy nem ideális inverz lineáris problémák megoldására kitalált matematikai algoritmus. A módszer alapja a hibák négyzetösszegének minimalizálásából származtatott rögzített pont iterációja az alábbiak szerint:

$$\min_x \frac{1}{2} \| \mathbf{I}(\mathbf{x}) - \mathbf{O} \|^2 . \quad (7)$$

Ennek megoldása

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + w_k \mathbf{I}'(\mathbf{x}_k)(\mathbf{O} - \mathbf{I}(\mathbf{x}_k)) , \quad (8)$$

ahol

$$w_k = \frac{\|u_k\|^2}{\|\mathbf{I}'(\mathbf{x}_k)u_k\|^2} , \quad (9)$$

és

$$u_k = \mathbf{I}' * (\mathbf{O} - \mathbf{I}(\mathbf{x}_k)) . \quad (10)$$

Itt $\mathbf{I}$ a mesterséges vonalprofil, $\mathbf{O}$ a megfigyelt vonalprofil, $\mathbf{x}$ egy vektor ami a szabad paramétereket tartalmazza, $\mathbf{I}'$ egy gradiens vektor, w_k pedig egy súlyfaktor (Carroll et al., 2012).

Az *iMap* inverziója előtt előkészületeket szükséges elvégezni a megfigyelt spektrumokon, ezzel létrehozva egy megfelelő bemeneti fájlt a képalkotáshoz. Ezekhez az alábbi három IDL programot használtam:

- **extractList.pro:** Kivágja a spektrumokból az egyes vonalprofilokat minden fázisra és elraktározza őket mra fájlalba. Minden ilyen fájl egy adott vonalprofilot tartalmaz egy bizonyos forgási fázisra. Ennél a lépésnél állítható az, hogy mekkora legyen a kivágott spektrális ablak egy vonal körül, illetve a kivágott profil spektrális felbontása "újrabinelés" után.
- **assembleList.pro:** A kivont vonalprofilokból profil fájlokat rak össze minden leképező vonalra, melyik az összes észlelési fázist tartalmazzák.
- **mergeList.pro:** Az előzőleg összeillesztett leképező profilokat kiátlagolja, ezzel létrehozva egy végső bemeneti fájlt, mely az összes észlelési fázisra tartalmazza a kivágott vonalokból készült átlagprofilokat.

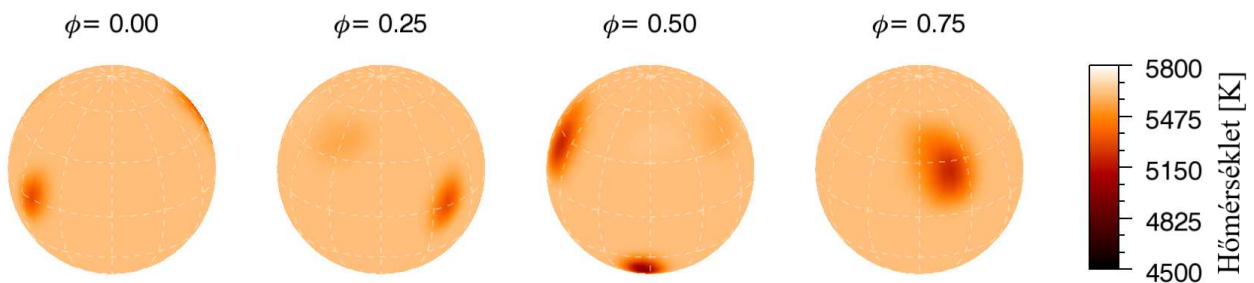
Az inverzió elindításához meg kell adnunk a mergeList.pro által készített bemeneti fájlt, és az *SME*-vel már korábban meghatározott fizikai paramétereket. A képalkotás előtt érdemes egy ún. "prefit" analízist is elvégezni, ami egy kezdeti mesterséges spektrumot hoz létre a kontinuum és a radiális sebesség illesztésével. Mindezek után a Doppler képalkotást elindítva végeredményben megkapjuk a kész képet, melyet aztán a különböző inverziós paraméterek (pl. regularizáció mértéke, vonalak élessége, a két félteke egymáshoz viszonyított súlyának aránya, stb.) változtatásával tudunk finomítani. A program vonalprofil illesztésének grafikus megjelenésére a 7. ábrán látunk egy példát.

