

# A dinamómechanizmus megfigyelhető jegyei késői típusú aktív csillagokon

MTA doktori értekezés tézisei

Dr. Kővári Zsolt Géza

MTA CSILLAGÁSZATI ÉS FÖLDTUDOMÁNYI KUTATÓKÖZPONT  
CSILLAGÁSZATI INTÉZET

2016

# 1. Bevezetés, előzmények

A naptevékenységként megfigyelhető jelenségek együttesét a Nap belsejében működő mágneses dinamo működésével magyarázzuk. A 20–21. sz. fordulójára a Nap felszínén, légkörében és belsejében zajló folyamatok földi és űreszközökkel történő megfigyelése révén egyre bővülő adatbázis áll a napdinamót vizsgáló kutatók rendelkezésére, minden korábbinál jobb térbeli és időfelbontású adatokkal, széles elektromágneses spektrumban. Ezzel szemben az ún. aktív csillagokon, vagy más néven foltos változócsillagokon zajló hasonló jelenségeket lényegében csak közvetett módon figyelhetjük meg, mivel a csillagok felszínének térbeli felbontása a rendelkezésünkre álló eszközökkel egyelőre nem – vagy csak nagyon korlátozottan – lehetséges. Sőt a csillagokról gyűjtött adatsorok időbeli felbontása a megfigyelési korlátok miatt meg sem közelíti a Napról gyűjtött adatokét.

A foltos csillagok kutatása az 1970-es években szinte egyszerre indult itthon és külföldön. Ebben meghatározó szerepe volt egy hazánkban megrendezett nemzetközi tudományos találkozáson<sup>1</sup>, ahol először tettek kísérletet fenomenológiai alapon a mágneses aktivitást mutató foltos csillagok osztályozására. Az új irány első magyar képviselője Oláh Katalin (MTA CSFK CSI), aki az itthon folyó munkát sikerrel integrálta a nemzetközi tudományos vérkeringésbe, később pedig új kutatói generáció kinevelésébe fogott. Ez utóbbi eredményeképpen az 1990-es évek végén két PhD értekezés is született (az egyik a saját munkám)<sup>2</sup>, amelyek a nemzetközi gyakorlatban alkalmazott új vizsgálati módszerek (idősoros fotometriai foltmodellek, Doppler-leképezés) megismerését, továbbfejlesztését és tesztekkel történő vizsgálatát tűzték ki célul. A csillagaktivitással kapcsolatos hazai kutatások centruma jelenleg az MTA CSFK CSI-ben működő *Nap és csillagaktivitás kutatócsoport*. A harmadik kutatói generációhoz köthető első PhD értekezés 2011-ben született<sup>3</sup> és hamarosan egy további PhD dolgozat<sup>4</sup> benyújtására is sor kerül.

<sup>1</sup> *Multiple Periodic Variable Stars*, IAU Colloquium No. 29, Budapest, 1975

<sup>2</sup> Kővári Zsolt: *A csillagaktivitás fotometriai és spektroszkópiai modellezése*, ELTE TTK, 1999; Bartus János: *Csillagfelszíni struktúrák modellezése*, ELTE TTK, 1999

<sup>3</sup> Vida Krisztián: *Aktív csillagok vizsgálata különböző időskálákon*, ELTE TTK, 2011

<sup>4</sup> Kriskovics Levente: *The application of Doppler imaging in studying stellar dynamos*, ELTE TTK, 2016

## 2. Célkitűzések

### 2.1. A feladat ismertetése

A doktori értekezésben a csillagokon megfigyelhető mágneses aktivitási jegyek vizsgálatára szolgáló alapvető – lényegében tehát indirekt – megfigyelési módszerekkel foglalkozunk, különös tekintettel a Doppler-képalkotásra, amelyre a dolgozatban foglalt eredmények döntő része épül. Néhány példán keresztül bemutatjuk a módszerek alkalmazási lehetőségeit és korlátait. Az eredmények birtokában – a napdinamóról összegyűjtött megfigyelési és elméleti tapasztalati háttérre támaszkodva – megvizsgáljuk, hogy az egyes aktív csillagokra jellemző mágneses dinamómechanizmus mennyiben hasonlít a napdinamó sajátosságaihoz, illetve mennyiben különbözik azoktól.

