

## Doppler Görüntüleme Tekniği Kullanılarak SW Lac'ın Yüzey Haritalarının Elde Edilmesi

Hakan V. Şenavcı<sup>1\*</sup>, Gaitee A.J. Hussain<sup>2</sup>, Douglas O'Neal<sup>3</sup>, John R. Barnes<sup>4</sup>,  
Selim O. Selam<sup>1</sup>, Berahitdin Albayrak<sup>1</sup> ve Cemal Aydın<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 06100  
Tandoğan Ankara, Türkiye

<sup>2</sup> ESO, Karl-Schwarzschild-Str. 2, D-85748 Garching, Almanya

<sup>3</sup> Keystone College, Natural Science and Mathematics, La Plume, PA 18440,  
Amerika Birleşik Devletleri

<sup>4</sup> Center for Astrophysics Research, University of Hertfordshire, College Lane,  
Hatfield Herts AL109AB, İngiltere

**Özet** Bu çalışmada, sezonluk ışık değişimi gösteren W-türü W UMa örtlen çift sistem SW Lac'ın ilk yüzey parlaklık dağılımı haritaları elde edildi. Sisteme ilişkin tayfların S/N değerleri, en küçük kareler dekonvolüsyonu (Least Squares Deconvolution - LSD) kullanılarak Doppler Görüntüleme Tekniği için uygun hale getirildi. Sisteme ilişkin yüzey parlaklık dağılımı haritaları, Doppler Görüntüleme Tekniği kodu DoTS'un değen çift yıldızlar için uyarlanmış versiyonu kullanılarak elde edildi. Analiz sonuçları, SW Lac'ın, ışık değişimi manyetik aktivite kökenli olan ve ikinci bileşen üzerinde daha çok soğuk leke barındıran tipik bir W-türü W UMa olduğunu göstermektedir.

### 1 Giriş

Geç tayf türünden yakın çift yıldızlarda görülen ışık değişimi, örtme-örtülme, yörünge parametreleri ve şekil bozulması gibi geometrik olgular dışında manyetik aktivitenin varlığına da atfedilmektedir. Bu bağlamda manyetik aktivite kökeninin araştırılmasında kullanılan en önemli belirteçler, ışık eğrisi genliğinin değişimi, dönem değişimi karakteristiği ve tayfsal aktivite belirteci çizgilerdir.

Yıldızlarda kromosferik ve fotosferik aktivitenin varlığının belirlenmesinde kullanılan en etkili tekniklerden biri, tayfsal aktivite çizgilerine bağlı olarak gerçekleştirilen Doppler Görüntüleme Tekniği'dir. Yıldız yüzeyindeki soğuk bölgeler, daha sıcak olan fotosfere oranla şiddet olarak daha düşük bir sürekli akıya ve çevreleyen fotosfere nazaran daha farklı bir kimyasal bileşime sahiptirler. Dolayısıyla dönmeden dolayı genişlemiş bazı tayfsal çizgilerin profillerinin bozulmasına, yani bir asimetriye sebep olurlar. Bu asimetrinin dönme modülasyonu kaynaklı radyal hızı lekenin anlık konumunun bir göstergesi iken, radyal hızın büyüklüğü ise lekenin büyüklüğünün izdüşüm görüntüde kapladığı alanın bir ölçüsüdür. Yıldız döndükçe çizgi üzerindeki asimetri, lekenin enleminin belirlediği bir genlikle profil boyunca hareket eder. Dolayısıyla bu teknik, bir zaman

\* email: hvsenavci@ankara.edu.tr

serisi olarak elde edilen tayfsal çizgi profillerindeki değişimlerle soğuk yıldızların yüzey parlaklık dağılımındaki anormalliklerin belirlenmesi ve fotosferik lekelerin yüzeydeki dağılımları ile zamana bağlı davranışlarının belirlenerek 2 – boyutlu yüzey haritalarının çıkartılmasında kullanılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı dönemden döneme ışık değişimi gösteren ve literatürce birçok araştırmacı tarafından bu davranışı doğrulanan kısa dönemli (P 0<sup>g</sup>.32) W UMa türü bir çift sistem SW Lac ( $V_{max}=8^m.99$ , HD 216598, BD+37° 4717, HIP 113052) yıldızının uzun dönemli ışık değişiminin, yalnızca geometrik (tutulmalar, biçim bozulması) ve ışınasal (yansıma ve çekim kararması) olgulardan değil, aynı zamanda manyetik etkinliğin varlığı altında bileşen yıldızların yüzey parlaklık dağılımlarının homojen olmamasından kaynaklandığını, Doppler Görüntüleme Tekniği yardımıyla, ortaya çıkarmaktır.