3. Eredmények

Az alábbiakban a három kész csillag Doppler-képei és a hozzájuk tartozó *SME* által illesztett fizikai paraméterek láthatóak. A kész képeket az *iMap* saját ábrázolórutinjával jelenítettem meg ortografikus (szférikus) és ekvirektanguláris (Mercator-szerű) vetületben. Az utóbbiakon a szaggatott vonal alatti rész jelöli azon területeket, amelyeket az inklináció miatt már nem láthatunk. Az EK Draconis a 8. és 9. ábrákon, a V889 Herculis a 10. és 11. ábrákon, a DI Piscium a 12. és 13., az II Pegasi pedig a 14. és 15. ábrákon látható. Az illesztett paraméterek a 2. , 3. , 4. és 5 táblázatokban találhatóak.

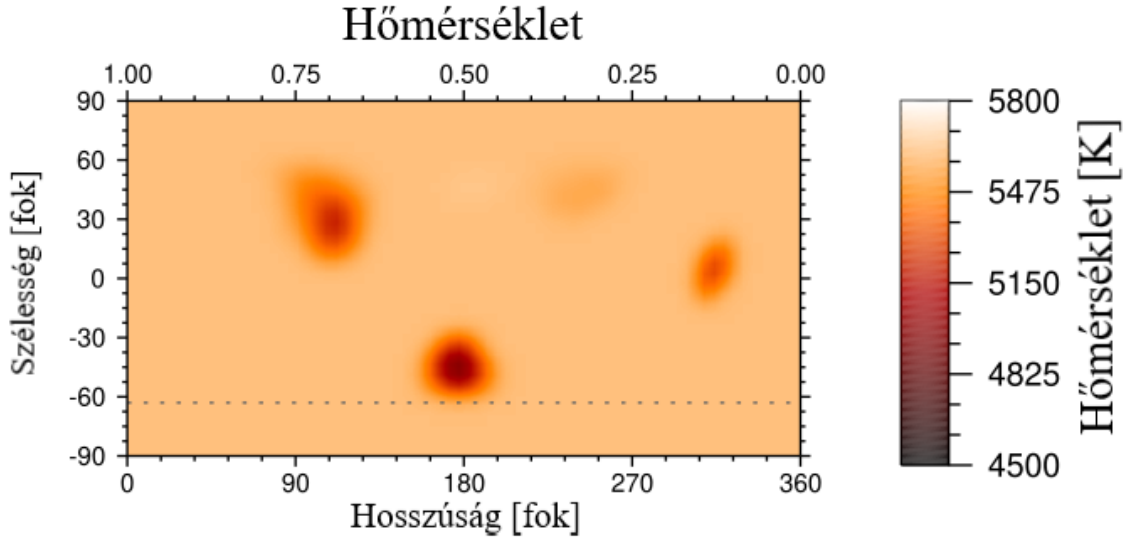
3.1. EK Draconis

Az EK Draconis (HD 129333, HIP 71631) egy G2-3V osztályú fiatal, nagyjából 80 millió éves, aktív Nap-analóg csillag, melyről kiterjedt irodalom áll rendelkezésre. Amellett, hogy betekintést nyújt a fiatal Nap mágneses aktivitásába, a fősorozati csillagok rotációs fejlődésének vizsgálatában is fontos szerepe van, miután effektív egyedülálló csillag (a kísérője ≈ 50 éves periódussal nagy excentricitású pályán kering), és röntgentartományban is meglehetősen fényes. Az elkészült Doppler kép spektru-



8. ábra. Az EK Draconis kész Doppler-képe ortografikus ábrázolásban.

mai ciklus maximum közepén készültek, csakúgy, mint Järvinen et al. (2018) munkájában. Náluk a kép felsőbb részein figyelhető meg prominensebb folt. Az én képemen ezzel ellentétben az ellentétes



9. ábra. Az EK Draconis kész Doppler-képének ekvirektanguláris vetülete.

féltekén található a legkontrasztosabb struktúra míg közepes szélességeken kisebb foltok figyelhetőek meg.

