

YY CrB Çift Yıldız Sisteminin Doppler Görüntüleme ile Yüzey Parlaklık Dağılım Anormalliğinin Belirlenmesi

Eda Burcu Yorulmaz^{1,2}  , İbrahim Özavcı^{1,2} , Engin Bahar^{1,2} ,
Hakan Volkan Şenavcı^{1,2} 

¹ Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 06100 Ankara, Türkiye

² Ankara Üniversitesi Kreiken Rasathanesi, 06837 Ankara, Türkiye

Accepted: April 15, 2025. Revised: April 15, 2025. Received: November 30, 2024.

Özet

Bu çalışmada, ışık eğrisinde O'Connell etkisi görülen YY CrB çift yıldız sisteminin, Ankara Üniversitesi Kreiken Rasathanesi'nde bulunan T80 Prof. Dr. Berahitdin Albayrak Teleskobu ve ona bağlı tayfçeker ile elde edilen orta çözünürlüklü ($R \sim 15000$) tayfları kullanılarak Doppler görüntüleme tekniği yardımıyla bileşenlerin yüzey parlaklık dağılımı haritalarının elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda, sisteme ilişkin tayflar LSD (En Küçük Kareler Dekonvolüsyonu) tekniği kullanılarak zamana bağlı hız profillerine dönüştürülmüş ve Doppler görüntüleme tekniğini temel alan, sıcak/soğuk leke varlığını ortaya çıkarmaya yönelik 3-sıcaklık modeline dayanan DoTS kodu ile her iki bileşene ait yüzey parlaklık dağılımı haritaları elde edilmiştir. Sistemin ışık eğrilerinde görülen O'Connell etkisini açıklayabilmek için literatürde yapılan çalışmalar sistemdeki lekelerin sıcak ve/veya soğuk leke olup olmadığını ve leke özelliklerini açıklamakta yetersiz kalmıştır. Bu bağlamda, YY CrB sistemi bileşenlerinin yüzey parlaklık dağılım anormalliği Doppler görüntüleme tekniği ile ortaya çıkarılmıştır.

Abstract

In this study, the aim is to obtain the surface brightness distribution maps of the components of YY CrB binary star system, which exhibits the O'Connell effect in its light curve, using mid-resolution ($R \sim 15000$) spectra obtained with the T80 Prof. Dr. Berahitdin Albayrak Telescope and its spectrograph at Ankara University Kreiken Observatory. In this context, the spectra of the system were converted into time-dependent velocity profiles using the LSD (Least Squares Deconvolution) technique, and the surface brightness distribution maps of both components were obtained using the DoTS code, which is based on Doppler Imaging and relies on 3-temperature models to reveal the presence of hot/cold spots. In the literature, explanations for the O'Connell effect observed in the system's light curves have been insufficient to determine whether the spots are hot or cold, as well as to characterize their properties. In this regard, the surface brightness inhomogeneities of the components of YY CrB system have been revealed through Doppler imaging technique.

Anahtar Kelimeler: binaries: eclipsing – techniques: imaging spectroscopy – stars: imaging – starspots

