

MÉRFÖLDKŐ A CSILLAGFELSZÍNI STRUKTÚRÁK KUTATÁSÁBAN

Először sikerült egy foltos csillag felszínét interferometriával „lefényképezni”

Kövári Zsolt

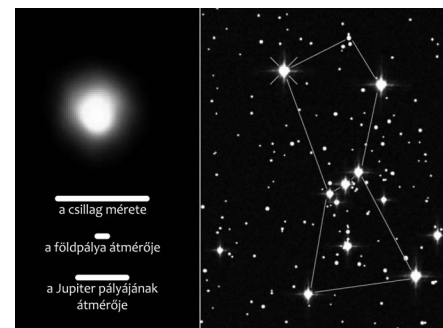
PhD, MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet
kovari@konkoly.hu

A foltos csillagok felszínének megfigyelése kezdetben kizárólag *indirekt* módszerek alkalmazását jelentette, hiszen a nagy távolságuk miatt a csillagok távcsöveinkkel gyakorlatilag felbonthatatlan, pontszerű forrásoknak tekinthetők – ami többnyire még ma is igaz. Ám 1995 márciusában szenzációs hírt jelentettek be, miszerint a Hubble-űrtávcső segítségével sikerült UV fényben direkt felvételt készíteni a Betelgeuze (α Ori) légköréről, meghozza olyan térbeli felbontással, amely első alkalommal tette lehetővé, hogy egy távoli csillag felszínének egyes részleteit megfigyeljük (Uitenbroek *et al.*, 1998). És valóban: a szuperóriás csillag nagyjából 50 ezred ívmásodperc szögátmérőjű korongján excentrikus kifényesedés volt megfigyelhető (1. ábra).

CHARA – valóra vált álom

Az 1990-es évek végén a csillagok direkt megfigyelését célzó, nagyívű tervek bontakoztak ki. Ilyen volt a NASA *MAXIM Pathfinder* elnevezésű űrmissziója – az eredeti tervek szerint egy harminckét műholdból álló röntgenképképző rendszer – azzal az ígérettel, hogy néhány évtizeden belül az elérhető tér-

beli felbontás akár az ívmásodperc egymilliomod része (1 mikroívmásodperc) lehet. Ez a gyakorlatban annyit jelent, hogy a közeli csillagok korongját – látszó méretük függvényében – akár olyan felbontásban is tanulmányozhatjuk, ahogyan a Napot látjuk egy közepes naptávcsővel. Megvalósulása esetén a *MAXIM Pathfinder* valóban ugrásszerű fejlődést jelenthetett volna, ám az elképzelés a tervezőasztalon maradt. Ezzel szemben sikeres programként az utóbbi évtizedben kezdte meg működését a Center for High Angular Resolution Astronomy (*CHARA*, azaz „nagy szögfelbontású csillagászati központ”) optikai-infravörös hullámhosszon működő interferométer (Mount Wilson, Kalifornia, Egyesült Államok), amely a Michigan Infrared Combiner (MIRC) műszer segítségével 6 db, egyenként 1 méteres tükrőátmérőjű távcső által egyidejűleg összegyűjtött fénynyalábokat kombinálva az ezred ívmásodperc törtrészének megfelelő szögfelbontásra képes. Ez kb. azzal egyenértékű, mintha egy hajszál vastagságának szögátmérőjét mérnénk meg 100 km távolságból. A *CHARA/MIRC* jelenleg a legjobb felbontóképességű eszköz a világon.



1. ábra • A Betelgeuze légköre ultraibolya fényben a Hubble-űrtávcső direkt felvételén. Bal oldalon felül a felbontott korong látható, alján egy fényes folt, épp a rotációs pólus körül. A korong alatt méretskálákon hasonlíthatjuk össze a csillag átmérőjét a Nap-Föld- és a Nap-Jupiter-távolsággal. Jobb oldalon látjuk a Betelgeuze pozícióját az Orion csillagképben. Forrás: HST/NASA/A. Dupree (CfA)