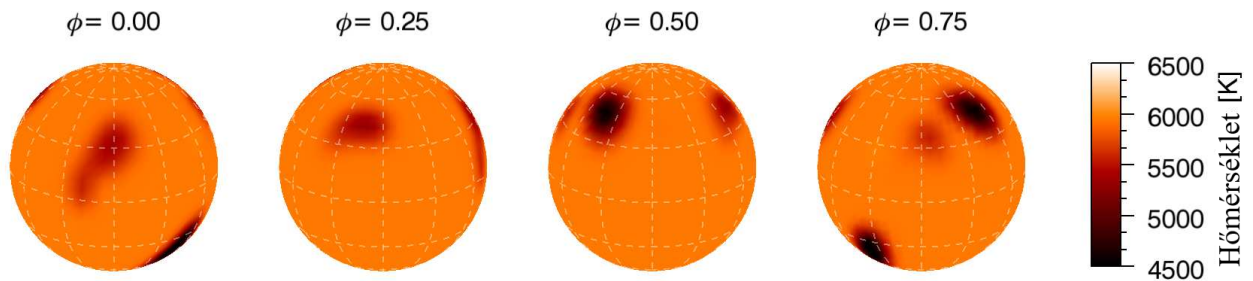
Érdemes megjegyezni – és ez a következő Doppler-térképekre is igaz, de az EK Dra-ra fokozottan –, hogy értelmezésüknél figyelembe kell venni a műszer felbontásából ($R \approx 21000$) eredő limitációkat. A relatíve kis felbontás, és az EK Dra esetén a nem túl nagy $v \sin i$ azt eredményezi, hogy a vonalprofilok kevesebb pontban vannak mintavételezve. Kriskovics et al. (2023) kiterjedt tesztet hajtott végre annak vizsgálatára, hogy hogyan befolyásolja a spektrális felbontás a leképezést. Azt találta, hogy a csökkenő felbontás hatására bár néhány alacsony kontrasztú felszíni struktúra elkenődhet, illetve a folthőmérsékletek néha csökkennek, a kép szerkezete lényegében nem változik.

T_{eff} [K]	5550
$\log g$	4.27
[Me/H]	-0.004
v_{mic} [km/s]	0.8
v_{mac} [km/s]	4.5
$v \sin i$ [km/s]	17

2. táblázat. EK Draconis illesztett fizikai paraméterei.

3.2. V889 Herculis

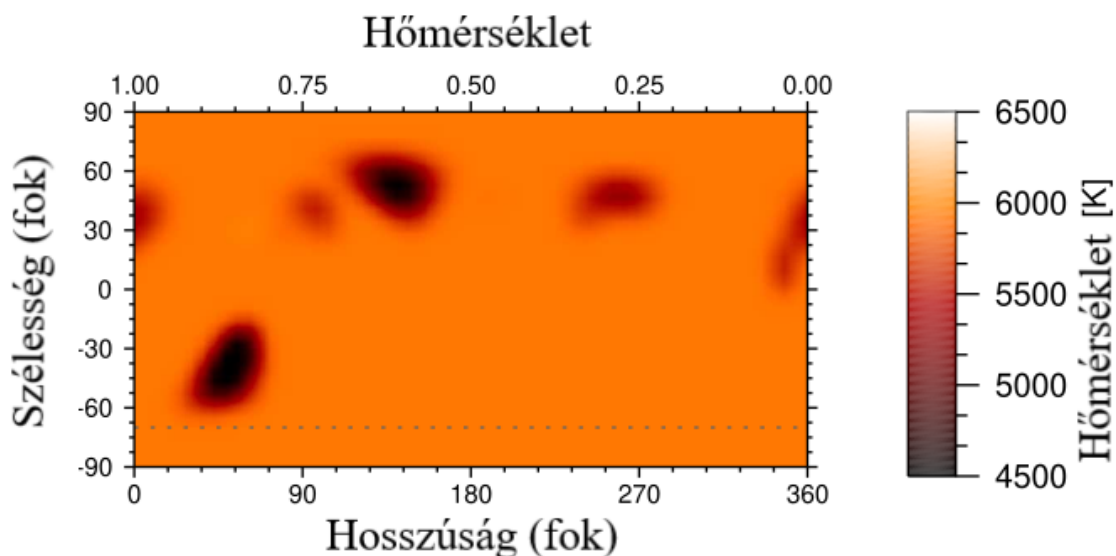
A V889 Herculis (HD 171488, HIP 91043) szintén egy G2V típusú, fiatal (30-50 millió éves) Nap-analóg csillag, amely hasonló okokból érdekes, mint az előbb bemutatott EK Draconis. Habár emiatt feltételezhető, hogy erre a csillagra is jellemző a poláris folt jelenléte, ahogy Willamo et al. (2019) munkájában is láthatjuk, ez nem feltétlen jelenti azt, hogy ez állandóan jelen is van a csillagon. Ahogy megfigyelhetjük, az általam készített Doppler-képen hiányzik ez a jellegzetes poláris folt. Egyébként a poláris folt hiánya időszakonként az előbb tárgyalt EK Draconis-on is (Rosén et al., 2016) megfigyelhető volt. A képen főként a magasabb szélességeken domináns a foltok jelenléte, ám ez nem zárja ki keletkezésüket az alacsonyabb térségeken sem (lásd a 11. ábra -30° -os szélességi és 45° -os hosszúsági tartományát). Az ilyen típusú folteloszlás jellemzően feltűnt már Willamo et al. (2019) és Kővári et al. (2011) munkájában is, így elmondható, hogy az elért eredményeim korrelálnak az eddigi kutatásokéval.