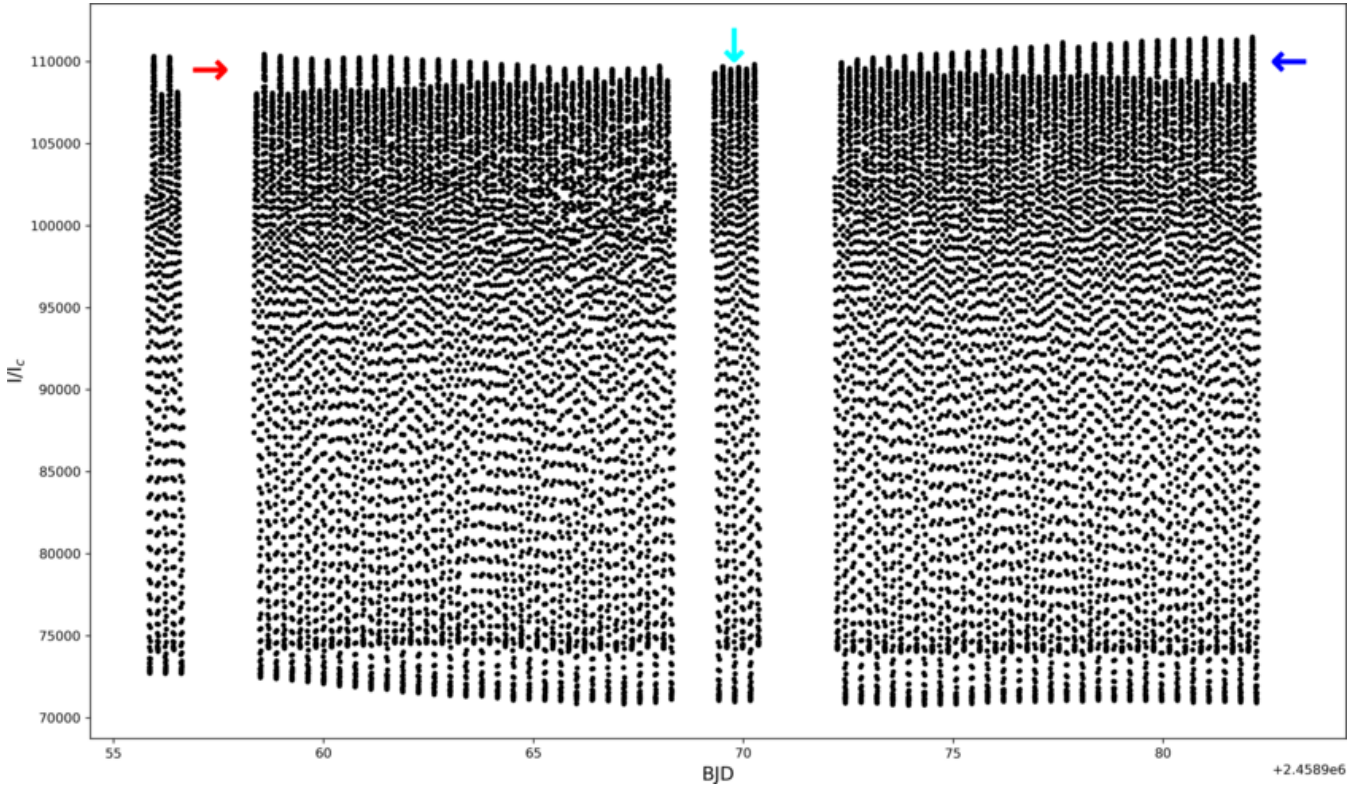
1 Giriş

Örten değişen çift yıldızların ışık eğrisi maksimum seviyeleri arasında fark olması, O'Connell etkisi (O'Connell 1951) adı verilen bir olgu ile isimlendirilmekte olup birçok sistemin ışık eğrisinde belirgin bir şekilde görülmektedir. Bu olgu neredeyse bir yüzyıldır bilinmektedir ve etkiye sebep olabilecek astrofiziksel sebepler hakkında ortaya çok sayıda teori atılmıştır. Fakat bu teoriler, O'Connell etkisi gösteren sistemlerin tamamı için kesin bir sebep olarak belirlenememiştir (Wilsey & Beaky 2009). Bu teoriler arasında, literatürde en çok kabul gören ve ışık eğrisi analizinde en sık kullanılan Binnendijk (1960)'in yüzey parlaklık dağılımını bozan leke aktivitesidir. Leke modellemesi amacıyla gerçekleştirilen ışık eğrisi analizi esnasında, gözlemsel verilere uyumlanan sıcak ve/veya soğuk leke modelleri her ne kadar uyumlu olsa da leke modeli temelde kendi içerisinde de bazı belirsizlikler taşır (Maceroni & van't Veer 1993). Özellikle örten değişen çift yıldızların ışık eğrisi analizinde kullanılan Wilson & Devinney (1971)

programı, her iki leke modelini de gözlem verilerine mükemmel bir şekilde uyumlayabilmektedir. Bu durum sadece ışık eğrisi analizi ile, sistemdeki lekenin hangi bileşende olduğunu ve lekenin karakteristiği hakkında yeterli bilgiye ulaşılamayacağını göstermektedir. Tayf bilimi bu bağlamda sisteme dair bilinmeyenleri açığa kavuşturabilecek bilgiyi taşımaktadır.