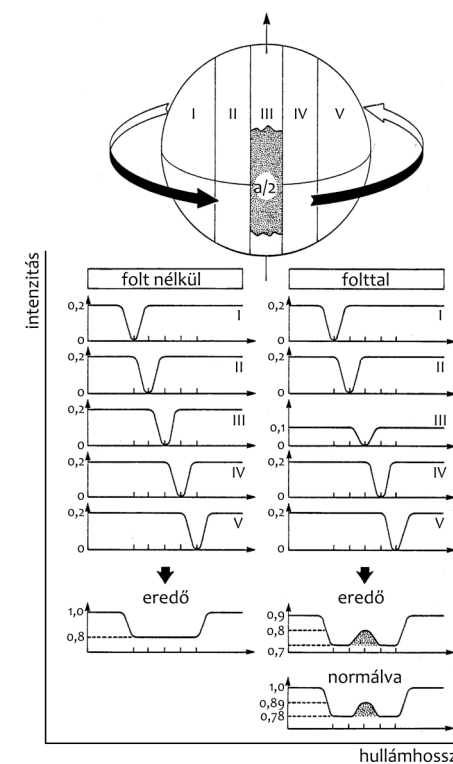
Az optikai interferometria csillagászati alkalmazásáról, közte a *CHARA* interferométerről Kiss L. László (2015) közölt nemrégiben összefoglalót a *Magyar Tudományban*.

A *CHARA/MIRC*-műszeregyüttessel számos izgalmas eredmény született: 2007-ben először sikerült felbontani egy fősozortati csillag, az Altair (α Aql) 3,2 ezred ívmásodperces átmérőjű korongját (Monnier *et al.*, 2007), korábban elképzelhetetlen felbontásban tanulmányozhattuk többek között az ϵ Aur-t (Kloppenborg *et al.*, 2010) és az Algolt (Baron *et al.*, 2012). 2016-ban pedig megpillanthattuk az első direkt képet egy foltos csillag felszínéről (Roettenbacher *et al.*, 2016). A célobjektum az *indirekt* Doppler-leképezéssel korábban többször vizsgált óriáscsillag, a z Andromedae volt (Kövári *et al.*, 2005, 2007, 2012), így egyebek mellett első alkalommal nyílt lehetőség arra, hogy a *direkt* és az *indirekt* képképző módszerek eredményeit köz-

vetlenül összehasonlítsuk. Cikkünk további részében ezt a csillagfoltok kutatásában valódi mérföldkőnek számító eredményt ismertetjük.

Az indirekt Doppler-képképzés alapelve

A csillagok felszíni foltjainak Doppler-leképezése egy spektroszkópiai megfigyelésen alapuló indirekt eljárás. E módszer segítségével lehetőség nyílik a csillagfoltok morfológiájának, elhelyezkedésének, időbeli fejlődésének megfigyelésére. A Doppler-képképzés megértéséhez tekintsük a 2. ábrát, amelyen egy csillag korongját öt egyenlő területű sávra osztottuk! A megfigyelés céljából választunk egy csillag felszínéről (fotoszférájából) eredő abszorpciós spektrumvonalat (ez az ún. térképezővonal)! Az ábra alapján látható,



2. ábra • A Doppler-képképzés alapelve

hogy egy-egyértelmű megfeleltetés létezik a csillag látszó korongjának egy sávja és a belőle eredő intenzitáshányad hullámhossza között, hiszen a tengely körüli forgás következtében az egyes sávokból eredő intenzitáshányadok a pozíciójuknak megfelelően más-más Doppler-eltolódást szenvednek. Ha ezeket az intenzitáshányadokat összegezzük, a térképezővonal rotáció miatt kiszélesedett profilját kapjuk (lásd az ábra alján, bal oldalon). Ha most feltételezzük, hogy az egyik sávot felerészben sötét folt borítja, akkor a sáv intenzitásjáruléka jóval kisebb lesz, így az összegzés során a rotációs kiszélesedett spektrumvonalon a megfelelő radiális sebességnél egy kitüremkedés (látszólagos emiszió) jelenik meg (lásd az ábra alján, jobb

oldalon). Ahogy a foltos rész a rotáció során a csillag korongján átvonul, úgy vándorol a kitüremkedés a spektrumvonal profilján keresztül a kék oldalról a vörös irányába, azaz a folt *hosszúsági pozícióját* a kitüremkedés aktuális radiális sebessége (Doppler-eltolódása) árulja el.