10. ábra. A V889 Herculis kész Doppler-képe ortografikus ábrázolásban.

T_{eff} [K]	5940
$\log g$	4.35
[Me/H]	0.12
v_{mic} [km/s]	1.9
v_{mac} [km/s]	3.9
$v \sin i$ [km/s]	43.7

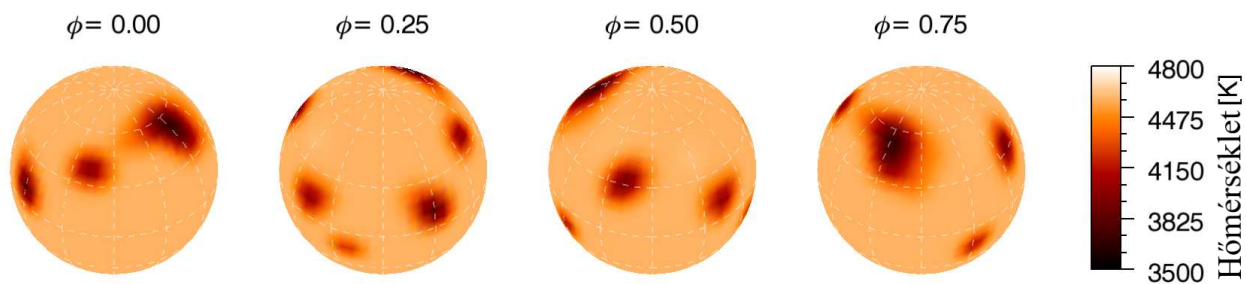
3. táblázat. V889 Herculis illesztett fizikai paraméterei.



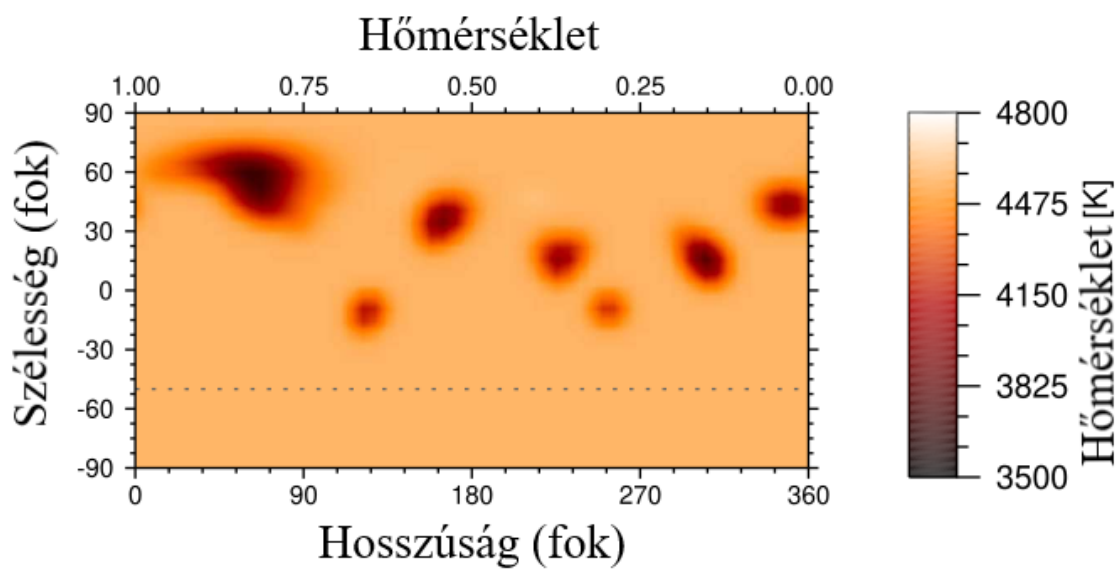
11. ábra. A V889 Herculis kész Doppler-képének ekvirektanguláris vetülete.

