

Doppler Hüzmenmesi Gösteren Çift Sistemlerde Fotometriden Dikine Hız Eldesi

H. Gökhan Gökay^{1,2}★, Sacit Özdemir^{1,2,3}

¹Ankara Üniversitesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, Ankara TÜRKİYE

²Ankara Üniversitesi, Kreiken Gözlemevi, Ankara TÜRKİYE

³TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi, Antalya TÜRKİYE

Özet

Birbiri etrafında dolanan çift sistemler, yörünge eğiminin uygun olması durumunda, Doppler hüzmenmesi (beaming) nedeniyle, çok düşük genlikte ışık değişimi gösterebilir. Bu küçük genlikler (ppm) ancak uzay tabanlı CoRoT ve Kepler gibi uyduların duyarlı fotometrik gözlemlerinden elde edilebilir. Bu değişim uygun şekilde modellendiğinde baş bileşenin dikine hız genliği fotometriden belirlenebilmektedir (örneğin [van Kerkwijk et al. 2010](#)). Bu türden hüzmenme gösteren bir örten çift sistem olan HV Cnc'nin Kepler ışık eğrisi bu etki dikkate alınarak modellenmiş ve baş bileşenin "fotometrik dikine hız" genliği (38.7 ± 0.7 km/s) belirlenmiştir. Bu sonucun tayfsal dikine hız genliği (33.8 ± 0.2 km/s) ile ([Sandquist & Shetrone 2003](#)) uyumlu çıkması, yöntemin başarısını göstermektedir. Ayrıca çift yıldızların verecekleri hüzmenmenin, bileşen sıcaklıkları ve yörünge periyoduna göre değişimi de incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kepler, Doppler hüzmenmesi, fotometrik dikine hız

1 Giriş

Çift yıldız sistemleri astronomide, yıldızlara ilişkin fiziksel parametreleri belirlemede önemli araçlardan birisidir. Bu tür sistemler içinde en fazla bilgiyi örten çift sistemler sağlamaktadır. Işık eğrilerinin analizinden yörünge eğim açısı (i), yörünge dışmerkezliği (e), bileşenlerin görelî büyüklükleri ve şekilleri, kesirsel ışınım güçleri ($L_{1,2}$) ve kütle oranları (q) gibi bilgiler elde edilebilmektedir. Eğer her iki bileşenin dikine hız ölçümleri de mevcutsa bu durumda bileşenlerin kütleleri ($M_{1,2}$) ve yarı-büyük eksen uzunluğu (a) da belirlenebilmektedir. Işık eğrisi elde etmek için sistemin en az bir yörünge dönemi boyunca fotometrik ölçümü yapılmalıdır. Dikine hız değerlerini elde edebilmek için ise sistemin tayfsal gözlemleri yapılarak, bileşenlerin tayf çizgilerindeki Doppler kayması miktarı ölçülmelidir.

Günümüzde Kepler ve CoRoT gibi hassas fotometrik veri sağlayabilen teleskoplar sayesinde, önceden sadece tayfsal gözlemlerden elde edilebilecek bazı veriler fotometrik yolla da elde edilebilmektedir. Bileşenlerden birinin ışık eğrisi üzerindeki etkisi ihmal edilebildiği durumda, diğer bileşenin dikine hız eğrisinin genliği, Doppler beaming (hüzmenme) etkisinin modellenmesi ile fotometrik yolla belirlenebilmektedir. Hassas fotometrik veriler, ışık değişimine katkısı çok küçük (ppm seviyesinde) olan hüzmenme etkisini belirleyebilmeyi sağlamaktadır.

Doppler hüzmenmesi (beaming) şu 2 etkinin katkısıyla oluşur: i) yıldızların yörünge hareketi nedeniyle spektral enerji dağılımının mavi veya kırmızıya kayması nedeniyle oluşan akı modülasyonu, ii) yörünge hareketi nedeniyle yıldız fotosferinden salınan foton sayısı yoğunluğunun hareket yönünde artması. Hüzmenmenin beyaz cüce yıldızlarının dönmeleri üzerine etkileri [Hills & Dale \(1974\)](#) tarafından, çift sistem bileşenlerinin yörünge hareketi üzerindeki etkileri de [Shakura & Postnov \(1987\)](#) tarafından ilk defa tartışılmıştır. Bu etkinin gözlemsel izlerine ilk olarak [Maxted et al. \(2000\)](#) tarafından dikkat çekilmiştir. Kepler ışık eğrilerinde incelenmesi

ise ilk olarak [Loeb & Gaudi \(2003\)](#) ve [Zucker et al. \(2007\)](#) tarafından gerçekleştirilmiştir. Örneğin [van Kerkwijk et al. \(2010\)](#), bileşenlerinden birisi beyaz cüce olan KOI-74 çift sisteminin Kepler long-cadence ışık eğrilerini kullanarak, çiftin baş bileşeninin dikine hızını, fotometrik hüzmenme (beaming) etkisinden belirlemiştir.