### 2.2. A téma jelentősége, aktualitása

A csillagok aktivitási jegyeinek vizsgálata kulcsfontosságú a késői típusú csillagok fejlődésének megértéséhez. Azonban a csillagokon zajló mágneses aktivitási folyamatokat a napaktivitással összevetve a Napról is sok új információt szerezhetünk: visszatekinthetünk központi csillagunk múltjára, következtethetünk a Naprendszer keletkezésének körülményeire, annak további sorsára. A csillagaktivitást tanulmányozva közelebb juthatunk annak az izgalmas kérdésnek a megválaszolásához, hogy a fiatal, gyorsan forgó csillagok mágneses aktivitása hogyan befolyásolja a bolygókeletkezést, amely a földi bioszférához hasonló életformák megjelenésének a feltétele. A szoros kettősrendszerekben megfigyelhető mágneses aktivitás tulajdonságai és a kettősséget leíró egzakt fizikai paraméterek összekapcsolása közelebb vihet bennünket a nagy számban felfedezett „csillag-forró Jupiter” típusú rendszerek fiatal csillagain megfigyelt aktivitási jegyek értelmezéséhez. Ez akár új látásmódhoz is vezethet, amelyben a napaktivitás sajátosságait a Nap-bolygórendszer paradigmáján belül próbáljuk megérteni. Végül pedig a napdinamó és a csillagokban működő különböző lehetséges dinamómechanizmusok összehasonlítása a dinamóelmélet számára nyújt fontos tapasztalati alapot.

### 2.3. Vizsgálati módszerek, eljárások

A csillagaktivitás széles időskálán megmutatkozó jelenségei – a másodperces flerektől a hetes–hónapos időskálájú felszíni foltaktivitáson át az éves–évtizedes időskálán jelentkező mágneses ciklusokig – más és más

észlelési stratégiát, technikai eszközöket és módszereket igényelnek. Így az aktivitási ciklusok vizsgálatához hosszútávú, rendszeres fotometriai megfigyelésekre van szükség, míg a foltos felszínt elsősorban indirekt módon, az ún. Doppler-rekonstrukcióval tanulmányozhatjuk. Ez utóbbi eljárás olyan nagy felbontású spektroszkópiai idősorok alapján végezhető el, amelyek kellően sűrűn „mintavételezik” a forgás miatt folyamatosan változó foltos felszínt.

Elegendően hosszú spektroszkópiai idősorok birtokában a rekonstruált felszín foltjainak rotációs időskálájú változásaiból következtetni lehet a dinamómechanizmus egyik alapvető elemére, a felszín differenciális rotációjára, sőt egyes esetekben akár a meridionális cirkulációra is. Erre két eltérő vizsgálati módszer kínálkozik: a keresztkorreláción alapuló technika, valamint a parametrikus képalkotás.

A keresztkorrelációs technikák lényege, hogy az egymást követő időintervallumokra elkészített foltterképek zonális irányú keresztkorrelációja alapján nyert korrelációs mintázatból kimutatható a foltos csillag felszíni differenciális rotációja, míg a meridionális irányú keresztkorrelációból a meridionális cirkulációra lehet következtetni. A globális felszíni plazmaáramok jelei annál megbízhatóbbak, minél több keresztkorreláció elvégzésére van lehetőség (azaz idősorban minél több képrekonstrukció áll rendelkezésre).

Kevesebb észlelési adat esetén alternatív lehetőségként használható az ún. parametrikus Doppler-rekonstrukció („nyírt kép módszer”), amikor a képalkotás folyamatában a differenciális rotációt leíró paramétert egy újabb ismeretlenként szerepeltetve keressük az észlelési adatokhoz legjobb illeszkedést biztosító értéket. Ez utóbbi módszer a keresztkorrelációs eljárásoknál egyszerűbb, és mivel kevesebb adatból is elvégezhető, ezért széles körben elterjedt, ugyanakkor a kapott eredmények megbízhatósága sok esetben kétségeket ébreszt.

Az utóbbi néhány évben rohamos fejlődésnek induló optikai interferometria egy új (elvi) lehetőséget teremtett a foltos csillagok felszínének direkt tanulmányozására, bár e módszer széles körű gyakorlati alkalmazására a megfigyelési korlátok miatt egyelőre nincs lehetőség.