Belirgin bir O'Connell etkisine sahip YY CrB sisteminin ışık eğrisi keşfedildiği günden bu yana, maksimum seviyeleri arasındaki fark ve maksimum seviyenin görüldüğü evre (0.25 veya 0.75) zamanla değişmektedir (örn. Erdem ve diğ. 2001; Gazeas ve diğ. 2005; Essam ve diğ. 2010). Öyle ki bazı dönemlerde elde edilen ışık eğrilerinde O'Connell etkisi gözlenmemiştir (Sipahi ve diğ. 2000). Sistemin 24. sektör TESS ışık eğrileri incelenerek bu değişim net bir şekilde görülmüştür. Şekil 1'de 24. sektör TESS ışık eğrilerinin zamana bağlı değişimi gösterilmektedir. TESS'in aldığı ilk ışık eğrilerinde birinci maksimum seviyesi ikinci maksimum seviyesinden daha yüksek iken, zamanla maksimumlar arasındaki fark yavaş yavaş azalarak neredeyse aynı seviyeye gelmiştir. Sonrasında ise ikinci maksimum seviyesi birinci maksimum seviyesinden daha yüksek

* ebyorulmaz@ankara.edu.tr



Şekil 1. YY CrB'nin TESS 24. sektör ışık eğrileri. Kırmızı ok ile gösterilen ışık eğrilerinde, turkuaz renkli ok ile gösterilen ışık eğrilerine kadar maksimum-I seviyesi maksimum-II seviyesinden yüksektir. Turkuaz renkli ok ile gösterilen ışık eğrilerinde maksimum-I seviyesi ile maksimum-II seviyesi neredeyse aynıdır. Turkuaz renkli ok ile lacivert renkli ok arasındaki ışık eğrilerinde ise maksimum-II seviyesi maksimum-I seviyesinden daha yüksektir.

olacak şekilde maksimum seviyeleri arasındaki fark artmaya başlamıştır.

Her iki bileşeni de F8V tayf türüne sahip YY CrB sistemi için literatür ve TESS ışık eğrilerindeki değişim göz önünde bulundurularak, konvektif katman ve diferansiyel dönmenin de varlığıyla; manyetik aktivite sonucu oluşan, göç eden ve sönümlenen bir soğuk leke varlığından söz edilebilir. Buna karşın literatürde, sıcak ve/veya soğuk leke modelleri sistemin ışık eğrisi analizi sırasında uygulanmıştır. Öncelikle **Vaňko ve diğ. (2004)** birinci bileşenin ekvator bölgesine soğuk leke yerleştirmiştir. Devamında **Erdem ve diğ. (2001)**, birinci bileşenin kutup bölgesine soğuk bir leke yerleştirerek O'Connell etkisini modellemiştir. **Essam ve diğ. (2010)** karma leke modeli uygulayarak birinci bileşene soğuk, ikinci bileşene sıcak leke modeli uygulamıştır. Son olarak 2024 yılında **Soomandar & Poro (2024)** birinci bileşenin ekvator bölgesine fotosfere göre daha sıcak bir leke yerleştirerek ışık eğrisi analizini gerçekleştirmiştir.

Doppler görüntüleme tekniği (**Vogt & Penrod 1983**), sistemdeki lekenin hangi bileşende olduğunun belirlenebilmesi amacıyla kullanılabilecek tekniklerden birisidir. Bu bağlamda sistemin zamana bağlı tayf serilerinin elde edilmesiyle O'Connell etkisine sebep olan olgu açığa çıkarılabilir.