A 3. ábra szerint a vonalprofilon megjelenő kitüremkedés a folt csillagon elfoglalt *szélességi pozíciójáról* is árulkodik, ugyanis az a folt, amely közvetlenül a látszó rotációs pólus körül található, mindvégig látható, így járuléka a teljes rotációs fázis mentén megfigyelhető a vonalprofil alján, annak centruma körül oszcillálva („pólári folt”). Ellenben egy alacsonyabb szélességen elhelyezkedő folt a csillag rotációja során egy ideig látható, utána

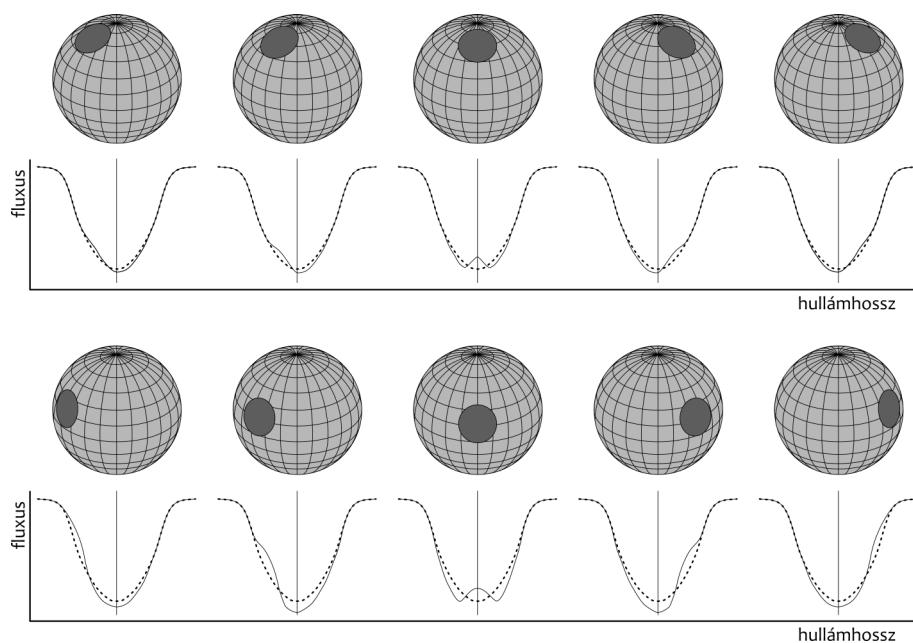
pedig kifordulva eltűnik a szemünk elől. Egy ilyen folt által előidézett kitüremkedés a növekvő hullámhossz irányában végigvonul a spektrumvonalon, majd eltűnik a vörös szárnynon, hogy idővel a vonal kék oldali szárnyán ismét felbukkanjon. Ha tehát a rotációs fázist térképezővonalak sorozatával kellően sűrűn mintavételezzük, akkor rekonstruálni tudjuk a csillag felszíni hőmérséklet-eloszlását. A spektrumvonalakon megjelenő kitüremkedések Doppler-eltolódásán alapuló indirekt képalkotást Armin J. Deutsch (1958) dolgozta ki, ennek nyomán később számos alkalmazás született, lásd Kövári Zolt és Oláh Katalin (2014) összefoglalóját. És hogy ez az *indirekt* módszer milyen hatékony? A Doppler-képalkotás segítségével – közepes távcsővel és egy hozzá kapcsolt nagy felbontású spektrográffal – akár mikroívmásodperces elméleti térbeli felbontás is elérhető, lehetővé téve a csillagfoltok részletekbe menő tanulmányozását.