## 3. Tézispontokba foglalt új tudományos eredmények

### 3.1. Az átlagolt keresztkorrelációk módszere

Az időben egymást követő Doppler-képek összehasonlításával lehetőség nyílik a felszíni differenciális rotáció kimutatására, amelynek matematikai eszköze a képek zonális irányú keresztkorrelációja. Azonban a keresztkorrelálandó képek között eltelt idő alatt esetleg lejátszódó foltfejlődés (új folt megjelenése, régi folt eltűnése, foltok összeolvadása stb.) miatt hamis korrelációs minták jelenhetnek meg, ami félrevezető lehet. Ennek kiküszöbölésére bevezettem az átlagolt keresztkorrelációk módszerét (Average Cross-CORrelation of consecutive Doppler-images, azaz „**ACCORD**”) [1][2], amely az elvégzett teszteredmények szerint kellően robusztus, megbízható eredményeket ad [3][4].

A módszer alap gondolata, hogy a foltfejlődés miatt bekövetkező – ezáltal véletlenszerűnek tekinthető – hamis korrelációs mintázatokat az alkalmasan választott keresztkorrelációs térképek átlagolásával csökkenteni lehet, miközben a differenciális rotációs mintázatot – amely viszont minden korrelációs térképen közös – az átlagolás felerősíti. A jel felerősítéséhez azonban előzetesen a keresztkorrelációs képek „normálása” (lineáris transzformációja) is szükséges. Az **ACCORD** módszerhez szükséges programokat a képfeldolgozást támogató Interactive Data Language (IDL) objektumorientált programozási nyelven írtam.

### 3.2. Az LQ Hya szoláris differenciális rotációja

Az 1,6 napos rotációs periódusú K2 spektráltípusú fősorozati csillag 1996 november–decemberi időszakban rögzített nagy felbontású optikai spektrumaiból összesen 28 idősorba rendezett Doppler-képet készítettem, így módon a 28 Doppler-kép kb. 35 rotációs periódusnak megfelelő időszakot reprezentált. A képsorozat segítségével filmszerűen, folyamatosan vált tanulmányozhatóvá a foltos felszín változása.

A rendelkezésre álló 28 Doppler-kép 20 olyan keresztkorrelációt tett lehetővé, amely során egymástól független, ugyanakkor időben egymáshoz legközelebb eső képeket hasonlíthattam össze (ezáltal minimalizálva a gyors foltfejlődés miatti hamis korrelációs minták hatását). Az átlagolt keresztkorrelációk (**ACCORD**) módszerét a 20 keresztkorrelációs térképre alkalmazva sikerült a differenciális rotációs mintázatot kellően felerősíteni, amely alapján megállapítottam, hogy az LQ Hya felszíni foltjai a Napéhoz hasonló jellegű, ám annál jóval kisebb mértékű

differenciális rotációt tükröznek (a szögsebesség az egyenlítőn a legnagyobb, a pólusok felé pedig a szélesség  $\sin^2$ -ével csökken). A szögsebesség  $\theta$  szélességi koordinátától való függését a szokásos

$$\Omega(\theta) = \Omega_{\text{eq}}(1 - \alpha \sin^2 \theta)$$

alakban kerestem, ahol az  $\alpha$  nyírási paraméter az egyenlítői és a poláris szögsebességek különbségéből számítható:  $\alpha = (\Omega_{\text{eq}} - \Omega_{\text{pol}})/\Omega_{\text{eq}}$ . A korrelációs mintázatra illesztett rotációs függvényből az egyenlítői szögsebesség legvalószínűbb értékére  $\Omega_{\text{eq}} = 225,177 \pm 0,037^\circ/\text{nap}$ , míg az  $\alpha$  nyírási együttható értékére  $0,0059 \pm 0,0010$  adódott [5][6].