3.3. DI Piscium

A DI Piscium egy lítiumban gazdag, K1III színképtípusú óriás. Antiszoláris differenciális rotációval rendelkezik, tehát a Nappal ellentétben az egyenlítőnél a forgása lassabb, mint a pólusok felé. Ez összefüggésbe hozható azzal, hogy miért jelenik meg erősen lítium a csillag felszínén, annak ellenére, hogy fejlődésében már a vörös óriás ágon tart: az antiszoláris differenciális rotáció okozta anyagmozgás felsodorhatja a mélyebb rétegekben lerakódott fémeket a pólusok felé (Kriskovics et al., 2014). Ennek ellenére poláris folt jelenléte nem feltétlen jellemző a csillagra, a domináns foltokat azonban itt is szintén a magasabb szélességeken láthatunk. Ez az általam készített Doppler-képen is megmutatkozik. Figyelembe véve, hogy korábbi kutatásoknál is jellemző volt az itt látható tipikusan "tarka" folteloszlás (Kriskovics et al., 2014; Kővári et al., 2013), az eredményeimről elmondható, hogy megfelelnek az eddigi szakirodalomnak.



12. ábra. A DI Piscium kész Doppler-képe ortografikus ábrázolásban.



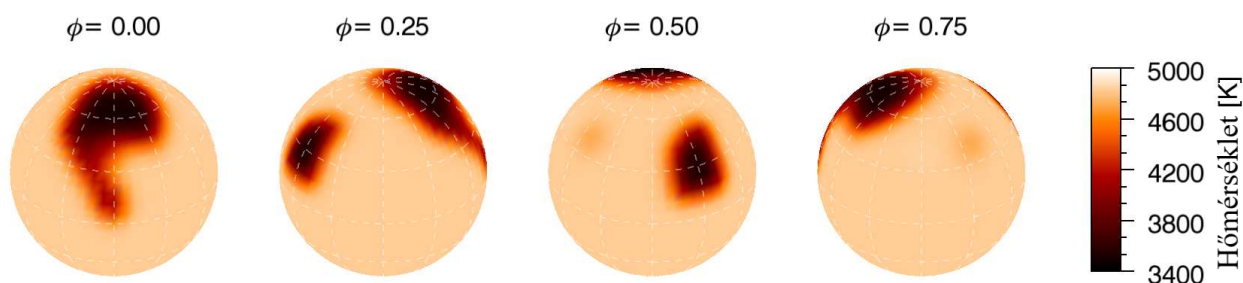
13. ábra. A DI Piscium kész Doppler-képének ekvirektanguláris vetülete.

T_{eff} [K]	4600.74
$\log g$	2.28
[Me/H]	0.04
v_{mic} [km/s]	1.62
v_{mac} [km/s]	5.78
$v \sin i$ [km/s]	44.65

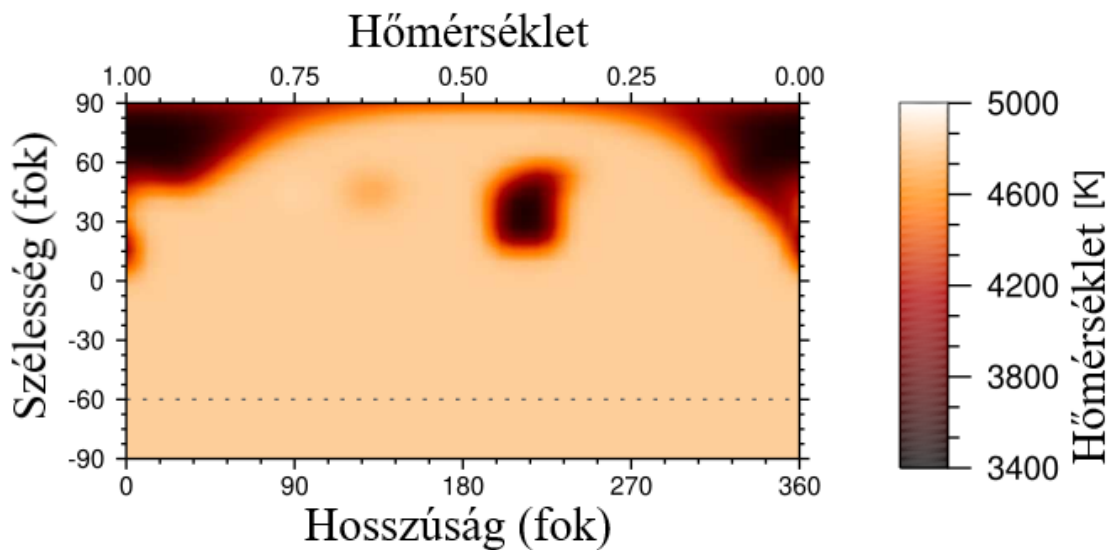
4. táblázat. DI Piscium illesztett fizikai paramétereit.