### 1.1 SW Lac

Sistem, ışık eğrilerinde gösterdiği asimetrik ve karmaşık dönem değişim karakteristiği nedeniyle literatürde en çok gözlenen ve araştırılan değen çift yıldızlardan biridir. SW Lac'ın ışık eğrilerindeki kararsızlıklar, sistemin ilk fotometrik gözlemlerinden bu yana bilinmekte ve soğuk leke bölgelerinin varlığı gibi bileşenlerin yüzey parlaklık dağılımındaki düzensizliklere atfedilmektedir (Brownlee 1957, Albayrak et al. 2004, Gazeas et al. 2005 ve referansları).

SW Lac'ın IUE (International Ultraviolet Explorer) gözlemleri, sistemde kromosferik aktivitenin varlığını işaret etmektedir (Eaton 1983, Rucinski et al. 1984, Jeong et al. 1994). Jeong et al. (1994), sistemin MgII çizgi şiddetlerinin yörünge evresiyle değişimini inceleyerek kromosferik aktivitenin ışık eğrilerindeki değişimle uyumlu olduğunu belirlediler. Rucinski et al. (1984) tarafından yapılan çalışmada sistemin koronal X-ışın akısının varlığında bahsedildi ve ardından Cruddace & Dupree (1984) ve Stępień et al. (2001) sırasıyla Einstein ve ROSAT uyduları gözlemlerinden sistemin X-ışın akısını  $L_x/L_{bol} = 3.31 \times 10^{-4}$  ve  $L_x/L_{bol} = 4.07 \times 10^{-4}$  olarak hesapladılar.

Sistemin en güncel dikine hız çalışması Rucinski et al. (2005) tarafından gerçekleştirildi. Araştırmacılar sistemin tayfsal kütle oranını  $q_{sp} = 0.776 \pm 0.012$  olarak belirlediler ve hatanın bu denli yüksek olmasının sistemin yüzey aktivitesinden kaynaklandığını açıkladılar. Yine aynı çalışmada sistemin tayf türü G5V olarak belirlendi. Ancak araştırmacılar bu tayf türünün gözlenen (B-V) değerinden daha sıcak olduğunu ve G8V tayf türünün sistem için daha uygun bir değer olduğunu belirttiler.

SW Lac'da üçüncü bileşenin varlığına ilişkin ilk çalışma Hendry & Mochacki (1998) tarafından yapıldı. İlave cismin varlığına ve bazı fiziksel parametrelerinin belirlenmesine ilişkin daha detaylı çalışmalar Canada-France-Hawaii Teleskobu'nda Adaptive Optics (AO) yöntemi kullanılarak Pribulla & Rucinski (2006) ve Rucinski et al. (2007) tarafından gerçekleştirildi. İlgili çalışmalarda 1''68 ayrıklığa ve sistemle oluşturduğu ortak kütle merkezi etrafında 940 yıllık yörünge dönemine sahip bir ilave cismin varlığı belirlendi.

## 1.2 Gözlemler ve İndirgeme

Doppler Görüntüleme Tekniği, hedef cisme ilişkin tam bir yörünge dönemi boyunca elde edilmiş yüksek çözünürlüklü tayflara gereksinim duymaktadır. Hedef cismin parlaklığı da göz önünde bulundurulduğunda yöntem, en az 2.0 m ve üzeri teleskopların kullanılmasını gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda SW Lac'ın faklı evrelerde ve tam bir yörünge dönemini kapsayan yüksek çözünürlüklü tayfları Amerika Birleşik Devletleri Texas Eyaleti'nde bulunan McDonald Gözlemevi'nde elde edildi. Gözlemler, 10 ve 13 Ağustos 2009 tarihlerinde, 2.1 m'lik Otto Struve Teleskobu'na bağlı Sandiford Eşel Tayfçekeri (SES) kullanılarak gerçekleştirildi ve SW Lac'a ilişkin 60000 çözünürlüklü ve 5435 - 6620Å dalgaboyu aralığında toplam 20 adet tayf elde edildi. İlgili tarihlerde SW Lac'a ilişkin tayfların yanısıra ön indirgeme adımlarında kullanılacak olan Flat ve Bias görüntüleri, dalgaboyu kalibrasyonunda kullanılacak olan ThAr lamba tayfları, radyal hız standardı HD 144579 yıldızının tayfı, aktif olmadığı bilinen HR 7345, HR 8729 ve HR 7462 yıldızlarının tayfları ile tellürik çizgilerin tayflardan arındırılmasında kullanılan teknik gereği hızlı dönen B tayf türünden HR 7906 ve HR 8579 yıldızlarının tayfları da elde edildi.