Bu çalışmada ilk önce, bileşenleri anadol üyesi olan bir çift sistemin üreteceği hüzmenmenin, bileşenlerin fotosferik sıcaklık farkına ve sistemin yörünge dönemine göre değişimi incelenmiştir (Bölüm 2). Daha sonra Bölüm 3'te ise M67 üyesi olan ayrık, örten, tek çizgili tayfsal çift sistem HV Cnc için hüzmenme etkisi Kepler ışık eğrisine dayanılarak incelenmiş ve baş bileşenin dikine hız değişiminin genliği, hüzmenme etkisinden belirlenmiştir. Yöntemin dikine hız eğrisi eldesindeki başarısı tartışılmıştır.

2 Doppler Beaming ve Fotometrik Etkisi

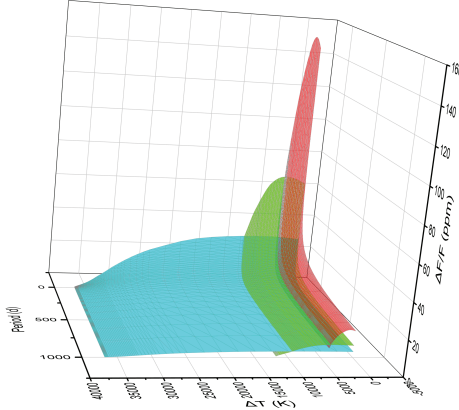
Bir gökcisminin uzay hareketinin radyal bileşeni, o cisimden gözlemciye gelen ışığın tayfının kaymasına, foton salma oranının değişmesine, dolayısıyla yüzeyinden yayılan fotonların gözlemci doğrultusunda hüzmenmesine neden olur. Teorik olarak ilk defa [Rybicki & Lightman \(1979\)](#) tarafından öngörülmüştür. Dikine hızları relativistik değerlere ulaşmayan kaynaklar için, gözlenen (hüzmenmiş) akı (F_λ veya F_ν) ile yüzeyden yayınlanan (hüzmenmeye uğramamış) akı ($F_{0,\lambda}$ veya $F_{0,\nu}$) arasındaki bağıntı şu şekilde verilir ([Bloemen 2015](#)):

$$F_\lambda = F_{0,\lambda} \left(1 - \alpha_\lambda \frac{v_r}{c}\right) \text{ veya } F_\nu = F_{0,\nu} \left(1 - \alpha_\nu \frac{v_r}{c}\right) \quad (1)$$

Burada α , Doppler beaming çarpanı olarak adlandırılır. Hüzmenmenin ışık değişimine etkisi,

$$\left(\frac{\Delta F_\nu}{F_\nu}\right)_{\text{hüzmenme}} = \frac{1}{c} \frac{K_1 [3 - \alpha_1(\nu)] F_{\nu,1} - K_2 [3 - \alpha_2(\nu)] F_{\nu,2}}{F_{\nu,1} + F_{\nu,2}} \quad (2)$$

★ ggokay@science.ankara.edu.tr



Şekil 1. Hüzmelenme etkisinin ($\Delta F/F$), çift sistemin yörünge dönemi (P) ve bileşenlerin fotosferik sıcaklık farkına (ΔT) göre değişimi görülmektedir. Baş bileşen için üç ayrı sıcaklık değeri (40000 K (mavi), 15000 K (yeşil) ve 7000 K (kırmızı)) kullanılmıştır. Baş bileşenin sıcaklığı azaldıkça hüzmelenme etkisi daha iyi görülmektedir.