3.4. II Pegasi

Az II Pegasi kettős rendszer főkomponense egy K2 típusú, RS CVn változó szubóriás (Berdyugina et al., 1998). Nagy aktivitása miatt intenzív flereket produkál és felszínének akár 40%-át is csillagfoltok boríthatják (Covino et al., 1999). Az elkészített Doppler-képeken ez a nagy aktivitás jól látszik, hiszen kivehető két nagy kiterjedésű folt, amelyek közül a dominánsabb poláris és egy érdekes, nyúlt formával rendelkezik. Ez azzal magyarázható, hogy feltehetően két struktúrát látunk, ám a használt műszer felbontása nem elég magas ahhoz, hogy ezeket szeparálja, így egy "összefolyt" végeredményt kapunk.



14. ábra. Az II Pegasi kész Doppler-képe ortografikus ábrázolásban.



15. ábra. Az II Pegasi kész Doppler-képének ekvirektanguláris vetülete.

T_{eff} [K]	4832.86
$\log g$	3.8
[Me/H]	-0.11
v_{mic} [km/s]	1.31
v_{mac} [km/s]	5.63
$v \sin i$ [km/s]	28.67

5. táblázat. II Pegasi illesztett fizikai paramétereit.

4. Összefoglalás

Korábbi, témavezetőm, Kriskovics Levente által kimért piszkéstetői spektrum adatokat feldolgozva hoztam létre Doppler-képeket különböző aktív változócsillagokról. A dolgozat írásáig 5 célpont csillagot kezdtem el vizsgálni, ebből háromra sikeresen elkészítettem a felszíni hőmérsékleteloszlás diagramokat. Az elkészült célpontok a következők voltak: az EK Draconis és V889 Herculis BY Dra típusú Napszerű változók és a DI Piscium lítiumban gazdag FK Comae-szerű óriás. A csillagok fizikai paramétereinek meghatározásához az *SME* szoftvercsomagot, a spektrumvonalak kontinuumhoz igazításához a *click2shift* IDL programot, a Doppler-leképezés elvégzéséhez pedig az *iMap* szoftvert használtam fel. A képeket kétféleképpen ábrázoltam, ortografikus illetve ekvirektanguláris vetületi térképeken az *iMap* saját ábrázolóprogramjának segítségével. A foltok elhelyezkedésére és eloszlására kapott eredmények az eddig a témában elfogadott szakirodalommal korrelálnak, így elmondható, hogy a képalkotás sikeres volt.

5. Jövőbeli tervek

A kutatásom elkövetkezendő szakaszában tervezek saját magam is méréseket végezni a Piszkéstetői Obszervatóriumban, ezzel felvéve a sorban következő célpontjaim spektrumát. A célpontokat tervezem úgy megválasztani, hogy a lehető legjobban lefedje a HRD fősorozati ágát, valamint ezen célpontokra is elvégezni a Doppler-képalkotást. Fő célom a kész hőmérsékleteloszlás képekre egy súlyozott fényesség átlagot, ú.n. fotocentert kiszámolni, amely a foltok forgása miatt feltételezhetően egy periodikus "mozgást" fog végezni az adatsorban. Ezt az elmozdulást szeretném a későbbiekben összevetni a Gaia űrtávcső adatainak hibájával és megvizsgálni, hogy a foltok okozta fényességcsökkenés relevánsan befolyásolja-e a távolságmérés pontosságát.

6. Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Kriskovics Leventének, hogy támogatta és segítette munkámat, valamint Vida Krisztiánnak, aki az általa elnyert Élvonal pályázatból anyagilag támogatja kutatásomat.

Hivatkozások

- Baldwin, J. M. (1908). The short-period variable W Ursæ Majoris. *MNRAS*, 69, 78.
- Berdyugina, S. V. (2005). Starspots: A Key to the Stellar Dynamo. *Living Reviews in Solar Physics*, 2(1), 8.
- Berdyugina, S. V., Jankov, S., Ilyin, I., Tuominen, I., & Fekel, F. C. (1998). The active RS Canum Venaticorum binary II Pegasi. I. Stellar and orbital parameters. *AA*, 334, 863–872.
- Boulliau, I. (1667). *Ad astronomos monita duo: Primum, de stella nova, quae in collo Ceti ... visa est : Alt. de nebulosa in Andromedae cinguli parte Borea ante bien. it. orta*. Cramoisy.
- Carrington, R. C. (1863). *Observations of the spots on the Sun: from November 9, 1853, to March 24, 1861, made at Redhill*.
- Carroll, T. A., Kopf, M., & Strassmeier, K. G. (2008). A fast method for Stokes profile synthesis. Radiative transfer modeling for ZDI and Stokes profile inversion. *AA*, 488, 781–793.
- Carroll, T. A., Strassmeier, K. G., Rice, J. B., & Künstler, A. (2012). The magnetic field topology of the weak-lined T Tauri star V410 Tauri. New strategies for Zeeman-Doppler imaging. *AA*, 548, A95.
- Castelli, F. & Kurucz, R. L. (2003). New Grids of ATLAS9 Model Atmospheres. In N. Piskunov, W. W. Weiss, & D. F. Gray (Eds.), *Modelling of Stellar Atmospheres*, volume 210 (pp. A20).
- Chugainov, P. F. (1966). On the Variability of HD 234677. *Information Bulletin on Variable Stars*, 122, 1.
- Covino, S., Tagliaferri, G., Pallavicini, R., Mewe, R., & Poretti, E. (1999). The active binary star iipeg with beposax.
- Cowling, T. G. (1953). Solar Electrodynamics. In G. P. Kuiper (Ed.), *The Sun* (pp. 532).
- Eddington, A. S. (1918). Stars, Gaseous, On the pulsations of a gaseous star. *MNRAS*, 79, 2–22.
- Fekel, F. C. (1980). Absorption Line Asymmetries in HR 1099. In *Bulletin of the American Astronomical Society*, volume 12 (pp. 500).
- Galilei, G. (1718). *Le opere di Galileo Galilei*, volume 1. Barbèra.
- Galilei, G., Welser, M., & de Filiis, A. (1613). *Istoria E dimostrazioni intorno alle macchie solari E loro accidenti comprese in tre lettere scritte all'illvstrissimo signor Marco Velseri ...*

- Hall, D. S. (1974). The O9+Of eclipsing binary V729 CYG in CYG OB-2. , 24, 69.
- Hoffmeister, C. (1965). Analyse der Lichtkurven von vier RW Aurigae-Sternen. *Veroeffentlichungen der Sternwarte Sonneberg*, 6(3), 97–122.
- Järvinen, S. P., Strassmeier, K. G., Carroll, T. A., Ilyin, I., & Weber, M. (2018). Mapping EK Draconis with PEPSI. Possible evidence for starspot penumbrae. *AA*, 620, A162.
- Kővári, Z., Frasca, A., Biazzo, K., Vida, K., Marilli, E., & Çakırlı, Ö. (2011). Differential rotation on the young solar analogue V889 Herculis. In D. Prasad Choudhary & K. G. Strassmeier (Eds.), *Physics of Sun and Star Spots*, volume 273 (pp. 121–125).
- Kővári, Z., Korhonen, H., Strassmeier, K. G., Weber, M., Kriskovics, L., & Savanov, I. (2013). Doppler imaging of stellar surface structure. XXIV. The lithium-rich single K-giants DP Canum Venaticorum and DI Piscium. *AA*, 551, A2.
- Kriskovics, L., Kővári, Z., Seli, B., Oláh, K., Vida, K., Henry, G. W., Granzer, T., & Görgei, A. (2023). EI Eridani: A star under the influence. The effect of magnetic activity in the short and long term. *AA*, 674, A143.
- Kriskovics, L., Kővári, Z., Vida, K., Granzer, T., & Oláh, K. (2014). Lithium enrichment on the single active K1-giant DI Piscium. Possible joint origin of differential rotation and Li enrichment. *AA*, 571, A74.
- Kron, G. E. (1952). A Photoelectric Study of the Dwarf M Eclipsing Variable YY Geminorum. *ApJ*, 115, 301.
- Kupka, F., Piskunov, N., Ryabchikova, T. A., Stempels, H. C., & Weiss, W. W. (1999). VALD-2: Progress of the Vienna Atomic Line Data Base. *AAS*, 138, 119–133.
- Ledoux, P. (1940). Sur la théorie des oscillations radiales d’une étoile. *Astrophysica Norvegica*, 3, 193.
- Ledoux, P. & Pekeris, C. L. (1941). Radial Pulsations of Stars. *ApJ*, 94, 124.
- Müller, G. & Kempf, P. (1903). Ein neuer Veränderlicher von außergewöhnlich kurzer Periode 3.1903 Ursae majoris. *Astronomische Nachrichten*, 161, 141.
- Noci, G. (1984). The Solar and Heliospheric Observatory. In G. A. Doschek (Ed.), *IAU Colloq. 86: Eighth International Colloquium on UV and X-Ray Spectroscopy of Astrophysical and Laboratory Plasmas* (pp. 155).

