

Hassas Dikine Hız Ölçümlerinde Yıldız Leke Aktivitesinin Etkisi

Orkun Özdarcan¹, Serdar Evren¹

¹Ege Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, İzmir, Türkiye.

Özet: Hassas dikine hız ölçümlerine dayalı ötegezegen keşiflerinin başlamasıyla yıldız aktivitesinin yüksek duyarlıklı dikine hız ölçümlerine etkisi de gündeme gelmiştir. Ötegezegen çalışmalarında hedef yıldız leke aktivitesi gösteriyorsa, ölçülen dikine hızlarda gezegen kaynaklı dikine hız değişimini bastırabilecek kadar büyük ek kaymalar gözlenebilir. Bu çalışmada yüksek leke aktivitesine sahip tek çizgili tayfsal çift HD 208472 yıldızının hassas dikine hız ölçümleri üzerinden leke aktivitesinin dikine hızlara etkisi araştırıldı. Yıldızın yörünge hareketi boyunca sergilediği dikine hızlarda 1 km s^{-1} kadar ek kaymalar olduğu gözlemlendi. Yıldızın beklenen dikine hız eğrisine göre, farklı yörünge evrelerinde farklı miktarlarda gözlenen bu kaymaların, leke konumları ile ilişkili olduğu görüldü.

Anahtar Kelimeler: Yıldız aktivitesi, dikine hızlar, HD 208472

Abstract: With the beginning of the discoveries of extrasolar planets via precise radial velocity measurements, effects of stellar activity on high precision radial velocity measurements are put on the agenda. In the extrasolar planet studies, if the target star exhibits star spot activity, additional large shifts, which could suppress the radial velocity variation of planetary origin, could be observed in measured radial velocities. In this study, effects of spot activity on radial velocities are investigated via precise radial velocity measurements of single-lined spectroscopic binary with high spot activity, HD 208472. Up to 1 km s^{-1} of additional shifts were observed in radial velocities of the star through its orbital motion. According to the expected radial velocity curve of the star, it is seen that different amount of observed shifts in different orbital phases are related to the positions of spots.

Key Words: Stellar activity, radial velocities, HD 208472

1. Giriş

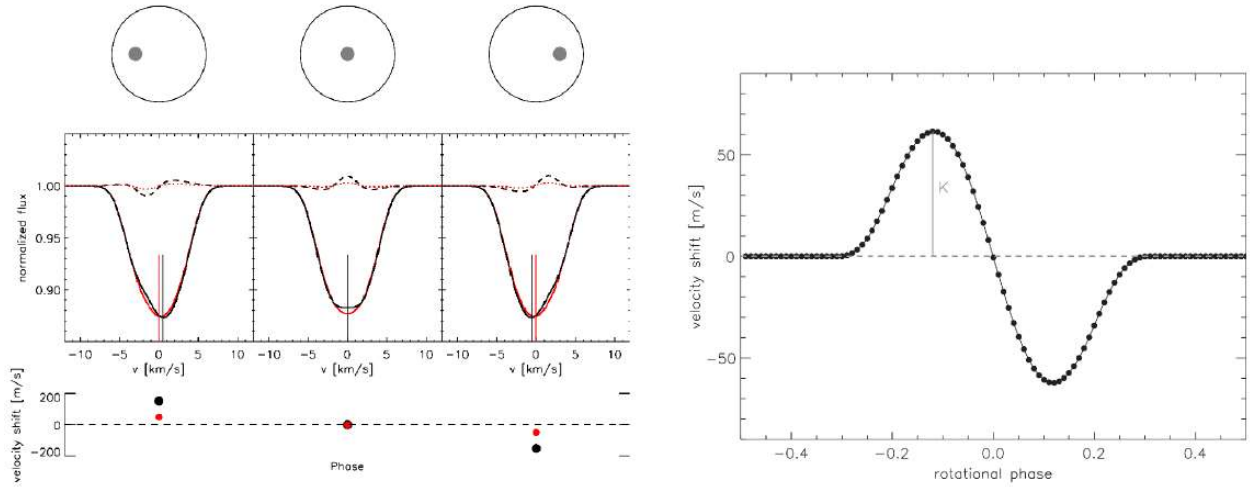
Yıldızların ve yıldız sistemlerinin doğalarında bulunan kimi değişimleri izleyip analiz edebilmek için çoğu zaman yüksek çözünürlüğe ve sinyal/gürültü oranına (S/N) sahip görsel bölge tayflarına gereksinim duyulur. Bu gereksinimi karşılamak için iyi bir tayfçekker ve CCD alıcıya ihtiyaç olduğu kadar bu aletlerin iyi gözlem koşullarına sahip gözlemevlerinde sıcaklığın ve basıncın olabildiğince sabit tutulduğu kararlı ortamlarda tutularak kullanılması da çok önemlidir. Bu koşulları sağlayan gözlemevi ve aletsel kurulumdan elde edilen gözlemlerin dikkatli bir biçimde indirgenmesi ile sözü edilen gereksinim karşılanabilir.