McDonald Gözlemevi'nde elde edilen tayfların ön indirgemesi (Flat - Bias düzeltmesi), kozmik ışıklardan arındırılması, dalgaboyu kalibrasyonu ve normalizasyon işlemi IRAF<sup>5</sup> (Image Reduction and Analysis Facility) programı ve ek paketleri (GUIAPPS) kullanılarak gerçekleştirildi. Tayfların tellürik çizgilerden arındırılması işlemi ise yine IRAF programı ve Keystone Üniversitesi'nden Dr. Douglas O'Neal tarafından geliştirilen ve IDL<sup>6</sup> (Interactive Data Language) programlama diliyle yazılmış olan "normdry" kodu yardımıyla gerçekleştirildi.

## 1.3 En Küçük Kareler Dekonvolüsyonu - LSD

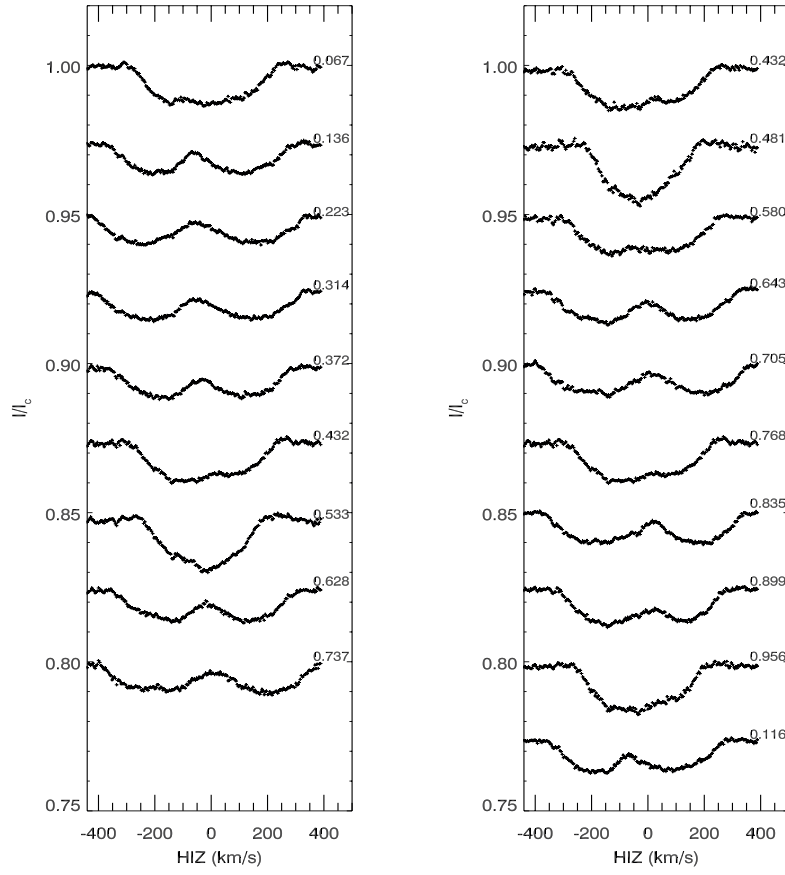
En küçük kareler dekonvolüsyonu (Least Squares Deconvolution - LSD) gelişmiş bir çapraz - korelasyon (cross - correlation) yöntemi olup binlerce tayf çizgisinden eş zamanlı olarak ortalama bir profil elde etmek amacıyla kullanılmaktadır. Dekonvolüsyon işlemi ile Doppler görüntüleme tekniğine uygun, oldukça yüksek S/N oranına sahip profiller elde edilebilmektedir. Teknik ilk kez Donati et al. (1997) tarafından uygulandı.