### 3.3. Poláris folt hatása a nyírt kép módszerre

A csillagfelszín differenciális rotációja a nyírt kép módszer segítségével csupán egyetlen Doppler-képrekonstrukcióhoz elegendő spektrumvonal sorozatból is meghatározható, bár az eredmény általában kevésbé megbízható. A nyírt kép módszer a gyakorlatban úgy működik, hogy a Doppler-képalkotás folyamatában az  $\Omega_{\text{eq}}$  egyenlítői szögsebesség és az  $\alpha = (\Omega_{\text{eq}} - \Omega_{\text{pol}})/\Omega_{\text{eq}}$  nyírási együttható rögzített paraméterként szerepel, és az eredményül kapott Doppler-képhez tartozó vonalprofil-illeszkedések jósága, azaz a  $\chi^2$  értékek minimuma mutatja meg a legvalószínűbb  $\Omega_{\text{eq}}-\alpha$  értékpárt [6].

Tesztekkel kimutattam, hogy amennyiben a csillag poláris vidékét a pólusra szimmetrikus folt fedi, a nyírt kép módszer a differenciális rotáció értékére hamis eredményt ad, aminek az a magyarázata, hogy a poláris folt épp úgy torzító hatással van a spektrumvonal alakjára, mint maga a differenciális rotáció [7]. A teszteredmények magyarázatot adnak arra is, hogy egyes poláris folttal rendelkező csillagok esetében miért születhetnek a differenciális rotációra vonatkozóan egymásnak ellentmondó eredmények [8][9].

### 3.4. A V889 Her differenciális rotációja

A V889 Her egy Naphoz hasonló spektráltípusú (G2), magányos, gyorsan forgó ( $P_{\text{rot}} = 1,3371$  nap), „nullkorú” fősorozati (ZAMS) törpecsillag, amely lehetőséget biztosít a fiatal Nap tulajdonságainak a megismerésére. A csillagról készült korábbi Doppler-leképezésen alapuló vizsgálatok egyöntetűen poláris foltot mutattak, ugyanakkor a csillag differenciális rotációjáról egymásnak ellentmondó eredmények születtek.

A csillagról 2006. augusztus 13–16. között, kb. 3 rotációt átfogó időtartam alatt rögzített 10 nagy felbontású optikai spektrum alapján két

térképezővonalra (Fe I–6411 Å és Ca I–6439 Å) Doppler-rekonstrukciókat készítettem. A foltterképek tovább erősítették azt a feltételezést, hogy a csillag pólusát folyamatosan egy nagy kiterjedésű, hideg (a zavartalan fotoszféránál kb. 1500 K fokkal hidegebb) folt takarja [10]. A rendelkezésre álló spektroszkópiai adatokból a nyírt kép módszer segítségével megállapítottam, hogy a csillag differenciális rotációja gyenge felszíni nyírást tükröz, amely szoláris jellegű (vagyis az egyenlítő forog a leggyorsabban) [8]. A vas térképezővonalára a nyírt kép módszer  $P_{\text{eq}} = 1,3395 \pm 0,0027$  nap és  $\alpha = 0,0027 \pm 0,0044$ , míg a kalcium vonalra  $P_{\text{eq}} = 1,3350 \pm 0,0053$  nap és  $\alpha = 0,0097 \pm 0,0019$  értékeket valószínűsített. A két térképezővonalhoz tartozó  $\chi^2$  térképek súlyozatlan átlagának közös minimuma alapján a rotációs függvény becsült paraméterei  $P_{\text{eq}} = 1,3357 \pm 0,0056$  nap és  $\alpha = 0,0061 \pm 0,0040$ . Az eredmény mellett szól, hogy a poláris folt pólushoz viszonyított helyzete és alakja határozott aszimmetriát mutat, így nincs annyira kedvezőtlen hatása a nyírt kép módszer megbízhatóságára. A csillag gyenge szoláris jellegű differenciális rotációja összhangban van az elméleti várakozásokkal.