Güneş benzeri leke aktivitesi gösteren çift veya çoklu sistem üyesi olmayan yıldızlar için elde edilen yüksek çözünürlüklü tayflarda karanlık/soğuk bölgelerin (lekeler), parlak/sıcak bölgelerin (fakülalar) ve bulgurlanmanın (granülasyon) etkileri gözlenebilir. Eğer gözlenen tayfin çözünürlüğü $R < 100000$ ise granülasyonun etkisi çözümlenemez. Bununla beraber $40000 < R < 100000$ için yıldız yüzeyindeki leke ve fakülaların tayftaki soğurma çizgilerinde bakışıklığı bozması gözlenebilir. Bu tip bir yıldız üzerindeki herhangi bir aktivite yapısı (leke veya faküla) göz önüne alındığında, yıldızın bir dönme dönemi boyunca belirli bir zamanda bu aktivite yapısı önce yıldız diskinin bize yaklaşan tarafından görünür. Zaman ilerledikçe bakış doğrultumuza gelir ve ardından yıldız diskinin bizden uzaklaşan tarafından kaybolur. Aktivite yapısının varlığı soğurma çizgilerinin belirli bölgelerinde biçimsel bozulmaya neden olurken bir dönem içinde yıldız diski üzerindeki hareketi sonucunda bu bozulma soğurma çizgisinin kısa dalgaboyu tarafından uzun dalgaboyu tarafına doğru göç eder ve bu olay her bir dönme döneminde tekrarlanır.

Soğurma çizgilerinde gözlenen bu bozulmalar, bir yörünge (eğer yıldız tekse dönme) dönemi boyunca çizgi kesiti içinde kısa dalgaboyundan uzun dalgaboyuna doğru göç ettiği ve çizginin merkez dalgaboyuna göre bakışıklığı bozduğu için, ölçülecek dikine hızlarda da kimi kaymalara yol açacaktır. Şekil 1'de (Reiners ve ark 2010) dönme eksenine dik bakılan bir yıldız yüzeyinde eşlekte bulunan bir lekenin çizgi kesitinde oluşturduğu bozulma ve bu bozulmanın ölçülen dikine hıza yansımaları görsel olarak gösterilir.

Çift veya çoklu sistem üyesi olmayan ve güneş benzeri leke aktivitesine sahip tek bir yıldız için zaman serisi biçiminde alınacak görsel tayflardan ölçülen dikine hızlar yıldızın uzay hızı etrafında rastgele olmayan bir saçılma gösterecektir. Söz konusu yıldız bir çift sistem üyesi ise, aktivite yapılarının tayf çizgilerini bozması nedeniyle ortaya çıkacak dikine hız kaymalarının üzerine yörünge hareketi sonucu ortaya çıkan Doppler kaymaları binecektir. Benzer olarak ötegezegene sahip ve leke aktivitesi gösteren bir sistem gözleniyorsa, gezegen nedeniyle ortaya çıkan yörünge hareketi ve yıldız üzerindeki aktif yapılar nedeniyle ortaya çıkan ek dikine hız kaymaları üst üste binecektir.

*Sorumlu Yazar E- Posta: orkun.ozdarcan@ege.edu.tr



Şekil 1: Bir eşlek lekesinin çizgi kesitinde oluşturduğu bozulma ve bu bozulmanın ölçülen dikine hızla yansması (Reiners et al. 2010). Şekilde ele alınan yıldızın etkin sıcaklığı 3700 K'dir. Kırmızı ve siyah çizgiler sırasıyla 3500 K ve 0 K sıcaklığına sahip lekenin oluşturduğu çizgi kesitlerini gösterir. Her bir çizgi kesitine karşılık gelen dikine hız ölçümü şeklin alt bölümünde gösterilir. Sağ tarafta lekenin konumuna göre beklenen dikine hızlar gösterilir. Sıfır evre ölçülen dikine hız lekenin gözlemcinin tam bakış doğrultusundan geçtiği anda, -0.25 ve 0.25 evrelerde ölçülen hızlar da sırasıyla lekenin gözlemciye yaklaştığı ve uzaklaştığı anda ölçülen dikine hızlardır.