2 Gözlemler ve Analiz

Ankara Üniversitesi Kreiken Rasathanesi'nde T80 Prof. Dr. Berahitdin Albayrak teleskobuna bağlı Whoppschel tayfçekeri ile orta çözünürlüklü ($R \sim 15000$) 4170–7861 Å aralığındaki 8

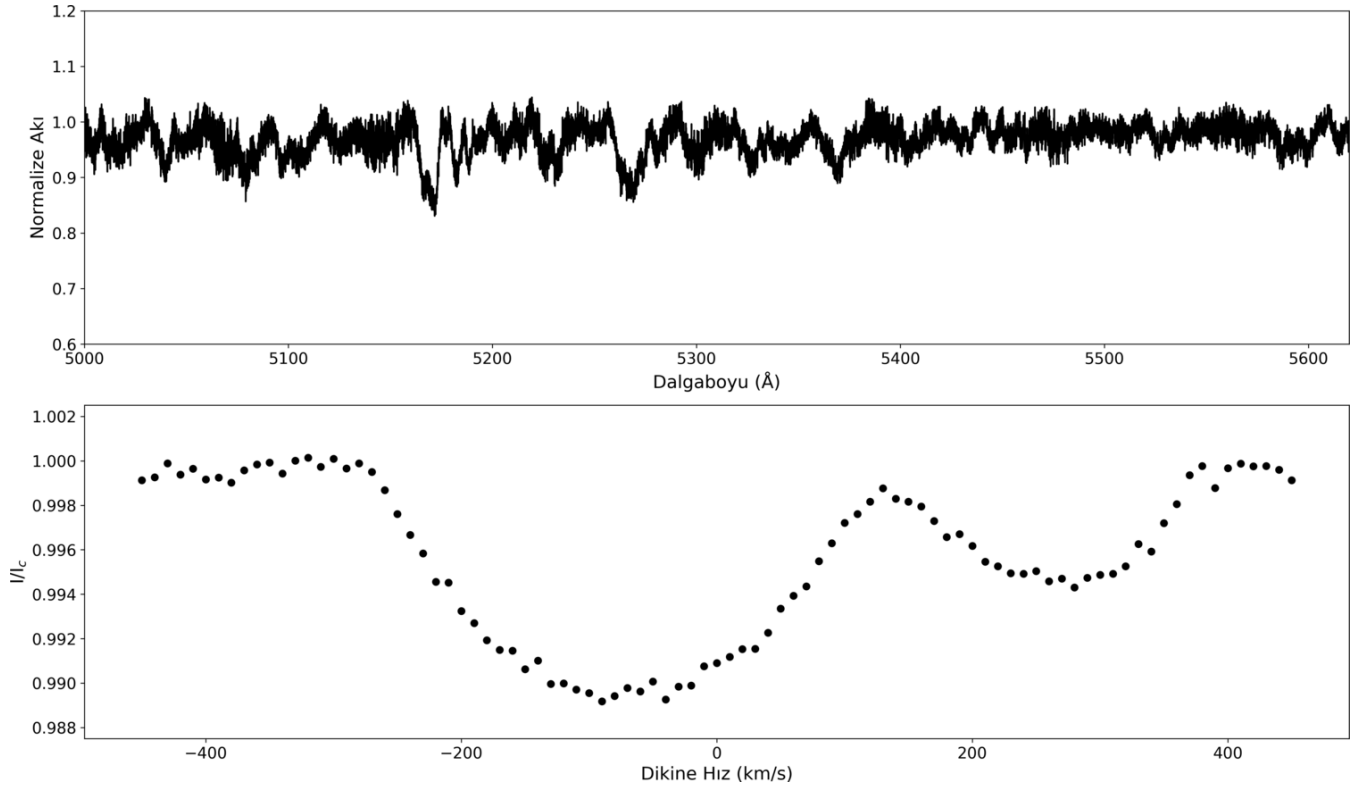
Çizelge 1. Gözlem bilgisi. Tüm poz süreleri 3600 s.