- Piskunov, N. & Valenti, J. A. (2017). Spectroscopy Made Easy: Evolution. *AA*, 597, A16.
- Rice, J. B. (1996). Doppler imaging of stellar surfaces (review). In K. G. Strassmeier & J. L. Linsky (Eds.), *Stellar Surface Structure*, volume 176 of *IAU Symposium* (pp. 19).
- Roettenbacher, R. M., Monnier, J. D., Korhonen, H., Aarnio, A. N., Baron, F., Che, X., Harmon, R. O., Kővári, Z., Kraus, S., Schaefer, G. H., Torres, G., Zhao, M., Ten Brummelaar, T. A., Sturmann, J., & Sturmann, L. (2016). No Sun-like dynamo on the active star ζ Andromedae from starspot asymmetry. *Nature*, 533(7602), 217–220.
- Roettenbacher, R. M., Monnier, J. D., Korhonen, H., Harmon, R. O., Baron, F., Hackman, T., Henry, G. W., Schaefer, G. H., Strassmeier, K. G., Weber, M., & ten Brummelaar, T. A. (2017). Contemporaneous Imaging Comparisons of the Spotted Giant σ Geminorum Using Interferometric, Spectroscopic, and Photometric Data. *ApJ*, 849(2), 120.
- Rosén, L., Kochukhov, O., Hackman, T., & Lehtinen, J. (2016). Magnetic fields of young solar twins. *AA*, 593, A35.
- Route, M. (2016). The Discovery of Solar-like Activity Cycles Beyond the End of the Main Sequence? , 830(2), L27.
- Scharmer, G. & Lofdahl, M. (1991). Swedish solar telescope: Short summary of instrumentation and observation techniques. *Advances in Space Research*, 11(5), 129–132.
- Stix, M. (2004). *The Sun: An introduction (no p.68-147)*. Springer, 2ed. edition.
- Tody, D. (1986). The IRAF Data Reduction and Analysis System. In D. L. Crawford (Ed.), *Instrumentation in astronomy VI*, volume 627 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series* (pp. 733).
- Valenti, J. A. & Fischer, D. A. (2005). Spectroscopic Properties of Cool Stars (SPOCS). I. 1040 F, G, and K Dwarfs from Keck, Lick, and AAT Planet Search Programs. *ApJS*, 159, 141–166.
- Vogt, S. S. & Penrod, G. D. (1983). Doppler imaging of spotted stars : application to the RS Canum Venaticorum star HR 1099. *PASP*, 95, 565–576.
- Švestka, Z. & Uchida, Y. (1991). *The YOHKOH (SOLAR-A) mission. A series of invited contributions.*, volume 136.
- Willamo, T., Hackman, T., Lehtinen, J. J., Käpylä, M. J., Ilyin, I., Henry, G. W., Jetsu, L., Kochukhov, O., & Piskunov, N. (2019). Long-term spot monitoring of the young solar analogue V889 Herculis. *AA*, 622, A170.

Wilson, O. C. (1978). Chromospheric variations in main-sequence stars. *ApJ*, 226, 379–396.