SW Lac 'ın farklı evre aralıklarında gözlenen yüksek çözünürlüklü tayflarından yüksek S/N oranına sahip hız profilleri elde etmek amacıyla, Donati et al. (1997) tarafından yazılan LSD kodu kullanıldı. Analizler esnasında ortalama 325 fotosferik çizgi kullanıldı. Sistemin McDonald Gözlemevi'nde elde edilen yüksek çözünürlüklü tayflarının S/N oranı 44.84 - 107.23 arasında değişmekte iken ilgili tayfsal veriler kullanılarak elde edilen LSD profillerinin S/N oranları 700 - 900 arasında değişmektedir. Dolayısıyla bu değerler ile sisteme ilişkin elde edilen tayfsal veriler Doppler görüntüleme Tekniği için uygun hale getirilmiş oldu. Sistemin 10 ve 13 Ağustos gözlemsel verileri kullanılarak elde edilen hız

<sup>5</sup> <http://iraf.noao.edu>

<sup>6</sup> <http://www.itvis.com/ProductServices/IDL.aspx>

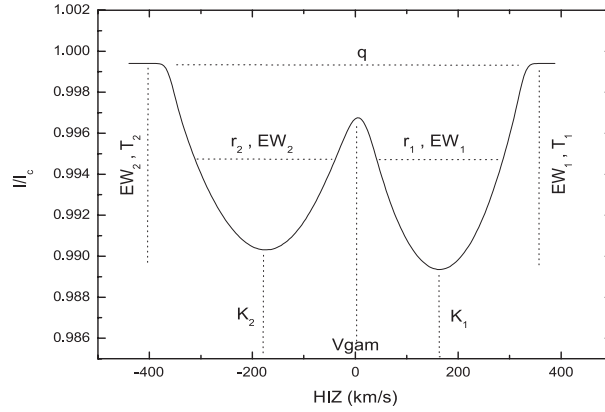
profilleri Şekil 1’de verildi. Şekilde verilen her iki güne ilişkin profillerde, özellikle 0.6 – 0.8 evreleri civarında 2. bileşen üzerindeki leke kaynaklı hörgüç yapıları görülebilmektedir. Buna ek olarak bu hörgüç yapıların değişen evre ile yıldız üzerindeki hareketi de yine ilgili şekilde kolaylıkla görülebilmektedir. Buna ek olarak 1. bileşen üzerindeki hörgüç yapısı da özellikle 0.136 ve 0.899 evrelerinde net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 1. 10 ve 13 Ağustos gözlemleri kullanılarak elde edilen LSD profilleri

## 2 Sistem Parametreleri, Yüzey Parlaklık Dağılımı Haritaları ve Sonuç

McDonald Gözlemevi'nden alınan tayflardan elde edilen hız profilleri, ayrıntıları Collier Cameron (1992) ve Barnes et al. (2004) tarafından yapılan çalışmalarda verilen DoTS kodu ile modellenerek SW Lac 'a ilişkin yüzey parlaklık dağılımı haritaları elde edildi. Doppler görüntüleme tekniği ile bir yakın çift yıldızın yüzey parlaklık dağılımı haritalarını elde etmenin yanısıra sisteme ilişkin bazı fiziksel parametreler de belirlenebilmektedir. Bu, lekelerden kaynaklanan sistemik hataların da belirlenebilmesi bakımından önemli bir avantajdır. Tek yıldızlar için, özellikle yörüngesel ve geometrik özelliklerin tanımlanması açısından kullanılan parametrelerin azlığı, bu tür yıldızlarda modellemeyi çift yıldızlarınkine nazaran daha kolay kılmaktadır. Çift yıldızlarda ise sistemi fiziksel ve geometrik açıdan tarif eden parametrelerin fazlalığı ve birbirlerinden olan bağımsızlığı, modelleme aşamasını zorlaştırmaktadır. Şekil 2'de örnek bir LSD profili ve bazı temel parametrelerin profil üzerindeki etkisi verildi.



Şekil 2. Örnek bir LSD profili ve bazı parametrelerin etkisi

SW Lac 'a ilişkin sistem parametrelerinin belirlenmesi esnasında ilk yaklaşım olarak sistemin yörünge parametreleri ( $q$ ,  $K1$ ,  $V_{gam}$ ) belirlendi. Bunun için Rucinski et al. (2005) tarafından ilgili parametreler için belirlenen değerler, başlangıç parametre seti olarak kullanıldı. Sistemin bir W-türü WUMa olması, büyük kütleli bileşenin 1. minimum esnasında gözlemciye daha yakın olması anlamına gelmektedir. Bu bağlamda, analizler esnasında,  $q$  kütle oranının 1'den büyük değeri kullanıldı. Analizler esnasında  $q$ ,  $K1$  ve  $\Omega$  parametreleri için 3-boyutlu parametre uzayında çözüm taraması gerçekleştirildi. Bir başka çözüm taraması, bu kez 2-boyutlu parametre uzayında olmak üzere, sırasıyla çizgi şiddetleri ( $EW_{1,2}$ ) ve etkin sıcaklık ( $T_{eff1,2}$ ) parametreleri için gerçekleştirildi.