Tarih	HJD (2450000+)	Evre	S/N	
			Tayf	LSD
21/07/2022	9782.4601	0.124	37	2379
19/07/2022	9773.4726	0.257	37	2266
25/07/2022	9786.3153	0.361	41	2143
25/07/2022	9786.3571	0.472	61	2207
14/07/2022	9775.4634	0.543	41	2048
25/07/2022	9786.3989	0.583	56	3518
25/07/2022	9786.4411	0.695	64	2960
16/07/2022	9777.4448	0.805	65	2738

adet YY CrB tayfı, 12-25 Temmuz 2022 tarihleri arasında elde edildi. Ön indirgeme adımları ve tayfların normalizasyona hazırlanabilmesi amacıyla gerçekleştirilen tüm aşamalarda IRAF standart paketleri kullanılmıştır. Normalizasyona hazır hale gelen tayflar, Python tabanlı NSpec kodu kullanılarak normalize edilmiştir. Tayflara ait gözlem bilgileri Çizelge 1'de verilmiştir.

2.1 LSD (Least-Squares Deconvolution) Tekniği

LSD tekniği, tayf çizgi listesi kullanarak yıldız(lar)ın hız profillerini oluşturur. Tekniği ilk olarak **Donati ve diğ. (1997)**, bazı aktif yıldızların spektropolarimetrik gözlemlerine Doppler görüntüleme tekniğini uygulamak üzere kullanmıştır. Bu teknik yıldız tayfının S/N değerini yükselterek, yüzey parlaklık dağılımının daha hassas bir şekilde elde edilebilmesini sağlar.



Şekil 2. YY CrB sisteminin 0.26 evresine ait tayfı (üstte) ve LSD profili (altta)

Tekniğin tayflara uygulanabilmesi için bileşenlere ait ortalama bir yüzey sıcaklık değeri, yüzey çekim ivmesi ve uygun dalgaboyu aralığındaki atomlara ait çizgi şiddetlerine ihtiyaç duyulur. Bu çizgi listelerinin elde edilmesi aşamasında, VALD3 (The Vienna Atomic Line Database) (Pakhomov ve diğ. 2017) veritabanı kullanıldı. Veri tabanından $T=6000$ K sıcaklığında, $\log g=4.0$ yüzey çekim ivmesine sahip gözlem verilerinin dalgaboyu aralığındaki çizgi şiddet listesi elde edildi. Gözlenen tayflardan, hız profillerini olumsuz etkileyecek Balmer çizgileri, kromosferik aktivite belirteçleri ve tellürik çizgiler çıkarıldı.

LSD hız profillerinin oluşturulabilmesi için LSDpy (Folsom 2022) kodu kullanılarak S/N değerleri yükseltildi. YY CrB sisteminin tayf gözlemlerine ve LSD hız profillerine ait S/N değerleri Çizelge 1'de son iki sütunda verilmiştir. Görüldüğü üzere LSD profillerine ait S/N değerleri, tayflara ait S/N değerlerine göre çok daha yüksektir. Şekil 2'de YY CrB sisteminin 0.26 evresine ait tayfı ve LSD profili karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.

2.2 Doppler Görüntüleme Tekniği

Doppler görüntüleme tekniği, yıldız(lar)ın sık ve homojen evre dağılımına sahip tayflarındaki çizgi profillerini kullanarak yüzey parlaklık dağılım haritasını çıkaran bir tekniktir. Teknik, yıldız(lar)ın dönme hızına bağlı olarak, yıldız diskinin uzaydaki hızını temel alır ve eğer yıldız yüzeyinde soğuk leke varsa tayfsal çizgi profilleri üzerinde "tümsek", sıcak leke varsa tayfsal çizgi profilleri üzerinde "çukur" yapı gözlenir.