Bu çalışma kapsamında K1 III tayf türünden tek çizgili tayfsal çift üyesi ve leke aktivitesi gösteren HD 208472 yıldızının yörünge hareketi ve leke aktivitesi sonucu gözlenen dikine hızları incelenmiştir. Yıldızın aktivite düzeyinin değişimi ile ölçülen

dikine hızlardaki ek kaymaların değişimi, bu değişimlerin hesaplanan tayfsal yörünge parametrelerine etkisi ve olası ötegezegen keşfi çalışmalarında neden olabilecekleri sorunların büyüklüğü tartışılmıştır.

2. Gözlemler ve Veri İndirgeme

HD 208472'nin tayfsal gözlemleri Leibniz Astrofizik Enstitüsü'nün Izana Gözlemevi'nde (Tenerife, İspanya) bulunan STELLA robotik gözlem evinde 2009, 2010 ve 2011 yıllarında yapılmıştır. 1.2 m teleskoba bağlı fiber beslemeli ve R=55000 çözünürlüğe sahip Stella Echelle Spectrograph (SES) ile zaman serisi biçiminde 229 kullanışlı tayf elde edilmiştir. Tayfçekerde 2048 x 2048 piksel sayılı geri aydınlatmalı bir CCD kullanılmıştır. Her bir eşel tayf 80 sıradan oluşur ve 3800 - 8600 Å aralığını kapsar. SES tayfçekerindeki son güncellemelerle dikine hız duyarlılığı 30 m s⁻¹ değerine kadar inmiştir.

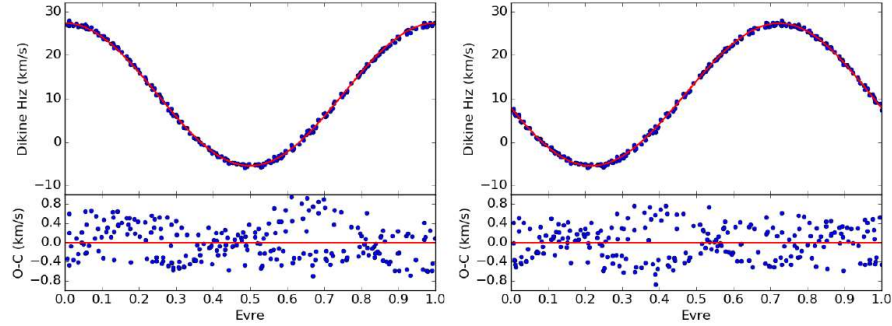
Tüm gözlemler IRAF görüntü indirgeme programında hazırlanmış küçük *cl betiklerinin* ardışık çalıştırılması ile otomatik olarak indirgenmiştir. İlk olarak kara akım, sıfır saniye ve düz alan düzeltmeleri, kozmik ışın ve bozuk piksel ayıklama gibi ön indirgeme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Hemen ardından, eşel tayftaki sıralar çıkartılmış ve Th - Ar lambası ile alınmış görüntüler kullanılarak dalgaboyu kalibrasyonu yapılmıştır. Son olarak, hedef yıldızla benzer tayfsal özellikler gösteren atmosfer modelleri kullanılarak, kalıp sentetik tayflar oluşturulmuş ve bu kalıplarla süreklilik normalizasyonu yapılmıştır.

İndirgeme sürecinden sonra, tayfların dikine hızlarının ölçülebilmesi için her bir tayftaki 80 sıradan 60'ı seçilmiştir. Bu noktada genişlemiş çizgilerin bulunduğu sıralar göz önüne alınmamıştır. 60 sıranın her biri için normalizasyon sürecinde kullanılan kalıp sentetik tayf kullanılarak çapraz korelasyon fonksiyonu hesaplanmış ve dikine hız belirlenmiştir. Göz önüne alınan 60 sıradan hesaplanan dikine hızların ortalaması, ilgili tayfin dikine hızı olarak kabul edilmiştir.

Tayf gözlemlerine ek olarak Johnson V bandı ışıkölçümleri Arizona Fairborn Gözlemevi'nde Tennessee Devlet Üniversitesi'ne ait TSU 0.40m otomatik fotoelektrik teleskop (APT), Viyana Üniversitesi'ne ait 0.75m "Amadeus" APT ve Ege Üniversitesi Gözlemevi'ne ait 0.30m Schmidt-Cassegrain teleskoplar ve bu teleskoplara bağlı fotoelektrik ışıkölçerler ile elde edilmiştir. Teleskoplara ve veri indirgeme sürecine ilişkin ayrıntılı bilgi Henry (1995), Strassmeier ve ark. (1997) ve Özdarcan ve ark. (2010) kaynaklarında bulunabilir.