### 3.5. A $\sigma$ Gem antiszoláris differenciális rotációja

A fősoorzat utáni aktív óriáscsillagok szerkezete a (Naphoz hasonló) fősoorzati törpékéhez képest jelentősen különbözik, így előfordulhat, hogy a differenciális rotáció jellege is más. A  $\sigma$  Gem egy RS CVn típusú szoros kettőscsillag, amely vörös óriás főkomponensének spektráltípusa K1III, rotációs periódusa pedig 19,6 nap. A csillagról idősoros Doppler-analízist készítettem, amelyhez 1996. november 9. és 1997. január 9. között rögzített spektroszkópiai adatokat (összesen 51 nagy felbontású spektrumot) használtam. Az első, legkevésbé részletekbe menő vizsgálat [11] során két térképezővonalra előállított 6-6 Doppler-rekonstrukcióból egyszerű keresztkorrelációk alapján még nem látszódott határozott nyoma a felszín differenciális rotációjának. Azonban ugyanezeket a képeket felhasználva az átlagolt keresztkorrelációk módszerével már egyértelmű antiszoláris jellegű differenciális rotációt találtam [1], tehát a rotációs függvény szerint a csillag egyenlítője forog a leglassabban. Ezután az eredeti adatok felhasználásával megismételtem a Doppler-rekonstrukciókat oly módon, hogy abból a felszíni foltok időfejlődéséről a lehető legtöbb információt nyerjem. Az így előállított 34 idősoros Doppler-képre alkalmazott átlagolt keresztkorrelációk (ACCORD) módszerével sikerült megerősíteni, hogy a csillagon antiszoláris differenciális rotáció működik [12]. Az így pontosított rotációs függvényt a szokásos  $\Omega(\theta) = \Omega_{\text{eq}}(1 - \alpha \sin^2 \theta)$  formában felírva, a keresett paraméterek a Fe I–6430 Å

térképezővonalra  $\Omega_{\text{eq}} = 18,25 \pm 0,06^\circ/\text{nap}$  és  $\alpha = -0,033 \pm 0,011$ , míg a Ca I–6439 Å vonalra  $\Omega_{\text{eq}} = 18,36 \pm 0,09^\circ/\text{nap}$  és  $\alpha = -0,045 \pm 0,015$ . A két térképezővonalra kapott Doppler-képek súlyozatlan átlagát felhasználva a legvalószínűbb értékek  $\Omega_{\text{eq}} = 18,26 \pm 0,07^\circ/\text{nap}$  és  $\alpha = -0,04 \pm 0,01$  [4][9].

### 3.6. A $\sigma$ Gem pólusirányú meridionális árama

A meridionális cirkuláció a dinamóműködéssel kapcsolatba hozható globális mozgásforma, amelyet egyes csillagokon elvileg lehetséges detektálni. A  $\sigma$  Gem esetében az 1996. november 9. és 1997. január 9. közötti adatokat felhasználva erre többféle megközelítésben tettem kísérletet.

Az első módszer sok tekintetben hasonlít az átlagolt keresztkorrelációk módszeréhez, ám ezúttal a keresztkorrelációs függvények nem zonális, hanem meridionális irányúak. Először csupán 6 idősoros Doppler-rekonstrukciót felhasználva a Fe-képekből átlagosan  $230 \pm 19$  m/s, a Ca-képekből  $248 \pm 13$  m/s, a Fe+Ca átlagképekből pedig  $311 \pm 13$  m/s sebességű pólusirányú felszíni meridionális áramot detektáltam [1]. A részletesebb vizsgálatból, 34 idősoros Doppler-kép alapján hasonló értékeket kaptam: a Fe-képekből  $194 \pm 13$  m/s, a Ca-képekből  $348 \pm 17$  m/s, a Fe+Ca átlagképekből pedig  $307 \pm 16$  m/s adódott [4].

A második módszer során a 34 idősoros Doppler-kép mindegyikéből egy szélesség szerint átlagolt hőmérséklet-eloszlás függvényt készítettem. Az így kapott egydimenziós függvényeket időrendben egymás mellé illesztve szinoptikus térképekhez jutottam, amelyeken az izoterm kontúrok rajzolatából mind a Fe, mind a Ca térképezővonalára, mind pedig az átlagolt (Fe+Ca) Doppler-képek alapján kb.  $4\text{--}7^\circ$ -os pólusirányú eltolódást mértem. Ez kb. 220 m/s sebességnek felel meg [9].