DoTS kodu (Collier Cameron 1997) incelenen yıldızların tayfsal ve fiziksel özelliklerine uygun sentetik profiller üreterek

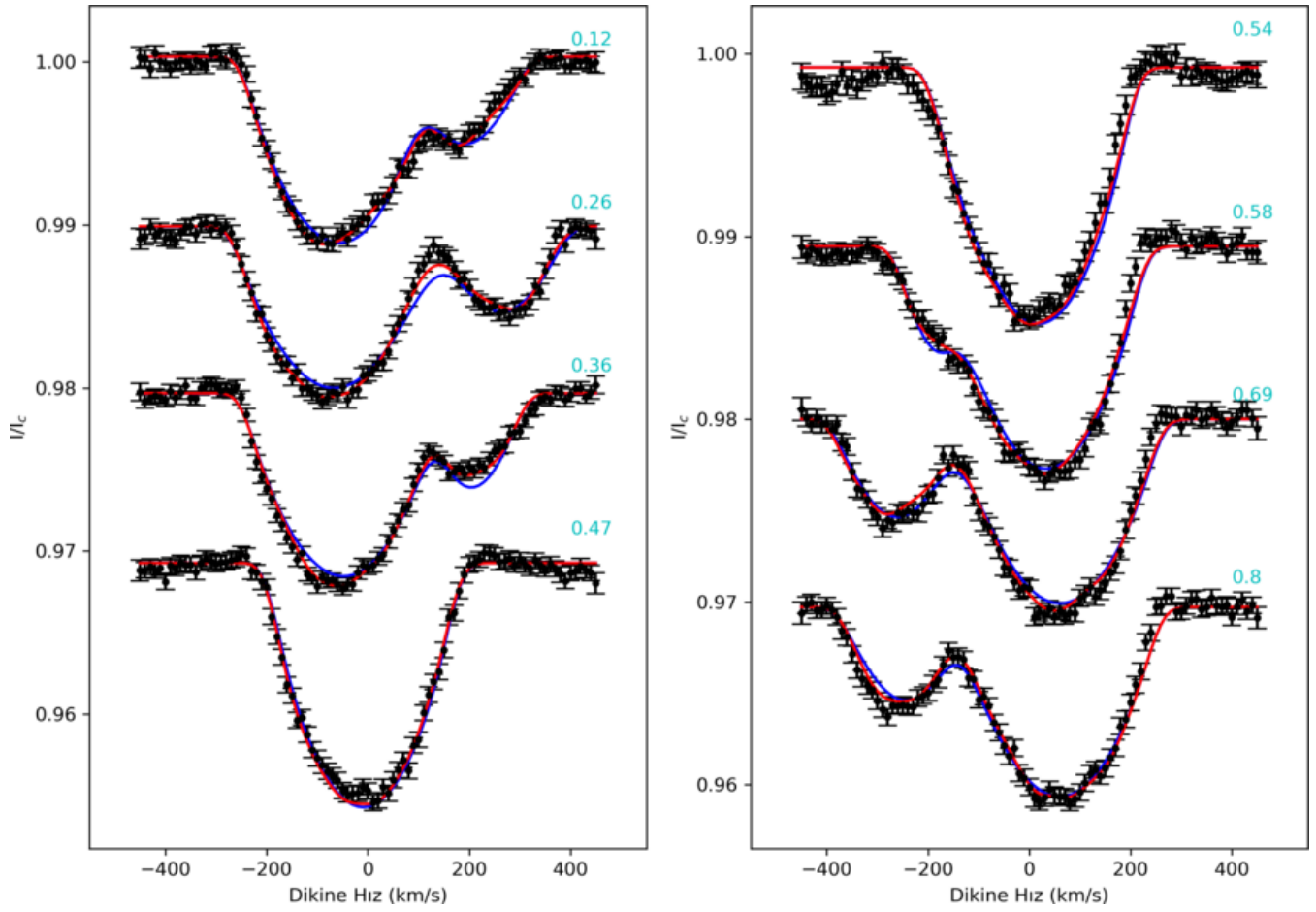
sonrasında Maksimum Entropi Metodu (MEM) (Skilling & Bryan 1984) adı verilen iterasyon tekniği ile gözlemsel profillere yakınsayarak uygun enlem ve boylam üzerine leke modellenmesi yapar. Kodun 3-sıcaklık modeli ile hem sıcak hem de soğuk lekeler modellenebilmektedir. 3-sıcaklık modeli, fotosfer sıcaklığı, fotosferden daha sıcak ve daha soğuk olacak şekilde 3 ayrı sıcaklığı barındırır.