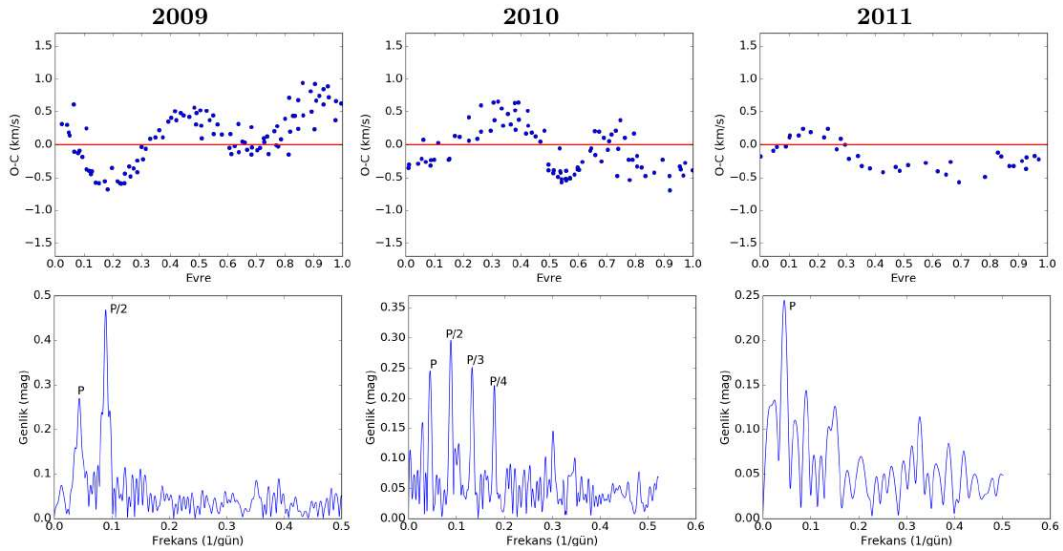
3. Dikine Hızların Analizi

Elde edilen dikine hızlara yörünge çözümü uygulanmıştır. Başlangıç parametreleri olarak Fekel ve ark. (1999) tarafından verilen yörünge çözüm parametreleri alınmıştır. Çember yörünge varsayımı ile elde edilen çözüm Şekil 2 sol panelde gösterilir. Çözümün kalan artıklar evreye bir grafik olarak noktalandığında 0 km s⁻¹ civarında rastgele bir dağılımdan çok 0.5 kadar evre farkı gösteren ve genişliği ± 1 km s⁻¹ değerine kadar ulaşan iki dalga deseninin varlığı görülür. Dışmerkezli yörünge varsayımı altında yapılan ikinci bir çözüm Şekil 2 sağ panelde gösterilir. Çözümün bulunan yörünge düşük bir dışmerkezliğe ($e = 0.01$) işaret eder. Bununla beraber çözümden kalan artıklar incelendiğinde sözü edilen iki dalganın halen varlığını koruduğu görülür.



Şekil 2: Dikine hızlara uygulanan yörünge çözümleri (üst paneller) ve çözümden kalan artıklar (alt paneller). Grafiklerde içi dolu daireler ölçülen dikine hızları, sürekli eğri tayfsal yörünge çözümünü gösterir. Sol panelde çember yörünge varsayımı altındaki çözüm, sağ panelde basık yörünge varsayımı ile yapılan çözüm gösterilir.

Çember yörünge varsayımı altında yapılan yörünge çözümünden kalan artıklarda gözlenen dalga desenlerinin dönemselliğini araştırmak için artıklara Period04 (Lenz ve Breger 2005) programı ile Fourier analizi uygulanmıştır. Analiz sürecinde her yıla ilişkin artıklar kendi içlerinde değerlendirilmiştir. Şekil 3'te her yıla ilişkin artıklar ve bu artıklara uygulanan Fourier analizine ilişkin genlik tayfları gösterilir. Üç yıl boyunca baskın olan dönemlerin yörünge dönemi ve harmonikleri olduğu gözlenir. Genlik tayflarında gürültü düzeyinin beş katının (5σ) üzerinde kalan dönemler göz önüne alınmıştır. İlgili dönemler Çizelge 1'de gösterilmiştir.