şeklinde ifade edilir (Zucker et al. 2007). Eğer $F_{\nu,2}, F_{\nu,1}$ yanında ihmal edilebilecek kadar düşükse, bu durumda ifade:

$$\left(\frac{\Delta F_{\nu}}{F_{\nu}}\right)_{\text{hüzmelenme}} \cong \frac{1}{c} K_1 [3 - \alpha_1(\nu)] \quad (3)$$

şeklinde yazılır. Eğer filtre kullanılmıyor ve bolometrik akı ölçülüyorsa, bu durumda 3 ifadesi:

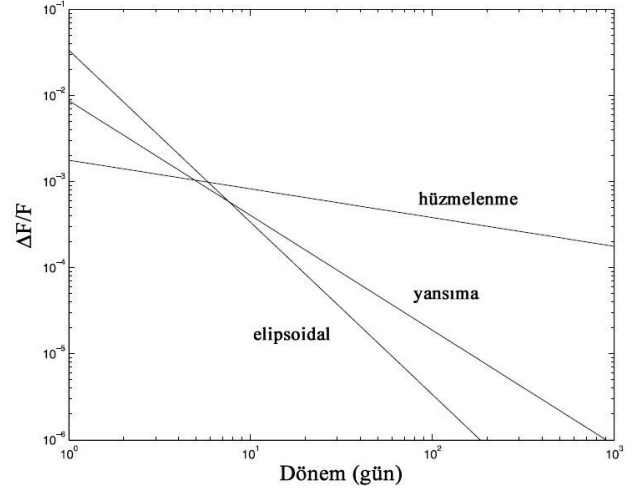
$$\left(\frac{\Delta F_{\nu}}{F_{\nu}}\right)_{\text{hüzmelenme}} \cong \frac{4}{c} K_1 \quad (4)$$

şeklini alır. Eşitliğin sol tarafı ışık eğrisinde gözlenen akı değişimine karşılık gelmektedir. $\alpha_1(\nu)$ kaynağın sıcaklığının bir fonksiyonudur. Dolayısıyla Eşitlik 3'den baş bileşenin dikine hız genliği (K_1) belirlenebilmektedir.

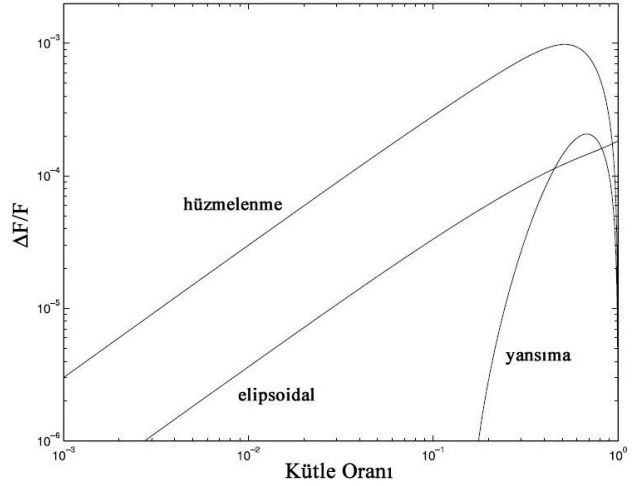
2 denklemleri kullanılarak, iki bileşeni de anakol yıldızı olan hipotetik bir çift sistemde, hüzmelenme etkisinin toplam ışık miktarına katkısı, farklı yüzey sıcaklığı ve yörünge dönemleri için hesaplanmıştır ve Şekil 1'de gösterilmiştir. Anakol varsayımı altında, bileşenlerin yüzey sıcaklıkları kullanılarak kütlelerine geçilmiştir (Cox 2000).

Bir çift yıldız sisteminde örtme/örtülme, mikrolensing, yansıma ve biçim bozulması kaynaklı ışık değişimleri de gözlenebilir. Bunlardan mikrolensing etkisi büyük çekim alanına sahip bir bileşen olmadığı sürece çok güçlü değildir. Ancak yansıma ve biçim bozulmasından kaynaklı ışık değişimi, eğer örtme/örtülme modellenirken yapılmamışsa, hüzmelenme etkisi modellenirken dikkate alınmalıdır. Morris & Naftilan (1993) biçim bozulmasından ve yansımadan kaynaklanan ışık değişimini şu şekilde modellemiştir:

$$\left(\frac{\Delta F_{\nu,1}}{F_{\nu,1}}\right)_{\text{elipsoidal}} \cong 0.3 \frac{(15 + u_1)(1 + \tau_1)}{(3 - u_1)} \frac{M_2}{M_1} \left(\frac{R_1}{a}\right)^3 \quad (5)$$



Şekil 2. Yörünge dönemine bağlı olarak F0-K0 çift sisteminde gözlenebilecek 3 etkinin birbirlerine göre değişimi görülmektedir (Zucker et al. 2007).