Sistemin gözlemsel LSD hız profilleri, DoTS kodu tarafından üretilen sistemin tayfsal ve fiziksel özelliklerine uygun sentetik profilleri ve MEM iterasyonu sonucu üretilen leke modeli Şekil 3'te gösterilmektedir. Ayrıca DoTS kodunun üretmiş olduğu bileşenlerin geometrisine uygun ve dört ana evredeki yüzey parlaklık dağılım haritaları Şekil 4'te gösterilmektedir.

3 Sonuçlar ve Tartışma

Doppler görüntüleme tekniği, yıldız(lar)ın yüzeyinden elde edilen dikine hız bilgisi ile yüzey parlaklık dağılım haritasının görsel olarak çıkarılmasına olanak sağlar.

YY CrB sisteminin, Doppler görüntüleme tekniği kullanılarak DoTS kodu yardımıyla elde edilen yüzey parlaklık dağılım haritalarında, 0.25 evresine denk gelen boyun bölgesi civarında, 0.75 evresine göre baskın bir soğuk leke göze çarpmaktadır. Yüzey parlaklık dağılım haritasında elde edilen soğuk leke görüntüsü, TESS ışık eğrilerindeki O'Connell etkisinin zamanla olan değişiminin, soğuk lekelerin göç etme özelliğiyle de tutarlıdır. Ayrıca, bileşenlerin yüzeyinde kontrast farkı çok yüksek olmayan oluşumlar da yüzey parlaklık dağılım haritalarından görülebilmektedir. Bu oluşumlar, 0.25 evresindeki soğuk leke kadar baskın olmamakla birlikte sistemin

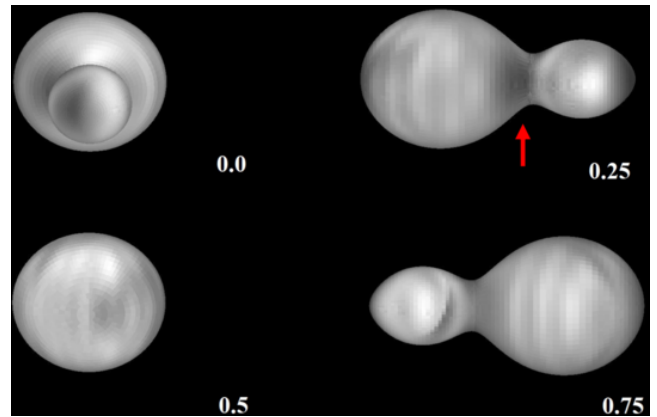


Şekil 3. Gözlemsel LSD profilleri (hata barları ile birlikte siyah noktalar), DoTS programı ile sistemin fiziksel özelliklerine uygun üretilen kuramsal LSD profilleri (lacivert sürekli eğri) ve DoTS programının maksimum entropi metodu kullanarak kuramsal eğrilere yakınsadığı sentetik eğriler (kırmızı sürekli eğri).

yüzeyinin tamamen homojen bir parlaklığa sahip olmadığını göstermektedir.

LSD profillerinin saçılmış olması, sistemin çok yüksek hızlarda dönme-dolanma hareketinden kaynaklıdır. YY CrB sisteminin Ankara Üniversitesi Kreiken Rasathanesi'nde elde edilen tayflarında 3600 saniyelik poz süreleri yaklaşık %11 oranında evre birleşmesine sebep olmuştur. Bu oran sistemdeki lekelerin konumlarını belirli seviyelerde etkilese de YY CrB örneğinde, sistemdeki lekenin sıcak/soğuk olup olmadığı ve hangi evrede olduğu belirlenebilmektedir. Tekniğin temel amacı yıldız(lar)ın yüzey parlaklık haritasını yüksek hassasiyetle çıkarmak olup; teknik, bu türden yörünge hızı yüksek olan ve O'Connell etkisi gösteren sistemlerin orta çözünürlükteki tayfları ile bileşenlerin yüzey parlaklık anormalliğini ortaya koyabilmektedir. Sistemdeki lekenin konumunun ve yüzey parlaklık dağılımının yüksek hassasiyetle belirlenebilmesi için gözlemlerin daha yüksek çözünürlükte yapılması ve daha kısa poz sürelerinde alınması gerekmektedir. Ek olarak sistemdeki lekenin TESS ışık eğrilerinde görülen göç hareketi sebebiyle, tayfsal ve fotometrik gözlemlerin eş zamanlı yapılması çok daha faydalı olacaktır.