A harmadik eljárás az előző módszer finomítása annak érdekében, hogy a szélességi körök menti hőmérséklet átlagolások ne vezessenek esetleges információvesztéshez. Így tehát a 34 idősoros Doppler-kép mindegyikét 72 darab ( $5^\circ$  széles) hosszúsági csíkra vágtam szét és egy adott hosszúságértékhez tartozó 34 csíkot idősorban egymás mellé rendezve megkaptam az adott meridián időfejlődését mutató szinoptikus térképet. A meridionális irányú mozgást a szinoptikus térképeken a hőmérsékleti minimumhelyekre alkalmazott lineáris függvényillesztésekkel határoztam meg. A függvények túlnyomó többsége pólusirányú áramlást mutatott, amelynek átlagos nagyságára a Fe+Ca átlagképek alapján  $203 \pm 27$  m/s becslést adtam [4].

Összefoglalva: a  $\sigma$  Gem esetében a vizsgált időszakban a felszíni foltok mozgásaiból egybehangzóan pólusirányú meridionális áramlást

mutattam ki, amelynek nagyságrendje 0,2–0,3 km/s. A meridionális cirkuláció a mélyebb tartományok és a felszín közötti anyag szállításával impulzuszórártól is közvetít, ami közvetlen magyarázatot adhat az antiszoláris differenciális rotációra [1][9][13].

### 3.7. A $\zeta$ And permanens poláris foltja

Egy permanens poláris folt kimutatására fotometriai adatokból nincs lehetőség, ugyanis egy ilyen folt nem, vagy alig okoz fényességváltozást, a fotometriai adatok pedig lényegében nem hordoznak információt a folt szélességi pozíciójáról. Ugyanakkor a Doppler-leképezéssel kapcsolatban is meg kell jegyezni, hogy egy centrálisan elhelyezkedő poláris folt hatása a Doppler-leképezéshez használt spektrumvonalakon fázisfüggetlen (mozdulatlan), így pontatlan (alulbecsült) vonalmélység-illesztéssel a poláris foltot esetleg nem leszünk képesek rekonstruálni. Ezzel szemben, ha a csillagon nincs poláris folt, de az elméleti vonalmélységet túlbecsüljük, akkor a Doppler-leképezéssel egy valóságban nem létező, hamis poláris foltot detektálhatunk.

A  $\zeta$  And egy 17,8 napos keringési periódusú RS CVn típusú kettősrendszer, amelynek kötött keringésű főkomponense egy K1III spektráltípusú óriás. A csillagról az első Doppler-képet az 1997. december 27. és 1998. január 15. között rögzített spektrumokból készítettem három térképezővonalra (Fe I–6411 Å, Fe I–6430 Å, és Ca I–6439 Å). A rekonstrukciókból megállapítottam, hogy a csillag pólusát a zavartalan fotoszféránál kb. 800 K-kal hidegebb folt borítja [14]. A hamis detektálás ellen szól, hogy az 1996. november 3. és 1997. január 9. közötti időszakból származó spektrumokból készített idősoros Doppler-képeken szintén poláris folt látható [15][16]. Ezt követően a poláris foltot a VLT UVES spektrográfiával 2008-ban rögzített adatok alapján is kimutattam 6 különböző térképezővonalon [17], sőt ezzel szinte egyidőben két további eszközről származó adatsorokból is hasonló eredményt kaptam [2].

A  $\zeta$  And permanens poláris foltja a CHARA/MIRC interferométerrel végzett megfigyelések alapján vált minden kétséget kizáróan bizonyítottá: a csillagfoltok kutatásának történetében eddig példa nélküli eredmény szerint a  $\zeta$  And felszínének *direkt* megfigyelésével 2011-ben és 2013-ban is sikerült független módszerrel megerősíteni, hogy a  $\zeta$  And pólusát – valószínűleg hosszabb időszakon keresztül, folyamatosan – hideg folt fedi. Ráadásul a poláris foltot 2013-ban a direkt interferometrikus képalkotással gyakorlatilag egyidejű Doppler-leképezéssel is kimutattam [18].

### 3.8. A $\zeta$ And elliptikussága és differenciális rotációja

A  $\zeta$  And óriáskomponense a másodkomponens irányában kissé megnyúlt, ennek következtében elliptikus változóként is ismert. A torzult alak a vonalszélesedés rotációs modulációján keresztül befolyásolja a Doppler-leképezést. Az aszferikusság kezelésére továbbfejlesztett Doppler-kóddal tesztvizsgálatokat végeztem, amelyekből kimutattam, hogy a fel nem ismert, vagy rosszul megállapított aszferikusság a Doppler-leképezésben szisztematikus hibához vezet [15][19].