Şekil 3: Her yıla ilişkin artıklar ve bu artıklara uygulanan Fourier analizinden elde edilen genlik tayfları. Baskın dönemler ve harmonikleri genlik tayflarında P, P/2 vs. şeklinde gösterilmiştir. Burada P yörünge dönemini simgeler.

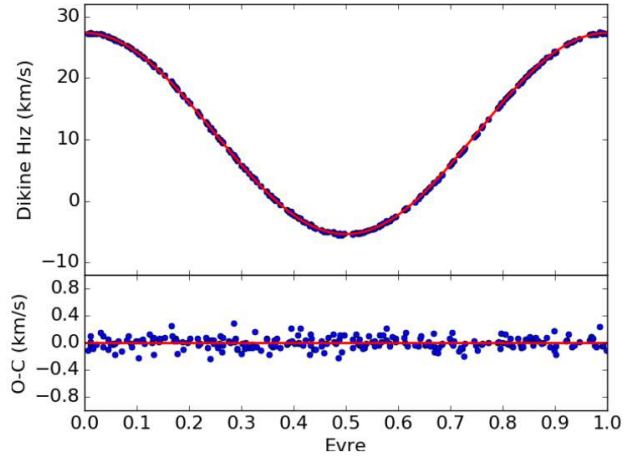
Her yıla ilişkin artıklardan bulunan dönemler o yılın dikine hız ölçümlerinden arındırılarak sadece yörünge değişimini içinde barındıran dikine hızlar elde edilmiş ve çember yörünge varsayımıyla bu dikine hızlardan tekrar yörünge çözümü elde edilmiştir. Şekil 4 üç yıllık arındırılmış veriyi ve tayfsal yörünge çözümünü gösterir. Çizelge 2'de artık hızlardan bulunan dönemler arındırmadan ve arındırılarak yapılan yörünge çözümlerine ait parametreler verilir. İki çözüm karşılaştırıldığında, parametrelerde çok küçük farklar olduğu, bununla beraber istatistik hataların yaklaşık dört kat kadar azaldığı görülür.

4. Dikine Hız Artıkları ve Işık Eğrisi Karşılaştırması

Her bir yıla ilişkin dikine hız artıkları, o yıl içinde Johnson V bandında elde edilmiş ışıkölçüm verileri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5'te her yıla ilişkin dikine hız artıkları ve o yıl elde edilen ışıkölçüm gözlemleri gösterilir. İlk bakışta fotometrik veri ve dikine hız artıkları arasında net bir ilişki göz çarpmaz. Bununla beraber ışık eğrisi genliğinin büyük olduğu 2009 ve 2010 yıllarında artıklar 500 m s^{-1} 'den daha büyük saçılma gösterirken, ışık eğrisi genliğinin daha küçük olduğu 2011 yılında dikine hız artıklarındaki saçılma 500 m s^{-1} 'den daha küçüktür.

Çizelge 1: Her yıla ilişkin bulunan baskın dönemler (5σ üzeri) ve genlikleri.

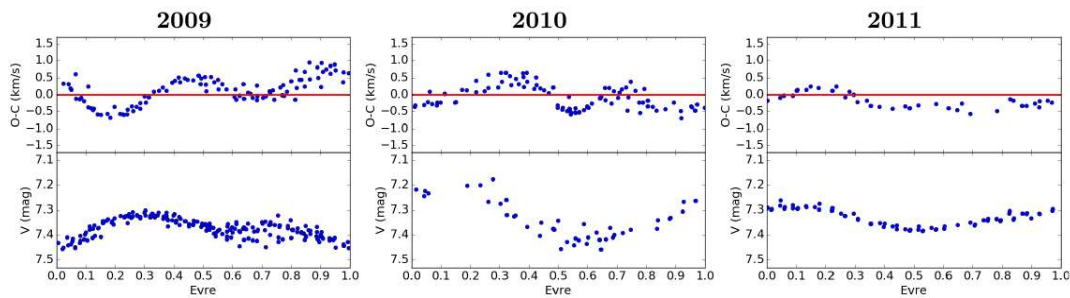
Yıl	Dönem (gün)	Genlik (km s^{-1})
2009	11.127 ± 0.006	0.48 ± 0.01
	22.882 ± 0.052	0.24 ± 0.01
	7.382 ± 0.018	0.07 ± 0.01
	25.322 ± 0.189	0.07 ± 0.01
2010	22.327 ± 0.120	0.28 ± 0.02
	11.350 ± 0.038	0.23 ± 0.02
	7.462 ± 0.022	0.18 ± 0.02
	5.568 ± 0.018	0.12 ± 0.02
2011	23.059 ± 0.375	0.28 ± 0.03



Şekil 4: Arındırılmış dikine hızlar ve bu hızlardan elde edilen tayfsal yörünge çözümü. Şekil 2 sol panel ile karşılaştırıldığında çözümden kalan artıkların küçülmesi net olarak görülür.