Etkin sıcaklık parametreleri için 2-boyutlu parametre uzayında gerçekleştirilen çözüm taraması sonucunda en iyi çözümün elde edildiği sıcaklıklar 1. ve 2. bileşen için sırasıyla  $T_1 = 5390$  K ve  $T_2 = 5170$  K olarak hesaplandı. Sistemin  $i$  yörünge eğimi, bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen ışık eğrisi analizleri sonucu hesaplanan değer kullanıldı. Yansıma etkisi ( $A_{1,2}$ ) ve çekim kararma katsayıları ( $g_{1,2}$ ) için gerçekleştirilen çözüm taramasında, konvektif zarfa sahip yıldızlar için, başlangıç değerleri sırasıyla 0.5 (Rucinski 1969) ve 0.08 (Lucy 1967) olarak alındı. Lineer kenar kararma katsayıları ( $X_{1,2}$ ) bileşenlerin etkin sıcaklıklarına bağlı olarak PHOENIX model atmosferlerinden (Hauschildt & Baron 2005) alındı.

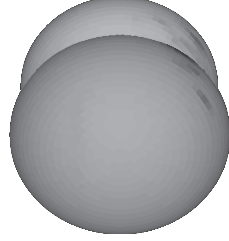
Parametrelerin hatalarının belirlenmesi ve en iyi model için global bir çözümün elde edilmesi amacıyla Downhill – Simplex (Amoeba) algoritmasına (Press et al. 1992) dayanan bir kod kullanıldı. Bu kod yardımıyla, SW Lac 'ın lekesiz bir fotosfer yaklaşımı altında, gözlemsel LSD profilleriyle en iyi uyumu sağlayan modeli oluşturan parametrelerin belirlenmesi aşaması sonuçlandırılmış oldu. Bu aşamadan sonra MEM (Maksimum Entropi Metodu) iterasyonları yardımıyla SW Lac 'ın yüzey parlaklık dağılımı haritaları DoTS kodu kullanılarak elde edildi. Çözüm sonucu elde edilen parametreler Tablo 1'de, kritik evrelerde çizilen yüzey parlaklık dağılımı haritaları ise Şekil 3'de verildi.

**Çizelge 1.** SW Lac'ın fiziksel parametrelerine ilişkin çözüm sonuçları ve hataları

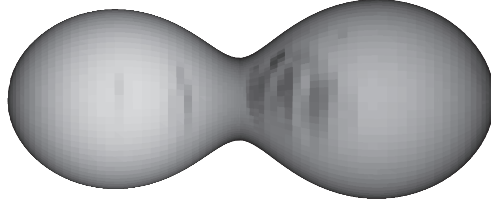
Parametre	Değer $\pm$ Hata
$q=M_2/M_1$	$1.280 \pm 0.007$
$K_1$ (km/s)	$220.227 \pm 1.207$
$K_2$ (km/s)	172.052
$V_{gam2}$ (km/s)	$-12.500 \pm 0.649$
$i$	$79.563 \pm 0.876$
değme oranı (f)	$1.341 \pm 0.004$
$T_0$	55043.26175
$P_{orb}$	0.3207209
$T_1$	5390
$T_2$	5170
kenar $k_{.1}$	0.09
kenar $k_{.2}$	0.06
albedo $_{1,2}$	0.3

Bu çalışmada SW Lac 'ın literatürdeki ilk yüzey parlaklık dağılımı haritaları, S/N seviyelerini arttıran En Küçük Kareler Dekonvolüsyon (Least Squares Deconvolution – LSD) Tekniği ve Doppler görüntüleme için kullanılan DoTS (Doppler Tomography of Stars) kodu yardımıyla elde edildi. Oluşturulan haritalar her iki bileşende de leke yapılarının varlığını açıkça göstermektedir. Buna ek olarak, analiz sonuçları SW Lac 'ın, 2. bileşen üzerindeki leke oranının 1. bileşene nazaran %2 mertebesinde daha fazla olan tipik bir W-türü W UMa olduğunu gösterdi. Sonuç olarak bu çalışma ile SW Lac'ın uzun dönemli ışık değişiminin manyetik aktivite kökenli olduğu belirlendi.