Doppler görüntüleme tekniği yıldızların yüzeyini görüntülemeye yarayan modern tekniklerden birisidir. Bu bağlamda O'Connell etkisinin en çok kabul gören sebepleri



Şekil 4. Bileşenlerin dört ana evredeki yüzey parlaklık dağılım haritaları. 0.25 evresi boyun bölgesindeki soğuk leke kırmızı ok ile gösterilmektedir.

arasında yer alan leke varlığının denetlenebilmesi açısından olarak sağlamaktadır. Teknik, sonuç olarak 0.25 evresinde baskın bir soğuk leke olduğunu gösterse de bu, o bölgede ışınmı engelleyen başka bir olgu kaynaklı olabilir. Bu

türden sistemlerde gözlenen O'Connell etkisinin, sistemin hangi evresinde olduğunu ve baskın lekenin fotosfere göre sıcak/soğuk olduğunu açıklamak için Doppler görüntüleme tekniğinin kullanılabileceği düşünülmektedir.

Kaynaklar

- Binnendijk L., 1960, *AJ*, 65, 358
 Collier Cameron A., 1997, *MNRAS*, 287, 556
 Donati J.-F., Semel M., Carter B. D., Rees D., Cameron A. C., 1997, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 291, 658
 Erdem A., Budding E., Demircan O., Cicek C., Ozdemir S., Bulut I., Soyduğan E., Soyduğan F., 2001, *Information Bulletin on Variable Stars*, 5152, 1, [ADS](#)
 Essam A., Saad S. M., Nouh M. I., Dumitrescu A., El-Khateeb M. M., Haroon A., 2010, *New Astron.*, 15, 227
 Folsom C. P., 2022, *LSDpy*, <https://github.com/folsomcp/LSDpy>
 Gazeas K. D., ve diğ., 2005, *Acta Astron.*, 55, 123, [ADS](#)
 Maceroni C., van't Veer F., 1993, *A&A*, 277, 515, [ADS](#)
 O'Connell D. J. K., 1951, *Publications of the Riverview College Observatory*, 2, 85, [ADS](#)
 Pakhomov Y., Piskunov N., Ryabchikova T., 2017, in Balega Y. Y., Kudryavtsev D. O., Romanyuk I. I., Yakunin I. A., eds, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series Vol. 510, Stars: From Collapse to Collapse*. p. 518 ([arXiv:1710.10854](#)), [doi:10.48550/arXiv.1710.10854](#)
 Sipahi E., Keskin V., Yasarsoy B., 2000, *Information Bulletin on Variable Stars*, 4859, 1, [ADS](#)
 Skilling J., Bryan R., 1984, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 211, NO. 1, P. 111, 1984, 211, 111
 Soomandar S., Poro A., 2024, *New Astron.*, 105, 102112
 Vaňko M., Parimucha Š., Pribulla T., Chochol D., 2004, *Baltic Astronomy*, 13, 151, [ADS](#)
 Vogt S. S., Penrod G. D., 1983, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 95, 565
 Wilsey N. J., Beaky M. M., 2009, *Society for Astronomical Sciences Annual Symposium*, 28, 107, [ADS](#)
 Wilson R. E., Devinney E. J., 1971, *Astrophysical Journal*, vol. 166, p. 605, 166, 605

Access:

M25-0336: [Turkish J.A&A](#) — Vol.6, Issue 3.