Çizelge 2: Tayfsal yörünge parametreleri.

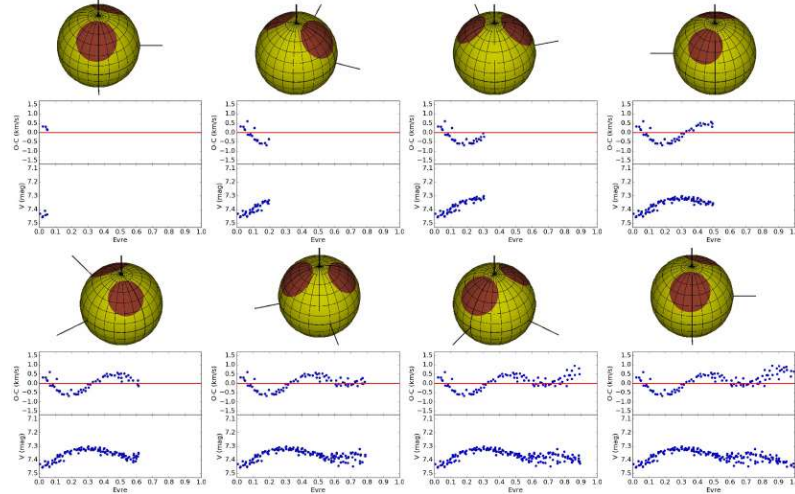
	Leke etkisi arındırılmamış	Leke etkisi arındırılmış
P (gün)	22.61942 ± 0.00066	22.61940 ± 0.00015
To (HJD2449+)	252.414 ± 0.180	252.419 ± 0.041
γ	10.968 ± 0.012	10.974 ± 0.003
K_1	16.355 ± 0.035	16.345 ± 0.008
e (sabit)	0	0
ω	...	...
$a_1 \sin i (10^6 \text{ km})$	5.087 ± 0.011	5.084 ± 0.003
$f(m) (M_\odot)$	0.01025 ± 0.00006	0.01023 ± 0.00001
Temsilin hatası (m s^{-1})	380	88



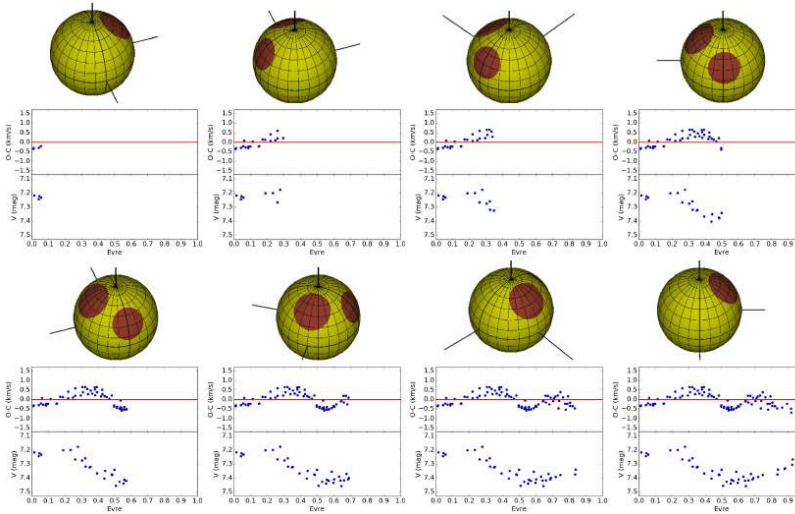
Şekil 5: Her yıla ilişkin artıklar ve Johnson V ışıkölçüm verileri.

Şekil 1'de gösterilen ilişkiyi gözlemsel olarak incelemek için, her yılın dikine hız artıkları ve ışıkölçüm verilerinin farklı evrelerdeki durumlar Şekil 6, 7 ve 8'de ayrı ayrı grafik olarak çizdirilir. Buna ek olarak, ışık eğrilerine Budding (1977) tarafından geliştirilen analitik leke modeli SpotModel programı Ribárik ve ark (2003) ile uygulanmıştır. Modelde yıldız üzerinde iki dairesel leke olduğu varsayılmıştır. Leke modelinin uygulamasına ilişkin teknik ayrıntılar Özdarcan ve ark. (2010, 2016) kaynaklarında bulunabilir. Uygulanan leke modeli sonucunda yıldızın ve üzerindeki lekelerin üç boyutlu görünüşleri elde edilmiş ve Şekil 6, 7 ve 8'de ek olarak gösterilmiştir.