A Doppler-képalkotás feltételei

A Doppler-képalkotás alapelve az orvosi diagnosztikában is ismert (például röntgen tomográfia). Az orvosi alkalmazás során a műszer a testrészt egy adott síkmetszetét körbejárva, azt röntgenfényvel több irányból átvilágítva egydimenziós „árnyéknyomatokat” készít, amelyekből azután előállítható a teljes kétdimenziós síkmetszet. Mivel a csillagászati alkalmazás során „körbejárásra” nincs lehetőség, meg kell várunk, amíg a csillag magától körbefordul, eközben kell összegyűjtenünk az egydimenziós „spektrális lenyomatokat”. A Doppler-képalkotás akkor nyújt kielégítő eredményt, ha a spektroszkópiai észlelésekkel a rotációs fázist kellően sűrűn tudjuk mintavételezni. Ebből az is következik, hogy a csillagászati Doppler-leképezés

szükségszerűen időátlagolást jelent, azaz a csillag felszínének rekonstruált Doppler-képe az egy fordulatnyi időnél rövidebb időskálájú változásokat nem képes megmutatni. (Ezzel szemben a *direkt* interferometrikus képalkotás használatával elérhető időfelbontás lényegesen jobb, gyakorlatilag az expozíciós idővel megegyező.)

A megbízható Doppler-képalkotásnak van néhány további szükséges feltétele. Az egyik, hogy a csillag vonalainak rotációs eredetű Doppler-szélesedése minden egyéb szélesedési mechanizmushoz képest domináns legyen. Ez a gyakorlatban úgy fogalmazható meg, hogy az egyenlítői rotációs sebesség látóirányú vetületének ($v \sin i$) legalább 20–25 km/s nagyságúnak kell lennie. E feltétel lényegében a Doppler-leképezéssel vizsgálható foltos csillagok két csoportját jelöli ki: a gyors forgású (néhány napos rotációs periódusú) fősorozati és közvetlenül a fősorozat előtti fejlődési állapotban levő törpék, továbbá a fősorozatról elfejlődött, ám viszonylag még gyorsan – kb. 10–25 napos periódussal – forgó szubóriások és óriások. Ez utóbbiak gyakran ún. RS CVn típusú szoros kettős rendszerek tagjai, ugyanis az ilyen rendszerekben kialakuló kötött keringés (szinkronizáció) miatt a gyors forgás az elfejlődés után is megmarad. (Márpedig a gyors forgás szoros kapcsolatban van a mágneses aktivitással, amelynek eredményeképpen a késői típusú csillagok felszínén – a napfoltokhoz hasonlóan – a csillagfoltok megjelennek.) Végül megemlítenénk, hogy az sem mindegy, mekkora a csillag forgástengelyének a látóiránnyal bezárt szöge, azaz *i* inklinációja. Míg $i=0^\circ$ esetén egyáltalán nincs lehetőség Doppler-rekonstrukcióra (hiszen ekkor a spektrumvonalon nincs rotációs Doppler-szélesedés), $i=90^\circ$ esetén pedig a csillag északi és déli féltekéje a Doppler-le-



3. ábra • Pólusközel és egyenlítőhöz közeli foltok nyomainak összehasonlítása. A forgás különböző fázisaiban rögzített pillanatképek sorozatán megfigyelhető, hogy a pólusközel (felső képsor) nyomának a vonal centrumához viszonyított Doppler-eltolódása kisebb, mint amit az egyenlítőhöz közeli folt esetében tapasztalunk (alsó képsor).

képezés szempontjából egyenértékű, vagyis ekkor nincs mód a két féltéke közötti különbségtételre: a csillag rekonstruált Doppler-képe szükségszerűen szimmetrikus az egyenlítőre. Szerencsés esetben tehát az inklináció nem esik túl közel a két szélsőértékhez.