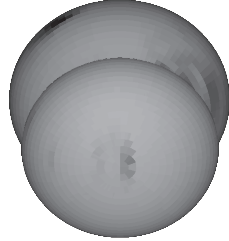
evre=0.00



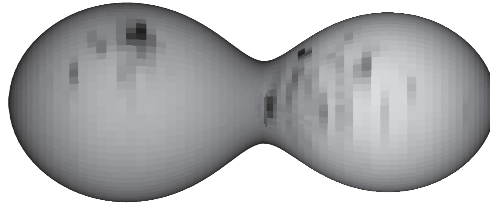
evre=0.25



evre=0.50



evre=0.75



**Şekil 3.** SW Lac 'ın 10 ve 13 Ağustos verileri toplamı kullanılarak elde edilen yüzey parlaklık dağılımı haritasının bazı kritik evrelerdeki gösterimi

## Kaynaklar

- Albayrak, B. and Djurašević, G., Erkapić, S., Tanrıverdi, T.: Modeling the changing spot features of SW Lacertae: A three year study. *A&A* **420** (2004) 1039–1045
- Barnes, J. R., Lister, T. A., Hilditch, R. W., Collier Cameron, A.: High-resolution Doppler images of the spotted contact binary AE Phe. *MNRAS* **348** (2004) 1321–1331
- Brownlee, R.R.: Photoelectric Observations of SW Lacertae. *ApJ* **125** (1957) 372–+
- Collier Cameron, A.: Modelling Stellar Photospheric Spots Using Spectroscopy (Invited). in *Surface Inhomogeneities on Late-Type Stars, Lecture Notes in Physics*, Berlin Springer Verlag ed. P. B. Byrne & D. J. Mullan **397** (1992) 33–+
- Cruddace, R. G., Dupree, A. K.: Contact binary stars. I - an X-ray survey. *ApJ* **277** (1984) 263–273
- Donati, J.-F., Semel, M., Carter, B. D., Rees, D. E., Collier Cameron, A.: Spectropolarimetric observations of active stars. *MNRAS* **291** (1997) 658–+
- Eaton, J.A.: Chromospheric emission of W Ursae Majoris-type stars and its relation to the structure of their common envelopes. *ApJ* **268** (1983) 800–806
- Gazeas, K. D., Baran, A., Niarchos, P., Zola, S., Kreiner, J. M., Ogloza, W., Rucinski, S. M., Zakrzewski, B., Siwak, M., Pigulski, A., Drozd, M.: Physical Parameters of Components in Close Binary Systems: IV. *ACTAA* **55** (2005) 123–140
- Hauschildt, P. and Baron, E.: Cool stellar atmospheres with PHOENIX. *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi* **7** (2005) 140–+
- Hendry, P. D., Mochnacki, S. W.: Detection of Tertiary Components in W Ursa Majoris Systems. *ApJ* **504** (1998) 978–+
- Jeong, J. H., Kang, Y. W., Lee, W. B., Sung, E. C.: Analysis of the IUE satellite and the ground-based observations of SW Lacertae. *ApJ* **421** (1994) 779–786
- Lucy, L. B.: Gravity-Darkening for Stars with Convective Envelopes. *ZAP* **65** (1967) 89–+
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., Flannery, B. P. in *Numerical recipes in C. The art of scientific computing*, Cambridge: University Press, —c1992, 2nd ed.
- Pribulla, T., Rucinski, S. M.: Contact Binaries with Additional Components. I. The Extant Data. *AJ* **131** (2006) 2986–3007
- Rucinski, S. M.: The Proximity Effects in Close Binary Systems. II. The Bolometric Reflection Effect for Stars with Deep Convective Envelopes. *ACTAA* **19** (1969) 245–+
- Rucinski, S. M., Brunt, C. C., Pringle, J. E., Vilhu, O.: IUE observations of two extremes among contact binaries - AW Ursae Majoris and SW Lacertae. *MNRAS* **208** (1984) 309–321
- Rucinski, S. M., Pych, W., Ogloza, W., DeBond, H., Thomson, J. R., Mochnacki S. W., Capobianco, C. C., Conidis, G., Rogoziecki, P.: Radial Velocity Studies of Close Binary Stars. X. *AJ* **130** (2005) 767–775
- Rucinski, S. M. and Pribulla, T. and van Kerkwijk, M. H.: Contact Binaries with Additional Components. III. A Search Using Adaptive Optics. *AJ* **134** (2007) 2353–2365
- Stępień, K., Schmitt, J. H. M. M., Voges, W.: ROSAT all-sky survey of W Ursae Majoris stars and the problem of supersaturation. *ApJ* **370** (2001) 157–169