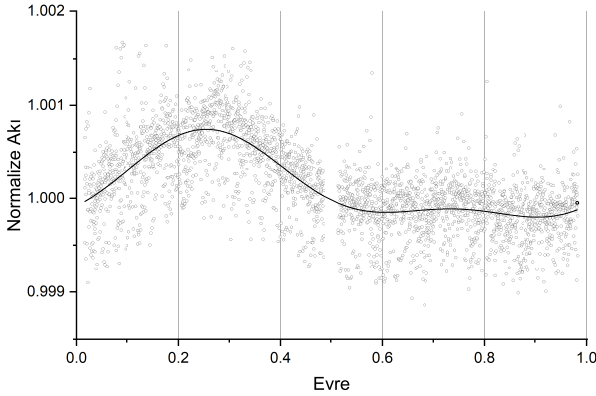
Şekil 3. Baş bileşeni G0 tayf türünden olan bir çift sistemin farklı kütle oranları için 3 etkinin birbirlerine göre değişimi görülmektedir (Zucker et al. 2007).

$$\left(\frac{\Delta F_{\nu}}{F_{\nu}}\right)_{\text{yansıma}} = \frac{2}{3} \frac{(R_2/a)^2 f_{\lambda}^{-1} F_{\nu,1} - (R_1/a)^2 f_{\lambda} F_{\nu,2}}{F_{\nu,1} + F_{\nu,2}} \quad (6)$$

Burada τ_1 ve u_1 baş bileşen için sırasıyla çekim kararma ve kenar kararma katsayılarını temsil etmektedir. f_{λ} ise ışınım gücü verimliliğini göstermektedir. Zucker et al. (2007), biçim bozulması, yansıma ve hüzmelenmeden kaynaklanan ışık değişimlerini bileşenleri F0-K0 ve baş bileşeni G0 tayf türünde olan çiftler için hesaplamıştır (Şekil 2 ve Şekil 3).

3 HV Cnc Sistemindeki Doppler Hüzmelenmesi

HV Cnc sistemi ($\alpha = 08^{\text{sa}}51^{\text{dk}}18^{\text{s}}$, $\delta = +11^{\circ}45'54''$, EPIC 211408138, $m_{\text{Kepler}} = 12^{\text{m}}.74$, $P=10.338$ gün) Mathieu et al.



Şekil 4. HV Cnc sistemine ait Kepler PDC-SAP verileri (noktalar), hüzmenme, şekil bozulması ve yansıma etkileri dikkate alınarak modellenmiştir (sürekli eğri). Tutulmadan kaynaklı değişime nazaran diğer değişimler çok küçük olduğu için, birinci ve ikinci minimum çukurları grafikte gösterilmemiştir.

(1986) tarafından SB1 türü tayfsal çift olarak keşfedilmiş, daha sonra Sandquist & Shetrone (2003) tarafından ayırık sistem olarak nitelenmiştir. Öz hareket ölçümlerine göre yüksek olasılıkla M67 kümesinin üyesidir (Sanders 1977; Girard et al. 1989; Zhao et al. 1993).

Sistem Kepler uzay teleskobu tarafından K2 görevi sırasında 27 Nisan – 10 Temmuz 2015 tarihleri arasında gözlenmiştir. Yaklaşık 75 günlük gözlem, sistemin 7 çevrimini kapsamaktadır. Analiz için arşivden edinilen fotometrik veri CCD #7 (ch 13-14) ile yapılan ölçümleri içermektedir. K2 görevinde gözlemler, teleskobun 4 jiroskobundan 2 tanesi çalışırken yapıldığı için yönelme sorunlarına dayanan ölçüm hataları içermektedir. Bu hatalar ya önceden tanımlı 16 CBV¹ (co-trending basis vector) kullanılarak ya da PDC (pre-search data conditioning) modülü tarafından giderilebilmektedir. HV Cnc sisteminin Kepler pipeline sistemi² tarafından sağlanan PDC-SAP (simple aperture photometry) verileri, analiz için kullanılmıştır.