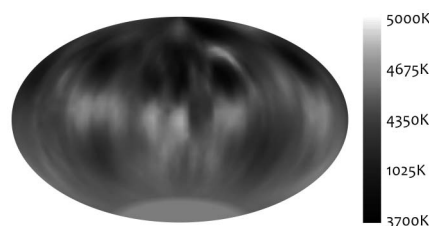
Korai Doppler-képek a ζ Andromedae felszínéről

A Doppler-leképezés szempontjából a kb. 4 magnitúdó látszó fényességű óriáscsillag, a ζ Andromedae (ζ And) ideális célpont: 17,8 napos keringési periódusú RS CVn típusú spektroszkópiai kettős, amelynek vonalaiban csak a fényesebb óriáskomponens látszik. Inklinációja ($i \approx 65^\circ$) és spektrumvonalainak rotációs szélesedése ($v \sin i \approx 41,4$ km/s) egyaránt alkalmassá teszik arra, hogy felszínét a Doppler-képpalkotással vizsgáljuk. Jellegzetes fotometriai fényváltozásából arra lehet következtetni, hogy az óriáscsillag alakja (a gyors forgás és a közeli másodkomponens gravitációs hatása következtében) torzult, a kísérő felé kissé elnyúlt (ún. *ellipszoidális* változó). Mindemellett a másodlagos fényváltozások arra utalnak, hogy a csillagfelszín foltos. A csillag felszínéről az első Doppler-rekonstrukció egy 1997–1998 fordulóján összegyűjtött spektrumsorozat alapján készült (Kövári et al., 2005). A Doppler-képeken főleg a látszó pólus és környéke volt hideg foltokkal borított (4. ábra), ám az eredmény nem volt teljesen kielégítő, ugyanis a Doppler-leképezés során ekkor még gömb alakot tételeztünk fel. Az elliptikuság figyelembevételére is alkalmas Doppler-rekonstrukciós eljárást két évvel később mutattuk be (Kövári et al., 2007). A spektroszkópiai vizsgálat kielégítően adta vissza a korábban fotometriai módszerrel becsült ellipszoidális torzultságot. Sikertült továbbá megerősíteni, hogy az 1997/98-as adatok

alapján a csillag felszínén a látszó pólus környékén hideg folt található, emellett a foltosodás mértéke alacsonyabb szélességeken is jelentős. Ugyanakkor egy jóval bővebb, 1996–1997 fordulóján összegyűjtött adatsor alapján arra is lehetőség nyílt, hogy négy egymást követő rotációs periódusra külön-külön Doppler-rekonstrukciókat készítve a csillagfoltok időbeli fejlődését vizsgáljuk. Az idősoros Doppler-képek alapján kimutattuk, hogy a csillag a Naphoz hasonlóan differenciálisan rotál, azaz az egyenlítőhöz közeli szélességi körök mentén gyorsabb a forgás, mint a pólus körüli vidékeken. Ez utóbbi eredményt, azaz a felszíni differenciális rotáció létét és annak mértékét sikerült újabb, tehát független adatok felhasználásával nemrégiben ismét kimutatni (Kövári et al., 2012).

A ζ Andromedae igazi arca

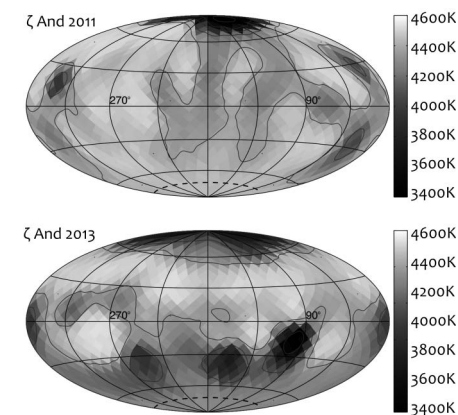
A ζ And megfigyelésére a CHARA/MIRC-interferométerrel két időszakban került sor: 2011. július 9–22. között tizenegy alkalommal, míg 2013. szeptember 12–30. között összesen tizennégy alkalommal. Az információk feldolgozása, maga a képpalkotás egy olyan új-



4. ábra • Az első Doppler-kép a ζ Andromedae felszínéről az 1997–1998 fordulóján összegyűjtött spektroszkópiai adatokból. A felszíni hőmérséklet-eloszlás rekonstrukciójához térképezővonalaként a neutrális vas 6430 Å hullámhossznál található abszorpciós vonalát használtuk.