Şekil 6, 7 ve 8 incelendiğinde, lekelerin gözlemcinin bakış doğrultusundan geçtiği ve yıldız diskinin arkasında kaybolduğu veya en az görüldüğü anlarda dikine hız artıklarının 0 km s^{-1} hız değerine yakınsadığı, lekelerin enlem yayları boyunca gözlemcinin bakış doğrultusu ile yaklaşık 45° açı yaptığı anlarda ise artıkların $\pm 500 \text{ m s}^{-1}$ daha büyük sistematik dağılım gösterdiği görülür. Bu çalışma kapsamında yapılan leke modellemesinde, leke enlemlerinin çok kısıtlı bir aralıkta dağıldığı görülür ($\sim 50^\circ - 80^\circ$). Bu nedenle gözlemsel incelemede enlemsel farklılığın dikine hız artıklarına etkisi konusunda net bir kanıya varılamaz. Bununla beraber, lekelerin boylamsal konumunun dikine hız artıklarına etkisi göz önüne alındığında, leke enlemlerindeki olası değişimlerin de dikine hız artıklarında değişime neden olabileceği öngörülebilir.



Şekil 6: 2009 yılı için artıklarının ve ışıkölçüm verilerinin farklı evrelerde yıldızın üç boyutlu çizimi ile beraber gösterimi.



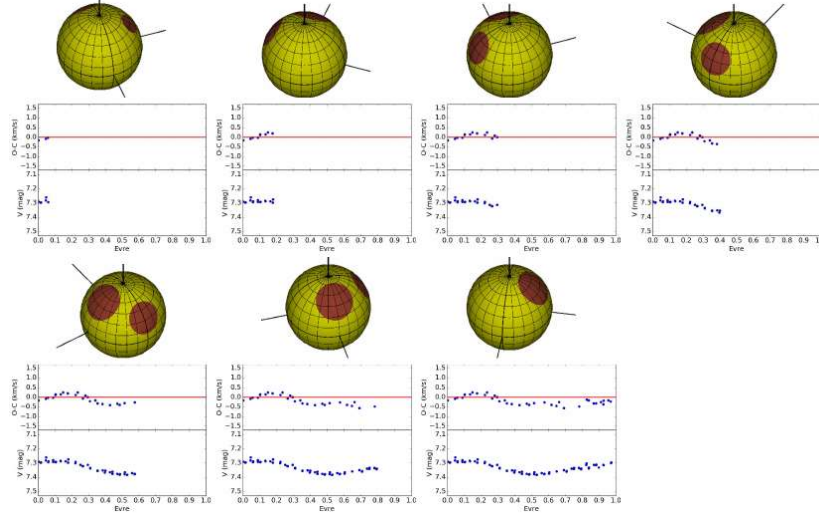
Şekil 7: 2010 yılı için artıklarının ve ışıkölçüm verilerinin farklı evrelerde yıldızın üç boyutlu çizimi ile beraber gösterimi.

5. Değerlendirme

Güneş benzeri leke aktivitesine sahip yıldızların ölçülen dikine hızlarında leke aktivitesi nedeniyle ek kaymalar gözlemlendiği bilinir. Bununla beraber, ötegezegen araştırmalarında m s^{-1} duyarlılığında yapılan ölçümlerde leke aktivitesinin etkisi ciddi sorunlara yol açar. Bu çalışmada, HD 208472 yıldızı için ölçülen dikine hızlardaki ek kaymaların km s^{-1} mertebesine kadar ulaşabildiği gözlemlenmiştir. Bu da, yüksek aktiviteye sahip yıldızların dikine hızlarında gözlenecek ek kaymaların olası bir ötegezegen sinyaliyle bastırarak gezegenin dikine hız sinyalinin çok zayıflamasına veya kaybolmasına neden olabileceğini gösterir.