Örten sistemin baş bileşeni 6400 K, yoldaş bileşeni ise 3750 K sıcaklığa sahiptir (Sandquist & Shetrone 2003). Sandquist & Shetrone (2003) örten sisteme fiziksel olarak bağlı olup olmadığını belirleyemediği, V bandında %11.5 oranında ışık katkısı sağlayan üçüncü bir cismin (B) bulunduğunu da belirlemiştir. Örten sistemin yoldaş bileşeninin (Ab), sistemin toplam ışığına katkısı 0.01'den daha azdır. Bu nedenle örten sistemin baş bileşenine (Aa) ait hüzmenme etkisi hesaplanırken yoldaş (Ab) bileşenin katkısı ihmal edilmiştir. Işık eğrisinin tutulmalar dışında kalan kısmı hüzmenme, biçim bozulması ve yansıma etkilerini belirleyecek şekilde modellenmiştir (Gökay & Özdemir 2018). Bu üç etki dikkate alınarak, ışık eğrisinin maksimumuna yapılan fit sonucunda ulaşılan parametreler Tablo 1'de verilmiş, grafiksel olarak ise Şekil 4'de sunulmuştur.

¹ <https://archive.stsci.edu/k2/cbv.html>

² <https://archive.stsci.edu/k2/data/search/search.php?k2`k2`id=211408138`&action=Search>

Çizelge 1. HV Cnc sisteminin ışık eğrisinin örtme/örtülme dışında kalan bölgesini en iyi modelleyen parametreler, hataları ile beraber verilmiştir. Hüzmenme etkisinden belirlenen fotometrik dikine hız, Sandquist & Shetrone (2003) tarafından tayfsal yolla bulunan dikine hız ile kıyaslanmıştır.

Parametre	Değeri
$A_{hüzmenme}(ppm)$	440±8
$A_{elipsoidal}(ppm)$	184±6
$A_{yansıma}(ppm)$	19±9
$V_{r,1}(km/s)$ (fotometrik)	38.7±0.7
$V_{r,1}(km/s)$ (tayfsal, (Sandquist & Shetrone, 2003))	33.8±0.2

4 Sonuç

Işık eğrilerinden doğrudan belirlenemeyecek tek tayfsal element dikine hız genliğidir. Ancak hassas fotometrik veri kullanıldığında, baş bileşenin hüzmenme çarpanı (α_1) ve bileşenlerinin hüzmenme etkilerinin normalize genlikleri ($\Delta F/F$) vasıtasıyla, denklem 2'de gösterdiği gibi K_1 değeri elde edilebilir. İkinci bileşenin yeteri kadar sönük olduğu çiftlerde, gözlenen hüzmenme değişiminin tek kaynağı parlak bileşen olarak alınabilir. Eğer baş bileşenin tayf türü belli ise α_1 belirlenip K_1 hesaplanır.

Hüzmenme çarpanının kestirilmesi ve hüzmenme genliği ile K_1 arasındaki genliğin kalibre edilmesi için çift sistemlerin tayfsal gözlemlerinin yapılması gereklidir. Hüzmenme etkisi görünen ışık eğrileri, sisteme ait dönem, dış merkezlik ve periastron geçiş anı gibi yörünge elemanlarını belirleme imkanı verir (Zucker et al. 2007). Bu değerler duyarlı fotometrik taramalardan elde edileceği için tayfsal çiftler hakkındaki istatistik çalışmalara katkı sağlar (örn. yörünge dönemi dağılımı (Duquennoy & Mayor 1991; Mazeh et al. 2006) ve yörünge dönemi ile dışmerkezlik arasındaki ilişki (Halbwachs et al. 2003)).

$P > 10$ gün olan F0-K0 türü bir çift sistem için, Doppler Beaming etkisi, biçim bozulması ve yansıma etkilerinden daha baskındır (Şekil 2). F7V tayf türünden baş bileşeni olan ve $P \sim 10.3$ gün döneme sahip olan HV Cnc sistemi için de hüzmenme etkisi beklendiği gibi, biçim bozulması ve yansıma etkilerinden daha baskındır (Tablo 1).