szzerű megközelítéssel történt, amely a Doppler-leképezés alap gondolatát követi. Eszerint a képpalkotáshoz fejlesztett kód, a SURFING (SURFace ImagING, John D. Monnier) az éjszakáról éjszakára készített „pillanatfelvételek” helyett a teljes adatmennyiség felhasználásával (ún. *apertúraszintézissel*) – a két időszakra külön-külön, egymástól függetlenül – olyan konzisztens modellt állít fel, amely kielégítő módon ad számot a látszó felszín folteloszlásának rotáció miatt történő időbeli változásáról. Az eljárásról fontos megemlíteni, hogy modelfüggetlen, azaz nincs szükség a felszíni struktúrával kapcsolatos *a priori* feltevésekre – leszámítva az elliptikuságot, amelyet viszont a korábbi fotometriai és spektroszkópiai vizsgálataink alapján nagy pontossággal ismertünk. Az eredményről a *Nature* című folyóirat hasábjain számoltunk be (Roettenbacher et al., 2016). A csillag felszínének direkt interferometrius képét a két időszakban az 5. ábrán láthatjuk. A ζ And foltjainak közvetlen megfigyelése mindjárt két alapvető megállapításhoz vezetett: az egyik a poláris folttal kapcsolatos, a másik pedig azzal a megfigyeléssel, hogy a folteloszlás a két vizsgált időszakban jelentős mértékben aszimmetrikus az egyenlítőre.

A poláris folt. Egy póluson, arra körszimmetrikusan elhelyezkedő folt a spektrumvonalak alján okoz ugyan kitüremkedést, de az a rotációs fázis mentén nem változik. Éppen ezért a Doppler-képeken megjelenő poláris foltok valódiságával kapcsolatosan kezdetben sokan szkeptikusak voltak. Többen úgy gondolták, hogy a poláris folt csupán hibás interpretáció, amely a Doppler-leképezés tökéletlenségéből (például hibás kontínuumillesztésből) ered. Ezt a vélekedést látszott alátámasztani az a tény is, hogy a Nap pólusainak környékén soha nem látunk foltokat. Mind-



5. ábra • Az első direkt kép egy foltos csillagról. A ζ And képe a CHARA/MIRC-interferométerrel 2011-ből (felül) és 2013-ból (alul). A képek a teljes felszínt mutatják Aitoff-vetületben, jobbra a hőmérsékletskálával. Forrás: Rachael Roettenbacher és John D. Monnier.

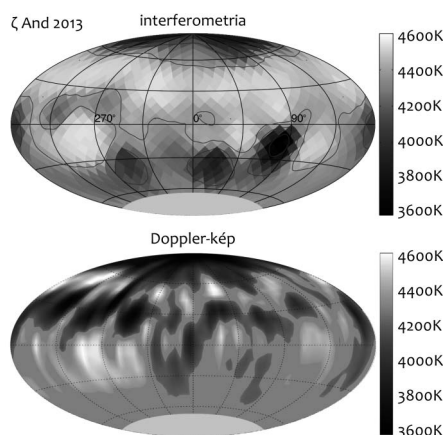
ezek ismeretében a csillagfoltok kutatásának történetében valóban mérföldkőnek számít, hogy a ζ And felszínének direkt megfigyelésével lényegében független módszerrel sikerült megerősíteni azt a Doppler-képpalkotásból kapott korábbi eredményt, hogy a ζ And pólusát (valószínűleg hosszabb időn át, folyamatosan) hideg folt fedi.

A folteloszlás hemiszférikus aszimmetriája. További fontos megfigyelés, hogy 2011-ben (a pólust leszámítva) a foltok leginkább a látszó pólushoz tartozó féltéken voltak jelen, míg ehhez képest a 2013-as képen a foltok döntően a másik féltéken jelentek meg. A Napon a napfoltok a mágneses tér felszínre törő erővonalainak nyomjelzői. A mágneses tér felerősítése és felszínre jutása pedig az ún. *dinamóhatásnak* köszönhető. Azonban a Napon nem tapasztalunk a foltok statisztikai eloszlásában jelentkező észak–déli aszimmetriát. Ebből arra lehet következtetni, hogy a ζ