A nem túl nagyfokú torzultságot (Roche-alakot) forgási ellipszoiddal közelítve az  $\varepsilon$  torzultsági paraméter legvalószínűbb értékét az aszferikusság kezelésére képes Doppler-kód segítségével állapítottam meg. Eszerint a  $\zeta$  And torzultsági paramétere  $\varepsilon = 0,27 \pm 0,04$ , ami a csillagot közelítő kéttengelyű forgási ellipszoid  $a$  és  $b$  fél nagytengelyeinek arányára  $b/a = 0,962 \pm 0,012$  értéket ad. Ez az eredmény jó összhangban van a független fotometriai adatok alapján megállapított geometriai torzultsággal [12][16].

A  $\zeta$  And-ról 2008-ban három helyszínről, kiváló műszerekkel, összehangoltan, részben átfedő időintervallumokban rögzített spektrumsorozatokból Doppler-képeket készítettem 4 térképezővonalra (Fe I-6411 Å, Fe I-6421 Å, Fe I-6430 Å, Ca I-6439 Å). Az így kapott 12 Doppler-képet felhasználva az átlagolt keresztkorrelációk módszerével két különböző úton meghatároztam a csillag felszíni differenciális rotációját. A két eljárás hasonló eredményt hozott. A rotációs függvényt leíró paraméterek az egyik megközelítésből  $\Omega_{\text{eq}} = 20,78 \pm 0,04$  és  $\alpha = 0,053 \pm 0,006$ , míg a másiktól  $\Omega_{\text{eq}} = 20,69 \pm 0,04$  és  $\alpha = 0,055 \pm 0,006$ , vagyis a differenciális rotáció szoláris jellegű, azaz a szögsebesség az egyenlítőn maximális [2]. Hibán belül egyező nyírási paramétereket (Fe-képekből  $\alpha = 0,053$ , Ca-képekből  $\alpha = 0,046$ ) kaptam az 1996/97-es adatokra készített idősoros Doppler-leképezésen alapuló vizsgálatból [16].

## 4. A tézispontokhoz kapcsolódó publikációk

- [1] Zs. Kővári, J. Bartus, K. G. Strassmeier, K. Vida, M. Švanda, and K. Oláh. Anti-solar differential rotation on the active K-giant  $\sigma$  Geminorum. *Astron. Astrophys.*, 474:165–168, October 2007.
- [2] Zs. Kővári, H. Korhonen, L. Kriskovics, K. Vida, J.-F. Donati, H. Le Coroller, J. D. Monnier, E. Pedretti, and P. Petit. Measuring differential rotation of the K-giant  $\zeta$  Andromedae. *Astron. Astrophys.*, 539:A50, March 2012.
- [3] Zs. Kővári, L. Kriskovics, K. Oláh, K. Vida, J. Bartus, K. G. Strassmeier, and M. Weber. Surface differential rotation of IL Hya from time-series Doppler images. In P. Petit, M. Jardine, and H. C. Spruit, editors, *IAU Symposium*, volume 302 of *IAU Symposium*, pages 379–380, August 2014.
- [4] Zs. Kővári, L. Kriskovics, A. Künstler, T. A. Carroll, K. G. Strassmeier, K. Vida, K. Oláh, J. Bartus, and M. Weber. Antisolar differential rotation of the K1-giant  $\sigma$  Geminorum revisited. *Astron. Astrophys.*, 573:A98, January 2015.
- [5] Zs. Kővári, K. G. Strassmeier, T. Granzer, M. Weber, K. Oláh, and J. B. Rice. Doppler imaging of stellar surface structure. XXII. Time-series mapping of the young rapid rotator LQ Hydrae. *Astron. Astrophys.*, 417:1047–1054, April 2004.
- [6] Zs. Kővári and M. Weber. Differential rotation of LQ Hya and IL Hya from Doppler imaging. *Publications of the Astronomy Department of the Eötvös University*, 14:221–232, June 2004.
- [7] Zs. Kővári, J. Bartus, L. Kriskovics, K. Vida, and K. Oláh. On the reliability of measuring differential rotation of spotted stars. In P. Petit, M. Jardine, and H. C. Spruit, editors, *IAU Symposium*, volume 302 of *IAU Symposium*, pages 198–199, August 2014.
- [8] Zs. Kővári, A. Frasca, K. Biazzo, K. Vida, E. Marilli, and Ö. Çakırlı. Differential rotation on the young solar analogue V889 Herculis. In D. Prasad Choudhary and K. G. Strassmeier, editors, *Physics of Sun and Star Spots*, volume 273 of *IAU Symposium*, pages 121–125, August 2011.
- [9] Zs. Kővári and K. Oláh. Observing Dynamos in Cool Stars. *Space Sci. Rev.*, 186:457–489, December 2014.
- [10] A. Frasca, K. Biazzo, Zs. Kővári, E. Marilli, and Ö. Çakırlı. Photospheric and chromospheric activity on the young solar-type star HD 171488 (V889 Herculis). *Astron. Astrophys.*, 518:A48, July 2010.