Hüzmenme etkisi içeren ışık eğrileri LCURVE isimli analiz kodu ile modellenilebilmektedir (Copperwheat et al. 2010). PHOEBE 2.0 sürümüne de bu etki ilave edilmiştir (Prša et al. 2016). Bu çalışmada HV Cnc sisteminin ışık eğrisindeki hüzmenme, yansıma ve biçim bozulması etkileri Denklem 3, 5 ve 6 ile modellenmiştir. En uygun fitten, sistemin dikine hız genliği 38.7 ± 0.7 km/s olarak belirlenmiştir. Bu değer, tayfsal gözlemlerden belirlenmiş literatürdeki genlik değeri ile oldukça uyumludur (Bkz. Tablo 1). Fotometrik hüzmenme etkisinden dikine hız genliği belirlenen ilk sistem KOI-74'tür (van Kerkwijk et al. 2010). Aynı çalışmada belirlenen dikine hız değerinin hatası 1km/s olarak belirtilmiştir. O halde çok duyarlı fotometrik gözlem verisinde bulunan olası hüzmenme etkisi modellenerek, çift (gezegen + yıldız veya kahverengi cüce + yıldız) sistemlerin en az bir bileşenine ait dikine hız genliği fotometrik yolla hesaplanabilmektedir. Bu sonuç hassas fotometrinin başarısı olup, yeni bir tür değişim mekanizmasını (hüzmenme) literatüre kazandırmıştır.

Örtme/örtülme göstermeyen bir sistem için bile hüzme-

lenme etkisinden çift olduğu belirlenebilir. Bu nedenle Zucker et al. (2007), yeni bir çift sistem türü olarak “Hüzmelenme Gösteren Çiftler” (Beaming Binaries) grubunu önermiştir. İki bileşenin de birbirine benzer parlaklık ve kütlelere sahip olmaları durumunda, bileşenlerin hüzmelenmeye neden olan katkıları birbirini yok eder (Denklem 2). İki bileşenin de toplam ışınımına katkısının önemli olduğu durumlarda, TODCOR (Zucker & Mazeh 1994) kodu gibi tayfsal çözümlenme (disentangling) tekniklerinin, fotometrik analize uygulanması gerekir. Bu durumda birden fazla filtrede gözlem yapılması, K_1 ve K_2 'nin her ikisinin birden belirlenmesine katkı sağlar (Zucker et al. 2007).

Kaynaklar

- Bloemen S., 2015, High-Precision Studies of Compact Variable Stars. Springer International Publishing, doi:10.1007/978-3-319-10283-2
- Copperwheat C. M., Marsh T. R., Dhillon V. S., Littlefair S. P., Hickman R., Gänsicke B. T., Southworth J., 2010, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 402, 1824
- Cox A. N., 2000, Allen's astrophysical quantities
- Duquennoy A., Mayor M., 1991, *Astronomy and Astrophysics*, 248, 485
- Girard T. M., Grundy W. M., Lopez C. E., van Alena W. F., 1989, *The Astronomical Journal*, 98, 227
- Gökay G., Özdemir S., 2018
- Halbwachs J. L., Mayor M., Udry S., Arenou F., 2003, *Astronomy and Astrophysics*, 397, 159
- Hills J. G., Dale T. M., 1974, *Astronomy and Astrophysics*, 30, 135
- Loeb A., Gaudi B. S., 2003, *The Astrophysical Journal*, 588, L117
- Mathieu R. D., Latham D. W., Griffin R. F., Gunn J. E., 1986, *The Astronomical Journal*, 92, 1100
- Marted P. F. L., Marsh T. R., North R. C., 2000, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 317, L41
- Mazeh T., Tamuz O., North P., 2006, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 367, 1531
- Morris S. L., Naftilan S. A., 1993, *The Astrophysical Journal*, 419, 344
- Prša A., et al., 2016, *The Astrophysical Journal*, 227, 29
- Rybicki G. B., Lightman A. P., 1979, Radiative processes in astrophysics
- Sanders W. L., 1977, *Astronomy and Astrophysics*, 27, 89
- Sandquist E. L., Shetrone M. D., 2003, *The Astronomical Journal*, 126, 2954
- Shakura N. I., Postnov K. A., 1987, *Astronomy and Astrophysics*, 183, L21
- Zhao J. L., Tian K. P., Pan R. S., He Y. P., Shi H. M., 1993, *Astronomy and Astrophysics*, 100, 243
- Zucker S., Mazeh T., 1994, *The Astrophysical Journal*, 420, 806
- Zucker S., Mazeh T., Alexander T., 2007, *The Astrophysical Journal*, 670, 1326
- van Kerkwijk M. H., Rappaport S. A., Breton R. P., Justham S., Podsiadlowski P., Han Z., 2010, *The Astrophysical Journal*, 715, 51

Erişim:

023-1400: UAK-2018 Program — UAK Bildiri — Turkish J.A&A.