And belsejében a napdinamótól eltérő dinamóméchanizmus működik. Egy lehetséges elképzelés szerint a mágneses tér (Napéhoz hasonló) dipól jellege (és ebből következőleg szimmetriája az egyenlítőre) az eltérő dinamóműködés következtében megváltozik. A dipól mellett a kvadrupól módus gerjesztődése és az egyes módusok kölcsönhatása révén a globális mágneses tér nagymértékben aszimmetrikussá válik. Lehetséges tehát, hogy a ζ And felszíni folteloszlásában 2011-ről 2013-ra mutatkozó hemiszférikus különbséget éppen ilyen, ún. „kevert paritású módus” magyarázza (Sokoloff – Nesme-Ribes, 1994).

Direkt vagy indirekt? – a Doppler-rekonstrukció és az interferometrikus képalkotás összehasonlítása

2013-ban a CHARA/MIRC-megfigyelésekkel egyidejűleg a ζ And-ról nagy felbontású



6. ábra • A ζ And felszíni hőmérséklet-eloszlásáról készült direkt interferometrikus kép (felül) és indirekt Doppler-rekonstrukció (alul). A képek alapjául szolgáló interferometriai és spektroszkópiai megfigyelések egy időben zajlottak. A két képen a szembetűnő hasonlóságok mellett eltérések is felfedezhetők.

spektroszkópiai megfigyeléseket is gyűjtöttünk. Ez utóbbiak tizennyolc napos időtartama alatt összesen tizenegy éjszakán sikerült adatokat rögzíteni, és ez már megfelelő fázisfedettséget biztosított egy Doppler-rekonstrukció elkészítéséhez. A Doppler-kép elkészítésével az volt az alapvető célunk, hogy független megfigyeléssel segítsük az interferometrikus adatok helyes értelmezését. Egyúttal alkalom kínálkozott arra, hogy egy foltos csillagról egy *direkt* és egy *indirekt* módszerrel egymástól függetlenül, azonos időben elkészített képet közvetlenül összehasonlítsunk. A két kép a 6. ábrán látható. Az összehasonlítás során felismerhető néhány jó egyezés, néhol hasonló alakzatokat látunk kisebb alak-, méret- és hőmérsékletbeli eltérésekkel, de vannak nyilvánvaló különbségek is. A poláris folt mindkét képen domináns, és méretét, struktúráját tekintve is hasonló. További szembetűnő hasonlóság a kb. 220° hosszúságon az egyenlítő alatt található nagyobb méretű, forróbb (fényesebb) terület. Azonban az interferometrikus képen főleg az alsó féltekén látunk foltokat, ellentétben a Doppler-képpel, ami nem annyira meglepő, hiszen a Doppler-rekonstrukció köztudottan megbízhatóbban működik a látható pólus féltekén (amelyre jobban rálátunk). Az interferometrikus képen az egyenlítő alatt kb. -25° és -60° szélességi koordináták közötti hangsúlyos foltok a 270° -tól a 45° -ig terjedő hosszúsági tartományban a Doppler-képen az alsó féltekén csak kisebb területen és kisebb kontrasztal láthatók kb. 315° – 0° hosszúságok között. Ugyanakkor a felső féltekén megjelennek az egyenlítőre tükrözött „szellemképek” formájában a 270° – 315° és 0° – 90° hosszúságok között. A tükröződési effektus jól ismert jelenség a Doppler-leképezésben: minél jobban közelítünk a 90° -os inklinációhoz, annál erősebb

ben jelentkeznek. Mindezekkel együtt kijelenthető, hogy a két kép egymással viszonylag jó összhangban van. Ám a nyilvánvaló eltérések oka csak részben írható a Doppler-leképezés számlájára (nagyobb pontatlanság az alsó féltekén, szellemképek), ugyanis a két módszer „felbontása” jelentősen különbözik. Az interferometrikus kép felbontási határa jelen esetben a látszó korong átmérőjére vetítve nagyjából 6–10 képelem lehet, míg a Doppler-képalkotás (elvi) felbontása ennek többszöröse. Vagyis a két eredmény csak részben

hasonlítható össze. Ugyanakkor az összehasonlítás arra mindenképpen elegendő, hogy a merőben eltérő, ám egymástól független két módszer létjogosultságát egyszerre igazolja.