- [11] Zs. Kővári, K. G. Strassmeier, J. Bartus, A. Washuettl, M. Weber, and J. B. Rice. Doppler imaging of stellar surface structure. XVI. A time-series analysis of the moderately-rotating K1-giant  $\sigma$  Geminorum. *Astron. Astrophys.*, 373:199–210, July 2001.
- [12] Zs. Kővári, J. Bartus, L. Kriskovics, K. Oláh, K. Vida, O. Ribárik, and K. G. Strassmeier. Differential Rotation in Two RS CVn Systems:  $\sigma$  Gem and  $\zeta$  And. In M. T. Richards and I. Hubeny, editors, *IAU Symposium*, volume 282 of *IAU Symposium*, pages 197–198, April 2012.
- [13] Zs. Kővári, J. Bartus, M. Švanda, K. Vida, K. G. Strassmeier, K. Oláh, and E. Forgács-Dajka. Surface velocity network with anti-solar differential rotation on the active K-giant  $\sigma$  Geminorum. *Astronomische Nachrichten*, 328:1081–1083, December 2007.
- [14] Zs. Kővári, J. Bartus, K. G. Strassmeier, K. Oláh, J. B. Rice, A. Washuettl, and Sz. Csizmadia. First Doppler images of  $\zeta$  Andromedae. In F. Favata, G. A. J. Hussain, and B. Battrick, editors, *13th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems and the Sun*, volume 560 of *ESA Special Publication*, pages 727–730, March 2005.
- [15] Zs. Kővári, K. Oláh, J. Bartus, K. G. Strassmeier, M. Weber, A. Washuettl, J. B. Rice, and Sz. Csizmadia. Doppler Images of  $\zeta$  Andromedae. *Astrophys. Space Sci.*, 304:375–377, August 2006.
- [16] Zs. Kővári, J. Bartus, K. G. Strassmeier, K. Oláh, M. Weber, J. B. Rice, and A. Washuettl. Doppler imaging of stellar surface structure. XXIII. The ellipsoidal K giant binary  $\zeta$  Andromedae. *Astron. Astrophys.*, 463:1071–1080, March 2007.
- [17] H. Korhonen, M. Wittkowski, Zs. Kővári, T. Granzer, T. Hackman, and K. G. Strassmeier. Ellipsoidal primary of the RS CVn binary  $\zeta$  Andromedae. Investigation using high-resolution spectroscopy and optical interferometry. *Astron. Astrophys.*, 515:A14, June 2010.
- [18] R. M. Roettenbacher, J. D. Monnier, H. Korhonen, A. N. Aarnio, F. Baron, X. Che, R. O. Harmon, Zs. Kővári, S. Kraus, G. H. Schaefer, G. Torres, M. Zhao, T. ten Brummelaar, J. Sturmann, and L. Sturmann. No Sun-like dynamo on the active star  $\zeta$  Andromedae from starspot asymmetry. *Nature*, 533:217–220, May 2016.
- [19] Zs. Kővári, J. Bartus, K. Oláh, K. G. Strassmeier, J. B. Rice, M. Weber, and E. Forgács-Dajka. Doppler Imaging of Stars with Roche-Geometry. In W. I. Hartkopf, P. Harmanec, and E. F. Guinan, editors, *Binary Stars as Critical Tools & Tests in Contemporary Astrophysics*, volume 240 of *IAU Symposium*, pages 587–592, August 2007.