Eğer dikine hızlardaki ek kaymaların yegane kaynağı leke aktivitesi ise, bu kaymaların dönem analizi sonucunda yıldızın yörünge (eğer yıldız tek ise dönme) dönemine ve harmoniklerine ulaşılacaktır. Ek kaymalar mevsimsel değişimler sergilese de hesaplanacak dönemlerde önemli değişimler olmayacaktır. Buna ek olarak, ışık eğrilerinde

zaman içinde gözlenen biçimsel değişimlerin bu ek kaymalara eşlik ettiği ve fotometrik leke modellemesi ve/veya Doppler görüntüleme yöntemi ile elde edilen yüzey haritalarındaki leke sayılarının ve konumlarının ek kaymalarla ilişkili olduğu görülecektir. HD 208472 durumunda ek kaymalarda gözlenen iç içe geçmiş ve 0.5 evre farkı gösteren iki dalganın aslında bir flip-flop (Jetsu ve ark. 1991; Berdyugina ve Tuominen 1998) olayı sonucun ortaya çıktığı anlaşılmıştır (Özdarcan ve ark. 2016). HD 208472 gibi yüksek leke aktivitesine sahip HU Vir yıldızı için (Harutyunyan ve ark. 2016) Doppler görüntüleme çalışması yapmış ve bu çalışmada kapsamında elde ettikleri dikine hızlarda, HD 208472 ile karşılaştırıldığında çok daha büyük ($\pm 2 \text{ km s}^{-1}$) ek kaymalar olduğunu gözlemlemiştir.



Şekil 8: 2011 yılı için artıklarının ve ışıkölçüm verilerinin farklı evrelerde yıldızın üç boyutlu çizimi ile beraber gösterimi.

Dikine hızlardaki ek kaymaların sadece leke aktivitesi kaynaklı olduğu durumlarda, leke konumları ile dikine hız ek kaymaları arasındaki ilişki akıllara "yeni bir leke modelleme tekniği geliştirilebilir mi?" sorusunu getirebilir. Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda bu tür bir modelleme girişimi yapılmamıştır. Bununla beraber, leke aktivitesi gösteren yıldızların ışık eğrilerinden dikine hızlardaki ek kaymaları tahmin etmek için yöntemler geliştirilmiştir (Aigrain ve ark. 2012). Ötegezegen araştırmalarında kullanılabilecek bu yöntemle tahmin edilen ek kaymalar veriden arındırılarak geriye sadece ötegezegenin sinyalinin kalması amaçlanır ancak bu yöntem, çoğu durumda geçerli olmayan, sadece tek bir leke nedeniyle ışık değişiminin gerçekleştiği durumlarda sağlıklı olarak çalışabilir.

Dikine hızlardaki ek kaymalardan leke konumlarına (özellikle leke enlem bilgisine) ulaşabilecek olası bir model geliştirilmesi, aktif yıldızların yüzey modellemesinde ve yüzey hız dağılımının çalışılmasında (diferansiyel dönme, meridyenel akıntılar) yeni bir kilometre taşı olacaktır.

6. Kaynaklar

- Aigrain, S.; Pont, F.; ve Zucker, S. 2012 MNRAS, 419, 3147
Berdyugina, S.V. ve Tuominen, I. 1998, A&A, 336, L25
Budding, E. 1977, Ap&SS, 48, 207
Fekel, F.C., Strassmeier, K.G., Weber, M., ve Washuettl, A. 1999 A&AS, 137, 369
Harutyunyan, G., Strassmeier, K.G., Künstler, A., Carroll, T.A., ve Weber, M. 2016 A&A, 592, A117
Henry, G.W. The Development of Precision Robotic Photometry. G.W. Henry ve J.A. Eaton (eds.), Robotic Telescopes. Current Capabilities, Present Developments, and Future Prospects for Automated Astronomy, volume 79 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 44. 1995.
Jetsu, L.; Pelt, J.; Tuominen, I.; ve Nations, H. The spot activity of FK Comae Berenices. I. Tuominen; D. Moss; ve G. Rüdiger (eds.), IAU Colloq. 130: The Sun and Cool Stars. Activity, Magnetism, Dynamos, volume 380 of Lecture Notes in Physics, Berlin Springer Verlag, 381. 1991. doi:10.1007/3-540-53955-7 161.
Lenz, P. ve Breger, M. 2005, Communications in Asteroseismology, 146, 53
Özdarcan, O., Carroll, T.A., Künstler, A., Strassmeier, K.G., Evren, S., Weber, M. ve Granzer, T. 2016, A&A, 593, 123
Özdarcan, O., Evren, S., Strassmeier, K.G., Granzer, T. ve Henry, G.W. 2010, AN, 331, 794
Reiners, A.; Bean, J.L.; Huber, K.F.; Dreizler, S.; Seifahrt, A.; ve Czesla, S. 2010, ApJ, 710, 432
Ribárik, G., Oláh, K., ve Strassmeier, K.G. 2003, AN, 324, 202
Strassmeier, K.G., Boyd, L.J., Epanch, D.H. ve Granzer, T. 1997, PASP, 109, 697