A kutatást az OTKA-109276 sz. pályázat (témavezető Kövári Zsolt) és az MTA Lendület-2009 programja (témavezető Kiss László) is támogatta.

Kulcsszavak: *Doppler-leképezés, interferometria, csillagfolt, mágneses dinamo, CHARA*

IRODALOM

- Baron, Fabien – Monnier, John D. – Pedretti, Ettore et al. (2012): Imaging the Algol Triple System in the H Band with the CHARA Interferometer. *Astrophysical Journal*. 752, 20 DOI: 10.1088/0004-637X/752/1/201 • <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/752/1/20/pdf>
- Deutsch, Armin J. (1958): Harmonic Analysis of the Periodic Spectrum Variables. In: Lehnert, Bo (ed.): *Electromagnetic Phenomena in Cosmical Physics*. Proceedings from IAU Symposium no. 6. International Astronomical Union. Symposium no. 6. Cambridge: Cambridge University Press, 209–221. • <http://adsabs.harvard.edu/full/1958IAUS...6..209D>
- Kiss L. László (2015): Csillagászati képalkotás optikai interferometriával. *Magyar Tudomány*. 176, 10, 1162–1170. • <http://www.matud.iif.hu/2015/10/03.htm>
- Kloppenborg, Brian – Stencel, Robert – Monnier, John D. et al. (2010): Infrared Images of the Transiting Disk in the ϵ Aurigae System. *Nature*. 464, 870–872. DOI: 10.1038/nature08968 • <http://tinyurl.com/jnc4vpl>
- Kövári Zsolt – Bartus János – Strassmeier Klaus G. et al. (2005): First Doppler Images of ζ Andromedae. In: *Cool Stars, Stellar Systems and the Sun* 13, 5–9 July 2004, Hamburg, Germany, ESA-SP-560 (Vol. II), 727–730. • <http://tinyurl.com/z0j22x6>
- Kövári Zsolt – Bartus János – Strassmeier Klaus G. et al. (2007): Doppler Imaging of Stellar Surface Structure XXIII. The Ellipsoidal K Giant Binary ζ Andromedae. *Astronomy & Astrophysics*. 63, 1071–1080. DOI: 10.1051/0004-6361/20065982 • <http://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2007/09/aa5982-06.pdf>
- Kövári Zsolt – Korhonen, Heidi – Kriskovics Levente et al. (2012): Measuring Differential Rotation of the K-giant ζ Andromedae. *Astronomy & Astrophysics Paper A50* DOI: 10.1051/0004-6361/201118177 • <https://arxiv.org/pdf/1201.2921v1.pdf>
- Kövári Zsolt – Oláh Katalin (2014): Observing Dynamos in Cool Stars. *Space Science Reviews*. 186, 457–489. DOI: 10.1007/978-1-4939-2584-1_16 • <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1408/1408.6199.pdf>
- Monnier, John D. – Zhao, Ming – Pedretti, Ettore et al. (2007): Imaging the Surface of Altair. *Science*. 317, 342 DOI: 10.1126/science.1143205 • <https://arxiv.org/pdf/0706.0867v2.pdf>
- Roettenbacher, Rachael – Monnier, J. D. – Korhonen, H. et al. (2016): No Sun-like Dynamo on the Active Star ζ Andromedae from Starspot Asymmetry. *Nature*. 533, 217–220. DOI: 10.1038/nature17444
- Sokoloff, Dmitry – Nesme-Ribes, Elizabeth (1994): The Maunder Minimum: A Mixed-parity Dynamo Mode? *Astronomy & Astrophysics*. 288, 1, 293–298. • <http://tinyurl.com/z7lmyfz>
- Uitenbroek, Han – Dupree, Andrea K. – Gilliland, Ronald L. (1998): Spatially Resolved Hubble Space Telescope Spectra of the Chromosphere of α Orionis. *The Astronomical Journal*. 116, 2501–2512. DOI: 10.1086/300596 • <http://tinyurl.com/jskx9p2>